

УДК 681.518

Двухкритериальная нечеткая система предиктивного обслуживания холодильных установок: анализ параметров работы в реальном времени, безопасности и экономической эффективности

Махмуд Рами

rami.mahmoud119900@gmail

Гаврюшин Сергей Сергеевич

gss@bmstu.ru

SPIN-код: 3142-3809

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В работе представлена двухкритериальная система предиктивного обслуживания чиллеров на основе нечеткой логики в среде LabVIEW с архитектурой из трех взаимосвязанных контроллеров. Система интегрирует анализ текущего состояния оборудования с оценкой критичности, безопасности и экономической важности. Экспериментальная апробация на оборудовании больницы Кадмус (Сирия, 2023–2024) подтвердила эффективность: сокращение внезапных отказов на 29 %, достигнута точность прогнозирования состояния на уровне 91,7 %, сокращение времени незапланированных простоев на 35 %.

Ключевые слова: предиктивное обслуживание, двухкритериальная система, нечеткая логика, поддержка решений, вибрационный анализ, тепловая эффективность, исторические данные об отказах

Введение. Чиллерные системы являются жизненно важными элементами во многих промышленных и коммерческих объектах. На фоне растущих вызовов, связанных с расходами на эксплуатацию и техническое обслуживание, предиктивное техническое обслуживание, основанное на состоянии оборудования, стало стратегическим выбором для повышения эффективности и снижения количества отказов. Экономические исследования выявили, что традиционные подходы к обслуживанию неэффективны и увеличивают затраты [1, 2]. Распространение Интернета вещей (IoT) и технологий Четвертой промышленной революции усилило роль предиктивного обслуживания.

Методы и материалы; результаты. Разработана комплексная нечеткая модель в среде LabVIEW, предназначенная для непрерывного мониторинга и оценки технического состояния чиллерных установок. Модель основана на анализе пяти ключевых параметров оборудования: вибрации компрессора, температурных и давленческих характеристик. Система включает три взаимосвязанных нечетких контроллера: первый анализирует текущее состояние оборудования в реальном времени, второй оценивает стратегические критерии (экономическая важность, безопасность), третий интегрирует результаты для принятия решений. Была использована оптимизированная база нечетких правил, сокращенная с 344 до 201 правила без потери точности. Эксперимен-

тальная апробация на чиллерах больницы Кадмуса (Сирия) в течение 12 месяцев показала: сокращение количества внезапных отказов на 29,4 %, точность прогнозирования состояния 91,7 %, сокращение времени незапланированных простоев на 35 % [3–5]. Система демонстрирует значительные преимущества перед искусственными нейронными сетями, особенно в условиях неопределенности данных, что подтверждается исследованиями [6].

Заключение. Разработанная двухкритериальная система предиктивного обслуживания обеспечивает комплексный анализ как текущих параметров оборудования в режиме реального времени, так и критериев безопасности и экономической эффективности, что существенно повышает обоснованность принимаемых решений. Система демонстрирует значительные преимущества перед традиционными методами обслуживания. Полученные результаты подтверждают высокую интерпретируемость и надежность системы в реальных условиях эксплуатации.

Список источников

- [1] Douglas S.T., Brian A.W. Economics of manufacturing machinery maintenance: A survey and analysis of U.S. costs and benefits. National Institute of Standards and Technology, 2020. <https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.100-34>
- [2] Poor P., Zenisek D., Basl J. Historical overview of maintenance management strategies: Development from breakdown maintenance to predictive maintenance in accordance with four industrial revolutions. Proc. of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Pilsen, Czech Republic, 2019.
- [3] Mitrofanina I.A., Emirisa D.M., Koulouriotis D.E. An industrial maintenance decision support system based on fuzzy inference to optimize scope definition. 30th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM). Athens, Greece, 2021.
- [4] Wirunpuch P., Manop P., Prayoon S. et al. Predictive maintenance model for rotating machinery using a fuzzy logic. Proc. of the 2022 International Conference on Power Engineering and Intelligent Information (ICPEI). IEEE, 2022, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICPEI55293.2022.9987151>
- [5] Fouad R.H., Samhour M. A fuzzy logic approach for scheduling preventive maintenance in ERP systems. Proc. of the 2011 International Conference on Management and Service Science (ICMSS). 2011, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICMSS.2011.5999330>
- [6] Pezeshki Z., Mazinani S.M. Comparison of artificial neural networks, fuzzy logic and neuro-fuzzy for predicting optimization of building thermal consumption: A survey. Artificial Intelligence Review, 2018, vol. 52, № 3, pp. 1–28.