

УДК 681.518

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

Махмуд Рами

makhmudr@student.bmstu.ru

Гаврюшин Сергей Сергеевич

gss@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Разработана двухкритериальная система предиктивного обслуживания чиллеров на основе нечеткой логики в LabVIEW, направленная на преодоление ограничений традиционных методов. Система интегрирует анализ текущего состояния оборудования с оценкой критичности, безопасности и экономической важности. Архитектура включает три взаимосвязанных контроллера: обработку данных в реальном времени, оценку критериев безопасности и экономическую важность оборудования, формирование рекомендаций по обслуживанию. Оптимизированная база из 344 правил обеспечивает точную классификацию состояния. Экспериментальные испытания на чиллерах больницы Кадмус (Сирия) подтвердили снижение внезапных отказов на 29 %, точность прогнозирования 91,7 % и сокращение простоев на 35 %. Решение превосходит традиционные методы и нейронные сети в условиях неопределенных данных благодаря интерпретируемости и использованию экспертных знаний, что гарантирует его практическую применимость.

Ключевые слова: предиктивное обслуживание, двухкритериальная система, нечеткая логика, поддержка решений, критерии безопасности, экономическая важность

Введение. Чиллерные системы являются жизненно важными элементами во многих промышленных и коммерческих объектах, где они играют ключевую роль в поддержании оптимальной рабочей среды. Анализ литературы выявляет существенное ограничение существующих исследований: они фокусируются либо исключительно на текущих параметрах оборудования, либо только на исторических данных. Например, система Rueda [1] на основе искусственной нейронной сети демонстрирует эффективность, но представляет собой «черный ящик» с ограниченной интерпретируемостью и использует только текущие параметры. Метод Wu [2], основанный на исторических данных, не учитывает реальное состояние оборудования. В то же время, подходы, основанные исключительно на машинном обучении, также могут страдать от недостатка интерпретируемости и сильной зависимости от качества и объема данных [3], что мотивирует использование гибридных или альтернативных подходов, таких как предложенная в данной работе система на основе нечеткой логики.

Предиктивное обслуживание, основанное на состоянии оборудования, стало стратегическим инструментом для повышения эффективности и снижения отказов за счет анализа данных о предыдущих неисправностях. Исторически

обслуживание носило корректирующий характер (устранение поломок после их возникновения) [4], однако рост конкуренции и технологические изменения стимулировали переход к плановому обслуживанию. Экономические исследования подтверждают неэффективность традиционных методов и обосновывают переход к предиктивному обслуживанию для снижения затрат [5].

Развитие IoT, облачных платформ и Industry 4.0 усилило роль предиктивного обслуживания, интегрируя аналитику данных и системы оповещения [5]. Технологии ИИ повысили точность и адаптивность таких систем [6].

Нечеткая логика (FL), имитирующая человеческое мышление, особенно эффективна в условиях неопределенности данных. Ее применение обеспечивает технико-экономические преимущества: повышает доступность оборудования, эффективность эксплуатации и снижает затраты [7, 8]. В промышленности FL используется для планирования профилактики в ERP-системах [9], диагностики высоковольтного оборудования [10], обслуживания текстильных машин [11, 12] и шлифовальных линий [13, 14], а также защиты трансформаторов [15, 16].

Архитектура разработанной системы предиктивного обслуживания для диагностики чиллеров. В рамках практического применения была разработана и внедрена нечеткая модель в LabVIEW для мониторинга чиллеров на основе пяти параметров: амплитуды и частоты вибрации компрессора (датчик Piezotronics 352C33 PCB), разницы температур (Датчики NTC), температуры двигателя (Датчики RTD-PT100), давления нагнетания и всасывания (Датчики давления Keller 400 бар) [17]. Значения обрабатываются функциями принадлежности (низкий, нормальный, высокий). HMI-интерфейс отображает состояние в реальном времени, дает рекомендации по обслуживанию и классифицирует его на пять уровней («очень хорошее», «хорошее», «допустимое», «предупреждающее», «критическое») для оперативных решений.

На рис. 1 представлен графический интерфейс системы в LabVIEW для двух чиллеров в больнице Кадмуса (Сирия).

Система интегрирована с инфраструктурой больницы через протокол Modbus TCP, обеспечивая надежную передачу данных и удаленный мониторинг. Это позволяет выявлять неисправности на ранних этапах, минимизируя риски сбоев критического оборудования и сохраняя непрерывность медицинского обслуживания.

Модель использует пять входных параметров с тремя функциями принадлежности (треугольными и трапецеидальными), формируя 243 правила (3^5) для полного охвата типовых и критических неисправностей. Выходные состояния оборудования: «очень хорошее» (0–15 %), «хорошее» (16–25 %), «допустимое» (26–40 %), «предупреждающее» (41–60 %) и «критическое» (>61 %). Градация определяет рекомендации: от планового наблюдения каждые 6 месяцев до срочного вмешательства в течение 24 часов.

Для уровня «предупреждающее» система рекомендует диагностику компрессора и проверку хладагента, а при «критическом» состоянии автоматически уведомляет персонал.

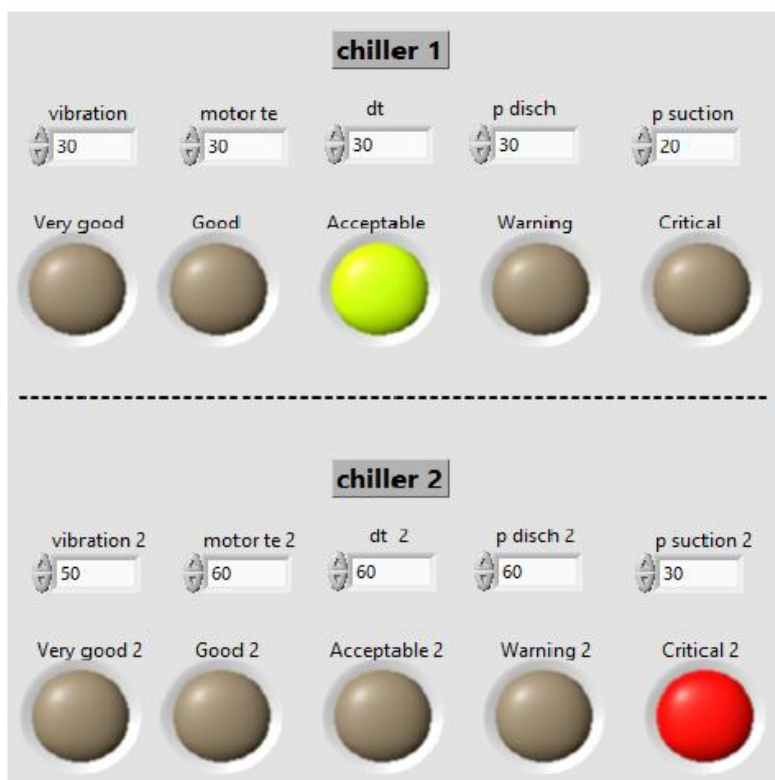


Рис. 1. Интерфейс двух охлаждающих устройств в среде LabVIEW

На рис. 2 представлена блок-схема архитектуры в LabVIEW, отображающая взаимодействие компонентов двухкритериальной системы для двух охлаждающих устройств — от сбора данных до формирования рекомендаций.

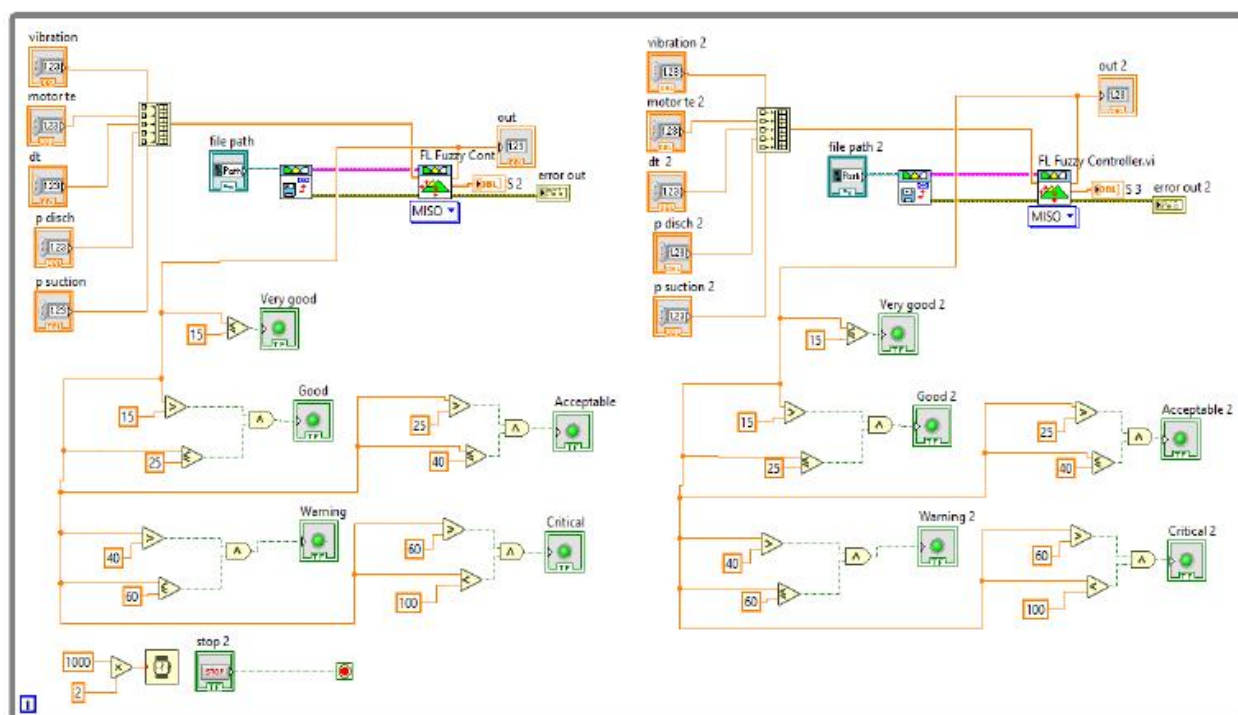


Рис. 2. Блок-схема двух охлаждающих устройств в среде LabVIEW

Вторым этапом разработки стала двухкритериальная модель оценки технического состояния оборудования, включающая три взаимосвязанных нечетких контроллера, каждый из которых выполняет специфическую функцию в процессе принятия решений.

Первый контроллер, отвечающий за анализ реального состояния оборудования, обрабатывает пять ключевых параметров в реальном времени: вибрацию компрессора, разницу температур воды на входе и выходе, температуру двигателя, давление нагнетания и давление всасывания. Этот контроллер преобразует четкие измерения в нечеткие значения с использованием специально разработанных функций принадлежности, что позволяет учитывать неопределенность и неточность данных, характерных для промышленных условий эксплуатации.

Второй контроллер выполняет критически важную функцию — оценку экономической и безопасностной значимости оборудования. В отличие от традиционных подходов, которые полагаются на исторические данные или исключительно на текущее техническое состояние, данный контроллер анализирует четыре ключевых параметра: стоимость обслуживания и ремонта (высокая/средняя/низкая), доступность запасных частей, фактор безопасности, а также критичность оборудования для общего производственного процесса.

Каждый из этих параметров преобразуется в нечеткое значение с помощью специально разработанных функций принадлежности — треугольных и трапецеидальных — что позволяет учитывать качественные и количественные аспекты при принятии решений. Общее количество правил в этом контроллере составляет 81 (3^4), поскольку каждый из четырех параметров имеет три возможные лингвистические переменные, и все их комбинации учитываются для формирования полной картины приоритета обслуживания. Добавление этого контроллера к первому — анализирующему текущее состояние оборудования в реальном времени — принципиально меняет характер принимаемых решений: теперь система не просто определяет, «неисправно ли устройство», а отвечает на вопрос «насколько важно его обслужить именно сейчас с точки зрения затрат, безопасности и влияния на производственный цикл».

Это особенно актуально для объектов, где даже незначительный простой может привести к серьезным финансовым потерям или рискам для персонала — например, в медицинских учреждениях, энергетических системах или производственных линиях. Таким образом, интеграция экономических и безопасностных критериев с техническими данными повышает обоснованность рекомендаций, снижает вероятность как преждевременной, так и запоздалой замены компонентов, и делает систему предиктивного обслуживания не только технически точной, но и стратегически эффективной.

Результаты первых двух контроллеров объединяются в третьем интегрирующем блоке, который формирует окончательные рекомендации. Этот блок синтезирует данные о текущем состоянии оборудования и экономико-

безопасностных критериях, применяя специальные правила для разрешения противоречий между сигналами контроллеров. Например, если оборудование технически исправно, но его простой критичен для процесса, система повысит приоритет обслуживания.

Такая двухуровневая структура повышает точность решений, минимизируя риски преждевременной или запоздалой замены компонентов и делая систему не только технически точной, но и стратегически эффективной. Интеграция экономических и безопасностных критериев с техническими данными обеспечивает обоснованный баланс между затратами и операционной надежностью.

На рис. 3 представлена интерфейс и структурная схема реализованной двухкритериальной модели.

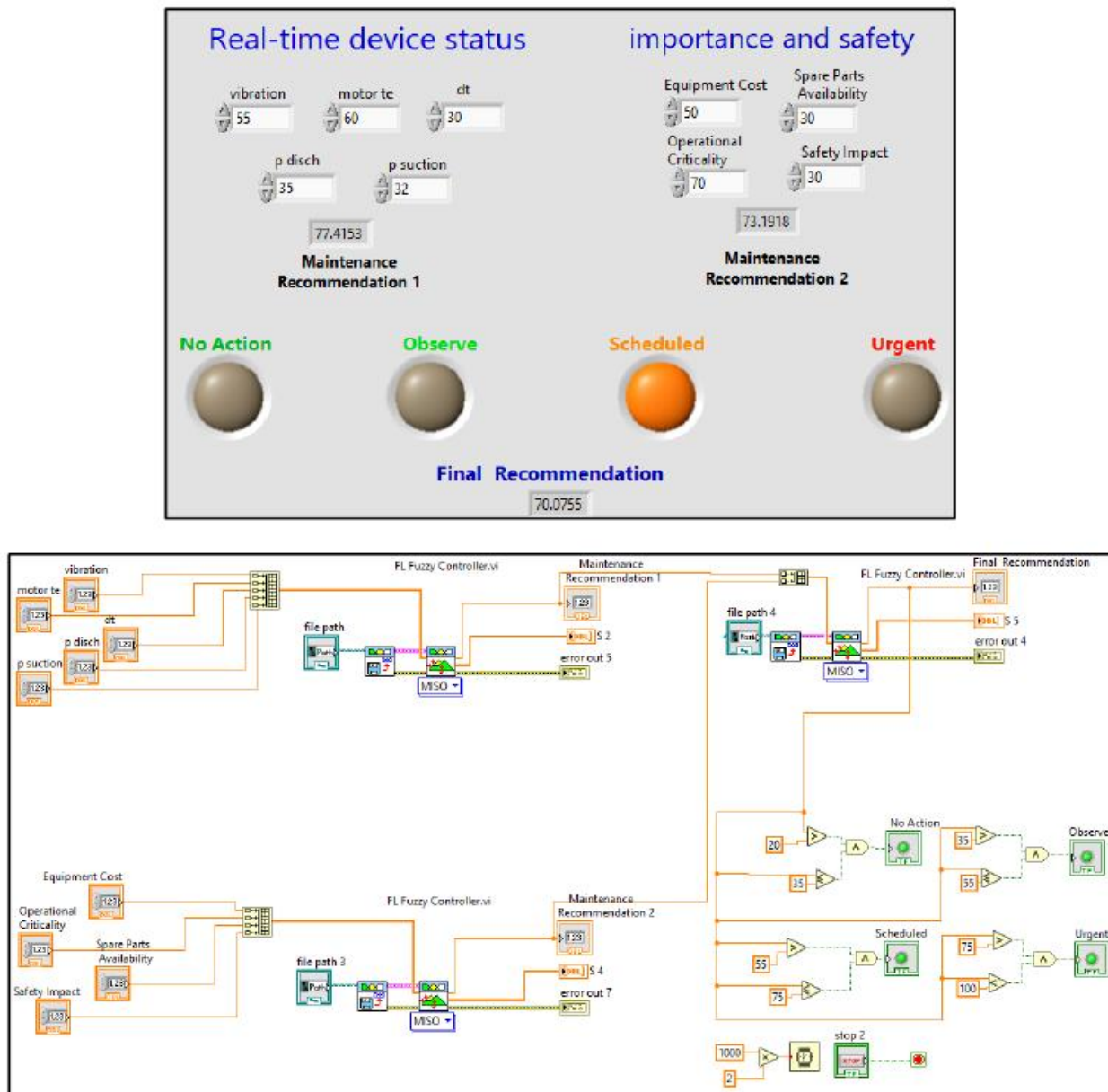


Рис. 3. Интерфейс и структурная схема реализованной двухкритериальной модели

Обсуждение полученных результатов. В среде LabVIEW использовалась встроенная функция проектирования нечеткого контроллера (Fuzzy Logic Toolkit) для проектирования контроллеров с настройкой функций принадлежности, базы правил и дефаззификации.

Примеры правил: первый контроллер выдает «предупреждение» при низкой вибрации, высокой температуре двигателя и средних отклонениях давления; второй — «срочное» обслуживание при высоком риске безопасности и критичности оборудования.

Третий контроллер интегрирует результаты (напр., «предупреждение» + «срочное» → «срочное»).

На рис. 4 показано инструмент проектирования нечеткого контроллера в LabVIEW, где можно наблюдать функции принадлежности и окончательный результат.

Были использованы реальные параметры двух систем охлаждения. Первоначальное количество нечетких правил составляло 344, но после оптимизации было сокращено до 201 при сохранении требуемой точности (маловероятные комбинации удаляются, схожие правила объединяются, и система структурируется иерархически). Это позволило охватить большинство рабочих сценариев и обеспечить точные прогнозы и обоснованные рекомендации по техническому обслуживанию.

Сокращение количества отказов на 29,4 % (Процент снижения рассчитывался по формуле: $((\text{Количество поломок до} - \text{Количество поломок после}) / \text{Количество поломок до}) \times 100$, где количество поломок в год, предшествовавший эксперименту, составляло 17 поломок по сравнению с 12 поломками в экспериментальной группе) достигнуто за счет раннего прогнозирования критических состояний.

Точность предсказаний составила 91,7 % $((\text{Количество правильных прогнозов} / \text{Общее количество прогнозов}) \times 100$. 110 правильных прогнозов из 120 дали показатель точности 91,7 %), а время незапланированных простоев сократилось на 35 % благодаря оптимизации графика технического обслуживания $((\text{Время простоев до} - \text{Время простоев после}) / \text{Время отдыха до}) \times 100$. Время сократилось с 320 часов в предыдущем году до 208 часов в экспериментальной группе. Эти показатели подтверждены эксплуатацией системы на чиллерах больницы Кадмуса (Сирия). Эксперимент продолжался 12 месяцев подряд (2023 г.). Полученные результаты соответствуют ожидаемым преимуществам от внедрения систем предиктивного обслуживания на высокотехнологичных предприятиях [18].

Заключение. Разработана и внедрена двухкритериальная система предиктивного обслуживания чиллерных установок на основе нечеткой логики, реализованная в среде LabVIEW. Подход обеспечивает комплексный анализ текущих параметров оборудования в режиме реального времени и критериев безопасности/экономической эффективности, повышая обоснованность решений по сравнению с традиционными однофакторными методами.

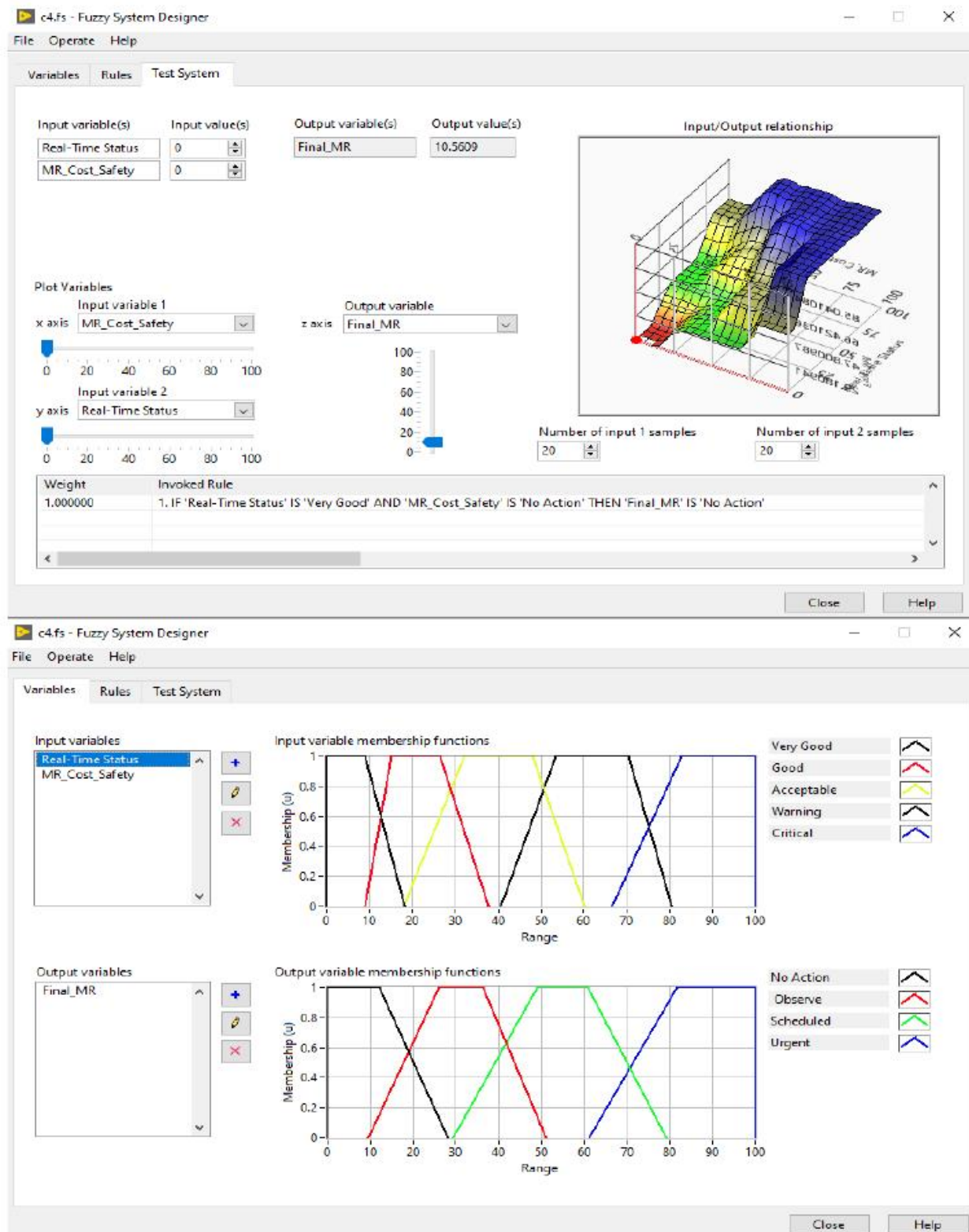


Рис. 4. Инструмент проектирования нечеткого контроллера в LabVIEW

Система включает три взаимосвязанных нечетких контроллера: первый оценивает техническое состояние по пяти ключевым параметрам (вибрация компрессора, температурные и давленческие характеристики), второй анализирует стратегические аспекты (стоимость обслуживания, доступность запас-

ных частей, фактор безопасности, критичность оборудования), третий, интегрирующий, формирует окончательные рекомендации, разрешая противоречия между данными. Оптимизированная база правил (201 вместо 344) обеспечивает высокую точность прогнозирования и полное покрытие типовых и критических эксплуатационных сценариев.

Экспериментальная апробация на чиллерах больницы Кадмуса (Сирия, 2023–2024 гг.) подтвердила эффективность системы, обеспечив снижение внезапных отказов, высокую точность прогнозов и сокращение незапланированных простоев. Результаты демонстрируют преимущества подхода перед традиционными методами и нейронными сетями благодаря прозрачности алгоритмов и возможности использования экспертных знаний.

Этот подход имеет и определенные ограничения, такие как необходимость ручной настройки функций принадлежности и зависимость от специальных знаний технологического или производственного процесса.

В будущих исследованиях мы предлагаем усовершенствовать модель, объединив глубокое обучение и нечеткую логику, включив исторические данные об отказах, автоматически оптимизировав правила на основе машинного обучения и используя периферийные вычисления. Эти меры позволят повысить надежность и конкурентоспособность промышленных объектов в контексте Индустрии 4.0.

Литература

- [1] Rueda E., Tassou S.A., Grace I.N. Fault detection and diagnosis in liquid chillers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2005, vol. 219, pp. 117–125.
- [2] Wu Y., Maravelias C.T., Wenzel M.J., ElBsat M.N., Turney R.T. Predictive maintenance scheduling optimization of building heating, ventilation, and air conditioning systems. *Energy and Buildings*, 2021, vol. 231, art. no. 110487.
- [3] Койбагаров М.К., Исабеков Ж.Н., Курмангалиева Л.А., Байтурганова В.К., Рахметова П.М. Разработка системы предиктивного обслуживания на основе машинного обучения. *Вестник Университета Шакарима. Технические науки*, 2025, vol. 2 (18), pp. 121–128.
- [4] 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>
- [5] 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.
- [6] Соколович М.Г., Аксёненко М.А., Захарьев В.А. *Системы предиктивного обслуживания технологического оборудования на основе методов искусственного интеллекта*. Минск, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019.
- [7] Dutta S. Fuzzy logic applications: Technological and strategic issues. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 1993, vol. 40, № 3, pp. 237–254.
- [8] *Fuji Electric. The fundamentals of fuzzy logic*. URL: <https://www.fujielectric.fr/en/blog/the-fundamentals-of-fuzzy-logic/> (accessed 21.01.2025).

- [9] Fouad R.H., Samhouri M. A fuzzy logic approach for scheduling preventive maintenance in ERP systems. *Proc. of the 2011 International Conference on Management and Service Science (IC-MSS)*, 2011, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICMSS.2011.5999330>
- [10] Frigura-Iliasa M., Simo A., Dzitac S. et al. Fuzzy-logic based diagnosis for high voltage equipment predictive maintenance. *Intelligent methods in computing, communications and control*, Springer, 2021, pp. 245–253.
- [11] Baban C., Baban M., Stefan M.D. Using a fuzzy logic approach for the predictive maintenance of textile machines. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2016, vol. 30, no. 2.
- [12] Torun T.K., Marmarali A. Online fault detection system for circular knitting machines. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 2011, vol. 21 (2), pp. 164–170.
- [13] Baban M., Baban C.F., Moisi B. A fuzzy logic-based approach for predictive maintenance of grinding wheels of automated grinding lines. *Proc. of the 23rd International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR)*, 2018, pp. 483–486.
- [14] Delgado-Arredondo P.A., Morinigo-Sotelo D., Osornio-Rios R.A., Avina-Cervantes J.G., Romero-Troncoso R.D. Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, vol. 83, pp. 568–589.
- [15] Dapshima B., Chuupa Y.E., Chaturvedi S. Fault detection and protection of power transformer using fuzzy logic. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 2023, vol. 11, no. 1, pp. 1–7.
- [16] Ashrafiyan A., Vahidi B., Mirsalim M. Time-time-transform application to fault diagnosis of power transformers. *IET Gen Transmission Distrib*, 2014, vol. 8 (6), pp. 1156–1167.
- [17] Мёрфи К. Выбор подходящего датчика для предиктивного технического обслуживания. *Электроника: наука, технология, бизнес*, 2020, № 9 (00200), с. 96–103.
- [18] Яковлева М.В., Шалина А.И. Разработка рекомендаций по внедрению предиктивного обслуживания оборудования на высокотехнологичных предприятиях. *Вопросы инновационной экономики*, 2023, т. 13 (3), с. 1531–1550.

Two - criteria fuzzy system for predictive maintenance of refrigeration units: real - time operational parameter analysis, safety, and economic efficiency

Mahmoud Rami

makhmudr@student.bmstu.ru

Gavriushin Sergey Sergeevich

gss@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

This paper presents a two-criteria fuzzy logic-based predictive maintenance system for chillers, developed in LabVIEW to overcome the limitations of traditional maintenance approaches. The system integrates real-time equipment condition analysis with assessments of criticality, safety, and economic importance. Its architecture comprises three interconnected controllers: real-time data processing, safety/economic evaluation, and maintenance recommendation generation. An optimized rule base of 344 rules enables precise equipment state classification. Experimental validation on chillers at Kadmus Hospital (Syria, 2023–2024) demonstrated a 29 % reduction in unexpected failures, 91.7 % prediction accuracy, and a 35 % decrease in unplanned downtime. The proposed solution outperforms conventional methods and neural networks under uncertain data conditions due to its interpretability and incorporation of expert knowledge, ensuring high practical applicability.

Keywords: predictive maintenance, two-criteria system, fuzzy logic, decision support, vibration analysis, thermal efficiency, historical failure data