

ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОЇ ВИСОТИ СТАЛЕВИХ БАЛКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ З УРАХУВАННЯМ КОЕФІЦІЄНТА ДИНАМІЧНОСТІ ПІД ЧАС ДІЇ ЕПІЗОДИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Артем БІЛИК¹, Максим ТЕРНОВИЙ²

^{1,2}Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітряних Сил, Київ, Україна, 03037

¹artem.bilyk@gmail.com, orcid.org/ 0000-0002-9219-920X,

²ternovoy@gmail.com orcid.org/ 0009-0003-7586-7872

Анотація. В статті розроблено узагальнений підхід пошуку раціональної висоти сталевих балкових конструкцій: ферми або балки покриття під час дії епізодичного короткочасного навантаження імпульсної дії. Дослідження виконані на підставі створення узагальненої фізико-математичної моделі пошуку раціональної висоти сталевих ферми підвищеної надійності з урахуванням дії імпульсного зосередженого навантаження, яке діє по середині прольоту конструкції. Вибір раціональної висоти сталевих ферми прийнято за узагальненою методикою оптимального проектування з урахуванням обмежень за міцністю і стійкістю. Тому можна прийняти, що застосований методологічний підхід дає обмежено-оптимальний результат, але він є достатнім, враховуючи складність поставленої задачі, для варіантного проектування.

За цільову функцію прийнято аналітичний вираз витрат сталі з урахуванням коефіцієнта динамічності за згинальним моментом. Запис аналітичної цільової функції витрат сталі конструкції ферми із перехресною решіткою виконано з урахуванням уніфікації сталевих елементів, також враховано вплив конструктивних коефіцієнтів. За фізико-математичну модель сталевих ферми покриття прийнята конструкція ідеального двотавра з урахуванням деформації зсуву перерізу при визначенні коефіцієнта динамічності. Отримані аналітичні вирази (критерії раціональності) для визначення раціональної (обмежено-оптимальної) висоти ферми з урахуванням впливу коефіцієнта динамічності. Проведені числові дослідження обмежено-оптима-



Артем БІЛИК

доцент кафедри металевих та дерев'яних конструкцій,
к.т.н., доцент



Максим ТЕРНОВИЙ

асистент кафедри металевих та дерев'яних конструкцій

льної висоти сталевих конструкцій ферми покриття. Підтверджено, що в залежності від статичного та імпульсного навантаження та геометричних параметрів сталевих конструкцій покриття, коефіцієнт динамічності впливає на визначення раціональної висоти сталевих конструкцій. Отриманий критерій раціональності конструкції враховує також вплив співвідношення власної ваги конструкції сталевих ферми покриття і конструкції покриття з урахуванням огорожувальних несучих конструкцій плит покриття.

Аналітичний критерій раціональної висоти сталевих ферми покриття із впливом імпульсного навантаження включає і критерій раціональності оптимальної висоти ферми при статичному навантаженні.

За результатами досліджень отримана практична методика визначення раціональної конструкції сталевих ферми покриття під час варіантного проектування з урахуванням дії імпульсних навантажень.

Ключові слова: сталева ферма покриття; оптимальне проектування; раціональна висота сталевих ферм покриття; критерій раціональності; коефіцієнт динамічності; імпульсне навантаження; аварійні навантаження; живучість конструкцій.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Створення нових класів і підкласів сталевих конструкцій з підвищеними захисними властивостями – це наукова проблема розвитку аналітичного апарату розрахунку конструкцій на дію засобів повітряного нападу [1,2]. Для об'єктів критичної інфраструктури та цивільних особливо важливих будівель і споруд вдосконалення методологічних підходів визначення раціональних конструктивних систем покриття будов є актуальною задачею. Металеві балкові системи прогоном 9-18 м повинні бути розраховані на опір зо-середженим імпульсним навантаженням, які діють під час прямого ураження безпілотними летальними апаратами. Важливим етапом проектування є пошук раціональних технічних рішень таких конструкцій [2,3,15]. Проте підходи раціонального (обмежено-оптимального) пошуку оптимальної висоти балкової конструкції, у тому числі і сталевих ферм покриття, з урахуванням навантаження імпульсного характеру недостатньо представлені в наукових дослідженнях.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Імпульсний характер дії навантаження найбільш доцільно враховувати через визначення коефіцієнта динамічності [6, 7, 3, 15, 16, 17]. Серед актуальних задач окремою технічною проблемою є дослідження складних рамних і стрижневих систем під час сейсмічного навантаження [6, 7, 8, 9, 10]. Задачі розрахунків на аварійні та епізодичні навантаження пов'язані із створенням конструктивних систем підвищеної живучості, розрахованих на протидію калоптичного руйнування конструкцій [6, 7, 8, 9, 10,11,12].

Оптимальне проектування сталевих конструкцій ферм покриття – це вибір найкра-

щого конструктивного рішення із використання автоматизованих процесів реалізації аналітичних фізико-математичних алгоритмизованих моделей цілеспрямованого пошуку, під час якого з множини допустимих проектних рішень цього об'єкта відшуковують один най-кращий, такий, що забезпечує узгодженість, збалансованість техніко-економічних показників як самого об'єкта, так і загалом системи, елементом якої є цей об'єкт [3, 4, 5, 22].

У загальному випадку математична постановка задач оптимізації полягає у пошуку фізичних та геометричних параметрів конструктивної форми, при яких показники якості рішення досягають екстремального значення [4, 5, 20, 21, 22, 23].

Напрямок розвитку теорії оптимального проектування сталевих стержневих систем до 60-х років XX сторіччя пов'язаний з розвитком аналітичних підходів пошуку екстремальних значень цільової функції витрат сталі. В якості активних обмежень мінімальної ваги приймалися рівняння умов міцності та стійкості [4, 5, 20, 21, 22, 23]. Першими роботами з оптимального проектування слід вважати відомі роботи Дж.Максвел (1869 р.) [Maxwell J.C. Scientific papers 11,1869. Cambridge University, Press, p 175-177. (Reprinted by Dover publications, New York, 1953)], А.Мічел (1904) [Maxwell J.C. Scientific papers 11,1869. Cambridge University, Press, p 175-177. (Reprinted by Dover publications, New York, 1953)] та М.Леві (1874р.) [Levy M. Le statique graphique et ses applications aux constructions.-Paris:1874], [2].

Перші роботи із розрахунку статично невизначених ферм за критерієм найменшого об'єму належить ряду авторів [5, 20, 21, 22, 23, 24]. Так, було доказане положення: «системи, з яких ми вибираємо рішення зворотної задачі – це сукупність конструкцій із однаковим абрисом осей. Множина усіх можливих рішень конструкцій із заданим абрисом осей та основна задача проектування – задача вибору найкращого варіанту з цієї множини» [3, 4, 5]. Це стосується і пошуку оптимальних конструктивних рішень балок, які при прогонах і певних навантаженнях є

конкурентними із конструктивними рішеннями сталевих ферм покриття [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]. Розвинутий підхід щодо пошуку раціональних конструкцій комбінованих ферм покриття [13, 14], з використанням прокатних балкових профілів та двотаврів з гофрованою стінкою у верхньому поясі [26, 27].

Проте вирішення задачі оптимального вибору на даному етапі навіть при визначених умовах та із задовільною точністю, пов'язане із потребою попереднього розрахунку, конструювання та послідовного обчислення техніко-економічних показників для кожної конструкції з множини можливих рішень. Тому в зв'язку із великою трудомісткістю ручного розрахунку техніко-економічних показників при варіантному проектуванні, пошук шляхів розв'язання зворотної задачі проектування пішов у напрямку відшукування оптимальних рішень на неперервних функціях, що описують множини допустимих рішень [3, 9, 13, 16, 22].

В той же час намагання звести пошук оптимальних параметрів стержневих конструкцій до суто аналітичних методів, розрахованих на ручний розрахунок, зумовили значні спрощення, які були прийняті при їх розробці, та наклали обмеження щодо їх застосування на мінімальні та максимальні значення параметрів конструкції [5, 21, 22].

Для багатомірної безумовної оптимізації, до якої відноситься більшість задач оптимізації стержневих конструкцій, найбільшого поширення набули градієнтні методи першого порядку, що малочутливі до початкового проекту та кількості обмежень у формі додаткових рівнянь [20, 21, 22, 23, 24].

Більшість вирішень задач оптимізації сталевих стержневих конструкцій передбачають вибір параметрів на неперервному ряді значень характеристик елементів. Насправді ж, природа простору рішень у реальному проектуванні металевих конструкцій носить дискретний характер, що визначається сортаментами елементів. З теоретичної точки зору, дискретне проектування отримується при використанні методики цілочисельного програмування за умови, що

математичну задачу програмування можна ліанеризувати.

Розв'язок узагальненої задачі оптимального проектування дозволяє вирішити проблеми пошуку оптимальної геометрії, топології та розподілу зусиль і матеріалу в стержневих металевих системах при визначених умовах закріплення на опорах та величинах розрахункових навантажень, з урахуванням вимог будівельних норм та специфіки конструювання.

Таким чином, методи математичного програмування за відносно короткий строк набули широкого розвитку, і довели свою ефективність, як в галузі оптимізації будівельних конструкцій, так і інших технічних систем. Разом із тим, широкого прикладного застосування в задачах з урахуванням дії динамічного та імпульсного навантаження, методи оптимального проектування так і не набули. Це пов'язано насамперед із не випуклістю (пологістю) області допустимих рішень, наявністю локальних екстремумів функції цілі (її мультимодальністю), дискретною зміною шуканих параметрів, складністю урахування конструктивних, технологічних, економічних та експлуатаційних вимог, які мають бути формалізовані у вигляді складових функцій або обмежень, дією навантаження у часі, ефекти навантаження, які залежать від самих геометричних параметрів конструкції. Дійсно, цільові функції, які навіть із задовільною точністю описують масу або вартість сталевих стержневих конструкцій, мають складний характер, залежать від багатьох як кількісних так і якісних параметрів, є нелінійними, дискретними та мультимодальними. На даний час математично строго довести збіжність таких цільових функцій існуючими методами достатньо складна задача [3, 4, 5, 20, 21, 22, 23].

Це значно ускладнює застосування до них методів математичного програмування, змушує реалізовувати оптимальне проектування в декілька етапів із застосуванням нових критеріїв і методологій [3].

Таким чином, задача прямого одноетапного оптимального проектування та ви-

бору оптимального рішення на стадії варіантного проектування сталевих ферм та інших конс-труктивних балкових, комбінованих конс-трукцій під час дії імпульсного навантаження не достатньо теоретично досліджена. Тому до таких сталевих систем простої конструктивної форми на першому етапі варіантного проектування може бути застосований загальний підхід пошуку аналітичної функції витрат сталі з подальшим врахуванням коефіцієнта динамічності і пошуку обмежено оптимальних геометричних параметрів системи в цілому. Такий підхід достатньо реалізований під час пошуку оптимальних параметрів різних конструкцій двотаврових балок постійного, змінного перерізу, та балок з гофрованою стінкою [15, 16, 17, 18, 19]. Вирішено і задачі оптимального проектування сталевих споруд з урахуванням динамічного впливу вітру [20].

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розроблена узагальнена фізико-математична модель балкової конструкції покриття, яка може бути застосована для пошуку раціональної (обмежено оптимальної) стрижневої балкової шарнірно опертої конструкції з урахуванням дії епізодичного імпульсного навантаження. Конструкція покриття складається із поясів та елементів решітки, для підвищення надійності конструкції ферми врахована вага додаткових елементів (прийнята хрестова решітка ферми покриття).

Конструкція ферми представлена у вигляді ідеального двотавра з урахуванням коефіцієнта деформації зсуву перерізу - k_G .

Отримано приведені значення витрат сталі на конструкцію покриття – цільова функція з урахуванням обмежень за міцністю всіх елементів і конструктивних коефіцієнтів:

$$\frac{8R_y \gamma_c m_\Phi}{\rho \psi_w q_P L_\Phi^2} = \frac{L_\Phi}{h_\Phi} D_{wd} + D_s \frac{h_\Phi}{L_\Phi} \quad (1)$$

де m_Φ – витрати сталі на сталеву балкову конструкцію покриття,

D_{wd} – конструктивна характеристика витрат сталі на пояси,

D_s – конструктивна характеристика витрат сталі на решітку,

L_Φ – прогін сталеві ферми покриття,

h_Φ – висота сталеві ферми покриття,

γ_c – коефіцієнт умов роботи,

R_y – розрахунковий опір сталі за межею плинності (межею текучості)

q_P – рівномірне розподілене граничне розрахункове навантаження,

ρ – густина сталі,

ψ_w – конструктивний коефіцієнт верхнього поясу конструкції.

При дії імпульсного навантаження, робота конструкції розділяється на два етапи: час (τ_1) коли діє імпульсне навантаження, та час (t) коли імпульсне навантаження перестав діяти ($t \geq \tau_1$), а конструкція продовжує рухатися.

Коефіцієнт динамічності за згинальним моментом ($k_{din,M,2}$) прийнято вираховувати за першою частотою коливань ($t \geq \tau_1$), що дає достатнє представлення про раціональні параметри сталеві конструкції покриття під час варіантного проектування:

$$t \geq \tau_1 \rightarrow k_{din,M,2} = \frac{M_{x,2,z1} \left(\frac{l}{2} \right)}{M_{x,st} \left(\frac{l}{2} \right)}.$$

$$B_{\tau 1} = \sin \left(\frac{\omega_1 \tau_1}{2} \right) \sin \left(\frac{\omega_1 \tau_1}{2} + \omega_1 (t - \tau_1) \right). \quad (2)$$

$$k_{din,M,2} = \frac{16}{\pi^2} B_{\tau 1}.$$

Колова частота власних коливань за першою формою буде залежати від ваги конструкції покриття (m_{tr}) і жорсткості системи на згин $EI_x k_G$.

$$\omega_1 = \pi^2 \sqrt{\frac{EI_x k_G}{L_\Phi^4 m_{tr}}}. \quad (3)$$

Момент інерції перерізу можливо представити через висоту конструкції ідеального

двотавра (приймається площа поясів конструкції за площею нижнього поясу і враховуються конструктивними коефіцієнтами відмінності):

$$I_x = D_{wd} 2 \frac{h_\Phi^2}{4} A_d = D_{wd} \frac{h_\Phi^2 2 A_d}{4}. \quad (4)$$

Тепер функція $B_{\tau 1}$ колової частоти за першою формою набуває запису з урахуванням теоретичної маси ферми:

$$m_{tr,0} = 2\psi_{tr} D_{wd} A_d. \quad (5)$$

$$B_{\tau 1} = \sin \left(\pi^2 \frac{h_\Phi}{L_\Phi} \sqrt{\frac{E}{4\rho\psi_{tr} L_\Phi^2} \frac{m_{tr,0}}{m_{tr}}} \frac{\tau_1}{2} \right).$$

Таким чином, функція витрат сталі з урахуванням коефіцієнта динамічності набуває виду

$$\frac{8R_y \gamma_c m_{\Phi 1}}{\rho \psi_{i,w} q_P L_\Phi^2} = \frac{16}{\pi^2} B_{\tau 1} \left(\frac{L_\Phi}{h_\Phi} D_{wd} + D_s \frac{h_\Phi}{L_\Phi} \right) \quad (4(6))$$

Проведені числові дослідження – витрати сталі на сталеву балкову конструктивну систему сталевих ферм покриття прольотом $L_\Phi = 17,5$ м із урахуванням коефіцієнта динамічності та часу дії імпульсу

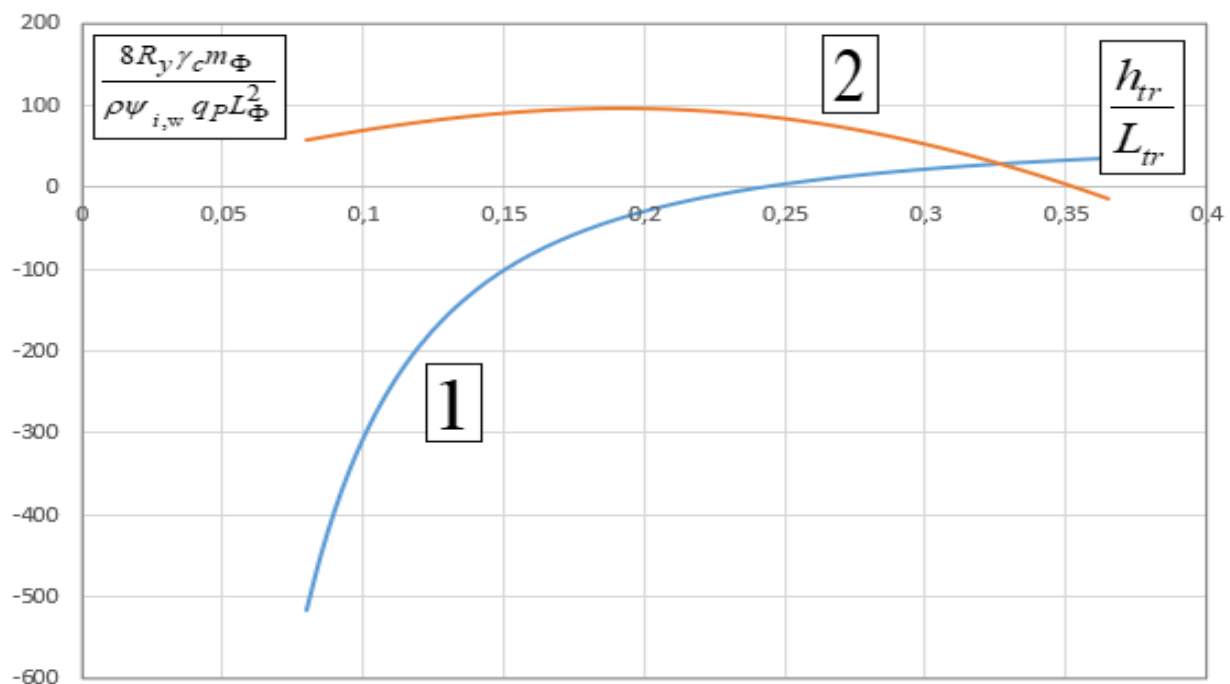


Рис.1. Зміна критерію зведених витрат сталі на конструктивну систему покриття в залежності від відносної висоти сталевих ферм покриття $m_{tr,0}/(\psi_{tr} m_{tr})=0,15$, час дії імпульсу $\tau_1=0,02$. Графік 1 - при статичному навантаженні, рівняння (6). Графік 2 - з урахуванням коефіцієнта динамічності за згинальним моментом, рівняння (5)

Fig.1 The change in the criterion of aggregated costs of steel for the structural system of the roof truss depending on the relative height of the steel truss $m_{tr,0}/(\psi_{tr} m_{tr})=0,15$, the duration of the impulse $\tau_1=0,02$. Graph 1 - under static load (equation (6)). Graph 2 - taking into account the dynamism factor by bending moment equation (5).

Критерій раціональності конструктивної системи зі сталевими фермами є рівність нулю першої похідної цільової функції.

$$B'_{\tau 1} \left(\frac{L_\Phi}{h_\Phi} D_{wd} + D_s \frac{h_\Phi}{L_\Phi} \right) + B_{\tau 1} \left(-\frac{L_\Phi}{h_\Phi^2} D_{wd} + D_s \right) = 0 \quad (5)(7)$$

Важливим є те, що критерій зведених витрат сталі на конструкцію покриття без урахування коефіцієнта динамічності має запис рівняння (6). Цей критерій входить до складу критерію (5). Розрахунки виконані для часу, коли конструктивна система має максимальні переміщення.

$$\left(-\frac{L_{\Phi}}{h_{\Phi}^2} D_{wd} + D_s \right) = 0 \quad (8)$$

За результатами числових досліджень (рис.1) показано, що оптимальна висота сталевих ферми буде більше оптимальної висоти ферми, без урахування коефіцієнта динамічності, при відношенні власної ваги сталевих конструкцій ферми до ваги конструкції покриття $m_{tr,0}/(\psi_{tr}m_{tr})=0,15$. За таким співвідношенням врахована вага огорожувальних

конструкцій покрівлі (m_{tr}), які коливаються разом з конструкціями сталевих ферм покриття.

При зменшенні власної ваги огорожувальних конструкцій відображається зменшення оптимальної висоти сталевих ферм за рахунок зменшення коефіцієнта динамічності (рис. 2), $m_{tr,0}/(\psi_{tr}m_{tr})=0,25$. Фактично досягається суттєве зменшення імпульсного навантаження.

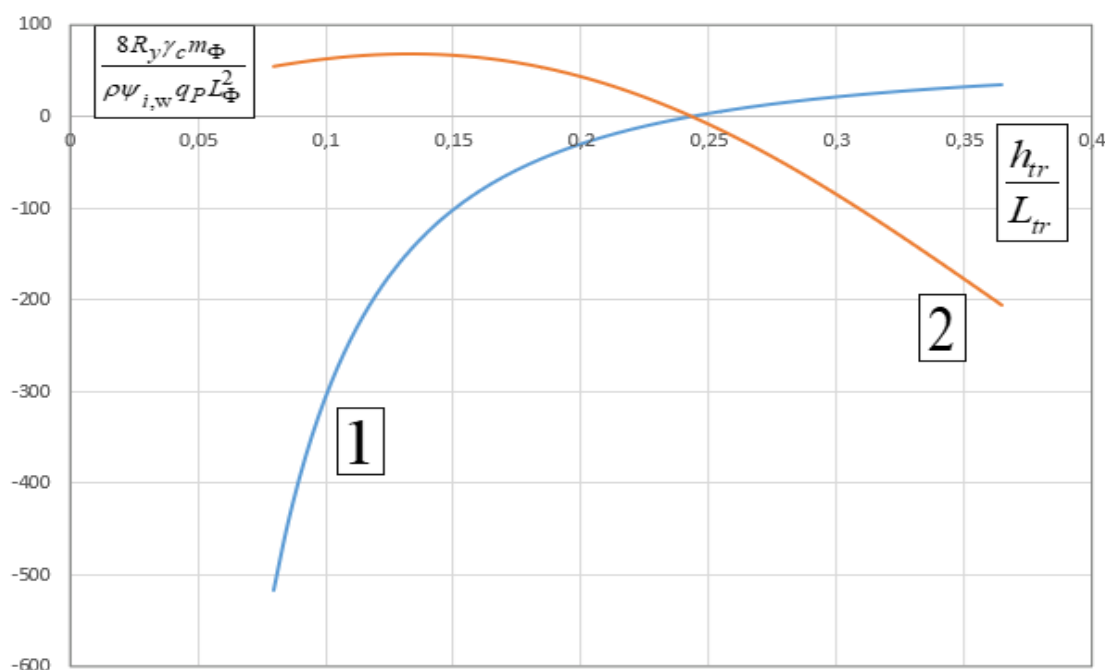


Рис.2. Зміна критерію зведених витрат сталі на конструктивну систему покриття в залежності від відносної висоти сталевих ферми покриття $m_{tr,0}/(\psi_{tr}m_{tr})=0,25$, час дії імпульсу $\tau_1=0,02$. Графік 1 - при статичному навантаженні, рівняння (6). Графік 2 - з урахуванням коефіцієнта динамічності за згинальним моментом, рівняння (5).

Fig.2 The change in the criterion of aggregated costs of steel for the structural system of the roof truss depending on the relative height of the truss $m_{tr,0}/(\psi_{tr}m_{tr})=0,25$, the duration of the impulse $\tau_1=0,02$. Graph 1 - under static load, equation (6). Graph 2 - taking into account the dynamism factor by bending moment, equation (5).

Подальший перехід до несучих конструкцій покрівлі із сталезалізобетону із суттєвим зменшенням ваги самих огорожувальних конструкцій покриття приводить до подальшого зменшення коефіцієнта динамічності та зменшення раціональної висоти ферми за

критерієм (5), (рис 3).

Таким чином, встановлено суттєвий вплив ваги несучих конструкцій покрівлі на загальну роботу системи покриття при дії імпульсних навантажень.

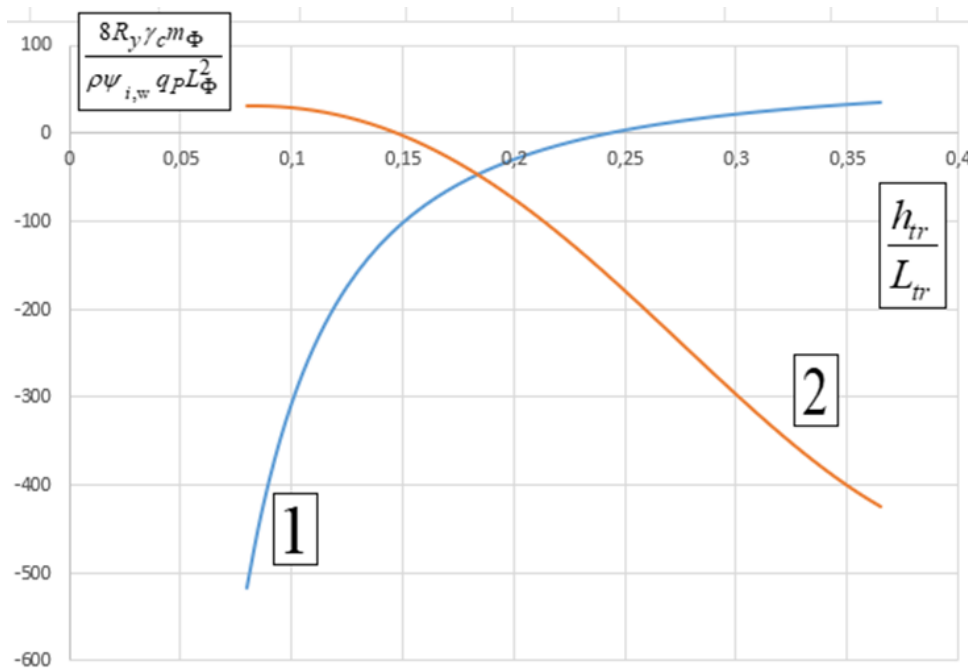


Рис.3. Зміна критерію зведених витрат сталі на конструктивну систему покриття в залежності від відносної висоти сталеві ферми покриття $m_{tr,0}/(\psi_{tr}m_{tr})=0,4$, час дії імпульсу $\tau_1=0,02$.

Графік 1 - при статичному навантаженні, рівняння (6). Графік 2 - з урахуванням коефіцієнта динамічності за згинальним моментом, рівняння (5).

Fig.3 The change in the criterion of aggregated costs of steel for the structural system of the roof truss depending on the relative height of the steel truss $m_{tr,0}/(\psi_{tr}m_{tr})=0,4$, the duration of the impulse $\tau_1=0,02$. Graph 1 - under static load, equation (6). Graph 2 - taking into account the dynamism factor by bending moment, equation (5).

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Досліджена узагальнена фізико-математична модель сталеві ферми для визначення раціональної висоти з урахуванням дії імпульсного зосередженого навантаження, яке діє посередині прольоту конструкції. Вибір раціональної висоти сталеві ферми прийнято за узагальненої методикою оптимального проектування з урахуванням певних обмежень. За цільову функцію прийнято аналітичний вираз витрат сталі з урахуванням коефіцієнта динамічності за згинальним моментом. За фізико-математичну модель сталеві ферми покриття прийнята конструкція ідеального двотавра з урахуванням деформації зсуву перерізу при визначення коефіцієнта динамічності. За основну конструкцію сталеві ферми прийнята сталева балкова система ферм з перехресною решіткою. Отримані аналітичні вирази (кри-

терії раціональності) для визначення раціональної (обмежено-оптимальної) висоти ферми з урахуванням впливу коефіцієнта динамічності. Проведені числові дослідження залежності оптимальної висоти сталеві конструкції ферми покриття від часу дії навантаження. Підтверджено, що в залежності від часу дії імпульсного навантаження і геометричних параметрів сталеві конструкції покриття, коефіцієнт динамічності приймає значення, як більше, так і менше одиниці. Отриманий критерій раціональності сталеві конструкції балкового типу під час дії імпульсивного навантаження, враховує вплив співвідношення власної ваги конструкції сталеві ферми покриття і конструкції покриття з урахуванням огорожувальних несучих конструкцій плит покриття. За результатами досліджень отримана практична методика визначення раціональної конструкції сталеві ферми покриття під час варіантного проектування з урахуванням дії імпульсних навантажень.

Подальші дослідження необхідно провести у напрямку уточнення функції впливу часу імпульсного навантаження, та при дії рівномірно розподіленого імпульсного навантаження, яке діє по всьому прольоту сталеві конструкції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Білик С.І., Білик А.С. Порівняння методик проникнення дії засобів повітряного нападу противника в залізобетоні конструкції споруд захисту об'єктів критичної інфраструктури // *Зб. наук. Праць Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини. ОДАБА. Вип. № 28. – Одеса, 2024. – С.75-84.*
<http://doi.org/10.31650/2707-3068-2024-28-75-84>.
2. Коваль М.В. Основи інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі України від засобів повітряного нападу противника. *Монографія /М.В. Коваль, В.В. Коваль, А.С. Білик, В.І. Коцюруба, О.М. Кубраков; під ред. А.С.Білика. – К.: Генеральний штаб Збройних Сил України, 2023 – 180 с.*
3. Білик А. С. Вибір оптимального конструктивного рішення ферм покриття в експертній системі автоматизованого оптимального проектування // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. -Д.:ПДАБА, 2009. т.№ 5.-С.22-28.*
https://ecat.ust.edu.ua/cgi-bin/irbis64r_12/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21C OM=S&I21DBN=DB4&P21DBN=DB4&S21 FMT
4. Білик А.С. Визначення оптимальних конструктивних рішень ферм у експертній системі одностадійного оптимального проектування // *Зб. наук.праць УНДПІСК ім. В.М.Шимановського. – Київ, вид-во «Сталь», 2009, вип. 4. – С.119-132.*
http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZNPISK_2009_4_16
5. 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.
6. Писаренко Г.С. Опір матеріалів: Підручник /Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський; під ред. Г.С. Писаренка. – К.: Вища школа, 2004. – 655 с.
7. Alberto Di Matteo. Dynamic response of beams excited by moving oscillators: Approximate analytical solutions for general boundary conditions./ *Computers & Structures. Volume 280, May 2023, 106989.*
<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2023.106989>
8. Svedholm C., Zangeneh A., Pacoste C., François S., Karoumi R.. Vibration of damped uniform beams with general end conditions under moving loads /*Engineering Structures* Volume 126, 1 November 2016, Pages 40-52.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.037>
9. S. Priyadharshini1 , V. Sadhasivam1, K. K. Viswanathan. Some New Oscillation Criteria for Euler-Bernoulli Beam Equations with Damping Term / *Mathematics and Statistics* 12(4): 324-330, 2024 <http://www.hrpub.org>
DOI: 10.13189/ms.2024.12040.
10. Yanyutin E. G., Yanchevskiy I. V., Voropay A. V., Sharapata A. S. Zadachi impul'snogo deformirovaniya elementov konstruktivnykh [Problems of impulse deformation of structural elements]. Kharkov, HNADU PUBL., 2004. 392 p.
11. Ol'shans'kyi V. P., Ol'shans'kyi S. V. Dissipative oscillators' power characteristic non-symmetry dynamic effect /*Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Mathematical modeling in engineering and technologies* Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2021. – № 1-2 (2). – С. 65 – 75.
DOI:10.20998/2222-0631.2021.02.08/
<http://mmtt.khpi.edu.ua/article/view/249516>
12. Ol'shans'kyi V. P., Ol'shans'kyi S. V. On the effect of non-symmetry of power characteristic of vibration system under force impact. *Vibration in engineering and technology : all-Ukrainian scientific and technical journal.* 2018, no. 2 (89), pp. 36– 40.
<https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/8ab76a86-2a41-4283-b0e1-e02f5a208be0/content>
13. Gogol M., Zygun A., Maksuta N. New effective combined steel structures. /*International journal of engineering & technology.* 2018. Vol. 7, no. 3.2. P. 343.
URL: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14432>
14. Hohol M., Marushchak U., Peleshko I., Sydorak D. (2022) Rationalization of the Topology of Steel Combined Truss. In: Bieliatynskyi A., Breskich V. (eds) *Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_9

15. Лаврінченко Л., Олійник, Д. (2020). Области оптимальних параметрів сталевих гофрованих балок. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (7), С.45–56.
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.7.2020.45-56>
16. Білик С.І. Методика визначення оптимальної висоти сталевий двотаврової балки зі змінним перерізом стінки при розвитку обмежених пластичних деформацій / *Зб. наук. праць Українського інституту сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського. К., Сталь*, 2012. Вип.9. С.28-33
<https://www.urdisc.com.ua/rl/info/9'2012.pdf>
17. Білик С.І., Недоходюк І.Д. Рациональні сталеві елементи рам двотаврового перерізу зі змінною висотою стінки / *Зб. наук. праць Українського інституту сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського. К., Сталь*, 2009. Вип.4. С.133-142.
<https://www.urdisc.com.ua/rl/info/4'2009.pdf>
18. Білик С.І. Конструктивні коефіцієнти та рациональна висота сталевий коробчатої балки постійного перерізу / С.І. Білик, Л.І. Лаврінченко // *Будівельне виробництво*. - 2017. - № 62(1). - С. 33-38.
http://nbuv.gov.ua/UJRN/buvu_2017_6228129_9
19. Гордєєв В.М. Елементарні задачі оптимізації двотавра / *Зб. наук. праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. К., Сталь*, 2009. Вип.3. С.27-48
http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZNPISK_2009_3_6
20. Perelmuter A., Yurchenko V. Parametric optimization of steel shell towers of high-power wind turbines // *Procedia Engineering*. – No. 57, 2013. – p. 895 – 905.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.114>
21. Haug E. J., Arora J. S. Applied optimal design: mechanical and structural systems. – John Wiley & Sons, 1979. – 520 p.
https://www.researchgate.net/profile/Edward-Haug-2/publication/327630206_Applied_Optimal_Design/links/5b9a68e145851574f7c3d08a/Applied-Optimal-Design.pdf
22. Пермяков В.А., Перельмутер А.В., Юрченко В.В. Оптимальне проектування сталевих стержневих конструкцій. К., Сталь, 2008. - 538 с.
23. Yurchenko V. V., Peleshko I. D. Parametric optimization of steel structures based on gradient projection method // *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles* – Kyiv: KNUBA, 2020. – Issue 105. – P. 192-222.
[DOI: 10.32347/2410-2547.2020.105.192-220](https://doi.org/10.32347/2410-2547.2020.105.192-220)
24. Білик С.І., Шимановський О.В., Нілов О.О., Володимирський В.О. Металеві конструкції: Том 2. Конструкції металевих каркасів промислових будівель: *Підручник для вищих навчальних закладів. /Білик С.І., Шимановський О.В., Нілов О.О., Володимирський В.О./ Кам'янець –Подільський: ТОВ «Друкарня «Рута»- 2021.-448 с.*

REFERENCES

1. Bilyk S.I., Bilyk A.S. Porivnyannya metodyk pronyknennya diyi zasobiv povitryanoho napadu protyvnyka v zalizobetonni konstruktsiyi sporud zakhystu ob'yektiv krytychnoyi infrastruktury // *Zb. nauk. Prats' Suchasni budivel'ni konstruktsiyi z metalu ta derevyny. ODABA. Vyp. № 28*. – Odesa, 2024. – p.75-84.
<http://doi:10.31650/2707-3068-2024-28-75-84>
2. Koval M.V. Osnovy inzhenerenoho zakhystu ob'ektiv krytychnoyi infrastruktury enerhetychnoi haluzi Ukrainy vid zasobiv povitryanoho napadu protyvnyka. *Monohrafiia / [Koval V.V., Bilyk A.S., Kotsiuruba V.I., Kubrakov O.M]; pid red. Bilyka A.S.. – K.: Heneralnyi shtab Zbroinykh Syl Ukrainy, 2023 – 180 p.*
3. Bilyk A.S. Vybir optymalnoho konstruktyvnogo rishennia ferm pokryttia v ekspertnii systemi avtomatyzovanoho optymalnoho proektuvannia / *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury» № 5 / 2009 – p.32-39*
4. Bilyk A.S. Vyznachennia optymalnykh konstruktyvnykh rishen ferm u ekspertnii systemi odnostadiinoho optymalnoho proektu-vannia / *Zb. nauk.prats UNDPISK im. V.M. Shyma-novskoho. – Kyiv, vyd-vo «Stal», 2009, vyp. 4. – p.119-132*
http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZNPISK_2009_4_16
5. Bilyk A. S. Vybir optymalnykh konstruktyvnykh rishen pry analizi yakisnykh umov proektuvannia / *«Budivelni konstruktsii», zb. nauk. prats, vyp. 63 – Kyiv, NDIBK, 2005. – p.335-340*
6. Pysarenko H.S. Opir materialiv: Pidruchnyk / Kvitka O.L., Umanskyi E.S.; pid red. H.S. Pysarenka. – K.: Vyshcha shkola, 2004. – 655 p.
7. Alberto Di Matteo. Dynamic response of beams excited by moving oscillators: Approximate analytical solutions for general boundary conditions./ *Computers & Structures. Volume 280, May 2023, 106989.*

- <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2023.106989>.
8. **Svedholm C., Zangeneh A., Pacoste C., François S., Karoumi R.** Vibration of damped uniform beams with general end conditions under moving loads /*Engineering Structures* Volume 126, 1 November 2016, Pages 40-52. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.037>
 9. **Priyadharshini S., Sadhasivam V., Viswanathan K.** Some New Oscillation Criteria for Euler-Bernoulli Beam Equations with Damping Term /*Mathematics and Statistics* 12(4): 324-330, 2024
[DOI: 10.13189/ms.2024.12040](https://doi.org/10.13189/ms.2024.12040).
 10. **Yanyutin E. G., Yanchevskiy I. V., Voropay A. V., Sharapata A. S.** Zadachi impul'snogo deformirovaniya elementov konstruktsiy *Problems of impulse deformation of structural elements*. Kharkov, HNADU PUBL., 2004. 392 p.
 11. **Ol'shans'kyy V. P., Ol'shans'kyy S. V.** Dissipative oscillators' power characteristic non-symmetry dynamic effect /*Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Mathematical modeling in engineering and technologies* Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2021. – № 1-2 (2). – С. 65 – 75.
[DOI:10.20998/2222-0631.2021.02.08](https://doi.org/10.20998/2222-0631.2021.02.08)
<http://mmmt.khpi.edu.ua/article/view/249516>
 12. **Ol'shans'kyy V. P., Ol'shans'kyy S. V.** Pro efekt nesymetriyi sylovoyi kharakterystyky kolyval'noyi systemy pry mekhanichnomu udari *Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnologiyakh : Vseukrayins'kyy naukovo-tekhnichnyy zhurnal* 2018, no. 2 (89), pp. 36– 40.
<https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/8ab76a86-2a41-4283-b0e1-e02f5a208be0/content>
 13. **Gogol M., Zygun A., Maksuta N.** New effective combined steel structures. /*International journal of engineering & technology*. 2018. Vol. 7, no. 3.2. P. 343.
<https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14432>
 14. **Hohol M., Marushchak U., Peleshko I., Sydorak D. (2022)** Rationalization of the Topology of Steel Combined Truss. In: Bieliatynskiy A., Breskich V. (eds) *Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_9
 15. **Lavrinenko, L., & Oliinyk, D. (2020).** Области оптимальных параметров стальных гофро-ванных балок. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (7), 45–56.
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.7.2020.45-56>
 16. **Bilyk S.I.** Metodyka vyznachennia optymalnoi vysoty stalevoi dvotavrovoy balky zi zminnym pererizom stinky pry rozvytku obmezhenykh plastychnykh deformatsii / *Zb. nauk. prats Ukrainського інституту stalevykh konstruktsii im. V.M. Shymanovskoho. K., Stal*, 2012. Vyp.9. p.28-33
 17. **Bilyk S.I., Nedokhodiuk I.D.** Ratsionalni stalevi elementy ram dvotavrovoho pererizu zi zminnoiu vysotoiu stinky / *Zb. nauk. prats Ukrainського інституту stalevykh konstruktsii im. V.M. Shymanovskoho. K., Stal*, 2009. Vyp.4. p.133-142.
 18. **Bilyk S.I., Lavrinenko L.I.** Konstruktyvni koefitsiienty ta ratsionalna vysota stalevoi korobchastoi balky postiinoho pererizu // *Budivelnne vyrobnytstvo: Vidomchyi naukovotekhnichnyi zbirnyk (tekhnichni nauky)*. K., DP NDIBV. 2017. № 62/1. p.33 – 38
http://nbuv.gov.ua/UJRN/buvu_2017_6228129_9
 19. **Hordeiev V.M.** Elementarni zadachi optyimizatsii dvotavra / *Zb. nauk. prats Ukrainського науково-дослідного та проєктного інституту stalevykh konstruktsii imeni V.M. Shymanovskoho. K., Stal*, 2009. Vyp.3. p. 27-48.
http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZNPISK_2009_3_6
 20. **Perelmutter A., Yurchenko V.** Parametric optimization of steel shell towers of high-power wind turbines // *Procedia Engineering*. – No. 57, 2013. – p. 895 – 905.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.114>
 21. **Haug E. J., Arora J. S.** Applied optimal design: mechanical and structural systems. – *John Wiley & Sons*, 1979. – 520 p.
 22. **Permiakov V.A., Perelmutter A.V., Yurchenko V.V.** Optymalne proektuvannia stalevykh sterzhnevyykh konstruktsii. K., *Stal*, 2008. - 538 p.
 23. **Yurchenko V. V., Peleshko I. D..** Searching for optimal prestressing of steel bar structures based on sensitivity analysis / *Archives of Civil Engineering Vol LXVI, ISSUE 3, 2020, p.525-540*
https://journals.pan.pl/Content/117478/PDF/29.ACE00044%20do%20druku_B5.pdf
 24. **Yurchenko V. V., Peleshko I. D.** Parametric optimization of steel structures based on gradient projection method // *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles* – Kyiv: KNUBA, 2020. – Issue 105. – P. 192-222.

[DOI: 10.32347/2410-2547.2020.105.192-220](https://doi.org/10.32347/2410-2547.2020.105.192-220)

SELECTION OF RATIONAL HEIGHT OF STEEL BEAM STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT THE DYNAMICS COEFFICIENT DURING EPISODIC LOADING

*Artem BILYK,
Maksym TERNOVYI*

Summary: The article develops a generalized approach to finding the rational height of a steel beam structure: a truss or a roof beam under the action of an episodic short-term pulse load. The research was carried out based on creating a generalized physical and mathematical model for finding the rational height of a steel truss of increased reliability, taking into account the action of a pulsed concentrated load acting in the middle of the span of the structure. The choice of the rational height of a steel truss was made according to the generalized optimal design method, taking into account the constraints on strength and stability. Therefore, it can be assumed that the applied methodological approach gives a limited-optimal result given the complexity of the problem, but it is sufficient for variant design.

The analytical expression of steel consumption was taken as the objective function, taking into account the dynamic coefficient for bending moment. The analytical objective function of steel consumption for a truss structure was written taking into ac-

count the unification of steel elements, and the influence of design coefficients was also taken into account. The physical and mathematical model of the steel truss is the design of an ideal I-beam taking into account the shear deformation of the section when determining the dynamic coefficient.

Analytical expressions (rationality criteria) are obtained for determining the rational (bounded-optimal) height of the truss taking into account the influence of the dynamic coefficient. Numerical studies of the bounded-optimal height of the steel roof truss structure are carried out. It is confirmed that depending on the static and impulse load and the geometric parameters of the steel roof structure, the dynamic coefficient affects the determination of the rational height of the steel structure. The obtained criterion of the rationality of the structure also takes into account the influence of the ratio of the self-weight of the steel truss structure and the structure taking into account the enclosing load-bearing structures of the roof slabs.

The analytical criterion of the rational height of the steel truss with the influence of the impulse load also includes the criterion of the rationality of the optimal height of the truss under static load.

According to the research results, a practical method for determining the rational design of a steel roof truss has been obtained during variant design taking into account the action of impulse loads

Keywords: steel roof truss; optimal design; rational height of steel roof truss; rationality criterion; dynamic coefficient; impulse load; emergency loads; structural durability.

Стаття надійшла до редакції 29.10.2024