УДК 692.23:004.9:620.9

В. В. Любич

А.Б. Кукленко

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТА «РОЗУМНІ» ФАСАДНІ СИСТЕМИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто адаптивний фасад як керовану систему взаємодії будівлі із зовнішнім середовищем. Запропоновано структуру керування сонцезахистом і оптичними властивостями огородження з урахуванням енергоспоживання, теплового комфорту та природного освітлення. Визначено вимоги до базового сценарію, безпечного стану й оцінювання ефекту за життєвим циклом.

Ключові слова: адаптивний фасад, сонцезахист, автоматизоване керування, природне освітлення, теплова оболонка.

Abstract

An adaptive façade is considered as a controlled interface between a building and its outdoor environment. A control framework for shading and envelope optical properties is proposed, accounting for energy use, thermal comfort and daylight. Baseline selection, a safe fallback state and life-cycle appraisal requirements are identified.

Keywords: adaptive façade, solar shading, automated control, daylight, building envelope.

Вступ

Фасад визначає не лише зовнішній вигляд будівлі, а й характер теплообміну, сонячних надходжень та природного освітлення. Статичне огородження має незмінні властивості, тоді як зовнішні умови й потреби користувачів змінюються протягом доби. Адаптивні рішення дозволяють реагувати на ці зміни, але сам факт установлення датчиків не гарантує зменшення витрат енергії. Мета роботи — обґрунтувати структуру керування фасадом і критерії, за якими його можна оцінити як функціонально інтелектуальний.

Результати дослідження

Кліматично адаптивна оболонка змінює характеристики відповідно до зовнішніх умов [1]. До керованих елементів належать жалюзі, екрани та скління зі змінним пропусканням. Електрохромні системи змінюють оптичний стан без переміщення екрана [2]. Технології слід порівнювати за діапазоном регулювання, інерційністю та обслуговуванням.

Пропонується розглядати інтелектуальний фасад через чотири взаємопов’язані компоненти: вимірювання, оцінювання стану, вибір дії та перевірку результату. Вхідними даними можуть бути сонячна радіація на відповідній орієнтації, зовнішня й оперативна внутрішня температура, освітленість та зайнятість приміщення. Положення екрана або стан скління змінюються не за одним датчиком, а з урахуванням режиму будівлі. Контроль положення приводу потрібний для виявлення ситуацій, коли команда не виконана.

Узимку надмірне затінення може збільшувати потребу в опаленні й освітленні, а влітку недостатній сонцезахист — навантаження на охолодження. Тому однакова програма на весь рік не відповідає завданню адаптації. Для приміщень з різною орієнтацією та функцією слід формувати окремі зони керування. Мінімальні умови теплового комфорту, освітлення й захисту від засліплення доцільно задавати як обов’язкові обмеження, а не компенсувати їх порушення умовною економією.

Серед режимів, які задовольняють ці обмеження, пропонується мінімізувати сумарне електроспоживання інженерних систем за розрахунковий період:

$$J = E_{heat} + E_{cool} + E_{light} + E_{drive} \rightarrow min$$

де Eheat, Ecool, Elight — електроенергія опалення, охолодження та освітлення; Edrive — енергія приводів і керування. Такий запис застосовний за електричних систем відповідного призначення. За наявності різних енергоносіїв потрібне приведення до єдиної бази порівняння або окреме подання кожного виду енергії. Просте додавання теплової й електричної енергії без пояснення меж оцінювання може приховувати різну ефективність перетворення.

Практичний алгоритм може працювати за коротким прогнозом: на кожному кроці розглядаються доступні стани фасаду, перевіряються обмеження, обирається режим з найменшими витратами й контролюється фактичний результат. Для запобігання частому перемиканню задаються мінімальна тривалість стану або гістерезис. У разі сильного вітру зовнішній сонцезахист переходить у передбачений виробником безпечний стан. Втрата зв'язку, відмова датчика та можливість ручного втручання мають бути опрацьовані до введення в експлуатацію.

Ефект автоматики слід оцінювати за однакових погодних умов і графіка користування. Порівняння лише з незатіненим фасадом може завищувати перевагу системи. Базовими альтернативами мають бути належний пасивний сонцезахист, керування за розкладом та адаптивний режим. Для кожного визначаються споживання енергії й години порушення комфортних умов.

Smart Readiness Indicator пов'язує цифрові функції з ефективністю, потребами користувачів і взаємодією з енергосистемою [3]. Оцінка готовності не замінює вимірювання економії. Витрати життєвого циклу фасаду повинні включати заміну датчиків, обслуговування приводів і підтримку автоматики. Потрібні також ручне керування та працездатний резервний режим.

Розрахункові сценарії та оцінювання ефективності

Розрахункове порівняння фасадних систем пропонується виконувати за однакової будівлі, змінюючи лише тип і логіку роботи оболонки. Базовий варіант повинен мати належний пасивний сонцезахист, а не свідомо погіршені характеристики. Другий варіант може використовувати керування за розкладом, третій — адаптацію за вимірюваннями або прогнозом. Для кожного слід визначати енергію окремих інженерних систем та якість внутрішнього середовища. Якщо геометрія, зайнятість або температурні завдання змінюються разом із фасадом, додатковий ефект автоматики неможливо достовірно відокремити.

Для контролю прийнятності режиму доцільно визначати сумарну тривалість порушення хоча б однієї погодженої умови:

$$H_{bad} = \sum_{t=1}^{N} I_{bad,t}\, \Delta t$$

де Ibad,t дорівнює одиниці, якщо в інтервалі t порушено погоджену вимогу до температури або освітлення, і нулю в інших випадках; Δt — тривалість інтервалу. Величина Hbad є об'єднаною тривалістю, тому одночасне порушення двох умов не зараховується двічі. Для діагностики слід також подавати окремі температурні та світлотехнічні показники. Межі визначаються призначенням приміщення та прийнятими вимогами, а не підбираються після розрахунку. Мінімізація енергії має виконуватися серед режимів, для яких ці обмеження забезпечені.

В умовному прикладі річні електровитрати опалення, охолодження, освітлення й приводів для фіксованого фасаду становлять 12; 8; 5 та 0 МВт·год, разом 25 МВт·год. Керування за розкладом дає 12; 6; 5,5 та 0,1 МВт·год, разом 23,6 МВт·год. Для адаптивного режиму прийнято 12,5; 4,8; 5,7 та 0,2 МВт·год, разом 23,2 МВт·год. Отже, додаткове зменшення відносно розкладу дорівнює 0,4 МВт·год. Аналіз лише охолодження показав би значно більшу перевагу й приховав би одночасне збільшення інших складових. Усі наведені значення є демонстраційними, а не результатом натурного дослідження фасаду.

Фінальний вибір потребує перевірки Hbad для кожного режиму. Якщо встановлене завдання допускає не більше 40 годин порушень, а умовні результати становлять 44, 36 і 28 годин, перший варіант не відповідає цьому завданню. Водночас перевага третього над другим оцінюється і за енергією, і за якістю середовища. Наведена межа використана лише як приклад процедури вибору та не є універсальною нормативною вимогою. Для реального об'єкта необхідно застосовувати показники й допустимі значення, що відповідають його функції та погодженим умовам експлуатації.

Додатковою характеристикою алгоритму є кількість фактичних змін дискретного стану керованого елемента:

$$N_{sw} = \sum_{t=2}^{N} I_t$$

де Nsw — кількість перемикань; It — одиничний індикатор зміни стану між сусідніми інтервалами; N — число інтервалів. Показник придатний для дискретних станів, наприклад заданих положень екрана або режимів скління. Для безперервного приводу додатково потрібні амплітуди й траєкторія переміщень. Однакове число команд не гарантує однакового механічного навантаження. Команди, які не виконані, слід відокремлювати від фактичних переходів за даними зворотного зв'язку, інакше журнал керування не відображатиме реального стану фасаду.

Для перевірки стійкості алгоритму доцільно порівняти результати за різного кроку керування та різної ширини зони нечутливості. Занадто чутлива реакція на короткі коливання освітленості може збільшувати число перемикань без помітної річної економії. Надто велика затримка, навпаки, може погіршувати умови в приміщенні. Параметри необхідно добирати за спільним аналізом енергії, Hbad та Nsw. Визначення мінімуму лише одного показника не описує належної роботи системи. Для відтворюваності слід зберігати правила зміни стану та порядок дій за відсутності сигналу датчика.

Реакцію на відмови пропонується перевіряти окремою серією сценаріїв: втрата центрального зв'язку, некоректний сигнал, зупинка приводу та відновлення живлення. Для кожного випадку встановлюється прийнятний стан оболонки й доступність ручного керування. Після відновлення системи потрібне зіставлення фактичного положення елементів із програмним завданням. Перевірка має охоплювати не лише передавання команди, а й завершення фізичної дії. Це дозволяє оцінювати працездатність фасаду як цілого та визначити, які функції залишаються доступними за часткової втрати автоматизації.

Остаточне рішення слід пов'язувати з витратами життєвого циклу. Невеликий додатковий енергетичний результат складної автоматики може поєднуватися з цінним поліпшенням комфорту, однак ці вигоди мають бути показані окремо. Потрібно враховувати доступ до приводів, заміну датчиків, налаштування та підтримку керування. Для міських громадських будівель важлива наявність персоналу, здатного підтримувати запропонований режим. Тому інтелектуальність фасаду доцільно підтверджувати вимірюваним результатом і відновлюваною працездатністю, а не кількістю цифрових пристроїв у специфікації.

Практична реалізація та перевірка результатів

Для практичного проєктування пропонується починати з розподілу фасаду на зони, що мають подібні умови сонячного опромінення та користування приміщеннями. Однаковий алгоритм для північного й західного фасадів може створювати різні результати, а усереднений сигнал із будівлі приховувати локальний дискомфорт. Для кожної зони необхідно визначити керовані елементи, доступні вимірювання та відповідального оператора. Такий опис дозволяє пов'язати архітектурне рішення з реальною структурою автоматизації та уникнути встановлення функцій, результат яких надалі неможливо перевірити.

Формування завдання на керування має включати межі температури, освітленості, допустимого засліплення та технічного стану приводів. Ці умови задають множину прийнятних режимів, усередині якої порівнюються енерговитрати. Важливо передбачити пріоритет безпеки за сильного вітру, обмерзання або відмови датчика. Перехід до безпечного положення може тимчасово збільшити споживання, але це не є підставою для його скасування. У звіті такі інтервали слід відокремлювати від штатної оптимізації, щоб правильно пояснити причини зміни підсумкового результату.

Доцільно порівняти щонайменше три способи роботи: фіксований стан оболонки, керування за розкладом і керування за вимірюваннями або коротким прогнозом. Для всіх варіантів мають застосовуватися однакові погодні дані, графіки зайнятості та вимоги до комфорту. Порівняння лише з явно нераціональним режимом завищує привабливість складної автоматики. Належний пасивний сонцезахист слід розглядати як самостійну альтернативу. Додаткові капітальні й експлуатаційні витрати інтелектуальної системи повинні зіставлятися з її додатковим результатом відносно цієї альтернативи.

Алгоритм керування пропонується перевіряти не тільки за підсумковою енергією, а й за послідовністю команд. Надмірна кількість перемикань може бути ознакою нестійкої логіки або чутливості до шуму вимірювання. Для її обмеження задаються мінімальний час утримання стану та допустима зона нечутливості. Окремо аналізується затримка між командою і фактичним положенням елемента. Якщо результат керування підтверджується лише переданим сигналом, система не виявлятиме заклинювання або втрату зв'язку з приводом. Тому зворотний контроль стану є важливою частиною практичної перевірки.

Поведінка користувачів повинна бути включена до сценаріїв експлуатації. Ручне керування потрібне для локальних потреб, але його тривале використання може змінювати запланований режим усієї зони. Доцільно встановити зрозумілий порядок повернення до автоматики та реєструвати частоту ручних змін. Це дозволяє відрізнити похибку моделі від невідповідності алгоритму фактичним умовам роботи. Інтерфейс має пояснювати поточний стан і причину обмеження без надлишкових технічних подробиць. Якість взаємодії з користувачем слід оцінювати поряд із технічними показниками системи.

Для оцінювання фактичного ефекту необхідний узгоджений облік енергії опалення, охолодження, освітлення та приводів. Показники за різних погодних умов потребують приведення до зіставної основи. Окремо слід фіксувати години порушення прийнятих умов комфорту, відмови й періоди відключення автоматики. Якщо режим заощаджує енергію завдяки погіршенню освітленості або температури, він не може вважатися рівноцінною альтернативою. Для приміщень різного призначення підсумки варто подавати окремо, оскільки загальне середнє значення може приховувати проблемні зони.

Витрати життєвого циклу пропонується оцінювати з урахуванням очищення, доступу до елементів, заміни приводів і датчиків та підтримки програмної частини. Бажано передбачити можливість експлуатації фасаду в прийнятному резервному режимі після відмови центрального керування. Для реконструкції необхідно окремо перевіряти сумісність нових елементів з існуючим огородженням і можливості їх обслуговування. Масштабування рішення доцільне після апробації на окремій зоні протягом характерних сезонів. Така послідовність пов'язує поняття інтелектуального фасаду з підтвердженою якістю роботи, а не тільки з переліком установленої автоматики.

Висновки

Інтелектуальність фасадної системи визначається якістю узгодження її реакцій з потребами будівлі. Запропонований підхід ставить комфорт і безпечну роботу як обов'язкові умови, а енергоспоживання — як критерій вибору серед допустимих режимів. Для українських об'єктів доцільне зональне впровадження з подальшим моніторингом. Рішення слід приймати за підтвердженим ефектом протягом року й витратами життєвого циклу, включно з обслуговуванням.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Loonen R. C. G. M., Trčka M., Cóstola D., Hensen J. L. M. Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 25. P. 483–493. DOI: 10.1016/j.rser.2013.04.016

2. Granqvist C. G. Electrochromics for smart windows: Oxide-based thin films and devices. Thin Solid Films. 2014. Vol. 564. P. 1–38. DOI: 10.1016/j.tsf.2014.02.002

3. Commission Delegated Regulation (EU) 2020/2155 of 14 October 2020 establishing an optional common European Union scheme for rating the smart readiness of buildings. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2020/2155/oj/eng (дата звернення: 15.10.2026).

Любич Володимир Володимирович — аспірант, асистент кафедри промислового та цивільного будівництва, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: mr.lyubich1988@gmail.com.

Кукленко Аліна Богданівна — студентка групи 1Б-23б, Факультет будівництва цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: kuklenkoalina6@gmail.com.

Liubych Volodymyr Volodymyrovych — PhD student, Assistant at the Department of Industrial and Civil Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mr.lyubich1988@gmail.com.

Kuklenko Alina B. — student of group B-23b, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kuklenkoalina6@gmail.com.