

Г. С. Ратушняк¹**В. В. Панкевич¹****О. Д. Панкевич¹****А. Є. Гуменчук¹**

МОДЕЛЬ ВИБОРУ ВІКОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ БУДІВЕЛЬ З УРАХУВАННЯМ БЕЗПЕКОВОЇ СИТУАЦІЇ

¹Вінницький національний технічний університет

Розглянуто проблему вибору віконної конструкції для житлових будівель на основі багатокритеріального аналізу. Проведено аналіз математичних методів, які можна застосувати для розроблення моделі багатокритеріального вибору варіанта віконної конструкції. Для оцінювання значень критеріїв пропонується використати метод парних порівнянь Сааті (метод аналізу ієрархій). Поставлена задача вибору раціонального варіанта віконної конструкції із множини варіантів рішень на етапі проєктування. Визначено етапи у процесі застосування методу парних порівнянь у моделі прийняття рішення щодо вибору віконних конструкцій. Для розроблення моделі прийняття рішення для вибору раціонального варіанта віконної конструкції визначено та формалізовано фактори та критерії, що впливають на прийняття такого рішення. Прийняття рішення відбувається за умови, коли жодна альтернатива (варіант віконної конструкції) відповідає усім вимогам проєктування віконних конструкцій за будівельними нормами. При цьому, одна альтернатива не переважає інші за усіма критеріями. Запропоновано модель прийняття рішень яка дозволяє систематизовано та обґрунтовано вибрати віконну конструкцію, враховуючи ключові параметри та безпековий фактор. Модель включає п'ять основних критеріїв оцінки: енергоефективність, архітектурну привабливість та функціональність, ринкову ціну, захист від злону та стійкість до дії вибухової хвилі. Критерій стійкість до дії вибухової хвилі є інноваційним для прийняття рішення щодо вибору віконної конструкції. Процес оцінювання значень критеріїв для альтернатив здійснюється експертно на підставі інформації про значення критеріїв за допомогою методу парних порівнянь Сааті. Для врахування впливу визначених критеріїв використано метод лінійної згортки зважених частинних критеріїв, що дозволяє формалізувати процес вибору та вибрати раціональний варіант конструкції, коли жодна альтернатива не є абсолютним лідером за всіма параметрами.

Ключові слова: проєктування, фактор, віконна конструкція, вибухова хвиля, безпекова ситуація, енергоефективність, функціональність, надійність, математична модель, багатокритеріальний вибір, альтернатива, прийняття рішень, метод Сааті.

Вступ

Вікна — один з елементів огорожувальних конструкцій будівель, який впливає на комфорт, естетику та енергоефективність приміщення. Вибір віконних конструкцій житлових будівель є важливим під час проєктування та реконструкції будівель і потребує врахування багатьох факторів та дотримання будівельних норм [1]—[5]. Окрім традиційних критеріїв, які висуваються до огорожувальних конструкцій будівель, таких як теплоізоляція, звукоізоляція та естетика, в сучасних умовах можливих техногенних або воєнних загроз актуальності набуває вагомість здатності конструкції забезпечувати безпеку мешканців у разі потенційних загроз. Війна в Україні, збільшення природних і техногенних небезпечних процесів та явищ, що призводять до землетрусів, пожеж та вибухів окреслюють задачу врахування безпекової ситуації як надважливу [6]—[8]. За статистикою [7] одним з найпоширеніших джерел травмування людей від дії вибухової хвилі є саме вікна.

Близько 64 % усіх смертей та поранень внаслідок вибуху під час терактів чи бомбардувань завдаються розбитим віконним склом. Тому питання вибору віконних та світлопрозорих конструкцій з врахуванням безпекового фактора є досить актуальним та важливим. Вибір віконних конструкцій під час проектування житлових будівель з урахуванням безпекової ситуації в Україні сьогодні не унормований.

Метою дослідження є розробка математичної моделі багатокритеріального вибору раціонального проектного рішення віконної конструкції, що дозволить досягти балансу між технічними вимогами, економічною доцільністю та безпекою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій та обґрунтування мети і задачі дослідження

Питання забезпечення стійкості вікон при дії вибухової хвилі є актуальним сьогодні як в Україні так і за кордоном про що свідчать публікації науковців і практиків [9]—[15]. В роботі [9] проаналізовані сучасні методи проектування фасадів, вікон та дверей, стійких до вибухів, з акцентом на практики, що застосовуються в Німеччині; розглянуті різні підходи до забезпечення вибухостійкості будівельних елементів, включно з експериментальними, чисельними та інженерними методами. Цей огляд може служити основою для розуміння принципів проектування вибухостійких віконних конструкцій та їх інтеграції в загальну модель вибору. Інформаційний бюлетень [12], підготовлений Департаментом безпеки та охорони ООН, надає детальний аналіз ризиків, пов'язаних з уламками скла під час вибухів, та пропонує стандарти і заходи для підвищення безпеки віконних систем і може бути використаний для визначення ключових факторів, які варто враховувати під час оцінювання стійкості вікон до вибухової хвилі. У статті [10] досліджується вплив використання полімерних прокладок, посилені вуглецевими нанотрубками, на вибухостійкість віконних систем. Результати дослідження [10] свідчать про важливість оцінювання конструктивних особливостей віконних систем для підвищення їхньої стійкості до вибухів під час розробки моделей. Стаття [14] подає огляд сучасних досліджень щодо безпеки скляних фасадів під час вибухів та окреслює перспективи покращення їхньої стійкості. Інформація з огляду [14] може бути використана для формалізації критеріїв оцінки вибухостійкості віконних конструкцій у моделі обґрунтування прийняття рішення.

Існують математичні методи [16]—[19], які можна застосувати для багатокритеріального вибору.

Метод аналізу ієрархій (*MAI*). Цей метод, розроблений Томасом Сааті, дозволяє структурувати проблему у вигляді ієрархії та визначити пріоритети альтернатив на основі парних порівнянь критеріїв та альтернатив. Метод парних порівнянь також може використовуватись під час прийняття рішень, коли необхідно враховувати багато критеріїв та альтернатив, і коли важко визначити їхню відносну важливість без прямого порівняння один з одним.

Метод аналізу корисності. Базується на визначенні функції корисності для кожного критерію та обчисленні загальної корисності для кожної альтернативи. Цей метод дозволяє кількісно оцінити переваги альтернатив за різними критеріями, враховуючи суб'єктивні уподобання особи, що ухвалює рішення. До недоліків застосування цього методу можна віднести те, що особа, яка ухвалює рішення, є раціональною та має чітко визначені уподобання, що не завжди відповідає реальності. Визначення точних функцій корисності за цим методом може бути складним і суб'єктивним процесом.

Метод *ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité)* — це один з методів багатокритеріального аналізу рішень, який використовується для ранжування або вибору найкращої альтернативи з множини можливих варіантів. Заснований на побудові відношень переваги між альтернативами з урахуванням порогів чутливості. Цей метод підходить для складних рішень, коли альтернатив багато, але він може бути складним для інтерпретації та вимагає багато розрахунків.

Метод *TOPSIS*: Орієнтований на вибір альтернативи, яка має найменшу відстань до ідеального рішення та найбільшу відстань до найгіршого, базується на концепції вибору альтернативи, що має найменшу відстань до позитивного ідеального рішення та найбільшу відстань до негативного ідеального рішення. До недоліків цього методу можна віднести високу чутливість до нормалізації даних — результати можуть суттєво змінюватися залежно від вибраного методу нормалізації, якщо застосована нормалізація невідповідна, то це може спотворити ранжування альтернатив. Метод *TOPSIS* базується на відстанях до ідеального та найгіршого рішень, він не враховує можливу нелінійну природу оцінювання альтернатив, що може впливати на кінцевий вибір альтернативи.

Інтеграція знань та аналіз з наведених джерел свідчать що важливим під час ухвалення рішення

щодо вибору віконних конструкцій є забезпечення комплексного підходу. Реалізація методу включає аналіз матеріалів, особливостей встановлення, рівня захисту та витрат та враховує не лише традиційні критерії, такі як енергоефективність та естетичність, але й сучасні вимоги до безпеки, зокрема стійкість до вибухової хвилі.

Безпековий фактор у контексті вибору віконних конструкцій визначимо як сукупність характеристик, що визначають рівень захисту вікна від зовнішніх загроз — стійкість до вибухової хвилі, здатність вікна витримувати надмірний тиск вибухової хвилі без руйнування або з мінімальними пошкодженнями.

Задачею дослідження є розробка моделі прийняття рішення, яка за доступною інформацією дозволить проранжувати варіанти віконних конструкцій (альтернативи) з урахуванням потреб замовника.

Результати дослідження

Системний підхід до вибору віконної конструкції забезпечується врахуванням таких вимог:

- функціональні — тепло- та звукоізоляційні характеристики, міцнісні характеристики;
- економічні — вартість віконного виробу;
- естетичні — відповідність архітектурному стилю будівлі;
- безпекові — стійкість до злому та зовнішніх загроз.

Задача вибору віконної конструкції на етапі проектування є багатокритеріальною, оскільки потрібно враховувати різні фактори, і полягає у знаходженні компромісу між критеріями. Багатокритеріальний аналіз забезпечує врахування кількох критеріїв прийняття рішень одночасно (наприклад, енергоефективність, естетика, безпека тощо) та пошук компромісного рішення, яке задовольняє різні критерії на *збалансованому рівні*.

Для розроблення математичної моделі прийняття рішення вибір віконної конструкції пропонується виконувати за критеріями:

- y_1 «Енергоефективність»; y_2 «Архітектурна привабливість та функціональність»;
 y_3 «Ринкова ціна»; y_4 «Захист від злому»;
 y_5 «Стійкість вікон до вибухової хвилі».

Критерій y_1 «Енергоефективність» оцінюється факторами X_{11} і X_{12} , показаними на схемі (рис. 1) Критерій y_1 оцінюється рівнями: граничний, нормативний, покращений, інноваційний.

Критерій y_2 «Архітектурна привабливість та функціональність» вікна визначено факторами X_{21} , X_{22} і X_{23} (рис. 2). Критерій y_1 оцінюється рівнями: низький, середній, високий.



Рис. 1. Фактори, що визначають критерій y_1 «Енергоефективність»

Рис. 2. Фактори, що визначають критерій y_2 «Архітектурна привабливість та функціональність»

Критерій y_3 «Ринкова ціна» формують фактори X_{31} , X_{32} і X_{33} (рис. 3) Критерій y_3 оцінюється рівнями (за ціновим сегментом): економічний, середньоринковий, високий.

Критерій y_4 «Захист від злому» визначено факторами X_{41} та X_{42} (рис. 4). Критерій y_3 оцінюється рівнями: базовий, підвищений, надійний.

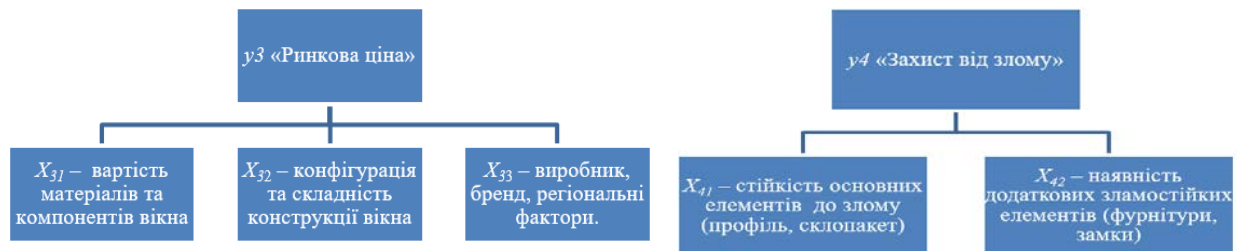


Рис. 3. Фактори, що визначають критерій y_3 «Ринкова ціна»

Рис. 4. Фактори, що визначають критерій y_4 «Захист від злому»

Критерій y_5 «Стійкість вікон до вибухової хвилі» визначено факторами X_{51} , X_{52} і X_{53} (рис. 5). Критерій y_5 «Стійкість вікон до вибухової хвилі» є новим для ухвалення рішення щодо вибору віконної конструкції. Критерій y_5 «Стійкість вікон до вибухової хвилі» оцінюється рівнями стійкості: А — спеціалізований, В — високий, С — підвищений; D — низький, Е — мінімальний.



Рис. 5. Фактори, що визначають критерій y_5 «Стійкість вікон до вибухової хвилі»

Задача вибору віконної конструкції

Поставлена задача щодо вибору віконної конструкції розв'язується з урахування переваг та недоліків кожного методу. Для розроблення моделі вибрано метод парних порівнянь Сааті. Метод Сааті [17] для розроблення моделі прийняття рішення щодо вибору віконної конструкції має такі переваги:

- дозволяє враховувати кількісні та якісні критерії, що зменшує суб'єктивність вибору;
- дозволяє враховувати додаткові критерії або змінювати їхню вагомість відповідно до пріоритетів (гнучкість);
- дозволяє оцінити, наскільки логічними є експертні судження (перевірка узгодженості).

Ухвалення рішення у разі вибору віконних конструкцій житлових будівель розглянемо як пошук найкращого варіанта з відомих декількох варіантів віконних конструкцій $V_1, V_2 \dots V_m$. Варіанти віконних конструкцій $V_1, V_2 \dots V_m$ назвемо альтернативами (в термінах теорії прийняття рішення), а вибраний варіант — рішенням, позначеним символом D .

Альтернативами $V_1, V_2 \dots V_m$ можуть бути віконні конструкції з різними параметрами та характеристиками. Розглядаємо ухвалення рішення, коли кожна альтернатива відповідає усім вимогам проектування віконних конструкцій за будівельними нормами. При цьому одна альтернатива не переважає інші за усіма критеріями. Одна з альтернатив переважає за окремою підмножиною частинних критеріїв, інша — домінує за іншою підмножиною частинних критеріїв. Отже, ми маємо випадок прийняття рішень, коли усі альтернативи перебувають у зоні компромісу і вибір рішення залежить від вагомості частинних критеріїв та значущістю переваг. Тобто задача полягає у тому щоб, з доступних варіантів віконних конструкцій вибрати один, який найкраще відповідає одночасно усім критеріям щодо енергоефективності, архітектурної привабливості та функціональності, вартості, захищеності від несанкціонованого доступу та стійкості до вибухової хвилі.

Модель прийняття рішення

Для ухвалення рішення відповідність альтернатив кожному з критеріїв пропонується пронормувати на єдиний інтервал $[0, 10]$. Пронормовані значення критеріїв позначимо таким чином:

Y_1 — рівень енергоефективності; Y_2 — рівень архітектурної привабливості; Y_3 — ціновий рівень; Y_4 — рівень захисту від злону; Y_5 — рівень стійкості до вибухової хвилі.

Що вище значення частинних критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 , то кращою є альтернатива порівняно з іншими, і тим сильнішою стає її перевага. Оскільки розглядається задача вибору, тобто завдання полягає у виборі оптимальної альтернативи, а не в абсолютній оцінці їхніх характеристик. Достатньо, щоб нормалізовані критерії відображали відносну перевагу кожної альтернативи над іншими.

Для оцінювання значень критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 пропонується використати метод парних порівнянь Сааті (метод аналізу ієрархій), відповідно на підставі інформації про значення критеріїв y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 (рис. 1—5). Цей підхід базується на експертному аналізі інформації щодо значень критеріїв. Основна концепція полягає в тому, щоб порівнювати кожний критерій з кожним іншим

у парах, визначаючи їхню відносну важливість або перевагу. Для цього критеріям присвоюють числові значення або ранги, що відображають ступінь їхньої значущості. Експерт оцінює наскільки один критерій важливіший за інший за шкалою Сааті (1—9 балів). Метод дозволяє формалізувати процес прийняття рішень, розраховуючи відносні ваги критеріїв та визначаючи, яка альтернатива є найприйнятнішою з урахуванням всіх факторів. Це забезпечує системний і структурований підхід до вибору конструкції вікна.

Зважену суму пронормованих частинних критеріїв визначимо, як інтегральний критерій

$$Y = w_1 Y_1 + w_2 Y_2 + w_3 Y_3 + w_4 Y_4 + w_5 Y_5, \quad (1)$$

де w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 — вагові коефіцієнти (коефіцієнти важливості) частинних критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 відповідно.

Вагові коефіцієнти (коефіцієнти важливості) визначаються числом з інтервалу $[0, 1]$ та визначають вплив частинного критерію на прийняття рішення. Чим більше значення вагового коефіцієнту, тим важливіше відповідний частинний критерій.

У контексті задач вибору віконної конструкції важливим інструментом у математичному моделюванні, машинному навчанні та багатокритеріальному аналізі є регуляризація. Регуляризація допомагає створити моделі, які є узгодженими, стійкими та здатними до генералізації. Її ключова роль полягає у введенні додаткових обмежень на вагові коефіцієнти або їхні нормалізовані значення, а також у застосуванні штрафних компонент, що сприяє кращій інтерпретації моделі та забезпечує стійкість отриманого розв'язку. Відповідно до правил регуляризації маємо обмеження

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 = 1. \quad (2)$$

Тоді, інтегральний критерій набуватиме значення з того з інтервалу, що і частинні критерії, тобто з інтервалу $[0, 10]$.

Як рішення вибору D вибирається альтернатива з найбільшим значенням інтегрального критерію Y

$$D = \arg \max (Y(V_1), Y(V_2) \dots Y(V_m)). \quad (3)$$

Прийняття рішень з порівнянням альтернатив визначення відносної важливості або переваги одного варіанта проводиться шляхом попарного порівняння — методом Сааті.

Ухваленню рішень за формулою (3) передують визначення значень частинних критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 для кожної альтернативи $V_1, V_2 \dots V_m$ та визначення коефіцієнтів важливості w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 .

Визначення значень частинних критеріїв

Запропонована модель прийняття рішень щодо вибору віконних конструкцій (3) є лінійною відносно пронормованих частинних критеріїв.

Процес оцінювання значень критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 для альтернатив $V_1, V_2 \dots V_m$ здійснюється експертно на підставі інформації про значення критеріїв (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5) за допомогою методу парних порівнянь Сааті. Цей метод дозволяє експертам оцінити альтернативи, враховуючи кількісні дані та слабоформалізовану інформацію, яка відображає специфіку будівельного об'єкта, цільову аудиторію та стратегію забудовника. Експерт, враховуючи попередньо зібрані дані щодо значень критеріїв для кожної альтернативи $y_1(V_1), y_1(V_2), \dots, y_1(V_m)$, здійснює попарне порівняння, визначаючи перевагу однієї альтернативи над іншою. Такий підхід є зручнішим у реалізації, ніж безпосереднє присвоєння кожному критерію y_1 відповідного значення критерію Y_1 з дотриманням лінійності впливу на загальний інтегральний показник Y .

Спочатку експерт визначає, яка з альтернатив у парі є кращою, а потім оцінює рівень її переваги за допомогою дев'ятибальної шкали Сааті, яка дозволяє відображати відносну перевагу однієї альтернативи над іншою: 1 — перевага відсутня; 2 — ледь слабка перевага; 3 — слабка перевага; 4 — майже помірна перевага; 5 — помірна перевага; 6 — майже явна перевага; 7 — явна перевага; 8 — майже абсолютна перевага; 9 — абсолютна перевага.

Після експертної оцінки рівня переваг для кожної пари альтернатив записується матриця парних порівнянь

$$A_1 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{23} \\ \dots & & & \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mm} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

де a_{ij} — елемент в i -му рядку та j -му стовпчику, визначає рівень переваги альтернативи V_i , $i=1,2,...,m$ над альтернативою V_j , $j=1,2,...,m$.

Матриця парних порівнянь Сааті має такі властивості: $a_{ij} = 1/a_{ji}$, для $i \neq j$ коефіцієнти під головною діагоналлю матриці Сааті є оберненими до відповідних коефіцієнтів над головною діагоналлю; та $a_{ii} = 1$ — елементи на головній діагоналі.

За матрицею (4) здійснюється узагальнення лінгвістичних оцінок переваг шляхом перетворення їх в числові значення $Y_1(V_1), Y_1(V_2), \dots, Y_1(V_m)$. Математично, процедура полягає в знаходженні власного вектора S і найбільшого власного значення $\lambda_{\max}$ матриці парних порівнянь

$$A_1 \cdot S = \lambda_{\max} \cdot S. \quad (5)$$

Координати власного вектора відповідають шуканим числовим значенням оцінок переваг $Y_1(V_1), Y_1(V_2), \dots, Y_1(V_m)$, але їх потрібно пронормувати таким чином:

[illegible]

де $S_1....S_m$ — координати власного вектора S .

У разі трьох альтернатив, коли $m=3$, потрібні три парні порівняння, за чотирьох альтернатив — шість парних порівнянь, у разі п'яти альтернатив — десять парних порівнянь. Якщо парних порівнянь багато, тоді знижується ризик, що помилкове визначення рівня переваги для однієї якоїсь пари альтернатив спотворить підсумкові значення. Така стійкість до нетипових значень (викидів) закладена у математичній процедурі знаходження власного вектора матриці. Окрім того, узгодженість парних експертних порівнянь в матриці (4) можна перевірити за максимальним власним значенням $\lambda_{\max}$. Якщо $\lambda_{\max}$ приблизно дорівнює кількості альтернатив m , то експертні оцінки належним чином узгоджені.

Приклад застосування методу Сааті для оцінювання частинних значень критеріїв

Розглянуто чотири альтернативи V_1, V_2, V_3, V_4 . Для альтернатив рівень енергоефективності у1 визначено

$y1(V_1)$ = іноваційний; $y1(V_2)$ = покращений; $y1(V_3)$ = нормативний; $y4(V_2)$ = граничний.

Вважатимемо, що експертні оцінки рівня попарних переваг є такими:

майже помірна перевага V_1 над V_2 ; помірна перевага V_1 над V_3 ;

явна перевага V_1 над V_4 ; майже помірна перевага V_2 над V_3 ;

помірна перевага V_2 над V_4 ; слабка перевага V_3 над V_4 .

Наведеним парним порівнянням відповідає така матриця:

$$A_1 = \begin{pmatrix} V_1 & V_2 & V_3 & V_4 \\ 1 & 4 & 5 & 7 \\ 1/4 & 1 & 4 & 5 \\ 1/5 & 1/4 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$$

Власний вектор цієї матриці парних порівнянь дорівнює

$$S = (0,903 \ 0,391 \ 0,16 \ 0,08).$$

Після нормування за формулами (6), отримуємо такі значення критерію Y_1 :

$$Y_1(V_1) = 5,88; Y_1(V_2) = 2,55; Y_1(V_3) = 1,04; Y_1(V_4) = 0,52.$$

Власне значення матриці парних порівнянь дорівнює $\lambda_{\max} = 4,24$ та є близьким до кількості альтернатив. Відповідно це означає, що парні порівняння узгоджені між собою, тому результат оцінювання критеріальних значень альтернатив є достовірними.

Процес застосування методу парних порівнянь у моделі прийняття рішення щодо вибору віконних конструкцій представлено структурною схемою (рис. 1) та включає такі етапи:

– визначення альтернатив. Спочатку визначаються альтернативи (варіанти віконних конструкцій), які потрібно порівняти між собою;

– встановлення критеріїв оцінки (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5). Оцінки можуть бути числовими значеннями або відносними шкалами у вигляді лінгвістичних описів — термів (наприклад, «дуже важливий», «помірний», «менш важливий»);

– оцінювання значень критеріїв Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 для альтернатив $V_1, V_2, \dots, V_m$ за методом парних порівнянь Сааті. Здійснюється експертно на підставі інформації про значення критеріїв (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5). При цьому,

експерт має можливість врахувати слабоформалізовану інформацію про призначення будівельного об'єкта, цільову аудиторію та стратегію забудовника;

– обчислення вагових коефіцієнтів. На основі матриці порівнянь обчислюються вагові коефіцієнти для кожної альтернативи, що відображають загальну важливість чи перевагу кожної з них;

– обчислення інтегрального показника кожної альтернативи з урахуванням вагових коефіцієнтів w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 .

– Прийняття рішення. Порівняння результатів оцінки для кожної альтернативи та прийняття рішення — формула (3) щодо вибору найраціональнішого варіанта віконної конструкції з урахуванням безпекового фактора.

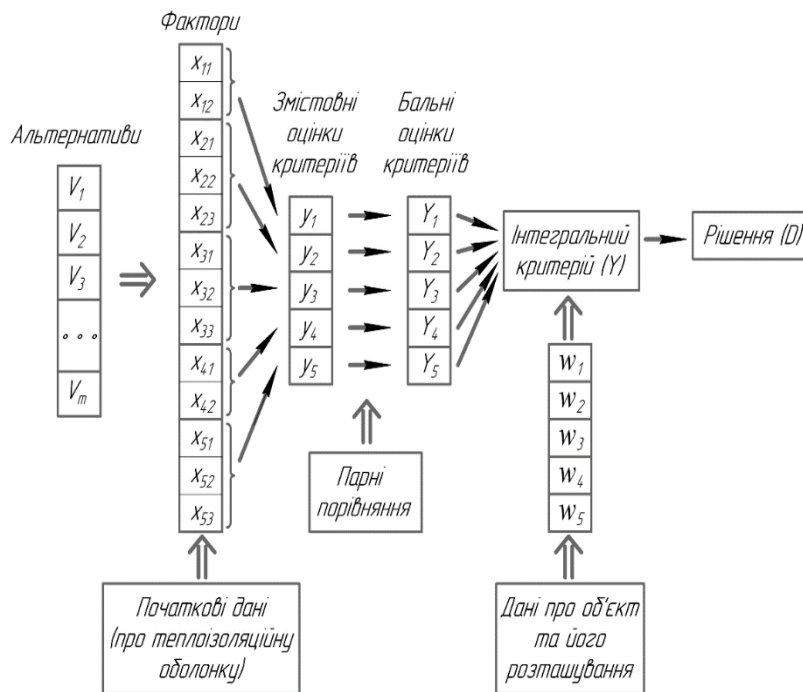


Рис. 6. Структурна схема ухвалення рішень щодо вибору віконних конструкцій під час проєктування будівель з урахуванням безпекової ситуації

Висновки

Запропонована інтегральна модель прийняття рішень для вибору віконних конструкцій, яка дозволяє обґрунтовано визначити найдоцільнішу альтернативу серед можливих варіантів. Модель прийняття рішень для вибору віконних конструкцій враховує п'ять ключових критеріїв: «енергоефективність», «архітектурну привабливість і функціональність», «ринкову вартість», «рівень захисту від злону», «стійкість конструкції до впливу вибухової хвилі». Критерій «стійкість до вибухової хвилі» є важливим фактором у сучасних умовах підвищених безпекових вимог.

Використання методу аналізу ієрархій Сааті забезпечує структурований підхід до вибору варіанта віконної конструкції, дозволяючи врахувати важливість кожного критерію шляхом парних порівнянь. Розглянутий підхід дає можливість визначити компромісне рішення, з використанням

запропонованих критеріїв, коли жодна альтернатива не є абсолютним лідером за всіма параметрами.

Наведений підхід дозволяє ухвалювати зважені рішення, адаптуючи вагові коефіцієнти відповідно до конкретних потреб та пріоритетів. Експерти під час ухвалення рішення можуть оцінити альтернативи з огляду на кількісні дані та слабоформалізовану інформацію, яка враховує специфіку віконної конструкції та будівельного об'єкта, цільову аудиторію та стратегію забудовника.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] ДСТУ-Н Б В.2.6-146:2010. *Настанова щодо проектування і улаштування вікон та дверей*. Київ, Україна, 2010. 106 с.
- [2] ДБН В.2.6-31:2021. *Теплова ізоляція та енергоефективність будівель*. Київ, Україна, 2022, 27 с.
- [3] ДБН В.2.2-15:2019. *Житлові будівлі. Основні положення. Зі зміною № 1*. Київ, Україна, 2022, 43 с.
- [4] ДСТУ EN 13126-8:2022 (EN 13126-8:2017 IDT). *Будівельна фурнітура. Обладнання для вікон та балконних дверей. Вимоги та методи випробувань*. Київ, Україна, 2022, 17 с.
- [5] ДСТУ EN 14608:2021. (EN 14608:2004, IDT). *Вікна. Визначення стійкості рами*. Київ, Україна, 2021.
- [6] Як захистити вікна від вибухової хвилі. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://tvomisto.tv/news/yakyy_zahyst_vberezhe_vas_ulamkiv_skla_pry_vybuchah_151722.html. Дата звернення 02.01.2025
- [7] Вікна: стійкість до вибуху. [Електронний ресурс]. Режим доступу: 02.01.2025. <https://okna.ua/ua/library/vikna-stiykist-do-vybukhu>. Дата звернення 02.01.2025.
- [8] Г. С. Ратушняк, і В. В. Панкевич, «Визначальні чинники впливу на безпеку віконних конструкцій», *Міжнародна науково-технічна конференція Енергоефективність в галузях економіки України-2023*, Вінниця, 2023. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2023/paper/view/19061>.
- [9] J. D. Van der Woerd, M. Wagner, et al., "Design methods of blast resistant façades, windows, and doors in Germany: a review," *Glass Struct Eng* no. 7, pp. 693-710, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40940-022-00213-w>.
- [10] Г. С. Ратушняк, і В. В. Панкевич, «Ідентифікація факторів, які визначають безпеку вікон при дії вибухової хвилі», *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, вип. 35, т. 2, с. 42-48, 2023. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-2-42-48>.
- [11] Ziyuan Li, and Yapeng Wang, "Experiment and Simulation of Critical Parameters for Building Windows under Thermal Explosion," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 26, pp. 101014, Published, Apr 25, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X21001775>.
- [12] Blast protection for windows. *UN Department of Safety and Security, Division of Specialized Operational Support Physical Security Unit, PSU Information Bulletin* (pdf). [Electronic resource]. Available: https://www.unicef.org/jordan/media/5951/file/LRFP-2021-9166373-Annex_4-Blast_Protection_for_Windows.pdf.
- [13] Attia Mohamed, M. A. Hossain Khandaker, et al., "Enhancing the performance of anti-blast windows through the use of carbon nanotube reinforced polymer gaskets," *Journal of Building Engineering*, vol. 78, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107634>.
- [14] Suwen Chen, Xing Chen, et al., "Towards blast safety of glass facades: research advances and prospects," *Thin-Walled Structures*, vol. 212, 2025. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823125003076>.
- [15] Ataei, and J. C. Anderson, "Mitigating the injuries from flying glass due to air blast," *Engineering, Environmental Science*, Jan 18, 2012. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:138632606>.
- [16] Р. А. Івченко, і А. І. Купін, «Дослідження методів багатокритеріальної оптимізації для вибору обладнання або деталей на виробництві», *Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація*, т. 32 (71), ч. 1, № 1, 2021. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.1-1/11>.
- [17] С. Д. Штовба, і А. В. Галушак, *Ідентифікація багатфакторних залежностей за допомогою баз знань. Лабораторний практикум*. Вінниця, ВНТУ, 2015.
- [18] І. С. Романченко, М. М. Потьомкін, і О. С. Сирський, «Метод трикритеріального евклідового ранжування та його використання для багатокритеріального порівняння альтернатив», *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, № 1(34), с. 59-63. Травень, 2019. <http://dx.doi.org/10.33099/2311-7249/2019-34-1-59-63>.
- [19] О. Міхно, І. Патракеєв, і Н. Левінськова, «Багатокритеріальний вибір альтернатив на основі методу аналізу ієрархій», *Вісник. Військово-спеціальні науки*, т. 56, вип. 4(56), с. 57-63, Груд 2023. <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2023.56.57-63>.

Рекомендована кафедрою системного аналізу та інформаційних технологій ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 10.05.2025

Ратушняк Георгій Сергійович — канд. техн. наук, професор, завідувач кафедри інженерних систем у будівництві, e-mail: ratushnyak@vntu.edu.ua;

Панкевич Володимир Вячеславович — PhD, асистент кафедри інженерних систем у будівництві, e-mail: pan@vntu.edu.ua;

Панкевич Ольга Дмитрівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інженерних систем у будівництві, e-mail: pankevich@vntu.edu.ua;

Гуменчук Анастасія Євгенівна — студентка факультету будівництва, цивільної та екологічної інженерії, e-mail: flora.butterfly68954@gmail.com

H. S. Ratushnyak¹
V. V. Pankevych¹
O. D. Pankevych¹
A. Ye. Humenchuk¹

Model for Selecting Window Structures in Building Design with Consideration of the Security Situation

¹Vinnitsia National Technical University

The problem of choosing a window structure for the residential buildings on the basis of multicriteria analysis is considered. The analysis of mathematical methods that can be used to develop a model of multicriteria selection of window construction option is carried out. To evaluate the values of the criteria, it is proposed to use the Saaty method of pairwise comparisons (hierarchy analysis method). The task of choosing a rational variant of window construction from a set of solution options at the design stage is put forward. The stages in the process of applying the method of pairwise comparisons in the decision-making model for choosing window structures are determined. To develop a decision-making model for choosing a rational variant of a window structure, the factors and criteria influencing the decision-making process are identified and formalized. Decision-making takes place when each alternative (window construction option) meets all the requirements for the design of window structures according to building codes. At the same time, one alternative does not prevail over the others by all criteria. The article proposes a decision-making model that allows systematic and reasonable selection of a window structure, taking into account key parameters and the security factor. The model includes five main evaluation criteria: energy efficiency, architectural attractiveness and functionality, market price, burglary protection and blast resistance. The blast resistance criterion is an innovative one for decision-making, regarding the choice of window construction. The process of evaluating the values of the criteria for the alternatives is carried out expertly on the basis of information on the values of the criteria using the Saaty pairwise comparison method. To take into account the influence of the defined criteria, the method of linear convolution of weighted partial criteria is used, which allows to formalize the selection process and choose a rational design option when any alternative is an absolute leader in all parameters.

Keywords: design, factor, window construction, blast wave, safety situation, energy efficiency, functionality, reliability, mathematical model, multi-criteria selection, alternative, decision-making, Saaty method.

Ratushniak Heorhii S. — Cand. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Engineering Systems in Civil Engineering, e-mail: ratushnyak@vntu.edu.ua ;

Pankevych Volodymyr V. — PhD, Assistant Professor of the Chair of Engineering Systems in Civil Engineering, e-mail: pan@vntu.edu.ua ;

Pankevych Olga D. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Engineering Systems in Civil Engineering, e-mail: pankevich@vntu.edu.ua ;

Humenchuk Anastasiya Ye. — Student of the Department of Civil Engineering, Civil and Environmental Engineering, e-mail: flora.butterfly68954@gmail.com