

УДК 721.012:69.001.5:697.1

Чудик І. І., *д-р. техн. наук, професор*, <https://orcid.org/0000-0002-7402-6962>**Яценко О. Ф.**, *канд. арх., доцент*, <https://orcid.org/0000-0001-6181-6597>**Цих В. С.**, *канд. техн. наук, доцент*, <https://orcid.org/0000-0002-9095-4099>**Лейбюк Б. В.**, <https://orcid.org/0009-0001-8275-3561>*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна*

АДАПТИВНІ АРХІТЕКТУРНО-БУДІВЕЛЬНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ГІБРИДНОГО ВИКОРИСТАННЯ В УМОВАХ КРИЗИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ

Анотація

Вступ. Глобальна енергетична криза, загострена геополітичною нестабільністю, обумовила необхідність кардинального перегляду принципів функціонування будівельного сектора – одного з найбільших споживачів енергоресурсів. Традиційні підходи до проектування, орієнтовані на статичні умови експлуатації, виявляються неефективними в умовах гострої нестачі енергії та динамічної зміни функціональних потреб суспільства. Наявні архітектурно-будівельні системи не забезпечують необхідного рівня адаптації до зовнішніх кліматичних чинників і внутрішніх функціональних вимог, особливо в контексті гібридного використання просторів, що поєднує житлові, комерційні та громадські функції.

Мета дослідження полягає у розробленні концептуальних засад і методології проектування адаптивних архітектурно-будівельних систем, спрямованих на забезпечення енергетичної стійкості та функціональної гнучкості об'єктів в умовах кризи енергетичного комплексу.

Матеріали та методи. Дослідження ґрунтується на системному аналізі сучасних технологічних рішень для адаптивної архітектури, включаючи динамічні фасадні системи, матеріали зі змінними властивостями та інтелектуальні системи управління енергоспоживанням. Використано компаративний метод для оцінки ефективності різних підходів, моделювання енергетичних потоків для кількісної перевірки гіпотез та експертне оцінювання для валідації запропонованої методології.

Результати. Запропоновано класифікацію адаптивних систем за критеріями об'єкта впливу (опалубка, огорожувальні конструкції, інженерні мережі) та типу адаптації (пасивна, активна, гібридна). Розроблено багаторівневу модель інтегрованого проєктування, що поєднує: (1) аналіз контексту та вимог гібридного використання; (2) вибір оптимальних адаптивних технологій; (3) інтеграцію з системами автоматизованого управління (BIM, IoT); (4) оцінку енергоефективності та економічної доцільності. Встановлено, що впровадження запропонованих рішень дозволяє знизити енергоспоживання об'єкта на 30–45 % порівняно з традиційними аналогами та забезпечити швидку адаптацію простору до змінних функціональних потреб.

Висновки. Обґрунтовано доцільність переходу від статичних до динамічних принципів архітектурного проєктування в умовах енергетичної кризи. Запропонована методологія дозволяє створити архітектурно-будівельні системи, здатні адаптуватися до зовнішніх умов і внутрішніх потреб, забезпечуючи енергетичну стійкість і функціональну універсальність. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення детальних стандартів для адаптивних систем та їхню інтеграцію із системами «розумного міста».

Ключові слова: адаптивна архітектура, гібридне використання, динамічні фасадні системи, інтелектуальне управління будівлею, енергетична криза, енергоефективність, стійкий розвиток.

Вступ

Сьогоденний етап розвитку суспільства характеризується поглибленням глобальних енергетичних дисбалансів, зумовлених як обмеженістю ресурсів, так і геополітичною нестабільністю. Енергетична криза, що загострилася в останні роки, стала каталізатором переосмислення принципів функціонування ключових секторів економіки, серед яких будівельна галузь займає одне з провідних місць за обсягами споживання енергоресурсів [1]. За даними Міжнародного енергетичного агентства, на будівлі припадає понад 30 % світового кінцевого споживання енергії та майже 40 % викидів CO₂, пов'язаних з енергетикою [2]. В умовах України ця проблема посилюється наслідками воєнних дій, які призвели до руйнування критичної інфраструктури та загострення дефіциту енергоносіїв, актуалізуючи потребу в швидкій відбудові з одночасною реалізацією принципів енергетичної стійкості [3].

Традиційні підходи до архітектурного проектування, орієнтовані на статичні умови експлуатації та лінійні функціональні сценарії, виявляються неефективними в умовах динамічної зміни зовнішніх і внутрішніх чинників. Необхідність гібридного використання просторів, що поєднує житлові, комерційні, офісні та громадські функції, стає новою нормою, обумовленою соціально-економічними зрушеннями, зокрема розвитком віддаленої роботи та потребою оптимізації використання міської інфраструктури [4]. Наявні архітектурно-будівельні системи не забезпечують необхідного рівня адаптації ні до зовнішніх кліматичних чинників, ні до внутрішніх функціональних вимог, що призводить до надмірного енергоспоживання та низького рівня комфорту.

Світовий досвід демонструє зростання інтересу до концепції адаптивної архітектури (Adaptive Architecture), яка передбачає створення будівель і конструкцій, здатних змінювати свої характеристики у відповідь на зовнішні умови та внутрішні потреби [5]. Основним драйвером розвитку цього напрямку є поява нових матеріалів зі змінними властивостями (фази зміни стану, фотохромні матеріали), динамічних фасадних систем, а також технологій інтелектуального управління (BIM, IoT) [6, 7]. Однак, більшість досліджень присвячена окремим технологічним рішенням, тоді як комплексний підхід до проектування адаптивних систем саме для умов гібридного використання в контексті енергетичної кризи залишається недостатньо вивченим.

Мета дослідження полягає в розробленні концептуальних засад і методології проектування інтегрованих адаптивних архітектурно-будівельних систем, спрямованих на забезпечення енергетичної стійкості, функціональної гнучкості та підвищення якості середовища в умовах гострої нестачі енергоресурсів.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні **завдання**:

1. Проаналізувати сучасний стан і виклики енергетичного комплексу для архітектурно-будівельної галузі.
2. Дослідити та класифікувати наявні адаптивні архітектурно-будівельні системи та технології.
3. Розробити принципи інтеграції адаптивних систем для забезпечення гібридного використання просторів.
4. Запропонувати методологію проектування та критерії оцінювання ефективності таких систем.
5. Провести кількісну оцінку потенційного енергозбереження та економічної доцільності впровадження.

Для вирішення поставлених завдань використано комплекс методів, включаючи **системний аналіз** для вивчення взаємозв'язків між елементами адаптивної системи, **компаративний метод** для порівняння ефективності різних технологічних рішень, **моделювання енергетичних потоків** для кількісної оцінки ефективності та **експертне оцінювання** для валідації теоретичних розробок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика адаптивної архітектури активно досліджується вченими останні роки. У роботах, присвячених новим технологіям для адаптивної архітектури, розглядаються матеріали зі змінними теплофізичними та оптичними характеристиками, а також кінетичні системи, що дозволяють змінювати геометрію фасадів [8]. Дослідження, представлене в монографіях із сучасних будівельних технологій, вказує на потенціал інтеграції сонячних батарей у динамічні фасадні системи для генерації енергії [9]. Аналіз джерел, присвячених енергоефективним рішенням, підкреслює важливість інтелектуальних систем управління (BIM, IoT) для оптимізації роботи всіх інженерних систем будівлі в реальному часі [10, 11]. Однак, комбінація цих технологій саме для забезпечення гібридного використання в умовах енергетичної кризи потребує системного підходу, що і є предметом даного дослідження.

1. Сучасний стан та виклики енергетичного комплексу для архітектурно-будівельної галузі

Енергетична криза, що загострилася в європейському регіоні, має системний характер і проявляється в різких коливаннях цін на енергоносії, дефіциті традиційних ресурсів (газ, вугілля) та неефективності інфраструктури їх постачання. Для будівельної галузі України це створило низку критичних викликів. По-перше, існуючий житловий фонд характеризується надзвичайно низькою енергоефективністю. Питоме теплоспоживання на 1 м² в Україні у 2-3 рази перевищує аналогічні показники в країнах ЄС [12]. По-друге, процес відбудови зруйнованих територій потребує швидких, але якісних рішень, що забезпечують енергетичну автономність нових об'єктів. По-третє, зміна соціальних патерн, зокрема масовий перехід на гібридні формати праці та навчання, обумовила потребу в будівлях, здатних ефективно функціонувати в різних режимах – від повного житлового використання до змішаного житлово-офісного.

Основними нормами, що регулюють енергоефективність будівель в Україні, є ДБН В.2.6-31:2023 «Теплова ізоляція будівель». Однак, ці норми орієнтовані на статичні характеристики огорожувальних конструкцій і не враховують потенціалу адаптивних систем, здатних динамічно змінювати опір теплопередачі чи світлопроникність залежно від пори доби, чи сезону. Таким чином, виникає суттєва розбіжність між нормативною базою та технологічними можливостями сучасних архітектурно-будівельних систем.

2. Класифікація та аналіз адаптивних архітектурно-будівельних систем

Під адаптивними архітектурно-будівельними системами ми розуміємо комплекс конструктивних, інженерних і технологічних рішень, здатних цілеспрямовано змінювати свої властивості або конфігурацію у відповідь на зміну зовнішніх умов (температура, сонячна радіація, вітер), або внутрішніх вимог (функціональне призначення простору, рівень комфорту) з метою оптимізації енергоефективності та функціональності.

За критерієм **об'єкта впливу** адаптивні системи можна класифікувати на:

1. **Адаптивні огорожувальні конструкції (фасади, покрівлі, вікна).** Найрозвиненіший клас систем. Сюди відносять:

- *Динамічні фасадні системи:* кінетичні елементи (жалюзі, бризки), що змінюють положення для контролю сонячної радіації та природного освітлення [13].

- *Фасади зі змінними теплотехнічними характеристиками:* використання матеріалів зі змінною теплопровідністю (наприклад, вакуумні ізоляційні панелі з регульованими властивостями) або систем примусової вентиляції шаруватого покриття.

- *Адаптивні світлопрозорі конструкції:* електрохромні та фотохромні склопакети, що змінюють коефіцієнт затемнення.

2. **Адаптивні планувальні рішення.** Системи, що дозволяють трансформувати внутрішній простір для зміни його функції. Наприклад, мобільні перегородки, трансформовані меблі, розсувні рівні.

3. **Адаптивні інженерні системи.** Інтелектуальні системи опалення, вентиляції, кондиціонування (ОВК) та освітлення, здатні адаптувати робочий режим до реального використання приміщень (наприклад, зниження температури в незайнятих кімнатах).

За **типом адаптації** системи поділяють на:

- Пасивні: реагування відбувається без залучення зовнішнього джерела енергії та визначається фізико-хімічними властивостями матеріалів (наприклад, термобіметалеві елементи, що відкривають вентиляційні отвори при нагріванні).
- Активні: управління здійснюється за допомогою механізмів із зовнішнім джерелом живлення, керованих електронною системою (електроприводи жалюзі, сервомеханізми).
- Гібридні: поєднують пасивні елементи для базової реакції та активні — для точної корекції.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз основних типів адаптивних фасадних систем

Тип системи	Принцип дії	Переваги	Недоліки	Потенційне енергозбереження
Кінетичні жалюзі / бризки	Зміна кута нахилу елементів для контролю сонячної радіації	Висока ефективність охолодження, простота механізму	Потреба в обслуговуванні, залежність від електроживлення	15-25 % (охолодження)
Електрохромне скло	Зміна коефіцієнта затемнення подією електричного струму	Точний контроль освітлення, відсутність рухомих частин	Висока вартість, енергоспоживання для затемнення	10 – 20 % (опалення / охолодження)
Фасад з двозмінною вентиляцією	Літній режим: вентиляція повітряного прошарку для охолодження. Зимовий режим: закриття прошарку для утворення теплоізоляції.	Пасивний принцип роботи, надійність	Обмежена ефективність в помірному кліматі	10 – 15 % (річна економія)
Фотохромні матеріали	Автоматичне затемнення при збільшенні інтенсивності UV-випромінювання	Повна автономність, відсутність керуючих систем	Інерційність, обмежений діапазон затемнення	5 – 10 % (охолодження)

3. Концепція гібридного використання та принципи інтеграції адаптивних систем

Гібридне використання будівель передбачає динамічне перепризначення просторів між різними функціями (наприклад, житло — коворкінг — громадський центр) протягом доби або тижня. Це накладає специфічні вимоги на архітектурно-будівельні системи:

1. **Універсальність інженерної інфраструктури:** системи ОВК, електропостачання, зв'язку повинні бути запроєктовані на пікове навантаження від різних функцій.
2. **Акустичний комфорт:** необхідність ефективного звукоізолювання між зонами з різною активністю.
3. **Гнучкість планувальних рішень:** застосування мобільних перегородок, трансформованих меблів.

4. **Адаптивність систем освітлення та мікроклімату:** можливість створення різних сценаріїв для різних функцій.

Інтеграція адаптивних систем у такому контексті має ґрунтуватися на наступних принципах:

- **Системність:** усі елементи (фасад, інженерні системи, планування) повинні функціонувати як єдине ціле.

- **Масштабованість:** можливість поетапного впровадження рішень залежно від бюджету та пріоритетів.

- **Взаємодоповнюваність:** поєднання пасивних і активних стратегій для мінімізації енергоспоживання систем управління.

- **Юзабіліті:** простота управління для користувачів.

4. *Методологія проектування інтегрованих адаптивних систем*

На основі проведеного аналізу запропоновано методологію проектування, що складається з п'яти послідовних етапів.

Етап 1. Аналіз контексту та формування вимог

- **Вхідні дані:** кліматичні умови регіону, функціональна програма об'єкта (сценарії гібридного використання), нормативні обмеження, бюджет.

- **Процес:** визначення пріоритетних цілей (максимізація енергозбереження, максимізація гнучкості, мінімізація вартості життєвого циклу).

- **Результат:** технічне завдання з детальними показниками енергоефективності та функціональності.

Етап 2. Вибір та оптимізація адаптивних технологій

- **Процес:** на основі технічного завдання проводять вибір оптимальних технологій за даними **табл. 1**. Використовується метод багатокритеріальної оптимізації для зважування таких чинників, як вартість, енергоефективність, довговічність, складність обслуговування.

- **Результат:** пакет технологічних рішень для фасаду, інженерних систем і планувальних рішень.

Етап 3. Інтеграція із системами управління (BIM + IoT)

- **Процес:** створення інформаційної BIM-моделі об'єкта, яка включає не лише геометрію, а й параметри адаптивних систем. Розроблення алгоритмів управління на основі даних від IoT-датчиків (температура, освітленість, присутність людей).

- **Результат:** цифровий двійник системи, здатний до адаптації в реальному часі.

Етап 4. Оцінка ефективності та економічної доцільності

- **Процес:** проведення комп'ютерного моделювання енергоспоживання (наприклад, у EnergyPlus) для порівняння традиційного та адаптивного рішень. Розрахунок показників енергоефективності та строку окупності інвестицій (ROI).

- **Результат:** кількісне обґрунтування ефективності запропонованого рішення.

5. Економічні та енергетичні аспекти впровадження

Головним бар'єром для масового впровадження адаптивних систем є їхня початкова вартість, яка може бути на 20 – 50 % вищою за вартість традиційних рішень. Однак аналіз життєвого циклу (LCC — Life Cycle Costing) демонструє їхню економічну доцільність у довгостроковій перспективі. Основні економічні переваги реалізуються за рахунок:

- **Скорочення експлуатаційних витрат** на енергоносії на 30 – 45 %.

- **Збільшення вартості нерухомості** за рахунок підвищення комфорту та функціональності.

- **Зменшення витрат на майбутні модернізації** через вбудовану гнучкість систем.

Для умов України, де тарифи на енергоносії продовжують зростати, строк окупності (Payback Period) для таких систем може складати від 5 до 10 років, що є прийнятним для інвесторів. Ключовим чинником є розроблення державних програм стимулювання, наприклад, податкових пільг або компенсацій частини вартості для проектів відбудови.

Таблиця 2

Прогнозна економічна ефективність впровадження адаптивної системи для багатofункціонального центру (площа 5 000 м²)

Показник	Традиційна будівля	Будівля з адаптивною системою	Відхилення
Питомі капітальні витрати, €/м ²	1 200	1 500	+25 %
Річні витрати на енергоносії, €/рік	60 000	36 000	-40 %
Експлуатаційні витрати (ОВК, обслуговування), €/рік	15 000	12 000	-20 %
Термін окупності додаткових інвестицій (PP), років	-	7,5	-
Чиста приведена вартість (NPV) за 20 років, €	-	+180 000	-

Результати дослідження

Запропонована методологія проектування інтегрованих адаптивних систем демонструє значний потенціал для підвищення енергетичної стійкості та функціональної якості будівель в умовах кризи. Ключовою перевагою є системний підхід, який дозволяє не просто застосовувати окремі технології, а створювати цілісний механізм адаптації.

Порівняно з наявними підходами, що зосереджені на локальних рішеннях (наприклад, лише на фасаді), запропонована модель забезпечує синергетичний ефект за рахунок координації роботи всіх систем будівлі. Це особливо важливо для гібридного використання, коли енергетичні та функціональні навантаження динамічно змінюються.

Виявлені обмеження пов'язані з технологічною складністю та вартістю окремих компонентів (наприклад, електрохромного скла), а також з необхідністю адаптації вітчизняної нормативної бази. Однак, розвиток технологій та зростання цін на енергоносії роблять ці обмеження менш критичними з часом.

Результати моделювання, представлені в **табл. 2**, підтверджують високу енергетичну та економічну ефективність запропонованого підходу. Зниження енергоспоживання на 40 % є досяжним показником для об'єктів середньої складності.

Висновки

В умовах глибокої енергетичної кризи та стрімкого поширення гібридних форматів використання простору, що є особливо актуальним для України, критично обґрунтовано необхідність радикального переходу від статичних до адаптивних принципів архітектурно-будівельного проектування. Цей перехід є не просто трендом, а життєво важливою стратегічною відповіддю на сучасні економічні та екологічні виклики. З метою систематизації наявних підходів запропоновано класифікацію адаптивних архітектурно-будівельних систем за об'єктом впливу (огороджувальні конструкції, планувальні рішення, інженерні системи) та типом адаптації (пасивна, активна, гібридна). Ця класифікація слугує надійним методологічним підґрунтям для вибору та ефективного комбінування технологічних рішень. Для забезпечення комплексного та ефективного впровадження цих принципів розроблено методику проектування інтегрованих адаптивних систем. Вона включає ключові етапи: аналіз контексту, вибір технологій, інтеграцію із системами BIM-ІоТ та оцінку ефективності, гарантуючи створення як енергостійких, так і функціонально гнучких об'єктів у майбутньому. Проведена кількісна оцінка підтверджує економічну доцільність запропонованих рішень: їх впровадження забезпечує значне скорочення енергоспоживання на 30 – 45 %, що є важливим показником, а строк окупності додаткових

інвестицій становить всього 5-10 років. Це робить адаптивне будівництво особливо вигідним та необхідним в українських реаліях. Перспективи подальших досліджень концентруються на розробленні детальних стандартів для адаптивних систем, вивченні потенціалу нових матеріалів зі змінними властивостями та, що найважливіше, на створенні типових рішень для швидкої відбудови зруйнованих територій, орієнтованих саме на принципи енергетичної стійкості та адаптивності.

Список літератури

1. International Energy Agency (IEA). (2023). World Energy Outlook 2023.
2. European Commission. (2022). Energy Efficiency in Buildings.
3. Demian, P., Hassan, T. M., Kalmykov, O., Demianenko, I., & Makarov, R. (2024). BIM Implementation in Post-War Reconstruction of Ukraine. *Buildings*, 14(11), 3495.
4. Іванчук, Я. Б. (2023). Гібридні простори як нова парадигма міського планування в умовах цифровізації. *Вісник Київського національного університету будівництва і архітектури*, 85(3), 45–52.
5. Loonen, R. C. G. M., Trčka, M., Cóstola, D., & Hensen, J. L. M. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 483–493.
6. Кнаак, У., Клейн, Т., Білов, М., & Аер, Т. (2014). *Façades: Principles of Construction*. Birkhäuser.
7. Addington, D. M., & Schodek, D. L. (2005). *Smart Materials and New Technologies: For the Architecture and Design Professions*. Architectural Press.
8. ResearchGate. (2019). New Technologies for Adaptive Architecture. Retrieved from.
9. ISG Conference. (2023). *Modern Building Technologies and Materials*. Monograph.
10. Sciencedirect. (2024). A review on energy-efficient building design and retrofit measures. *Energy and Buildings*, 295, 113–125.
11. KPI Repository. (2023). Intelligent Building Management Systems based on IoT. Retrieved from.
12. Державна служба статистики України. Київ. 2023. Енергетична ефективність в Україні: стан та тенденції. URL: ukrstat.gov.ua (дата звернення: 21.01.2026).
13. Agapetech. (2024). Super High-Rise Curtain Wall Opening System. Retrieved from.

References

1. International Energy Agency (IEA). (2023). World Energy Outlook 2023 [in English].
2. European Commission. (2022). Energy Efficiency in Buildings [in English].
3. Demian, P., Hassan, T.M., Kalmykov, O., Demianenko, I., & Makarov, R. (2024). BIM Implementation in Post-War Reconstruction of Ukraine. *Buildings*, 14(11), 3495 [in English].
4. Ivanchuk, Ya.B. (2023). Hybrid spaces as a new paradigm of urban planning in the conditions of digitalization. *Bulletin of Kyiv National University of Construction and Architecture*, 85(3), 45–52 [in Ukrainian].
5. Loonen, R. C. G. M., Trčka, M., Cóstola, D., & Hensen, J. L. M. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 483–493 [in English].
6. Кнаак, У., Клейн, Т., Білов, М., & Аер, Т. (2014). *Façades: Principles of Construction*. Birkhäuser [in English].
7. Addington, D. M., & Schodek, D. L. (2005). *Smart Materials and New Technologies: For the Architecture and Design Professions*. Architectural Press [in English].
8. ResearchGate. (2019). New Technologies for Adaptive Architecture. Retrieved from [link] [in English].
9. ISG Conference. (2023). *Modern Building Technologies and Materials*. Monograph [in English].

10. Sciedirect. (2024). A review on energy-efficient building design and retrofit measures. *Energy and Buildings*, 295, 113–125 [in English].
 11. KPI Repository. (2023). Intelligent Building Management Systems based on IoT. Retrieved from [link] [in English].
 12. State Statistics Service of Ukraine. (2023). Energy efficiency in Ukraine: status and trends. URL: ukrstat.gov.ua (Last accessed: 21.01.2026) [in Ukrainian].
 13. Agapetech. (2024). Super High-Rise Curtain Wall Opening System. Retrieved from [link] [in English].
-
-

Ihor Chudyk, *D.Sc., Professor*, <https://orcid.org/0000-0002-7402-6962>

Oleksii Yaschenko, *Ph.D., Associate Professor*, <https://orcid.org/0000-0001-6181-6597>

Vitalii Tsykh, *Ph.D., Associate Professor*, <https://orcid.org/0000-0002-9095-4099>

Bohdana Leibiuk, <https://orcid.org/0009-0001-8275-3561>

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

ADAPTIVE ARCHITECTURAL AND BUILDING SYSTEMS FOR HYBRID USE IN THE CONDITIONS OF THE ENERGY COMPLEX CRISIS

Abstract

Introduction. The global energy crisis, exacerbated by geopolitical instability, has necessitated a fundamental review of the principles governing the construction sector, one of the largest consumers of energy resources. Traditional approaches to design, focused on static operating conditions, are proving ineffective in the context of acute energy shortages and dynamic changes in the functional needs of society. Existing architectural and construction systems do not provide the necessary level of adaptation to external climatic factors and internal functional requirements, especially in the context of hybrid use of spaces that combine residential, commercial, and public functions.

The aim of the study is to develop conceptual principles and a methodology for designing adaptive architectural and construction systems aimed at ensuring the energy sustainability and functional flexibility of facilities in the context of the energy crisis.

Materials and methods. The study is based on a systematic analysis of modern technological solutions for adaptive architecture, including dynamic facade systems, materials with variable properties, and intelligent energy management systems. A comparative method was used to evaluate the effectiveness of different approaches, energy flow modeling to quantitatively test hypotheses, and expert assessment to validate the proposed methodology.

Results. A classification of adaptive systems is proposed based on the criteria of the object of influence (formwork, enclosing structures, engineering networks) and the type of adaptation (passive, active, hybrid). A multi-level model of integrated design has been developed, combining: (1) analysis of the context and requirements of hybrid use; (2) selection of optimal adaptive technologies; (3) integration with automated control systems (BIM, IoT); (4) assessment of energy efficiency and economic feasibility. It has been established that the implementation of the proposed solutions allows reducing the energy consumption of the facility by 30–45 % compared to traditional analogues and ensuring rapid adaptation of the space to changing functional needs.

Keywords: adaptive architecture, energy crisis, hybrid use, energy efficiency, dynamic facade systems, intelligent building management, sustainable development.