

УДК 621.56+ 004.8

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ХОЛОДИЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Судаков Е.С. (ИТМО)

Научный руководитель – к.т.н., доцент Малинина О.С.
(ИТМО)

Введение. Рост глобального энергопотребления систем охлаждения и кондиционирования воздуха обуславливает необходимость повышения их энергетической эффективности и надёжности. По данным Международного энергетического агентства, холодильные и климатические установки формируют значительную долю мирового спроса на электроэнергию, и их вклад продолжает увеличиваться [1]. Классические алгоритмы управления, основанные на ПИД-регулировании, демонстрируют ограниченную адаптивность при переменных тепловых нагрузках, что приводит к снижению коэффициента энергоэффективности (*COP*) и увеличению эксплуатационных затрат. В связи с этим актуальной задачей является разработка интеллектуальных методов управления холодильными системами на основе технологий искусственного интеллекта и цифровых двойников.

Основная часть. Целью настоящего исследования является систематизация и анализ современных подходов к оптимизации управления холодильными системами на основе методов искусственного интеллекта. Для достижения поставленной цели решаются задачи структурирования концепции цифрового двойника холодильной установки, оценки потенциала предиктивного регулирования и обоснования интеграции интеллектуальных алгоритмов в контур управления.

В ходе работы проведён обзор научных публикаций, посвящённых применению цифровых двойников и алгоритмов искусственного интеллекта в холодильной технике и системах *HVAC+R* [2–4]. Особое внимание уделено методам построения вычислительных моделей парокompрессионных холодильных машин, способных воспроизводить термодинамические процессы, динамику переходных режимов и эксплуатационные особенности оборудования. Рассмотрены подходы к объединению расчётных моделей с данными, поступающими от датчиков давления, температуры и массового расхода, что обеспечивает возможность калибровки модели и повышения её прогностической точности.

Анализ существующих решений показал, что традиционные системы управления, основанные на пропорционально-интегральных регуляторах, эффективно поддерживают заданные параметры, однако не обладают механизмами прогнозирования изменения тепловой нагрузки. В условиях переменных внешних воздействий это приводит к отклонению режима работы от оптимального и, как следствие, к снижению коэффициента энергоэффективности (*COP*) и росту удельного энергопотребления.

В рамках исследования рассмотрена концепция цифрового двойника как инструмента повышения качества управления холодильной установкой. Показано, что цифровой двойник может использоваться для расчёта производительности компрессора, тепловой мощности испарителя и конденсатора, а также для оценки текущего и прогнозного значения энергетической эффективности. Интеграция такой модели в систему управления создаёт основу для перехода от реактивного регулирования к предиктивному.

Отдельный раздел анализа посвящён применению методов искусственного интеллекта для обработки эксплуатационных данных и аппроксимации нелинейных зависимостей между параметрами цикла. Рассмотрены алгоритмы машинного обучения и нейронные сети, используемые для прогнозирования тепловой нагрузки, оценки состояния оборудования и формирования оптимальных управляющих воздействий [3, 4]. Установлено, что сочетание интеллектуальных алгоритмов с цифровым двойником позволяет существенно повысить точность оценки текущего состояния системы и обеспечивает возможность формирования оптимальных стратегий управления в реальном времени.

Также изучены подходы к реализации предиктивного регулирования на основе математической модели объекта. В ряде работ продемонстрирована эффективность использования моделей холодильных установок для расчёта оптимальной траектории изменения управляющих параметров с учётом технологических ограничений и критерия минимизации энергопотребления [5]. Такой подход позволяет согласовать требования по поддержанию температурного режима с задачей повышения энергетической эффективности, обеспечивая более рациональное использование оборудования.

Перспективы развития данных технологий связаны с повышением точности цифровых моделей, расширением функциональности цифровых двойников и внедрением интеллектуальных алгоритмов в распределённые системы управления инженерной инфраструктурой. Дальнейшие исследования направлены на адаптацию моделей к условиям реальной эксплуатации, повышение устойчивости алгоритмов к внешним возмущениям и разработку методов автоматической калибровки моделей на основе потоков данных.

Выводы. В результате проведённого анализа установлено, что применение цифровых двойников и методов искусственного интеллекта создаёт предпосылки для оптимизации управления холодильными системами. Интеграция расчётной модели объекта и алгоритмов прогнозирования позволяет реализовать элементы предиктивного управления и обеспечить повышение энергетической эффективности при переменной тепловой нагрузке.

Список использованных источников:

1. IEA. *The Future of Cooling*. Paris: International Energy Agency, 2022.
2. Tao F., Zhang M., Liu Y., Nee A.Y.C. *Digital twin in industry: State-of-the-art* // *Journal of Manufacturing Systems*. 2022. Vol. 64. P. 372–389.
3. Ahmed R., Sreeram V., Mishra Y., Arif M.D. *A review and evaluation of the state-of-the-art in artificial intelligence techniques in refrigeration system modelling and optimization* // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021. Vol. 47. 101488.
4. Pérez-Gomariz M., López-Gómez A., Cerdán-Cartagena F. *Artificial Neural Networks as Artificial Intelligence Technique for Energy Saving in Refrigeration Systems: A Review* // *Clean Technologies*. 2023. Vol. 5, №1. P. 116–136.
5. Di Mattia E. et al. *Predictive Controller for Refrigeration Systems* // *Energies*. 2022. Vol. 15, №19. 7125.