

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УДК 504.064.36

DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_70

*А. Е. Колоденкова, С. С. Верещагина, Н. А. Тарутин***РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ГИБРИДНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ
ДЛЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ИДЕНТИФИКАЦИИ
НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДСТАНЦИИ ***

Аннотация. Железнодорожный транспорт потребляет более 7 % энергии, вырабатываемой электростанциями РФ, которая расходуется как на тягу поездов, так и на питание нетяговых потребителей (депо, станций, мастерских, а также районных потребителей). Таким образом, электрическая подстанция (ЭП) должна обеспечивать надежное электропитание различных устройств железнодорожного транспорта и электроснабжение всех потребителей железнодорожного транспорта. В связи с этим возникает потребность в своевременном выявлении неисправностей в работе ЭП для обеспечения бесперебойного питания, а также предупреждения аварийных ситуаций. В настоящей работе приведена обобщенная схема мониторинга и идентификации неисправностей ЭП с использованием гибридной нейронной сети (ГНС). Схема представлена в нотации IDEF0 с подробным описанием выполняемых функций. Рассмотрен алгоритм преобработки данных для проверки четких и нечетких значений выбранных параметров, влияющих на работу ЭП. Предложена структура ГНС, которая основана на работе сверточной нейронной сети, извлекающей признаки и шаблоны значений параметров, а также рекуррентной нейронной сети, обрабатывающей четкие входные данные. Разработанная ГНС позволит сократить время обработки входных данных, своевременно получить оценку технического состояния ЭП в условиях разнородных данных, а также провести мероприятия, направленные на предупреждение выхода подстанции из строя.

Ключевые слова: диагностические параметры, сверточная нейронная сеть, рекуррентная нейронная сеть, неисправности, электрическая подстанция.

Для цитирования: Колоденкова, А. Е. Разработка структуры гибридной нейронной сети для системы мониторинга и идентификации неисправностей электрической подстанции / А. Е. Колоденкова, С. С. Верещагина, Н. А. Тарутин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 70–79. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_70.

Введение

В силу большого роста как грузоперевозок, так и пассажироперевозок железнодорожным транспортом остается вопрос обеспечения бесперебойного электроснабжения тяги поездов и питания нетяговых потребителей, а также устройства регулирования движения поездов. При этом электроснабжение делят на внешние сети (электростанции, трансформаторные подстанции, линии электропередачи) и внутренние сети (тяговая сеть, линии электроснабжения устройств СЦБ и др.).

Поскольку электрические сети становятся все более сложными, необходимы предписывающие аналитические инструменты для обеспечения устойчивой передачи электроэнергии к конечному потребителю.

Результаты анализа отключения питания, срабатывания защитных устройств за 2020–2022 гг. на ЭП, питающей электрооборудование железной дороги, представлены на рис. 1.

Если рассматривать причины, то на погодные условия человек мало может повлиять, но на внешние сети и собственные он влияет напрямую. Если рассматривать внешние сети, то за передачу электроэнергии от внешней сети к собственным отвечает ЭП. Поэтому необходимо проводить мониторинг и контроль ЭП, а также выявлять причины, приводящие к отказу или выходу из строя, подбирать мероприятия, которые направлены на поддержание ее работоспособности. Для того чтобы оценить техническое состояние ЭП, необходимо проанализировать огромный объем входных данных, которые могут носить четкий и нечеткий характер.

* Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-00415.

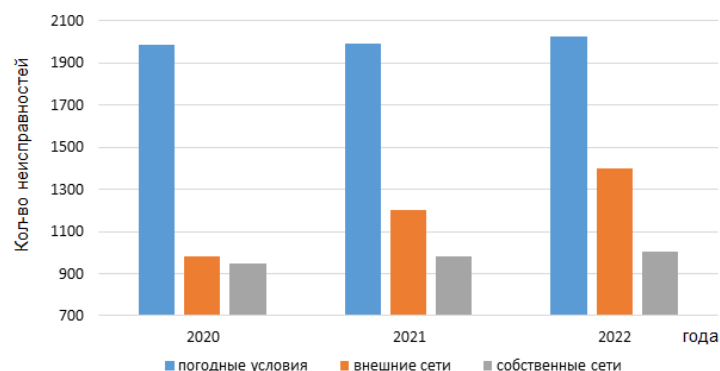


Рис. 1. Статистические данные причин отключения питания и срабатывания защитных устройств

В работе [1] для оценки надежности различных типов конфигураций шин с использованием расчета потока мощности Ньютона – Рафсона с минимальными наборами разрезов рассматриваются два типа режимов отказа, т. е. активный отказ и пассивный отказ. Кроме того, также учитываются работа защитных устройств и мощность устройств, поскольку они влияют на путь потока мощности на подстанции. Результаты оценки надежности всех типов конфигураций шин на электрических подстанциях сравниваются по следующим индексам: *LOLF*, *LOLP* и *EENS*.

В работе [2] рассматривается системный фактор воздействия *SIF* как дополнение к расширению предписывающих возможностей электрических подстанций с целью повышения надежности и устойчивости компонентов. В исследовании используется многокритериальный метод, который включает безопасность, защиту окружающей среды, надежность и устойчивость сети среди других факторов, таких как *SAIDI* и *SAIFI*, для определения фактического воздействия отказов для принятия более обоснованных решений.

В работе [3] рассматривается расчет электрических нагрузок, который является основой выбора пропускной способности всех элементов электрической сети. Предложены пути совершенствования расчета электрических нагрузок трансформаторных подстанций, которые позволят избежать перегрузок в сети и, как следствие, предотвратить выход ЭП из строя.

Несмотря на большое количество публикаций по данной теме, оценка технического состояния ЭП до сих пор является актуальной, так как в рассматриваемых подходах преимущественно учитываются только внутренние параметры.

Целью настоящей статьи является разработка подхода к оценке технического состояния ЭП с использованием гибридной нейронной сети.

1 Выбор диагностических параметров для системы мониторинга и неисправностей электрической подстанции

Для успешного диагностирования, оценки и прогнозирования состояния ЭП необходимо разрабатывать и внедрять эффективные модели и методы принятия решений, которые учитывают различные аспекты работы ЭП, такие как шкалы измерений, типы данных, структуры представления, масштабы и единицы измерения. Одна из первостепенных задач при оценке состояния ЭП – это выбрать наиболее подходящий и правильно описывающий набор диагностических параметров и факторов, которые характеризуют и оказывают влияние на работоспособность подстанции. Для того чтобы интегрировать исходные данные, необходимо определить параметры, которые характеризуют работоспособность подстанции как на прямую, так и косвенно, при этом необходимо учитывать не только внешнюю среду, но и внутреннюю [4–8].

Также отметим, что некоторые параметры могут быть оценены посредством визуального наблюдения, которое проводится в динамическом режиме (при работающем оборудовании) и в статическом режиме (при остановленном). Фрагмент таблицы с диагностическими параметрами и факторами приведен ниже.

Большинство параметров получено с помощью установленных на ЭП датчиков, в которые интегрированы технологии интернета вещей. Для получения остальных значений и параметров применяются математические расчеты либо информация от экспертов, полученная на основе знаний и опыта оперативного и дежурного персонала.

Диагностические параметры и факторы ЭП

Обозначение	Название ЛП, параметра, фактора	Нормируемые значения, ед. изм.	Метод измерения	Терм-множество
x_1	Номинальное U обмотки НН	0,4 кВ нормально допустимые/0,4 ± 10 % предельно допустимые	Измерительный прибор мультиметр	Предельно допустимые/ нормально допустимые
...
x_{15}	Отклонение напряжения фаз А, В, С	±5 % предпочтительный диапазон ±10 % предельный диапазон	Измерительные трансформаторы, токоизмерительные клещи	Предельно допустимые /нормально допустимые

Для измерения некоторых параметров допустимо использовать измерительные приборы (измерительные трансформаторы, мультиметры, прибор ПКЭ-А), если не хватает данных по диагностическим параметрам.

2 Разработка обобщённой схемы оценки технического состояния ЭП

Для мониторинга неисправностей ЭП была разработана обобщенная схема в нотации *IDEF0*, представленная на рис. 2.

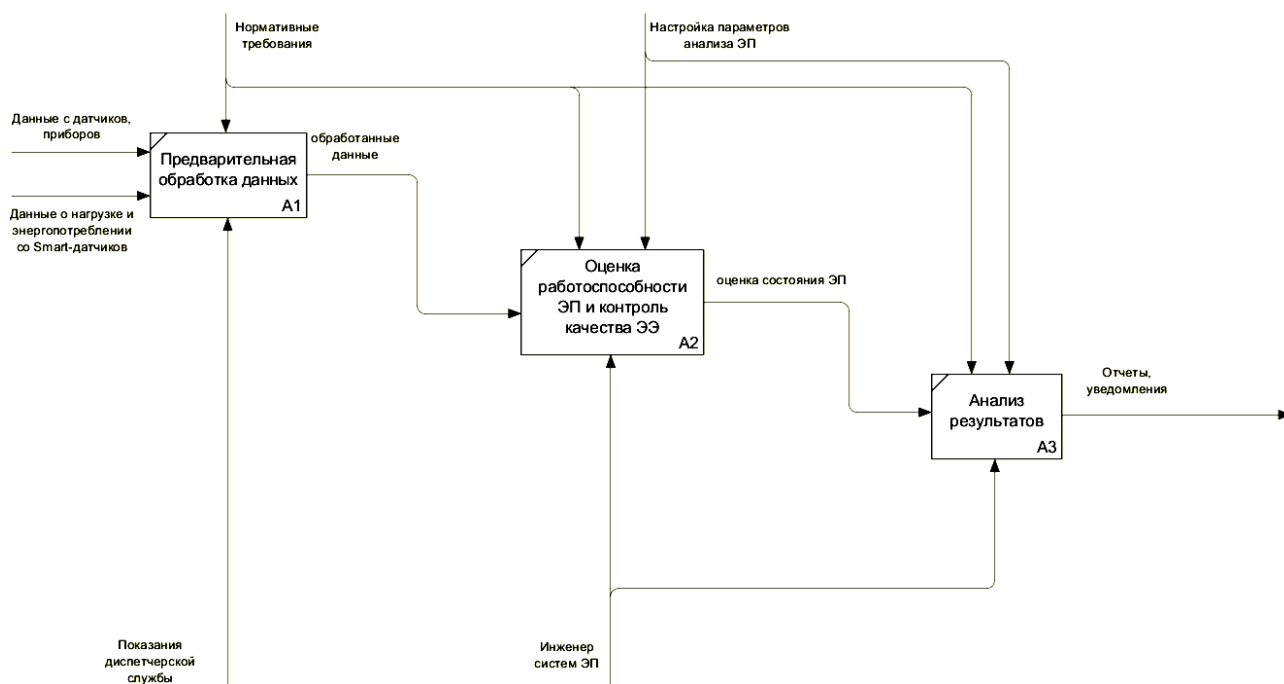


Рис. 2. Обобщенная схема мониторинга неисправностей подстанции в нотации *IDEF0*

Здесь функция A1 позволяет предварительно обработать данные, полученные с различных датчиков, отвечающих за температуру, мощность, ток, с приборов (показатели качества электроэнергии, значение напряжения, тока по фазам и т.д.), а также информацию о нагрузке со smart-счетчиков.

Для успешной интеграции данных для последующей их обработки, необходимо исходные данные предварительно обработать, что позволит выявить наличие шумов, загрязнений данных и т. д., для этого был разработан алгоритм проверки на соответствие, который представлен на рис. 3 [9–13] и состоит из семи шагов.

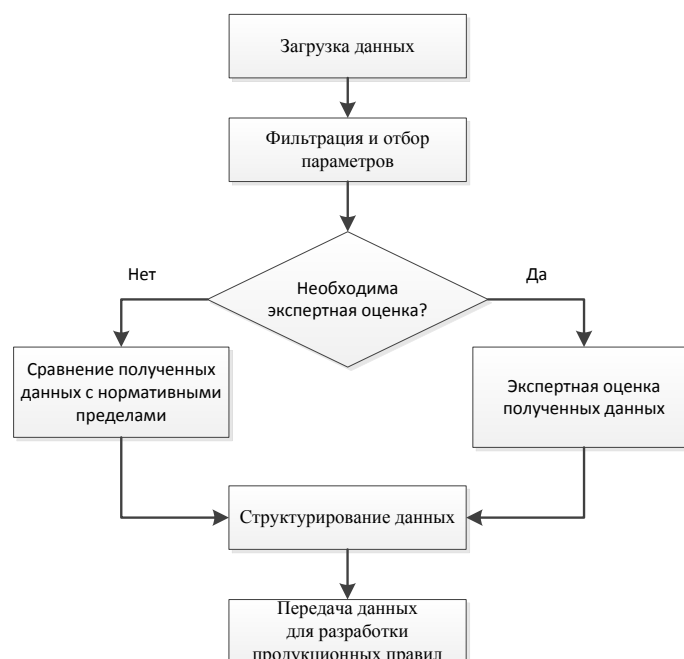


Рис. 3. Алгоритм предобработки данных

Шаг 1. Загрузка данных. Загружаются данные с датчиков, которые непрерывно собирают и накапливают данные диагностических параметров, а также с других приборов при их наличии.

Шаг 2. Фильтрация и отбор параметров. Используются алгоритмы фильтрации для подавления шумов и ненужной информации, а также происходит отбор основных параметров, по которым анализируются загруженные данные.

Шаг 3. Проверка условия: необходима экспертная оценка? Если да, то переход к шагу 5, иначе переход к шагу 4.

Шаг 4. Сравнение полученных данных с нормативными значениями. Проверка соответствия данных с нормативными документами, правилами и т.д. для определения, какому интервалу оно принадлежит (нормальному, предельному).

Шаг 5. Экспертная оценка полученных данных. Экспертная оценка необходима в том случае, если по выбранным или выбранному параметру необходимо с точки зрения эксперта оценить данные и их интерпретировать.

Экспертная оценка параметров необходима для более точного определения состояния электрической подстанции, учитывая то, что параметры взаимозависимы друг от друга, то необходимо дополнительно некоторым «чувствительным» параметрам давать экспертную оценку.

Шаг 6. Структурирование данных. Полученные данные по выбранным параметрам структурируются для последующего анализа.

Шаг 7. Передача данных для разработки продукционных правил.

Функция A2 отвечает за оценку рабочего состояния ЭП, учитывая данные анализа состояния ЭП. Так же здесь происходит контроль качества ЭЭ.

Для оценки работоспособности ЭП используется разработанная гибридная нейронная сеть, основанная на работе *1D-CNN* и *LSTM*, представленная на рис. 4 [14–20].

В качестве типа *CNN* предлагается использовать *1D-CNN*. В *1D-CNN* применяются одномерные фильтры, проходящие только лишь по одному измерению данных. Так как в предлагаемой ГНС *CNN* работает с пространственными данными, то в качестве измерения данных будет выступать время. Ключевыми компонентами *1D-CNN* являются сверточный и пулинговый слой. В сверточном слое применяются одномерные фильтры, проходящие по одному измерению данных. Пулинговый слой уменьшает размерность карт признаков.

Рекуррентную сеть предлагается использовать типа *LSTM*, которая разработана специально для устранения проблемы затухающего градиента, что препятствует обучению на длительных последовательностях. В контексте системы мониторинга и идентификации неисправностей электрической подстанции, предпочтительнее использовать сеть *LSTM*, так как она способна учитывать долгосрочные зависимости в данных, что позволяет модели запоминать важную информацию о нормальном, предельном и неработоспособном состоянии подстанции в течение некоторого периода. Помимо этого,

сеть *LSTM* способна моделировать сложные временные зависимости, что позволяет более точно предсказывать аномалии и обнаруживать неисправности. Это будет особенно полезно в случаях, когда причинами неисправностей могут быть скрытые явления, которые неочевидны без учета всей последовательности событий.

Как видно из структуры, в *CNN* и полносвязном слое применяется выпрямленная линейная функция активации (*ReLU*), которая представляет собой кусочно-линейную функция, которая выводит входные данные без изменений, если они положительные, и ноль, если входные данные отрицательные.

В *RNN* используется гиперболический тангенс в качестве функции активации, которая в отличие от сигмоида, который имеет диапазон от 0 до 1, *Tanh* преобразует входные данные в диапазон от -1 до 1. Это означает, что выходные данные *Tanh* центрированы вокруг нуля, что может улучшить эффективность обучения в некоторых случаях, так как это помогает избежать предвзятости в одну сторону в начальных этапах обучения.

В качестве метода оценки для *1D-CNN* используется *F1*-мера:

$$F1 = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}},$$

где $\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}$, TP – истинно положительные результаты, FP – ложно положительные результаты; $\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}$, FN – ложно отрицательные результаты.

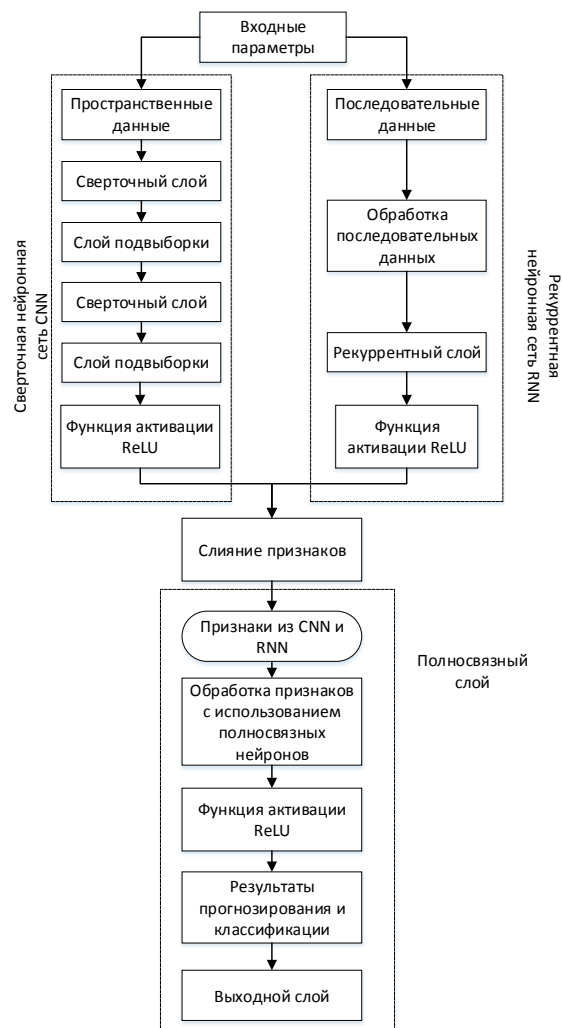


Рис. 4. Структура ГНС для разрабатываемой системы в виде блок-схемы

Для сети *LSTM* используется метод средней абсолютной ошибки, который измеряет среднюю величину ошибок без учета их направления, вычисляемую по формуле

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y_i^*|,$$

где y_i – истинные значения, y_i^* – прогнозируемые значения, n – количество прогнозов.

Чтобы оценить эффект прогнозирования *CNN-LSTM*, в качестве критериев оценки методов используют среднюю абсолютную ошибку (*MAE*). Это усредненная сумма модулей разницы между реальным и предсказанным значениями. Чем меньше значение *MAE*, тем качественнее модель. Так как стоит задача точного определения состояния электрической подстанции, то для решения данной задачи была выбрана средняя абсолютная ошибка.

Функция АЗ формирует отчеты о конечном состоянии ЭП, отправляет оператору уведомления о выявленных неисправностях и мероприятиях по их устранению.

Таким образом, представленная обобщенная схема охватывает все процессы, необходимые для оценки работоспособности ЭП.

3 Вычислительный эксперимент

Для мониторинга неисправностей ЭП было разработано программное обеспечение (ПО) с использованием языка программирования *Python*, а также встроенных библиотек, необходимых для полноценной работы программы. На рис. 5 показаны экранные формы входных данных.

Скриншоты экранной формы «Система мониторинга и неисправности электрической подстанции».

а – нормальные параметры:

- Текущие параметры подстанции: Ток: 155 А, Мощность: 7788 Вт, Нагрузка: 13 %
- Номинальное напряжение обмотки низкого напряжения: 0,4
- Номинальное напряжение обмотки высокого напряжения: 6
- Номинальный ток: 60
- Потери короткого замыкания: 11
- Потери холостого хода: 1
- Ток холостого хода: 0,6
- Номинальная частота: 50
- Сопротивление обмотки низкого напряжения: 0,1
- Сопротивление обмотки высокого напряжения: 10
- Коэффициент мощности: 0,85
- Напряжение короткого замыкания: 5,5
- Отклонение напряжения фаз: 0
- Коэффициент трансформации: 0
- Температура окружающей среды: 24
- Уровень напряжения импульсов грозового разряда: 11

б – предельные параметры:

- Текущие параметры подстанции: Ток: 183 А, Мощность: 7817 Вт, Нагрузка: 74 %
- Номинальное напряжение обмотки низкого напряжения: 0,4
- Номинальное напряжение обмотки высокого напряжения: 6
- Номинальный ток: 70
- Потери короткого замыкания: 20
- Потери холостого хода: 1
- Ток холостого хода: 0,64
- Номинальная частота: 52
- Сопротивление обмотки низкого напряжения: 0,14
- Сопротивление обмотки высокого напряжения: 10
- Коэффициент мощности: 0,85
- Напряжение короткого замыкания: 5,5
- Отклонение напряжения фаз: 0
- Коэффициент трансформации: 0
- Температура окружающей среды: 35
- Уровень напряжения импульсов грозового разряда: 11

Рис. 5. Параметры работы электрической подстанции: а – нормальные; б – предельные

На рис. 6 приведены экранные формы результатов обработки выбранных параметров по значениям при нажатии на кнопку «Анализ состояния подстанции». При обнаружении неисправности программа предлагает возможное решение (рис. 7).

а – в нормальном состоянии:

Результат

Подстанция находится в нормальном состоянии.

OK

б – в предельном состоянии:

Вопрос

Обнаружено ли превышение температуры на подстанции?

Да Нет

Рис. 6. Оповещение о нормальной работе электрической подстанции; а – в нормальном состоянии; б – в предельном состоянии

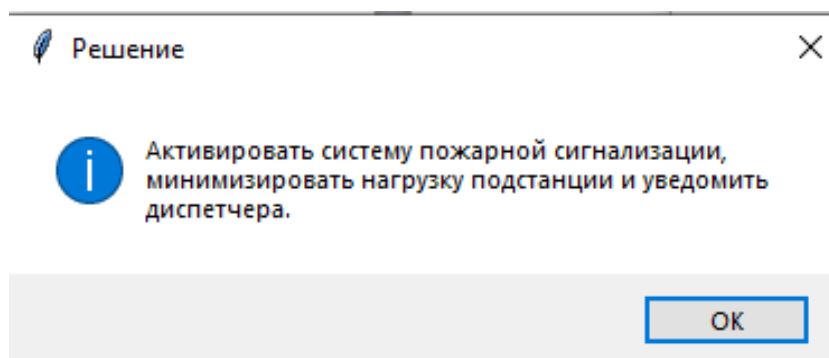


Рис. 7. Возможное решение неисправности

Разработанное ПО было протестировано на 50 различных вариантах нагрузок ЭП, которое показало сокращение времени для обработки данных в 1,5 раза.

Заключение

Представленная в статье система мониторинга неисправностей подстанции позволяет применять современные информационные технологии, регулярно в режиме онлайн-мониторинга следить за состоянием ЭП, а также в 1,5 раза сокращает время на обработку значений параметров и позволяет своевременно принимать научно обоснованные решения для предотвращения аварийных ситуаций на ЭП.

Список литературы

1 **Keawlumyai, N.** Reliability evaluation of electrical substations considering load growth / N. Keawlumyai, W. Witoontorn, S. Chaitusaney // 11th International Conference on Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). – 2014. – P. 1–6. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7207048> (дата обращения: 02.12.2024).

2 **Rodriguez, M.** Enhancing Prescriptive Capabilities in Electrical Substations: A Systemic Impact Factor Approach for Failure Impact Analysis / M. Rodriguez, A. Crespo Marquez, V. Gonzalez-Prida // Energies. – 2024. – Vol. 4. – P. 1–14. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/4/770> (дата обращения: 02.12.2024).

3 **Шабанов, В.** К вопросу об определении электрических нагрузок трансформаторных подстанций / В. Шабанов, А. Рахимбердина, И. Яникиев // Electrical and data processing facilities and systems. – 2022. – Vol. 1. – P. 114–122. – DOI 10.17122/1999-5458-2022-18-1-114-122.

4 **Щегловитова, Е. В.** Классификация трансформаторных подстанций / Е. В. Щегловитова, А. И. Зотова // Energy Systems. – 2024. – Vol. 1. – P. 122–127. – DOI 10.34031/ES.2024.1.016.

5 **Bustos-Brinez, O.** Application of data analysis techniques for characterization and estimation in electrical substations / O. Bustos-Brinez, A. Zambrano, J. Rosero Garcia // Frontiers in Energy Research. – 2024. – Vol. 12. – P. 1–19. – DOI 10.3389/fenrg.2024.1372347.

References

1 **Keawlumyai, N.** Reliability evaluation of electrical substations considering load growth / N. Keawlumyai, W. Witoontorn, S. Chaitusaney // 11th International Conference on Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). – 2014. – P. 1–6. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7207048> (date of access: 12/02/2024).

2 **Rodriguez, M.** Enhancing Prescriptive Capabilities in Electrical Substations: A Systemic Impact Factor Approach for Failure Impact Analysis / M. Rodriguez, A. Crespo Marquez, V. Gonzalez-Prida // Energies. – 2024. – Vol. 4. – P. 1–14. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/4/770> (date of access: 12/02/2024).

3 **Shabanov, V.** On the issue of determining the electrical loads of transformer substations / V. Shabanov, A. Rakhimberdina, I. Yanikiev // Electrical and data processing facilities and systems. – 2022. – Vol. 1. – P. 114–122. – DOI 10.17122/1999-5458-2022-18-1-114-122.

4 **Shcheglovitova, E.** Classification of transformer substations / E. Shcheglovitova, A. Zotova // Energy Systems. – 2024. – Vol. 1. – P. 122–127. – DOI 10.34031/ES.2024.1.016.

5 **Bustos-Brinez, O.** Application of data analysis techniques for characterization and estimation in electrical substations / O. Bustos-Brinez, A. Zambrano, J. Rosero Garcia // Frontiers in Energy Research. – 2024. – Vol. 12. – P. 1–19. – DOI 10.3389/fenrg.2024.1372347.

- 6 **Leiva Vilaplana, J.** Virtualized Protection, Automation, and Control in Electrical Substations : An Open-Source Dynamic Cost-Benefit Assessment Model / J. Leiva Vilaplana, N. Kabbara, T. Coste [et al.] // IEEE Access. – 2024. – P. 1–17. – DOI 10.1109/ACCESS.2024.3435972.
- 7 **ГОСТ 22782.0-81.** Электрооборудование взрывозащищенное. Общие технические требования и методы испытаний (с Изменениями N 1, 2, 3). – Москва : Издательство стандартов, 1984. – 28 с.
- 8 **ГОСТ 32144-2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 19 с.
- 9 **Wu, D.** The effects of data preprocessing on probability of default model fairness / D. Wu // World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences. – 2024. – Vol. 12. – P. 872–878. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2408.15452> (дата обращения: 02.12.2024).
- 10 **Almarshad, M.** Polysomnography Raw Data Extraction, Exploration, and Preprocessing / M. Almarshad, S. BaHammam, S. Islam, S. Al-Ahmadi, A. Bahammam // Springer/Nature. – 2024. – DOI 10.1007/978-3-031-68263-6_2.
- 11 **Кузнецов, А. Д.** Эффективная предобработка данных перед их анализом / А. Д. Кузнецов, М. Д. Порохня, В. В. Фиоктистова // Молодежные исследования сегодня : сборник статей VII Международной научно-практической конференции. – Петрозаводск : Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И. И.), 2024. – С. 120–126. – ISBN 978-5-00215-227-8.
- 12 **Тарасов, В. И.** Роль предобработки данных при прогнозировании временных рядов / В. И. Тарасов, М. О. Усманов, А. Д. Пономарев // Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных : Сборник статей II Всероссийской научной конференции : в 5 т. Т. 2. Москва, 27–28 апреля 2023 года. – Москва : КДУ, Добросвет, 2023. – С. 145–150. ISBN 978-5-7913-1352-2.
- 13 **Караткевич, М. С.** Исследование влияния способов предобработки данных на результаты обучения модели регрессии LightGBM / М. С. Караткевич // Устойчивое развитие общества : новые научные подходы и исследования : сборник материалов II Международной научно-практической конференции. – Москва : АЛЕФ, 2024. – С. 109–119. – ISBN 978-5-605-09446-3.
- 14 **Kolodenkova A.E.** Selection of Basic Parameters for the Diagnosis of Industrial Electrical Equipment
- 6 **Leiva Vilaplana, J.** Virtualized Protection, Automation, and Control in Electrical Substations : An Open-Source Dynamic Cost-Benefit Assessment Model / J. Leiva Vilaplana, N. Kabbara, T. Coste [et al.] // IEEE Access. – 2024. – P. 1–17. – DOI 10.1109/ACCESS.2024.3435972.
- 7 **GOST 22782.0-81.** Explosion-proof electrical equipment. General Engineering requirements and test methods (with Amendments No. 1, 2, 3). – Moscow : Publishing House of Standards, 1984. – 28 p.
- 8 **GOST 32144-2013.** Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Standards for the quality of electric energy in general-purpose power supply systems. – Moscow : Standartinform, 2014. – 19 p.
- 9 **Wu, D.** The effects of data preprocessing on probability of default model fairness / D. Wu // World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences. – 2024. – Vol. 12. – P. 872–878. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2408.15452> (date of access: 02.12.2024).
- 10 **Almarshad, M.** Polysomnography Raw Data Extraction, Exploration, and Preprocessing / M. Almarshad, S. BaHammam, S. Islam, S. Al-Ahmadi, A. Bahammam // Springer/Nature. – 2024. – DOI 10.1007/978-3-031-68263-6_2.
- 11 **Kuznetsov, A. D.** Effective preprocessing of data before their analysis / A. D. Kuznetsov, M. D. Porokhnya, V. V. Fioktistova // Youth research today : collection of articles of the VII International scientific and practical conference. – Petrozavodsk : International Center for Scientific Partnership "New Science" (IP Ivanovskaya I. I.), 2024. – P. 120–126. – ISBN 978-5-00215-227-8.
- 12 **Tarasov, V. I.** The role of data preprocessing in forecasting time series / V. I. Tarasov, M. O. Usmanov, A. D. Ponomarev // Artificial intelligence in automated control and data processing systems : Collection of articles of the II All-Russian scientific conference : in 5 volumes. Vol. 2, Moscow, April 27–28, 2023. – Moscow : KDU, Dobrosvet, 2023. – P. 145–150. – ISBN 978-5-7913-1352-2.
- 13 **Karatkevich, M. S.** Study of the influence of data preprocessing methods on the results of training the LightGBM regression model / M. S. Karatkevich // Sustainable development of society : new scientific approaches and research : collection of materials of the II International scientific and practical conference. – Moscow : ALEF, 2024. – P. 109–119. – ISBN 978-5-605-09446-3.
- 14 **Kolodenkova, A. E.** Selection of Basic Parameters for the Diagnosis of Industrial Electrical

Using Computer Technology / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina // Proceedings – 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022. – Sochi, 2022. – P. 982–986. – ISBN 978-1-6654-8370-4.

15 **Kolodenkova, A. E.** Development of a Unified Diagnostic Complex of Electrical Equipment for Intelligent Systems / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Сочи, 2023. – P. 209–213. – ISBN 979-8-3503-4556-8.

16 **Томин, Н. В.** Концепция построения интеллектуальной системы “искусственный диспетчер” для автоматической системы управления электрическими сетями на базе глубокого обучения с подкреплением / Н. В. Томин // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2020. – № 6. – С. 132–151. – DOI 10.31857/S0002338820050121.

17 **Кокшев, П. А.** Преимущества применения нейронной сети с архитектурой многослойного перцептрона для сетевого анализатора данных цифровой подстанции. Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем : материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции / П. А. Кокшев, Н. А. Галанина // Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова. – Чебоксары, 2021. – С. 127–129. – ISBN 978-5-7677-3286-9.

18 **Cheng, L.** Research on visualization monitoring technology of vulnerable high-voltage electrical equipment in substation based on BP artificial neural network / L. Cheng, X. Hu // Applied Mathematics and Nonlinear Sciences. – 2024. – Т. 9. – P. 1–23. – DOI 10.2478/amns-2024-1634.

19 **Kenessov, Y.** Construction of a recurrent neural network-based electrical load forecasting model for a 110 kV substation: a case study in the Western Region of The Republic of Kazakhstan / Y. Kenessov, K. Tokhtibakiev, A. Saukhimov [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – Vol. 2. – P. 6–15. – DOI 10.15587/1729-4061.2024.299192.

20 **Колоденкова, А. Е.** Подход к обнаружению неисправностей электрооборудования с использованием сверточных нейронных сетей / А. Е. Колоденкова, С. С. Верещагина // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы : сборник статей по материалам научной VII Всероссийской Поспеловской конференции. – Калининград, Санкт-Петербург : Русская христианская гуманитарная академия им. Ф. М. Достоевского, 2024. – С. 281–286. – ISBN 978-5-907855-25-0.

Equipment Using Computer Technology / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina // Proceedings – 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022. – Sochi, 2022. – P. 982–986. – ISBN 978-1-6654-8370-4.

15 **Kolodenkova, A. E.** Development of a Unified Diagnostic Complex of Electrical Equipment for Intelligent Systems / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Сочи, 2023. – P. 209–213. – ISBN 979-8-3503-4556-8.

16 **Tomin, N. V.** The concept of building an intelligent system “artificial dispatcher” for an automatic control system of electric networks based on deep reinforcement learning / N. V. Tomin // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems. – 2020. – No. 6. – P. 132–151. – DOI 10.31857/S0002338820050121.

17 **Kokshev, P. A.** Advantages of using a neural network with a multilayer perceptron architecture for a network data analyzer of a digital substation. Dynamics of nonlinear discrete electrical and electronic systems: Proceedings of the XIV All-Russian scientific and technical conference / P. A. Kokshev, N. A. Galanina // Chuvash State University named after I. N. Ulyanov. – Cheboksary, 2021. – P. 127–129. – ISBN 978-5-7677-3286-9.

18 **Cheng, L.** Research on visualization monitoring technology of vulnerable high-voltage electrical equipment in substation based on BP artificial neural network / L. Cheng, X. Hu // Applied Mathematics and Nonlinear Sciences. – 2024. – Т. 9. – P. 1–23. – DOI 10.2478/amns-2024-1634.

19 **Kenessov, Y.** Construction of a recurrent neural network-based electrical load forecasting model for a 110 kV substation: a case study in the Western Region of The Republic of Kazakhstan / Y. Kenessov, K. Tokhtibakiev, A. Saukhimov [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – Vol. 2. – P. 6–15. – DOI 10.15587/1729-4061.2024.299192.

20 **Kolodenkova, A. E.** An approach to detecting faults in electrical equipment using convolutional neural networks / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina // Hybrid and synergetic intelligent systems : a collection of articles based on the materials of the scientific VII All-Russian Pospelovskaya Conference. – Калининград, Saint Petersburg : Russian Christian Humanitarian Academy named after F. M. Dostoevsky, 2024. – P. 281–286. – ISBN 978-5-907855-25-0.

A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina, N. A. Tarutin

DEVELOPMENT OF A HYBRID NEURAL NETWORK STRUCTURE FOR THE SYSTEM OF MONITORING AND FAULT IDENTIFICATION OF ELECTRICAL SUBSTATION

Abstract. Railway transport consumes more than 7 % of the energy generated by power plants in the Russian Federation, which is spent both on train traction and on power supply for non-traction consumers (depots, stations, workshops, and district consumers). Thus, an electrical substation (ES) must ensure reliable power supply for various devices of railway transport and power supply of all consumers of railway transport. In this regard, there is a need for timely detection of faults in the ES operation to ensure uninterrupted power supply, as well as to prevent emergency situations. This paper presents a generalized scheme for monitoring and identifying faults of the electrical substation using a hybrid neural network (HNN). The scheme is presented in IDEF0 notation with a detailed description of the functions performed. The algorithm of data preprocessing for verification of crisp and fuzzy values of selected parameters affecting the ES operation is considered. The authors propose the HNN structure based on the operation of a convolutional neural network that derives signs and templates of parameter values, as well as a recurrent neural network that processes crisp input data. The developed HNN will reduce the time for processing input data, obtain timely assessment of the technical condition of the electrical substation under conditions of heterogeneous data, as well as to take measures aimed at preventing substation failure.

Keywords: diagnostic parameters, convolutional neural network, recurrent neural network, faults, electrical substation.

For citation: Kolodenkova, A. E. Development of a hybrid neural network structure for the system of monitoring and fault identification of electrical substation / A. E. Kolodenkova, S. S. Vereshchagina, N. A. Tarutin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 4. – P. 70–79. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_70.

Сведения об авторах

Колоденкова Анна Евгеньевна

Самарский государственный технический университет (СамГТУ),
кафедра «Информатика и вычислительная техника»,
доктор технических наук, доцент,
профессор,
e-mail: anna82_42@mail.ru

Верещагина Светлана Сергеевна

Самарский государственный технический университет (СамГТУ),
кафедра «Информатика и вычислительная техника»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: werechaginass@mail.ru

Тарутин Никита Алексеевич

Самарский государственный технический университет (СамГТУ)
кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий»
аспирант,
e-mail: nikitartutin@mail.ru

Information about the authors

Kolodenkova Anna Evgenievna

Samara State Engineering University,
Chair «Computer Science and Engineering»,
Doctor of Engineering Sciences,
Associated Professor, Professor,
e-mail: anna82_42@mail.ru

Vereshchagina Svetlana Sergeevna

Samara State Engineering University,
Chair «Computer Science and Engineering»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: werechaginass@mail.ru

Tarutin Nikita Alekseevich

Samara State Engineering University,
Chair «Power Supply for Industrial Enterprises»,
Postgraduate Student,
e-mail: nikitartutin@mail.ru