

Є. С. АНАНЬІН, А. С. ЛЯШЕНКО, Р. В. ПРОТАСОВ, А. В. ГРАБОВСЬКИЙ

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТА ВЛАСНИХ ЧАСТОТ І ФОРМ КОЛИВАНЬ МОСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Розглянуто процес створення моделі прототипу арочного залізничного моста і розрахунків його власних частот і форм коливань і напружено-деформований стан на всіх етапах проектування. Для моделювання геометрії використовується програмний комплекс Autodesk Inventor, а для розрахунку скінченно-елементної моделі – Autodesk Nastran In-CAD та Autodesk Simulation Mechanical. На основі геометричних даних створено балкову модель моста для двох залізничних колій. За допомогою аналізу напружено-деформованого стану підбрано профілі для певних груп елементів конструкції в умовах рівного запасу міцності. Використовуючи параметри балкової моделі, побудовано поверхневу модель для більш точного аналізу напружено-деформованого стану, особливо в місцях з'єднань декількох профілів. Розрахунок власних частот і форм коливань здійснюється на кожному етапі модернізації (вдосконалення) геометричних параметрів моста для перевірки цілісності скінченно-елементної моделі. На завершення наведені власні частоти конструкції будуть використані при подальшому проектуванні залізничного полотна

Ключові слова: напружено-деформований стан, метод скінченних елементів, мостова конструкція, модель моста, напруження, навантаження, власні частоти, форми коливань, резонанс

Е. С. АНАНИН, А. С. ЛЯШЕНКО, Р. В. ПРОТАСОВ, А. В. ГРАБОВСКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассмотрен процесс создания модели прототипа арочного железнодорожного моста и расчет его собственных частот и форм колебаний и напряженно-деформированное состояние на всех этапах проектирования. Для моделирования геометрии используется программный комплекс Autodesk Inventor, а для расчета конечно-элементной модели – Autodesk Nastran In-CAD и Autodesk Simulation Mechanical. На основе геометрических данных создано балочную модель моста для двух железнодорожных путей. С помощью анализа напряженно-деформированного состояния подобрано профили для определенных групп элементов конструкции в условиях равного запаса прочности. Используя параметры балочной модели, построено поверхностную модель для более точного анализа напряженно-деформированного состояния, особенно в местах соединений нескольких профилей. Расчет собственных частот и форм колебаний производится на каждом этапе модернизации (совершенствование) геометрических параметров моста для проверки целостности конечно-элементной модели. В заключение приведенные собственные частоты конструкции будут использованы при дальнейшем проектировании железнодорожного полотна

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, мостовая конструкция, модель моста, напряжение, нагрузка, собственные частоты, формы колебания, резонанс

E. S. ANANIN, A. S. LIASHENKO, R. V. PROTASOV, A. V. GRABOVSKIJ

RESEARCH OF STRESS-STRAIN STATE AND NATURAL FREQUENCIES AND WAVEFORMS OF BRIDGE CONSTRUCTIONS VIBRATIONS

The process of creating a prototype model of an arched railway bridge and calculation of its natural frequencies and vibration modes and the stress-strain state at all design stages are considered. Autodesk Inventor is used for geometry modeling, and Autodesk Nastran In-CAD and Autodesk Simulation Mechanical are used to calculate the finite element model. Based on the geometric data, a beam bridge model for two railway tracks was created. Using analysis of the stress-strain state, profiles were selected for certain groups of structure elements under conditions of equal stress margin. Using the parameters of the beam model, a surface model was constructed for a more accurate analysis of the stress-strain state, especially at the joints of several profiles. The calculation of natural frequencies and waveforms is performed at each stage of modernization (improvement) of the bridge's geometric parameters to verify the integrity of the finite element model. In conclusion, given natural frequencies of the structure will be used in the further design of the railway tracks

Keywords: stress-strain state, finite element method, bridge construction, bridge model, stress, load, natural frequencies, vibration forms, resonance

Вступ. Напружено-деформований стан (НДС) конструкції – сукупність внутрішніх напружень і деформацій, що виникають при дії на неї зовнішніх навантажень, температурних полів та інших факторів. НДС визначається розрахунковими і експериментальними методами у вигляді розподілу напружень, деформацій і переміщень.

Знання параметрів власних частот стає важливим в умовах динамічного навантаження і при моделюванні вібрацій і перехідних процесів у конструкціях. Частотний аналіз є лінійним і може враховувати ефекти загасання, але ігнорує пластичну текучість матеріалу і контактну жорсткість.

Розрахунок параметрів власних частот конструкції – перший етап вібраційного дослідження конструкції. Його метою є визначення ступеня небезпеки можливих резонансних режимів. Якщо небезпечні гармоніки не потрапляють у робочий діапазон діючих зовнішніх навантажень, то конструкція зазвичай вважається задовільною з точки зору міцності при вібраціях. В іншому випадку здійснюються спроби змінити конструкцію таким чином, щоб виве-

сти її власні частоти за робочий діапазон навантажень, і (або) проводиться оцінка небезпеки резонансних коливань за величиною виникаючих деформацій і напружень у конструкції.

Предметом роботи є проектування залізничного моста з урахуванням того, що конструкція буде достатньо надійною, щоб витримати два потяги по всій поверхні мосту.

Для оцінки НДС мостових конструкцій у процесі випробувань необхідно вимірювати напруження від випробувального навантаження у характерних перетинах найбільш навантажених елементів, прогини прогонових будов, періоди їх вільних коливань, динамічні коефіцієнти. У деяких випадках необхідно також визначити декременти коливань, а у вантових і всяких мостах – ще й зусилля у канатах.

Аналіз останніх досліджень та літератури. Для дослідження НДС мостових конструкцій використовують аналітичні, чисельні та інші методи розрахунку.

© Є. С. Ананьїн, А. С. Ляшенко,
Р. В. Протасов, А. В. Грабовський, 2019

Підтвердити ці розрахунки можливо експериментально, наприклад, магнітно-коерцитивним методом або тензометричним методом. Розрахунок НДС мостових конструкцій чисельним методом можна виконати за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ). МСЕ дає можливість здійснювати розрахунки мостових конструкцій із різними видами навантаження [1].

Необхідність у розрахунку власних частот і відповідних їм форм коливань нерідко виникає при аналізі динамічної поведінки конструкції під дією змінних навантажень. Найбільш поширена ситуація при проектуванні – це з'ясувати малу ймовірність появи в умовах експлуатації такого механічного явища, як резонанс. Як відомо, суть резонансу полягає у значному (у десятки разів і більше) посиленні амплітуд вимушених коливань на частотах зовнішніх впливів, так званих резонансних частот, що співпадають з власними частотами [2]. У більшості випадків виникнення резонансу є вкрай небажаним явищем у плані забезпечення надійності та міцності виробу.

Загальновідомо, що резонанси спостерігаються на частотах, близьких до частот власних коливань конструкції. Перевірка спектральних властивостей конструкцій на можливість співпадіння власних частот із робочим діапазоном частот зовнішніх впливів на стадії проектування дає змогу вносити у конструкцію зміни, котрі здатні змінювати спектр власних частот. Це дасть можливість уникнути або значно знизити ймовірність появи резонансів у процесі експлуатації. Умова вібростійкості за критерієм власних частот може бути сформульована за формулою $f_i \notin [0.7 f_{\min}^{\text{env}}, 1.3 f_{\max}^{\text{env}}]$, де f_i – i -та власна частота конструкції, а $f_{\min}^{\text{env}}, f_{\max}^{\text{env}}$ – нижня і верхня частоти діапазону зовнішніх вібраційних впливів.

Зазвичай найбільшу небезпеку представляє резонанс на низьких власних частотах ($i \leq 5$), оскільки саме на них накопичується більша частина механічної енергії.

Для збільшення власних частот необхідно надати конструкції більшої жорсткості і (або) зменшити її масу. Наприклад, для протяжного об'єкта можна підвищити жорсткість, зменшивши довжину або збільшивши поперечний розмір об'єкта. Для зменшення власної частоти, навпаки, необхідно зменшити жорсткість.

Для мостів за економічними, соціальними і екологічними наслідками їх відмов згідно з ДБН В.1.2-14 [3] споруду треба запроектувати так, щоб за умови відповідності проекту і при виконанні правил утримання її складові елементи мали протягом проектного строку служби надійність не нижче від нормованої. Споруда має залишитися придатною до функціонування, спроможно витримувати всі навантаження та впливи, які регламентовано відповідними стандартами і які можуть виникати в процесі спорудження та експлуатації. Проект розробляється з дотриманням таких умов, щоб мінімізувалися можливість руйнування мосту та втрати від ушкодження його елементів у результаті аварій транспорту, пожежі, терористичних актів і людських помилок при експлуатації.

Вимоги надійності згідно ДБН В.2.3-22:2009 [4]

будуть задовольнятися, якщо споруда та її елементи будуть запроектовані згідно з правилами цих норм, які мають за мету регламентувати процедури процесу проектування мостів і труб: належний вибір матеріалів, їх механічних і фізичних характеристик та коефіцієнтів надійності; достовірність фізико-механічних властивостей ґрунту основи; достовірність гідрологічних впливів із заданою забезпеченістю; належне визначення розрахункових комбінацій навантажень та відповідних коефіцієнтів надійності на всіх етапах роботи споруди; застосування достовірних розрахункових моделей; урахування динамічних, аеродинамічних і кліматичних впливів; перевірка елементів за граничними станами I та II груп та належне конструювання елементів споруд.

У зв'язку зі значним темпом зростання автомобільного руху останнім часом збільшується обсяг будівництва автомобільних доріг, в тому числі йдуть інтенсивні роботи із відновлення і реконструкції старих мостів для приведення їх вантажопідйомності і пропускної здатності у відповідність сучасним вимогам. Складні умови будівництва мостів у великих містах (мало місця для будівельного майданчика, неможливість влаштування тимчасових опор без перекриття і так сильно ускладненого руху автомобілів) змушують використовувати у мостобудуванні оригінальні конструкції і новітні технології, які вимагають великого обсягу контрольних вимірювань і додаткового аналізу НДС.

Таким чином, ефективне визначення НДС мостових конструкцій, як в процесі будівництва, так і при різних типах випробувань і в процесі експлуатації, стає вельми актуальним.

Відправною точкою для дослідження виникнення резонансу в спорудах послугувало руйнування моста в м. Анже у 1850 році, коли при переході через міст строем рота солдат марширувала з частотою, що збіглася з власною частотою моста, в результаті чого сталося руйнування. З того часу у зв'язку з розвитком автомобільного та залізничного транспорту динамічний вплив на мостові споруди значно зріс.

У зв'язку з цим потрібно постійно вдосконалювати конструкції мостових споруд та матеріали, з яких їх виготовляють. У процесі експлуатації у мостовій споруді з'являються дефекти і пошкодження, які навіть при короточасному впливі змінюють характер коливань споруд при рухомому навантаженні і можуть вплинути на довговічність споруди.

У цих умовах вивчення і аналіз коливальних процесів транспортних споруд і, перш за все, – автодорожніх мостів під дією рухомого навантаження набуває все більш важливе значення. Розрахунок конструкції на коливання дає можливість не допустити явище резонансу. Зростання амплітуди коливань здатне привести до руйнування конструкції.

Мета роботи. Мета роботи полягає в удосконаленні методів аналізу НДС мостових конструкцій від зовнішніх статичних і динамічних дій за результатами натурних досліджень за рахунок використання сучасних приладів, вимірювальних систем, методик проведення випробувань та аналізу отриманих даних [5].

Для досягнення поставленої мети розв'язуються наступні задачі:

- 1) постановка задач та створення розрахункової моделі мосту для дослідження НДС конструкції;
- 2) створення поверхневої моделі мосту для розрахунків на власні частоти та форми;
- 3) аналіз одержаних результатів та формування висновків.

Результати роботи. Сучасні мости бувають різних конструкцій. Одна з них – арочний міст. Він дає можливість створювати прольоти більшої довжини, ніж балковий міст. Однак такий міст розпирає опори аркою. Тому опори повинні бути масивними, мати велику площу основи, міцний фундамент і по можливості бути не високими (через розпирання арки). Такі мости знаходять застосування в горах, де скелі забезпечують міцну основу і немає можливості побудувати додаткові опори. Однак при їзді посередині або знизу моста є можливість замкнути розпираючі зусилля арки дорожнім полотном – затягуванням. У поданій роботі за основу був узятий комбінований міст (рис. 1), що складається з балочного з гратчастою фермою і арочного. У роботі досліджувалася тільки арочна частина мосту.

Геометрія служить базою для балкової моделі у додатку Nastran In-CAD, де проводились розрахунки напружено-деформованого стану.

Щоб розрахувати балкову модель без додаткових навантажень за допомогою додатку Autodesk Nastran In-CAD, було задано силу тяжіння, яка діє на усю модель, жорстке закріплення опор мосту, взято один переріз на усю конструкцію, був обраний матеріал – Сталь 20.

Задавши граничні умови закріплення та навантаження, а також силу тяжіння та закріпивши конструкцію на опорах мосту, було виконано тестовий розрахунок конструкції на статичну міцність від власної ваги.

Результат даного розрахунку свідчить, що конструкція не зруйнується, бо максимальні напруження становлять 178,6 МПа, а межа міцності матеріалу становить від 340 до 490 МПа.

Для поставленої задачі потрібно було побудувати балкову модель, провести необхідні розрахунки та на її підставі створювати поверхневу модель для проведення розрахунків. На основі фотографії Ханті-Мансійського мосту (рис. 1) будувалась тривимірна модель. Для отримання розрахункової моделі було побудовано геометрію мосту за поверхнею моделі (рис. 2).

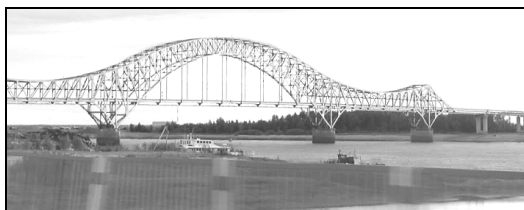


Рисунок 1 – Прототип проекту

На рис. 3 зображено результат розрахунку пере-

міщення конструкції, з якого видно, що максимальні переміщення незначні – 107,9 мм і вони знаходяться у центрі ваги конструкції.

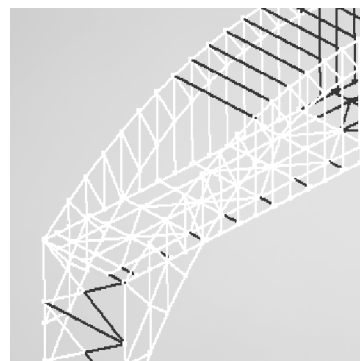


Рисунок 2 – Розрахункова модель

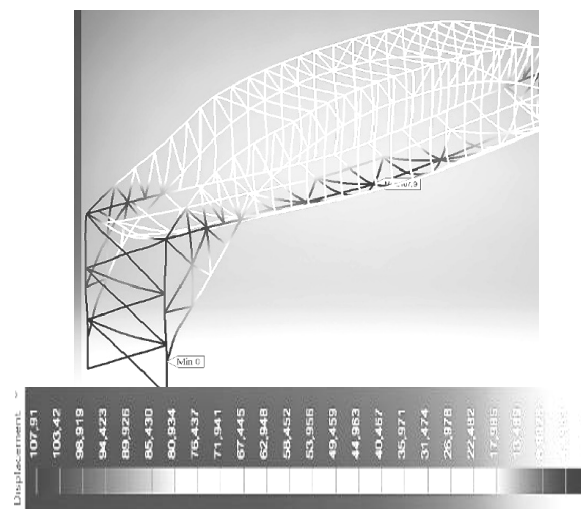


Рисунок 3 – Результат розрахунку переміщення

У результаті першого розрахунку отримано недостатньо раціональні значення без прикладених на міст розподілених навантажень, тобто потрібна більш надійна конструкція.

Для отримання надійності конструкцію було посилено в більшості вузлах за допомогою варіації перерізів. Було додано 13 типів перерізів з урахуванням критичних точок конструкції. За матеріал знову обрана Сталь 20, тип перерізу – двутавр по усій моделі, який є вигідним у питаннях забезпечення міцності і частіше усього застосовується у мостових спорудах.

Після підбору перерізів для різних областей конструкції були проведені розрахунки в програмі Autodesk Nastran In-CAD.

Отримано результати за напруженнями, переміщеннями та по коефіцієнтам запасу. Максимальне еквівалентне напруження становить 98,8 МПа. Отже, конструкція витримує навантаження навіть у небезпечних вузлах. Максимальне значення переміщення становить 59 мм у центральній точці, для мосту довжиною 147 м такий прогин незначний.

Після отримання таких результатів є можливість стверджувати, що отримані дані – це раціональний варіант, більшість показників покращено, а мінімальний показник коефіцієнту запасу становить 3,1.

Отримана конструкція може бути навантажена

ще приблизно у три рази в залежності від своєї ваги, отже, припускається, що ця модель витримає вагу двох складів потягів.

Далі на міст було прикладено розподілене навантаження, рис. 4, що буде рівнозначне навантаженню двох потягів, прийнявши за вагу одного вагону близько 20 т, що становить 177,9 кН. Довжина вагону в середньому 24 м, отже, на один метр розподілене навантаження дорівнює $q = 7414$ Н/м. Тому розподілене навантаження на усю довжину мосту складає $q \cdot 147 = 1089809$ Н/м. Оскільки було два залізничних состави на двох коліях, навантаження збільшується в два рази. Отримане розподілене навантаження $q = 2$ МН/м.

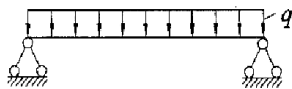


Рисунок 4 – Схема розподіленого навантаження на міст

Результати розрахунку навантаженого мосту мають наступний вигляд: загальне навантаження в небезпечних перерізах становить 98 МПа; максимальні переміщення посередині мосту – 97 мм (рис. 5); мінімальний коефіцієнт запасу – 2,5.

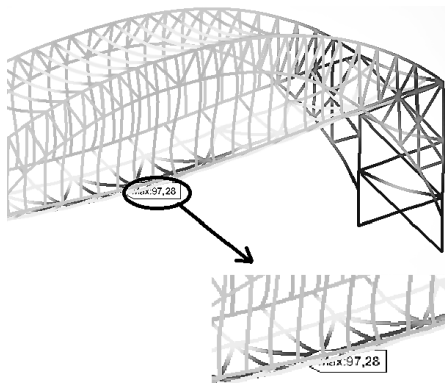


Рисунок 5 – Результати розрахунку переміщень

Отже, конструкцію можна навантажити ще приблизно у 2 рази. Отримані результати задовольняють вимогам щодо міцності та допустимих навантажень.

На основі 3D-ескізу мосту були змодельовані поверхні балок. Для отримання надійності конструкцію було посилено в більшості вузлах за допомогою варіації перерізів. Для отримання результатів будьяких розрахунків, більш приближених до реальності, було побудовано поверхневу модель усєї конструкції, та з початку було створено модель четвертої частини конструкції, це спрощує саме моделювання і час виконаної роботи.

Для отримання цілісної сітки було потрібно відрегувати вузли конструкції, рис. 6. Для отримання усєї конструкції було використано інструмент віддзеркалення, побудувавши для цього поверхню симетрії.



Рисунок 6 – Відрегуований вузол

Таким чином було отримано цілісну модель для розбиття на сітку скінченних елементів.

Далі проект було відкрито у програмі Autodesk Simulation Mechanical і обрано аналіз типу – «Natural (modal) frequency» для розрахунку власних частот і форм. На основі моделі було побудовано сітку.

Для усїх поверхонь мосту було задано товщину, що становила 10 мм, та матеріал Steel і запущено на аналіз власних частот до 10-ї форми.

Для розрахунку були закріплені нижні опори моста. Завдання однакової товщини дозволило провести аналіз цілісності моделі та в разі проблем доопрацювати геометрію. Але в такому випадку змінюється топологія геометрії, і потрібно заново перебудувувати сітку і задавати різні товщини.

Для прикладу на рис. 7 продемонстровано сьому власну форму коливань власної частоти мосту. Як видно з рисунку, модель не руйнується, всі елементи мосту з'єднані у єдине ціле. Частота становить – 0,916 Гц, що обумовлено невеликою товщиною металу при значних габаритах мосту.

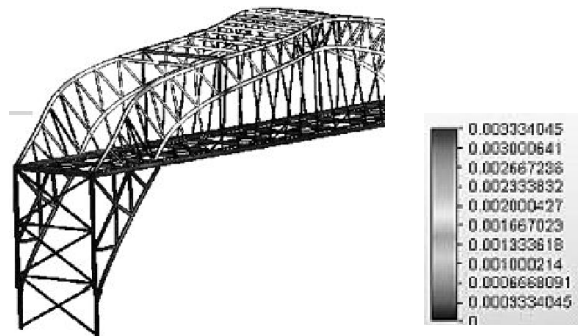


Рисунок 7 – Деформація мосту на сьомій формі коливання

Аналіз власних частот робиться для того, щоб перевірити цілісність розрахункової моделі. Це особливо важливо в разі таких конструкцій, як арочний міст в оболонковій постановці, де дуже багато поверхонь і важко перевірити, щоб усї елементи конструкції були з'єднані.

У результаті розрахунків були отримані наступні власні частоти, наведені у табл. 1. Завдання розрахунку власних частот – визначити частоти, при яких може виникнути резонанс. Суть резонансу полягає в значному посиленні амплітуд вимушених коливань на частотах зовнішніх впливів. Для конструкції класу арочний міст – це критично важливо знати, тому що цей міст розрахований на залізнодорожний проїзд.

Таблиця 1 – Власні частоти

№ форми коливання	Значення, Гц	№ форми коливання	Значення, Гц
1	0,105	6	0,617
2	0,322	7	0,916
3	0,367	8	0,943
4	0,384	9	0,943
5	0,450	10	1,004

Отже, відомі швидкості проїзду потягу, відстань між осями коліс і відстань між колісними візками;

тож можна визначити частоту від мінімальної до максимальної, з якої колеса будуть проїжджати по можливим стикам рейок.

Для виключення резонансу мосту потяг може рухатися або повільно, або на максимальній швидкості. Це зазвичай робиться для виключення збігу частоти ударів коліс по стиках рейок з власною частотою коливань мосту (з цієї ж причини ділянку рейок на мосту часто виконують суцільною, тобто без стиків).

Висновки. При сучасному рівні проектування і будівництва з використанням новітніх проектних рішень і технологій тільки електронні прилади у складі комп'ютерних вимірювальних систем дають можливість отримати найбільш повну картину НДС і дати детальний аналіз отриманих результатів вимірювань.

У ході досліджень було спроектовано удосконалену конструкцію залізничного мосту. Побудовано розрахункову модель мосту, на підставі якої були підібрані перерізи балок, прикладені навантаження та розраховано напружено-деформований стан. Отримано твердотільну модель, яка має приблизні розміри балок і типів перерізу. Результати останнього розрахунку мають наступний вигляд: загальне навантаження в небезпечних перерізах становить 98 МПа; максимальні переміщення по середині мосту – 97 мм; мінімальний коефіцієнт запасу – 2,5. Отже, конструкцію можна навантажити ще приблизно у 2 рази. Отримані результати задовольняють вимогам щодо міцності та допустимих навантажень.

Побудовано поверхневу модель мостової конструкції для отримання результатів будь-яких розрахунків, більш приближених до реальності. Було створено модель четвертої частини конструкції, що спрощувало саме моделювання і час виконання роботи. Для отримання усієї конструкції було використано інструмент віддзеркалення, побудувавши для цього поверхню симетрії. Результати розрахунків власних частот і форм показали, що модель конструкції є цілісною. Для усіх

поверхонь мосту було задано товщину, що становила 10 мм, а також побудовано більш точну поверхневу модель та скінченно-елементну сітку і розраховано на власні частоти до десятої форми конструкції.

Список літератури

1. Овчаренко В. А. Основи методу скінченних елементів і його застосування в інженерних розрахунках / Овчаренко В. А., Подлесний С. В., Зінченко С. М.: Навч. посіб. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – 380 с.
2. Костюченко Т. Г. Расчет собственных частот и форм колебаний конструкций / Костюченко Т. Г., Игнатовская А. А. T-FLEX / Анализ. – Томск. – 2016. – 12 с.
3. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. – Київ. – 2018. – 30 с.
4. ДБН В.2.3-22:2009. Мости та труби. Основні вимоги проектування. Наказ від 11.11.2009 № 484 – 73 с.
5. Хазанов М. Л. Аналіз НДС мостових конструкцій з використанням комп'ютерної вимірювальної системи / М. Л. Хазанов. – М., 2007. – 128с.

References (transliterated)

1. Ovcharenko V. A., Podlesniy S. V., Zinchenko S. M. *Osnovy metodu zakonchennykh elementiv ta yoho zastosuvannya v inzhenernykh rozrakhunkakh* [Fundamentals of the finite element method and its application in engineering calculations] Kramatorsk, Publ., 2008. 380 p.
2. Kostyuchenko T. G., Ignatovskaya A. A. *Raschet sobstvennykh chastot i form personazhey* [Calculation of natural frequencies and vibration patterns of structures] T-FLEX Analiz. Tomsk, 2016. 12 p.
3. DBN V.1.2-14-2018. *Zahal'ni pryntsyppy zabezpechennya nadiynosti ta konstruktivnoyi bezpeky budivel', sporud, budivel'nykh konstruktiv ta osnov* [General principles of maintenance of reliability and constructive safety of buildings, structures, building constructions and bases] Kyiv, Minrehionbud Ukrayiny Publ., 2018. 30 p.
4. DBN V.2.3-22-2009. *Mosty ta truby. Osnovni vymohy proektuvannya* [State Standard V.2.3-22-2009. Transport constructions. Bridges and pipes. Basic design requirements]. Kyiv, Minrehionbud Ukrayiny Publ., 2009. 73 p.
5. Khazanov M. L., *Analiz NDS mostovykh konstruktiv z vykorystannyam komp'yuternoyi vymiryval'noyi systemy* [Analysis of stress-strain state of bridge structures using a computer measuring system] Moscow, Publ., 2007. 128 p.

Надійшла (received) 23.12.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ананій Євгеній Сергійович (Ананьин Евгений Сергеевич, Ananin Evgeniy) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент гр. 2.МІТ212п.8, м. Харків, Україна

Ляшенко Анастасія Сергіївна (Ляшенко Анастасия Сергеевна, Liashenko Anastasiya) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; студентка гр. 2.МІТ212п.8, м. Харків, Україна

Протасов Роман Васильович (Протасов Роман Васильевич, Protasov Roman) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; викладач кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; тел.: (057) 707-64-78; e-mail: protasov@tmm-sapr.org.

Грабовський Андрій Володимирович (Грабовский Андрей Владимирович, Grabovskiy Andrey) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна, <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55446933900>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>; e-mail: andrej8383@gmail.com.