

УДК 624.014.2 (519.168)

## **Визначення оптимальних конструктивних рішень ферм у експертній системі одностадійного оптимального проектування**

**Білик А.С.**, аспірант

Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

**Анотація.** В статті наведена методика, що дозволяє здійснювати вибір оптимальних конструктивних рішень сталевих зварних ферм. Методика реалізована як експертна система одностадійного автоматизованого оптимального проектування.

**Аннотация.** В статье представлена новая методика, которая позволяет совершать выбор оптимальных конструктивных решений стальных сварных ферм. Методика реализована как экспертная система одностадийного автоматизированного оптимального проектирования.

**Abstract.** In article a new method, that determines optimal construction decision choice of steel welded lattice girders are introduced. Method is realized as one stage optimal design automatic expert system.

**Ключові слова:** ферми, оптимальне одностадійне проектування, експертні системи.

**Постановка проблеми.** На першому рівні оптимізації сталевих стержневих конструкцій знаходиться варіантне проектування або проектування на передпроектній стадії [11]. На даній стадії розглядаються декілька варіантів майбутньої конструкції, що можуть відрізнятися між собою за топологією, абрисами, геометрією, типами поперечних перерізів елементів та розрахунковою схемою. Спільними при цьому для всіх варіантів є якісні та кількісні вихідні умови, закладені у технічному завданні на проектування, а також головні геометричні параметри споруди та обмеження (прогін, розміри окремих елементів, граничні прогини тощо).

Обґрунтований вибір рішення конструкції можливий тільки на основі точного техніко-економічного аналізу кожного з варіантів, що розглядаються, а самі варіанти мають бути оптимальними відносно заданих властивостей і об'єктивних умов. У зв'язку із цим актуальними питаннями розвитку оптимального проектування є розроблення методик вибору оптимальних рішень сталевих стержневих конструкцій та систем автоматизованого проектування, що дозволяли б реалізувати оптимальний вибір серед скінченно великої кількості варіантів.

**Аналіз останніх досліджень.** А.І. Виноградовим було вперше визначено [6], що системи, з яких ми обираємо рішення зворотної задачі проектуван-

ня – це сукупність конструкцій із однаковим абрисом осей. Таким чином, для стержневих конструкцій було сформульовано об'єкт неугагальненої задачі оптимального проектування – множина усіх можливих рішень конструкцій із заданим абрисом осей та основна задача проектування – задача вибору найкращого варіанта з цієї множини [6].

Найважливіші принципи рішення щодо конструкції приймаються на стадії варіантного проектування. Проте вирішення задачі оптимального вибору на даному етапі навіть при визначених умовах та із задовільною точністю пов'язане із потребою попереднього розрахунку, конструювання та наступного обчислення техніко-економічних показників для кожної конструкції з множини можливих рішень, що відмічав Я.М. Ліхтарніков [9].

У той же час функції, які точно описують техніко-економічні критерії порівняння альтернатив, можуть бути класифіковані [13] як статичні, не випуклі, полімодальні, нелінійні, дискретні, недиференційовані та частково сепарабельні. Залежності між висхідними та змінними параметрами описуються методами математичного програмування, дискретної математики тощо, відповідно функції часткових критеріїв порівняння є алгоритмічними. Відповідним чином алгоритмічними будуть і функції суперкритеріїв порівняння. Окрім того, для альтернатив із відмінною топологією, абрисами, геометрією, типами поперечних перерізів елементів та розрахунковою схемою функції часткових критеріїв порівняння залежать від різних змінних, які не можуть бути приведені одна до одної. На даний час знайти глобальний оптимум таких цільових функцій існуючими аналітичними методами не є можливим [13, 12].

**Постановка задачі.** Задача вибору оптимального рішення сталеві стержневої конструкції на стадії варіантного проектування може бути визначена як задача багатокритеріального кардинального вибору альтернатив з різноважливими критеріями із множини допустимих рішень при вирішенні слабкоструктурованої проблеми з чітко заданими розподіленими параметрами. Тип задачі вибору – разовий довільний індивідуальний вибір у визначених умовах. Для вирішення задачі визначеного вище типу найбільш ефективними є обчислювальні методи вибору оптимальних проектних рішень [5, 8]. Обчислювальні методи вибору ґрунтуються на автоматизованому нормативному обрахунку критеріїв якості для всіх альтернатив із простору допустимих рішень із наступним здійсненням відбору із них найбільш прийнятних. Ґрунтовний автоматизований аналіз кожного варіанта дозволяє здійснити на стадії варіантного проектування економічний та ефективний вибір конструкції, що задовольняє поставлені вимоги. Вирішення задачі вибору здійснюється в рамках нормативної

моделі – усі прийняття рішень відповідають діючим нормам проектування, які формалізуються без спрощень «as is».

**Виклад основного матеріалу дослідження.** В рамках дисертаційної роботи автора була розроблена комплексна методика вибору оптимальних рішень стержневих конструкцій [1, 2] та реалізована експертна система вибору [3, 4].

Багатокритеріальна модель прийняття рішень для задачі вибору оптимального конструктивного рішення сталеві стержневої конструкції може бути представлена у наступному виді [10]:

$$\langle t, S, K, X, f, r \rangle, \quad (1)$$

де  $t$  – постановка (тип) задачі;  $S$  – множина допустимих рішень;  $K$  – множина критеріїв;  $X$  – множина шкал критеріїв;  $f$  – відображення множини допустимих рішень у множину векторних оцінок;  $r$  – вирішувальне правило. Постановка задачі відповідає цілям особи, що приймає рішення. В нашому випадку загальною постановкою  $t$  є пошук оптимального рішення. Множина  $S$  являє собою сукупність рішень, які задовольняють певні обмеження і розглядаються як можливі способи досягнення поставленої цілі.

Для поставленої задачі множина допустимих рішень (альтернатив) задана апіорно. В рамках реалізованої експертної системи підмножинами альтернатив є ферми з паралельними або з трапецієподібними поясами з поперечними перерізами елементів із рівнобічних прокатних кутиків з шарнірними вузлами, а також ферми з паралельними поясами з поперечними перерізами елементів із гнutoзварних замкнених профілів прямокутного і квадратного перерізу з жорстким сполученням елементів у вузлах.

У кожному підмножину альтернатив входять конструкції, що відрізняються топологією (кількістю вузлів та елементів) та геометрією (типом решітки, координатами вузлів), але структуровані відносно керуючих параметрів порівняння (в залежності від вихідних умов до вибору розглядаються конструкції з відповідними головними розмірами). Порівняння може відбуватися як між конструкціями всередині однієї підмножини, так і між конструкціями різних підмножин. Оскільки основною властивістю експертних систем є накопичення досвіду, по мірі вирішення все нових і нових задач вибору користувачем база моделей конструкцій збільшується.

Критеріями  $K_1, K_2, \dots, K_m$  є показники якості, спільні для всіх допустимих рішень і презентабельно характеризують цінність кожного з них. Кри-

терій якості, за яким оцінюється кожна конструкція при виборі оптимальної альтернативи, обирається особою, що проводить порівняння.

Для порівняння альтернатив застосовуються адитивні лінійні згортки часткових критеріїв у суперкритерії, які є кількісними показниками якості конструкції на різних рівнях аналізу:  $K_1$  – маса ферми в стадії КМД,  $K_2$  – собівартість експлуатації однієї ферми,  $K_3$  – розширена собівартість експлуатації блока ферм покриття з урахуванням другорядних та огорожувальних конструкцій,  $K_4$  – приведені витрати на блок ферм покриття з урахуванням експлуатаційних витрат.

Для визначення зусиль в елементах конструкції на кожному кроці був реалізований алгоритм методу скінченних елементів у постановці методу переміщень. Оптимізація поперечних перерізів здійснюється на дискретних множинах реальних сортаментів профілів, що є в наявності на металобазі. Оптимізація геометрії конструкції здійснюється методом повного перебору (breadth-first process) дискретних значень з допустимої множини, що дозволяє досягти збіжності на алгоритмічних функціях критеріїв вибору.

Для обчислення частинних критеріїв була створена інформаційно-аналітична модель кожного типу конструкцій, що включає автоматизоване конструювання та визначення типорозмірів основних і другорядних (фасонки, прокладки тощо) елементів конструкції [1].

Трудомісткість обчислюється поопераційно за показниками норм часу, потрібних для кожного етапу виготовлення та монтажу конструкції, а також другорядних елементів [7].

При аналізі розширеної собівартості окрім конструкцій ферм додатково підбираються в залежності від заданих умов профнастил покрівлі, прогони та в'язі, а також враховується огороження конструкцій. При аналізі приведених витрат враховуються експлуатаційні витрати, пов'язані із проведенням нормативно-регламентованих ремонтів, а також витрати на опалення блока ферм покриття для заданих параметрів температурних режимів експлуатації будівлі, характеристик огорожувальних конструкцій та вартості еквівалента палива (природний газ).

Шкали вартості та маси  $X$  мають спільні властивості для всіх альтернатив при оцінці за суперкритерієм у поставленій задачі і є абсолютними (числовими та неперервними), що природно. Кожне рішення оцінюється за шкалою  $X$  так, що множині допустимих рішень  $S$  ставиться у відповідність множина векторних оцінок у загальній множині допустимих векторних оцінок  $A \subseteq Y$  за допомогою відображення  $f : S \rightarrow A$ .

Вирішувальне правило  $r$  впорядковує множину  $A$  так, що дозволяє висловлювати припущення щодо переваг на множині  $S$ . При визначенні відображення  $f$  на шкалі  $X$  вирішенням задачі вибору є обрання альтернативи

$$r : S^* = \arg \min_{x \in S} K_0(q_1(x), q_2(x), \dots, q_p(x)). \quad (2)$$

Реалізація експертної системи вибору фактично є задачею створення системи одностадійного автоматизованого проектування, яка вже вирішувалася раніше, зокрема для споруд енергетичного сектора [14]. Для сталевих ферм рішення задачі одностадійного автоматизованого оптимального проектування виконано вперше.

**Приклад.** Розглянемо кардинальний вибір оптимальної ферми покриття прогоном 24 м, що здійснюється з 12 альтернатив.

Група альтернатив  $S_1$  (рис. 1 – 4): ферми з паралельними поясами із поперечними перерізами з парних рівнобічних кутиків, із різними типами решітки та кроком прогонів, із шарнірним сполученням у вузлах. Множина альтернатив  $S_1 = \{x_{11}; x_{12}; x_{13}; x_{14}\}$ :

- $x_{11}$ : топологія – 25 елементів, 14 вузлів; тип решітки – розкісна з додатковими стояками; крок прогонів 3,0 м; кількість прогонів на блок ферм: 9; кількість відправних марок: 2.
- $x_{12}$ : топологія – 19 елементів, 11 вузлів; тип решітки – розкісна з додатковими стояками; крок прогонів 4,0 м; кількість прогонів на блок ферм: 7; кількість відправних марок: 3.
- $x_{13}$ : топологія – 31 елемент, 17 вузлів; тип решітки – розкісна з додатковими стояками; крок прогонів 2,4 м; кількість прогонів на блок ферм: 11; кількість відправних марок: 3.
- $x_{14}$ : топологія – 23 елементи, 13 вузлів; тип решітки – трикутна; крок прогонів 4,8 м; кількість прогонів на блок ферм: 7; кількість відправних марок: 3.

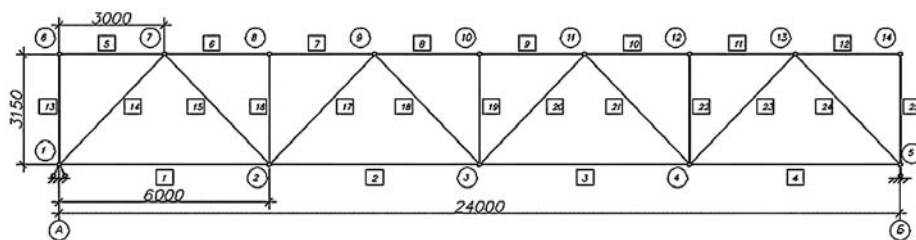


Рис. 1. Геометрична схема альтернативи  $x_{11}$

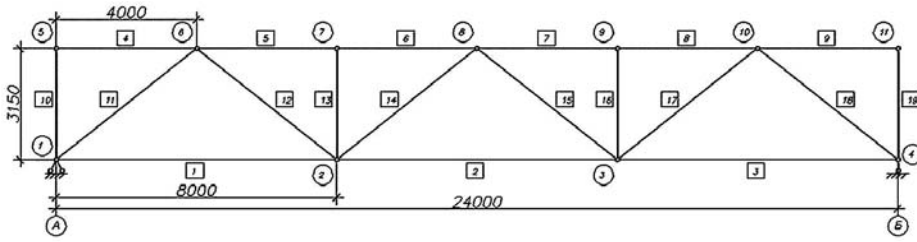


Рис. 2. Геометрична схема альтернативи  $x_{12}$

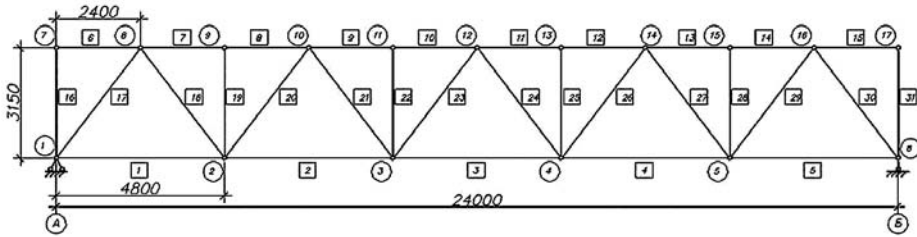


Рис. 3. Геометрична схема альтернативи  $x_{13}$

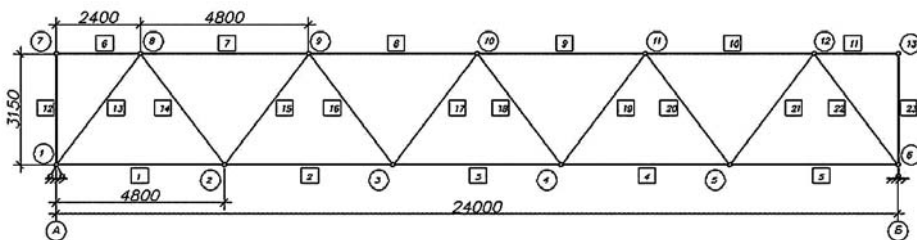


Рис. 4. Геометрична схема альтернативи  $x_{14}$

Група альтернатив  $S_2$  (рис. 5 – 8): ферми з трапецієподібним абрисом поясів, із поперечними перерізами з парних рівнобічних кутиків, з різними типами решітки та кроком прогонів, із шарнірними вузлами. Множина альтернатив  $S_2 = \{x_{21}; x_{22}; x_{23}; x_{24}\}$ :

- $x_{21}$ : топологія – 27 елементів, 15 вузлів; тип решітки – розкісна з додатковими стояками; крок прогонів 3,0 м; кількість прогонів на блок ферм: 9; кількість відправних марок: 3.
- $x_{22}$ : топологія – 33 елементи, 18 вузлів; тип решітки – розкісна з додатковими стояками; крок прогонів 2,4 м; кількість прогонів на блок

ферм: 11; кількість відправних марок: 2.

—  $x_{23}$ : топологія – 33 елементи, 18 вузлів; тип решітки – розкісна; крок прогонів 2,4 м; кількість прогонів на блок ферм: 11; кількість відправних марок: 2.

—  $x_{24}$ : топологія – 27 елементів, 15 вузлів; тип решітки – трикутна; крок прогонів 4,0 м; кількість прогонів на блок ферм: 7; кількість відправних марок: 3.

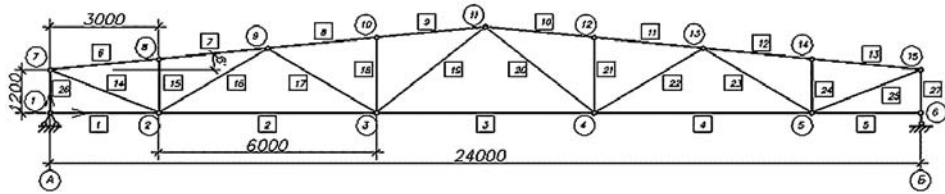


Рис. 5. Геометрична схема альтернативи  $x_{21}$

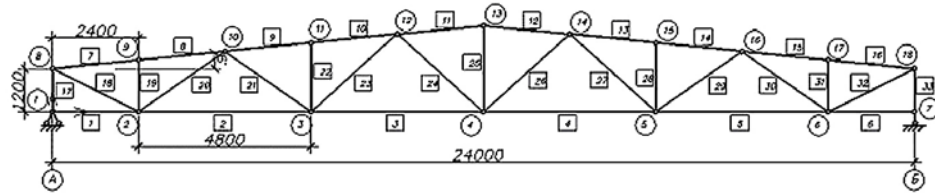


Рис. 6. Геометрична схема альтернативи  $x_{22}$

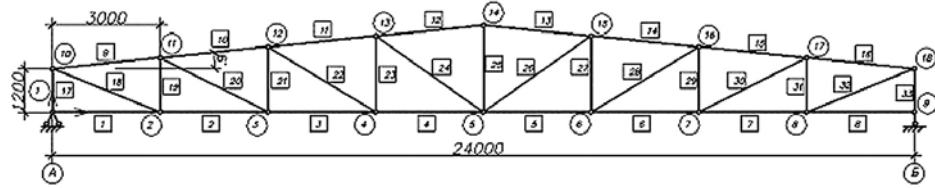


Рис. 7. Геометрична схема альтернативи  $x_{23}$

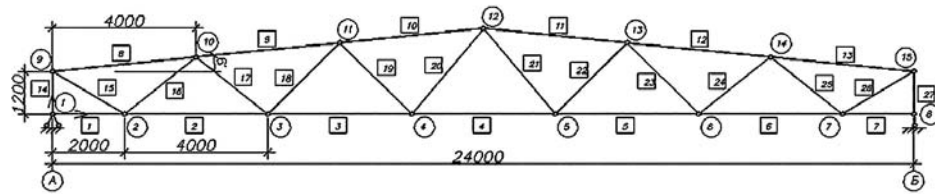


Рис. 8. Геометрична схема альтернативи  $x_{24}$

Група альтернатив  $S_3$  (9-12): ферми з паралельними поясами, із поперечними перерізами з квадратних гнutoзварних замкнених профілів, з різними типами решітки та кроком прогонів. Елементи жорстко з'єднані у вузлах, що мають обов'язкову умову центрування јсей елементів решітки на осі пояса, тобто допускається напусток [2, 15, 16]. Множина альтернатив  $S_3 = \{x_{31}; x_{32}; x_{33}; x_{34}\}$ :

- $x_{31}$ : топологія – 31 елемент, 17 вузлів; тип решітки – трикутна; крок прогонів 3,0 м; кількість прогонів на блок ферм: 9.
- $x_{32}$ : топологія – 23 елементи, 13 вузлів; тип решітки – трикутна; крок прогонів 4,0 м; кількість прогонів на блок ферм: 7.
- $x_{33}$ : топологія – 15 елементів, 9 вузлів; тип решітки – трикутна; крок прогонів 6,0 м; кількість прогонів на блок ферм: 5.
- $x_{34}$ : топологія – 29 елементів, 17 вузлів; тип решітки – комбінована розріджена; крок прогонів 3,0 м; кількість прогонів на блок ферм: 9. Зазначимо, що альтернатива  $x_{34}$  при шарнірному сполученні у вузлах була б геометрично змінюваною. Дана альтернатива введена з метою демонстрації можливостей реалізованої методики у вирішенні задач вибору для нетрадиційних систем. В цілому реалізація алгоритму МСЕ у формі методу переміщень дозволяє робити повністю безрозкісні системи, проте експериментальні обрахунки засвідчили їхню завелику деформативність при вирішенні поясів із ГЗП.

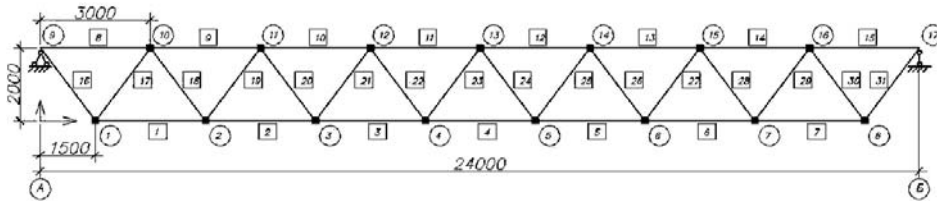


Рис. 9. Геометрична схема альтернатив  $x_{31}$

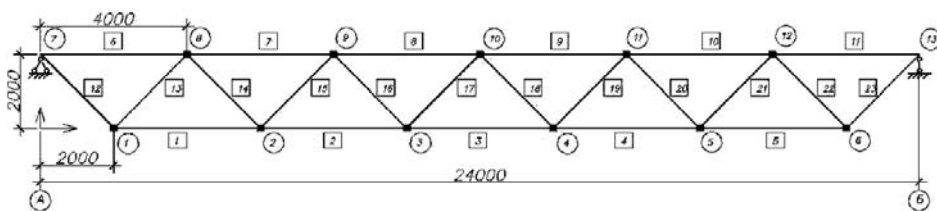


Рис. 10. Геометрична схема альтернатив  $x_{32}$



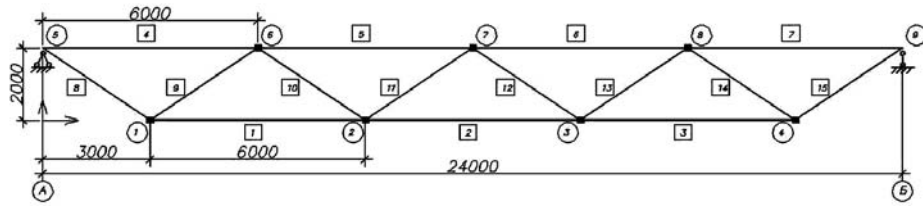


Рис. 11. Геометрична схема альтернатив  $x_{33}$

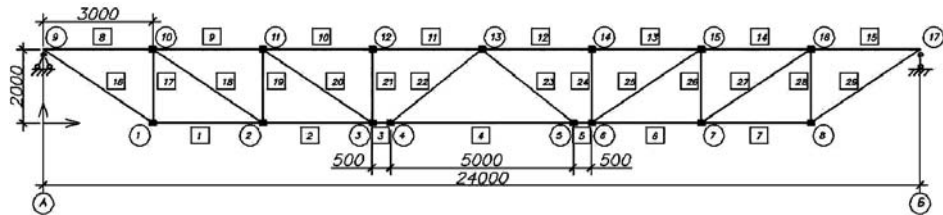


Рис. 12. Геометрична схема альтернатив  $x_{34}$

**Якісні дані.** Будівля опалювана, розрахункова температура повітря у приміщенні  $+17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , розрахункова температура зовнішнього повітря для холодного періоду року при розрахунку втрат теплоти крізь зовнішні огорожі  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Крок рамних поперечників будівлі  $b = 6\text{ м}$ . Сталь – С255; умови експлуатації нормальні; проектний срок експлуатації  $T = 70$  років; тимчасовий опір розриву металу шва  $R_{wm} = 410\text{ МПа}$ ; марка електродів УОНИ-13/45;  $\beta_f = 0,7$ ; коефіцієнт умов роботи для неосновних елементів та вузлів  $\gamma_c = 1,0$ ; кількість шарів фарбування – 2. Товщина ізоляційних панелей 150 мм. Умови уніфікації передбачають однакові за довжиною та між собою елементи поясів.

База цін уведена відповідно до прейскурантів, що діють на момент вирішення теоретичної задачі оптимального вибору (14.04.2009 р.), див. табл. 1. Ціна газу при визначенні експлуатаційних витрат на опалення умовної будівлі прийнята відповідно до «Прейскуранта цін на природний газ ресурсів НАК "Нафтогаз України"» для суб'єктів господарювання,  $c_g = 2424,3\text{ грн}/1000\text{ м}^3$ . Автоматизоване проектування в рамках системи окрім підбору перерізів стержнів ферм включає підбір профнастилу згідно з ГОСТ 24045-94, підбір прогонів із прокатних двотаврів згідно з ГОСТ 8239-89 та підбір в'язей із гнutoзварних замкнених профілів квадратного перерізу згідно з ГОСТ 8639-82. Заробітна платня робітника першого розряду становить 2000 грн/міс.

Таблиця 1

**Розцінки на основні матеріали**

Найменування витрат	Ціна	Одиниця виміру
Прямокутні замкнені профілі згідно з ДСТУ Б.В.2-6-8-95	4 690...8 130	грн/т
Квадратні замкнені профілі згідно з ГОСТ 8639-82	4 690...5 480	грн/т
Профільований настил згідно з ГОСТ 24045-94	50,62...112,68	грн/м <sup>2</sup>
Листовий прокат	5 733...5 086	грн/т
Двотаври згідно з ГОСТ 8239-89	6393...8551	грн/т
Кутики з рівними полочками згідно з ГОСТ 8509-72	4688...8304	грн/т
Електроди типу УОНИ-13/45	8500	грн/т
Розчинник, марка Р-4	13	грн/кг
Грунтовка ГФ-021	12	грн/кг
Емаль ПФ-115 червона	10,85	грн/кг
Сандвіч-панелі типу "Термобуд" без плівки, 150мм	225	грн/м <sup>2</sup>

Для ферм з паралельними поясами область допустимих значень задано  $\bar{H} \{1,50; 1,55; \dots; 3,80; 3,85\}$  з умов транспортного габариту 3,85 м, а також технологічних особливостей виготовлення та прогнозованих обмежень за II граничним станом. Для ферм з трапецієподібним абрисом поясів відповідна область допустимих значень кута нахилу для заданої висоти крайнього стояка 1,2 м складає:  $\bar{\alpha} \{3,0^0; 3,25^0, \dots; 12,0^0; 12,25^0\}$ . Початкову висоту альтернатив із гнutoзварних замкнених профілів в осях задано 2,0 м, ферм з парних кутиків – 3,15 м. Початковий кут нахилу верхнього поясу ферм трапецієподібного абрису на основі узагальненого досвіду проектування задано  $\alpha_0 = 6^0$ .

**Вирішення.** Вибір оптимального рішення досліджується для області граничних розрахункових значень навантаження  $q_u$ , прийнятих у межах  $\bar{q}_u \{2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0\}$  кН/м<sup>2</sup>, що відповідає реальним навантаженням на покриття виробничих та складських будівель при їх традиційному вирішенні і відсутності технологічних навантажень від навісного обладнання та ін. Експлуатаційне розрахункове значення навантаження  $q_e$  прийнято в залежності  $0,7 q_u$ , що приблизно відповідає реальним співвідношенням експлуатаційних і граничних навантажень. Залежності значень критеріїв  $K_1, \dots, K_4$  від граничного розрахункового навантаження для кожної з альтернатив наведені на рис. 13 – 16.

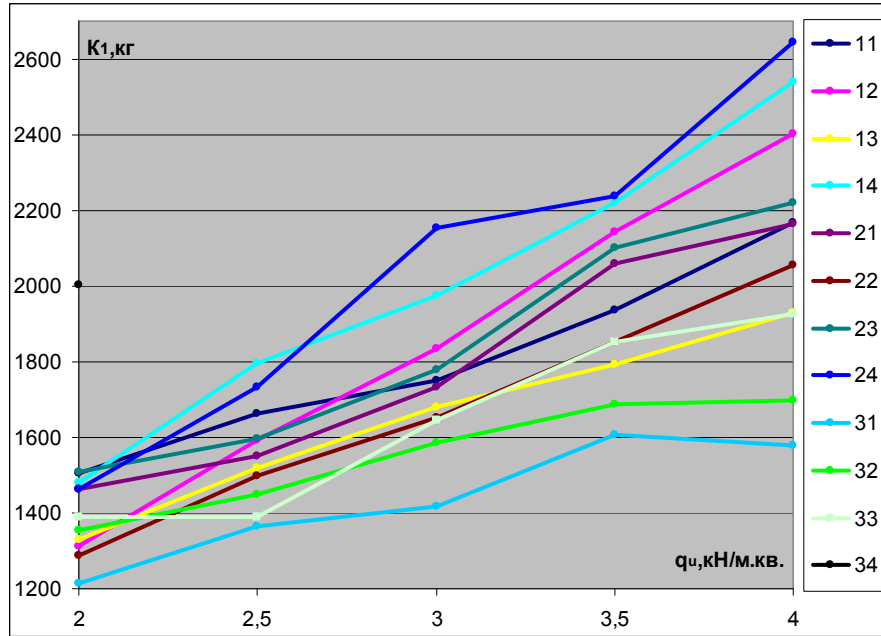


Рис. 13. Значення критерію  $K_1$  оптимальних альтернатив при зміні  $q_u$

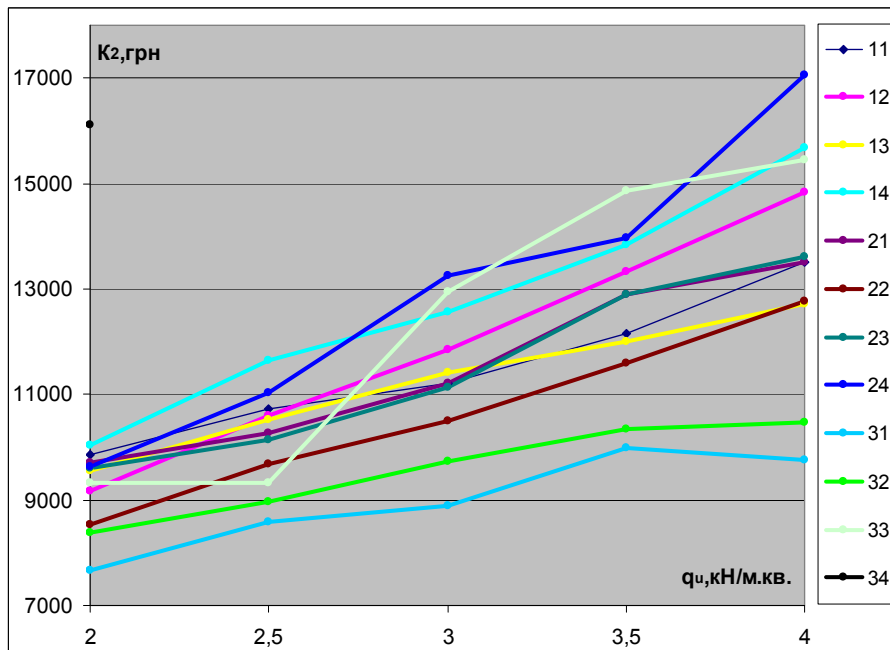


Рис. 14. Значення критерію  $K_2$  оптимальних альтернатив при зміні  $q_u$

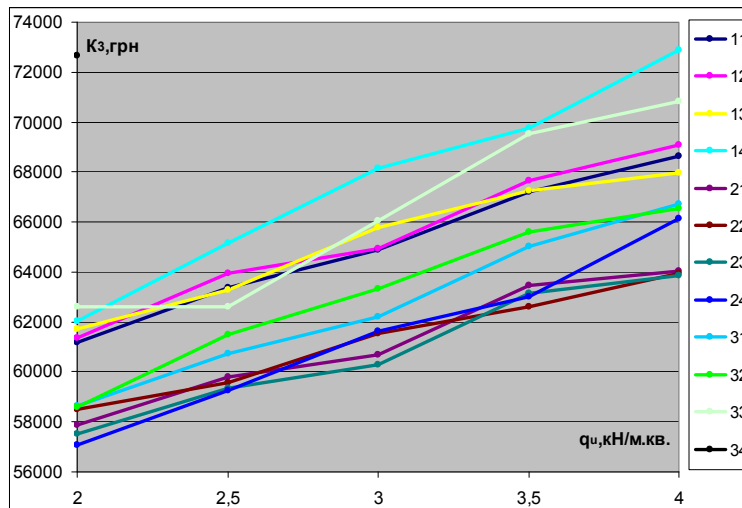


Рис. 15. Значення критерію  $K_3$  оптимальних альтернатив при зміні  $q_u$

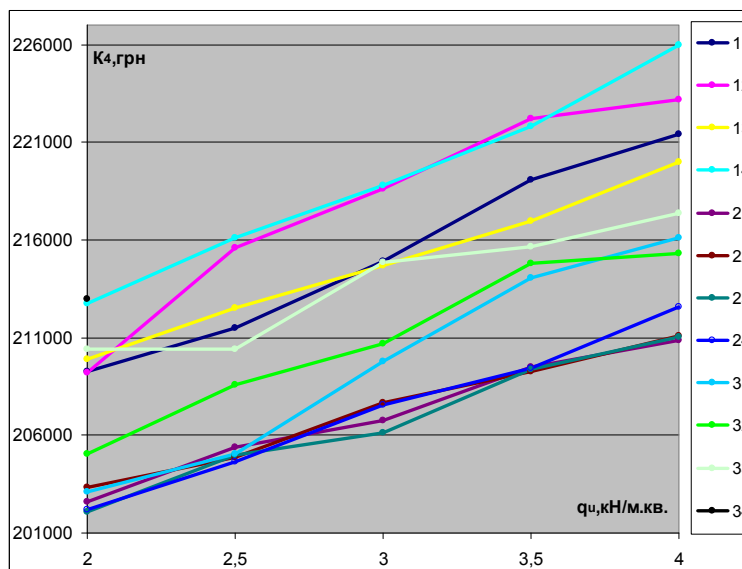


Рис. 16. Значення критерію  $K_4$  оптимальних альтернатив при зміні  $q_u$

Кількість альтернатив, що міститься в базі знань, може бути скінченно великою. Враховуючи основну властивість експертних систем – здатність до накопичення знань, можна відзначити, що по мірі використання системи при вирішенні реальних задач вибору кожним користувачем база наповнюється новими альтернативами, що можуть бути залучені до

вибору при вирішенні у свою чергу наступних задач. В цьому плані штучний досвід, який накопичується у системі, є індивідуальним, проте також вільний до обміну між користувачами.

Таблиця 2

**Економія внаслідок вибору оптимального рішення порівняно до альтернатив із найгіршим показником критерію у початковому розв'язку**

Критерій	Економія при $q_u$				
	2 кН/м <sup>2</sup>	2,5 кН/м <sup>2</sup>	3 кН/м <sup>2</sup>	3,5 кН/м <sup>2</sup>	4 кН/м <sup>2</sup>
$K_1$	44,67%	60,86%	56,25%	45,47%	47,30%
$K_2$	57,99%	69,93%	66,20%	49,86%	58,39%
$K_3$	21,47%	24,94%	21,47%	10,98%	14,55%
$K_4$	12,23%	14,75%	12,02%	11,08%	12,19%

Слід також відзначити істотну залежність вибору оптимального рішення від якісних вихідних даних та об'єктивних умов. У цьому плані рішення можна назвати «миттєво оптимальним», тобто дійсним на момент вирішення для заданих преїскурантів цін.

Розроблена методика та реалізована експертна система можуть бути поширені на будь які інші типи конструкцій.

### Висновки

Альтернативи, які досягають найменших значень обраного суперкритерію при заданому навантаженні, і є вирішенням задачі кардинального вибору. Економія внаслідок вибору оптимального рішення порівняно до альтернатив із найгіршим показником критерію у початковому розв'язку, які теж могли бути обрані, з урахуванням оптимізації геометрії та заданих вихідних даних складає від 11 % до 70 % для різних критеріїв вибору (табл. 2).

Наведений приклад наочно демонструє ефективність прийнятої методики та підтверджує вибір оптимального конструктивного рішення на стадії варіантного проектування як значний резерв економії сталевих конструкцій. Окрім того виявлено чутливість вирішення задачі вибору до вихідних умов щодо навантаження, особливо для альтернатив, що мають схожі топологічні типи.

### Література

- [1] Білик А.С. Аналітичне моделювання функції маси сталевих конструкцій при виборі оптимальних конструктивних рішень сталевих ферм. // Зб. доповідей V міжн. наук.-техн. конф. "Будівельні металеві конструкції: сьогодення та перспективи розвитку", – Київ, Вид-во «Сталь», 2006. – 664 с.

- [2] Білик А.С. Оптимальне проектування сталевих стержневих конструкцій із замкнених профілів // Тези доповідей наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА – Київ: КНУБА, 2007.
- [3] Білик А.С. Вибір оптимальних конструктивних рішень при аналізі якісних умов проектування // «Будівельні конструкції», зб. наук. праць, вип. 63 – Київ, НДІБК, 2005. – С.335 – 340.
- [4] Білик А.С., Пермяков В.О. Експертне моделювання вибору оптимальних рішень плоских сталевих зварних конструкцій // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди / Зб. наук. праць. Вип. 16. Ч. 2. – Рівне, 2008. – С. 295 – 302.
- [5] Вальд А. Последовательный анализ. – М., Физматгиз, 1960. – 328с.
- [6] Виноградов А.И. Подмножества допустимых решений в теории оптимальных стержневых систем. Исследования по теории сооружений, вып. XVI. – М.: Стройиздат.,1968.
- [7] ЕНиР на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы. Конструкции зданий и промышленных сооружений. Введ. 18.12.90 – М.: Госстрой СССР, 1990.
- [8] Лившиц В.Н. Выбор оптимальных решений в технико-экономических расчетах. – М.: «Экономика», 1971. – 255 с.
- [9] Лихтарников Я.М., Вариантное проектирование и оптимизация строительных конструкций – М.: Стройиздат. – 5 с.
- [10] Многокритериальные задачи принятия решений / Под. ред. Д.М. Гвишиани, С.В. Емельянова; АН СССР; ВНИИ системных иссл. – М.: Машиностроение, 1978. – 184 с.
- [11] Пермяков В.А. Современное состояние проблемы оптимального проектирования стальных конструкций. // Металеві конструкції, № 1, 1998 – С. 17 – 20.
- [12] Сергеев Н.Д., Богатырев А.И. Проблемы оптимального проектирования конструкций. – Л.,Стройиздат, Ленингр.отд-ние, 1971. – 136 с.
- [13] Чичинадзе В.К. Решение невыпуклых нелинейных задач оптимизации. – М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. Литературы, 1983. – 256с.
- [14] Шевченко Е.В. Совершенствование конструкций опор высоковольтных линий электропередачи и создание системы их автоматизированного оптимального проектирования. Автореферат дис... Докт. Техн. Наук. – Киев, 2000.
- [15] BS DD ENV 1993-1-1 :1992/A1 :1994.Eurocode 3 – Design of Steel Structures : Part 1-1 – General Rules and Rules for Buildings: Annex K - Hollow section lattice girder connections.
- [16] Jalkanen J. Multicriteria Tubular Truss Optimization // Design, fabrication and economy of welded structures. International Conference Proceedings, Horwood publ., Chichester,UK, 2008. – P. 71 – 79.

*Надійшла до редколегії 07.07.2009 р.*