

Батюк С.Г.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Воронюк М.В.**

Київський національний університет будівництва та архітектури

ЗАДАЧІ КОМПЛЕКСНОЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ ЯК АВТОНОМНОЇ КІБЕР-ФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

Стаття присвячена розробці структури кібер-фізичної системи автономного житлового будинку. Автономність житлового будинку забезпечується автономністю системи електропостачання і автономністю системи життєзабезпечення житлового будинку.

Продемонстровано, що ефективним рішенням є впровадження автоматизованої системи автономного електропостачання і життєзабезпечення, яка дозволяє ефективно використовувати альтернативні джерела енергії, накопичувати та розподіляти електроенергію за допомогою сучасних технологій.

Визначено, що задачі ефективної автоматизованої системи управління інженерними системами електропостачання і життєзабезпечення в складі кібер-фізичної системи житлового будинку мають бути задачами комплексної автоматизації житлового будинку.

Сформульоване визначення комплексної автоматизації як інтегрованої автоматизації технологічних процесів і бізнес-процесів підприємства. Комплексна автоматизована система управління – інтегрована автоматизована система управління масштабу підприємства. Синергетичний ефект комплексної автоматизації – інтегральна (системна) ефективність більша за суму ефектів компонентів (консолідація і агрегація даних). Кумулятивний ефект комплексної автоматизації – цільова ефективність – реалізація бізнес-тріади «звітність – аналітика – планування», зорієнтованої на обґрунтування прийняття рішень власником. Платформою комплексної автоматизації є цифровізація підприємства, що поєднує інформаційні технології і операційні технології (технології автоматизації). Визначені маркери комплексної автоматизації: 1) інтегрованість (автоматизація усіх технологічних і бізнес процесів); 2) консолідованість (реалізація бізнес-тріади «звітність – аналітика – планування»); 3) адаптивність (системи екстремального управління і автотюнінг регуляторів систем автоматичного регулювання).

Розроблена структура автоматизованої системи автономного електропостачання і життєзабезпечення житлового будинку, яка забезпечує стабільне електропостачання і безлюдне функціонування інженерних систем життєзабезпечення житлового будинку. Розроблена структура автоматизованої системи управління інженерними системами житлового будинку реалізує сформульовану авторами ідеологію комплексної автоматизації технологічних процесів.

Ключові слова: теплова енергетика, інженерні системи будівель, автономне електропостачання житлового будинку, автономне життєзабезпечення житлового будинку, автоматизація технологічних процесів, автоматизація теплоенергетичних процесів, автоматизація інженерних систем житлового будинку, комплексна автоматизація, кібер-фізична система, автоматизована система управління, система автоматичного регулювання, інформаційно-вимірювальна система, система програмно-логічного управління, програмно-технічні засоби автоматизації, контролерна функціональність, супервізорна функціональність, цифровий двійник, граничний девайс, інтернет речей, імітаційне моделювання, функціональне моделювання, структурне моделювання, параметрична адаптація.

Постановка проблеми. У сучасних умовах питання енергетичної незалежності житлових будинків набуває особливої актуальності. Перебої в електропостачанні можуть призвести до відключення критично важливих систем життєзабезпечення, таких як опалення, водопоста-

чання, вентиляція, зв'язок тощо. Використання традиційних джерел енергії збільшує фінансові витрати та негативно впливає на екологію.

Одним із перспективних рішень є впровадження автоматизованої системи автономного електропостачання і життєзабезпечення

Автономне електрозабезпечення дозволяє ефективно використовувати альтернативні джерела енергії [1], накопичувати та розподіляти електроенергію за допомогою сучасних технологій [2].

Однак в той же час важливо розуміти, що сонячні панелі та вітряки не можуть повністю забезпечити автономність будинку без фідеру енергосистеми як основного джерела живлення і мобільного паливного електрогенератора як резервного джерела живлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні тенденції у сфері автономного електропостачання дедалі частіше фокусуються на інтеграції кількох джерел енергії з метою досягнення максимальної ефективності та надійності [3]. Останні дослідження демонструють, що використання сонячних панелей є ефективним рішенням для забезпечення базових енергетичних потреб будинку в літній період або в режимі мінімального навантаження (stand-by), коли працюють лише критично важливі прилади – освітлення, холодильник, система охорони тощо.

Втім, у зимовий період, коли світловий день коротший, а споживання електроенергії зростає через використання опалення та інших енергомістких приладів, виникає потреба в додаткових джерелах живлення. У таких випадках важливу роль відіграють акумуляторні батареї, які зберігають надлишки енергії, накопичені вдень, або резервні генератори, що забезпечують стабільне постачання електроенергії у разі її нестачі.

Крім того, інтеграція систем життєзабезпечення, таких як опалення, кондиціонування, вентиляція та гаряче водопостачання, у єдину систему енергоменеджменту дозволяє оптимізувати енергоспоживання. Завдяки інтелектуальному управлінню енергією можна досягти вищого рівня автономності та зменшити витрати як на енергію, так і на обслуговування системи в цілому.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є розробка структури автоматизованої системи автономного електропостачання та життєзабезпечення житлового будинку. Така система, на додаток до сучасних базових задач автоматизації житлових будтнків [4], має забезпечити стабільне постачання електроенергії незалежно від зовнішніх джерел живлення, а також гарантувати безперебійне й безлюдне функціонування ключових інженерних систем – опалення, вентиляції, кондиціонування, водопостачання та системи безпеки.

Завдання полягає у створенні комплексного рішення, яке поєднує різні джерела енергії

(сонячні панелі, акумулятори, резервні генератори) з інтелектуальною системою управління. Остання повинна автоматично реагувати на зміну умов – споживання енергії, погодні умови, рівень заряду акумуляторів – і відповідно адаптувати роботу енергосистеми для досягнення максимальної ефективності та автономності. У результаті система повинна функціонувати з мінімальним залученням людини та забезпечувати комфорт і безпеку у будинку за будь-яких умов.

Комплексна автоматизація інженерних систем електропостачання і життєзабезпечення житлового будинку має враховувати сучасний стан теорії автоматичного управління [5] і досвід промислової автоматизації [6] в частині адаптації САР під параметричні збурення технологічного об'єкту управління [7]. Автори віддають перевагу класичному підходу [8] в частині використання жорсткої адаптації САР (тобто, використанню САР, малочутливих до параметричних збурень) і періодичної активної адаптації САР (тобто, екстремальному управлінню і автотюнінгу САР).

САР в системі комплексної автоматизації житлового будинку мають бути малочутливими до параметричних збурень від інженерних систем (тобто мають мати достатньо великий запас сталості). Для активної адаптації САР мають використовуватись екстремальне управління продуктивністю технологічних агрегатів і автотюнінг ПІД-регуляторів.

Виклад основного матеріалу. У межах дослідження були проаналізовані актуальні підходи до автономного електропостачання житлових будинків та створено функціональну модель кіберфізичної системи, здатної забезпечити повну або часткову енергетичну незалежність житлового об'єкту.

Розроблена система автономного електропостачання житлового будинку ґрунтується на поєднанні кількох взаємопов'язаних модулів, які забезпечують не лише стабільне постачання електроенергії, а й повноцінне управління інженерними системами життєзабезпечення. Такий підхід дозволяє досягти високого рівня автономності, ефективності та гнучкості у використанні ресурсів.

Джерела енергії в системі автономного електроживлення

Автономна система електропостачання використовує кілька типів генерації енергії для забезпечення надійності в різних умовах:

- Сонячні панелі – основне джерело енергії в літній період та в умовах достатньої соняч-

ної активності. Ефективні для підтримки роботи базових систем у денний час, але не здатні забезпечити повну енергонезалежність у хмарні дні або вночі.

- Вітрові генератори – доцільні у вітряних регіонах. Можуть ефективно доповнювати сонячну енергетику вночі або в похмуру погоду, забезпечуючи безперервність генерації.

- Резервні джерела енергії – бензинові, дизельні або газові генератори використовуються у разі високих навантажень або довготривалої відсутності вироблення з основних джерел. Забезпечують надійний резерв у зимовий період або при аварійних ситуаціях.

Накопичення енергії в системі автономного електроживлення

Збереження надлишкової енергії – критично важливий компонент автономності. Система накопичення базується на акумуляторах, які забезпечують живлення в нічний час або при несприятливих погодних умовах.

У системі можуть використовуватись:

- Гелеві акумулятори – стійкі до низьких температур, мають відносно тривалий строк служби, проте менш ефективні при високих навантаженнях.

- Літій-іонні (Li-ion) – характеризуються високою енергоємністю, швидкою зарядкою, тривалим терміном експлуатації (до 15 років), компактністю та мінімальним саморозрядом. Чутливі до перегріву, потребують системи терморегулювання.

- Літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) – найефективніші за співвідношенням енергії та надійності. Мають ККД до 98%, термін служби до 15 років, низький рівень деградації та високу пожегобезпечність. Ідеально підходять для сучасних домашніх систем, хоча мають вищу вартість.

Управління енергією в системі автономного електроживлення

Центральною ланкою автономної енергосистеми є Smart Grid – розумна електромережа, яка забезпечує оптимальне керування усіма джерелами та споживачами енергії.

Склад SmartGrid-енергосистеми:

- Інтелектуальні контролери – здійснюють моніторинг вироблення та споживання електроенергії, керують розподілом навантажень, враховуючи пріоритетність підключених систем.

- Алгоритми прогнозування – аналізують дані про погоду, типові шаблони споживання та стан акумуляторів. На основі цього система

приймає рішення про доцільність використання збереженої енергії або активацію резервних джерел.

- Система дистанційного моніторингу – користувач може контролювати та налаштовувати роботу енергосистеми через мобільний додаток або веб-інтерфейс. Це дозволяє адаптувати систему до змін у способі життя, тривалих відряджень або сезонних коливань споживання.

Інтеграція із системами життєзабезпечення

Автоматизована система електропостачання тісно взаємодіє з інженерними системами житлового будинку, оптимізуючи їх роботу:

Опалення:

- Використання теплових насосів типу повітря-вода або вода-вода.

- Інтелектуальне управління котлом дозволяє знижувати витрати енергії в періоди відсутності мешканців або вночі.

Водопостачання та водовідведення:

- Автоматизовані насосні станції з регулюванням тиску забезпечують сталість подачі води.

- Системи фільтрації та очищення води покращують якість питної води та підвищують загальний комфорт.

Вентиляція та кондиціонування:

- Системи з рекуперацією тепла дозволяють утилізувати тепло з повітря, що виходить, знижуючи потребу в додатковому обігріванні.

- Інтелектуальне управління кондиціонерами, що враховує температуру, вологість, час доби та присутність людей, зменшує споживання енергії без втрати комфорту.

Ці модулі працюють як єдина система, здатна адаптуватися до змін навантаження, погодних умов, поведінки мешканців та цін на енергію (у разі підключення до «розумної» міської мережі).

Структура автономної кібер-фізичної системи житлового будинку

Кібер-фізична система поєднує фізичні об'єкти (джерела енергії, споживачі, системи накопичення) з операційними технологіями (датчики, програмні алгоритми, комунікаційні інтерфейси).

Структура кібер-фізичної системи

В кібер-фізичній системі вирізняються наступні рівні прийняття рішень з автоматизації і управління:

1. Фізичний рівень

- Генерація: сонячні та вітрові установки.
- Накопичення: акумуляторні системи.
- Споживання: системи опалення, освітлення, побутова техніка.

2. Кібернетичний рівень

- Сенсори: температури, вологості, руху, напруги, струму.
- Актори: реле, електронні клапани, контролери.
- Комунікація: Wi-Fi, Zigbee, Modbus, Bluetooth, Ethernet.

3. Управлінський рівень

- Програмовані логічні контролери (PLC).
- Інтелектуальні модулі прийняття рішень.
- Прогнозно-аналітичні алгоритми, що адаптують поведінку системи в реальному часі.

4. Інтерфейсний рівень

- Мобільний додаток або веб-інтерфейс.
- Голосове управління (опціонально).
- Візуалізація даних у режимі реального часу (споживання, заряд, статуси пристроїв).

У результаті кібер-фізична система функціонує як єдиний «організм», що здатен до самодіагностики, саморегулювання і, за потреби, повідомлення власника або технічну службу про необхідність втручання. Така система створює основу для повністю безлюдного функціонування житла, з одночасною енергонезалежністю та високим рівнем комфорту.

Принципи роботи кібер-фізичної системи житлового будинку

Автоматизована система автономного електропостачання житлового будинку побудована на основі адаптивних алгоритмів управління [7], що дозволяють забезпечити ефективне використання енергії, зниження витрат та підтримання стабільної роботи інженерних систем навіть у непередбачуваних умовах. Основні принципи функціонування системи проаналізовані нижче.

Пріоритетне використання відновлюваних джерел енергії

Система зорієнтована на максимальне використання сонячної та вітрової енергії як основних джерел живлення. У сприятливих умовах генерації (сонячна погода, наявність вітру) вона забезпечує повне або часткове покриття потреб будинку за рахунок цих джерел. Нижче на рис. 1 наведена діаграма зміни рівня автономності електропостачання житлового будинку залежно від сезону. Надлишок електроенергії автоматично направляється на заряд акумуляторів, що дозволяє використовувати його в нічний час або при несприятливій погоді.

Найвища автономність досягається влітку, коли сонячні панелі працюють максимально ефективно, а найнижча – взимку через короткий світловий день і високе енергоспоживання

Автоматична оптимізація споживання

Інтелектуальні контролери постійно відстежують рівень споживання енергії і порівнюють його з доступними ресурсами.

У разі перевищення критичних значень або швидкого розряду акумуляторів система автоматично:

- Визначає неперіоритетні електроприлади (наприклад, декоративне освітлення, підігрів підлоги, зарядні пристрої) і тимчасово відключає їх.
- Оптимізує роботу життєво важливих систем, наприклад, знижує потужність обігрівачів або переходить на економний режим вентиляції.

Це дозволяє знизити пікові навантаження та уникнути аварійного відключення систем.

Автоматичне перемикавання між джерелами енергії

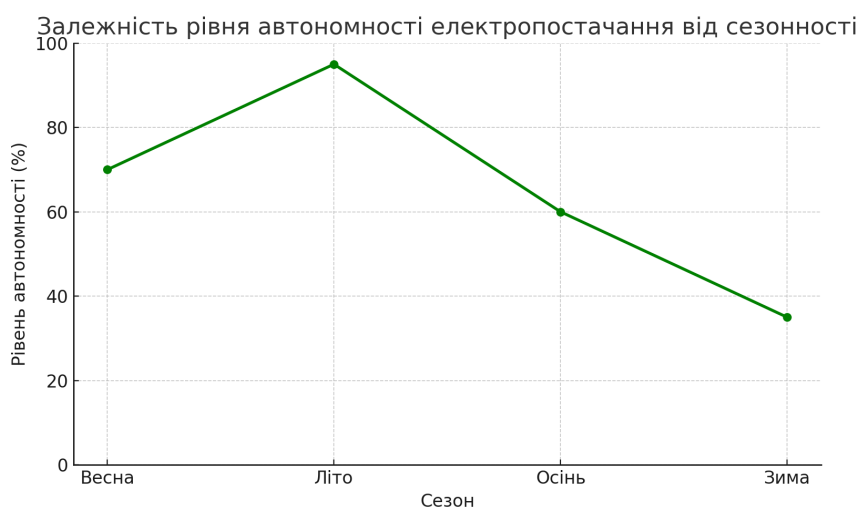


Рис. 1. Діаграма зміни рівня автономності електропостачання житлового будинку залежно від сезону

Система автоматично керує джерелами живлення залежно від наявності енергії в акумуляторах і потреб споживання. Розрізняють три основні режими роботи:

- Stand-by режим: мінімальне енергоспоживання (робота лише базових систем – охорона, холодильник, освітлення). Використовується в разі тривалої відсутності мешканців або енергетичної кризи.

- Стандартний режим: використовується накопичена енергія з акумуляторів, а за потреби – підключаються поновлювані джерела.

- Екстрений режим: при критичному зниженні заряду або несприятливих погодних умовах система автоматично вмикає резервний генератор (дизельний або газовий) або, за наявності, перемикається на зовнішнє електропостачання (наприклад, міську мережу).

Ці сценарії реалізуються без участі користувача, завдяки вбудованим алгоритмам реагування.

Дистанційний контроль та моніторинг

Система обладнана інтерфейсом дистанційного керування, який дозволяє власнику:

- Моніторити рівень генерації, заряд акумуляторів, стан споживання в реальному часі.

- Змінювати пріоритетність споживачів або режими роботи систем (наприклад, увімкнути економний режим під час відпустки).

- Отримувати повідомлення про несправності, перевантаження або відключення живлення.

Доступ до системи здійснюється через мобільний додаток або веб-інтерфейс, що працює в захищеному середовищі та підтримує авторизацію користувача.

Опис структури автономної кібер-фізичної системи житлового будинку

Автономна кібер-фізична система житлового будинку (КФС ЖБ) реалізована у вигляді автономного автоматизованого технологічного комплексу (ААТК ЖБ), який забезпечує енерго-незалежне функціонування як систем електропостачання, так і систем життєзабезпечення.

Структура ААТК ЖБ

ААТК ЖБ складається з двох основних підсистем:

- АТК системи автономного електропостачання (САЕ).

- АТК системи автономного життєзабезпечення (САЖ).

Система автономного електропостачання (САЕ)

Задача САЕ – забезпечити постійне електропостачання будівлі (постійне електроживлення

будівлі) незалежно від зовнішніх нештатних ситуацій і загроз.

Структура САЕ

- ФЦЕ – фідер центральної енергосистеми (резервне підключення до мережі).

- АСЕ – автономна сонячна електростанція.

- АВЕ – автономна вітряна електростанція.

- МПЕ – мобільний паливний електрогенератор (дизель/газ).

- СРЕ – система резервування електропостачання (акумулятори, стабілізатори).

Ці компоненти інтегруються в автоматизований технологічний комплекс (АТК) САЕ, який складається із самої САЕ та системи програмно-логічного управління (СПЛУ).

СПЛУ САЕ реалізована на базі автономних програмованих логічних контролерів (ПЛК), кожен з яких виконує роль ПОТ-пристрою.

До складу СПЛУ входять:

- СПЛУ/ПЛК ФЦЕ.

- СПЛУ/ПЛК АСЕ.

- СПЛУ/ПЛК АВЕ.

- СПЛУ/ПЛК МПЕ.

- СПЛУ/ПЛК СРЕ.

Загалом – 5 ПЛК, які взаємодіють через Industrial Ethernet і підтримують протоколи OPC-UA та MQTT.

Система автономного життєзабезпечення (САЖ)

Задача САЖ – забезпечити постійне життєзабезпечення будівлі (постійну роботу інженерних систем будівлі) незалежно від зовнішніх нештатних ситуацій і загроз.

Структура САЖ

- ЦЕК – центральний електричний котел.

- СПП – система підігріву підлоги.

- СРО – система радіаційного опалення.

- СГВП – система гарячого водопостачання.

- СВК – система водопостачання і каналізації.

Як і у випадку з САЕ, САЖ реалізується в складі АТК САЖ, що містить відповідну систему автоматичного управління (САУ) з 5 ПЛК, кожен із яких є автономним ПОТ-вузлом.

До складу САУ входять:

- САУ/ПЛК ЦЕК.

- САУ/ПЛК СПП.

- САУ/ПЛК СРО.

- САУ/ПЛК СГВП.

- САУ/ПЛК СВК.

Інтегрована структура ААТК ЖБ

Загальна архітектура ААТК ЖБ передбачає поєднання технологічних об'єктів управління

(ТОУ ЖБ) та автоматизованої системи управління (АСУ ЖБ).

До складу АСУ ЖБ входять:

- СПЛУ САЕ.
- САУ САЖ.
- Систему технічної діагностики (СТД).
- Систему адаптації параметрів (САП).

Система технічної діагностики (СТД ТОУ ЖБ)

Реалізована у вигляді хмарної платформи з використанням цифрового двійника (ЦД ЖБ).

Містить експертну систему управління (ЕСУ), яка використовує дедуктивне машинне навчання для прогнозування несправностей, оптимізації ресурсів та передачі керуючих впливів.

Система адаптації параметрів (САП АСУ ЖБ)

САП забезпечує самоналаштування локальних підсистем на основі індуктивного машинного навчання.

Структури САП

- Системи екстремального управління (СЕУ) – реалізують градієнтний пошук оптимальних значень техніко-економічних параметрів (ТЕП), наприклад, за допомогою:

- Позиціонування сонячних панелей (АСЕ) по відношенню до сонця.
- Адаптивне регулювання кута атаки лопатей вітрових установок (АВЕ).
- Системи автотюнінгу регуляторів (САТ) – здійснюють автоматичне налаштування регуляторів у процесі роботи об'єкта управління (ОУ).

Центральний ПЛК – граничний пристрій

У системі використовується центральний граничний ПЛК, який є концентратором даних і координатором локальних ПЛК.

Функціональність центрального ПЛК

- Реалізований як промисловий ПК з CoDeSys 3.5 (софтПЛК).
- Підтримує HIL-моделювання АТК, OPC-UA, MQTT, Industrial Ethernet (до 1024 м через маршрутизатори).
- Інтегрований із хмарною HMI/SCADA-системою AVEVA System Platform та хмарним архіватором даних.

Режими управління в КФС ЖБ

Система підтримує декілька рівнів та режимів керування.

Для експертної системи (ЕСУ):

- ПЦУ (пряме цифрове управління) – граничний ПЛК автоматично передає уставки до локальних ПЛК.
- ПОР (режим порадики) – оператор перевіряє та дозволяє передавання уставок від ЦД.

Для систем автотюнінгу (САТ):

- АВТ (автоматичний) – ПЛК автономно керують виконавчими механізмами (ВМ) згідно з уставками.

- НАВ (напівавтоматичний) – оператор задає уставки, ПЛК керують ВМ.

- РУЧН (ручний) – оператор напряму керує ВМ, минаючи ПЛК.

Цей опис демонструє складність, гнучкість і масштабованість автономної КФС житлового будинку як кібер-фізичної платформи нового покоління для енергоефективного та стабільного проживання.

Аналіз ефективності КФС ЖБ

Ефективність запропонованої кібер-фізичної системи житлового будинку (КФС ЖБ) оцінюється за кількома ключовими критеріями: енергетична автономність, економічна доцільність, технічна надійність, масштабованість та адаптивність до змін середовища.

Енергетична автономність КФС ЖБ

Завдяки використанню відновлюваних джерел енергії (сонячні панелі, вітрові генератори) та систем накопичення енергії:

- Рівень автономності у літній період сягає 80–100% (за сприятливих погодних умов).
- У зимовий період або при пікових навантаженнях автономність зберігається на рівні 60–75% завдяки підключенню резервних джерел живлення.
- Інтелектуальна система управління забезпечує оптимальний баланс між генерацією, споживанням і накопиченням енергії, мінімізуючи втрати.

Економічна ефективність КФС ЖБ

Техніко-економічні показники інсталяції АСУ ЖБ враховують інвестиції в обладнання і експлуатацію та очікуваний термін його служби (від 10 до 20 років):

- Термін окупності системи: від 5 до 8 років залежно від конфігурації та цін на енергоносії. Нижче на рис. 2 наведений графік окупності для трьох різних типів систем електропостачання.
- Скорочення витрат на електроенергію: до 70% на рік у порівнянні з традиційним підключенням до мережі.
- Вартість обслуговування значно зменшується завдяки системам самодіагностики та віддаленого моніторингу.

Автономна КФС, попри вищі початкові витрати, окупається приблизно за 7–8 років, що робить її вигідною інвестицією в довгостроковій перспективі порівняно з іншими системами.

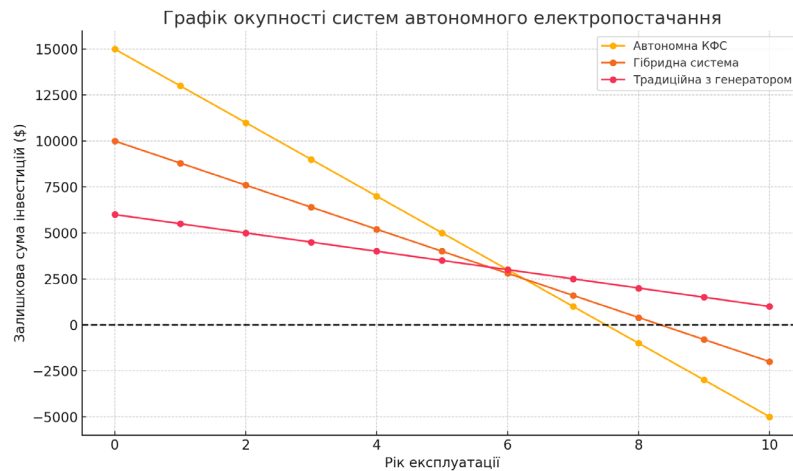


Рис. 2. Графік окупності для трьох типів систем електропостачання

Технічна надійність КФС ЖБ

- Кожен функціональний модуль системи має резервування критичних елементів (джерела живлення, мережеві вузли, сенсори).
- Вбудовані алгоритми діагностики (СТД + ЦД + ЕСУ) дозволяють заздалегідь виявляти потенційні збої та планувати технічне обслуговування.
- Використання IoT-архітектури та модульного підходу забезпечує стійкість до локальних збоїв і можливість гарячої заміни компонентів.

Адаптивність і масштабованість КФС ЖБ

- Система підтримує адаптацію до змінних кліматичних, експлуатаційних і поведінкових умов, завдяки САП (CEU + CAT), які реалізують індуктивне машинне навчання.
- Архітектура дозволяє масштабування – як горизонтальне (додавання нових зон чи модулів), так і вертикальне (інтеграція з міськими або регіональними енергомережами).
- Протоколи обміну (OPC-UA, MQTT) та хмарна SCADA-платформа дозволяють інтегрувати систему в єдине цифрове середовище «розумного міста».

Екологічна ефективність КФСЖБ

Екологічна ефективність є невід'ємною складовою профілю автономного житлового будинку.

Джерела екологічної ефективності:

- Скорочення споживання викопного палива та зменшення викидів CO₂ – до 2–4 тонн на рік для одного будинку середнього розміру.
- Використання чистих джерел енергії відповідає принципам сталого розвитку та екологічної відповідальності.

КФС система автономного електропостачання та життєзабезпечення демонструє високий рівень техніко-економічної ефективності, забезпечуючи:

- Енергетичну незалежність користувача.
- Зниження експлуатаційних витрат.
- Надійність та безперервність життєзабезпечення навіть у позаштатних умовах.
- Гнучкість та адаптивність до змін зовнішнього середовища.

Нижче в табл. 1 представлена порівняльна характеристика ефективності систем електропостачання. Таблиця демонструє переваги автономної кібер-фізичної системи (КФС), зокрема високий рівень автономності, екологічності, економічності та гнучкості управління в порівнянні з іншими варіантами.

Таким чином, впровадження подібних систем у житловому будівництві є доцільним і стратегічно важливим кроком до підвищення енер-

Таблиця 1

Порівняльна таблиця ефективності систем електропостачання

Показник	Автономна КФС	Гібридна система	Традиційна система
Інтегрованість	10	7	4
Консолідованість	10	6	3
Адаптивність	9	6	3
Окупність (років)	7	8	5
Рівень автономності (%)	85	60	40
Екологічність (1-10)	9	7	3

гетичної безпеки та цифрової трансформації інфраструктури.

Нижче на рис. 3 наведена структура КФС ЖБ (яка реалізує принцип комплексної автоматизації житлового будинку). Структура КФС ЖБ є універсальною і забезпечує автономність ЖБ від зовнішніх нештатних ситуацій і загроз техногенного і воєнного характерів.

В структурній схемі КФС ЖБ використані наступні позначення:

- САЕ – Система автономного електропостачання, до складу якої входять: ФЦЕ – Фідер центральної енергосистеми. АСЕ – Автономна сонячна електростанція. АВЕ – Автономна вітряна електростанція. МПЕ – Мобільний паливний електрогенератор. СРЕ – Система резервування електропостачання.

- САЖ – Система автономного життєзабезпечення, до складу якої входять: ЦЕК – Центральний електричний котел. СПП – Система підігріву підлоги. СРО – Система радіаційного опалення. СГВП – Система гарячого водопостачання. СВК – Система вентиляції і кондиціонування.

Розроблена структура КФС ЖБ забезпечує стабільне електропостачання і безлюдне функціонування інженерних систем життєзабезпечення житлового будинку.



Рис. 3. Схема структурна автономної КФС ЖБ

Висновки. У ході розробки було створено модель автономної кібер-фізичної системи житлового будинку (КФС ЖБ), що реалізує принципи комплексної автоматизації – глибоко

інтегрованої автоматизації як технологічних процесів (систем електропостачання та життєзабезпечення), так і функціональних бізнес-процесів, спрямованих на управління ресурсами, звітністю та прогнозуванням.

Комплексна автоматизована система управління (КАСУ)

Розроблена КФС ЖБ відповідає сучасній парадигмі КАСУ – комплексної автоматизованої системи управління масштабу об'єкта.

Основні ознаки реалізованої КАСУ:

- Інтегрованість: усі підсистеми, зокрема САЕ (автономне електропостачання) та САЖ (життєзабезпечення), охоплені автоматизованим керуванням за єдиною архітектурою.

- Консолідованість: поєднання цифрового двійника (ЦД) об'єкта з експертною системою управління (ЕСУ) дозволяє реалізувати активну систему технічної діагностики (СТД ТОУ) [9].

- Адаптивність: автономна система адаптації параметрів (САП), що містить системи екстремального управління (СЕУ) та системи автотюнінгу (САТ), забезпечує динамічну оптимізацію параметрів у реальному часі.

Досягнутий ефект від інсталяції КАСУ

Синергетичний ефект досягається за рахунок об'єднання даних усіх підсистем в єдине інформаційно-аналітичне середовище, що дозволяє:

- підвищити енергоефективність роботи будинку (через погоджене керування САЕ і САЖ);

- покращити точність діагностики стану обладнання;

- зменшити потребу в людському втручанні (режими ПЦУ та АВТ).

Кумулятивний ефект проявляється у забезпеченні бізнес-тріади «звітність – аналітика – планування» для власника будівлі, що досягається завдяки:

- автоматизованому збору, зберіганню і візуалізації даних через хмарну SCADA-платформу;

- використанню алгоритмів машинного навчання для прогнозування навантажень і адаптації систем;

- створенню цифрового близнюка як бази для симуляцій, аналізу та прийняття рішень.

ААТК ЖБ як платформа цифровізації ЖБ

Автоматизована архітектура ААТК ЖБ реалізує платформу комплексної автоматизації, яка об'єднує:

- Інформаційні технології (ІТ): хмарна SCADA, ЦД, мобільний інтерфейс управління, машинне навчання;

• Операційні технології (ОТ): ПоТ-пристрої, ПЛК, автономні об'єкти управління, інтелектуальні регулятори.

Загальний висновок щодо комплексної автоматизації автономного ЖБ

Комплексна автоматизація – інтегрована автоматизація технологічних процесів і бізнес-процесів підприємства. Комплексна АСУ (КАСУ) – інтегрована АСУ масштабу підприємства. Синергетичний ефект – інтегральна (системна) ефективність більша за суму ефектів компонентів (консолідація і агрегація даних). Кумулятивний ефект – цільова ефективність – бізнес-тріада «звітність – аналітика – планування», зорієнтована на власника. Платформа комплексної автоматизації – цифровізація підприємства = інформаційні технології + операційні технології. Маркери КАСУ: 1) інтегрованість (автоматизація усіх технологічних і бізнес процесів); 2) консолі-

дованість (СТД ТОУ = ЦД ТОУ + ЕСУ); 3) адаптивність (СМН = СЕУ + САТ).

Запропонована структура кібер-фізична системи дозволяє забезпечити стабільне, автономне, енергоефективне функціонування житлового будинку, орієнтоване на довгострокову надійність, зниження витрат і цифрову трансформацію інфраструктури.

Таким чином, модель КФС ЖБ може бути використана як референтна архітектура для проектування «розумних будинків» та об'єктів критичної інфраструктури, здатних функціонувати у відриві від центральних мереж і людського втручання.

На стадії проектування функціональність КАСУ моделюється і тестується в програмно-технічному симуляторі промислових АТК [10]. Для апроксимації динаміки ОУ використовуються інваріантні моделі об'єктів управління і універсальні структури ПД-регуляторів [11].

Список літератури:

1. Ткаченко П.М., Іванов Ю.В. Енергетичні системи з відновлюваними джерелами енергії. Харків : ХНУРЕ, 2020. 278 с.
2. Khoa, N.T., & Lee, M. IoT-based Energy Management for Smart Buildings with Renewable Sources and Battery Storage. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 170, P. 203–216.
3. Khalil, H., & Zaytoon, J. Smart Home Energy Management Systems: A Review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. Vol. 15 (2), P. 1221.
4. Ковтун В.І. Системи автоматизації житлових будинків: сучасні рішення та перспективи розвитку. Львів : ЛНУ, 2022. 198 с.
5. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування : підручник. Київ : Либідь, 2007. 656 с.
6. Баранов С.А., Ковальов Д.О. Автоматизовані системи управління: принципи побудови та приклади реалізації. Київ : Наукова думка, 2021. 312 с.
7. Novikov, P., Shtifzon, O., Bunke, O., & Batiuk, S. Selecting a method for the parametric adaptation of pi-controller in the control systems of boiler assemblies at thermal power stations with supercritical parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. 2, 2(116). P. 61-68. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254116>.
8. Батюк С.Г., Ковриго Ю.М., Бунь В.П. Порівняльний аналіз класичного і некласичного підходів до створення АСУ ТП в енергетиці на основі сучасних ПТК. *Наукові вісті НТУУ КПІ*. 1999. № 2. С. 40–48.
9. Пастухов А.В., Литвиненко В.С. Системи технічної діагностики в енергетиці. Дніпро : НГУ, 2021. 245 с.
10. Batiuk S.G. Simulation modeling and digital twinning of energy cyber-physical systems (cyber-energy systems). *Achievements of Ukraine and EU countries in technological innovations and invention : collective monograph*. Riga : Baltija Publishing, 2022. P. 44–109. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8>. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8-2>.
11. Батюк С.Г., Васянович В.М., Воронюк М.В., Ворошилов А.І. Інваріантні моделі об'єктів управління і універсальні структури ПД-регуляторів в імітаційному моделюванні теплоенергетичних систем автоматичного регулювання. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35 (74). № 6. Частина 2. С. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/01>.

Batiuk S.G., Voroniuk M.V. TASK OF COMPREHENSIVE AUTOMATION OF A RESIDENTIAL BUILDING AS AN AUTONOMOUS CYBER-PHYSICAL SYSTEM

The article is devoted to the development of the structure of the cyber-physical system of an autonomous residential building. The autonomy of a residential building is ensured by the autonomy of the power supply system and the autonomy of the life support system of the residential building.

It is demonstrated that an effective solution is the implementation of an automated system of autonomous power supply and life support, which allows for the effective use of alternative energy sources, accumulation and distribution of electricity using modern technologies.

It is determined that the tasks of an effective automated system for managing engineering systems of power supply and life support as part of the cyber-physical system of a residential building should be the tasks of complex automation of a residential building.

The definition of complex automation is formulated as an integrated automation of technological processes and business processes of an enterprise. A complex automated control system is an integrated automated management system of the enterprise scale. The synergistic effect of complex automation is an integral (system) efficiency greater than the sum of the effects of the components (data consolidation and aggregation). The cumulative effect of complex automation is target efficiency – implementation of the business triad “reporting – analytics – planning”, focused on substantiating decision-making by the owner. The platform of complex automation is the digitalization of the enterprise, which combines information technologies and operational technologies (automation technologies). The markers of complex automation are determined: 1) integration (automation of all technological and business processes); 2) consolidation (implementation of the business triad “reporting – analytics – planning”); 3) adaptability (extreme control systems and auto-tuning of regulators of automatic regulation systems).

The structure of the automated system of autonomous power supply and life support of a residential building has been developed, which ensures stable power supply and unmanned operation of engineering systems of life support of a residential building. The developed structure of the automated system of management of engineering systems of a residential building implements the ideology of complex automation of technological processes formulated by the authors.

Key words: *thermal energy, engineering systems of buildings, autonomous power supply of a residential building, autonomous life support of a residential building, automation of technological processes, automation of thermal energy processes, automation of engineering systems of a residential building, complex automation, cyber-physical system, automated control system, automatic regulation system, information and measuring system, system of program-logic control, software-technical means of automation, controller functionality, supervisory functionality, digital twin, edge device, Internet of Things, simulation modeling, functional modeling, structural modeling, parametric adaptation.*