

ІНЖЕНЕРНО-КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ РЕКОНСТРУЙОВАНИХ БУДІВЕЛЬ

Інженерно-конструктивна стійкість реконструйованих будівель визначає здатність їх несучих систем зберігати рівновагу, форму та працездатність під дією різних типів навантажень. Під час реконструкції будівель відбувається зміна геометрії, жорсткісних характеристик і умов роботи конструкцій, що потребує нового підходу до проєктування та оцінювання їхньої надійності. Вплив модернізації елементів на загальну стабільність системи зумовлює необхідність аналізу напружено-деформованого стану з урахуванням взаємодії матеріалів, вузлів і опор.

Особливу роль відіграє поєднання аналітичних і чисельних методів розрахунку, які забезпечують точне визначення зон критичних напружень, деформацій та втрати рівноваги. Метод скінченних елементів дозволяє моделювати складні просторові системи, включаючи дефекти, отвори та зони підсилення. Аналітичні підходи – закон Гука, рівняння рівноваги, формули Ейлера – дають можливість оцінити запас міцності й критичні параметри втрати стійкості для окремих елементів. Таке поєднання методів утворює основу для комплексної оцінки ефективності реконструкційних заходів.

Одним із ключових напрямів підвищення стійкості є підсилення несучих елементів. Використання сталевих арматур, обоймувань і композитних матеріалів дозволяє суттєво підвищити несучу здатність конструкцій без демонтажу або надмірного збільшення маси будівлі. Композити, зокрема вуглецеві та базальтові волокна, характеризуються високою міцністю, малою вагою й корозійною стійкістю, що забезпечує довговічність реконструйованих об'єктів. Застосування таких матеріалів особливо ефективно для будівель історичного або соціального призначення, де мінімальне втручання у структуру є важливою вимогою. Ефективність різних методів підсилення оцінюється через показники питомого ефекту – співвідношення між приростом несучої здатності та витратами. Порівняльний аналіз підтверджує, що композитні системи демонструють найвищі технічні результати при довгостроковій економічній вигідності. Поєднання сталевих арматур з композитним підсиленням формує збалансоване рішення з оптимальними показниками стійкості, вартості та технологічної складності.

Ключові слова: *стійкість будівель, реконструкція, підсилення конструкцій, армування, композитні матеріали, жорсткість, метод скінченних елементів, сейсмостійкість.*

Вступ. Проблема забезпечення стійкості реконструйованих будівель є однією з найактуальніших у сучасному будівництві. Застарілий житловий і промисловий фонд потребує модернізації, однак втручання в існуючі конструкції створює ризики

зміни силових схем, перерозподілу навантажень та втрати рівноваги системи. Сучасна інженерна практика вимагає інтеграції класичних методів розрахунку з цифровими технологіями моделювання, що дозволяють оцінити поведінку конструкцій у різних режимах навантаження. Реконструкція будівель передбачає не лише заміну зношених елементів, а й адаптацію об'єкта до нових функціональних умов: добудову поверхів, посилення фундаментів, зміну планувальної структури. Кожне з цих рішень змінює статичну та динамічну поведінку системи, тому завдання проектувальника полягає у забезпеченні достатнього запасу міцності та жорсткості.

Важливим аспектом є комплексне врахування статичної, динамічної та конструктивної стійкості. Саме їх поєднання визначає надійність споруди у процесі експлуатації. Використання аналітичних методів (закон Гука, рівняння рівноваги при згині) у поєднанні з чисельним аналізом (МСЕ) дозволяє створювати точні моделі поведінки конструкцій. Під час реконструкції часто застосовують методи підсилення – армування, обоймування, використання композитів. Ефективність кожного способу оцінюють не лише за технічними параметрами, але й за економічною доцільністю. Питомий ефект підсилення виступає ключовим критерієм для вибору технології.

Актуальність. В Україні значна частина будівельного фонду перебуває у стані фізичного і морального зносу. Підвищення вимог до експлуатаційної надійності, енергоефективності та сейсмостійкості вимагає переосмислення підходів до реконструкції споруд. Проблема стійкості конструкцій виходить за межі суто інженерної задачі та стає складовою сталого розвитку міського середовища. Сучасні умови реконструкції передбачають використання комбінованих матеріалів і методів підсилення, які дозволяють підвищити несучу здатність без значного збільшення маси будівлі. Композитні матеріали, зокрема вуглецеві волокна, забезпечують високу міцність і довговічність, що є критичним для історичних і житлових будівель.

З урахуванням зростаючої сейсмічної активності та кліматичних впливів проблема стабільності реконструйованих будівель набуває особливої гостроти. Інженерно-конструктивні рішення, що базуються на принципах системної рівноваги, моделювання напружено-деформованого стану і багатofакторного аналізу, стають основою для безпечної експлуатації об'єктів.

Постановка проблеми. Реконструкція будівель часто супроводжується зміною несучих систем, перерозподілом навантажень і виникненням нових деформаційних зон. Втрата локальної або загальної стійкості конструкцій призводить до пошкодження елементів, появи тріщин і аварійних станів. Недостатня увага до аналізу силових потоків, жорсткості з'єднань і взаємодії матеріалів може спричинити нерівномірне навантаження та зниження несучої здатності. Існуючі методики підсилення не завжди враховують динамічну поведінку будівлі та вплив зовнішніх факторів, таких як вітер чи сейсмічні коливання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Наукові та методичні праці [1–9], використані у дослідженні, висвітлюють питання міцності, стійкості й реконструкції будівельних об'єктів. Міністерські та галузеві документи визначають нормативні підходи до оцінки технічного стану конструкцій, проектування та реконструкції. Методичні підручники з технічної механіки та будівельних норм конкретизують аналітичні залежності, що застосовуються при перевірці стійкості елементів. Однак у більшості джерел увага зосереджується на розрахункових аспектах без детального

техніко-економічного аналізу варіантів підсилення. Недостатньо розкрито питання динамічної поведінки реконструйованих споруд та впливу композитних матеріалів на перерозподіл навантажень. Ці аспекти залишаються відкритими і потребують подальших досліджень для забезпечення інтегрованого підходу до підвищення стійкості.

Метою статті є комплексне обґрунтування інженерно-конструктивних рішень для підвищення стійкості реконструйованих будівель. У роботі передбачено поєднання аналітичних методів (закон Гука, рівняння рівноваги) із чисельними підходами (метод скінченних елементів), що дозволяє оцінити статичну, динамічну та конструктивну стійкість системи. На основі порівняння традиційних та інноваційних методів підсилення визначено їх технічну ефективність і економічну доцільність. Результати мають практичну цінність для інженерів, проєктувальників і науковців, які займаються модернізацією будівельного фонду та забезпеченням його надійності.

Виклад основної інформації. Стійкість будівель у контексті реконструкції розглядається як комплексна властивість конструктивної системи зберігати свою рівновагу, форму та функціональну придатність під впливом внутрішніх і зовнішніх навантажень. У процесі реконструкції поняття набуває особливого значення, адже втручання у структуру будівлі – зміна несучих елементів, посилення фундаментів, добудова поверхів чи перепланування – може суттєво впливати на розподіл навантажень і, відповідно, на загальну стабільність об'єкта. Стійкість визначає здатність конструкції протидіяти руйнуванню, надмірним деформаціям або втраті несучої здатності при впливі статичних, динамічних, температурних чи технологічних факторів.

Основними чинниками, що формують рівень стійкості реконструйованої будівлі, є фізико-механічні властивості матеріалів, величина та характер навантажень, просторово-конструктивна схема, умови закріплення опорних елементів, а також температурно-вологісний режим експлуатації. Зміна одного з цих параметрів у процесі реконструкції може викликати перерозподіл напружень, виникнення нових деформаційних зон або навіть локальну втрату стійкості. При проєктуванні реконструкції необхідно забезпечити баланс між міцністю, жорсткістю та деформативністю конструкцій, щоб уникнути їх критичного перевантаження [1].

Залежно від характеру прояву стійкість будівель поділяється на статичну, динамічну та конструктивну. Статична стійкість визначає здатність конструкцій протистояти постійним і тривалим навантаженням без зміни рівноваги. Динамічна стійкість характеризує поведінку будівлі під впливом змінних або імпульсних дій, як вітер, сейсмічні коливання, робота машин і механізмів. Конструктивна стійкість відображає здатність системи зберігати цілісність при локальних ушкодженнях або перерозподілі навантажень між елементами. Комплексне врахування цих аспектів під час реконструкції дозволяє досягти підвищеного рівня надійності, довговічності та безпеки будівель у сучасних умовах експлуатації.

Щоб оцінити запас надійності елемента після реконструкції, порівнюють критичне (граничне) зусилля/момент, за якого система втрачає стійкість, із робочим (розрахунковим) навантаженням у найбільш несприятливій комбінації. Відношення цих величин і є інтегральним показником стійкості: чим воно більше за 1, тим більший запас безпеки конструкції за прийнятої схеми роботи та фактичних жорсткісних параметрів.

Загальний коефіцієнт стійкості конструкції:

$$K_c = \frac{X_{кр}}{X_{роб}}, \quad (1)$$

де: K_c – загальний коефіцієнт стійкості (безрозмірний); $X_{кр}$ – критичний параметр втрати стійкості (критичне зусилля $N_{кр}$ або критичний момент $M_{кр}$); $X_{роб}$ – робочий (розрахунковий) параметр за діючими навантаженнями ($N_{роб}$ або $M_{роб}$).

Візуалізація силового стану конструкції дозволяє ідентифікувати найбільш напружені ділянки, визначити напрямки деформацій і перевірити правильність обраних рішень щодо підсилення чи зміни схеми навантаження. Підхід забезпечує точність розрахунків, надійність експлуатації об'єкта після модернізації. Структурну взаємодію силових потоків і напрямки деформаційних переміщень у межах несучої системи відображено на рис. 1, котрий демонструє узгодження між вертикальними та горизонтальними зусиллями, роботу елементів каркаса та взаємодію конструкційних матеріалів під дією навантажень різного типу.

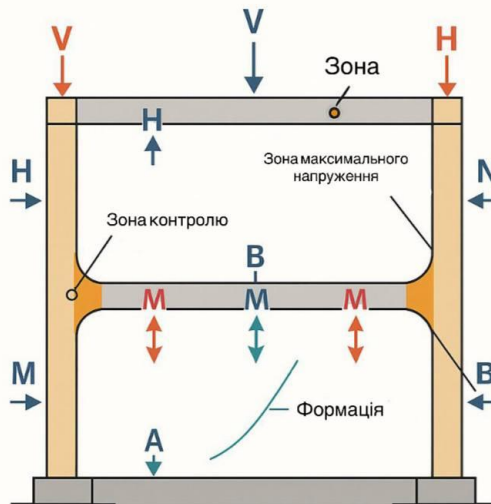


Рис. 1. Схема розподілу сил і деформацій у несучій системі реконструйованої будівлі (розроблено автором на основі [2])

Сучасні методи інженерного аналізу передбачають використання методу скінчених елементів (МСЕ), котрий дозволяє розділити конструкцію на велику кількість елементів простої геометричної форми, для яких розраховуються локальні параметри – напруження, переміщення, деформації. Підхід забезпечує можливість врахувати складні просторові взаємодії між несучими елементами, наявність отворів, тріщин або зон підсилення. МСЕ широко застосовується для аналізу як нових, так і реконструйованих об'єктів, дозволяє моделювати вплив підсилення конструкцій, заміну матеріалів і зміни у жорсткісній структурі системи.

При моделюванні стану матеріалів будівель застосовуються пружні та пластичні моделі поведінки. Пружна модель передбачає, що після зняття

навантаження матеріал повністю відновлює свою форму, що характерно для сталевих і залізобетонних конструкцій на початкових етапах навантаження. Пластична модель, навпаки, враховує незворотні деформації та втрату жорсткості при перевищенні межі текучості, що особливо важливо для аналізу граничних станів конструкцій під час реконструкції або підсилення [3].

Однією з базових залежностей у механіці матеріалів є закон Гука, котрий описує лінійний зв'язок між напруженням і відносною деформацією в межах пружного стану матеріалу. Закономірність використовується під час розрахунку елементів реконструйованих конструкцій для визначення допустимих деформацій та оцінки стану матеріалу під дією робочих навантажень. Закон Гука є фундаментом для подальших аналітичних і чисельних моделей, що застосовуються в інженерній практиці.

Закон Гука для пружного стану:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

де: σ – нормальне напруження, Па (Н/м²); E – модуль пружності (модуль Юнга), Па; ε — відносна деформація (безрозмірна величина).

Так, для сталевого елемента після реконструкції будівлі відомо, що модуль пружності сталі $E = 2.1 \times 10^{11}$ Па, а відносна деформація в зоні розтягнення дорівнює $\varepsilon = 0.0008$.

Тоді:

$$\sigma = 2.1 \times 10^{11} \times 0.0008 = 1.68 \times 10^8 \text{ Па} = 168 \text{ МПа}.$$

Інтерпретація:

Отримане напруження $\sigma = 168$ МПа менше за межу текучості сталі ($\sigma_T \approx 240$ МПа), отже, елемент перебуває у пружному стані, що гарантує відновлення початкової форми після зняття навантаження.

Під час реконструкції важливо забезпечити рівновагу та жорсткість вигнутих елементів – балок, ригелів, плит перекриття. Для цього використовують рівняння рівноваги при згині, котре пов'язує внутрішній згинальний момент із геометричними та фізичними характеристиками матеріалу. Співвідношення лежить в основі перевірки прогинів і напружень у балках, що працюють на згин у пружній області.

Рівняння рівноваги для балки при згині:

$$M = \frac{E \cdot J}{R}, \quad (3)$$

де: M – згинальний момент, Н·м; E – модуль пружності матеріалу, Па; J – момент інерції перерізу відносно нейтральної осі, м⁴; R – радіус кривизни осі балки, м.

Для балки перекриття реконструйованої будівлі приймаємо $E = 3.0 \times 10^{10}$ Па; $J = 4.2 \times 10^{-4}$ м⁴; радіус кривизни вигину $R = 85$ м.

Тоді:

$$M = \frac{3.0 \times 10^{10} \times 4.2 \times 10^{-4}}{85} = 1.482 \times 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м} = 148.2 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Розрахований момент $M = 148.2$ кН·м визначає максимальне згинальне зусилля, яке діє в небезпечному перерізі балки. Якщо фактичне навантаження не перевищує цю величину, балка працює у пружній зоні, не втрачаючи несучої здатності.

Графічне представлення дозволяє швидко оцінити роботу конструкції, виявити потенційно небезпечні області, спрогнозувати можливі деформації та обґрунтувати необхідність підсилення перекриття. Узагальнені результати чисельного аналізу подано на рис. 2, котрий відображає розподіл напружень за площею перекриття та показує ділянки максимальної інженерної небезпеки й оптимальної роботи матеріалу.

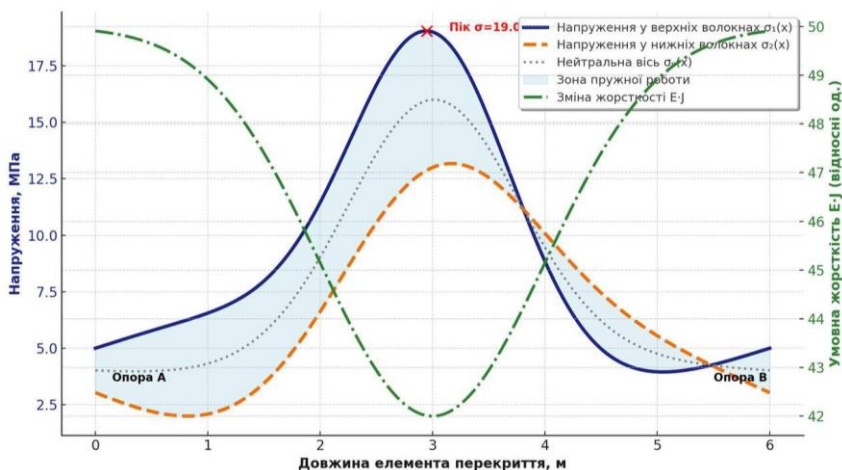


Рис. 2. Поле напружень у елементах перекриття під час реконструкції (результати чисельного моделювання (розроблено автором на основі [3]))

Під час реконструкції будівель ключовим завданням є забезпечення їхньої стійкості та надійності в умовах змінених навантажень і нових експлуатаційних вимог. Для цього застосовується комплекс інженерних заходів, спрямованих на підвищення несучої здатності, жорсткості та довговічності конструкцій. Основними методами є армування, підсилення колон і балок, зміна геометрії поперечних перерізів та впровадження композитних матеріалів, що дозволяють значно покращити роботу елементів без повного демонтажу чи заміни конструкції.

Останніми роками набуває поширення використання композитних матеріалів – зокрема вуглецевих, базальтових і склопластикових волокон, які поєднують малу вагу з високою міцністю. Їх застосування забезпечує підвищення несучої здатності без значного збільшення маси будівлі, що є особливо важливим при реконструкції старих споруд. Композитне підсилення має також високу корозійну стійкість і тривалий термін служби, що знижує експлуатаційні витрати [4].

Техніко-економічне порівняння різних методів підсилення дає змогу визначити оптимальний варіант за співвідношенням «ефективність–вартість». Наприклад, традиційне сталеве підсилення характеризується високою міцністю, проте потребує значних витрат на монтаж і захист від корозії. Використання композитних матеріалів може бути дорожчим на етапі закупівлі, але дешевшим у довгостроковій перспективі завдяки мінімальному технічному обслуговуванню. Порівняння технічних характеристик, вартості матеріалів, трудомісткості робіт і термінів реалізації дозволяє обґрунтовано вибрати найдоцільнішу технологію підсилення,

котра забезпечить максимальний ефект при мінімальних витратах і в межах наявного бюджету реконструкції.

Після армування/підсилення несуча здатність елемента (колони, стіни, ригеля) при центральному стиску визначається сумарним внеском армування і бетону в стиску. У першому наближенні (пружна робота, рівномірний стиск, без урахування знижувальних коефіцієнтів) несучу здатність можна оцінити як алгебраїчну суму граничних опорів матеріалів.

Розрахунок несучої здатності при армуванні:

$$N_{cap} = A_s f_y + A_c f'_c, \quad (4)$$

де: N_{cap} – несуча здатність елемента на стиск, Н; A_s – площа поздовжнього армування (сума існуючого + доданого), m^2 ; f_y – розрахунковий опір сталі (межа текучості з урахуванням коефіцієнтів), Па; A_c – ефективна площа бетону в стиску, m^2 ; f'_c – розрахунковий опір бетону в стиску, Па.

Оцінювання ефективності різних методів підсилення конструкцій є важливим етапом вибору оптимального технічного рішення під час реконструкції будівель. Кожен із методів – армування, обоймування, ін'єктування тріщин, використання композитних матеріалів чи зміна геометрії перерізу – має свої технічні та економічні особливості, котрі визначають доцільність його застосування у конкретних умовах. Зіставлення цих підходів дозволяє визначити, котрий із них забезпечує найбільший приріст несучої здатності та стійкості при мінімальних витратах ресурсів.

Візуальне представлення результатів представлено на рис. 3, котрий демонструє відносну ефективність найпоширеніших технологій з точки зору приросту міцності та економічної доцільності, що дозволяє обґрунтовано вибрати найоптимальніший варіант для конкретного реконструкційного проекту.

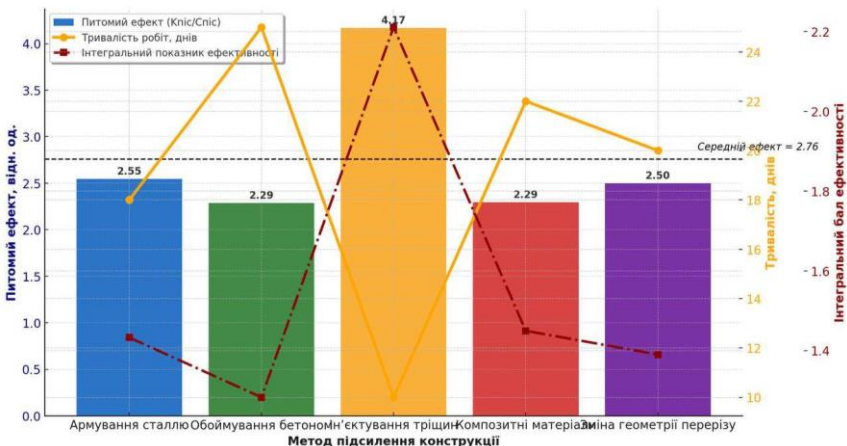


Рис. 3. Порівняння ефективності різних методів підсилення конструкцій (розроблено автором на основі [5])

Армування виконує подвійну функцію: воно збільшує міцність та опір деформаціям, забезпечує взаємодію між старими й новими конструкційними шарами, що особливо актуально при підсиленні залізобетонних елементів, добудові поверхів або заміні опорних ділянок. Основна увага приділяється раціональному розташуванню арматури, з'єднанню вузлів та формуванню жорстких рамних контурів, котрі забезпечують перерозподіл зусиль у разі локального перевантаження чи втрати стійкості одного з елементів.

У схемі враховуються напрямки передавання вертикальних і горизонтальних навантажень, жорсткість з'єднань, робота поперечних і діагональних зв'язків, а також участь фундаментних елементів у загальній системі опору. Узагальнена конструктивна побудова каркасу наведена на рис. 4, котрий демонструє взаємодію основних несучих елементів, розташування арматурних поясів, напрямки силових потоків і вузли підсилення, що забезпечують просторову стабільність та довговічність оновленої споруди.

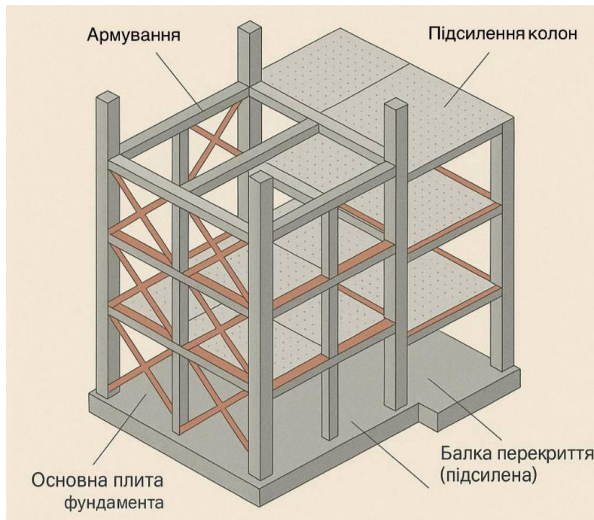


Рис. 4. Конструктивна схема армованого каркасу реконструйованої будівлі
(розроблено автором на основі [6])

Поведінка конструкцій під дією зовнішніх динамічних факторів є одним із ключових аспектів забезпечення стійкості реконструйованих будівель. Під час реконструкції особливу увагу приділяють оцінюванню впливу вітрових поривів і сейсмічних коливань, котрі можуть викликати додаткові інерційні навантаження, резонансні ефекти та коливання елементів каркасу. Для аналізу цих процесів використовують спрощені моделі, що дозволяють описати коливальний рух споруди в межах лінійної пружності. Моделі базуються на рівняннях динамічної рівноваги, у яких сила інерції пропорційна прискоренню маси будівлі, а відновлювальна сила – пружним властивостям системи.

Будівлю умовно розглядають як одновільну систему з приведеною масою, зосередженою у верхній частині, та еквівалентною жорсткістю, що відповідає сумарній пружності несучих елементів. Для неї визначають період власних коливань, котрий характеризує здатність споруди реагувати на динамічні впливи. Якщо період зовнішніх коливань (наприклад, сейсмічної хвилі або вітрового пориву) збігається з власним періодом будівлі, виникає явище резонансу, що може призвести до небезпечних амплітуд коливань і перевищення допустимих напружень у конструкціях [7].

Щоб оцінити реакцію реконструйованої будівлі на вітер і землетрус, її часто зводять до еквівалентної одновільної системи з приведеною масою та еквівалентною бічною жорсткістю каркаса. Модель дає перший, консервативний прогноз динамічної поведінки: що жорсткіша система (вище k) і що менша приведена маса m , то коротший період T і нижчий ризик резонансу з довгоперіодними збудженнями.

Період власних коливань будівлі (SDOF):

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (6)$$

де: T – період першої форми коливань, с; m – приведена маса конструкції (з урахуванням верхніх поверхів, обладнання, частки навантажень), кг; k – еквівалентна бічна жорсткість каркаса (сума жорсткостей «поверх на зсув» або рам/ядер), Н/м.

Вхідні дані (після підсилення):

приведена маса будівлі $m = 3.0 \times 10^6$ кг;

еквівалентна жорсткість каркаса $k = 2.0 \times 10^8$ Н/м.

Кутова власна частота:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{2.0 \times 10^8}{3.0 \times 10^6}} = \sqrt{66.666 \dots} \approx 8.165 \text{ рад/с.}$$

Період першої форми:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \approx \frac{6.283}{8.165} \approx 0.77 \text{ с.}$$

Отриманий $T \approx 0.77$ с відповідає «короткоперіодній» будівлі. Підсилення (зростання k) зменшує T , знижуючи чутливість до довгоперіодних сейсмічних впливів; збільшення маси (наприклад, через важкі інженерні надбудови) навпаки підвищує T .

Побудова амплітудно-частотного спектра дає змогу визначити резонансні частоти, на яких амплітуда переміщень досягає максимуму, та оцінити, наскільки ефективно нова система демпфування пригнічує коливання. Для реконструйованої споруди, де жорсткість збільшена за рахунок армування або введення нових діафрагм жорсткості, пік резонансу, як правило, зміщується у бік вищих частот, а загальна амплітуда зменшується.

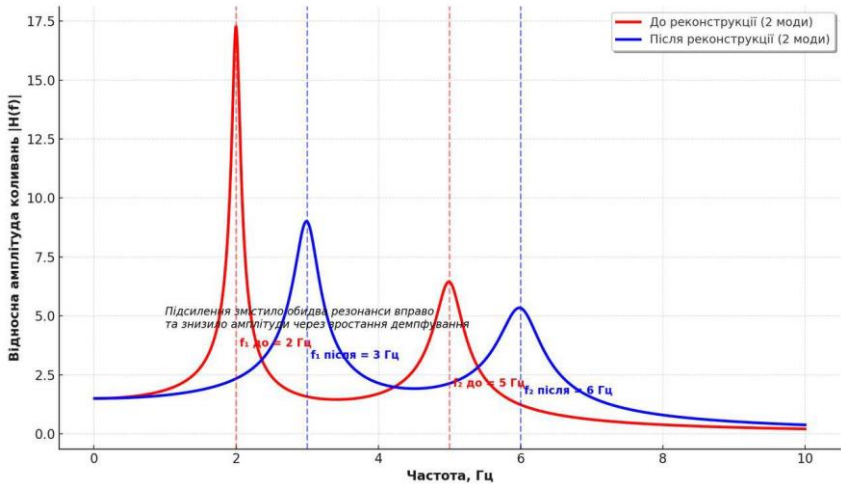


Рис. 5. Спектр амплітудно-частотної характеристики реконструйованої будівлі (розроблено автором на основі [8])

У спрощеній розрахунковій моделі сейсмічний вплив представляють як дію змінної сили, пропорційної масі споруди та прискоренню ґрунту. При цьому верхні поверхи, що мають більшу приведену масу, зазнають найбільших амплітуд переміщень і можуть бути критичними з точки зору втрати стійкості або руйнування вузлів. Ефективність реконструкції, зокрема підсилення колон, введення діафрагм жорсткості та зв'язкових систем, полягає в зменшенні деформацій і перерозподілі сейсмічних навантажень між елементами каркасу.

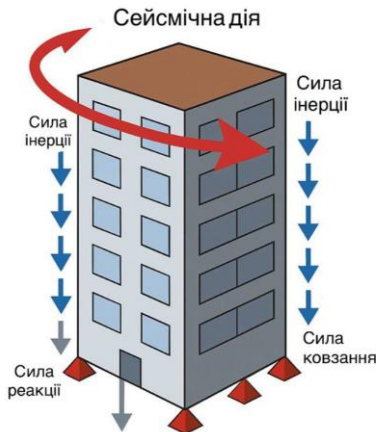


Рис. 6. Схема динамічного навантаження будівлі під час сейсмічної дії (розроблено автором на основі [9])

Висновок. Проведене дослідження підтверджує, що забезпечення стійкості реконструйованих будівель є багатофакторним завданням, яке потребує поєднання аналітичних, експериментальних та чисельних методів оцінювання. Основою підвищення надійності є комплексне врахування статичної, динамічної та конструктивної стійкості, що забезпечує збереження рівноваги системи під дією змінних навантажень і впливів навколишнього середовища.

У процесі реконструкції зміна несучих елементів, посилення або перепланування призводять до перерозподілу силових потоків, що вимагає ретельного розрахунку на міцність і жорсткість. Використання методу скінченних елементів (МСЕ) довело свою ефективність у моделюванні напружено-деформованого стану, дозволяючи точно визначити критичні ділянки та прогнозувати поведінку конструкцій при різних сценаріях навантаження. Аналітичні моделі – рівняння рівноваги, закон Гука, формули Ейлера – забезпечують перевірку граничних станів і оцінку запасу стійкості для ключових елементів. Значну роль у підвищенні стійкості відіграють технології підсилення. Традиційні методи, такі як сталеве армування або обоймування, залишаються актуальними для масивних конструкцій, тоді як інноваційні рішення із застосуванням композитних матеріалів (вуглецевих, базальтових, склопластикових волокон) відкривають нові можливості підвищення несучої здатності без збільшення маси споруди. Вони характеризуються високою довговічністю, стійкістю до корозії та мінімальними експлуатаційними витратами.

Виконане техніко-економічне порівняння методів підсилення показало, що оптимальний варіант визначається співвідношенням «ефект – вартість». Композитні системи підсилення, незважаючи на вищу початкову вартість, демонструють найкращі результати за питомим ефектом підвищення стійкості. Водночас поєднання сталевого та композитного підсилення може забезпечити найкращий баланс між економічністю та надійністю.

Розроблена конструктивна схема армованого каркасу реконструйованої будівлі забезпечує просторову стабільність та рівномірний розподіл навантажень. Збільшення жорсткості елементів позитивно впливає на динамічні характеристики споруди, зокрема скорочує період власних коливань, що підвищує сейсмостійкість.

Список літератури:

1. Нормативні документи технічного характеру. URL: https://e-construction.gov.ua/laws/doc_type=6.
2. Дарієнко В.В., Джирма С.О., Скриннік І.О., Портнов Г.Д., Настоящий В.А. Реконструкція та ремонт будівель і споруд: навч. Посіб. Кропивницький: ЦНТУ, 2023. 159 с. URL: <https://vpu29.rv.ua/wp-content/uploads/2025/02/0054101.pdf>.
3. Гаркуша М.В., Онищенко А.М. Удосконалення методу оцінки стійкості покриття нежорсткого дорожнього одягу до утворення колії. *Дороги і мости*, 209, 19-20, 61-77. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2019.19.061>
4. Нехаєва Д.В. Проблеми та перспективи розвитку реконструкції промислових будівель: кваліфікаційна робота магістра. Запоріжжя, 2023. URL: <https://dspace.znu.edu.ua/jspui/bitstream/12345/18140/1/Нехаєва%20.pdf>.
5. Цибульник І.О. Підсилення залізобетонних плит сталевіфібробетоном: дис... канд. техн. наук: 05.23.01. К.: КНУБА, 2004. 112 с.
6. Реконструкція будівель Комунального некомерційного підприємства «І територіальне медичне об'єднання м. Львова» з благоустроєм території на вул. В. Івасюка, 74 у смт. Брюховичі Львівської міської територіальної громади під

реабілітаційний центр. Том 1. Загальна пояснювальна записка. URL: <https://redcross.org.ua/wp-content/uploads/2024/09/Додаток-2.2-Загальна-пояснювальна-записка-проєкту-реконструкції.pdf>.

7. Чуприна Ю.А., Бінд В.Є., Кучеренко О.І., Чуприна Х.М., Горбач М.В., Петруха С.В. Вартісно-інжинірингові компоненти попередження економічних деструкцій в діяльності учасників проєктів будівельного девелоппменту. *Управління розвитком складних систем*. 2021. №45. С. 119-130.

8. ДБН В.2.2-15:2019 Будинки і споруди. Житлові будинки. Основні положення. [Чинний від 2019-12-01]. Вид. офіц. Київ, 2019. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=112684

9. Про затвердження та введення у дію Положення з питань обстеження, оцінки технічного стану, паспортизації та поточної експлуатації будівель та споруд у галузі зв'язку: Закон України від 28.04.2004 № 88. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0088570-04#Text>.

Timur KUZMIN

Engineering and structural solutions for enhancing the stability of reconstructed buildings

The engineering and structural stability of reconstructed buildings determines the ability of their load-bearing systems to maintain equilibrium, shape, and functionality under various types of loads. During the reconstruction process, changes occur in the geometry, stiffness characteristics, and working conditions of structures, which necessitates a new approach to design and evaluation of their reliability. The influence of element modernization on the overall stability of the system makes it essential to analyze the stress-strain state, taking into account the interaction of materials, joints, and supports.

A particularly important role is played by the combination of analytical and numerical calculation methods, which ensure precise identification of zones of critical stresses, deformations, and loss of equilibrium. The finite element method makes it possible to model complex spatial systems, including defects, openings, and strengthening zones. Analytical approaches – Hooke's law, equilibrium equations, and Euler's formulas – make it possible to assess the strength reserve and critical stability parameters for individual elements. This combination of methods forms the basis for a comprehensive assessment of the effectiveness of reconstruction measures.

One of the key directions for improving stability is the strengthening of load-bearing elements. The use of steel reinforcement, jacketing, and composite materials allows for a significant increase in the load-bearing capacity of structures without dismantling or excessive increase in the building's weight. Composites, such as carbon and basalt fibers, are characterized by high strength, low weight, and corrosion resistance, which ensures the durability of reconstructed structures. The application of such materials is particularly effective for historical or socially significant buildings, where minimal intervention in the existing structure is a critical requirement. The efficiency of different strengthening methods is evaluated through specific performance indicators – the ratio between the increase in load-bearing capacity and the cost. Comparative analysis confirms that composite systems demonstrate the highest technical results with long-term economic advantages. The combination of steel reinforcement with composite strengthening provides a balanced solution with optimal parameters of stability, cost, and technological complexity.

Keywords: *building stability, reconstruction, structural strengthening, reinforcement, composite materials, stiffness, finite element method, seismic resistance.*