

УДК 621.316

А.Б. АСЫКПАЕВ, студент гр. ТФ-202 (НАО «Шәкәрім университет»)
Научный руководитель Е.Н. МЯСОЕДОВА, магистр
(НАО «Шәкәрім университет»)
г. Семей

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ

Введение

С развитием цифровых технологий и повышением требований к стабильности энергосетей возрастает значение интеллектуальных систем управления электроснабжением зданий [1, 5]. Классические методы регулирования с фиксированными параметрами уже не обеспечивают необходимую надёжность и устойчивость работы энергосистем.

Одним из перспективных направлений является предиктивное управление (Model Predictive Control, MPC), основанное на прогнозировании состояния системы и выборе управляющих воздействий, минимизирующих отклонения от оптимальных режимов [2, 3]. Такой подход позволяет учитывать изменения нагрузки, погодные условия и тарифы, обеспечивая адаптивность и устойчивость электроснабжения [4, 6].

Цель работы – проанализировать принципы предиктивного управления и возможности их применения в системах электроснабжения зданий.

Для достижения цели решаются задачи:

- рассмотреть принципы и структуру алгоритмов предиктивного управления;
- проанализировать архитектуру интеллектуальных систем электроснабжения;
- обобщить зарубежный опыт применения;
- определить направления дальнейшего развития технологии.

1. Основные принципы предиктивного управления

Предиктивное управление (Model Predictive Control, MPC) – это класс алгоритмов, использующих математическую модель системы для прогнозирования её поведения и вычисления оптимальных управляющих воздействий [2, 3]. В отличие от традиционных регуляторов, MPC анализирует развитие процесса на несколько шагов вперёд и выбирает управление, минимизирующее функционал качества при заданных ограничениях.

Ключевым элементом метода является модель прогнозирования, описывающая динамику объекта через уравнения состояния, связывающие входные воздействия, возмущения и выходные величины. После расчёта оптимальных воздействий выполняется только первое, затем цикл повто-

ряется с обновлёнными данными – реализуется принцип скользящего горизонта управления [2].

Для систем электроснабжения зданий модель учитывает параметры источников, нагрузок, накопителей и внешние факторы – погоду, тарифы, режимы работы оборудования. Оптимизационный критерий обычно выражается как [3, 4]:

$$J = \sum (y_{ref} - \hat{y})^2 + \lambda(\Delta u),^2 \quad (1)$$

где y_{ref} – заданное значение выходной величины, \hat{y} – предсказанное значение, Δu – изменение управляющего воздействия, λ – весовой коэффициент.

Практическая реализация MPC стала возможна с развитием микроконтроллеров и технологий обработки данных [2]. В системах электроснабжения зданий это обеспечивает создание адаптивных комплексов, способных в реальном времени прогнозировать нагрузку, предотвращать перегрузки и повышать устойчивость энергоснабжения.

2. Архитектура и компоненты системы предиктивного управления электроснабжением зданий

Система предиктивного управления электроснабжением здания представляет собой комплекс аппаратных и программных средств, обеспечивающих сбор, анализ и прогнозирование данных энергосистемы, а также формирование управляющих воздействий [1,4]. Модульная архитектура позволяет адаптировать её под разные объекты – от отдельного здания до комплекса сооружений.

Основные компоненты системы:

- Подсистема сбора данных. Включает датчики и интеллектуальные счётчики, регистрирующие напряжение, ток, мощность и частоту в реальном времени [3].

- Подсистема прогнозирования. Анализирует текущие и архивные данные для краткосрочного прогноза нагрузки с использованием методов машинного обучения и нейронных сетей.

- Математическая модель (цифровой двойник). Описывает поведение системы с учётом параметров сетей, генераторов, накопителей и потребителей, служит основой для расчёта оптимальных режимов [4, 6].

- Подсистема оптимизации и управления. На основе прогнозов решает задачу минимизации функционала (1), выбирая оптимальные управляющие воздействия с учётом ограничений сети (1) [2].

- Исполнительная подсистема и интерфейс мониторинга. Передаёт управляющие сигналы на оборудование, обеспечивает визуализацию и диагностику работы системы.

Система работает в замкнутом цикле: данные поступают от датчиков → формируется прогноз → вычисляются управляющие воздействия → сигналы подаются на оборудование → обновлённые данные возвращаются в систему. Такой принцип обеспечивает адаптацию к изменяющимся условиям эксплуатации в реальном времени [1, 5].

Структурная схема представлена на рисунке 1 и включает контур измерения параметров, блоки прогнозирования, оптимизации, контроллер и исполнительные механизмы, объединённые обратной связью.

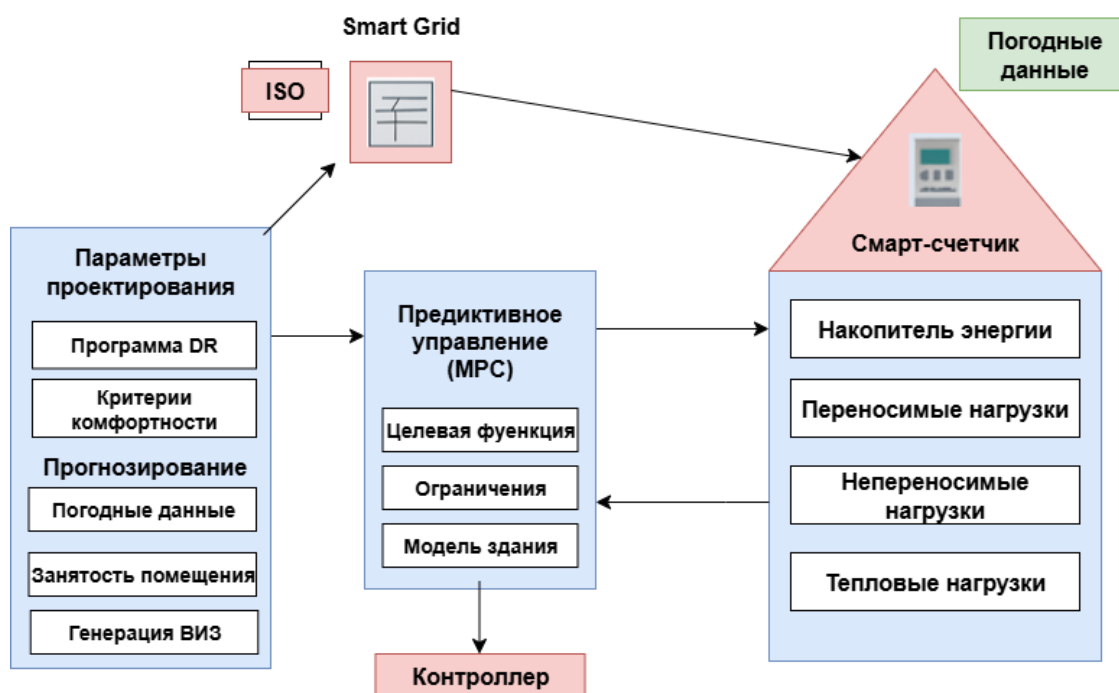


Рис. 1. Структурная схема системы предиктивного управления электроснабжением здания (авторская разработка)

3. Практические применения и зарубежный опыт

Предиктивные алгоритмы в энергетике зданий активно развиваются в технологически развитых странах [2, 4, 6]. Их цель – прогнозировать энергопотребление и адаптировать работу оборудования к изменяющимся условиям и тарифам.

В Японии внедряются интеллектуальные микросети, где MPC управляет локальной генерацией и прогнозирует нагрузку [4, 6]. В жилых и университетских комплексах Токио такие системы распределяют энергию с учётом погодных условий и занятости помещений, снижая пиковые нагрузки и повышая устойчивость.

В Южной Корее предиктивные алгоритмы применяются в управлении офисами и центрами обработки данных [4]. Модели машинного обучения прогнозируют потребление на сутки вперёд, что позволяет заранее

регулировать работу кондиционеров и накопителей, предотвращая перегрузки.

В США технологии MPC используются в университетских кампусах, включая MIT и Стэнфорд, где алгоритмы оптимизируют взаимодействие солнечных станций, аккумуляторов и локальной генерации, повышая надёжность электроснабжения [4].

Международный опыт показывает, что внедрение MPC повышает устойчивость энергоснабжения, улучшает балансировку нагрузок и способствует развитию интеллектуальных и энергоэффективных зданий нового поколения [6].

4. Эффект от внедрения предиктивного управления

Внедрение алгоритмов предиктивного управления в системы электроснабжения зданий обеспечивает новый уровень адаптивности и устойчивости энергетической инфраструктуры [1, 5]. Главное преимущество подхода – возможность прогнозировать состояние системы и заранее корректировать режимы работы оборудования с учётом внешних факторов.

Алгоритмы MPC повышают надёжность электроснабжения, предотвращая перегрузки и перераспределяя мощность между источниками и потребителями [1, 3]. Прогнозирование нагрузки улучшает качество электроэнергии и сглаживает пики потребления, что особенно важно при подключении возобновляемых источников [3].

Интеграция MPC с интеллектуальными системами и ВИЭ обеспечивает согласованную работу солнечных панелей, накопителей и сетевых источников, снижая износ оборудования за счёт плавного регулирования и оптимизации режимов [4, 6].

Применение предиктивных методов переводит энергосистемы зданий от реактивного к активно-адаптивному управлению, основанному на прогнозах и аналитике, формируя основу энергоустойчивых зданий нового поколения [5].

Заключение

Применение алгоритмов предиктивного управления в системах электроснабжения зданий является ключевым направлением цифровизации энергетики [1, 5]. Использование методов прогнозирования и оптимизации повышает надёжность электроснабжения, обеспечивает баланс между потреблением и генерацией и адаптирует работу оборудования к изменяющимся условиям.

Системы MPC могут интегрироваться в существующие энергосети без серьёзной модернизации, улучшая качество электроэнергии и снижая вероятность перегрузок. Это повышает эффективность использования энергетических ресурсов [6].

Мировой опыт подтверждает, что предиктивные технологии способствуют развитию «умных зданий» и микросетей, повышают устойчивость

энергоснабжения и облегчают интеграцию возобновляемых источников энергии [4, 6].

Таким образом, предиктивное управление становится ключевым элементом построения устойчивых и энергоэффективных систем электроснабжения будущего.

Список литературы:

1. Каменева, М. А. Применение алгоритмов предиктивного управления в системах энергетики зданий / М. А. Каменева, А. В. Лаптев // Вестник энергетики. – 2022. – № 5. – С. 47–53.
2. Qin, S. J., A survey of industrial model predictive control technology / S. J. Qin, T. A. Badgwell // Control Engineering Practice. – 2003. – Vol. 11, No. 7. – P. 733–764.
3. Afram A., Janabi-Sharifi F. Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC) // Building and Environment. – 2014. – Vol. 72. – P. 343–355.
4. Lee D., Shin S., Kim J. Application of predictive control algorithms in building microgrids for peak load reduction // Energy Procedia. – 2019. – Vol. 159. – P. 424–430.
5. Сатыбалдиева А. Ж., Имангалиев Д. А. Цифровизация систем электроснабжения в энергетике Казахстана // Энергетика и промышленность Казахстана. – 2023. – № 4. – С. 21–27.
6. European Commission. Smart Grid and Smart Building Integration: Report of the Joint Research Centre. – Luxembourg: Publications Office of the EU, 2021. – 54 p.

Информация об авторах:

Асыкпаев Арнур Бауржанович, студент 4-го курса гр. ТФ-202, НАО «Шәкәрім университет», 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глилки, д. 20 «А», arni.aidi0983368@gmail.com

Мясоедова Екатерина Николаевна, преподаватель, магистр, НАО «Шәкәрім университет», 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глилки, д. 20 «А», Kate_white89@mail.ru