МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 692.48:[624.014.2:517.9]

Д. О. БАННІКОВ[1*], Д. С. КІХТЕНКО[2], О. Р. ОСАДЧА[3], М. О. ГОЛОЛОБОВ[4]

[1*] Кафедра «Будівельне виробництво та геодезія»,
Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010,
тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта d.o.bannikov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679
[2] Факультет «Будівництво, архітектура та інфраструктура»,
Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010,
тел. +38 (068) 359 02 44, ел. пошта 20.scarecrow.19@gmail.com, ORCID 0009-0009-4196-2314
[3] Факультет «Будівництво, архітектура та інфраструктура»,
Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010,
тел. +38 (099) 011 62 48, ел. пошта osadchay.olga02@gmail.com, ORCID 0009-0004-5715-047X
[4] Факультет «Будівництво, архітектура та інфраструктура»,
Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010,
тел. +38 (097) 075 93 49, ел. пошта gololobovnikita15@gmail.com, ORCID 0009-0008-3939-594X

СУЧАСНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ГРАФОАНАЛІТИЧНОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ СТАЛЕВИХ ФЕРМ

Мета. Основною метою публікації є кількісна оцінка точності і вірогідності застосування графоаналітичного методу визначення розподілу зусиль в елементах сталевої кроквяної ферми на основі використання сучасного комплексу AutoCAD. **Методика.** Для досягнення поставленої мети були розглянуті три проєкти магазину продовольчих і непродовольчих товарів, розташованих в містах Збараж, Новоград-Волинський і Кривий Ріг. Покриття магазинів в усіх трьох випадках виконані на основі плоских сталевих ферм, які і були прийняті в якості об'єкту досліджень. Реалізація графоаналітичного методу побудови діаграми Максвелла-Кремони виконувалось на базі комплексу AutoCAD. Навантаження приймались відповідно до реальних умов експлуатації за чинним стандартом ДБН В.1.2-2:2006. Оцінка точності побудови діаграми Максвелла-Кремони виконувалось на основі співставлення із чисельним методом будівельної механіки – методом скінчених елементів на базі проєктно-обчислювального комплексу SCAD вітчизняної розробки. **Результати.** Проведене кількісне співставлення величин та характеру розподілу внутрішніх зусиль в елементах сталевих ферм покриття показало, що в середньому розбіжність між графоаналітичним методом і методом скінчених елементів не перевищує 3 %. Також використання графоаналітичного методу дозволяє отримувати повний розподіл зусиль в конструкцій ферми, не потребуючи навичок користування спеціалізованими пакетами прикладних програм чисельного аналізу, таких як SCAD або Lira. **Наукова новизна.** В ході проведеного аналізу визначено ступінь теоретичного співпадіння результатів графоаналітичного і чисельного підходів до оцінки розподілу внутрішніх зусиль в елементах сталевих ферм покриття. **Практична значимість.** Отримані результати оцінки вірогідності використання графоаналітичного методу відкривають перспективи його широкого використання в якості альтернативи аналітичним або чисельним методам будівельної механіки для сучасних ускладнених «польових» умов, коли виникає необхідність в наданні швидкої оцінки несучій здатності пошкодженої або зруйнованої будівельної конструкції.

Ключові слова: сталева ферма; ферма покриття; графоаналітичний метод; діаграма Максвелла-Кремони; метод скінчених елементів; комплекс SCAD

Вступ

Сталеві ферми на тепер є одним із найбільш розповсюджених видів конструктивних елементів, які застосовуються практично в усіх видах будівельних конструкцій, наведених в новому Національному класифікаторі (НК 018:2023, 2023) та його попередній редакції (ДК 018-2000, 2000). До таких конструкцій відносяться громадські, промислові та складські будівлі, житлові та нежитлові будівлі, а також значна кількість різновидів інженерних споруд (Kruhlikova, & Bannikov, 2019; Банніков, Нікіфорова, & Леонтієва, 2023; Науково-технічні дослідження у галузі будівництва, 2022; Rozumenko, Bannikov, 2020).

Особливе місце при цьому займають транспортні будівельні конструкції, класифікація яких залишається важливою складовою повної

Creative Commons Attribution 4.0 International © Д. О. Банніков, Д. С. Кіхтенко, О. Р. Осадча, М. О. Гололобов, 2024

класифікації будівельних конструкцій в Україні (Банніков, Нікіфорова, & Косячевська, 2022). Відповідно до нового Національного класифікатора (НК 018:2023, 2023) частина транспортних будівельних конструкцій віднесена до розділу транспортної інфраструктури.

Як справедливо відмічено в роботі (Жовтяк, 2011), на тепер склад та змістовне наповнення поняття «транспортна інфраструктура» тільки продовжує формуватися. Тому, постійно з'являються пропозиції стосовно розширення та вдосконалення цієї термінології. Так, наприклад, до таких пропозицій слід віднести можливість включення до «транспортної інфраструктури» мереж громадських будівель, зокрема таких як мережа магазинів продовольчих і непродовольчих товарів «АТБ» (Гололобов, 2024; Кіхтенко, 2024; Осадча, 2024). Такі мережі дозволяють як оперативно забезпечувати товарами першої необхідності значні маси людей, так і оперативно здійснювати їх транспортування через створені транспортно-товарні коридори. Це особливо актуально в теперішній надзвичайно складній ситуації в Україні, пов'язаній із веденням військових дій. В такій ситуації буває необхідно швидко та якісно виконати проєктно-конструкторські роботи з метою відновлення пошкодженої інфраструктури.

Зазначимо також, що питання проєктування сталевих ферм залишаються актуальними і в інших країнах світу (Bannikov, Radkevich, & Nikiforova, 2019; Wang, Liu, & Luo, 2023; Zhou, Yang, & Tang, 2014).

На тепер в інженерній практиці розроблені та використовуються три основні групи методів для розрахунку ферм (Металеві конструкції. Загальний курс, 2010; Клименко, Барабаш, & Стороженко, 2002):

1. Аналітичні.
2. Графоаналітичні.
3. Чисельні.

Аналітичні методи, такі як метод перерізів, хоча і забезпечують високу точність результатів, проте потребують проведення значних обсягів обчислень, особливо у випадку ферм з великою кількості елементів. Також такі методи позбавлені наочності щодо загальної картини розподілу зусиль в фермі.

Чисельні методи, такі як метод скінчених елементів (Ahmed, Abdelhamid, Ismail, & Ahmed, 2021; Bofang, 2018; Chen, & Yang, 2020; Kumar, Shitole, Ghosh, Kumar, & Gupta, 2019; Zienkiewicz, Taylor, & Fox, 2014), прив'язані до спеціалізованих проєктно-обчислювальних комплексів. Проте такі комплекси на зразок вітчизняних SCAD (Fialko, & Karpilovskyi, 2018; Карпіловський, 2022; Банніков, 2018) або Lira (Барабаш, Кір'язєв, Лапенко, & Ромашкіна, 2018; Барабаш, Козлов, & Медведенко, 2012) та закордонних ANSYS (Chimakurthi, Reuss, Tooley, & Scampoli, 2018; Sapietova, Novak, Saga, Sulka, & Sapieta, 2019), SolidWorks (Salahuddin, Atikah, Rosnah, & Zuhair, 2019), Cosmos-Work (Liang, Ruilin, & Changhao, 2015)., Nastaran (Chaomei, Chengjie, Haichuan, & Guo, 2015) тощо не завжди є в швидкому доступі. До того ж в сучасних умовах воєнного стану з-за можливих проблем з енергопостачанням оперативність їх використання викликає певні сумніви. Також застосування спеціалізованих програмних продуктів потребує певної кваліфікації фахівців, що може бути проблематичним в умовах проведення оперативних аварійно-відновлювальних робіт.

Тому постає питання ефективного використання *графоаналітичних методів*, таких як метод побудови діаграми Максвелла-Кремони. Окрім невисокої складності застосування метод дозволяє отримувати наочний розподіл зусиль в елементах ферми та швидко відображувати внесені конструктивні зміни. Також перевагою методу є можливість його використання в «польових умовах», навіть без додаткових обчислювальних засобів.

Мета

Зважаючи на вищевикладене, основною метою дослідження є аналіз можливостей сучасного застосування графоаналітичного методу побудови діаграми Максвелла-Кремони для сталевих ферм покриття.

Методика

Для досягнення мети були розглянуті три проєкти магазину продовольчих і непродовольчих товарів в містах Збараж (проєкт № 1) і Новоград-Волинський (проєкт № 2) і Кривий Ріг (проєкт № 3). Всі наведені надалі в публікації креслення запозичені за наступними Матеріалами проєктів:

- проєкт № 1 (Нове будівництво магазину

© Д. О. Банніков, Д. С. Кіхтенко, О. Р. Осадча, М. О. Гололобов, 2024 Creative Commons Attribution 4.0 International

продовольчих та непродовольчих товарів за адресою: Тернопільська область, Тернопільській район, м. Збараж, вулиця Грушевського, 161, 163);

- проєкт № 2 (Будівництво магазину продовольчих та непродовольчих товарів на вулиці Житомирській, 112 в місті Новограді-Волинському Житомирської області);
- проєкт № 3 (Нове будівництво магазину продовольчих та непродовольчих товарів за адресою: м. Кривий Ріг, Миколаївське шосе – вул. Івана Добровольського, 1а).

Всі три проєкти в частині сталевих конструкцій виконані відповідно до чинних в Україні стандартів (ДБН В.2.6-23:2009, 2019; ДБН В.2.6-198:2014, 2022; ДБН В.1.2-14:2018, 2022), а також відповідно до стандартів в частині виготовлення і монтажу (ДБН В.2.6-163:2010, 2011).

У всіх трьох випадках покриття торгівельних залів магазинів виконані з використанням несучих конструкцій у вигляді сталевих ферм. Однак, зовнішня геометрична форма, типи використаної решітки і типи поперечних перерізів елементів ферм для трьох випадків різняться.

В проєкті № 1 застосовано ферму із паралельними поясами, прийнято трикутну решітку з додатковими стійками і поперечний переріз у вигляді квадратних гнутозварних профілів. Проліт ферми становить 20,515 м. Висота ферми в прольоті становить 1800 мм. Крок розташування ферм становить 6 м. Ухил покрівля в 3,5 % забезпечується конструктивно за рахунок розташування ферми під кутом до горизонту. Опирання на колони каркасу передбачено шарнірним. Поперечний переріз будівлі із розглядуваною в ході подальших досліджень фермою наведено на рис. 1, а.

В проєкті № 2 застосовано трапецієвидну ферму із ухилом верхнього поясу 10 %, прийнято трикутну решітку з додатковими стійками і поперечний переріз у вигляді подвійних або поодиноких швелерів. Проліт ферми становить 25,200 м. Висота ферми в прольоті становить 2260 мм, а висота на опорі – 1000 мм. Крок розташування ферм становить 6 м. Опирання на колони каркасу передбачено шарнірним. Поперечний переріз будівлі із розглядуваною в ході подальших досліджень фермою наведено на рис. 1, б.

В проєкті № 3 застосовано трапецієвидну ферму із ухилом верхнього поясу 10 %, прийнято трикутну решітку і поперечний переріз у вигляді квадратних гнутозварних профілів. Проліт ферми становить 25,500 м. Висота ферми в прольоті становить 2200 мм, а висота на опорі – 925 мм. Крок розташування ферм становить 6 м. Обпирання на колони каркасу передбачено шарнірним. Поперечний переріз будівлі із розглядуваною в ході подальших досліджень фермою наведено на рис. 1, в.

Окремо відмітимо, що в усіх трьох проєктах використані класичні гарячекатані профілі для елементів сталевих ферм, які все ж таки вважаються більш надійними та довговічними порівняно із тонкостінними оцинкованими профілями (Безсалий, & Банніков, 2019).

Результати

Для побудови діаграми Максвелла-Кремони накреслимо маркувальні схеми для трьох розглядуваних ферм із позначенням полів (рис. 2).

Прикладене вузлове навантаження відповідає одиничному навантаженню з урахуванням кроку ферм в кожному випадку. Для можливості визначення найгіршого випадку при дії снігового навантаження задане вузлове навантаження прикладено на половині ферми. Побудовані діаграми Максвелла-Кремони для трьох розглядуваних випадків наведено на рис. 3-5. При цьому використовувався комплекс AutoCAD.

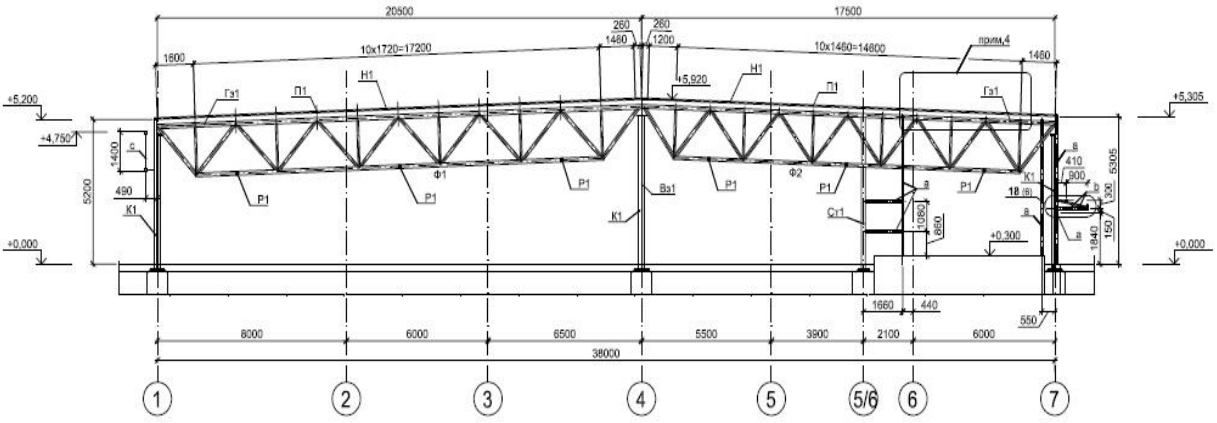
В якості навантажень на сталеві ферми покриття для всіх трьох проєктів приймалось постійне навантаження від власної ваги ферми, визначене відповідно до складу покрівлі, і короткочасне снігове навантаження, визначено відповідно снігового району розміщення будівлі магазинів за стандартом (ДБН В.1.2-2:2006). В узагальненому вигляді ці дані наведені в табл. 1.

Для оцінки вірогідності і достовірності отриманих результатів за графоаналітичним методом виконувалось їх співставлення за методом скінчених елементів на базі вітчизняного проєктно-обчислювального комплексу SCAD. Розроблені розрахункові моделі представлені на рис. 6-8.

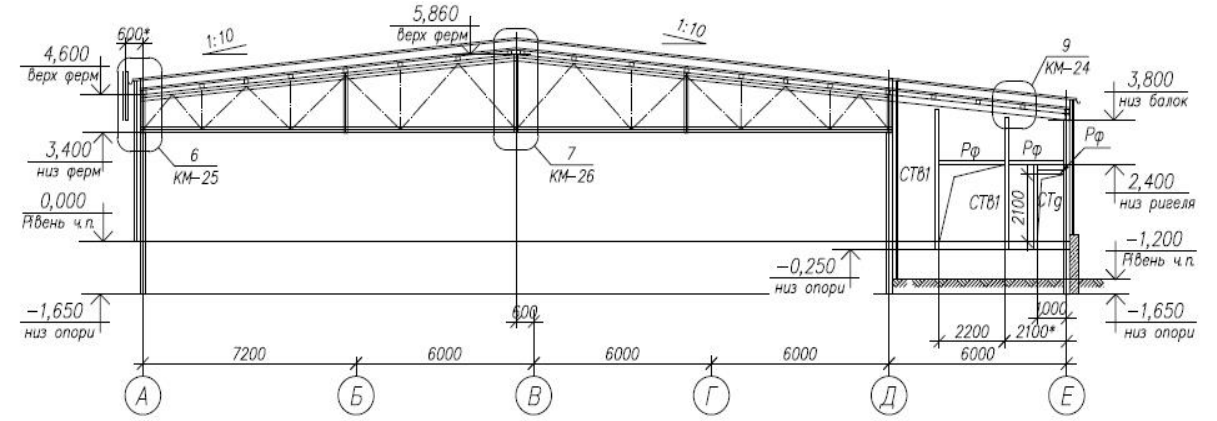
В табл. 2-4 подано співставлення отриманих результатів із кількісною оцінкою їх розбіжності, а також наведено значення зусиль за Матеріалами проєктів для довідкових цілей.

Creative Commons Attribution 4.0 International © Д. О. Банніков, Д. С. Кіхтенко, О. Р. Осадча, М. О. Гололобов, 2024

а)



б)



в)

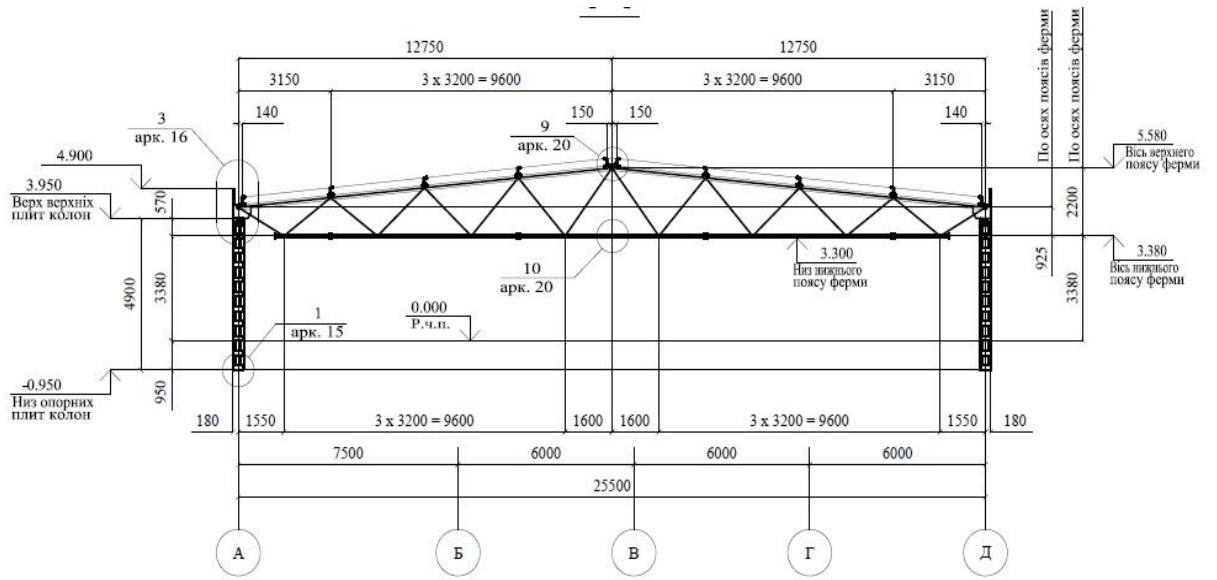
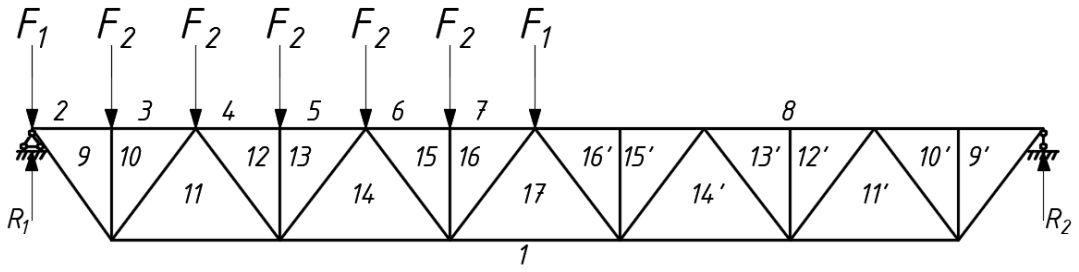


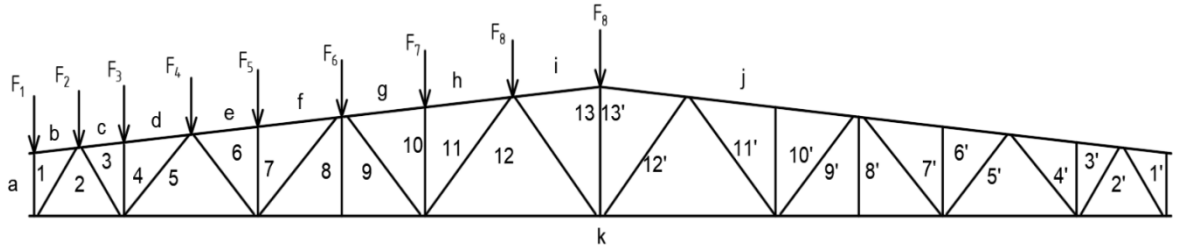
Рис. 1. Поперечний переріз будівлі магазину продовольчих та непродовольчих товарів із розташуванням сталевої ферми покриття:
а) за проєктом № 1; б) за проєктом № 2; в) за проєктом № 3

© Д. О. Банніков, Д. С. Кіхтенко, О. Р. Осадча, М. О. Гололобов, 2024 Creative Commons Attribution 4.0 International

а)



б)



в)

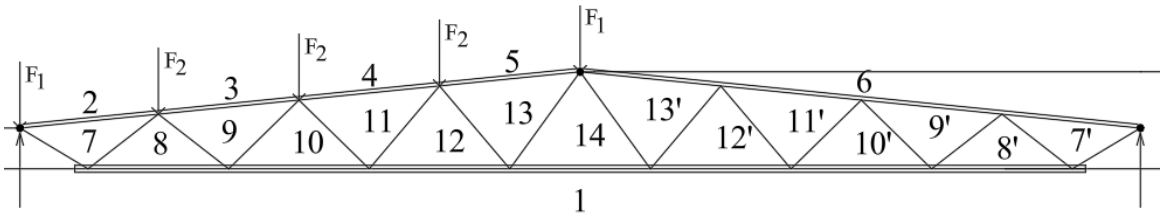


Рис. 2. Маркувальна схема сталевої ферми покриття:
а) за проєктом № 1; б) за проєктом № 2; в) за проєктом № 3

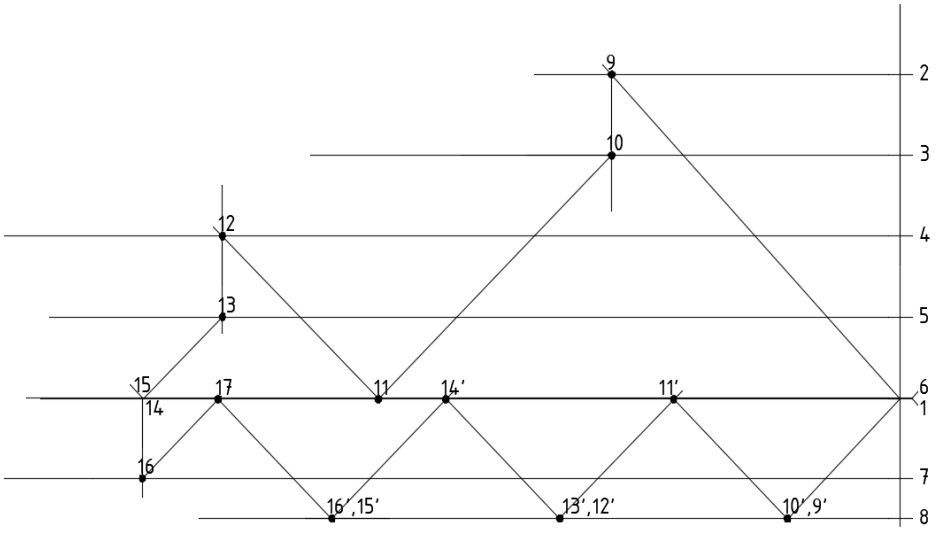


Рис. 3. Діаграма Максвелла-Кремони для сталевої ферми покриття за проєктом № 1

Creative Commons Attribution 4.0 International © Д. О. Банніков, Д. С. Кіхтенко, О. Р. Осадча, М. О. Гололобов, 2024

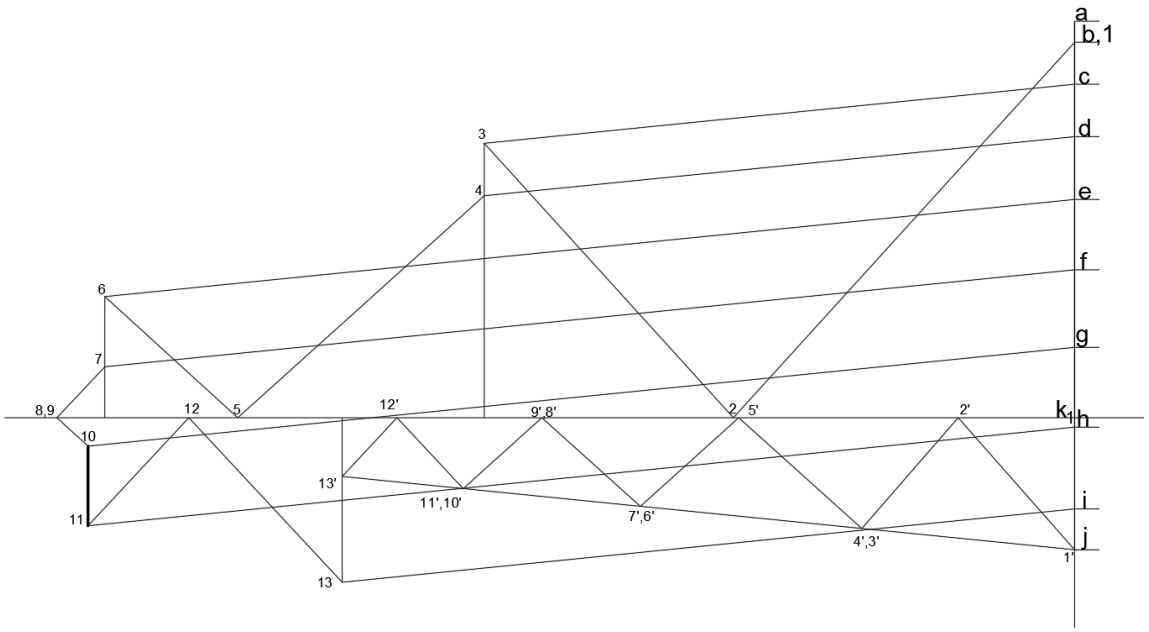


Рис. 4. Діаграма Максвелла-Кремони для сталевої ферми покриття за проєктом № 2

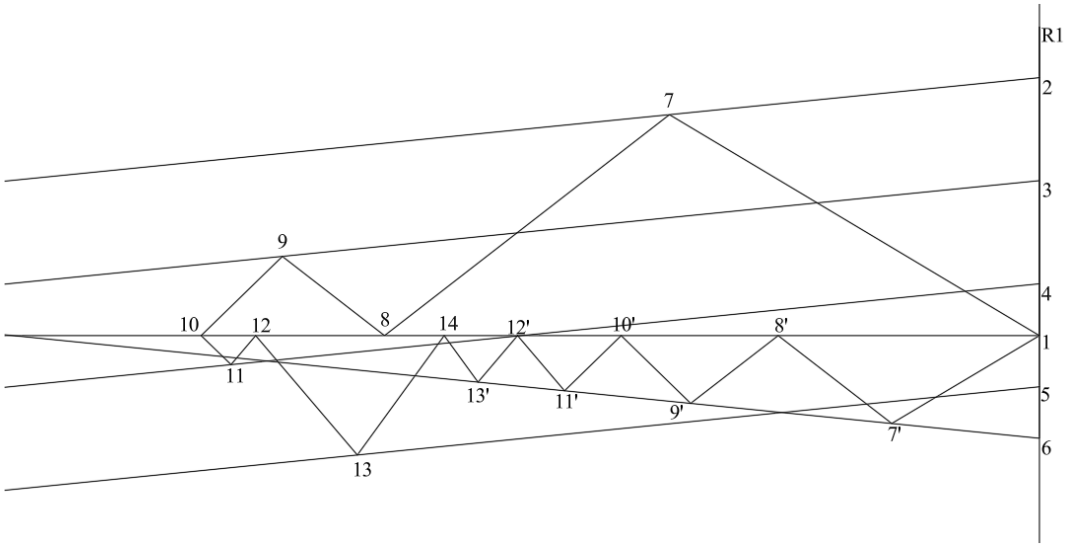


Рис. 5. Діаграма Максвелла-Кремони для сталевої ферми покриття за проєктом № 3

Таблиця 1

Розрахункові зовнішні навантаження на сталеві ферми (кПа)

Вид навантаження	Навантаження в елементах сталевої ферми за проєктом		
	№ 1	№ 2	№ 3
Власна вага покриття, ферми, в’язів	1,87	2,24	2,26
Снігове навантаження	1,40	1,40	1,50

© Д. О. Банніков, Д. С. Кіхтенко, О. Р. Осадча, М. О. Гололобов, 2024 Creative Commons Attribution 4.0 International

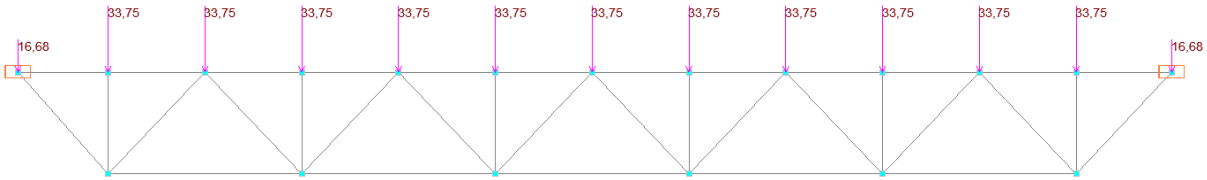


Рис. 6. Розрахункова модель для сталевої ферми покриття за проєктом № 1

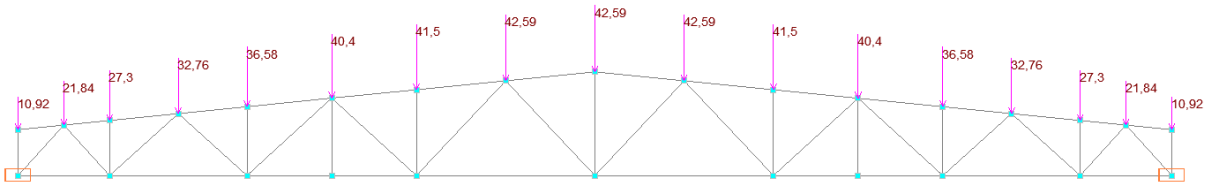


Рис. 7. Розрахункова модель для сталевої ферми покриття за проєктом № 2

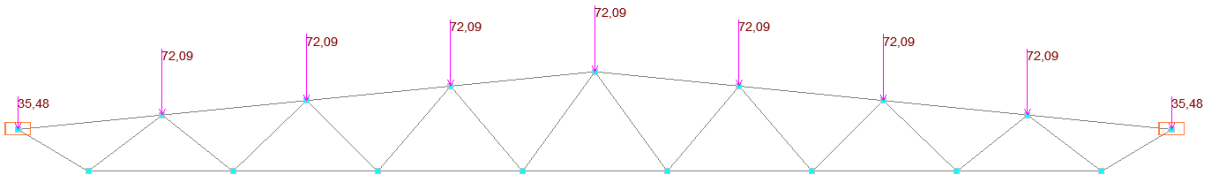


Рис. 8. Розрахункова модель для сталевої ферми покриття за проєктом № 3

Таблиця 2

Розрахункові зусилля на сталеву ферму за проєктом № 1

Елемент ферми		Розрахункове зусилля, кН			
		за діаграмою Максвелла-Кремони	за SCAD	Розбіжність, %	за Матеріалами проєкту
Верхній пояс	2-9	–167,63	–165,59	1,23	–153,04
	3-10	–167,63	–165,87	1,06	–154,02
	4-12	–425,29	–425,05	0,06	–386,51
	5-13	–425,29	–425,28	0,00	–386,51
	6-15	–553,91	–555,77	-0,33	–498,35
	7-16	–553,91	–555,85	-0,35	–499,33
Нижній	1-11	+312,64	+311,57	0,34	+318,83
	1-14	+505,73	+506,66	-0,18	+505,22
	1-17	+569,83	+572,84	-0,53	+568,00
Розкоси	1-9	+250,02	+249,22	0,32	+272,72
	10-11	–209,77	–210,91	-0,54	–222,69
	11-12	+163,08	+164,22	-0,69	+169,71
	13-14	–116,41	–117,79	-1,17	–121,64
	14-15	+69,75	+71,07	-1,86	+76,52
	16-17	–42,65	–42,07 (–24,61)	1,38	–27,47
Стійки	9-10	–33,75	–33,61	0,42	–36,30
	12-13	–33,75	–33,64	0,33	–35,32
	15-16	–33,75	–33,63	0,36	–34,34

Creative Commons Attribution 4.0 International © Д. О. Банніков, Д. С. Кіхтенко, О. Р. Осадча, М. О. Гололобов, 2024

Таблиця 3

Розрахункові зусилля на сталеву ферму за проєктом № 2

Елемент ферми		Розрахункове зусилля, кН			
		за діаграмою Максвелла-Кремони	за SCAD	Розбіжність, %	за Матеріалами проєкту
Верхній пояс	b-1	0	–1,37	–	–
	c-3	–420,49	–423,30	-0,66	–
	d-4	–420,49	–424,39	-0,92	–
	e-6	–735,10	–738,12	-0,41	–
	f-7	–735,10	–738,61	-0,48	–
	g-10	–836,65	–841,80	-0,61	–
	h-11	–836,65	–841,93	-0,63	–761,16
	i-13	–763,31	–770,91	-0,99	–
Нижній пояс	k-2	+238,38	+240,19	-0,75	–
	k-5	+610,94	+613,61	-0,44	–
	k-8	+807,72	+812,27	-0,56	–
	k-9	+807,72	+812,42	-0,58	–
	k-12	+814,38	+819,01	-0,57	+744,58
Розкоси	1-2	–355,88	–354,92	0,27	–317,84
	2-3	+269,87	+266,68	1,20	+248,19
	4-5	–258,99	–257,46	0,59	–231,52
	5-6	+162,64	+162,42	0,14	+150,09
	7-8	–105,41	–104,88	0,51	–100,06
	9-10	+41,69	+40,70 (+34,32)	2,46	+37,28
	11-12	+45,92	+46,64 (+27,24)	-1,54	+30,41
	12-13	–91,37	–91,73 (–75,55)	-0,39	–74,56
Стійки	a-1	–10,92	–12,02	-9,15	+13,73
	3-4	–27,30	–26,88	1,56	–30,41
	6-7	–36,58	–37,94	-3,58	–33,35
	8-9	0	–0,15	–	–
	10-11	–41,50	–42,98	-3,44	–38,26
	13-13’	–110,00	–109,97	0,03	+92,21

Таблиця 4

Розрахункові зусилля на сталеву ферму за проєктом № 3

Елемент ферми		Розрахункове зусилля, кН			
		за діаграмою Максвелла-Кремони	за SCAD	розбіжність, %	за Матеріалами проєкту
Верхній пояс	2-7	–364,31	–363,63	0,19	–
	3-9	–777,81	–778,93	-0,14	–
	4-11	–902,70	–904,68	-0,22	–606,26
	5-13	–874,76	–876,94	-0,25	–
Нижній пояс	1-8	+641,31	+645,94	-0,72	–
	1-10	+879,42	+881,88	-0,28	–
	1-12	+913,81	+915,74	-0,21	+552,30
	1-14	+823,31	+835,43	-1,45	–
Розкоси	1-7	+421,96	+421,39	0,14	+257,61
	7-8	–352,74	–356,86	-1,15	–199,63
	8-9	+167,84	+164,94	1,76	+104,28
	9-10	–147,27	–148,19	-0,62	–103,20
	10-11	+37,83	+37,47 (+25,77)	0,96	+25,50
	11-12	–34,71	–34,76 (–23,90)	-0,14	–24,52
	12-13	–84,03	–84,00 (–66,89)	0,04	–98,10
	13-14	+79,12	+79,39 (+63,23)	-0,34	+79,36

© Д. О. Банніков, Д. С. Кіхтенко, О. Р. Осадча, М. О. Гололобов, 2024 Creative Commons Attribution 4.0 International

Наукова новизна та практична значимість

Таким чином, в даній публікації надано оцінку можливості швидкої оцінки розподілу зусиль в сталевих фермах покриття на основі графоаналітичного методу побудови діаграми Максвелла-Кремони. Зокрема проаналізовано сталеві ферми для 3-х проєктів магазину продовольчих і непродовольчих товарів в містах Збараж, Новоград-Волинський і Кривий Ріг. З метою оцінки точності графоаналітичного підходу виконано моделювання ферм чисельним методом на основі проєктно-обчислювального комплексу SCAD.

Наукова новизна роботи полягає у визначенні рівня точності графоаналітичного методу із використанням комплексу AutoCAD. Практична значимість включає оцінку практичної вірогідності графоаналітичного методу.

В якості перспектив подальших досліджень слід відмітити необхідність оцінки впливу несиметричного навантаження на прийняті конструктивні перерізи елементів сталевих ферм покриття.

Висновки

1. На тепер можливою альтернативою чисельним методам для швидкої оцінки розподілу зусиль в елементах сталевих ферм слугує графоаналітичний метод на основі побудови діаграми Максвелла-Кремони. Метод може використовуватись в «польових» умовах або за відсутності належного енергопостачання. коли виникає необхідність в наданні швидкої оцінки несучій здатності пошкодженої або зруйнованої будівельної конструкції.

2. Практична точність графоаналітичного методу побудови діаграми Максвелла-Кремони порівняно і чисельним методом скінчених елементів в середньому не перевищує 3 %.

3. Подальшим напрямком оцінки розподілу зусиль в сталевих фермах покриття має бути оцінка несиметричне навантаження та його вплив на конструктивні перерізи елементів сталевих ферм.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Ahmed, S., Abdelhamid, H., Ismail, B., & Ahmed, F. (2021). Differential Quadrature Finite Element and the Differential Quadrature Hierarchical Finite Element Methods for the Dynamics Analysis of on Board Shaft. *European Journal Of Computational Mechanics*, 4-6, 29, 303-344. DOI: 10.13052/ejcm1779-7179.29461

Bannikov, D., Radkevich, A., & Nikiforova, N. (2019). Features of the Design of Steel Frame Structures in India for Seismic Areas. *Materials Science Forum*, 968, 348-354. DOI:10.4028/www.scientific.net/msf.968.348

Bofang, Z. (2018). *The finite element method: fundamentals and applications in civil, hydraulic, mechanical and aeronautical engineering*. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. DOI: 10.1002/9781119107323

Chaomei, Ch., Chengjie, Xi., Haichuan, T., & Guo, M. (2015). A Topology Optimization Method based on Nastran Card Quickly Modifying Parameter. *Journal of Mechanical Transmission*, 39, 7, 182-186.

Chen, L. P., & Yang, Y. A. (2020). New Mixed Finite Element Method for Biot Consolidation Equations. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*. 6, 12, 1520-1541. DOI: 10.4208/aamm.OA-2019-0174

Chimakurthi, S., Reuss, K. S., Tooley, M., & Scampoli St. (2018). ANSYS Workbench system coupling: a state-of-the-art computational framework for analyzing multiphysics problems. *Engineering with Computers*, 34, 2, 385-411. DOI: 10.1007/s00366-017-0548-4

Fialko, S., & Karpilovskyi, V. (2018). Time history analysis formulation in SCAD FEA software. *Journal of Measurements in Engineering*, 6, 4, 173-180. DOI: 10.21595/jme.2018.20408

Kruhlikova, N. G., & Bannikov, D. O. (2019). Rational design of shot-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Наука та прогрес транспорту*, 2 (80), 144-152. DOI: 10.15802/stp2019/165853

Kumar, A., Shitole, P., Ghosh, R., Kumar, R., & Gupta A. (2019). Experimental and numerical comparisons between finite element method, element-free Galerkin method, and extended finite element method predicted stress intensity factor and energy release rate of cortical bone considering anisotropic bone modelling. *Proceedings of the institution of mechanical engineers part h-journal of engineering in medicine*. 8, 233, 823-838. DOI: 10.1177/0954411919853918

Liang, W., Ruilin, L., & Changhao, W. (2015). Modal analysis and improvement of vibration noise of paper folding board based on COSMOSWorks. *Packaging Engineering*, 36, 1, 125-128.

Rozumenko, D. V., & Bannikov, D. O. (2020). Dynamic Properties of One-Storey Industrial Building. *Наука та прогрес транспорту*, 1 (85), 138-148. DOI: 10.15802/stp2020/199378

Creative Commons Attribution 4.0 International © Д. О. Банніков, Д. С. Кіхтенко, О. Р. Осадча, М. О. Гололобов, 2024

Salahuddin, M. B. M., Atikah, A. F., Rosnah, S., & Zuhair, M. N. M. (2019). Conceptual design and finite element analysis of a high inclusion dough shaping machine using 3D-computer aided design (CAD) (SolidWorks). *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 50, 3 (SI), 267-273. DOI: 10.1002/mawe.201800205

Sapietova, A., Novak, P., Saga, M., Sulka, P., & Sapieta M. (2019). Dynamic and stress analysis of a locking mechanism in the ANSYS Workbench software environment. *Advances in Science and Technology-Research Journal*, 13, 1, 23-28. DOI: 10.12913/22998624/101601

Wang, Yi., Liu, ZQ., & Luo, B. (2023). Structural performance of the improved CFRP-Steel tube composite truss: A finite element analysis. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48 (4), 5637-5654. DOI: 10.1007/s13369-022-07524-8

Zhou, CL., Yang, R., & Tang, XY. (2014). Finite element analysis of prestressed concrete-filled square steel tube truss. *Civil, Structural and Environmental Engineering*, 838-841, 510-513. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.838-841.510

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Fox D. D. (2014). *The finite element method for solid and structural mechanic*. 7-th edition. Elseveir LTD.

Банніков, Д. О., Нікіфорова, Н. А., & Косячевська, С. М. (2022). Сучасний стан класифікації транспортних будівельних конструкцій в Україні. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 21, 35-43. DOI: 10.15802/bttrp2022/258221

Банніков, Д. О. (2018). Використання будівельно-орієнтованого ПК SCAD для аналізу роботи машинобудівних конструкцій. *Наука та прогрес транспорту*, 1 (73), 98-111. DOI: 10.15802/stp2018/123406

Банніков, Д. О., Нікіфорова, Н. А., & Леонтієва, І. В. (2023). Співставлення ефективності сталевого та комбінованого каркасів. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*, 1, 51, 182-193. DOI: 10.32347/2707-501x.2023.51(1)

Барабаш, М. С., Кір'язєв, П. М., Лапенко, О. І., & Ромашкіна, М. А. (2018). *Основи комп'ютерного моделювання: навч. посбіник*. 2-ге. вид. Київ: НАУ.

Барабаш, М. С., Козлов, С. В., & Медведенко, Д. В. (2012). *Комп'ютерні технології проєктування металевих конструкцій: навч. посбіник*. Київ: НАУ.

Безсалий, В. М., & Банніков, Д. О. (2019). Ефективність сталевих тонкостінних оцинкованих профілів для аркових елементів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 16, 20-29. DOI: 10.15802/bttrp2019/189428

Гололобов, М. О. (2024). Вибір решітки сталевої ферми для об'єктів транспортної інфраструктури. *Тези XXI Міжнародної студентської науково-практичної конференції «Студентська наука – залізничній інфраструктурі»*. Дніпро: УДУНТ, 6-7.

ДБН В.1.2-2:2006 (2020). *Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об`єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Зі змінами № 1 та № 2.* Київ: Мінрегіонбуд України.

ДБН В.1.2-14:2018 (2022). *Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Зі зміною № 1.* Київ: Мінрегіонбуд України.

ДБН В.2.2-23:2010 (2019). *Будинки і споруди. Підприємства торгівлі. Зі зміною № 1.* Київ: Мінрегіонрозвитку і будівництва України.

ДБН В.2.6-163:2010 (2011). *Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу*. Київ: Мінрегіонбуд України.

ДБН В.2.6-198:2014 (2022). *Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі зміною № 1*. Київ: Мінрегіонбуд України.

ДК 018-2000 (2000). *Державний класифікатор будівель та споруд*. Київ: Держстандарт України.

Жовтяк, Г. А. (2011). Теоретико-методичні підходи до визначення поняття «транспортна інфраструктура регіону». *Ефективна економіка*, 11. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=792 (дата звернення 15.05.2024).

Карпіловський, В. С. (2022). *Метод скінченних елементів і задачі теорії пружності*. Київ: «Софія».

Кіхтенко, Д. С. (2024). Розрахунок сталевої ферми як конструктивного елементу об'єктів транспортної інфраструктури. *Тези XXI Міжнародної студентської науково-практичної конференції «Студентська наука – залізничній інфраструктурі»*. Дніпро: УДУНТ, 5-6.

Клименко, Ф. Є., Барабаш, В. М., & Стороженко, Л. І. (2002). *Металеві конструкції: підручник*. Львів: Світ.

Матеріали проєкту «Нове будівництво магазину продовольчих та непродовольчих товарів за адресою: Тернопільська область, Тернопільській район, м. Збараж, вулиця Грушевського, 161, 163». Електронний альбом.

Матеріали проєкту «Будівництво магазину продовольчих та непродовольчих товарів на вулиці Житомирській, 112 в місті Новограді-Волинському Житомирської області». Електронний альбом.

Матеріали проєкту «Нове будівництво магазину продовольчих та непродовольчих товарів за адресою: м. Кривий Ріг, Миколаївське шосе – вул.

© Д. О. Банніков, Д. С. Кіхтенко, О. Р. Осадча, М. О. Гололобов, 2024 Creative Commons Attribution 4.0 International

Івана Добровольського, 1а». Електронний альбом.

Металеві конструкції. Загальний курс: підручник. (2010). / О. О. Нілов та ін. 2-ге вид. / Під заг. ред. О. О. Нілова і О. В. Шимановського. Київ: Сталь.

Науково-технічні дослідження у галузі будівництва: колективна монографія. (2022). Т.1. / Заг. ред. Д. О. Банніков. Академія технічних наук України. Івано-Франківськ: Видавець Кушнір Г. М. DOI: 10.6084/m9.figshare.24137208

НК 018:2023 (2023). *Національний класифікатор України. Класифікатор будівель і споруд.* Київ: Мінрегіон України.

Осадча, О. Р. (2024). Мережа магазинів «АТБ» як елемент розвитку транспортної інфраструктури. *Тези XXI Міжнародної студентської науково-практичної конференції «Студентська наука – залізничній інфраструктурі».* Дніпро: УДУНТ, 4.

D. O. BANNIKOV[1*], D. S. KIKHTENKO[2], O. R. OSADCHA[3], M. O. GOLOLOBOV

[1*] Department «Construction Production and Geodesy»,
Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010,
tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail d.o.bannikov@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-9019-9679
[2] Faculty «Construction, Architecture and Infrastructure»,
Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010,
tel. +38 (068) 359 02 44, e-mail 20.scarecrow.19@gmail.com, ORCID 0009-0009-4196-2314
[3] Faculty «Construction, Architecture and Infrastructure»,
Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010,
tel. +38 (099) 011 62 48, e-mail osadchay.olga02@gmail.com, ORCID 0009-0004-5715-047X
[4] Faculty «Construction, Architecture and Infrastructure»,
Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010,
tel. +38 (097) 075 93 49, e-mail gololobovnikita15@gmail.com, ORCID 0009-0008-3939-594X

MODERN APPLICATION OF THE GRAPH-ANALYTICAL METHOD OF CALCULATION OF STEEL TRUSS

Purpose. The main purpose of the publication is to quantify the accuracy and probability of applying the graph-analytical method of determining the distribution of forces in the elements of a steel rafter truss based on the use of the modern AutoCAD complex. **Methodology.** To achieve the formulated purpose, three projects of food and non-food stores located in the cities of Zbarazh, Novohrad-Volynskyi and Kryvyi Rih were considered. The covering of stores in all three cases is made on the basis of flat steel trusses, which were accepted as the object of research. The implementation of the graph-analytical method of constructing the Maxwell-Cremona diagram was carried out on the basis of the AutoCAD complex. The loads were taken in accordance with the actual operating conditions according to the current DBN standard B.1.2-2:2006. The assessment of the accuracy of the Maxwell-Cremona diagram construction was carried out on the basis of a comparison with the numerical method of construction mechanics – the method of finite elements based on the SCAD design and calculation complex of domestic development. **Findings.** A quantitative comparison of the values and character of the distribution of internal forces in the elements of steel trusses of the coating showed that, on average, the divergence between the graph-analytical method and the finite element method does not exceed 3%. Also, the use of the graph-analytical method allows obtaining the full distribution of forces in truss structures, without requiring the skills of using specialized packages of numerical analysis application programs, such as SCAD or Lira. **Originality.** In the course of the conducted analysis, the degree of theoretical coincidence of the results of graph-analytical and numerical approaches to the assessment of the distribution of internal forces in the elements of the steel trusses of the coating was determined. **Practical value.** The obtained results of the assessment of the probability of using the graph-analytical method open the prospects of its widespread use as an alternative to analytical or numerical methods of construction mechanics for modern complicated «field» conditions, when there is a need to provide a quick assessment of the bearing estimation of a damaged or destroyed building structure.

Keywords: steel truss; covering truss; graph-analytical method; Maxwell-Cremona diagram; finite element method; SCAD complex

REFERENCES

Ahmed, S., Abdelhamid, H., Ismail, B., & Ahmed, F. (2021). Differential Quadrature Finite Element and the Differential Quadrature Hierarchical Finite Element Methods for the Dynamics Analysis of on Board Shaft. *European*

Creative Commons Attribution 4.0 International © Д. О. Банніков, Д. С. Кіхтенко, О. Р. Осадча, М. О. Гололобов, 2024

Journal Of Computational Mechanics, 4-6, 29, 303-344. DOI: 10.13052/ejcm1779-7179.29461 (in English)
Bannikov, D., Radkevich, A., & Nikiforova, N. (2019). Features of the Design of Steel Frame Structures in India for Seismic Areas. *Materials Science Forum*, 968, 348-354. DOI:10.4028/www.scientific.net/msf.968.348 (in English)
Bofang, Z. (2018). *The finite element method: fundamentals and applications in civil, hydraulic, mechanical and aeronautical engineering*. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. DOI: 10.1002/9781119107323 (in English)
Chaomei, Ch., Chengjie, Xi., Haichuan, T., & Guo, M. (2015). A Topology Optimization Method based on Nastran Card Quickly Modifying Parameter. *Journal of Mechanical Transmission*, 39, 7, 182-186. (in English)
Chen, L. P., & Yang, Y. A. (2020). New Mixed Finite Element Method for Biot Consolidation Equations. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*. 6, 12, 1520-1541. DOI: 10.4208/aamm.OA-2019-0174 (in English)
Chimakurthi, S., Reuss, K. S., Tooley, M., & Scampoli St. (2018). ANSYS Workbench system coupling: a state-of-the-art computational framework for analyzing multiphysics problems. *Engineering with Computers*, 34, 2, 385-411. DOI: 10.1007/s00366-017-0548-4 (in English)
Fialko, S., & Karpilovskyi, V. (2018). Time history analysis formulation in SCAD FEA software. *Journal of Measurements in Engineering*, 6, 4, 173-180. DOI: 10.21595/jme.2018.20408 (in English)
Kruhlikova, N. G., & Bannikov, D. O. (2019). Rational design of shot-span industrial building roof for reconstruction conditions. *Nauka ta proghres transportu*, 2 (80), 144-152. DOI: 10.15802/stp2019/165853 (in English)
Kumar, A., Shitole, P., Ghosh, R., Kumar, R., & Gupta A. (2019). Experimental and numerical comparisons between finite element method, element-free Galerkin method, and extended finite element method predicted stress intensity factor and energy release rate of cortical bone considering anisotropic bone modelling. *Proceedings of the institution of mechanical engineers part h-journal of engineering in medicine*. 8, 233, 823-838. DOI: 10.1177/0954411919853918 (in English)
Liang, W., Ruilin, L., & Changhao, W. (2015). Modal analysis and improvement of vibration noise of paper folding board based on COSMOSWorks. *Packaging Engineering*, 36, 1, 125-128. (in English)
Rozumenko, D. V., & Bannikov, D. O. (2020). Dynamic Properties of One-Storey Industrial Building. *Наука та прогрес транспорту*, 1 (85), 138-148. DOI: 10.15802/stp2020/199378 (in English)
Salahuddin, M. B. M., Atikah, A. F., Rosnah, S., & Zuhair, M. N. M. (2019). Conceptual design and finite element analysis of a high inclusion dough shaping machine using 3D-computer aided design (CAD) (SolidWorks). *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 50, 3 (SI), 267-273. DOI: 10.1002/mawe.201800205 (in English)
Sapietova, A., Novak, P., Saga, M., Sulka, P., & Sapieta M. (2019). Dynamic and stress analysis of a locking mechanism in the ANSYS Workbench software environment. *Advances in Science and Technology-Research Journal*, 13, 1, 23-28. DOI: 10.12913/22998624/101601 (in English)
Wang, Yi., Liu, ZQ., & Luo, B. (2023). Structural performance of the improved CFRP-Steel tube composite truss: A finite element analysis. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48 (4), 5637-5654. DOI: 10.1007/s13369-022-07524-8 (in English)
Zhou, CL., Yang, R., & Tang, XY. (2014). Finite element analysis of prestressed concrete-filled square steel tube truss. *Civil, Structural and Environmental Engineering*, 838-841, 510-513. (in English)
Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Fox D. D. (2014). *The finite element method for solid and structural mechanic*. 7-th edition. Elseveir LTD. (in English)
Bannikov, D. O., Nikoforova, N. A., & Kosiachevska, S. M. (2022). Suchasnij stan klassifikatsii transportnih budivelnih konstruktsij v Ukraini. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka*, 21, 35-43. DOI: 10.15802/bttrp2022/258221 (in Ukrainian)
Bannikov, D. O. (2018). Vikoristannja budivelno-orientovanogo PK SCAD dlja analizu roboti mashinobudivnih konstruktsij. *Nauka ta progress transport*, 1 (73), 98-111. DOI: 10.15802/stp2018/123406 (in Ukrainian)
Bannikov, D. O., Nikoforova N. A., & Leontiieva, I. V. (2023). Spivstavlennja efektivnosti stalevoho ta kombinovanoho karkasiv. *Shljahi pidvishennja efektivnosti budivnitstva v umovah formuvannja rinkovih vidnosin*, 1, 51, 182-193. DOI: 10.32347/2707-501x.2023.51(1) (in Ukrainian)
Barabash, M. S., Kirjazev, P. M., Lapenko, O. I., & Romashkina, M. A. (2018). *Osnovi kompjuternogo modeljuvannja: navch. posibnik*. Kyiv: NAU. (in Ukrainian)
Barabash, M. C., Kozlov, S. V., & Medvedko, D. V. (2012). *Kompjuterni technologii proektuvannja metalevih konstruktsij: navch. posibnik*. Kyiv: NAU. (in Ukrainian)
Bezsalyi, V. M. & Bannikov, D. O. (2019). Efektivnist stalevih tonkostinnih otsinkovanih profiliv dlja arkovih elementiv. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka*, 16, 20-29. DOI: 10.15802/bttrp2019/189428 (in Ukrainian)
Gololobov, M. O. Vibir reshitki stalevoji fermi dlja objektiv transportnoji infrastructure. *Tezi XXI Mignarodnoj studentskoj naukovo-praktichoj konferensii «Studentska nauka – zaliznichnij infrastructuri».* Dnipro: UDUNT, 6-7. (in

© Д. О. Банніков, Д. С. Кіхтенко, О. Р. Осадча, М. О. Гололобов, 2024 Creative Commons Attribution 4.0 International

Ukrainian)
DBN V.1.2-2:2006 (2020). *Systema zabezpechennja nadijnosti ta bezpeki budivelnih objektiv. Navantagennja I vplivi. Normi proektuvannja. Zi zminami № 1 ta № 2.* Kyiv: Minrehionbud Ukrayiny. (in Ukrainian)
DBN V.1.2-14:2018 (2022). *Systema zabezpechennja nadijnosti ta bezpeki budivelnih objektiv. Zagalni printsipi zabezpechennja nadijnosti ta konstruktivnoj bezpeki budibel i sporud*. *Zi zminoju № 1.* Kyiv: Minregionbud Ukrayiny. (in Ukrainian)
DBN V.2.2-23:2010 (2019). *Budinki I sporudi. Pidpriemstva torgivli. Zi zminoju № 1.* Kyiv: Minregionrozvitku i budivnitstva Ukrayiny. (in Ukrainian)
DBN V.2.6-163:2010 (2011). *Stalevi konstructsii. Normi proektuvannja, vigotovlennja i montagu*. Kyiv: Minregionbud Ukrayiny. (in Ukrainian)
DBN V.2.6-198:2014 (2014). *Stalevi konstructsii. Normi proektuvannja*. *Zi zminoju № 1*. Kyiv: Minregionbud Ukrayiny. (in Ukrainian)
DK 018-2000 (2000). *Dergavnij klassifikator budivel ta sporud*. Kyiv: Dergstandart Ukrainy. (in Ukrainian)
Govtjak, G. A. (2011). Teoretiko-metodichni pidhodi do viznachennja ponjattja «transportna infrastructura regionu». *Efektivna ekonomika*, 11. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=792 (date of application 15.05.2024). (in Ukrainian)
Karpilovskij, V. S. (2022). *Method skinchennih elementiv I zadachi teorii prugnosti*. Kyiv: Sophia. (in Ukrainian)
Kihtenko, D. S. Rozrahunok stalevoji fermi jak konstruktivnogo element objektiv transportnoji infrastrukturi. *Tezi XXI Mignarodnoj studentskoj naukovo-praktichoj konferensii «Studentska nauka – zaliznichnij infrastructuri».* Dnipro: UDUNT, 5-6. (in Ukrainian)
Klimenko, F. E., Barabash, V. M., & Storogenko, L. I. (2002). *Metalevi konstruktsii: pidruchnik*. Lviv: Svit. (in Ukrainian)
Materiali proektu «Nove budivnitstvo magazinu prodovolchih ta neprodovolchih tovariv za adrresoju: Ternopilska oblast, Ternopilskij rajon, m. Zbarazh, vulitsja Grushevskogo, 161, 163». Elektronnij albom. (in Ukrainian)
Materiali proektu «Budivnitstvo magazinu prodovolchih ta neprodovolchih tovariv na vulitsi Zitomirskij, 112 v misti Novohrad-Volynskyi Zitomirskoji oblasti». Elektronnij albom. (in Ukrainian)
Materiali proektu «Nove budivnitstvo magazinu prodovolchih ta neprodovolchih tovariv za adrresoju: m. Kryvyi Rih, Mikolajivske shoes – vul. Ivana Dobrovolskogo, 1a». Elektronnij albom. (in Ukrainian)
Metalevi konstruktsii. Zagalnij kurs: pidruchnik. (2010). O. O. Nilov ta in. 2-ge vid. / Pid. zag. red. O. O. Nilova I O. V. Shimanovskogo. Kyiv: Stal. (in Ukrainian)
Naukovo-tekhnichni doslidgennja v galuzi budivnitstva: kollektivnaja monographija. (2022). T.1. / Zag. red. D. O. Bannikov. Akademija tekhnichnih nauk Ukraini. Ivano-Frankivsk: Vidavets Kushnir G. M. DOI: 10.6084/m9.figshare.24137208 (in Ukrainian)
NK 018:2023 (2023). *Natsionalnij klassifikator Ukraini. Klassifikator budivel i sporud.* Kyiv: Minregion Ukrainy. (in Ukrainian)
Osadcha, O. R. Merega magaziniv «ATB» jak element rozvitku transportnoji infrasrtructuri. *Tezi XXI Mignarodnoj studentskoj naukovo-praktichoj konferensii «Studentska nauka – zaliznichnij infrastructuri».* Dnipro: UDUNT, 4. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 17.06.2024.
Прийнята до друку 15.07.2024.

Creative Commons Attribution 4.0 International © Д. О. Банніков, Д. С. Кіхтенко, О. Р. Осадча, М. О. Гололобов, 2024