

Вензелев Р.В., Баранова М.П., Вензелева О.О. Прогнозирование состояния плоскостных контактных соединений шин с применением моделей машинного обучения

.....
**Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»**
=====

УДК 621.316.1.13

**Прогнозирование состояния плоскостных контактных соединений шин с
применением моделей машинного обучения**

Вензелев Р.В., Баранова М.П., Вензелева О.О.

Красноярский государственный аграрный университет

Аннотация

В статье рассмотрена проблема прогнозирования технического состояния плоскостных контактных соединений шин в электроустановках. Исследованы методы моделирования, включая полиномиальную регрессию и авторегрессию, для оценки и прогнозирования состояния контактов. Проведен анализ результатов работы моделей и выполнена оценка их эффективности на различных наборах данных. Разработана программа прогнозирования состояния контактов и выполнена ее интеграция в программное обеспечение для мониторинга контактов шин. Результаты работы показывают перспективность создания систем мониторинга с использованием моделей прогнозирования для обеспечения надежности и эффективности работы электрооборудования.

Ключевые слова: МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ, ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ, ЭЛЕКТРОУСТАНОВКА, КОНТАКТНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Введение

Сельское хозяйство остаётся одной из важнейших отраслей экономики, определяющей продовольственную безопасность и социально-экономическое развитие страны. Основными задачами электроснабжения сельского хозяйства является обеспечение требуемого качества, надежности и экономичности электроэнергии. Уникальные особенности сельских электрических сетей, в том числе рассредоточение на

значительной территории и неравномерные нагрузки, выделяют их среди других видов энергетических систем.

Известно, что актуальность задачи обеспечения надежного электроснабжения очень высока, особенно для сельскохозяйственных предприятий промышленного типа, в первую очередь животноводческих комплексов [1]. Из-за высокого удельного ущерба, вызванного перерывами в электроснабжении, одним из ключевых аспектов современного развития агропромышленного комплекса является обеспечение эффективного и бесперебойного электроснабжения. В связи с этим возникает необходимость оценки технического состояния электроустановок в реальном времени при непрерывной эксплуатации под рабочим напряжением. Также важно иметь возможность прогнозировать техническое состояние электроустановок и их компонентов, что позволит оперативно реагировать на потенциальные проблемы и снижать риски появления аварийных ситуаций в ходе эксплуатации.

Исследование технического состояния электроустановок тесно связано с развитием методов удаленного контроля и технических средств для его реализации. Ранние исследования показали, что существует возможность применения акустической эмиссии и машинного обучения в ходе определения текущего технического состояния неразмыкаемых плоскостных контактных соединений шин в комплектных распределительных устройствах 0,4 – 35 кВ (далее - РУ) [2-4]. Предложенный способ оценки текущего технического состояния плоскостных контактных соединений шин использует современные методы анализа данных и машинного обучения для обеспечения более эффективного контроля состояния оборудования и имеет значимое практическое значение, позволяя выявлять неполадки в контактных соединениях распределительных устройств и планировать мероприятия по ремонту до возникновения отказов.

Перспективность внедрения методов машинного обучения для прогнозирования технического состояния как электроустановки, так и отдельных ее компонентов и узлов, заключается в возможности использования полученных данных об оценке технического состояния плоскостных контактных соединений шин для прогнозирования технического состояния оборудования.

Цель и задачи

Цель работы состояла в возможности прогнозирования технического состояния плоскостного контактного соединения шин на базе данных о состоянии этого контакта.

В ходе работы для достижения поставленной цели были определены **следующие задачи:**

1. Выполнить подбор моделей машинного обучения для прогнозирования технического состояния контакта;
2. Провести сравнительный анализ эффективности работы моделей на наборе данных о состояниях контактного соединения;
3. Предложить способ интеграции наиболее эффективной модели в программном обеспечении ЭВМ для прогноза состояния контактного соединения.

Подбор модели

Вводными данными для обработки в модели машинного обучения являются значения состояния контактного соединения, представленные соответствующей нейросетевой моделью, выполняющей обработку ультразвукового сигнала и температуры контакта [3]. Результатом работы нейросетевой модели являются значения состояния контактного соединения, которые варьировались в единицах от 1 до 2,5. Все значения величиной до 1,5 соответствовали нормальному состоянию контакта, значения от 1,5 до 2,5 соответствовали ухудшенному состоянию контакта, при котором требуется запланировать ревизию, и значения более 2,5 соответствовали аварийному состоянию контакта, при котором требуется отключение нагрузки или вывод из работы присоединения для предотвращения аварии.

Известно, что неразмыкаемые контактные соединения плоских шин подвержены деградации в процессе эксплуатации. Даже в условиях нормальной эксплуатации через год – полтора после сборки у большинства алюминиевых контактов наблюдается 3–5 кратный рост сопротивления, который приводит к повышенному нагреву и потерям электроэнергии [5].

Учитывая особенности эксплуатации неразмыкаемых контактных соединений, можно предположить, что изменения их технического состояния соответствует линейной

или экспоненциальной динамике. Для мониторинга этих изменений был выбран интервал измерений продолжительностью в 24 часа, что обеспечивает возможность отслеживания ежедневных колебаний состояния соединений

Для выбора модели машинного обучения были определены четыре основных критерия:

1. Простота модели;
2. Работа модели при наличии малого набора входных данных;
3. Интерпретируемость результатов;
4. Выявление тренда к возрастанию значения состояния контактного соединения на анализируем наборе данных.

Для прогнозирования технического состояния контактного соединения с учетом динамики во времени и ограниченного объема данных, были рассмотрены различные методы моделирования. Исходя из необходимости работы модели с применением малого объема данных и отсутствия на текущем этапе работы реальной базы значений уровней развития дефекта в контакте, на которой возможно выполнить обучение, использование нейронных моделей является неэффективным. Это обусловлено тем, что нейронные сети требуют большого количества данных для обучения, чтобы адекватно отражать сложные нелинейные зависимости и обеспечивать высокую точность прогнозирования. В условиях ограниченного набора данных, нейронные сети могут столкнуться с проблемой переобучения, когда модель слишком точно подгоняется под имеющиеся данные и теряет способность к обобщению, что снижает её способность к прогнозированию на новых данных. Формирование адекватных моделей в нейросетевом базисе возможно при накоплении значительной базы реальных данных об изменении состояния контактов с течением времени, поэтому эффективное использование нейросетевых моделей требует дополнительных исследований и сбора результатов измерений, выполненных на большом количестве контактных соединений.

Для реализации возможности прогнозирования состояния контактов шин комплектного распределительного устройства, особенно в случае ограниченного объема данных и необходимости сохранения простоты модели, предпочтительными являются

простые статистические методы, такие как полиномиальная регрессия и авторегрессия. Эти методы позволяют достичь приемлемого уровня точности прогнозирования, даже при малом объеме анализируемых данных, и способны обеспечить надежные результаты без больших объемов обучающих данных. Также эти модели полезны в ситуациях, когда аналитик знает, что криволинейные эффекты присутствуют в истинной функции ответа, например, при изменении технического состояния контактного соединения [6].

К основным отличиям моделей полиномиальной регрессии и авторегрессии, можно отнести следующее:

1. Полиномиальная модель не предполагает привязки к последовательным временным интервалам и не учитывает временные зависимости между данными. Она фокусируется на аппроксимации кривой, которая наилучшим образом подходит для существующих данных. С другой стороны, модель авторегрессии учитывает временные зависимости между значениями, так как она основывается на предыдущих значениях временного ряда.

2. Модель авторегрессии более подходит для прогнозирования временных рядов, так как она учитывает динамику изменения данных с течением времени. В то время как полиномиальная модель может быть более универсальной и подходит для моделирования сложных нелинейных зависимостей в данных.

3. Полиномиальная модель может быть более чувствительной к выбросам в данных из-за ее подгонки кривой. При этом модель авторегрессии может быть более стабильной, так как она основывается на предыдущих значениях временного ряда и может игнорировать отдельные аномалии.

Применение моделей

Для анализа и прогнозирования технического состояния контактных соединений шин использовалась интегрированная среда Matlab. Этот инструментарий предоставляет обширные возможности для обработки данных, применения линейной алгебры, статистического анализа и оптимизации.

В отсутствие реальных эксплуатационных данных об изменении состояния контактных соединений с течением времени для сравнения моделей полиномиальной и авторегрессионной регрессии были использованы искусственно сгенерированные

значения. Эти значения отражают как неизменное техническое состояние контактов, так и их ухудшение, которое моделируется с помощью геометрической прогрессии для имитации развития дефектов.

Для повышения точности прогнозов и минимизации влияния устаревших данных, которые могут значительно отличаться от текущего состояния контакта, были использованы аналитические окна в пять и десять циклов измерений. Такой подход позволяет выбрать наилучший размер аналитического окна, при котором модель машинного обучения наиболее точно отслеживает начало деградации контактов и уменьшает влияние нерелевантных данных, относящихся к периоду стабильных значений состояния контакта.

Пример работы моделей и результаты прогнозирования методами полиномиальной регрессии первой степени и авторегрессии первого порядка представлены на рис. 1–4.

Таким образом, проведен ряд модельных экспериментов с применением полиномиальной регрессии до третьей степени и авторегрессии до третьего порядка, который продемонстрировал, что модели высших порядков способны обеспечивать высокую точность прогнозирования за счет более детального учета зависимостей в данных. Однако с увеличением степени и порядка модели также возрастает риск переобучения, когда модель слишком точно описывает обучающий набор данных, теряя при этом способность к обобщению и прогнозированию.

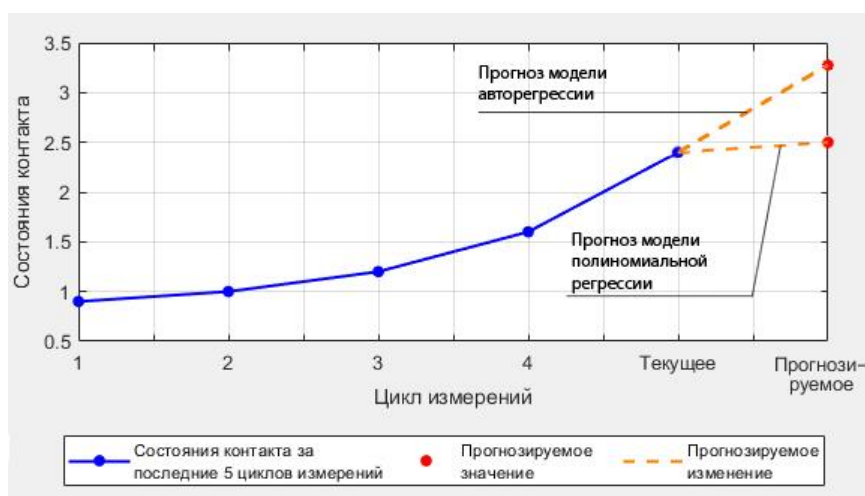


Рис. 1. Прогноз состояния контактного соединения на основе 5 известных значений при ухудшении состоянии контакта

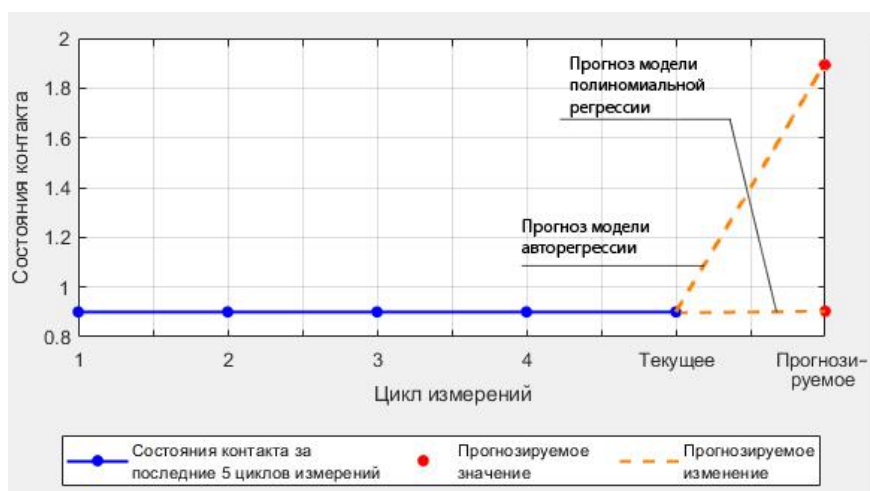


Рис. 2. Прогноз состояния контактного соединения на основе 5 известных значений при нормальном состоянии контакта



Рис. 3. Прогноз состояния контактного соединения на основе 10 известных значений при ухудшении состояния контакта

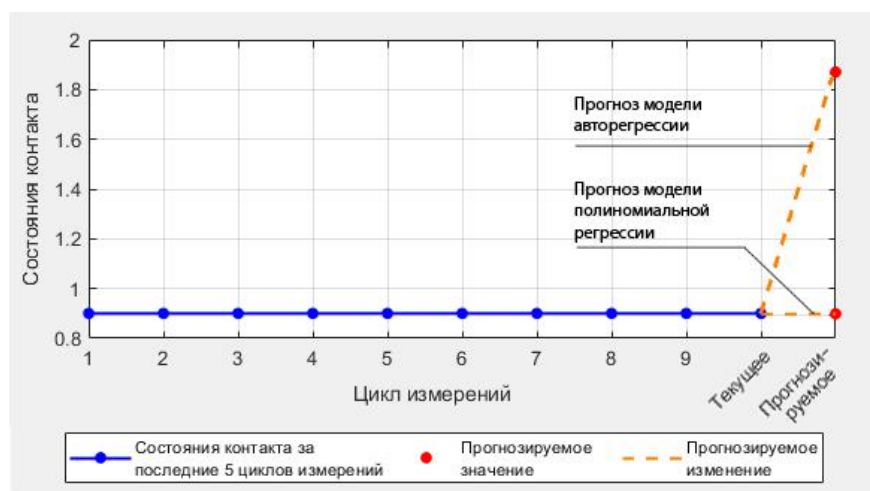


Рис. 4. Прогноз состояния контактного соединения на основе 10 известных значений при нормальном состоянии контакта

Стоит отметить, что результатом работы модели авторегрессии третьего порядка на наборе из пяти значений являлась ошибка. Это связано с тем, что авторегрессия третьего порядка требует больше данных для обучения, чем авторегрессия первого или второго порядка. Если количество доступных данных недостаточно для адекватной оценки параметров модели, то работа модели может привести к некорректным результатам и ошибкам.

Результаты прогнозирования значений представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты прогноза состояния контакта

Модель	Целевое значение состояния контакта	10 стабильных значений состояния контакта	5 стабильных значений состояния контакта	Целевое значение состояния контакта	10 значений с ростом развития дефекта	5 значений с ростом развития дефекта
Полиномиальная регрессия первой степени	0,9	0,9	0,9	4	1,8333	2,5
Полиномиальная регрессия второй степени	0,9	0,9	0,9	4	2,65	3,3
Полиномиальная регрессия третьей степени	0,9	0,9	0,9	4	3,31	3,72
Авторегрессия первого порядка	0,9	1,9	1,9	4	3,31	3,28
Авторегрессия второго порядка	0,9	1,45	1,45	4	5,85	6,22
Авторегрессия третьего порядка	0,9	1,3	-	4	9,03	-

Для сравнения двух модели прогноза состояния кантатного соединения выполнен расчет среднеквадратической ошибки (MSE) и средней абсолютной ошибки (MAE) моделей.

Средняя абсолютная ошибка для прогнозных значений определялась следующим образом [7]:

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

среднеквадратическая ошибка имела вид:

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

Для рассматриваемых моделей прогнозирования технического состояния контактного соединения p_i – фактические значения (целевые), q_i – прогнозируемые значения. Данные, полученные при расчете ошибок моделей, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчета ошибки моделей

Модель	10 стабильных значений состояния контакта		5 стабильных значений состояния контакта		10 значений с ростом развития дефекта		5 значений с ростом развития дефекта	
	MSE	MAE	MSE	MAE	MSE	MAE	MSE	MAE
Полиномиальная регрессия первой степени	0	0	0	0	1,472	2,166	1,224	1,5
Полиномиальная регрессия второй степени	0	0	0	0	1,349	1,35	0,7	0,7
Полиномиальная регрессия третьей степени	0	0	0	0	0,689	0,69	0,279	0,28
Авторегрессия первого порядка	1	1	1	1	0,689	0,69	0,279	0,28
Авторегрессия второго порядка	0,449	0,55	0,449	0,55	1,849	1,85	2,21	2,22
Авторегрессия третьего порядка	0,4	0,4	-	-	5,029	5,03	-	-

Данные таблиц 1 и 2, позволяют прийти к заключению, что модели полиномиальной регрессии при стабильных значениях состояния контакта идеально прогнозируют ожидаемый результат. Это обусловлено тем, что известные значения не имеют дисперсии и регрессия легко подстраивается под данные, успешно выполняя прогноз.

Однако авторегрессия, вне зависимости от количества принятых для обработки стабильных значений, показывает резкое возрастание прогнозного значения, что может вызвать ложные предупредительные сигналы при реализации модели в реальном процессе эксплуатации.

При анализе прогнозных значений на основе данных, характеризующих развитие дефекта в контактном соединении, отмечается, что полиномиальная регрессия третьей степени наилучшим образом приспособляется к этим данным и прогнозирует результат,

близкий к целевому значению. В то же время авторегрессия показывает аналогичные значения при модели первого порядка, но в условиях ее работы на стабильных данных применение этой модели не является целесообразным.

Таким образом, для снижения вероятности некорректной работы при анализе стабильных данных и прогнозировании тренда на возрастание дефекта наиболее рациональным является применение полиномиальной регрессии третьей степени.

Программа прогноза состояния контактного соединения для ЭВМ

Для реализации метода полиномиальной регрессии в прогнозировании технического состояния контакта необходимо выполнить интеграцию алгоритма прогнозирования в программное обеспечение для ЭВМ (ПО). ПО предназначено для повседневной работы на автоматизированном рабочем месте диспетчера, дежурного, начальника смены, мастера, инженера или другого сотрудника, обеспечивающего наблюдение за режимами работы и состоянием энергооборудования в зоне его ответственности. Реализация метода выполнена дополнительным блоком для программы мониторинга состояния контактов шин (рис. 5) [8].

В интерфейсе программы отображена однолинейная схема первичных соединений 1 и 2 секций шин 10 кВ подстанции. На схеме отображены только те соединения, на которых установлены элементы системы контроля плоскостных контактных соединений шин КРУ.

В основном блоке программы, данные о параметрах контакта поступают по беспроводному каналу связи от автономных устройств ультразвуковой эмиссии контактов, далее обрабатываются нейронной сетью [3] и записываются в отдельный для каждого контактного соединения файл, в котором сохраняется хронология измерений состояния контакта. Результат обработки измеренных значений для каждого из контактов отображается в интерфейсе программы в виде контрольных ламп, цвета которых соответствуют одной из степеней развития дефекта, а именно, зеленый цвет – дефект отсутствует, оранжевый цвет – ухудшенное состояние контакта, необходимо запланировать ремонт, красный цвет – аварийное состояние контакта, требуется вывод из работы соответствующего присоединения.

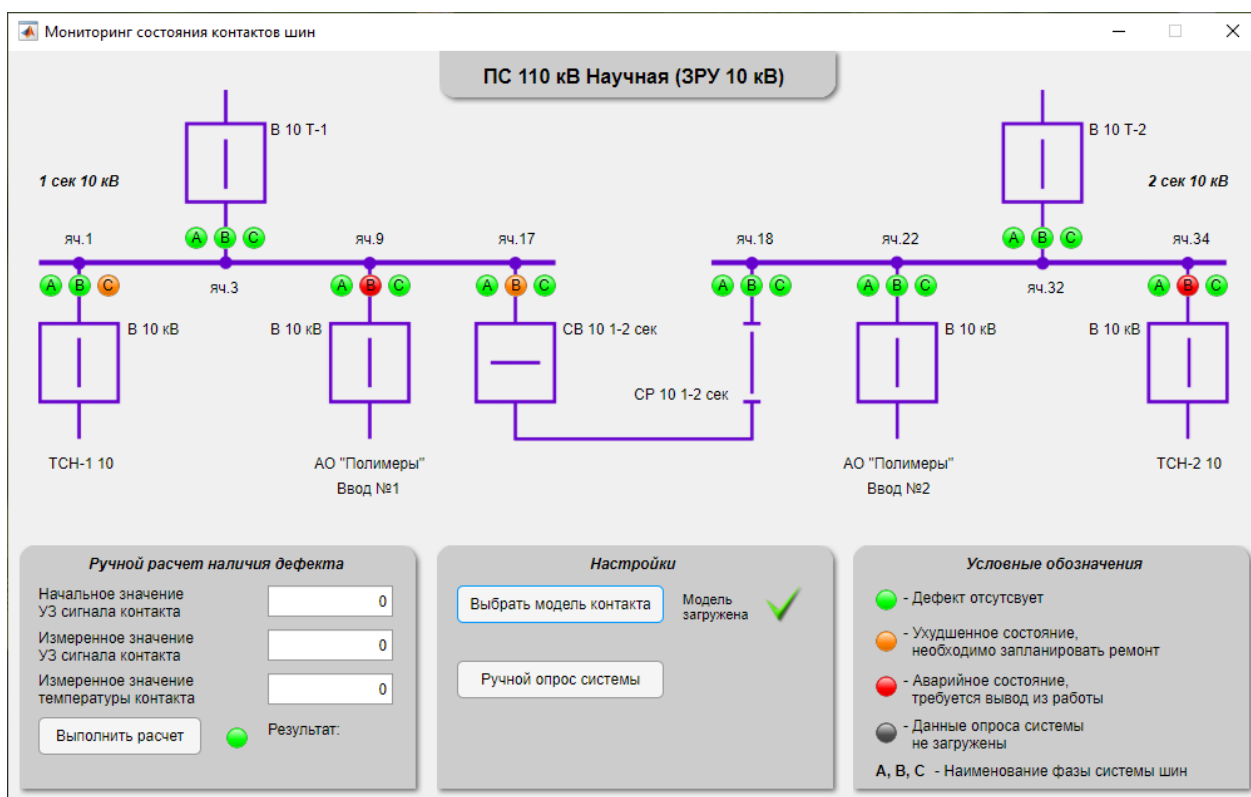


Рис. 5. Интерфейс основной программы мониторинга контактов шин

Предложенный дополнительный блок программы выполняет прогнозирование технического состояния контакта для следующего цикла измерений. Загрузка пяти последних значений степени развития дефекта для прогнозирования выполняется из файла с записанными в хронологическом порядке данных. В случае прогнозирования перехода состояния контакта на более высокую ступень, в основном интерфейсе программы на контрольной лампе соответствующего контакта появляется предупредительный сигнал «!». Также для ручной оценки прогноза предусмотрена визуализация прогнозного графика, который вызывается нажатием на контрольную лампу оцениваемого контакта курсором мыши в основном интерфейсе программы. Для примера, на рис. 6 показана визуализация графика прогноза для контакта шины фазы «В» в ячейке №3.

Реализация прогнозирования будущего значения технического состояния контакта выполнена с помощью функции `polyfit` в `Matlab`. Формирование кода выполнено отдельным блоком в основном коде программы мониторинга состояния контактов шин.

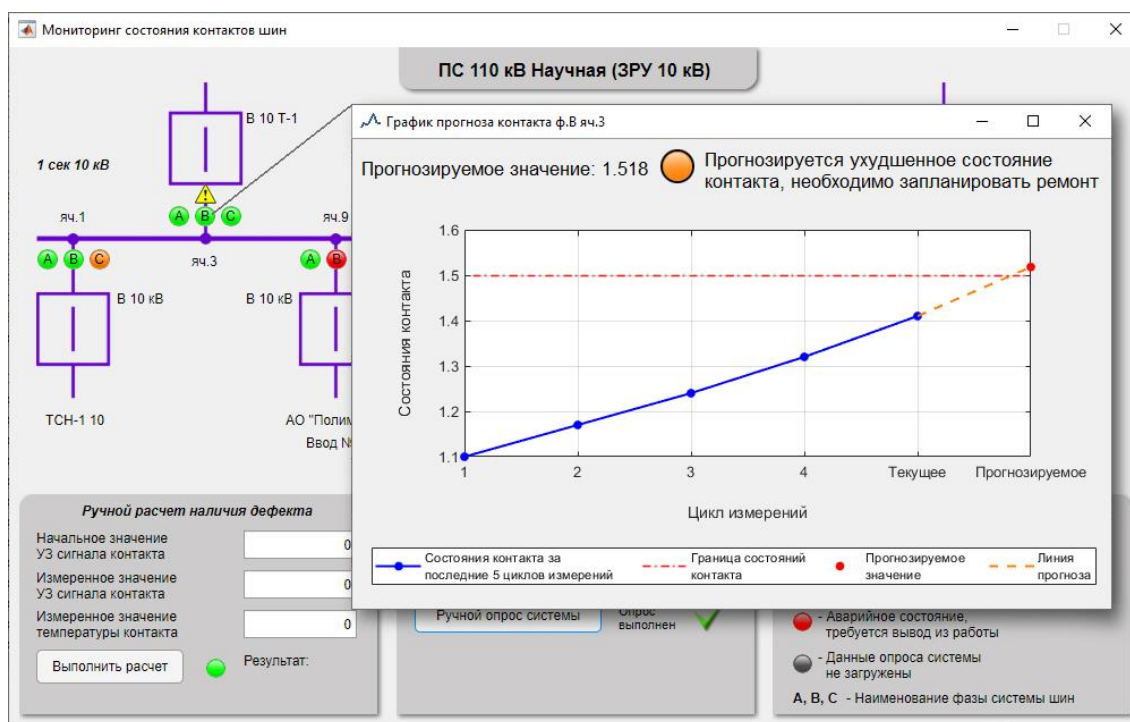


Рис. 6. Визуализация графика прогнозирования в программе мониторинга контактов шин

Заключение

Таким образом, в ходе работы решена задача подбора моделей. Определено, что для прогнозирования технического состояния на ограниченном наборе входных данных наиболее подходящими являются модели полиномиальной регрессии и временных рядов.

Выполнено сравнение работы моделей на наборе данных о состоянии контактного соединения. Показано, что наиболее стабильное прогнозирование значений выполняет полиномиальная регрессия третьей степени на наборе данных из пяти значений.

Предложен способ интеграции модели полиномиальной регрессии для прогнозирования состояния контакта в качестве одной из функций программного обеспечения ЭВМ, предназначенного для мониторинга состояния контактов шин, что обеспечивает оперативное реагирование на потенциальные изменения и поддержание надёжности электроустановок.

Важно отметить, что применение метода полиномиальной регрессии является неконечным вариантом реализации способа прогнозирования состояния контактов шин. При формировании обширной базы данных о состояниях контактных соединений возможно формирование более сложных моделей в нейросетевом базисе, которые способны более точно реализовать задачу прогнозирования [3].

В целом, результаты работы подчеркивают перспективность создания систем мониторинга, в том числе с применением моделей прогнозирования технического состояния элементов электрических сетей.

Список использованных источников:

1. Лещинская Т.Б. Электроснабжение сельского хозяйства / Т.Б. Лещинская, И.В. Наумов. – М.: КолосС, 2008. 655 с.
2. Вензелев Р.В., Баранова М.П. Диагностика неразмыкаемого поверхностного контактного соединения ультразвуковым сигналом / Журнал Сибирского Федерального университета. Техника и технологии. – Красноярск: БИК СФУ, 2023. – С. 278–286.
3. Вензелев Р.В., Рогалев А.Н., Баранова М.П. Применение нейронных сетей и методологии поверхностей отклика для прогноза показателей плоскостного электрического контакта шин / Научно-технический журнал «Энергия единой сети». – Москва: АО «НТЦ ФСК ЕЭС», 2024. – С. 20–29.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024619281 Российская Федерация. Определение уровня усиления сквозного ультразвукового сигнала пройденного через плоскостной электрический контакт: № 2024617779 : заявл. 09.04.2024: зарег. 22.04.2024 / Р. В. Вензелев, А. Ф. Семенов, М. П. Баранова; правообладатель Красноярский ГАУ. – 1 с.
5. Бойченко, В. И. Контактные соединения токоведущих шин / В. И. Бойченко, Н. Н. Дзекцер. – Л.: Энергия, Ленинградское отделение, 1978. 144 с.
6. Montgomery, D. C., Peck, E. A., Vining, G. G. Introduction to linear regression analysis / Douglas C. Montgomery, Elizabeth A. Peck, G. Geoffrey Vining. – 5th ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2012. – 672 p.
7. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS. – СПб. Питер: Изд. Группа BHV, 2004. – 848 с.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024619283 Российская Федерация. Мониторинг состояния контактов шин: № 2024617778: заявл. 09.04.2024: зарег. 22.04.2024 / Р. В. Вензелев; правообладатель Красноярский ГАУ. – 1 с.

Цитирование:

Вензелев Р.В., Баранова М.П., Вензелева О.О. Прогнозирование состояния плоскостных контактных соединений шин с применением моделей машинного обучения [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2024. – № 3. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/3/st_302.pdf
DOI: <https://doi.org/10.51419/202143302>.