

МОДЕЛЮВАННЯ МОСТУ ВАНТОВОГО ТИПУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Красніков С. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Розглянуто частотні характеристики вантового мосту за кількома його схемами. Здійснено аналіз впливу на частотні характеристики типу опору за різними наборами. Серед типів опору було вибрано тверду опору, шарнір та відсутність опору. Метою дослідження є визначення причин виникнення аварійно небезпечних ситуацій, зокрема тих, що фіксуються як дорожньо-транспортні пригоди. Для цього запропоновано проаналізувати власні частоти вантового мосту за різноманітними типами його контактування (опору) з колонами. Об'єктом у нашому дослідженні є міст вантового типу, що експлуатується вже 45 років. Він є системою з трьох типів елементів: пілон, пролітна частина та колони. Предметом дослідження є спектр власних частот мосту за різноманітними його моделями. Дослідження здійснено за допомогою методів коливальних та скінчених елементів, а також розроблених автором методик побудови моделей складних машинобудівних систем. За результатами досліджень були розроблені математичні тривимірні скінчено-елементні моделі частин та всієї системи мосту за різними типами опору, отримані власні частоти для кожної системи. Проведені дослідження надали підстави для висновків щодо конкретизації причин виникнення аварійно небезпечних ситуацій та способів їх уникнення. Було визначено унікальність розроблених моделей вантового мосту. Завдяки ним можна моделювати три стани взаємодії частин системи. Для проведення дослідження з високим ступенем достовірності реальної моделі необхідно отримати дані щодо типів з'єднання її елементів. Це можливо за допомогою унікальних авторських методик побудови моделі та використання універсальних можливостей методу скінчених елементів. Дослідження мосту іншими методами не дозволило вирішити поставленого завдання щодо виникнення аварійно небезпечних ситуацій. Результати роботи є безпосереднє практичне застосування. За результатами дослідження можна дійти висновку щодо заходів із підвищення безаварійної роботи системи та заходів з уникнення виникнення аварійно небезпечної ситуації.

Ключові слова: міст, вібрація, власні частоти, моделювання, метод скінчених елементів, фундамент.

Вступ

Серед різноманітних типових конструкцій мостів можна виокремити їхні вантові різновиди. Конструкція вантового типу дозволяє не тільки рівномірно розподілити навантаження на основні опорні елементи, але й значною мірою знизити строки будівництва. Незважаючи на ці переваги, вантові мости є більш престижними з погляду естетичності та надійності. Вантові мости є об'єктами престижу в кожній країні та населених пунктах. Насамперед це пов'язано з обмеженнями на розмір прольоту моста. Чим більшим за довжиною є проліт, тим кращий та вагоміший має вигляд міст (рис. 1). Однак витонченість конструкції вимагає специфічних інженерних рішень для їхнього забезпечення.

Значні розміри прольоту висувають підвищені вимоги як до вант, так і до опорних пілонів. Крім того, залізобетонні конструкції мають більші строки будівництва, але меншу

вартість. Ці особливості пов'язані з необхідністю використання для вантових мостів великої кількості коштовної легованої сталі, що використовують на ванти. Також невантові конструкції мостів мають більшу здатність до демпфірування коливальних, а вантові фактично містять для майданчиків прольотів підпружинені опори. Все це призводить до різноманітних небажаних ситуацій у процесі експлуатації.

У нашій країні побудовано один з перших десяти вантових мостів в Європі. Його типова конструкція є зразком для серії мостів цього типу. Він з'єднує автомобільну трасу із двох берегів ріки Дніпро в м. Київ. 2018 року міст було перейменовано з «Московського моста» в «Північний міст». Незважаючи на успішну експлуатацію моста вже більше ніж півстоліття, є декілька особливостей його використання.



Рис. 1. Міст вантового типу в м. Київ

У процесі експлуатації зазначеного моста вантового типу була зафіксована велика кількість аварійних ситуацій автотранспорту. За результатами аналізу дорожньо-транспортних випадків були виявлені факти нелінійної взаємодії автомобільного транспорту й моста, що можливо стали причиною аварій. Для усунення аварійних ситуацій було вжито такі заходи: заборонявся та дозволявся рух, звужувалася та розширювалася ширина прольоту для проїзду автотранспорту. Зазначені заходи не призвели до зникнення або істотного зменшення аварійних ситуацій та дорожньо-транспортних випадків, що продовжували й продовжують відбуватися до цього часу приблизно з однаковою періодичністю. Так, 2019 року ремонтні роботи здійснювалися 12 разів, а 2020 року – більше ніж 5 разів. Така ситуація призводить до необхідності проведення додаткових досліджень, зокрема частотного аналізу моста вантового типу.

Аналіз публікацій

Вантові конструкції одні з найкрасивіших і розповсюджених споруджень в усьому світі. Типовою вантовою конструкцією є міст [1– 6]. У нашій країні перший вантовий міст із прольотом більше 100 метрів був спроектований і побудований більше 50 років тому в столиці на річці Дніпро [7–10]. Це «Рибальський вантовий міст», який мав довжину основного прольоту 144 метри. Міст був в експлуатації з 1963 по 2009 рік. Нині здійснюється демонтаж цього моста, який планують завершити до 2022 року. 1971 року почалося будівництво нового унікального моста з довжиною основного прольоту 300 метрів [11– 13]. З 1976 року до сьогодні час він перебуває в експлуатації. На будівництво моста було витрачено 200 млн. доларів США [14]. Конструкція цього моста є пілотною і була з різноманітними варіаціями повторена

в великій кількості мостів, що побудовані на території країни. 1987 року було затверджено план проектування й будівництва Запорізького мостового переходу [15]. Його будівництво розпочалося 2004 року, і планують завершити до 2024 року. Обсяг фінансування проекту на 2021 рік становить 1 млрд. доларів США. У нашій країні експлуатуються також вантові мости з довжиною прольоту до 100 метрів, більша частина з яких є пішохідними. Проблема, що розглядається, стосується всіх мостів вантового типу.

Раніше були проведені розрахунки статичної міцності вантового моста, які продемонстрували прогини в аварійно небезпечних місцях основного прольоту й залежності переміщень і деформацій за різного комбінування вант [16–17]. Однак істотних методів і рекомендацій зі зниження аварійно небезпечних ситуацій і тенденцій ці дослідження не дали. Тому було ухвалено рішення щодо продовження досліджень, зокрема аналізу спектрів власних частот за умови різноманітних варіантів кріплення пролітної будови до опор [18– 20]. Для кріплення до опор розглядалися такі варіанти: шарнір, тверда опора, відсутність опори.

Мета і постановка завдання

Метою нашого дослідження є визначення значень власних частот моста вантового типу, здійснення їхнього якісного й кількісного аналізу. Об'єктом у цьому дослідженні є система мосту, що складається з трьох структурних частин: пілона, вантів, пролітної частини. Предметом дослідження є значення власних частот, їхній спектр, а також якісні характеристики.

Математична модель

Запишемо для нашої задачі основний функціонал в узагальненому виді:

$$L(t, C_o, q) = 0, \quad (1)$$

де C_o – жорсткості опорних місць мосту; L – рівняння руху Лагранжа 2 роду; q – узагальнені переміщення.

Відповідно до загальновідомого методу скінченних елементів [21–22] функціонал (1) можна записати в матричному виді:

$$[M]\{\ddot{q}(t)\} + [C]\{\dot{q}(t)\} + [K]\{q(t)\} = R, \quad (2)$$

де M – матриця мас; C – матриця демпфування; K – матриця жорсткості; R – зовнішні тривіальні впливи.

Власні частоти (p_j) коливань для системи визначаються відповідно до формули (3):

$$\det[K - p_j^2 M] = 0. \quad (3)$$

Значення частот можуть бути визначені за допомогою методу Якобі.

Опис розрахункової моделі

Були побудовані геометричні моделі, що наведені на рис. 2. Міст має загальну довжину 816 м. Довжина основного прольоту становить 300 м. Висота пілона моста 119 м. На основі геометричних моделей побудовані розрахункові кінцево-елементні моделі.

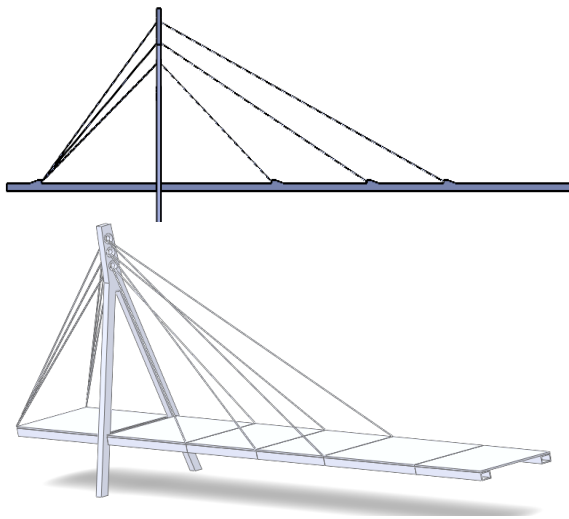


Рис. 2. Геометрична модель

Вид розрахункових моделей наведено на рис. 3. Він візуально однаковий для всіх моделей. Їхня основна особливість полягає в способі кріплення моста. Розглянута модель моста має чотири місця закріплення. Модель 1 містить тверде закріплення пілона. У моделях 2 і 3 тверде закріплення, крім пілона, мають ще обидва кінці прольоту моста.

У моделі 4 всі опори твердого типу закріплення. Параметри моделей наведені в табл. 1. Характеристики кріплення опор наведені в таблиці 2.

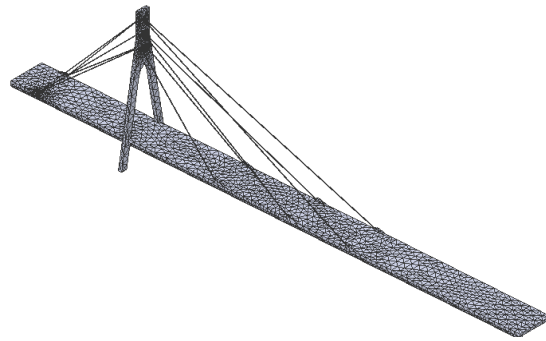


Рис. 3. Скінченно-елементна модель

Для моделі 4 була побудована модель 4-2 зі збільшеною кількістю ступенів волі. Максимальне розходження за частотами становить 8 %, середнє розходження менше – 6 %. Тому для розрахунків була використана дискретизація, що відповідає моделі 4.

Дослідження спектра власних частот

Для побудованих скінченно-елементних моделей були розраховані власні частоти в діапазоні від 0 до 10 Гц.

Таблиця 1 – Параметри розрахункових моделей

Модель	Кількість		
	вузлів	елементів	ступенів волі
1	10797	30748	32313
2	10797	30748	32235
3	10930	31121	32619
4	10930	31121	32604
4-2	13850	44320	54109

Таблиця 2 – Характеристики розрахункових моделей

Модель	Кількість		
	вільних опор	шарнірів	твердих опор
1	1	2	1
2	1	0	3
3	0	1	3
4	0	0	4
4-2	0	0	4

У діапазоні, що розглядається, розташовується перша тисяча власних частот. Більша частина з них відповідає локальним резонансам вантів. Значно менша частина з них відповідає резонансам всієї системи, що позначаються як глобальні. На рис. 4 наведено частоти глобальних резонансів моделей 1 і 2. На рис. 5 і 6 наведено частоти глобальних резонансів моделей 3 і 4.

Рис. 4–6 демонструють, що врахування проміжної опори істотно впливає на тип розподілу глобальних резонансів. Так, у моделях 1 і 2 в діапазоні до 10 Гц розташовано по 5 глобальних резонансів (рис. 4). У моделі 3 таких резонансів 49 (рис. 5). А для моделі 4 є 29 глобальних резонансів (рис. 6). Отже, моделі 1 і 2 відрізняються від моделей 3 і 4. Моделі 1 і 2 мають майже однаковий частотний спектр (рис. 4). Моделі 3 і 4 містять де-

кілька загальних закономірностей (рис. 5, 6). Вони виражені в розподілі глобальних резонансів. Є досить густий спектр у діапазоні до 5 Гц (рис. 5, 6) та діапазон в 2 Гц без глобальних резонансів. Наприкінці діапазону на частотах 7–8 Гц розташовано ще один (для моделі 4, рис. 6) або декілька резонансів (для моделі 3, рис. 5).

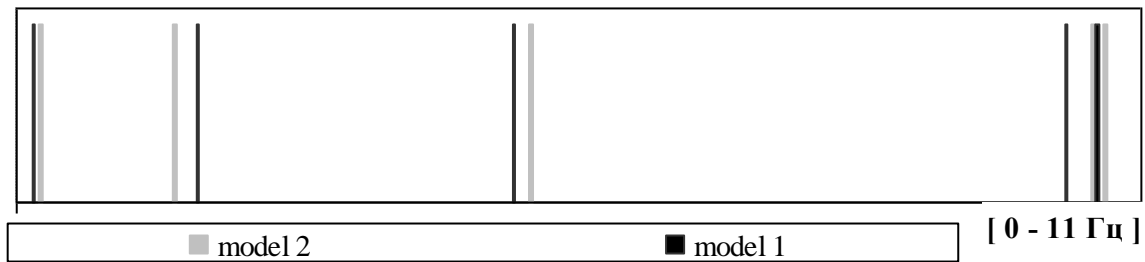


Рис. 4. Власні частоти глобальних резонансів моделей 1 і 2



Рис. 5. Власні частоти глобальних резонансів моделі 3

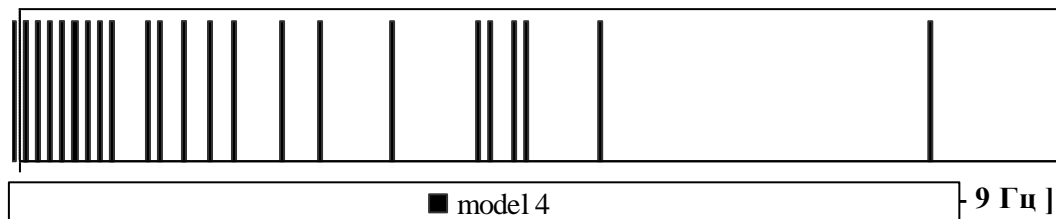


Рис. 6. Власні частоти глобальних резонансів моделі 4

Моделі 1 і 2 (рис. 4) мають майже однаковий частотний спектр, ніж моделі 3 і 4 (рис. 5, 6). Всі ці особливості демонструють вплив жорсткості обпирання на розподіл глобальних резонансів. Спільним між ними є те, що рух вздовж мосту з дуже малими швидкостями (перша передача) буде джерелом і причиною виникнення резонансів у системі. Це може бути причиною виникнення дорожньо-транспортної пригоди. Для незавантаженого стандартного автомобіля ВАЗ 2106 ці малі швидкості становлять діапазон від 0 до 7 км/г. Для інших транспортних засобів верхня межа діапазону становить приблизно 3–15 км/г. Для правильного вирахування граничної швидкості критичного діапазону необхідно враховувати тип механічної коробки передач, тип двигуна, діаметр

коліс, тип протектора, тиск шин, а також загальні формули розрахування та таблиці частот обертання окремих частин транспортного засобу, що є відомими для фахівців. Крім того, необхідно зазначити, що транспортний засіб більшої маси в разі виникнення резонансу призведе до більш складної аварійної ситуації.

Висновки

Дослідження демонструє істотний вплив твердості обпирання на спектр власних частот. Глобальних резонансів у системі значно менше, ніж локальних, що пов'язано з більшою кількістю резонансів на вантах. Результат частотного аналізу продемонстрував, що рух вздовж мосту з невеликими швидкостями або гальмування до повної зупинки мо-

жуть бути причинами виникнення резонансу всієї системи та дорожньо-транспортної пригоди.

Література

- Петропавловский А. А. Вантовые мосты. Москва: Транспорт, 1985. 224 с.
- Бычковский Н. Н., Бычковский С. Н., Пименов С. И. Вантовые мосты. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2007. 648 с.
- Кирсанов Н. М. Висячие и вантовые конструкции. Москва: Стройиздат, 1981. 160 с.
- Михайлова А. И., Кузьмина В. М. Особенности конструкции вантовых мостов. *Наука – образование – производство: опыт и перспективы развития*. Т. 2. Автоматизация, мехатроника и ИТ. Гуманитарные науки. Строительство и архитектура. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2018. С. 253–258.
- Казакевич М. И. Современное развитие проектирования и строительства средне- и длиннопролетных мостов на высокоскоростных железных дорогах (hsr) Китая. *Мосты и тоннели: теория, исследования, практика*. 2014. № 1. С. 34–39.
- Кривошапка С. Н. Вантовые структуры. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2016. № 1. С. 9–21.
- Котлярова Е. В., Козаченко Т. О. Предпосылки возникновения и анализ отечественного опыта применения вантовых конструкций в мостостроении. *Закономерности развития технических и технологических наук: сборник статей Международной научно-практической конференции*. Казань. 2017. С. 43–45.
- Котлярова Е. В., Козаченко Т. О. Пространственные конструкции в современной архитектуре: вантовые покрытия. *Закономерности развития технических и технологических наук: сборник статей Международной научно-практической конференции*. Казань. 2017. С. 45–47.
- Рязанова А. В. Особенности и общие принципы конструирования одноопорных вантовых мостов Сантьяго Калатравы. *Актуальные проблемы науки и техники. Материалы национальной научно-практической конференции*. 2019. С. 799–800.
- Барановский А. А. Крупнейшие вантовые мосты мира. Отечественный мост через пролив Босфор Восточный. *Мир дорог*. 2011. С. 46–48.
- Новиков А. П., Техова Т. Д. Конструкции висячих мостов: сб. трудов международной науч.-практ. конференции «Актуальные проблемы современной науки». 2014. С. 153–154.
- Скориков О. Г. Вантовые мосты: перспектива для России. *Актуальные проблемы науки и техники*. 2008. С. 218–220.
- Фульмес Н. Е., Кульбицкая Д. А. Вантовые конструкции: материалы межвуз. научно-технической конференции. Рязань. 2015. С. 31–35.
- Зайцев А. И. Минимизация материальных затрат при производстве вантовых покрытий шатрового типа: *сборник материалов Международной научно-практической конференции* Архангельск. 2013. С. 141–144.
- Богданова М. Е., Масловская О. В. Вантовые мосты в структуре образа города: *материалы международной научной конференции*. Хабаровск. 2014. С. 37–42.
- Казакевич М. И. Причины глобальных и локальных отказов вантовых мостов. *Мосты и тоннели: теория, исследования, практика*. 2012. №1. С. 3–8.
- Красников С. В. Моделирование вантового моста стилия арфы и анализ прочностных характеристик. *Автомобильный транспорт*. 2017. № 41. С. 188–195.
- Zavyalova N. V., Kadisov G. M. Analysis of three-dimensional thin-walled systems at local load. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2007. Т. 3. № 2. С. 57–60.
- Schlaich M. Erection of Cable-Stayed Bridges Having Composite Decks with Precast Concrete Slabs. *Journal of Bridge Engineering*. 2001.
- Shi Jingxian Ran Zhihong. Effect of Concrete shrinkage and creep effect on the Cable Force of Extradosed Cable-stayed Bridge. *Highway engineering*. 2014. № 1. С. 7
- Еременко С. Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых тел. Харьков: Основа. 1991. 271 с.
- Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. Москва: Мир. 1984. 428 с.

References

- Petropavlovskiy A. A. (1985) Vantovye mosty. Moskva: Transport. 224 s.
- Bychkovskiy N. N., Bychkovskiy S. N., Pimenov S. I. (2007) Vantovye mosty. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t. 648 s.
- Kirsanov N. M. (1981). Visyachie i vantovye konstruktivnykh. Moskva: Stroyizdat. 160 s.
- Mikhaylova A. I., Kuz'mina V. M. (2018). Osobennosti konstruktivnykh vanovykh mostov. Nauka – obrazovanie – proizvodstvo: Opyt i perspektivy razvitiya. T. 2. Avtomatizatsiya, mekhatronika i IT. Gumanitarnye nauki. Stroitel'stvo i arkhitektura. Nizhniy Tagil : NTI (filial) UrFU. S. 253–258.
- Kazakevich M.I. (2014). Sovremennoe razvitie proektirovaniya i stroitel'stva sredne- i dlinnooproletnykh mostov na vysokoskorostnykh zheleznykh dorogakh (hsr) Kitaya. Mosty i tonneli: teoriya, issledovaniya, praktika. № 1. S. 34–39.
- Krivoshapko S. N. (2016). Vantovye struktury. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktivnykh i sooruzheniy. № 1. S. 9–21.
- Kotlyarova E. V., Kozachenko T. O. (2017). Predposylki vzniknoveniya i analiz otechestvennogo opyta primeneniya vantovykh konstruktivnykh v mostostroenii. Zakonomernosti

- razvitiya tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh nauk: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Kazan. 2017. S. 43–45.
8. Kotlyarova E. V., Kozachenko T. O. (2017). Prostranstvennye konstruksii v sovremennoy arkhitekture: vantovye pokrytiya. Zakonomernosti razvitiya tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh nauk: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Kazan'. 2017. S. 45–47.
 9. Ryazanova A. V. (2019). Osobennosti i obshchie printsipy konstruirovaniya odnoopornykh vantovykh mostov Sant'yago Kalatravy. Aktual'nye problemy nauki i tekhniki: materialy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii. S. 799–800.
 10. Baranovskiy A. A. (2011). Krupneyshie vantovye mosty mira. Otechestvennyy most cherez pro-liv Bosfor Vostochnyy. Mir dorog. S. 46–48.
 11. Novikov A. P., Tekhova T. D. (2014). Konstruksii visyachikh mostov. Sbornik trudov mezhdunar. nauch.-prakt. konferentsii «Aktual'nye problemy sovremennoy nauki». S. 153–154.
 12. Skorikov O. G. (2008). Vantovye mosty: perspektiva dlya Rossii. Aktual'nye problemy nauki i tekhniki. 2008. S. 218–220.
 13. Ful'mes N. E., Kul'bitskaya D. A. (2015). Vantovye konstruksii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. Ryazan': RIPD «Pervopechatnik». S. 31–35.
 14. Zaytsev A. I. (2013). Minimizatsiya material'nykh za-trat pri proizvodstve vantovykh pokrytiy shatrovogo tipa: sbornik materialov Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. S. 141–144.
 15. Bogdanova M. E., Maslovskaya O. V. (2014). Vantovye mosty v strukture obraza goroda: materialy mezhdunar. nauch. konf. Khabarovsk: S. 37–42.
 16. Kazakevich M. I. (2012). Prichiny global'nykh i lokal'nykh otkazov vantovykh mostov. Mosty i tonneli: teoriya, issledovaniya, praktika. № 1. S. 3–8.
 17. Krasnikov S. V. (2017). Modelirovanie vantovogo mosta stilya arfy i analiz prochnostnykh kharakteristik. Avtomobil'nyy transport. № 41. S. 188–195.
 18. Zavyalova N. V., Kadisov G. M. Analysis of three-dimensional thin-walled systems at local load. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2007. T. 3. № 2. C. 57–60.
 19. Schlaich M. Erection of Cable-Stayed Bridges Having Composite Decks with Precast Concrete Slabs. *Journal of Bridge Engineering*. 2001.
 20. Shi Jingxian Ran Zhihong. Effect of Concrete shrinkage and creep effect on the Cable Force of Extradosed Cable-stayed Bridge. *Highway engineering*. 2014. № 1. C. 7
 21. Eremenko S. Yu. (1991). Metody konechnykh elementov v mekhanike deformiruemyykh tel. Khar'kov: Osnova. 271 s.
 22. Gallager R. (1984). Metod konechnykh elementov. Os-novy. Moskva: Mir. 428 s.
- Modeling of cable-stayed bridge and research of frequency characteristics**
- Abstract. Problem.** *The frequency characteristics of the cable-stayed bridge according to several of its schemes are considered. The analysis of the influence on the frequency characteristics of the type of resistance according to different sets is carried out. Among the types of resistance were taken complete whitening, hinge and lack of resistance. Goal.* *The purpose of the study is to determine the causes of emergencies, including those recorded as road accidents. For this purpose it is offered to carry out the analysis of natural frequencies of the cable-stayed bridge on its different types of contact (resistance) with columns. The object of this study is a cable-stayed bridge, which has been in operation for 45 years. The bridge is a system of three types of elements: pylon, span and columns. The subject of the study is the spectrum of natural frequencies of the bridge according to its various models.*
- Methodology.** *The research was performed using the methods of oscillations and finite elements, as well as the methods developed by the author for building models of complex machine-building systems.*
- Results.** *According to the results of the performed researches, mathematical three-dimensional finite-element models of parts and the whole system of the bridge were made for different types of resistance, natural frequencies for each system were obtained. The conducted research provided grounds for conclusions on concretization of the causes of emergency situations and directions for their avoidance. Originality.* *Regarding the type of developed models of the cable-stayed bridge, we note their uniqueness. Due to the existing personalities of the models used, it is possible to model three states of interaction of parts of the system. To conduct a study with a high degree of reliability of the real model, you need to have available data on the types of connections of its elements. This is possible with the help of unique author's methods of model construction and use of universal possibilities of the finite element method. Research of the bridge by other methods did not allow to solve the set tasks on emergence of emergency situations. Practical value.* *The results of the work have a direct practical application. Based on the results of the work, a conclusion was made on measures to increase the trouble-free operation of the system and measures to avoid the occurrence of an emergency situation.*
- Key words:** *bridge, vibration, natural frequencies, modeling, finite element method, foundation.*
- Krasnikov S. V.**¹, Ph.D., Assoc. Prof.,
tel. +38 057-707-37-30, e-mail: vsevavr@list.ru
¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslav Mudry street, Kharkiv, 61002, Ukraine.