№ 2(46) 2026



НАФТОГАЗОВА ЕНЕРГЕТИКА

ISSN 1993-9868 print
ISSN 2415-3109 online

https://nge.nung.edu.ua

Прийнято 21.10.2026. Прорецензовано 27.10.2026. Опубліковано 30.11.2026.

УДК 624.04:004.94 **DOI: 10.31471/1993-9868-2026-2(46)-183-202**

ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ НА МЕХАНІЧНУ ПОВЕДІНКУ НЕСУЧИХ СИСТЕМ СПОРІДНЕНИХ МАЛОПОВЕРХОВИХ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ

Андрусяк А. В. *
Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
https://orcid.org/0000-0003-2099-9045
e-mail: andriiandrusiak@gmail.com

Чемерис А. В.
Студент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
https://orcid.org/0009-0009-3206-1856
e-mail: andrii.chemerys-bm251@nung.edu.ua

Величкович А. С.
Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
https://orcid.org/000-0003-2685-8753
e-mail: a_velychkovych@ukr.net

Анотація. У роботі досліджено вплив просторово-планувальної трансформації на механічну поведінку несучих систем двох споріднених малоповерхових житлових будинків. Будівлі розглянуто як базовий і геометрично розвинений варіанти однієї архітектурно-конструктивної концепції. В системі інформаційного моделювання САПФІР-3D побудовано просторові фізико-геометричні моделі будинків, які надалі трансформовано у скінченно-елементні моделі в програмному комплексі LIRA-FEM. Для обох варіантів застосовано однакові принципи дискретизації, формування розрахункових сполучень навантажень і моделювання граничних умов, а взаємодію споруди з ґрунтовою основою представлено двопараметричною моделлю Вінклера–Пастернака. Порівняльний аналіз виконано за абсолютними, відносними та питомими показниками геометрії, матеріаломісткості і механічної реакції, а також за зміною роботи вибраних несучих стін спільного геометричного ядра. Збільшення розрахункової площі на 72,0% супроводжується практично пропорційним приростом модельного об’єму на 73,3%, тоді як маса несучих конструкцій зростає випереджальними темпами – на 91,8%. Механічна реакція несучої системи не відповідає простому пропорційному масштабуванню, зокрема, максимальне за модулем вертикальне переміщення збільшується на 45,5%, інтегральна реакція найбільш навантаженої несучої стіни – на 39,1%, а перший період власних коливань – лише на 16,2%. Локальний аналіз спільного геометричного ядра виявив різноспрямований перерозподіл силових факторів, а саме

Запропоноване посилання: Андрусяк, А. В., Чемерис, А. В. & Величкович, А. С. (2026). Вплив геометричної трансформації на механічну поведінку несучих систем споріднених малоповерхових житлових будинків. Нафтогазова енергетика, 2(46), 183-202. doi: 10.31471/1993-9868-2026-2(46)-183-202.

* Відповідальний автор

Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

у стіні поблизу зони геометричного розвитку мембранне зусилля зростає на 47,2%, у внутрішній стіні ядра зменшується на 12,2%, тоді як у віддаленій стіні змінюється лише на 5,3%. Отримані результати показують, що геометричний розвиток спорідненої будівлі спричиняє непропорційні та локально різноспрямовані зміни механічної реакції внаслідок перерозподілу жорсткості і шляхів передавання навантажень. Запропонований підхід може бути використаний у варіантному проєктуванні для кількісної оцінки впливу просторово-планувальних трансформацій на матеріаломісткість, деформативність і розподіл внутрішніх зусиль.

Ключові слова: геометрична трансформація; малоповерхова будівля; числове моделювання; САПФІР-3D; LIRA-FEM; несучі стіни; перерозподіл зусиль.

Вступ

У малоповерховому житловому будівництві одну архітектурно-конструктивну концепцію можна реалізувати у кількох просторово-планувальних варіантах. За однакової поверховості, конструктивної системи та використаних матеріалів такі будинки можуть відрізнятися площею, конфігурацією плану і розміщенням несучих елементів. Вибір раціонального варіанта потребує врахування не лише архітектурних і функціональних вимог, але і матеріаломісткості та особливостей роботи несучої системи будинку.

Сучасні дослідження вказують на суттєвий вплив геометричної форми та конструктивної схеми будівель на використання матеріальних ресурсів [1, 2]. При цьому зміна просторово-планувальної конфігурації впливає на взаємодію несучих елементів, тому переміщення, опорні реакції та внутрішні зусилля можуть змінюватися непропорційно до приросту площі чи об’єму будівлі.

Активний розвиток котеджних містечок, особливо в західних областях України, посилює практичну потребу в порівняльному оцінюванні таких проєктних варіантів. Така оцінка має охоплювати не лише геометричні та матеріальні характеристики, але і напружено-деформований стан несучих конструкцій (переміщення та внутрішні зусилля), опорні реакції і динамічні характеристики будівель.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Останні дослідження геометричної трансформації житлових будівель охоплюють питання архітектурно-планувальної адаптивності, ефективності використання простору та раціоналізації конструктивних рішень. Зокрема, у праці [3] розглянуто можливості трансформації житлового простору для підвищення його функціональної ефективності. У дослідженні [4] запропоновано кількісне порівняння планувальних рішень до та після реконструкції за показниками площі, маси, геометричних характеристик і параметрів несучих стін. У роботі [5] обґрунтовано доцільність оптимізації геометричної форми будівель з урахуванням матеріальних та енергетичних характеристик. Зазначені підходи підтверджують важливість кількісного оцінювання архітектурних варіантів, однак переважно орієнтовані на просторово-планувальні та ресурсні показники, та не аналізують локальні реакції несучих конструкцій.

Вплив просторової конфігурації на механічну поведінку будівель досліджено у працях, присвячених геометричній нерегулярності конструктивних систем. Числове моделювання будівель із нерегулярною формою плану та розривами конструктивних елементів виявило залежність переміщень, внутрішніх сил і деформацій від їх просторового розміщення [6]. Для малоповерхових каркасних будівель із планувальною асиметрією запропоновано спрощені просторові моделі, які враховують взаємозв’язок маси, жорсткості та міцності конструктивної системи [7]. Отримані результати підтверджують необхідність просторового аналізу геометрично нерегулярних будівель. Проте вони стосуються переважно каркасних систем під дією горизонтальних навантажень, що обмежує можливість перенесення встановлених закономірностей на малоповерхові будівлі з несучими цегляними стінами.

Ближчими до предмета нашого дослідження є праці, присвячені конструктивній поведінці кам’яних будівель. Систематизація методів нелінійного статичного аналізу вказала на необхідність врахування геометричної нерегулярності та особливостей роботи кам’яних конструкцій [8]. Порівняння різних підходів до моделювання дворівневої кам’яної будівлі показало, що прийнята розрахункова ідеалізація суттєво впливає на прогнозовану реакцію просторової системи [9]. У дослідженнях [10, 11] встановлено залежність результатів числового аналізу кам’яних стін від конфігурації прорізів і способу представлення несучих елементів у розрахунковій моделі. Вплив вертикальної нерегулярності на конструктивну поведінку кам’яних будівель додатково розглянуто у праці [12].

Особливий інтерес становить перерозподіл внутрішніх сил між несучими стінами внаслідок зміни їх жорсткості та умов взаємодії. Експериментально-числове дослідження [13] підтвердило істотну роль жорсткості кам'яних стін у розподілі внутрішніх сил при горизонтальному навантаженні. Числовий аналіз в роботі [14] показав вплив геометричних пропорцій стін і рівня вертикального навантаження на їхню механічну поведінку за сейсмічних впливів. Ці результати вказують на складний взаємозв'язок геометрії, жорсткості та силової реакції кам'яних конструкцій, проте не визначають закономірностей перерозподілу вертикальних навантажень між незміненими стінами при геометричному розвитку всієї будівлі.

Важливим доповненням до статичного аналізу є дослідження динамічних характеристик конструктивних систем. Показано, що фізико-механічні властивості матеріалів несучих стін впливають на власні частоти та форми коливань будівель [15]. Поєднання експериментального вібраційного аналізу з числовим моделюванням кам'яної будівлі також засвідчило важливість деформівності перекриттів і просторової взаємодії конструктивних елементів [16]. Отже, модальні характеристики можуть слугувати додатковими інтегральними показниками зміни масово-жорсткісних властивостей будівель.

Розвиток інформаційного моделювання та скінченно-елементних методів створює передумови для комплексного порівняння архітектурно-конструктивних варіантів. У дослідженнях [17, 18] розглянуто питання узгодження геометричних та аналітичних моделей, передавання даних і забезпечення їх сумісності на різних етапах проєктування. Сучасні підходи до інтеграції BIM-технологій із методами конструктивної оптимізації узагальнено у праці [19]. Можливості поєднання конструктивного аналізу з оцінюванням матеріально-екологічних показників продемонстровано у дослідженні [20], тоді як у роботі [21] обґрунтовано необхідність розмежування мінімізації обсягу конструктивного матеріалу та комплексної ефективності проєктного рішення. Ці дослідження підтверджують ефективність використання узгоджених цифрових моделей для кількісного зіставлення конструктивних варіантів.

У вітчизняних наукових публікаціях розглянуто впровадження BIM-технологій для формування комплексних інформаційних моделей будівельних об'єктів [22]. Окрему увагу приділено можливостям програмного комплексу ЛІРА-САПР для моделювання конструктивних систем зі змінною розрахунковою схемою [23] та оцінювання напружено-деформованого стану будівельних конструкцій [24]. Водночас зазначені роботи вирішують переважно завдання реконструкції, моделювання пошкоджених конструкцій або інформаційного забезпечення проєктування, не охоплюючи порівняльного аналізу локальної реакції незмінених несучих елементів у геометрично споріднених малоповерхових будівлях.

Розглянуті дослідження підтверджують важливість геометричних і матеріальних характеристик будівель та просторової конфігурації їхніх несучих систем для оцінювання конструктивної ефективності. Водночас комплексне порівняння матеріаломісткості, глобальних механічних характеристик і локального перерозподілу внутрішніх зусиль у геометрично споріднених малоповерхових будівлях залишається недостатньо висвітленим.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

У цій роботі під геометричною трансформацією ми розуміємо умовний перехід від базового варіанта будівлі (рис. 1) до спорідненого, просторово розвиненого, зі збереженням спільного геометричного ядра та додаванням нового об'єму (рис. 2). Такий підхід дає змогу порівнювати не лише інтегральні характеристики будівель, але і механічну реакцію відповідних несучих елементів за незмінних геометричних параметрів і фізико-механічних властивостей матеріалів.

Основна наукова проблема полягає у розмежуванні ефектів кількісного збільшення будівлі та перерозподілу жорсткості і шляхів передавання навантажень у її несучій системі. Робоча гіпотеза полягає в тому, що близькі до пропорційних зміни інтегральних геометричних і матеріальних показників можуть супроводжуватися непропорційними та різноспрямованими змінами опорних реакцій і внутрішніх зусиль у незмінених несучих елементах.

Перевірка цієї гіпотези потребує узгодженого просторового моделювання обох варіантів будівлі за однакових властивостей матеріалів, принципів задання навантажень і граничних умов. Це дозволяє мінімізувати вплив відмінностей розрахункових моделей та кількісно оцінити механічні наслідки геометричної трансформації.

Отже, невирішена частина загальної проблеми полягає у кількісному визначенні впливу геометричної трансформації споріднених

малоповерхових будинків на глобальні характеристики їх несучих систем і локальний перерозподіл опорних реакцій та внутрішніх зусиль у незмінених несучих елементах.

Мета та завдання дослідження

Мета роботи полягає у встановленні впливу геометричної та просторово-планувальної трансформації споріднених малоповерхових житлових будинків на їх геометричні, матеріальні та конструктивні характеристики, зокрема на перерозподіл внутрішніх зусиль у незмінених несучих елементах.

Для досягнення поставленої мети передбачено сформувати узгоджені просторові та скінченно-елементні моделі двох споріднених будівель; визначити систему абсолютних, відносних і питомих показників для порівняння їх геометричних і матеріальних характеристик; зіставити глобальні параметри конструктивної реакції при однакових розрахункових умовах; дослідити зміну опорних реакцій і внутрішніх зусиль у відповідних несучих стінах спільного геометричного ядра та встановити особливості їх перерозподілу при геометричній трансформації будівлі.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Характеристика об'єктів дослідження

Об'єктами дослідження є два споріднені приватні малоповерхові житлові будинки одного житлового містечка. Базовий варіант є компактнішою реалізацією архітектурно-конструктивної схеми, а геометрично трансформований варіант розвиває її шляхом додавання функціонально-конструктивного об'єму. Архітектурно-планувальні рішення обох будинків передбачають два основні житлові рівні та розвинене скатне покриття. Характерні висотні відмітки покриття і даху досягають +9,30 м.

Несучі системи обох будівель мають стінову конструктивну схему, утворену поздовжніми та поперечними зовнішніми і внутрішніми несучими стінами завтовшки 380 мм із керамічної рядової цегли марки М100. Міжповерхові перекриття виконано з монолітних залізобетонних плит завтовшки 180 мм із бетону класу С20/25, які спираються на несучі стіни, сприймають вертикальні навантаження та забезпечують просторову взаємодію конструктивних елементів. Над віконними та дверними прорізами передбачено збірні залізобетонні брускові перемички типу 3ПБ перерізом 120 × 220 мм відповідно до ДСТУ Б В.2.6-55:2008. Для перекриття окремих прольотів застосовано залізобетонні балки прямокутного перерізу 200 × 300 мм, які спроєктовано згідно з ДБН В.2.6-98:2009 (зі Зміною № 1) та ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Вертикальні навантаження від надземної частини будівель через систему несучих стін і фундаментну частину передаються на ґрунтову основу. Зовнішні стіни утеплено фасадними плитами з кам'яної вати Rockwool frontrock super завтовшки 150 мм. Міжкімнатні перегородки завтовшки 120 мм виконано з керамічної цегли. Конструктивна спорідненість обох будівель забезпечується однаковими матеріалами, принципами взаємодії несучих елементів та збереженням спільного геометричного ядра. Геометрична трансформація супроводжується розвитком системи несучих стін і перекриттів за межами цього ядра, що змінює просторовий розподіл жорсткості та шляхи передавання навантажень.

Фасади та плани першого поверху, наведені на рис. 1 і 2, відображають спільність базової архітектурно-конструктивної схеми та характер її просторово-планувальної трансформації. На плані (рис. 2) виділено спільне геометричне ядро Gc, до якого належать конструктивні елементи, що зберігають положення та базові геометричні характеристики в обох варіантах. Для локального механічного аналізу обрано контрольні несучі стіни W1–W3, розташовані в межах спільного ядра.

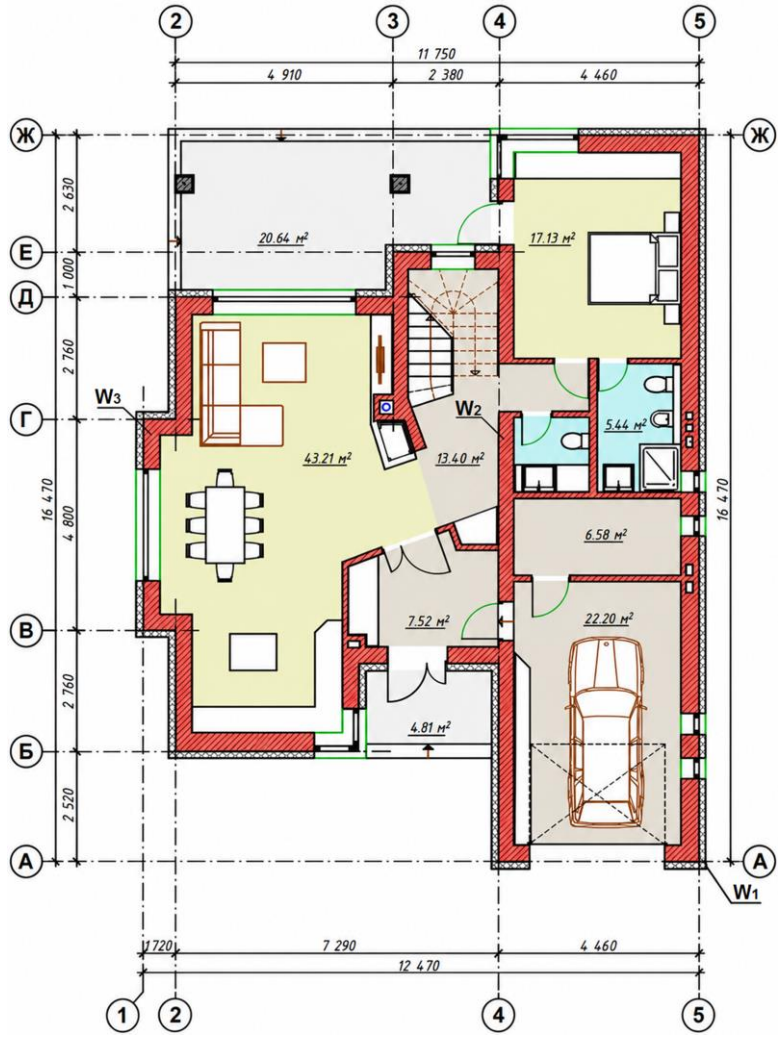
Просторові інформаційні моделі будинків

Просторові інформаційні моделі обох будинків сформовано у САПФІР-3D за їх архітектурно-планувальними та висотними параметрами (рис. 3). На першому етапі відтворено фізичні моделі з єдиними принципами задання рівнів, геометрії стін і перекриттів, прорізів та взаємного положення конструктивних елементів. Несучі і ненесучі елементи в обох моделях інтерпретовано за однаковими правилами, що забезпечило коректне формування аналітичних представлень і подальший перехід до узгоджених розрахункових схем у LIRA-FEM. Моделі САПФІР-3D також використано як єдину геометричну основу для визначення розрахункової площі, модельного об'єму, сумарної довжини та об'єму несучих стін.

Розрахункову площу A_i визначали як суму геометричних площ основних рівнів будівлі без застосування понижувальних коефіцієнтів, що використовуються в архітектурних розрахунках для відкритих терас. Такий підхід забезпечує фізично однозначну основу для



а)



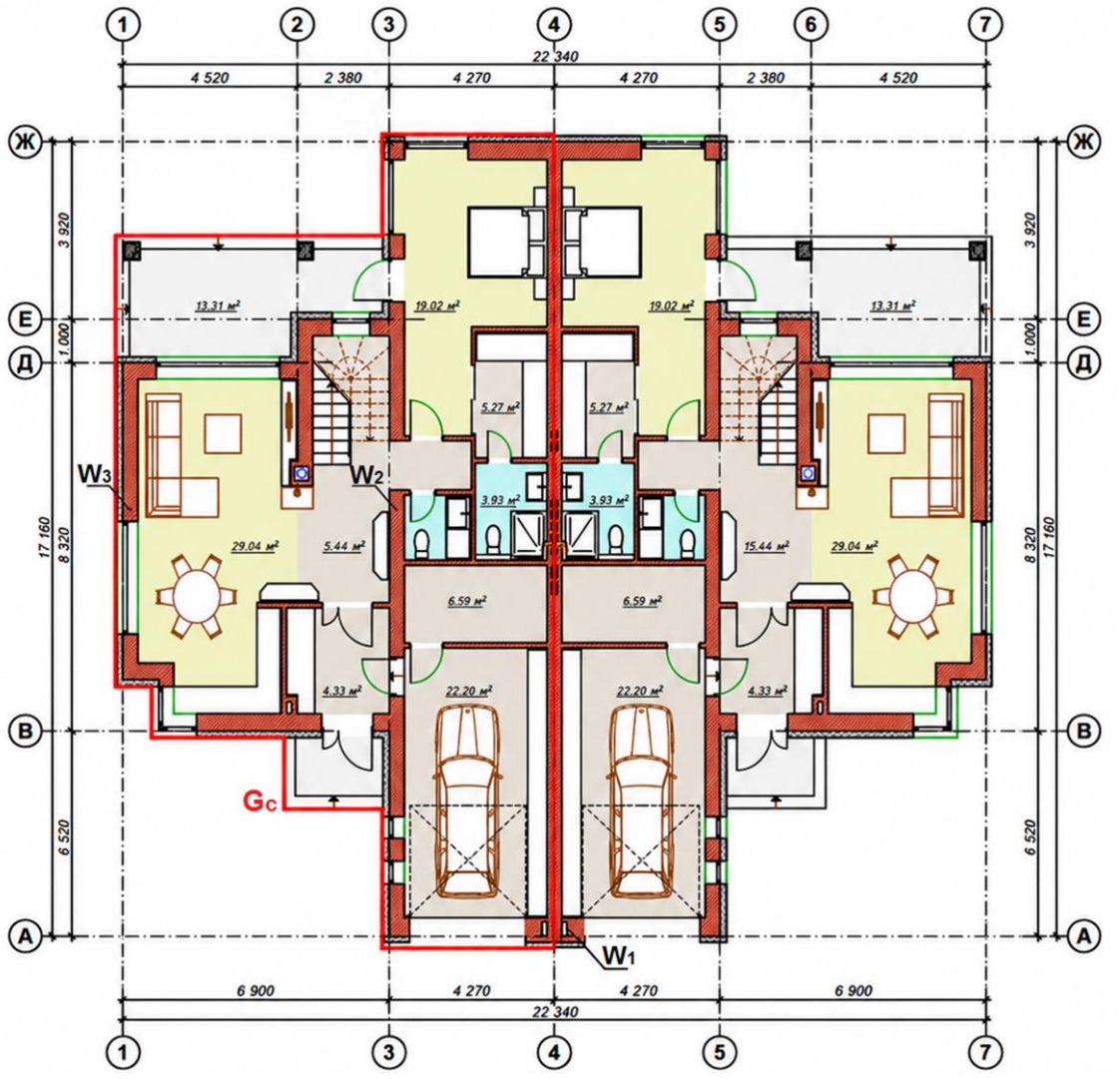
б)

а – фасад; б – план першого поверху; W1–W3 – контрольні несучі стіни

Рисунок 1 – Архітектурно-планувальна характеристика базового житлового будинку, що відповідає спільному геометричному ядру (Gc)



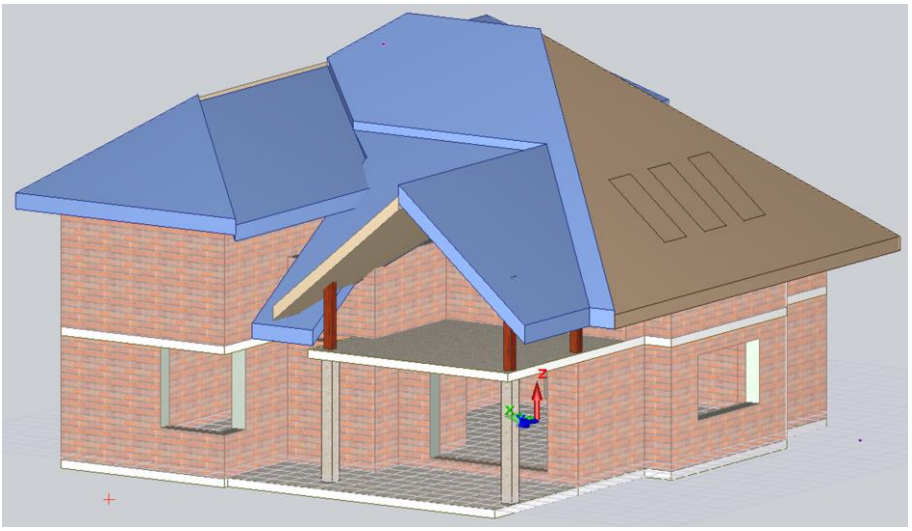
а)



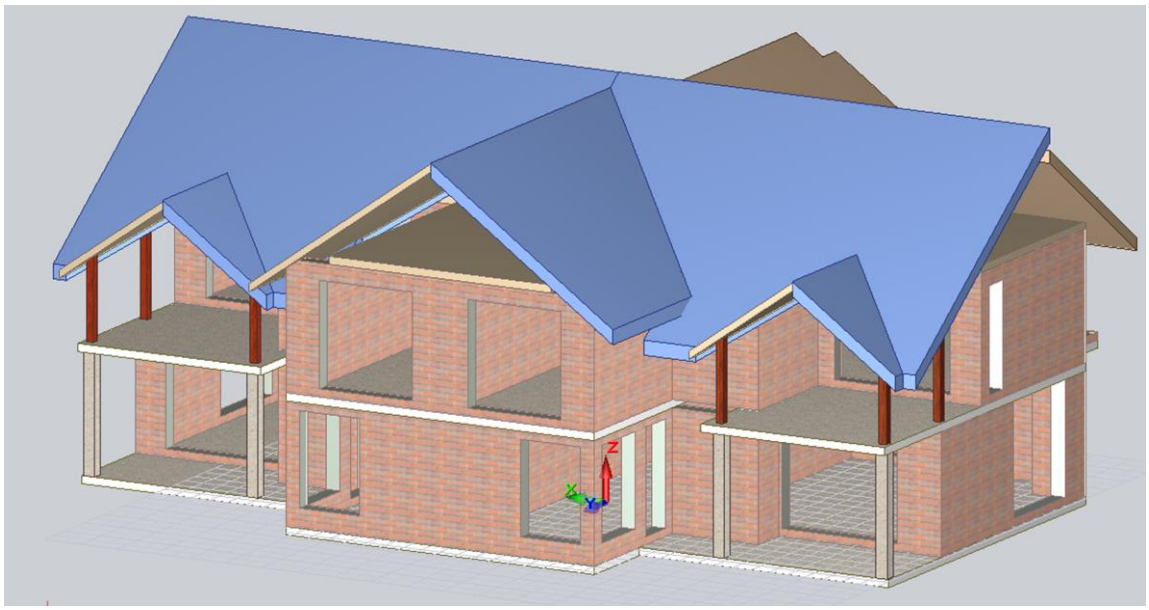
б)

а – фасад; б – план першого поверху;
W1–W3 – контрольні несучі стіни спільного геометричного ядра

Рисунок 2 – Архітектурно-планувальна характеристика геометрично трансформованого житлового будинку, утвореного спільним ядром Gc та доданою частиною



а)



б)

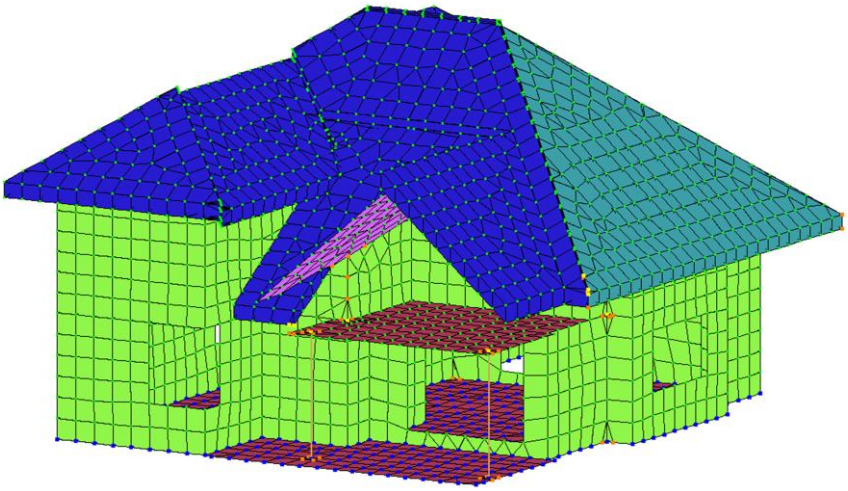
а – базовий варіант; б – геометрично трансформований варіант

Рисунок 3 – Просторові інформаційні моделі будинків у САПФІР-3D

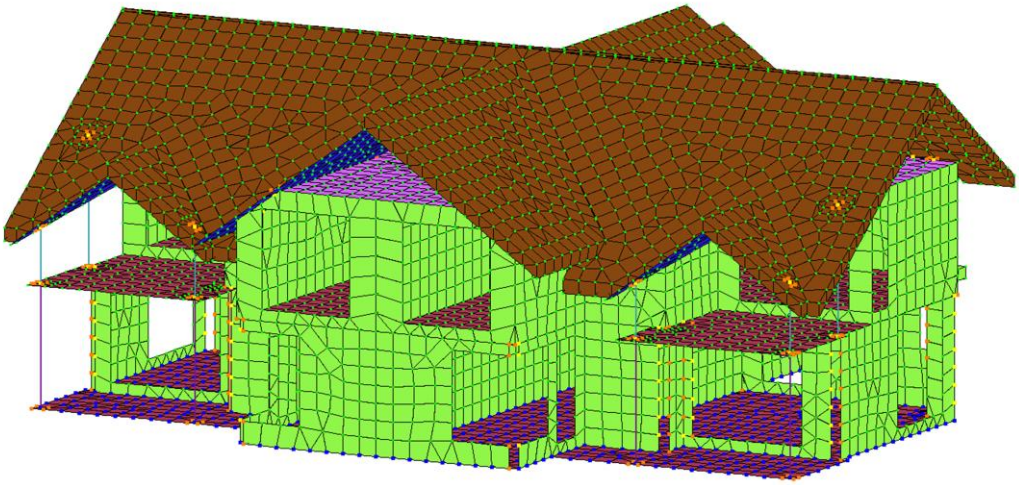
нормування механічних показників і показників матеріаломісткості. Для базового та геометрично трансформованого варіантів отримано відповідно A_1 = 163,5 м² і A_2 = 281,2 м².

Розрахункові моделі будинків

Розрахункові моделі сформовано у програмному комплексі LIRA-FEM із дотриманням єдиних принципів дискретизації, задання фізико-механічних характеристик матеріалів, граничних умов і навантажень (рис. 4). Несучі стіни та плити перекриттів змодельовано пластинчастими скінченними елементами, а перемички і балки – просторовими універсальними стержневими скінченними елементами. З'єднання суміжних конструктивних елементів прийнято кінематично сумісним із забезпеченням спільності відповідних вузлових переміщень. Характерний розмір скінченно-елементної сітки у спільному геометричному ядрі для обох моделей становив близько 0,5 м. Базова модель містила 5265 вузлів і 5689 скінченних елементів, а геометрично трансформована – 9295 вузлів і 10318 скінченних елементів. Кількість вузлів у другій моделі збільшилася на 76,5 %, а скінченних елементів – на 81,4 %, що відображає збільшення розмірів і геометричної складності трансформованого варіанта за незмінних принципів дискретизації.



а)



б)

а – базовий варіант; б – геометрично трансформований варіант

Рисунок 4 – Розрахункові скінченно-елементні моделі споріднених житлових будинків у LIRA-FEM

Для обох моделей прийнято однакову узагальнену інженерно-геологічну схему, що відповідає одному з поширених типів ґрунтових умов Прикарпаття. Покривну товщу представлено суглинками тугопластичної та напівтвердої консистенції, підстеленими щільнішими піщано-гравійними і гравійно-галечниковими відкладами. Взаємодію фундаментів із ґрунтовою основою моделювали за двопараметричною моделлю Вінклера–Пастернака. Коефіцієнти постелі визначали програмними засобами LIRA-FEM за прийнятими деформаційними характеристиками ґрунтових шарів і геометрією фундаментної частини, при цьому для обох будівель застосовували однаковий алгоритм їх визначення.

Власну вагу несучих конструкцій визначали в межах розрахункової моделі за заданими характеристиками матеріалів. Додаткове постійне навантаження на плити приймали 350 кгс/м² (3,43 кН/м²). Експлуатаційне навантаження на перекриття приймали 100 кгс/м² (0,98 кН/м²), а снігове навантаження на покриття задавали відповідно до нормативного значення для Івано-Франківської області.

Для порівняння напружено-деформованого стану обох моделей використовували однойменні розрахункові сполучення навантажень (РСН) і розрахункові сполучення зусиль (РСЗ), сформовані за однаковими правилами. Переміщення, опорні реакції та локальні силові фактори відбирали для відповідних контрольних сполучень.

Для модального аналізу масову модель формували за єдиним правилом з урахуванням власної ваги конструкцій, навантажень на пли-

ти та снігового навантаження. Перші дві форми власних коливань використовували як додаткові характеристики зміни масово-жорсткісних властивостей просторової системи.

Навантаження від скатних дахів, зокрема власну вагу їх конструктивних елементів і снігове навантаження, визначали відповідно до ДБН В.1.2-2:2006 та прикладали на несучі стіни й балки у вигляді еквівалентних навантажень з урахуванням схеми обпирання покриття. Також їх враховували при формуванні (РСН). Для модального аналізу масову модель формували засобами LIRA-FEM шляхом перетворення відповідних статичних завантажень на еквівалентні маси з їх подальшим розподілом між вузлами скінченно-елементної схеми відповідно до просторового розміщення навантажень. Таким чином, інерційний вплив даху враховано через еквівалентні вузлові маси, а жорсткісні характеристики просторової системи визначаються змодельованими несучими конструкціями.

Контроль коректності моделей включав перевірку балансу вертикальних навантажень і реакцій, узгодження локальних осей відповідних пластинчастих елементів та близькість характерного розміру скінченно-елементної сітки в межах спільного геометричного ядра. Для локального аналізу інтегральну вертикальну реакцію несучої стіни визначали як суму реакцій її опорних вузлів. Власне такий показник є менш чутливим до локальної зміни густини скінченно-елементної сітки, ніж максимальна реакція в окремому вузлі.

Система показників і методика порівняльного аналізу

Для кількісного порівняння двох варіантів будівлі введено узагальнений показник X, під яким залежно від етапу аналізу розуміли відповідну геометричну характеристику, показник матеріаломісткості або параметр механічної реакції. Індексом 1 позначали значення показника для базового варіанта, а індексом 2 – для геометрично трансформованого. Поряд з абсолютними значеннями X_1 і X_2 визначали їх відношення r_X та відносну зміну ΔX:

$$r_X = \frac{X_2}{X_1}; \quad \Delta X = \frac{X_2 - X_1}{X_1} \cdot 100\% . \qquad (1)$$

Базовим геометричним параметром для зіставлення темпів зміни інтегральних показників прийнято розрахункову площу будівлі A. Такий вибір не передбачає строгої геометричної подібності двох об'єктів, а формує єдину основу для їх кількісного порівняння. Відношення площ геометрично трансформованого та базового варіантів визначали як

$$r_A = \frac{A_2}{A_1} . \qquad (2)$$

Відносний приріст площі ΔA визначали за співвідношенням (1), приймаючи $X = A$. Для інтегральних характеристик, зміна яких безпосередньо пов'язана зі збільшенням розмірів будівлі, додатково використовували індекс пропорційності η_X:

$$\eta_X = \frac{X_2}{X_1} \cdot \frac{A_1}{A_2} = \frac{r_X}{r_A} . \qquad (3)$$

Індекс η_X характеризує співвідношення між темпом зміни певного інтегрального показника та темпом зміни розрахункової площі. Значення, близьке до одиниці, відповідає наближено пропорційній зміні; $\eta_X > 1$ свідчить про швидше, а $\eta_X < 1$ – про повільніше зростання показника порівняно зі збільшенням площі. Індекс використовували як аналітичну характеристику, а не як нормативний критерій. Для максимального за модулем вертикального переміщення $|u_z|_{\max}$, власних періодів коливань і локальних екстремальних силових факторів η_X не застосовували, оскільки немає фізичних підстав очікувати їх лінійної залежності від площі будівлі.

Для кількісної оцінки матеріаломісткості та ступеня розвитку системи несучих стін використовували питомі показники, віднесені до розрахункової площі:

$$m_A = \frac{M}{A}; \quad l_W = \frac{L_W}{A}; \quad v_W = \frac{V_W}{A}, \qquad (4)$$

де M – загальна маса несучих конструкцій;

L_W – сумарна довжина несучих стін;

V_W – їх сумарний об'єм.

Відповідно, показник m_A характеризує масу несучих конструкцій на одиницю розрахункової площі, l_W – протяжність несучих стін на одиницю площі, а v_W – їх об'єм на одиницю площі будівлі.

Для локального аналізу роботи спільних несучих елементів визначали інтегральну вертикальну реакцію контрольної стіни R_W як суму вертикальних реакцій усіх її опорних вузлів:

$$R_W = \sum R_{Z,j} , \qquad (5)$$

де $R_{Z,j}$ – вертикальна реакція j-го опорного вузла контрольної стіни. Частку сумарної вертикальної реакції моделі, що припадає на цю стіну, визначали як

Таблиця 1 – Геометричні характеристики та показники матеріаломісткості будинків

Показник	Базовий	Трансформований	Зміна	Питомий показник (базовий → трансформований)	η_X
Розрахункова площа A, м²	163,5	281,2	+72,0 %	—	1,000
Модельний об'єм V, м³	1 095,4	1 898,1	+73,3 %	6,700 → 6,750 м³/м²	1,008
Маса конструкцій M, т	434,2	832,9	+91,8 %	2,656 → 2,962 т/м²	1,115
Довжина несучих стін L_W, м	132,4	194,7	+47,1 %	0,810 → 0,692 м/м²	0,855
Об'єм несучих стін V_W, м³	147,0	207,2	+41,0 %	0,899 → 0,737 м³/м²	0,820

$$\rho_W = \frac{R_W}{\sum R_Z}, \qquad (6)$$

де $\sum R_Z$ – сумарна вертикальна реакція всієї розрахункової моделі.

Сукупне використання абсолютних, відносних і питомих показників забезпечує методичну основу для розмежування ефектів, зумовлених переважно збільшенням геометричних параметрів будівлі, та ефектів, пов'язаних зі зміною просторового розподілу жорсткості і шляхів передавання навантажень внаслідок її геометричної та просторово-планувальної трансформації.

Результати

Геометрична трансформація та показники матеріаломісткості

Порівняння базового та геометрично трансформованого варіантів виявило неоднакові темпи зміни геометричних характеристик і показників матеріаломісткості (табл. 1). Зі збільшенням розрахункової площі з 163,5 до 281,2 м² (+72,0 %) модельний об'єм зростає практично пропорційно (+73,3 %). При цьому приріст маси несучих конструкцій є випереджальним (+91,8 %), тоді як сумарна довжина та об'єм несучих стін збільшуються значно повільніше – відповідно на 47,1 і 41,0 %. Отже, геометрична трансформація супроводжується істотно різними темпами зміни матеріальних характеристик: на фоні збільшення питомої маси конструкцій спостерігається зменшення питомої протяжності та об'єму несучих стін.

Нормування геометричних і матеріальних характеристик на розрахункову площу дає змогу виявити особливості просторово-планувальної трансформації, які не відображаються абсолютними показниками. Питомий модельний об'єм залишається практично незмінним (+0,8 %), що підтверджується близьким до одиниці індексом пропорційності $\eta_V = 1{,}008$. Натомість питома маса несучих конструкцій зростає на 11,5 % ($\eta_M = 1{,}115$), тоді як питома довжина та об'єм несучих стін зменшуються відповідно на 14,5 і 18,0 % ($\eta_{LW} = 0{,}86$; $\eta_{VW} = 0{,}82$). Одночасне збільшення питомої маси конструкцій і зменшення питомої довжини та об'єму несучих стін свідчить про те, що геометрична трансформація змінює не тільки загальну матеріаломісткість будівлі, але і співвідношення між характеристиками складових її несучої системи (рис. 5, 6).

На рис. 5 проілюстровано відносні зміни основних геометричних, матеріальних і розрахункових показників при переході від базового до геометрично трансформованого варіанта. Пунктирною лінією позначено приріст розрахункової площі, який використано як орієнтир для порівняння темпів зміни інших характеристик.

На рис. 6 наведено порівняння нормованих питомих характеристик обох будинків. Графік демонструє, що за практично незмінного питомого модельного об'єму питома маса несучих конструкцій збільшується, тоді як питома довжина та об'єм несучих стін зменшуються.

Глобальна реакція несучої системи будинку

Основні результати порівняльного аналізу глобальної механічної реакції несучих систем обох варіантів будинку, зокрема вертикальні переміщення, опорні реакції та динамічні характеристики, систематизовано в табл. 2. Результати числового аналізу свідчать, що геометрична трансформація впливає як на деформативність несучої системи, так і на характер передавання вертикальних навантажень. За однакового складу розрахункового сполучення навантажень максимальне за модулем вертикальне переміщення зростає з 5,19 до 7,55 мм (+45,5 %). Наведені на рис. 7 ізополя відображають особливості просторового розподілу переміщень в обох варіантах будівлі. Їх кількісне зіставлення виконано за числовими екст-

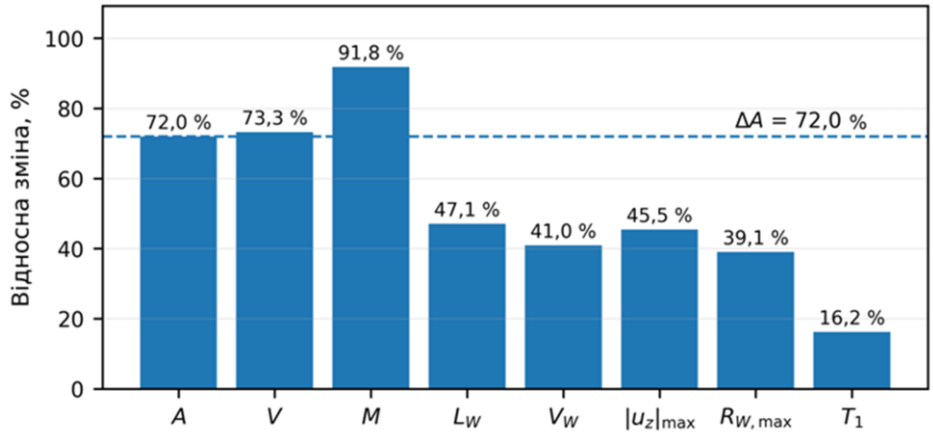


Рисунок 5 – Відносна зміна основних геометричних показників, показників матеріаломісткості та механічної реакції при переході від базового до геометрично трансформованого варіанта

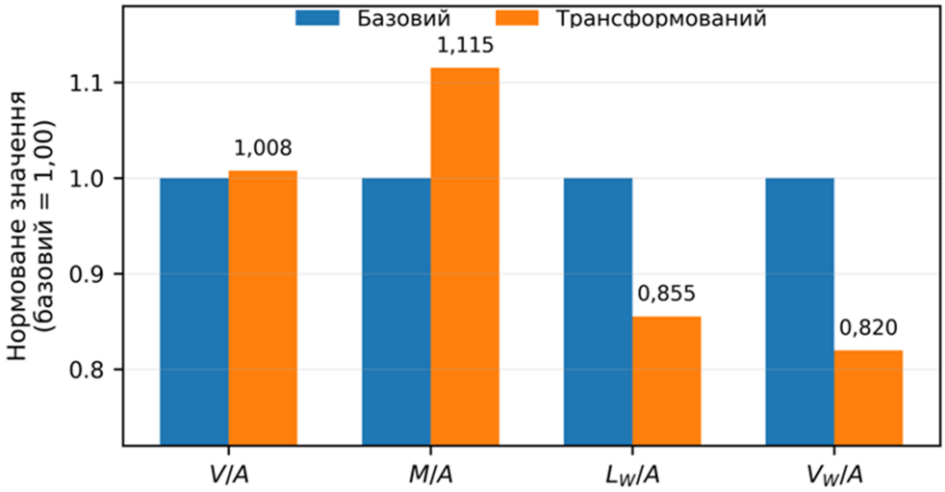


Рисунок 6 – Зміна питомих геометричних і матеріальних характеристик (значення для базового будинку прийнято за 1,00)

ремумами. Зазначимо, що для наочності відображення ізополів вертикальних переміщень на рис. 7 приховано скатні дахи, вплив яких у розрахункових моделях ураховано відповідними навантаженнями без включення до складу несучої системи.

Більш виразно вплив геометричної трансформації проявляється у співвідношенні опорних реакцій. При збільшенні сумарної вертикальної реакції з 5,20 до 9,80 МН (+88,5 %) інтегральна реакція найбільш навантаженої несучої стіни зростає значно повільніше – з 640 до 890 кН (+39,1 %). Відповідно, її частка в сумарній вертикальній реакції зменшується з 12,31 до 9,08 %. Така відмінність свідчить про зміну розподілу опорних зусиль між несучими елементами та підтверджує, що механічна реакція просторової системи визначається не лише величиною навантажень, але і конфігурацією та взаємодією її конструктивних складових.

Модальний аналіз виявив помітні відмінності динамічних характеристик двох варіантів будівлі. Перша власна частота зменшується з 5,73 до 4,93 Гц (на 14,0 %), що відповідає збільшенню першого періоду коливань з 0,175 до 0,203 с (+16,2 %). На рис. 8 представлено перші власні форми коливань обох будинків із відображенням горизонтальної складової модальних переміщень уздовж осі X (саме в напрямку цієї осі переміщення максимальні). Оскільки амплітуди власних форм нормуються під час розрахунку, їх значення характеризують відносний розподіл переміщень і не відповідають фактичним деформаціям від експлуатаційних навантажень. Аналогічну тенденцію встановлено для другої власної форми, частота якої зменшується з 9,12 до 7,58 Гц, а відповідний період збільшується з 0,110 до 0,132 с (+20,3 %). Сукупність отриманих результатів свідчить про зміну співвідношення інерційних

Таблиця 2 – Параметри глобальної реакції несучої системи будинків

Показник	Базовий	Трансформо-ваний	r_X	Зміна
максимальне вертикальне переміщення $\lvert u_z \rvert_{\max}$, мм	5,19	7,55	1,455	+45,5 %
сумарна вертикальна реакція $\sum R_Z$, кн	5 200	9 800	1,885	+88,5 %
найбільша інтегральна реакція стіни $R_{W,\max}$, кн	640	890	1,391	+39,1 %
частка $\rho_{W,\max}$, %	12,31	9,08	0,738	–26,2 %
перший власний період T_1, с	0,175	0,203	1,162	+16,2 %
другий власний період T_2, с	0,110	0,132	1,203	+20,3 %

і жорсткісних характеристик несучої системи внаслідок її геометричної та просторово-планувальної трансформації.

Віднесення сумарної вертикальної опорної реакції до розрахункової площі будівлі дає значення 31,8 кН/м² для базового та 34,9 кН/м² для геометрично трансформованого варіанта, що відповідає приросту на 9,6 %. Отже, сумарна вертикальна реакція зростає дещо швидше за розрахункову площу, що узгоджується зі збільшенням питомої маси несучих конструкцій та відображає особливості формування вертикальних навантажень у двох варіантах будівлі. Водночас цей нормований показник не слід ототожнювати з контактним тиском під фундаментами, величина та розподіл якого залежать від площі контакту, конструктивних характеристик фундаментів і деформівності ґрунтової основи.

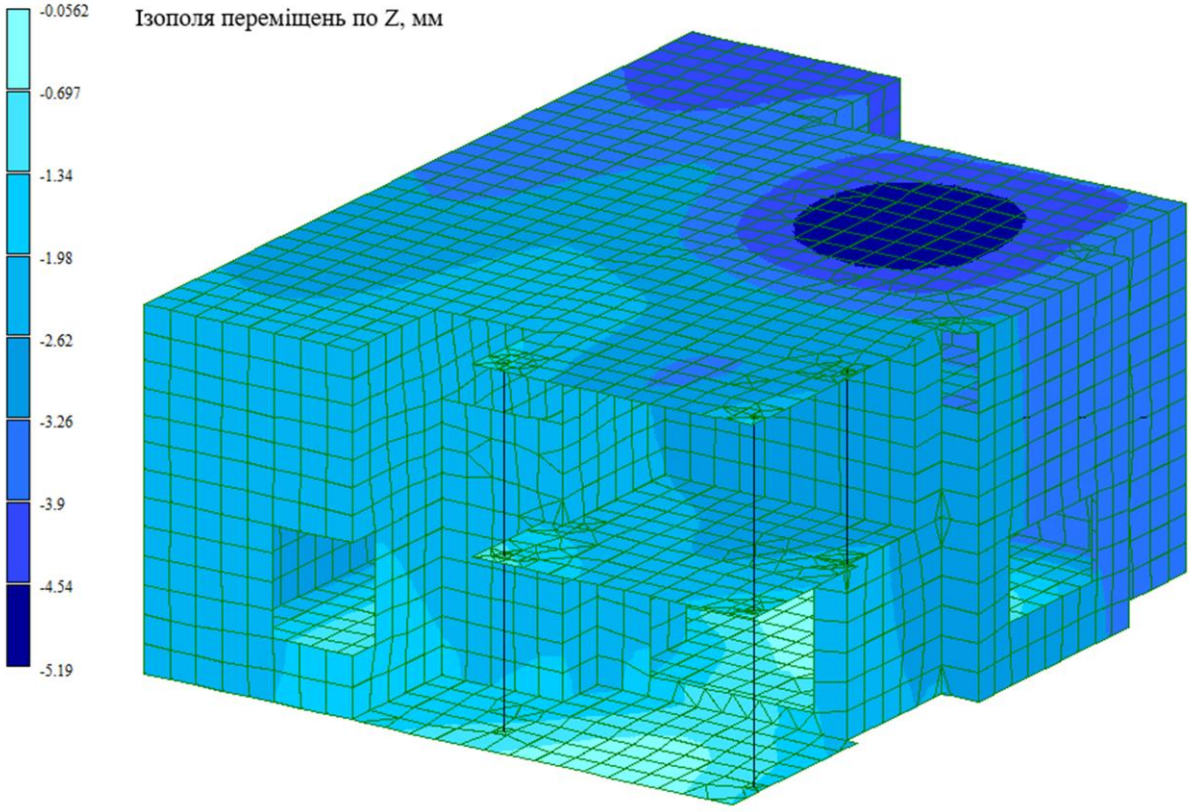
Особливості зміни основних показників при геометричній трансформації будинку

Порівняльний аналіз результатів, систематизованих у табл. 3, дає змогу виокремити три характерні співвідношення темпів зміни інтегральних показників відносно приросту розрахункової площі. Модельний об’єм збільшується практично пропорційно площі ($\eta_V = 1{,}008$), тоді як приріст маси несучих конструкцій є випереджальним ($\eta_M = 1{,}115$). Натомість сумарна довжина та об’єм несучих стін зростають повільніше за площу, що відображають відповідні індекси пропорційності $\eta_{LW} = 0{,}86$ та $\eta_{VW} = 0{,}82$. Встановлені співвідношення свідчать, що просторово-планувальна трансформація супроводжується зміною питомих матеріально-геометричних характеристик несучої системи, а не лише збільшенням її загальних розмірів.

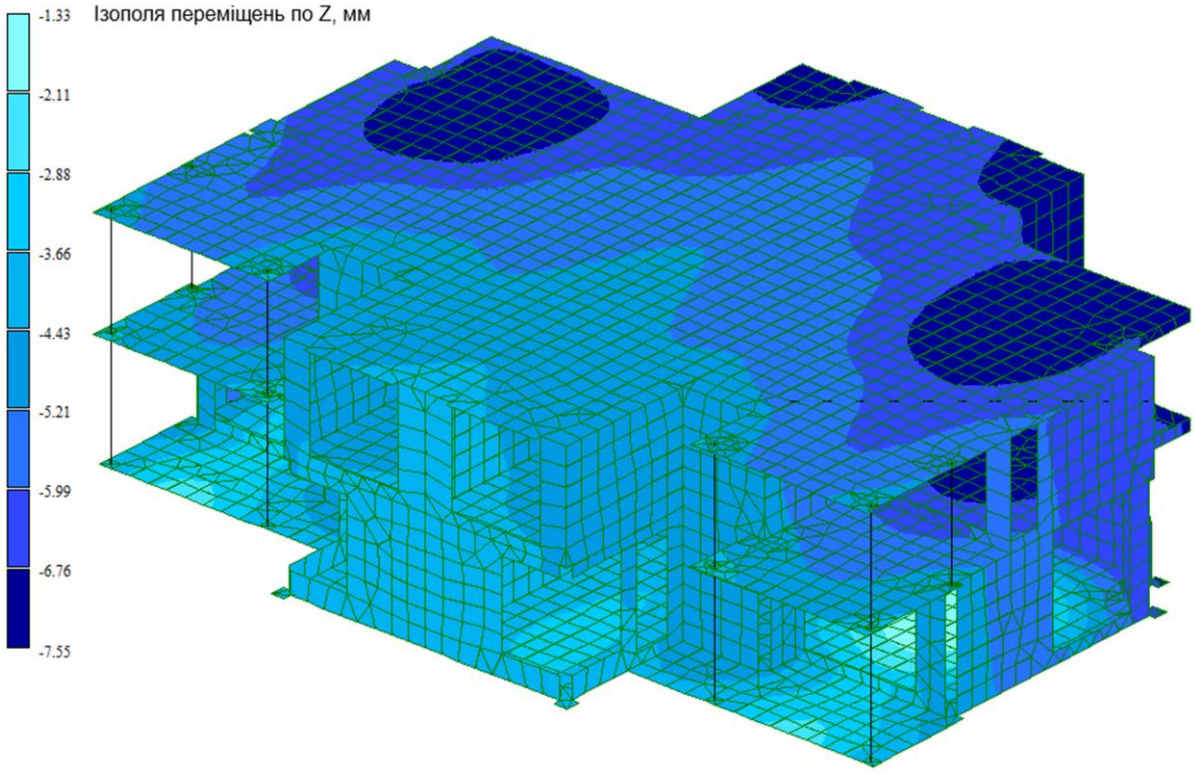
Для показників механічної реакції нормування на розрахункову площу не має безпосереднього фізичного обґрунтування, оскільки їх величини визначаються взаємодією навантажень, маси та жорсткості просторової системи. При цьому зіставлення відносних змін виявляє суттєві відмінності в реакції окремих конструктивних складових. Зокрема, при збільшенні сумарної вертикальної реакції на 88,5 % інтегральна реакція найбільш навантаженої стіни зростає лише на 39,1 %, а її частка в загальній реакції зменшується з 12,31 до 9,08 %. Максимальне за модулем вертикальне переміщення при цьому збільшується на 45,5 %, тоді як перший період власних коливань – на 16,2 %. Сукупність результатів характеризує неоднакову чутливість показників механічної реакції до геометричної трансформації.

Локальна зміна роботи спільних несучих елементів

Для локального механічного аналізу обрано три контрольні несучі стіни спільного геометричного ядра. Стіна W1 розташована поблизу зони приєднання нового об’єму, W2 є внутрішньою несучою стіною ядра, а W3 знаходиться на віддаленому від трансформації боці. Для кожної стіни порівнювали інтегральну вертикальну реакцію R_W, максимальне за абсолютним значенням мембранне зусилля $\lvert N_z \rvert$ та характерний згинальний момент $\lvert M_x \rvert$ у відповідних за розташуванням ділянках, віддалених від локальних кутових концентрацій. Результати порівняння інтегральних вертикальних реакцій та характерних внутрішніх силових факторів у контрольних стінах спільного геометричного ядра будинків наведено в табл. 4.



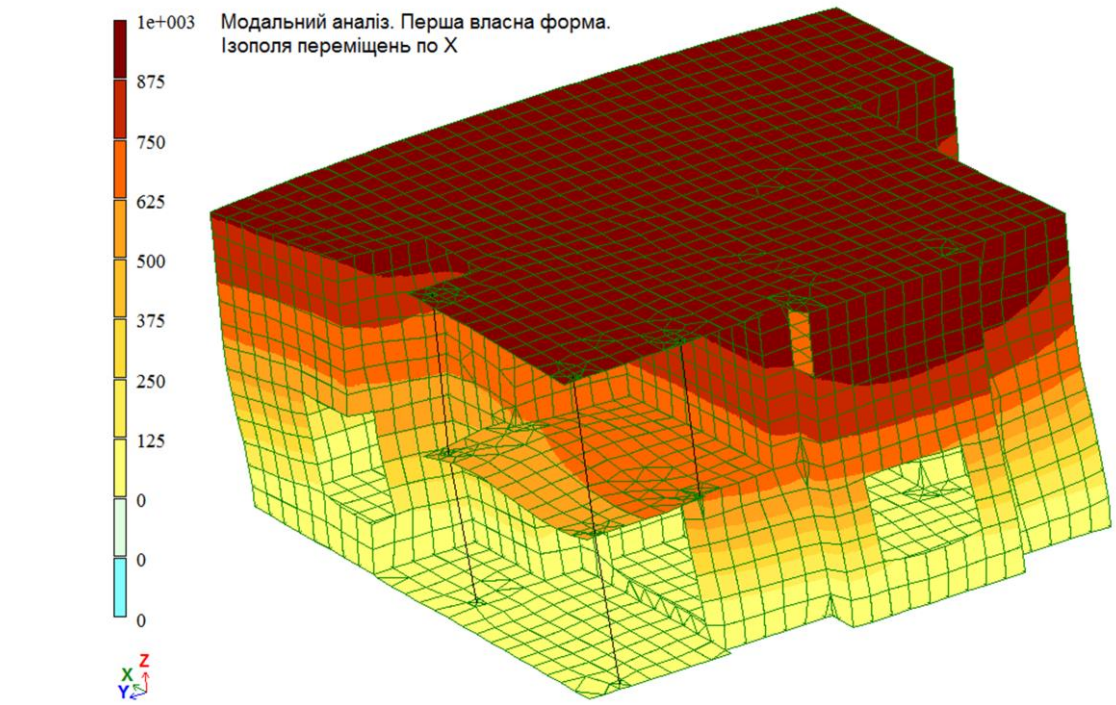
а)



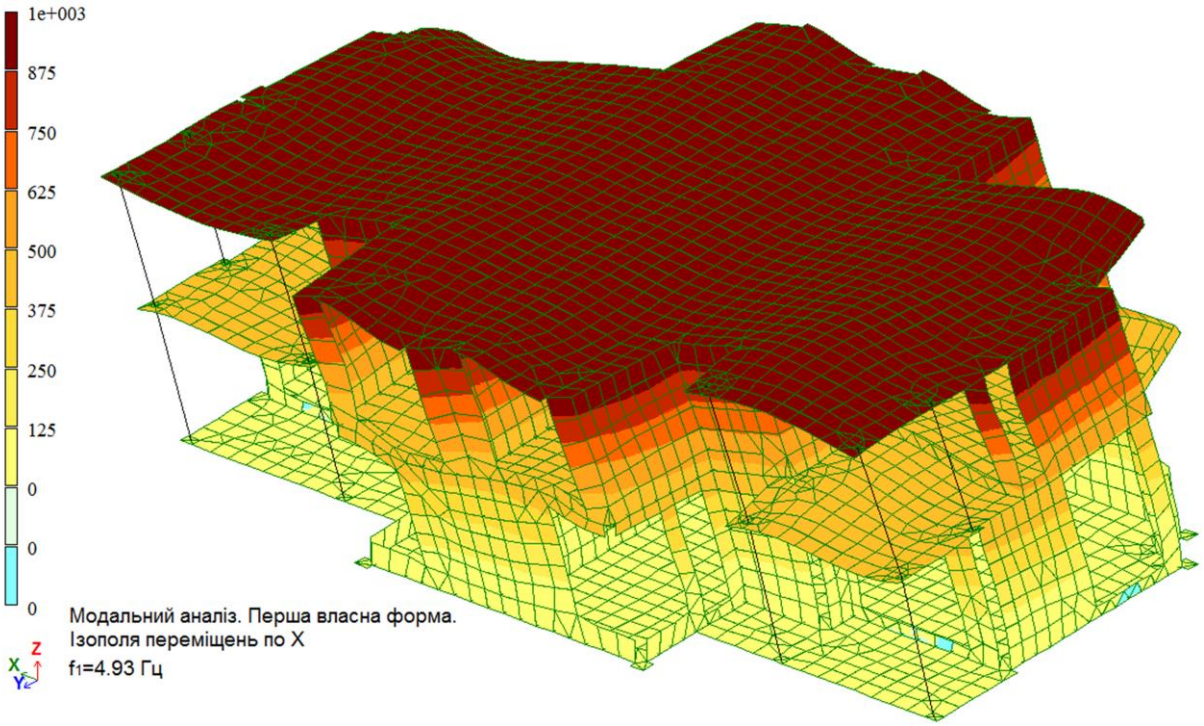
б)

а – базовий варіант; б – геометрично трансформований варіант

Рисунок 7 – Ізополя вертикальних переміщень u_z, мм



а)



б)

а – базовий варіант (f_1 = 5,73 Гц);
б – геометрично трансформований варіант (f_1 = 4,93 Гц)

Рисунок 8 – Перша форма власних коливань споріднених житлових будинків за результатами модального аналізу

Таблиця 3 – Порівняльна класифікація зміни основних показників

Показник	r_X	ΔX	η_X	Характер зміни
площа a	1,720	+72,0 %	1,000	геометричний еталон
об’єм v	1,733	+73,3 %	1,008	майже пропорційна
маса m	1,918	+91,8 %	1,115	швидше за площу
довжина стін L_W	1,471	+47,1 %	0,855	повільніше за площу
об’єм стін V_W	1,410	+41,0 %	0,820	повільніше за площу
переміщення $\lvert u_z \rvert_{\max}$	1,455	+45,5 %	—	непропорційна
реакція $R_{W,\max}$	1,391	+39,1 %	—	непропорційна
період T_1	1,162	+16,2 %	—	непропорційна

Таблиця 4 – Зміна реакцій і силових факторів у контрольних стінах спільного геометричного ядра

Стіна	Показник	Базовий	Трансформований	Зміна
W1	R_W, кН	640	890	+39,1 %
W1	$\lvert N_z \rvert$, кН/м	318	468	+47,2 %
W1	$\lvert M_x \rvert$, кН·м/м	13,4	20,6	+53,7 %
W2	R_W, кН	415	362	–12,8 %
W2	$\lvert N_z \rvert$, кН/м	271	238	–12,2 %
W2	$\lvert M_x \rvert$, кН·м/м	11,5	10,0	–13,0 %
W3	R_W, кН	351	373	+6,3 %
W3	$\lvert N_z \rvert$, кН/м	225	237	+5,3 %
W3	$\lvert M_x \rvert$, кН·м/м	8,8	9,1	+3,4 %

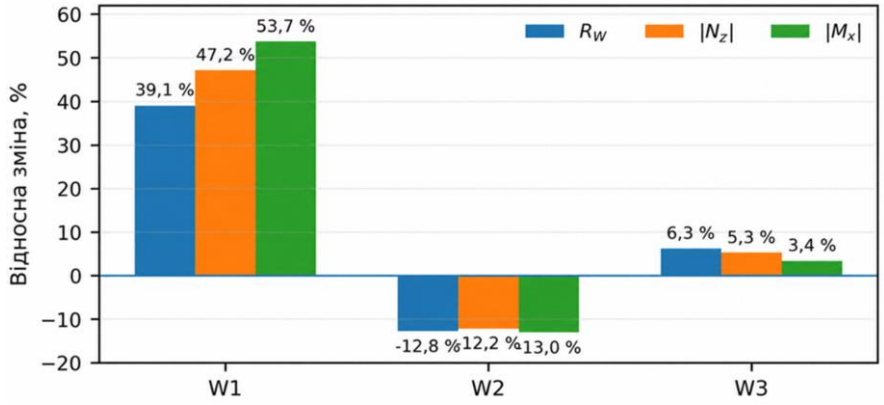


Рисунок 9 – Відносна зміна інтегральної реакції та силових факторів у контрольних стінах W1–W3 спільного геометричного ядра

Стіна W1, розташована поблизу зони геометричного розвитку, суттєво довантажується: її інтегральна реакція зростає на 39,1 %, мембранне зусилля $|N_z|$ – на 47,2 %, а характерний згинальний момент $|M_x|$ – на 53,7 %. Для внутрішньої стіни W2 спостерігається протилежна тенденція: реакція зменшується на 12,8 %, мембранне зусилля – на 12,2 %, а згинальний момент – на 13,0 %. У віддаленій стіні W3 зміни залишаються незначними: відповідно +6,3, +5,3 та +3,4 %. Таким чином, локальна реакція залежить не лише від загального приросту навантаження, але і від положення елемента відносно зони геометричної трансформації (рис. 9).

Отже, збільшення загального розміру будівлі не спричиняє рівномірного довантаження елементів спільного ядра. Поблизу геометричної трансформації окремі стіни активніше залучаються до роботи, інші розвантажуються, тоді як у віддалених елементах зміни залишаються незначними. Саме різноспрямованість

локальної реакції показує, що визначальним чинником є не лише приріст загального навантаження, але і зміна просторових шляхів його передавання.

Обговорення результатів

Проведений порівняльний аналіз показав, що механічні наслідки геометричної та просторово-планувальної трансформації не обмежуються зміною загальних розмірів будівлі. Вони проявляються як у показниках матеріаломісткості, так і в деформативності, розподілі опорних реакцій та внутрішніх зусиль. Це обґрунтовує потребу поєднати аналіз інтегральних характеристик несучої системи з локальним дослідженням відповідних елементів спільного геометричного ядра.

Майже пропорційне збільшення розрахункової площі та модельного об'єму супроводжується зростанням питомої маси несучих конструкцій і водночас зменшенням питомої довжини та об'єму несучих стін. Отже, зміна матеріаломісткості не визначається лише збільшенням об'єму стінових конструкцій. Для встановлення внеску перекриттів, покриття та інших елементів у приріст загальної маси необхідна подальша деталізація матеріальних характеристик розрахункових моделей.

Важливим механічним результатом є зміна розподілу опорних реакцій. Зменшення внеску найбільш навантаженої стіни в сумарній вертикальній реакції свідчить про зниження відносної концентрації навантаження на цьому елементі. Водночас локальний аналіз стін спільного геометричного ядра виявив неоднаковий характер зміни внутрішніх зусиль за незмінних геометричних і матеріальних характеристик самих стін. Зростання зусиль поблизу доданої частини, їх зменшення у внутрішній стіні та відносно незначні зміни у віддаленому елементі узгоджуються з перерозподілом навантажень і зміною взаємодії конструктивних елементів у просторовій системі.

Результати модального аналізу доповнюють отриману картину. Зменшення перших двох власних частот відображає зміну співвідношення інерційних і жорсткісних характеристик несучої системи. При цьому вплив збільшення маси та зміни її просторового розподілу не можна відокремити від впливу жорсткості лише за значеннями власних частот.

Практичне значення результатів полягає в тому, що інтегральні геометричні та питомі матеріальні характеристики можуть використовуватися для попереднього оцінювання наслідків трансформації, проте пропорційне перенесення реакцій і внутрішніх зусиль із базового варіанта не забезпечує надійної оцінки локальної механічної реакції. Для цього необхідний окремий просторовий розрахунок геометрично трансформованої будівлі з урахуванням конфігурації несучої системи та взаємодії фундаментів із ґрунтовою основою.

Подальші дослідження автори планують спрямувати на параметричний аналіз послідовних варіантів просторово-планувальної трансформації за узгоджених розрахункових умов. Це дасть змогу уточнити характер залежності механічної реакції від параметрів трансформації, оцінити вплив ґрунтової основи та перевірити можливість немонотонної зміни локальних зусиль у конструктивних елементах спільного геометричного ядра.

Висновки

1. Геометрична трансформація спорідненої малоповерхової будівлі супроводжується неоднаковими темпами зміни геометричних і матеріальних характеристик. При збільшенні розрахункової площі на 72,0 % модельний об'єм зріс на 73,3 %, а маса несучих конструкцій – на 91,8 %. Разом з цим сумарна довжина та об'єм несучих стін збільшилися відповідно на 47,1 і 41,0 %, продемонструвавши суттєво нижчі темпи приросту порівняно з розрахунковою площею.

2. Аналіз питомих характеристик виявив збільшення маси несучих конструкцій на одиницю розрахункової площі на 11,5 % за одночасного зменшення питомої довжини та питомого об'єму несучих стін відповідно на 14,5 і 18,0 %. Оскільки матеріал стін в обох будівлях однаковий, приріст їхньої маси пропорційний приросту об'єму, а випереджальне зростання сумарної маси конструкцій свідчить про збільшення частки інших конструктивних елементів у загальній масі. Отже, геометрична трансформація супроводжується не лише збільшенням розмірів будівлі, але й зміною співвідношення мас окремих складових її несучої системи.

3. Геометрична трансформація вплинула на розподіл вертикальних опорних реакцій. При збільшенні їх сумарної величини на 88,5 % інтегральна реакція найбільш навантаженої стіни зросла лише на 39,1 %, а її частка в сумарній реакції зменшилася з 12,31 до 9,08 %. Це вказує на зниження відносної концентрації вертикального навантаження на зазначеній стіні.

4. У відповідних несучих стінах спільного геометричного ядра встановлено неоднакові

зміни внутрішніх зусиль. Мембранне зусилля у стіні поблизу доданої частини збільшилося на 47,2 %, у внутрішній стіні зменшилося на 12,2 %, а у віддаленій стіні змінилося лише на 5,3 %. Отримані результати підтверджують, що зміна просторово-планувальної конфігурації впливає на механічну реакцію навіть тих несучих елементів, геометрія та матеріал яких залишаються незмінними.

5. Максимальне за модулем вертикальне переміщення збільшилося на 45,5 %, а перший період власних коливань – на 16,2 %, що характеризує зміну деформативних і динамічних властивостей несучої системи. Отримані результати обґрунтовують необхідність проведення числового аналізу геометрично трансформованих варіантів. Пропорційне перенесення розрахункових характеристик із базової будівлі не є достатнім для оцінювання локальних зусиль і деформативності зміненої конструктивної системи.

6. Встановлені кількісні закономірності характеризують механічну реакцію розглянутої пари споріднених малоповерхових будівель зі стіновою несучою системою за прийнятих розрахункових умов і не можуть без додаткової перевірки поширюватися на інші конструктивні конфігурації. Водночас запропонований методичний підхід до аналізу спільного геометричного ядра може бути застосований до ширшого класу геометрично споріднених будівель. Подальша перевірка на розширеній сукупності конструктивних варіантів дозволить оцінити відтворюваність виявлених ефектів перерозподілу зусиль та встановити межі їх узагальнення.

Подяки
Відсутні.

Конфлікт інтересів
Відсутній.

Список використаних джерел

1. Rankin K. H., Arceo A., Isin K., Saxe S. Embodied GHG of missing middle: Residential building form and strategies for more efficient housing. *Journal of Industrial Ecology*. 2024. Vol. 28, No. 3. P. 455–468. DOI: https://doi.org/10.1111/jiec.13461.

2. What really matters in multi-storey building design? A simultaneous sensitivity study of embodied carbon, construction cost, and operational energy / H. L. Gauch et al. *Applied Energy*. 2023. Vol. 333. Art. 120585. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120585.

3. Toporkov V. Transformation as a means of increasing the efficiency of the use of living space. *Current Problems of Architecture and Urban Planning*. 2020. Vol. 56. P. 293–304. DOI: https://doi.org/10.32347/2077-3455.2020.56.293-304.

4. Evaluation of Data Extracted from Floor Plans for Apartment Complex Remodeling / D. Shin et al. *Advances in Civil Engineering*. 2022. Vol. 2022. Art. 9376886. DOI: https://doi.org/10.1155/2022/9376886.

5. Building shape optimization based on interconnected embodied and operational energy and carbon impacts / F. Nazari et al. *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 325. Art. 114933. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114933.

6. Islam M. R., Chakraborty S., Kim D. Effect of Plan Irregularity and Beam Discontinuity on Structural Performances of Buildings under Lateral Loadings. *Architectural Research*. 2022. Vol. 24, No. 2. P. 53–61. DOI: https://doi.org/10.5659/AIKAR.2022.24.2.53.

7. Reduced-order models for the seismic assessment of plan-irregular low-rise frame buildings / S. Ruggieri et al. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2022. Vol. 51, No. 14. P. 3327–3346. DOI: https://doi.org/10.1002/eqe.3725.

8. Aşıkoğlu A., Vasconcelos G., Lourenço P. B. Overview on the Nonlinear Static Procedures and Performance-Based Approach on Modern Unreinforced Masonry Buildings with Structural Irregularity. *Buildings*. 2021. Vol. 11, No. 4. Art. 147. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings11040147.

9. Pushover analysis of unreinforced irregular masonry buildings: Lessons from different modeling approaches / A. Aşıkoğlu et al. *Engineering Structures*. 2020. Vol. 218. Art. 110830. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110830.

10. Equivalent frame idealization of walls with irregular openings in masonry buildings / S. Cattari et al. *Engineering Structures*. 2022. Vol. 256. Art. 114055. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114055.

11. Validation of non-linear equivalent-frame models for irregular masonry walls / G. Camata et al. *Engineering Structures*. 2022. Vol. 253. Art. 113755. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113755.

12. Evaluation of vertical irregularity effects of historical masonry buildings through a simplified procedure: The case of Florence city center / V. Alecci et al. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2024. Vol. 22. P. 2085–2104. DOI: https://doi.org/10.1007/s10518-023-01846-0.

13. Grzyb K., Hua Y., Jasiński R., Milani G. Redistribution of internal forces in masonry walls: A study through full-scale experiments and numerical simulations. *Engineering Structures*. 2025. Vol. 340. Art. 120758. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120758.

14. Hu Y., Ma P., Yao J. Effects of aspect ratios and vertical loads on in-plane seismic behavior of unreinforced masonry walls: A numerical simulation. *PLOS ONE*. 2023. Vol. 18, No. 3. Art. e0282430. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0282430.

15. Zajac M., Kuzniar K., Tatara T. Effect of Load-Bearing Wall Material on Building Dynamic Properties. *Materials*. 2024. Vol. 17, No. 24. Art. 6101. DOI: https://doi.org/10.3390/ma17246101.

16. Experimental Vibration Analysis in the Knowledge Process of a Historic Confined Masonry Building / C. Tripepi et al. *Buildings*. 2023. Vol. 13, No. 10. Art. 2560. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings13102560.

17. Ren R., Zhang J. A New Framework to Address BIM Interoperability in the AEC Domain from Technical and Process Dimensions. *Advances in Civil Engineering*. 2021. Vol. 2021. Art. 8824613. DOI: https://doi.org/10.1155/2021/8824613.

18. BIM in Structural Project: Interoperability Analyses and Data Management / A. M. Gomes et al. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No. 17. Art. 8814. DOI: https://doi.org/10.3390/app12178814.

19. Towards BIM-Based Sustainable Structural Design Optimization: A Systematic Review and Industry Perspective / M. Afzal et al. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 20. Art. 15117. DOI: https://doi.org/10.3390/su152015117.

20. Kathiravel R., Feng H. Structural and embodied carbon performance optimization for low carbon buildings through BIM-based integrated design. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 98. Art. 111008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111008.

21. Mergos P. E. Structural design of reinforced concrete frames for minimum amount of concrete or embodied carbon. *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 318. Art. 114505. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114505.

22. Чашин Д. Ю., Рахманін О. А., Хіль Д. В. Упровадження BIM-технологій як основи для створення комплексних інформаційних моделей в керуванні будівництвом. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 1 (007). С. 63–70. DOI: https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.63.834.

23. Barabash M. S., Romashkina M. A. LIRA-SAPR Program for Generating Design Models of Reconstructed Buildings. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018. Vol. 14, No. 4. P. 70–80. DOI: https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-4-70-80.

24. Барабаш М. С., Костира Н. О., Томашевський А. В. Визначення напружено-деформованого стану та міцності пошкоджених несних конструкцій інструментами ПК «ЛІРА-САПР». *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 1 (007). С. 7–14. DOI: https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.7.827.

References

1. Rankin, K. H., Arceo, A., Isin, K., & Saxe, S. (2024). Embodied GHG of missing middle: Residential building form and strategies for more efficient housing. *Journal of Industrial Ecology*, *28*(3), 455–468. https://doi.org/10.1111/jiec.13461

2. Gauch, H. L., & et al. (2023). What really matters in multi-storey building design? A simultaneous sensitivity study of embodied carbon, construction cost, and operational energy. *Applied Energy*, *333*, Article 120585. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120585

3. Toporkov, V. (2020). Transformation as a means of increasing the efficiency of the use of living space. *Current Problems of Architecture and Urban Planning*, *56*, 293–304. https://doi.org/10.32347/2077-3455.2020.56.293-304

4. Shin, D., & et al. (2022). Evaluation of data extracted from floor plans for apartment complex remodeling. *Advances in Civil Engineering*, *2022*, Article 9376886. https://doi.org/10.1155/2022/9376886

5. Nazari, F., & et al. (2024). Building shape optimization based on interconnected embodied and operational energy and carbon impacts. *Energy and Buildings*, *325*, Article 114933. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114933

6. Islam, M. R., Chakraborty, S., & Kim, D. (2022). Effect of plan irregularity and beam disconti - uity on structural performances of buildings under lateral loadings. *Architectural Research*, *24*(2), 53–61. https://doi.org/10.5659/AIKAR.2022.24.2.53

7. Ruggieri, S., & et al. (2022). Reduced-order models for the seismic assessment of plan-irregular low-rise frame buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *51*(14), 3327–3346. https://doi.org/10.1002/eqe.3725

8. Aşıkoğlu, A., Vasconcelos, G., & Lourenço, P. B. (2021). Overview on the nonlinear static procedures and performance-based approach on modern unreinforced masonry buildings with structural irregularity. *Buildings*, *11*(4), Article 147. https://doi.org/10.3390/buildings11040147

9. Aşıkoğlu, A., & et al. (2020). Pushover analysis of unreinforced irregular masonry buildings: Lessons from different modeling approaches. *Engineering Structures*, *218*, Article 110830. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110830

10. Cattari, S., & et al. (2022). Equivalent frame idealization of walls with irregular openings in masonry buildings. *Engineering Structures*, *256*, Article 114055. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114055

11. Camata, G., & et al. (2022). Validation of non-linear equivalent-frame models for irregular masonry walls. *Engineering Structures*, *253*, Article 113755. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113755

12. Alecci, V., & et al. (2024). Evaluation of vertical irregularity effects of historical masonry buildings through a simplified procedure: The case of Florence city center. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *22*(5), 2085–2104. https://doi.org/10.1007/s10518-023-01846-0

13. Grzyb, K., Hua, Y., Jasiński, R., & Milani, G. (2025). Redistribution of internal forces in masonry walls: A study through full-scale experiments and numerical simulations. *Engineering Structures*, *340*, Article 120758. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120758

14. Hu, Y., Ma, P., & Yao, J. (2023). Effects of aspect ratios and vertical loads on in-plane seismic behavior of unreinforced masonry walls: A numerical simulation. *PLOS ONE*, *18*(3), Article e0282430. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0282430

15. Zajac, M., Kuzniar, K., & Tatara, T. (2024). Effect of load-bearing wall material on building dynamic properties. *Materials*, *17*(24), Article 6101. https://doi.org/10.3390/ma17246101

16. Tripepi, C., & et al. (2023). Experimental vibration analysis in the knowledge process of a historic confined masonry building. *Buildings*, *13*(10), Article 2560. https://doi.org/10.3390/buildings13102560

17. Ren, R., & Zhang, J. (2021). A new framework to address BIM interoperability in the AEC domain from technical and process dimensions. *Advances in Civil Engineering*, *2021*, Article 8824613. https://doi.org/10.1155/2021/8824613

18. Gomes, A. M., & et al. (2022). BIM in structural project: Interoperability analyses and data management. *Applied Sciences*, *12*(17), Article 8814. https://doi.org/10.3390/app12178814

19. Afzal, M., & et al. (2023). Towards BIM-based sustainable structural design optimization: A systematic review and industry perspective. *Sustainability*, *15*(20), Article 15117. https://doi.org/10.3390/su152015117

20. Kathiravel, R., & Feng, H. (2024). Structural and embodied carbon performance optimization for low carbon buildings through BIM-based integrated design. *Journal of Building Engineering*, *98*, Article 111008. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111008

21. Mergos, P. E. (2024). Structural design of reinforced concrete frames for minimum amount of concrete or embodied carbon. *Energy and Buildings*, *318*, Article 114505. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114505

22. Chashyn, D. Yu., Rakhmanin, O. A., & Khil, D. V. (2022). Uprovadzhennia BIM-tekhnolohii yak osnovy dlia stvorennia kompleksnykh informatsiinykh modelei v keruvanni budivnytstvom [Implementation of BIM-technologies as a basis for creating complex information models in construction management]. *Ukrainskyi Zhurnal Budivnytstva ta Arkhitektury*, (1(007)), 63–70. https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.63.834 (in Ukrainian)

23. Barabash, M. S., & Romashkina, M. A. (2018). LIRA-SAPR program for generating design models of reconstructed buildings. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, *14*(4), 70–80. https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-4-70-80

24. Barabash, M. S., Kostyra, N. O., & Tomashevskyi, A. V. (2022). Vyznachennia napruzheno-deformovanoho stanu ta mitsnosti poshkodzhenykh nesnykh konstruktsii instrumentamy PK "LIRA-SAPR" [Determination of stress-strain state and strength of damaged load-bearing structures with PC "LIRA-SAPR" tools]. *Ukrainskyi Zhurnal Budivnytstva ta Arkhitektury*, (1(007)), 7–14. https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.7.827 (in Ukrainian)

EFFECT OF GEOMETRIC TRANSFORMATION ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF STRUCTURAL SYSTEMS IN RELATED LOW-RISE RESIDENTIAL BUILDINGS

Andrusyak A. V.
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
St. Karpatska, 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-2099-9045
e-mail: andriiandrusiak@gmail.com

Chemerys A. V.
Student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
St. Karpatska, 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine
https://orcid.org/0009-0009-3206-1856
e-mail: andrii.chemerys-bm251@nung.edu.ua

Velychkovych A. S.
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
St. Karpatska, 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-2685-8753
e-mail: a_velychkovych@ukr.net

Abstract. This study investigates the effect of spatial and layout transformation on the mechanical behavior of the structural systems of two related low-rise residential buildings. The buildings are considered as the baseline and geometrically expanded variants of a common architectural and structural concept. Three-dimensional physical and geometric models of both buildings were developed in the SAPFIR-3D building information modeling environment and subsequently converted into finite element models using the LIRA-FEM software package. Consistent principles of discretization, design load combination generation, and boundary condition modeling were applied to both variants, while soil–structure interaction was represented using the two-parameter Winkler–Pasternak foundation model. The comparative analysis was performed using absolute, relative, and specific indicators of geometric characteristics, material intensity, and mechanical response, together with an assessment of the structural behavior of selected load-bearing walls within the common geometric core. A 72.0% increase in the calculated floor area is accompanied by an almost proportional increase in the modeled building volume of 73.3%, whereas the mass of load-bearing structures increases at a higher rate of 91.8%. The mechanical response of the structural system does not follow simple proportional scaling. Specifically, the maximum absolute vertical displacement increases by 45.5%, the integrated reaction of the most heavily loaded load-bearing wall by 39.1%, and the first natural period of vibration by only 16.2%. Local analysis of the common geometric core revealed opposing trends in the redistribution of internal force resultants. The membrane force increases by 47.2% in the wall adjacent to the geometrically expanded portion, decreases by 12.2% in an internal wall of the core, and changes by only 5.3% in a more distant wall. The results demonstrate that the geometric expansion of a related building produces non-proportional and locally opposing changes in mechanical response due to changes in the spatial distribution of stiffness and load-transfer paths. The proposed approach can be applied to the design and evaluation of alternative building configurations to quantitatively assess the effects of spatial and layout transformations on material intensity, deformability, and internal force distribution.

Keywords: geometric transformation; low-rise building; numerical modeling; SAPFIR-3D; LIRA-FEM; load-bearing walls; force redistribution