**Прогнозирование эксплуатационных неисправностей ветрогенераторов**

**на основе эволюционных вычислений**

Данильченко В.И., Данильченко Е.В., Мавроматидис В.Ю.

(1) к.т.н., доцент каф. САПР им. В.М. Курейчика, ИКТИБ, ЮФУ

(2) ассистент каф. САПР им. В.М. Курейчика, ИКТИБ, ЮФУ

(3) студент каф. САПР им. В.М. Курейчика, ИКТИБ, ЮФУ

г. Таганрог

[vdanilchenko@sfedu.ru](mailto:vdanilchenko@sfedu.ru)

*В статье рассматривается применение эволюционных методов для прогнозирования эксплуатационных неисправностей ветрогенераторов с целью повышения их надежности и снижения риска отказов. Рассматриваются класс эволюционных методов и алгоритмов на их основе, которые показывают хорошие результаты при решении задач диагностики и предиктивного мониторинга. Такие методы позволяют учитывать множество факторов, влияющих на состояние оборудования, и повышают точность прогнозирования потенциальных неисправностей. В работе проведен анализ эффективности эволюционных подходов по сравнению с традиционными методами машинного обучения, что демонстрирует их преимущества в ряде сценариев. Результаты показывают, что использование этих алгоритмов помогает выявлять неисправности на ранних этапах, что способствует своевременному техническому обслуживанию и предотвращению поломок, снижая тем самым затраты на эксплуатацию и обслуживание ветрогенераторов.*

ВЕТРОГЕНЕРАТОРЫ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ, ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ, ПРЕДИКТИВНАЯ АНАЛИТИКА, ДИАГНОСТИКА, НАДЕЖНОСТЬ, ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

В настоящее время ветряная энергетика приобретает всё большее значение как один из наиболее перспективных источников возобновляемой энергии. Отметим, что с увеличением масштабов эксплуатации ветрогенераторов возникает необходимость в эффективных методах мониторинга и диагностики их технического состояния. Прогнозирование неисправностей ветрогенераторов становится критически важным для обеспечения их надежности и долговечности.

Современные подходы к диагностике часто основаны на традиционных методах, таких как анализ данных и статистические модели. Однако, такие методы могут не обеспечивать достаточную точность в условиях сложной динамики работы оборудования и влияния внешних факторов [1-3]. В этой связи эволюционные вычислительные методы демонстрируют значительный потенциал в решении задач прогнозирования. Такие методы основываются на принципах естественного отбора и коллективного поведения, что позволяет им эффективно адаптироваться к изменяющимся условиям и многопараметрическим задачам [2].

Ранее проводимые исследования показали, что применение биоинспирированных алгоритмов в сфере диагностики может существенно повысить точность прогнозов и сократить время на техническое обслуживание [3]. Данная статья направлена на исследование возможностей применения эволюционных методов для прогнозирования эксплуатационных неисправностей ветрогенераторов. Также проводится сравнительный анализ эффективности этих методов относительно традиционных подходов в области диагностики.

Генетические алгоритмы (ГА) представляют собой классы эвристических методов, основанных на механизмах естественного отбора и эволюции. Эти алгоритмы применяются для решения сложных оптимизационных задач, включая прогнозирование неисправностей ветрогенераторов. Основная идея ГА заключается в эволюции популяции потенциальных решений через операции, такие как мутация, кроссинговер и отбор.

Моделирование состояния ветрогенераторов. Состояние ветрогенераторов описывается набором параметров, представленным в виде вектора X:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

где ​ – целочисленное значение, отражающее уровень повреждений для *i* элемента (лопасти, трансмиссии и т.д.). Каждое значение ​ может принимать значения от 0 до 5, где: 0 – отсутствие повреждений, 1 – незначительные повреждения, 2 – умеренные повреждения, 3 – значительные повреждения, 4 – критические повреждения, 5 – серьезная неисправность [4].

Модуль прогнозирования представляет собой десктоп-приложение, интегрированное с базой данных, в которой хранится информация о состоянии ветрогенераторов. Данные собираются с помощью сенсоров, установленных на ветрогенераторах, и регулярно обновляются для обеспечения актуальности информации. База данных содержит следующие параметры: состояние лопастей, наличие механических повреждений, показатели работы генератора, данные о внешних условиях (ветровые нагрузки, температура и влажность) [4-6]. Каждый из этих параметров представлен целочисленными значениями, отражающими уровень повреждений и износа. Например, состояние лопастей может быть оценено по шкале от 0 до 5, где 0 указывает на идеальное состояние, а 5 – на критическую неисправность.

Основу приложения составляет генетический алгоритм, который использует данные из базы для формирования первоначальной популяции, дополняя их случайно сгенерированными значениями. Этот подход позволяет генерировать множество возможных сценариев состояния ветрогенератора и учитывать разнообразие вектора состояния [7].

Первоначальная популяция формируется из случайно сгенерированных векторов состояния . Размер популяции определяется параметром :

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

Каждый вектор состояния генерируется путем случайного выбора значений для каждого элемента:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

где ​ – весовой коэффициент, определяющий приоритет *i*-го элемента для общего состояния системы. Эти веса могут быть установлены на основе статистического анализа, экспертных оценок или в результате предварительного обучения модели [7].

Для каждого индивидуального решения в популяции вычисляется значение целевой функции , отражающее эффективность состояния ветрогенератора. В данном контексте целевая функция может быть определена как:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

где – весовой коэффициент, определяющий важность *i*-го элемента для общего состояния системы. Эти веса могут быть установлены на основе статистического анализа, экспертных оценок или в результате предварительного обучения модели.

После оценки целевой функции осуществляется отбор наиболее приспособленных индивидуумов. Наиболее распространенными методами отбора являются рулеточный и турнирный отбор. В случае турнирного отбора выбирается *k* случайных особей, и наилучший из них сохраняется:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

где ​ – набор из *k* случайно выбранных индивидуумов.

Для генерации новой популяции применяются операции кроссинговера и мутации. Кроссинговер осуществляется с использованием вероятности :

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

где – родительские векторы состояния. Операция мутации вносит случайные изменения в отдельные гены:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

где – нормальное распределение с нулевым средним и дисперсией .

После каждой итерации генетического алгоритма производится обновление базы данных, в которой фиксируются изменения состояния ветрогенераторов, а также результаты работы алгоритма [8]. Это позволяет не только отслеживать динамику состояния, но и использовать полученные данные для дальнейшего обучения модели и улучшения точности прогнозов.

Процесс повторяется на протяжении заданного числа поколений или до достижения условия останова, основанного на изменении значений целевой функции. Итоговое значение целевой функции интерпретируется как индикатор состояния ветрогенератора:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

где ​ – финальная популяция после итераций.

Целью эксперимента является оценка эффективности модуля прогнозирования неисправностей ветрогенераторов на основе генетических алгоритмов и сравнение результатов с традиционными методами диагностики. В качестве данных использовались параметры состояния ветрогенераторов, включая состояние лопастей (оценка от 0 до 5), наличие механических повреждений (да/нет), уровень вибраций, температуру двигателя и состояние электрооборудования (также от 0 до 5). Первоначальная популяция формировалась с использованием случайно сгенерированных значений, после чего применялись генетические операторы, такие как мутация, кроссинговер и турнирный отбор. Для оценки эффективности использовалась целевая функция, выражаемая формулой:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |

где ​ – состояние лопастей, – наличие механических повреждений, – уровень вибраций, – температура двигателя, а ​ – состояние электрооборудования. Процесс эволюции повторялся на протяжении 100 поколений. Результаты были оценены с помощью перекрестной проверки и сравнены с результатами традиционных методов диагностики, такими как регрессионный анализ и метод опорных векторов (*SVM*). В таблице 1 представлены результаты, полученные при использовании различных подходов к прогнозированию.

В ходе исследования был разработан модуль прогнозирования неисправностей ветрогенераторов на основе ГА, который продемонстрировал сопоставимые результаты, а в некоторых тестах показал преимущество по сравнению с традиционными методами, такими как регрессионный анализ и метод опорных векторов.

Таблица 1 – Результаты теста

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Метод** | **MAE** | **RMSE** | **R²** |
| Генетический алгоритм | 0.45 | 0.67 | 0.89 |
| Метод опорных векторов | 0.55 | 0.78 | 0.83 |
| Линейная регрессия | 0.60 | 0.82 | 0.79 |

Результаты эксперимента показали, что ГА обеспечивает более низкие значения MAE и RMSE, а также более высокий коэффициент детерминации (R²), что свидетельствует о его способности учитывать сложные взаимосвязи в данных. Это подчеркивает важность применения эволюционных методов для повышения надежности и экономичности эксплуатации ветряных электростанций. Разработанный модуль может эффективно использоваться для раннего выявления неисправностей и оптимизации процессов обслуживания.

**Поддержка.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 24-71-00035, https://rscf.ru/project/24-71-00035/ в Южном федеральном университете.

**Список литературы**

1. Данильченко, В. И. Метаэвристический метод оптимизации на основе модели поведения стволовых клеток / В. И. Данильченко, Е. В. Данильченко, В. М. Курейчик // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 2(226). – С. 14-20. – DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-14-20.
2. Интеллектуальные системы: модели и методы метаэвристической оптимизации: Монография / Л. А. Гладков, Ю. А. Кравченко, В. В. Курейчик, С. И. Родзин. – Чебоксары : ООО "Издательский дом "Среда", 2024. – 228 с. – ISBN 978-5-907830-56-1. – DOI 10.31483/a-10639)
3. Данильченко, В. И. Метаэвристика на основе поведения колонии белых кротов / В. И. Данильченко, Е. В. Данильченко, В. М. Курейчик // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 6(223). – С. 132-140. – DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-132-140
4. Danilchenko, V. I. Bionspired search in the transmission line design calculation problem when placing VLSI fragments / V. I. Danilchenko, Y. V. Danilchenko, V. M. Kureichik // Conference Proceedings - 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2021. – 2021. – P. 460-463. – DOI 10.1109/RSEMW52378.2021.9494119.
5. Гладков, Л. А. Эволюционирующие многоагентные системы и эволюционное проектирование / Л. А. Гладков, Н. В. Гладкова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 4(214). – С. 48-59. – DOI 10.18522/2311-3103-2020-4-48-59.
6. Гладков, Л.А. Генетические алгоритмы / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – М.: Физматлит, 2010. – 368 с..
7. Danilchenko, V. I. Genetic Algorithms in the Matrix Arrangement of Elements in Blocks on a Crystal Model / V. I. Danilchenko, Y. Vladimirovna Danilchenko, V. M. Kureichik // International Seminar on Electron Devices Design and Production, SED 2021. – 2021. – P. 9444496 (pp. 1-4). – DOI 10.1109/SED51197.2021.9444496.