

УДК 624.04

В. В. Воробйов, д-р техн. наук, проф.; Л. Д. Воробйова, канд. техн. наук, доц.;
В. Д. Кулинич, канд. техн. наук; Р. М. Пастушенко

ПРО ВПЛИВ РОЗМІЩЕННЯ ДОДАТКОВОГО УСТАТКУВАННЯ НА ЗМІНУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВЕЖІ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

На сучасному етапі розвитку цивілізації одним з найважливіших завдань є забезпечення населення надійним мобільним радіозв'язком, що функціонує в умовах великої кількості перешкод від інших радіозасобів і абонентів, які можуть розміщуватися на суші, на морі, в повітрі, в космосі. Галузь мобільного зв'язку і телекомунікацій є нині однією з галузей науки і техніки, що нестримно розвиваються. Її ефективна робота багато в чому залежить від кількості базових станцій (БС) - фіксованих антен, розташованих на вежах або щоглах, що передають інформацію на комутаційні центри за допомогою радіочастотних сигналів.

В роботі проведений аналіз сучасних тенденцій розвитку телекомунікаційної галузі. Показано, що в сучасних економічних умовах розвиток інформаційного простору і, зокрема, телекомунікаційної галузі є визначальним фактором прискорення економічного зростання. З розвитком мобільного зв'язку в Україні і, як наслідок, збільшенням кількості базових станцій з різними типами опор (вежі, щогли, комбіновані опори), кількість аварій на цих об'єктах неминуче зростає. Важливим для таких конструкцій стає прогнозування і забезпечення міцності та надійності, оскільки вони піддаються як статичним, так і динамічним навантаженням (вітер, власна вага, землетрус тощо).

Розглянуто методи оцінки фактичного стану веж стільникового зв'язку за результатами обстеження та наявні рекомендації щодо підвищення надійності їх експлуатації. Застосування чисельних методів, реалізованих в обчислювальному комплексі скінченних елементів Ansys, дозволило провести моделювання напруженого стану вежі стільникового зв'язку з урахуванням вітрового навантаження та несиметричного розташування пристроїв зв'язку.

В роботі виконаний аналіз точності застосування програмного комплексу ANSYS для задач цього типу. Виконані розрахунки прогину вертикальної циліндричної труби, для якого відома аналітична формула показали, що невелика кількість скінчених елементів (СЕ) дозволяє з високою точністю отримати результат, що майже співпадає з аналітичним (похибка лежить в межах 3 %, а для оптимальних розмірів СЕ складає всього 0,37 %).

Встановлено, що розташування зміщеної відносно осі вежі антени істотно впливає на її напружено-деформований стан. Виконані розрахунки показали, що за рахунок цього еквівалентна напругу може зрости до 13 %, а максимальна деформація – до 14 %.

Ключові слова: ANSYS, вага, вежа, деформація, вітрові навантаження, динамічні навантаження, скінченно-елементна модель, напруга.

Вступ

На сучасному етапі розвитку цивілізації одним з найважливіших завдань є забезпечення населення надійним мобільним радіозв'язком, що функціонує в умовах великої кількості перешкод від інших радіозасобів і абонентів, які можуть розміщуватися на суші, на морі, в повітрі, в космосі. Галузь мобільного зв'язку і телекомунікацій є нині однією з галузей науки і техніки, що нестримно розвиваються. Її ефективна робота багато в чому залежить від кількості базових станцій (БС) – фіксованих антен, розташованих на вежах або щоглах, що передають інформацію на комутаційні центри за допомогою радіочастотних сигналів. У світі на сьогодні експлуатується близько двох мільйонів БС, з яких (до вторгнення росії) більше 20 000 були розташовані в Україні [1]. Необхідно відзначити, що вежі стільникового зв'язку є

дуже складною конструкцією, яка складається з безліч окремих частин і вихід з ладу будь-якої з них може привести до катастрофічного обвалення. Тому нормальна функціональність і довговічність щогл забезпечують не лише якісний зв'язок, але і безпеку населення і фахівців, які здійснюють обслуговування БС [2–4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розрахунок металоконструкції вежі мобільного зв'язку з метою визначення реальної працездатності є одним з важливих і відповідальних питань при модернізації мереж зв'язку. У сучасних умовах розвитку безпроводних технологій передачі інформації на великі відстані, у т. ч. систем стільникового зв'язку, особливе значення має питання установки висотних щогл для розташування на них передавального антенно-фідерного обладнання. У міській забудові для установки такого устаткування часто використовуються висотні будівлі, димарі, вежі радіо- і телемовлення. При цьому зрозумілим фактом є необхідність установки базових станцій на істотній висоті над рівнем землі для покриття більшої території в зоні прямої видимості. Виходячи з цього розробки опорних конструкцій для встановлення в умовах щільної міської забудови повинні задовольняти як вимогам забезпечення їх надійності, так і естетичним вимогам.

З розвитком мобільного зв'язку в Україні і, як наслідок, збільшенням кількості базових станцій з опорами різного типу (вежі, щогли, комбіновані опори), неминуче росте і кількість аварій на цих об'єктах. Можна виділити наступні головні причини аварій [5]:

- виробничий чинник (помилки під час проектування і монтажу);
- вплив явищ природи (вітер, ожеледь, блискавки);
- прояви вандалізму (падіння, демонтаж окремих елементів конструкцій).

На жаль, обвалення опор мобільного зв'язку характерне не лише для України. Особливо від цього страждають райони, які схильні до різних стихійних катаклізмів. Так за останнє десятиліття сталося декілька аварій опор в США, причиною яких були складні погодні умови:

- 3 березня 2020 р. в Сент-Джонс впала верхня половина вежі стільникового зв'язку (рис. 1 [6]);
- 7 лютого 2023 р. в Остіні після крижаного шторму 500-футова вежа з відтяжками звалилася на трифазну розподільну лінію і зруйнувала чотири прольоти дротів і п'ять опор електропередач [7];
- снігова буря на різдвяних вихідних (2023 р.) на заході Нью-Йорка привела до падіння 114-футового монополя [8];
- 23 вересня 2021 р. 150-футовий монополь AmericanTowerCorp впав під дією торнадо у містечку Верхній Дублін [9].



Рис. 1. Загальний вигляд опори, що впала, в Сент-Джонс [6]

Висотні спорудження стільникового зв'язку в процесі роботи піддаються дії змінних навантажень: вітрове навантаження, сейсмічні збурення, а також навантаження, що виникають під час монтажних робіт і при аварійних ситуаціях [10, 11].

Проте вібрація, викликана вітром, часто ушкоджує не лише опори мобільного зв'язку, але і високі стовпові ліхтарі і викликає серйозні несприятливі наслідки. Так, у Китаї 19 серпня 2014 року в місті Наньчан, провінція Цзянси, більше 30 ліхтарних стовпів нахилилися і впали внаслідок сильного вітру; 26 червня 2018 року під дією тривалої вібрації, викликаній вітром, один ліхтарний стовп впав у місті Чэнду (провінція Січуань), а 5 липня 2020 року – в місті Наньнінь (провінція Гуансі) [11].

Щогли і вежі піддаються різним типам навантажень. Навантаження залежать від місця розташування конструкції і кліматичних умов. До них відносяться статичне навантаження (вага самої вежі і устаткування, яке на ній встановлене), навантаження ожеледі, монтажне і ремонтне навантаження, вітрове навантаження. Традиційний розрахунок сил і напруги в елементах металоконструкції трудомісткий і вимагає великих витрат часу і засобів [12]. Сучасний розвиток обчислювальної техніки дозволяє реалізовувати складні розрахунки, які були неможливі на практиці раніше. При цьому програмні продукти постійно удосконалюються, надаючи нові можливості користувачам [12]. Це дозволяє розглядати різні аспекти проєктованих виробів і в короткі терміни отримувати конструкції з оптимальними характеристиками. Застосування математичного моделювання дозволяє працювати не з самим об'єктом, а з його моделлю, що дає можливість відносно швидко і без істотних витрат досліджувати його властивості і поведінку у будь-яких ситуаціях. В той же час обчислювальні експерименти з моделями об'єктів дозволяють, спираючись на сучасні методи і технічні інструменти інформатики, детально і глибоко вивчати об'єкти в достатній повноті, недоступній чисто теоретичним підходам.

Зараз у напрямі проєктування антенно-щоглових споруд проводяться численні наукові дослідження, а проєктними організаціями вже накопичено певний досвід експлуатації веж стільникового зв'язку [12]. Напружений стан циліндричних і конічних сталевих веж під дією

динамічних навантажень методом кінцевих елементів детально вивчено багатьма ученими, серед яких можна виділити роботи [13– 16].

Невід'ємною частиною стільникового зв'язку є базова стільникова станція, яка складається з антени (антен), радіомодуля і блоку живлення. Усі БС зв'язуються між собою за допомогою системи оптоволоконних кабелів (у місті) і радіорелейних антен (якщо відстань між станціями велика). Такі антени мають бути точно налагоджені одна на одну на різних БС, бо відхилення навіть на градус може розірвати зв'язок. Дуже часто це призводить до того, що вісь радіорелейної антени не співпадає з віссю щогли і виникає несиметричне вітрове навантаження (рис. 2). Проте питанням впливу просторового розташування точок прикладення навантаження на зміну напруженого стану конструкції приділяється дуже мало уваги.



Рис. 2. Розташування радіорелейних антен на вежі мобільного зв'язку [12]

Мета роботи – дослідження впливу просторового розташування точок прикладення навантаження на зміну напруженого стану вежі мобільного зв'язку.

Виклад основного матеріалу

Чисельне моделювання все частіше застосовується при проектуванні різних конструкцій для визначення оптимальних параметрів при заданих експлуатаційних режимах. Основним чисельним методом, що отримав широке поширення в інженерних розрахунках, є метод скінченних елементів (МСЕ). МСЕ є потужним, надійним і сучасним засобом дослідження поведінки конструкцій в умовах різноманітних дій. Виходячи з цього в якості інструменту моделювання був вибраний програмний комплекс ANSYS Workbench, який відомий і користується популярністю серед інженерів, що займаються вирішенням питань міцності. Програмний комплекс ANSYS має широкі можливості, які можуть бути використані для вирішення завдань подібного роду. Він забезпечує користувача вичерпним набором твердотільних та оболонкових елементів для проведення пружного аналізу міцності в лінійній постановці. Внаслідок чого ми отримуємо залежність характеристик НДС при дії статично доданого навантаження. В статті для реалізації поставленої задачі використовується

платформа ANSYS Workbench версії 24.R1 STUDENT (для студентів компанія ANSYS Inc. надає безкоштовну ліцензію для навчання).

Для моделювання була обрана тонка конічна сталева вежа (аналог труби БВМ3-25, яка виготовляється в Україні ТОВ «Аколь-груп») з наступними параметрами: висота –23 м, нижній діаметр – 0,782 м, верхній діаметр – 0,336 м, товщина стінки –10 мм. В якості радіорелейної антени прийнято AL24F SRD з діаметром 0,6 м і 1,2 м і загальною масою 44 кг. Перед проведенням розрахунків в першу чергу був виконаний аналіз точності застосування програмного комплексу ANSYS для задач цього типу. З цією метою був проведений розрахунок прогину вертикальної циліндричної труби, для якого відома аналітична формула [17]:

$$f = \frac{FH^3}{3EI_y}$$

де F – горизонтальна сила, яка прикладена до вершини труби, Н; H – висота труби, м; E – модуль Юнга матеріалу труби, Па; I_y – осьовий момент інерції, м⁴.

Для перевірного розрахунку застосовували наступні значення: $F = 3000$ Н, $H = 23$ м, $D = 0,56$ м, товщина стінки – 10 мм, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $I_y = 6,533 \cdot 10^{-4}$ м⁴. В результаті отримали, що прогин нашої труби складає 0,09312 м. При комп'ютерному моделюванні в якості скінченного елемента (СЕ) використовували SHELL 181[18]. Цей елемент містить чотири вузли, що мають по шість ступенів свободи, призначений для моделювання тонкостінних оболонкових деталей. Він є по суті квазіоб'ємним, що дозволяє суттєво знизити об'єм обчислень та отримати задовільний за точністю результат при моделюванні. При розрахунках розмір елемента змінювали від 0,1 до 0,2 м.

Проведений аналіз (табл.1) показав, що для цієї задачі застосування програмного комплексу ANSYS є повністю виправданим: невелика кількість СЕ дозволяє з високою точністю отримати результат (похибка лежить в межах 3%, а для оптимальних розмірів КЕ складає всього 0,37%).

Тепер перейдемо до розрахунку конічної труби, схема якої наведена на рис. 3.

Таблиця 1.

Вплив розміру скінченного елемента на точність розрахунку

Розмір елемента, м	Кількість вузлів, шт.	Кількість елементів, шт.	Величина прогину, м	Абсолютна похибка, %
0,1	4176	4158	0,09056	2,75
0,12	3088	3072	0,09112	2,15
0,15	1860	1848	0,09346	0,37
0,17	1370	1360	0,09583	2,91
0,2	1094	1085	0,09654	3,67

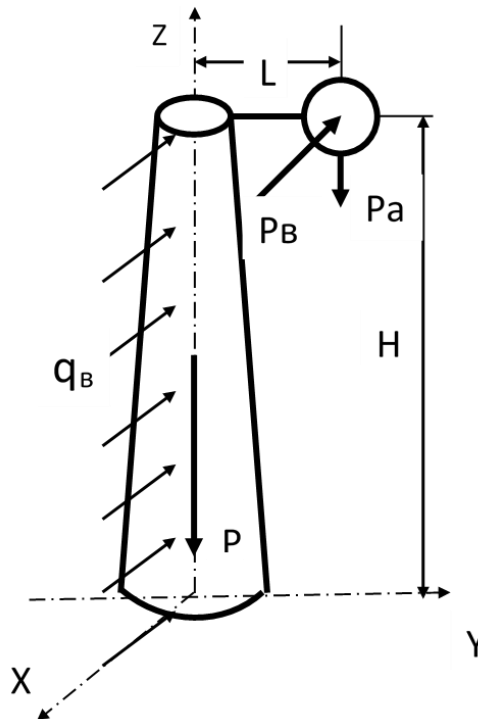


Рис. 3. Розрахункова схема (P – вага труби; Pa – вага антени; Pv – вітрове навантаження на антену; qv – вітрове навантаження на трубу; H - висота труби; L - зміщення антени відносно осі труби)

Вітровий тиск (q_v) в загальному вигляді складається з двох складових [19]:

$$q_v = q_{вс} + q_{вп},$$

де $q_{вс}$, $q_{вп}$ – відповідно середня та пульсаційна складові, Па.

В нашому випадку можна пульсаційну складову вітрового навантаження враховувати коефіцієнтом динамічності (C_d), величина якого дорівнює 1,2 [19, 20]. Тепер вітровий тиск, який діє на трубу, буде дорівнювати:

$$q_v = q_{вс} = q_0 C_a C_d C_v,$$

де q_0 – характеристичне значення вітрового тиску залежно від вітрового району (для України він змінюється від 400 до 600 Па) [19]; C_a – аеродинамічний коефіцієнт, що залежить від геометричних параметрів конструкції (для труби – 0,7; для параболічної антени – 1,4); C_v – коефіцієнт, що враховує зміну вітрового навантаження по висоті.

При розрахунках прийmemo $q_0 = 600$ Па. Тоді середній вітровий тиск (q_c) на трубу буде складати 600 Па, на антену – 840 Па. Відповідно, сила вітрового навантаження для антени радіуса 0,3 м буде складати 400 Н, а для радіуса 0,6 м – 1600 Н ($P_v = q_c C_a C_v S_a$, де S_a – площа антени, м²). Під час комп'ютерного моделювання в якості скінченного елемента (СЕ) теж використовували SHELL 181 (розмір елемента – 0,095 м; кількість вузлів – 4822 шт.; кількість елементів – 4812 шт.). Результати комп'ютерного моделювання наведені в табл. 2, а характерні розподіли деформацій і напруг – на рис. 4 – 5.

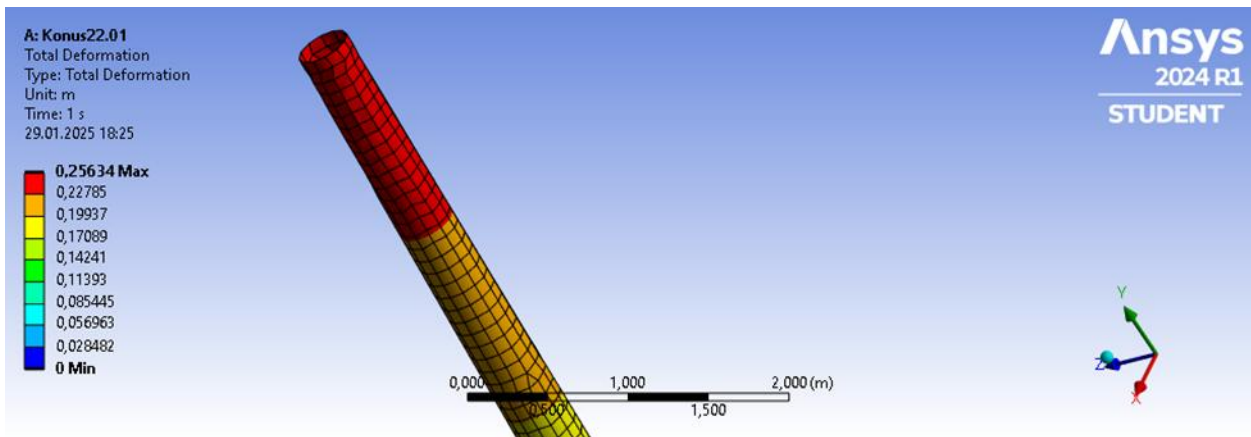


Рис.4.Характерний вид розподілу деформацій вежі

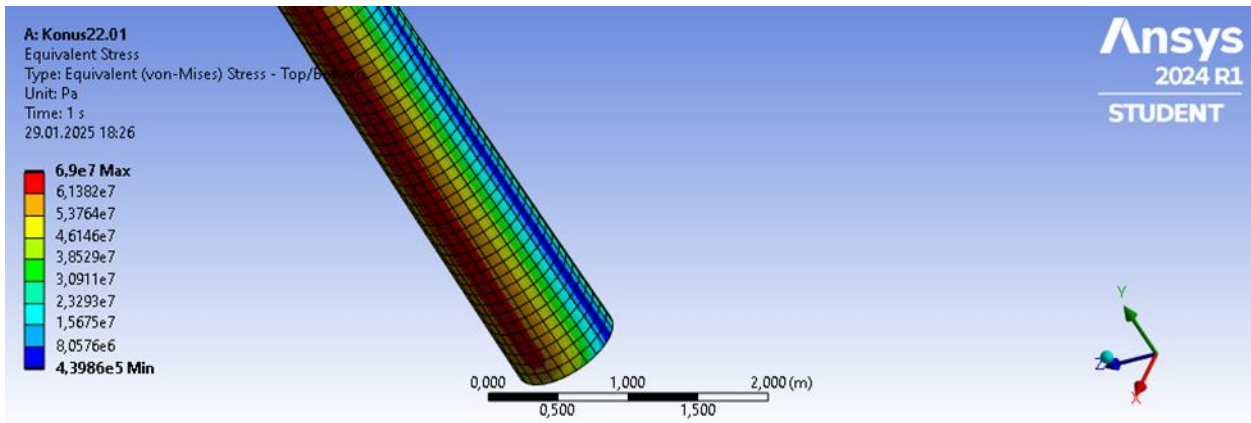


Рис. 5. Характерний вид розподілу напруги по поверхні вежі

Таблиця2

Результати комп'ютерного моделювання

Радіус антени, м	Зміщення антени відносно осі вежі, м	Максимальна сила додаткового вітрового навантаження, Н	Максимальна деформація, м	Максимальна величина напруг, МПа
Антенa відсутня	-	-	0,2244	60,9
0,3	0	400	0,2324	62,97
	1	400	0,2324	62,97
0,6	0	1600	0,2563	69,0
	1	1600	0,2563	69,0

Висновки

1. Розташування зміщеної відносно осі вежі антени істотно впливає на її напружено-деформований стан.
2. Виконані розрахунки показали, що розміщення на вежі радіорелейної антени (чи аналогічного устаткування з площею $\leq 1,2 \text{ м}^2$ поперечного перерізу) збільшує максимальну еквівалентну напругу: при радіусі антени 0,3 м – на 3,4 %, при радіусі 0,6 м – на 13,3 %.
3. Розміщення додаткового устаткування подібним чином впливає і на збільшення величини максимальних деформацій: для антени радіусу 0,3 м – на 3,6 %, а для антени радіусу 0,6 м – на 14,2 %.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Методика визначення загального рівня опромінення персоналу в сучасному інформаційному просторі / А. В. Карпов та ін. *Наукоємні технології*. 2010. Вип. 2. С. 116–121.
2. Nguyen C., Freda A., Solari G. Aeroelastic Instability and wind-excited response of complex lighting poles and antenna masts. *Engineering Structures*. 2015. Vol. 85. P. 264–276.
3. Wahrhaftig A., Brasil R. M. Initial undamped resonant frequency of slender structures considering nonlinear geometric effects: the case of a 60.8 m-high mobile telecommunication mast. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2017. Vol. 39. P. 725–735.
4. Fedorik F. Use of design optimization techniques in solving typical structural engineering related design optimization problems. *Structural Engineering and Mechanics*. 2015. Vol. 55. P. 1121–1137.
5. Молчанов Д. С. Аварії опор мобільного зв'язку. Современные строительные конструкции из металла и древесины. 2013. № 17. С. 152–157. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sskmd_2013_17_28 (дата звернення 15.01.2025).
6. Bell Aliant Officials Investigating Cell Tower Collapse in St. John's. URL: <https://vocm.com/2020/03/03/cell-tower-assessment> (дата звернення 22.12.2024).
7. Austin ice storm's power outages complicated by 500-foot tower that decimated transmission lines. URL: <https://wirelessestimator.com/articles/2023/austin-ice-storms-power-outages-complicated-by-500-foot-tower-that-decimated-transmission-lines/> (дата звернення 22.12.2024).
8. Either Mother Nature or a deficient design caused a New York American Tower monopole to collapse. URL: <https://wirelessestimator.com/articles/2023/either-mother-nature-or-a-deficient-design-caused-a-new-york-american-tower-monopole-to-collapse/> (дата звернення 22.12.2024).
9. Tornado takes out ATC 150-foot monopole as Ida wind sits path of destruction through the northeast. URL: <https://wirelessestimator.com/articles/2021/tornado-takes-out-an-atc-150-foot-monopole-as-ida-winds-its-path-of-destruction-through-the-northeast/> (дата звернення 22.12.2024).
10. Editor Madugula. Dynamic response of lattice tower and guyed masts. Committee report. M. K. S. Reston (US): ASCE, 2002. 266 p.
11. Zhang M., Li T., Wang Y., Chen Y. Wind-Induced Vibration and Vibration Suppression of High-Mast Light Poles with Spiral Helical Strakes. *Buildings* 2023. 13, 907. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings13040907> (дата звернення 22.12.2024).
12. Шевченко Ф. Л. Будівельна механіка. Спеціальний курс. Динаміка пружних стержневих систем. Донецьк: РІА ДонНТУ, 2000. 293 с.
13. Diaz C., Victoria M. Optimum design of semi-rigid connection using meta models. *Journal of Constructional Steel Research*. 2012. Vol 78. P. 97–106. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.06.013> (дата звернення 15.01.2025).
14. Abasolo M., Aguirrebeitia J. Methodology for the optimization of bolting sequences for wind generator flanges. *Journal of Pressure Vessel Technology*. 2014. №136 (6). URL: <https://doi.org/10.1115/1.4027597> (дата звернення 15.01.2025).
15. Diaconita A., Andrei G., Rusu E. Estimation of the Tower Shape Effect on the Stress–Strain Behavior of Wind Turbines Operating under Off shore Boundary Conditions. *Inventions*. 2022. №7 (1). URL: <https://doi.org/10.3390/inventions7010011> (дата звернення 15.01.2025).
16. Zhu R., Zheng Z., Liu Y., Shen J. Finite Element Analysis for MW Wind Turbine Tower. In *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications Ltd. Stafa-Zurich, Switzerland. 2012. Vol. 130. P. 124–127.

17. Опір матеріалів : навч. посіб. / Жигилій Д. О. Верещака С. М., Некрасов С. С., Довгополов А. Ю. Суми : Сумський державний університет, 2022. Ч. 1. 159 с.
18. Гришанова І. А., Згуровська Л. П., Киричук Ю. В. Розв'язок задач проєктування приладів та систем з використанням ANSYS і MATHCAD: підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, «Політехніка», 2022. 180 с.
19. ДБН В.1.2.-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проєктування. Київ, 2006. 60 с.
20. Кльон А. М., Трет'як А. В. Визначення вітрового навантаження на баштовий кран. Системи управління, навігації та зв'язку. 2022. № 4. С. 42–44.

Стаття надійшла до редакції 30.01.2025.

Стаття пройшла рецензування 04.02.2025.

Воробйов Віктор Васильович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри машинобудування, e-mail: yvv.imit@gmail.com.

Воробйова Лариса Дмитрівна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри машинобудування.

Кулинич Вікторія Дмитрівна – канд. техн. наук, старший викладач кафедри машинобудування.

Пастушенко Руслан Михайлович – аспірант кафедри машинобудування.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського.