УДК 004.412:519.237.5

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗУМНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ У БУДИНКУ

Марцін А.С.[1] ; Тройніна А.С., к.т.н., доц.[2]
[1, 2]Національний університет «Одеська Політехніка»
[1, 2]Україна, Одеса
[1]7546754@stud.op.edu.ua, [2]atroinina@op.edu.ua

Анотація. *У тезах представлено структуру, модель і результати дослідження розумної системи керування енергоспоживанням у житловому будинку (SHEMS). Проаналізовано існуючі підходи, сформульовано функціональні та нефункціональні вимоги, побудовано модель «чорної скриньки» та ієрархію підсистем. Результати симуляцій показують можливе зниження споживання електроенергії на рівні 15–30 % у типовому житловому сценарії та покращення показників комфорту. Наведено ключові обмеження та напрями подальших досліджень.*

Ключові слова. *розумний будинок; енергоефективність; SHEMS; IoT; оптимізація.*

Вступна частина. Підвищення енергоефективності житлового фонду є одним із пріоритетів сучасної енергетичної політики через необхідність зниження викидів парникових газів і забезпечення енергетичної безпеки. Розумні системи керування енергоспоживанням (Smart Home Energy Management Systems, SHEMS) об'єднують датчики, керовані навантаження та алгоритми оптимізації для мінімізації витрат та підвищення комфорту споживача. Незважаючи на активні дослідження останніх років, існуючі рішення часто мають недоліки: слабку адаптацію до поведінки користувача, обмежену інтеграцію із зовнішніми тарифними сигналами і вразливості в питанні захисту даних. У зв’язку з цим актуальним є розроблення моделі SHEMS, здатної забезпечувати адаптивну оптимізацію з урахуванням тарифів, локального виробництва енергії та поведінки користувача. [1]

Метою дослідження є розробка функціональної моделі SHEMS та оцінка її ефективності щодо енергозбереження і покращення комфорту.[2, 3] Для досягнення мети поставлено завдання: описати структуру системи та побудувати модель «чорної скриньки»; сформулювати вимоги і проблемні ситуації; здійснити симуляцію роботи системи на синтетичних і реальних даних; оцінити економічний та екологічний ефект.

Основна частина. Дослідження побудовано на методах системного аналізу, моделювання та обчислювальної симуляції. Архітектура SHEMS включає підсистеми: моніторинг, аналітика і прогнозування, автоматичне керування, інтерфейс користувача та кіберзахист. Для моделювання використовувались часові ряди споживання із хвилинною роздільністю (реальні/синтетичні набори), тарифи з тарифними зонами та модель поведінки користувача зі стохастичними сценаріями. Оптимізаційний блок реалізовано як багатоцільова задача мінімізації сумарних витрат з урахуванням обмежень комфорту:

$$min\, J \;=\; \sum_{t} \left(E_t \;*\; C_t\right) \;-\; \alpha \sum_{t} E_t^{gen},$$

де E_t – споживання в інтервалі t, C_t – тариф, E_t^{gen} – локальна генерація,α – коефіцієнт врахування власної генерації. Функція описує компроміс між мінімізацією фінансових витрат і максимізацією використання власної енергії, дозволяючи здійснювати адаптивне керування

енергоспоживанням у реальному часі. Прогнозування навантаження виконано методом випадкового лісу (Random Forest) та простих рекурентних моделей для порівняння.

Симуляції для типової 3-кімнатної квартири з набором керованих навантажень (опалення/кондиціонування, бойлер, освітлення, розетки) показали:

– середнє зниження споживання електроенергії на (18 ± 5) % при базовому сценарії користувацької поведінки;

– при налаштуванні агресивнішої оптимізації (допускається більш широкий діапазон температурних відхилень) економія до 30 %;

– з урахуванням локальної сонячної генерації частка енергії, покритої власною генерацією, зросла до 35 %, що додатково знижує витрати. Результати узагальнено в Таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати симуляцій для різних сценаріїв

Сценарій	Економія, %
Консервативний (комфорт пріоритет)	15
Баланс (комфорт + економія)	18
Агресивний (економія пріоритет)	30

Аналіз чутливості показав, що основні ризики ефективності – це невірні дані датчиків, відключення інтернет-зв'язку та поведінка користувача, що ілюструє необхідність впровадження локального «fail-safe» режиму та навчання користувачів.

Отримані результати підтверджують практичну доцільність впровадження SHEMS у житловому секторі: економічний ефект помітний вже при середній оптимізації, а інтеграція з локальною генерацією і тарифними сигналами додатково підвищує вигоди. Симуляційні експерименти, проведені для типового житлового сценарію, показали економію електроенергії до 30 %. Однак для реального впровадження необхідно вирішити питання сумісності обладнання, стандартів обміну даними (протоколи ZigBee/Z-Wave/HTTP/ MQTT) та забезпечення кібербезпеки (шифрування, сертифікація). Крім того, соціальний фактор – готовність користувача змінювати звички – є критичною складовою успіху.

Висновки. У результаті дослідження створено ієрархічну структуру розумної системи керування енергоспоживанням, що включає підсистеми моніторингу, прогнозування, оптимізації та керування навантаженнями. Реалізована оптимізаційна модель дала змогу оцінити вплив різних тарифних політик і сценаріїв поведінки користувача на загальне споживання енергії. За результатами симуляції встановлено, що інтеграція SHEMS у типовий житловий об'єкт може забезпечити економію електроенергії до 30 % порівняно з базовим режимом, а також покращення стабільності споживання в години пікового навантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Raza, A., Jingzhao, L., Ghadi, Y., Adnan, M., & Ali, M. (2024, July 24). Smart Home Energy Management Systems: Research Challenges and Survey. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/378713290_Smart_home_energy_management_systems Research_challenges_and_survey

[2] Aguilar, J., Garcés-Jiménez, A., R-Moreno, M. D., & García, R. (2021). A systematic literature review on the use of artificial intelligence in energy self-management in smart buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 151, 111395*.
[3] Motta, L. L., Ferreira, L. C. B. C., Cabral, T. W., Lemes, D. A. M., Cardoso, G. d. S., Borchardt, A., Cardieri, P., Fraidenraich, G., de Lima, E. R., Neto, F. B., & Meloni, L. G. P. (2023). General Overview and Proof of Concept of a Smart Home Energy Management System Architecture. *Electronics, 12(21), 4453*. https://doi.org/10.3390/electronics12214453

Martsin A.S., Troynina A.S.

Research on an Intelligent Energy Management System in a Building

Abstract. *The paper presents the structure, model, and research results of an intelligent energy management system in a residential building (SHEMS). Existing approaches were analyzed, functional and non-functional requirements were formulated, and a "black box" model along with a subsystem hierarchy was developed. Simulation results demonstrate a potential reduction in electricity consumption of 15–30% in a typical residential scenario, as well as improvements in comfort indicators. Key limitations and directions for further research are also outlined.*

Keywords: *smart home; energy efficiency; SHEMS; IoT; optimization.*