

УДК 62-225-047.37

doi: 10.32620/akt.2024.sup2.07

М. Р. ТКАЧ¹, Ю. М. ГАЛИНКІН¹, Ю. Г. ЗОЛОТИЙ¹, А. А. МОНАХОВ¹,
С. М. ДОЦЕНКО¹, І. Ю. ЖУК²

¹ Національний університет кораблебудування, Миколаїв, Україна

² Чорноморський державний університет імені Петра могили, Миколаїв, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ТА РОЗРАХУНОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРУБЧАТОЇ ДЕТАЛІ З РОЗРІЗАМИ

При створенні сучасних виробів машинобудування значну увагу приділяють параметрам міцності в умовах динамічних навантажень. До таких параметрів належать форми власних коливань, та відповідні їм частоти. Визначення цих параметрів дозволяє виявити небезпечні режими роботи деталі, прогнозувати її міцність, а також форми та частоти коливань є основою для подальших розрахунків. Дана робота присвячена визначенню параметрів динамічної міцності циліндричної деталі діаметром 105 мм, висотою 86 мм, товщиною стінки 2,48 мм, виробленої зі сталі 40. Для цієї деталі визначено форми коливань та відповідні їм частоти спочатку суцільної деталі, потім зроблено чотири прорізи вздовж осі обертання шириною 1 мм на рівній кутовій відстані між ними. Дослідження проведені для прорізів глибиною 0,25, 0,50 та 0,75 від висоти (відповідно 21,5 мм, 43,0 мм та 64,5 мм). Для кожного випадку визначено форми коливань та відповідні їм частоти, які наведені в цій публікації. Визначення форм коливань та відповідних їм частот проведено шляхом моделювання методом скінчених елементів у програмному комплексі SolidWorks. Параметри створеної трьохвимірної моделі наступні: максимальний розмір елемента 4,86389 мм, мінімальний розмір елемента 4,86389 мм, якість сітки: висока, всього вузлів 16913, всього елементів 8096, максимальне співвідношення сторін 4,7645. Для верифікації розрахункових значень проведено експериментальні дослідження з визначення власних частот та форм коливань методом спекл-інтерферометрії реального часу. Для цього використано створений спеціалізований оптичний стенд, оптична схема якого і методика отримання спекл-інтерферограм захищені патентами України. Для прикладу наведені зображення інтерферограм коливальних форм досліджуваного зразка з прорізами 0,50 висоти. Проведено аналіз впливу глибини розрізів з якого видно, що для першої та другої форм частота власних коливань змінюється з 474 Гц до 279 Гц, для третьої – з 722 Гц до 641 Гц, для п'ятої – з 1339 Гц до 561 Гц, зменшення частоти виникнення власних форм коливань пояснюється зменшенням жорсткості досліджуваної деталі.

Ключові слова: форма коливань; частота коливань; трубчата деталь; експериментальні дослідження; комп'ютерне моделювання; розрізи.

Вступ

У техніці широко розповсюджені деталі, які містять у своєму складі елемент трубчатої форми. Це можуть бути оболонкові елементи камер згоряння сучасних ГТД, втулки циліндра ДВЗ, суднові валопроводи, палі, та багато інших [1]. Часто циліндричні конструкції не є суцільними оболонками, а мають вирізи, приєднані маси, ребра жорсткості тощо. Характерною особливістю таких деталей є те, що вони працюють в умовах значних динамічних навантажень, зумовлених їх резонансною вібрацією. Тому встановленню власних частот та форм коливань таких об'єктів приділяється особлива увага [2 - 4]. Адже це дозволяє визначити зони можливих руйнувань елементів машин, рекомендувати безпечні режими їх роботи, верифікувати використані математичні моделі шляхом порівняння теоретично та експериментально отриманих резонансних форм коливань. Це дозволяє оптимізувати конструкцію досліджуваних деталей,

збільшуючи надійність [4]. В деяких конструкціях використано елементи трубчатої конструкцією з перфорованою поверхнею, вплив перфорації на форми коливань показано в роботах [7, 8]. Визначення форм коливань складних багатошарових оболонок показано в роботах [9, 10]. Оскільки трубчата деталь є складною конструкцією, її запропоновано розглянути як даль з двох обичайок, заповнених пористим матеріалом. Порівняльному аналізу пластинчатої та трубчатої структури присвячена робота [11].

Постановка задачі дослідження

Серед трубчатих деталей часто використовуються продовжні прорізи, що безпосередньо впливає на жорсткість конструкції, а значить і на спектр коливань. Тому задачею цього дослідження є визначення впливу глибини прорізу на частоту виникнення форм власних коливань.

Дослідження проведено шляхом комп'ютерного моделювання у програмному комплексі SolidWorks, в якому реалізовано метод кінцевих елементів. Вкладка Simulation дозволяє, окрім лінійного статичного аналізу, виконати частотні дослідження [12]. При проведенні розрахунків частотного дослідження тіло, виведене зі стану спокою, починає коливатися на певних частотах, про власних чи резонансних коливаннях. При кожній своїй частоті тіло приймає певну форму, яка називається формою коливань. При частотному аналізі у SolidWorks, розраховуються власні частоти та асоційовані форми коливань. Надмірна реакція з'являється, якщо тіло піддається впливу динамічного навантаження, що працює на одній із власних частот. Частотний аналіз може допомогти уникнути руйнування, викликаного надмірною напругою, обумовленою резонансом. Він також надає дані для вирішення задач, пов'язаних з визначенням динамічних навантажень.

Статичні дослідження у SolidWorks припускають, що навантаження є постійними або прикладаються дуже повільно, поки вони не досягають повних значень. Внаслідок цього припускається, що швидкість та прискорення кожної частки моделі приймаються нульовими. В результаті статичні дослідження нехтують інерційними силами і силами демпфування. У багатьох практичних випадках навантаження не прикладаються повільно або змінюються з часом або частотою. Для таких випадків використовується динамічне дослідження. Загалом, якщо частота навантаження, якій піддається досліджуваний об'єкт, більша ніж 1/3 найнижчої (основної) частоти, розробником SolidWorks пропонується використовувати динамічне дослідження [11]. Лінійні динамічні дослідження ґрунтуються на частотних дослідженнях. Програмне забезпечення розраховує реакцію моделі у вигляді складання впливів кожної моди на середовище навантаження. У більшості випадків, тільки нижні моди роблять значний внесок у реакцію. Вплив моди залежить від частотного. Як правило, динамічний аналіз виконують при проектуванні структурних та механічних систем для роботи без руйнування у динамічних середовищах, або для модифікації характеристик системи (тобто форми, механізмів демпфування, властивостей матеріалу тощо), щоб зменшити вплив вібрації [11].

У якості об'єкта досліджень розглянуто модель твердого тіла циліндричної форми діаметром 105 мм, висотою 86 мм, товщиною стінки 2,48 мм. Параметри моделі наступні: тип сітки – сітка на твердому тілі, використовуване розбиття – сітка на основі змішаної кривизни, точки Якобіана для сітки високої якості –

16 пікселів, максимальний розмір елемента 4,86389 мм, мінімальний розмір елемента 4,86389 мм, якість сітки: висока, всього вузлів 16913, всього елементів 8096, максимальне співвідношення сторін 4,7645, відсоток елементів із співвідношенням сторін менше трьох 99,7 %, відсоток елементів із співвідношенням сторін більше десяти 0 %.

Моделювання проведено для моделей без розрізу, та моделей з чотирма розрізами вздовж осі, при цьому висота розрізу складала відповідно 0,25, 0,50 та 0,75 висоти (тобто 21,5 мм, 43,0 мм та 64,5 мм). Результати розрахунку зведено до таблиці 1, де m – кількість вузлових ліній вздовж твірної циліндра (паралельно осі обертання), n – кількість перпендикулярних до осі обертання циліндру вузлових ліній. У якості прикладу форми коливань для прорізів глибиною 0,5 висоти наведені на рис. 1.

Верифікацію проведено шляхом порівняння розрахунків та даних прямих експериментальних досліджень. В експериментальних дослідженнях використано метод спеклінтеферометрії реального часу, захищений патентами України [13] Оптична схема наведена на рис. 2.

Таблиця 1

Частота коливань циліндричної обичайки

№	0	0,25	0,50	0,75	n	m
1	474	439	358	249	0	4
2	474	469	402	268	0	4
3	722	663	676	641	1	4
4	722	693	670	641	1	4
5	1339	1269	980	561	0	6
6	1339	1269	980	634	0	6
7	1774	1650	1510	1273	1	6
8	1774	1651	1510	1273	1	6
9	2564	2350	1428	852	0	8
10	2564	2387	1428	1085	0	8
11	3090	2818	1968	1523	1	8
12	3090	2925	2254	1792	1	8

Розроблений та створений експериментальний стенд, що реалізує метод спеклінтеферометрії, працює наступним чином. Промінь лазера 1 з довжиною хвилі 532нм через мікрооб'єктив 2 і світлорозділювач 3 освітлює вібруючий об'єкт 4, рис. 1.

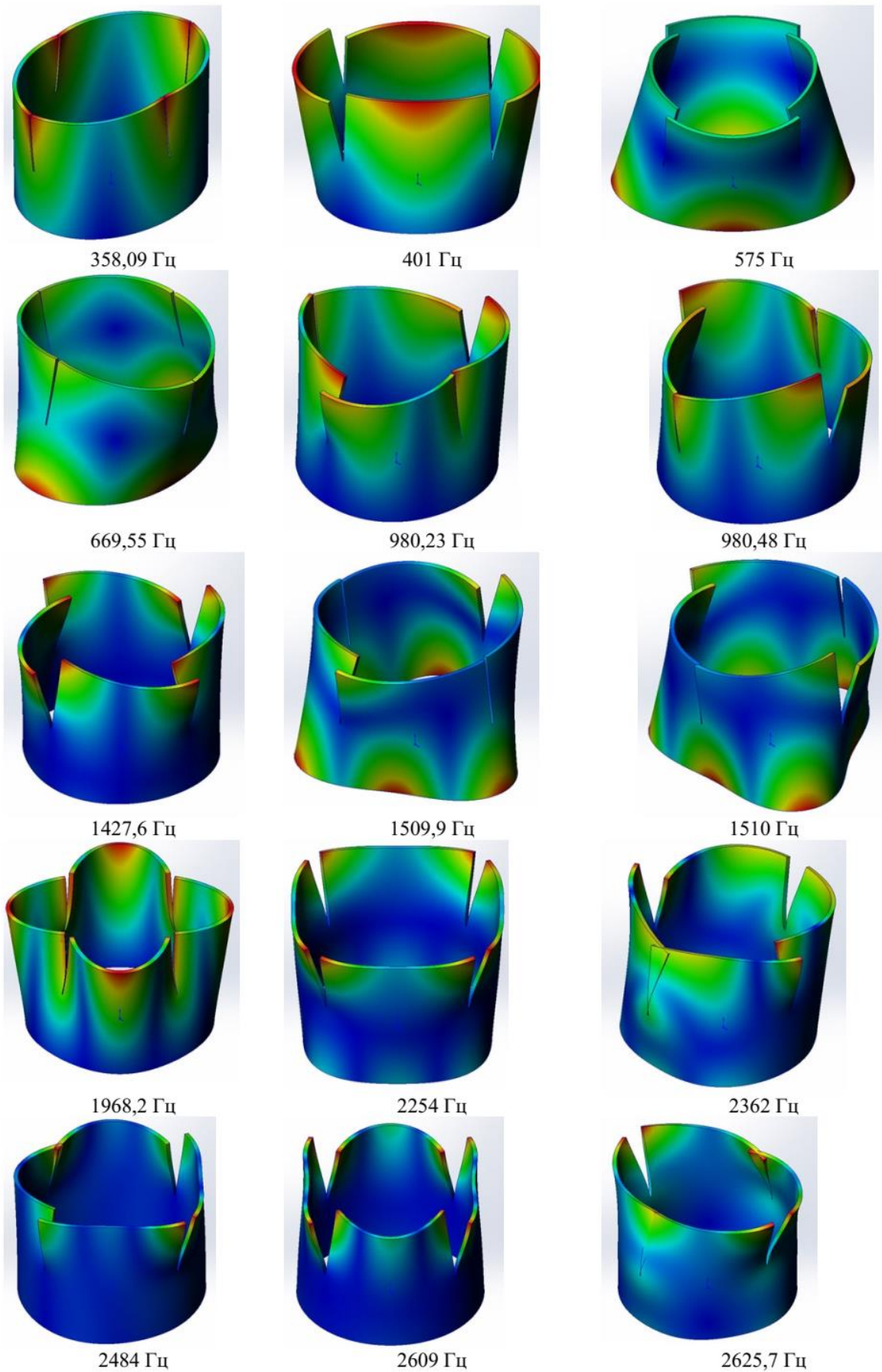


Рис. 1. Форми коливань, отримані шляхом моделювання

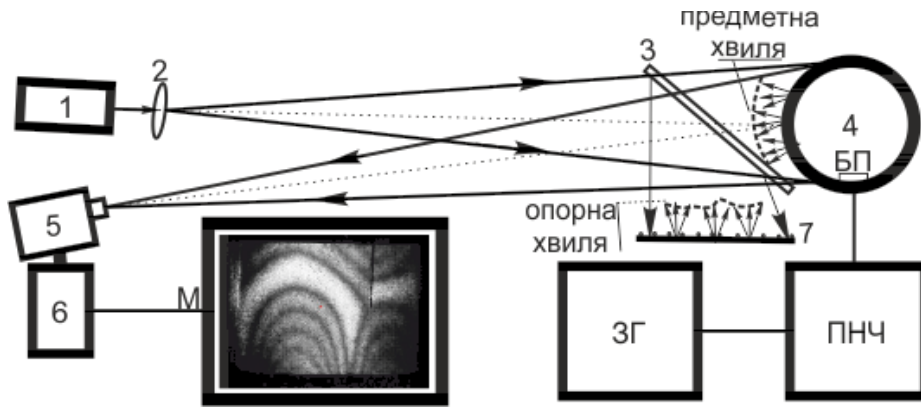


Рис. 2. Оптична схема спекл-інтерферометра і апаратурне забезпечення експериментального стенду

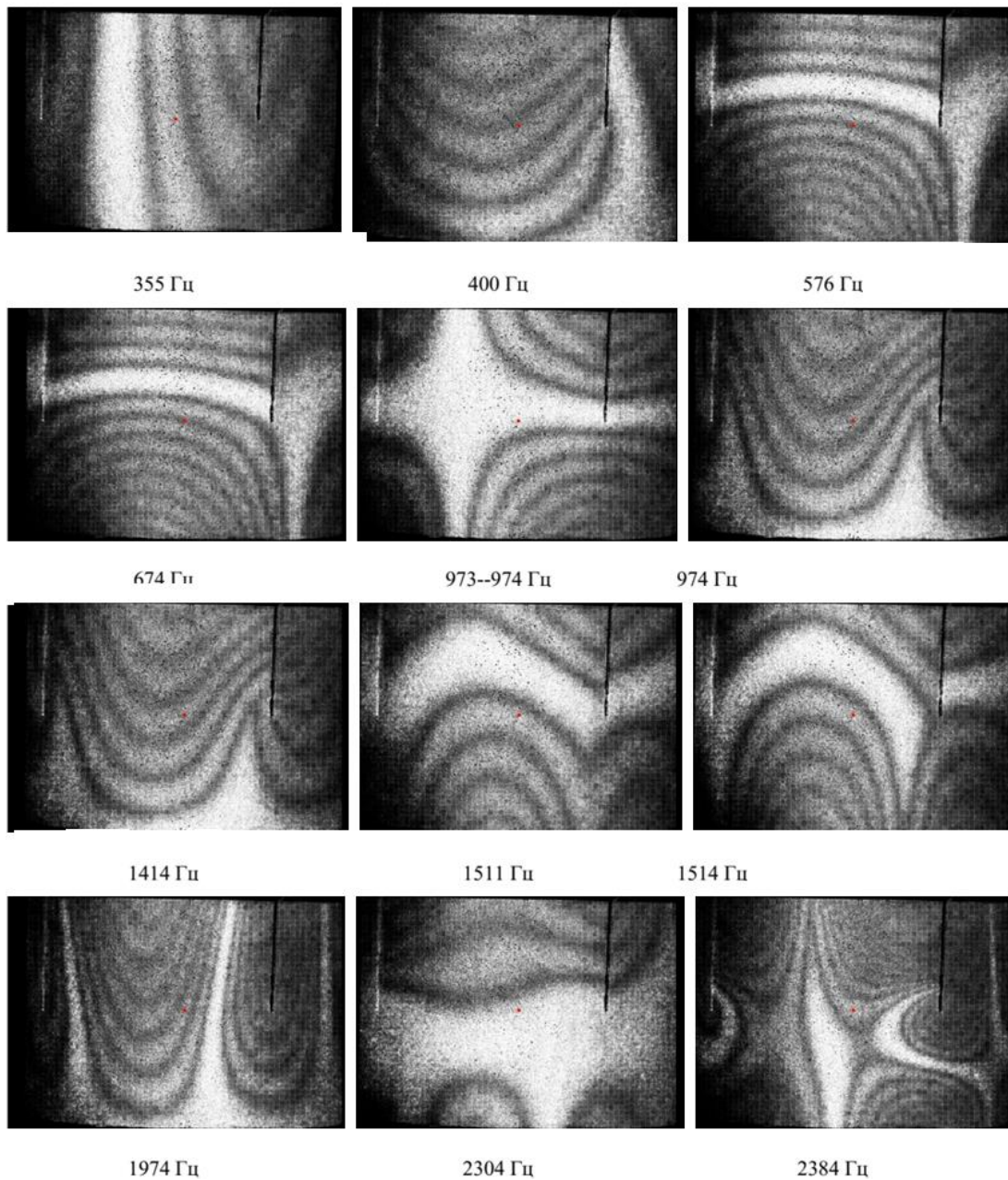


Рис. 3. Форми коливань циліндричної деталі з вирізами 0,5 висоти, отримані з експериментальних досліджень

Дифузно відбита від його поверхні предметна хвиля знову проходить через пластинку світлорозділювача і об'єктивом відеокамери 5 фокусується на світлочутливій поверхні ПЗЗ-матриці в якості предметного спекл-поля. Відбитий світлорозділювачем пучок розсіюється дифузором 7 і, після повторного відбивання світлорозділювачем і заломлення об'єктивом, створює на матриці опорну спекл-структуру. Суміщенні світлорозділювачем і об'єктивом предметний та опорний хвильові фронти інтерферують поточно, формуючи результуюче спекл-поле.

Сигнал збудження коливань задається звуковим генератором ЗГ, при необхідності підсилюється підсилювачем низької частоти ПНЧ та передається на біморфний п'єзоелемент БП діаметром 8 мм, жорстко закріплений на досліджуваному об'єкті. Його маса та жорсткість порівняно з масою та жорсткістю циліндра дуже малі і їх впливом на частоту власних коливань можна знехтувати.

Відеокамера 5 працює в режимі веб-камери і в реальному часі передає на комп'ютер 6 відеопотік 25 кадрів в секунду з роздільною здатністю 720 x 576 точок з розбивкою по яскравості на 256 градацій.

Комп'ютерна програма реалізує алгоритм обробки відеоінформації і формує спекл-інтерферограми коливальних форм запропонованим нами методом визначення контрасту динамічної картини спеклів [5, 11]. Їх зображення в режимі реального часу відтворюються на моніторі М з фіксацією частотного та модального спектрів (рис.3). В першому наближенні смуги на інтерферограмах інтерпретуються як ізольовані вібропереміщення. Точки смуг з максимальною яскравістю відповідають вузлам коливань.

Результатом експериментальних досліджень є ряд зафіксованих форм коливань досліджуваного

об'єкта, див. рис. 3, так для чотирьох вирізів шириною 1 мм на глибину 0,5 висоти показано на рис. 3. З рисунка видно, що в діапазоні 300...2400 Гц отримано дванадцять форм коливань, частота виникнення кожної форми відповідно наведена. Порівнявши результати розрахунків та експериментальних досліджень, бачимо, що середньоквадратичне відхилення становить 60 Гц, або 2,8 %, рис. 5. Такі результати є прийнятними для подальшої обробки

З отриманих даних видно, що для першої та другої форм частота власних коливань змінюється з 474 Гц до 279 Гц, для третьої – з 722 Гц до 641 Гц, для п'ятої – з 1339 Гц до 561 Гц, рис. 6. Змінення частоти пояснюється зменшенням жорсткості циліндричної обичайки, рис.6.

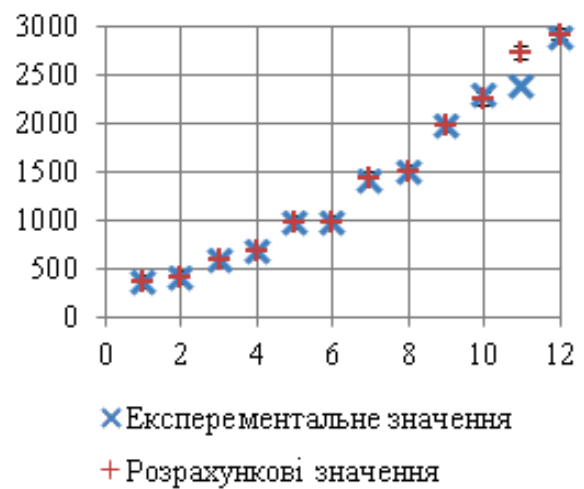


Рис. 4. Експериментальні та розрахункові значення для прорізів 50% висоти

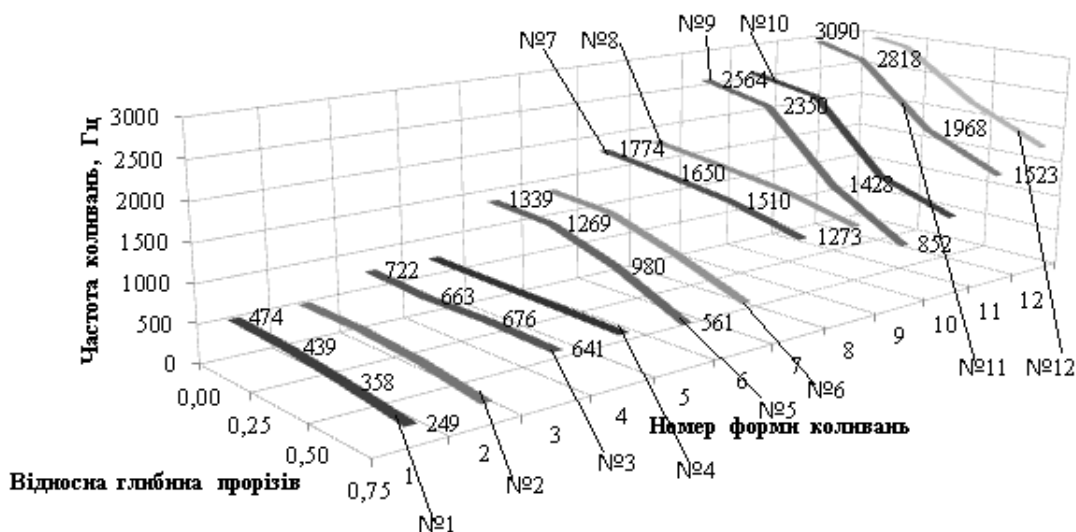


Рис. 5. Вплив глибини прорізу на форми коливань

Висновки

У діапазоні частот 100...2400 Гц виявлено 12 форм коливань експериментально та теоретично.

Встановлено вплив поздовжніх перерізів на частоту та форми коливань: для всіх форм частота виникнення зменшується на 200...1500 Гц, при чому більші значення відповідають більшим значенням розриву.

Теоретичні розрахунки верифіковано експериментальним методом спекл-інтерферометрії реального часу. Середньоквадратичне відхилення становить 2,8 %.

Внесок авторів: формулювання проблеми, організація роботи колективу – **М. Р. Ткач, Ю. Г. Золотий**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **С. М. Доценко, І. Ю. Жук**; розробка дослідницького стенда, проведення експериментальних досліджень – **Ю. Г. Золотий, А. А. Монахов**; верифікація дослідницького стенда, аналіз результатів верифікації – **А. А. Монахов, М. Р. Ткач**; моделювання в програмному комплексі SolidWorks – **Ю. М. Галинкін, І. Ю. Жук**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис не має супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *Применение аддитивных технологий для производства камер сгорания ракетных двигателей [Текст] / М. В. Андриевский, Ю. А. Митиков, С. В. Аджамский, Д. А. Шамровский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 6(141). – С. 17-22. DOI: 10.32620/akt.2017.6.03.*

2. *Кесарийский, А. Г. Применение лазерно-интерференционных методов для исследования цилиндров поршневого двигателя [Текст] / А. Г. Кесарийский // Двигатели внутреннего сгорания. – 2004. – №1 (4). – С. 117-119.*

3. *Кесарийский, А. Г. Голографические исследования деформации блока цилиндров двигателя внутреннего сгорания [Текст] / А. Г. Кесарийский // Авиационно-космическая техника и технология. – 1999. – № 9. – С. 335.*

4. *Двирник, Я. В. Оценка предельного состояния лопаток компрессора вертолетных ГТД по частоте собственных колебаний [Текст] / Я. В. Двирник, & Д. В. Павленко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2016. – № 7(134). – С. 79-83.*

5. *Кесарийский, А. Г. Оптимизация деталей и узлов конструкции в процессе изготовления [Текст] / А. Г. Кесарийский // Вісник двигунобудування. – 2003. – №2. – С. 176-178.*

6. *An Experimental Study of the Vibrational Characteristics of a Diamond Circular Blade Using Electronic Speckle-Pattern Interferometry and FEM [Text] / M. Tkach, Y. Halynkin, A. Proskurin [et al] // Acta Mechanica et Automatica. – 2021. – P. 16-23. DOI: 10.2478/ama-2021-0003.*

7. *Free vibration analysis of functionally graded double-beam system using HAAR wavelet discretization method [Text] / G. Kim, P. Han, K. An [et al] // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2021. – Vol. 24, Iss. 2. – P. 414-427. DOI: 10.1016/j.jestch.2020.07.009.*

8. *Giania, S. Free vibration of perforated cylindrical shells of revolution: Asymptotics and effective material parameters [Text] / S. Giania, H. Hakula // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. – 2023. – Vol. 403(2). – P. 1-22. DOI: 10.1016/j.cma.2022.115700.*

9. *Gulizzi, V. High-order accurate transient and free-vibration analysis of plates and shells [Text] / V. Gulizzi, I. Benedetti, A. Milazzo // Journal of Sound and Vibration. – 2024. – Vol. 587. – P. 2-19. DOI: 10.1016/j.jsv.2024.118479.*

10. *Mechanical property of cylindrical sandwich shell with gradient core of entangled wire mesh [Text] / X. Xue, C. Zheng, F. Lai, X. Wu // Defence Technology. – 2024. – Vol. 31. – P. 510-522. DOI: 10.1016/j.dt.2023.01.003.*

11. *Research on seismic performance of honeycomb plate cylindrical reticulated shell structure [Text] / T. Zheng, L. Yuan, C. Zhao [et al] // Case Studies in Construction Materials. – 2023. – Vol. 18. – Article no. e01897. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e01897.*

12. *SolidWorks* [Electronic resource]. – Available at: <https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-simulation>. (accessed 20.05.2024).

13. Пат. UA 146326 Україна. Пристрій з підвищеною звадостійкістю для дослідження коливань конструкцій методом електронної спеклінтерферометрії [Текст] / М. Р. Ткач, Ю. Г. Золотий, А. Ю. Проскурін, Ю. М. Галинкін, І. Ю. Жук, В. С. Ключник. - № u202006205; заявл. 25.09.2020; опубл. 10.02.2021. – Бюл. № 6.

References

1. Andrievskij, M. V., Mitikov, Ju. A., Adzhamskij, S. V., & Shamrovskij, D. A. Primenenie additivnyh tehnologij dlja proizvodstva kamer sgoraniya raketnyh dvigatelej [Application of additive technologies for the production of combustion chambers of rocket engines]. *Aviacijno-kosmichna texnika i tehnologiya - Aerospace Technic and Technology*, 2017, no. 6 (141), pp. 17-22. DOI: 10.32620/akt.2017.6.03.
2. Kesarijskij, A. G. Primenenie lazerno-interferencionnyh metodov dlja issledovanija ci-lindrov porshnevoogo dvigatelja [Application of laser interference methods to study piston engine cylinder]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya - Internal Combustion Engines*, 2004, no. 1 (4), pp. 117-119.
3. Kesarijskij, A. G. Golograficheskie issledovanija deformacii bloka cilindrov dvigatelja vnutrennego sgoraniya [Holographic studies of internal combustion engine cylinder block deformation]. *Aviacijno-kosmichna texnika i tehnologiya - Aerospace Technic and Technology*, 1999, no. 9, pp. 335.
4. Dvirnik, Ja. V., & Pavlenko, D. V. Ocenka predelnogo sostoja-nija lopatok kompressora vertoletnyh gtd po cha-stote sobstvennyh kolebanij [Estimation of the limiting state of helicopter compressor blades based on natural vibration frequency]. *Aviacijno-kosmichna texnika i tehnologiya - Aerospace Technic and Technology*, 2016, no. 7 (134), pp. 79-83.
5. Kesarijskij, A. G. Optimizacija detalej i uzlov konstrukcii v processe izgotovlenija [Optimization of

parts and structural units during the manufacturing process]. *Visnik dvigunobuduvannja - Herald of Aeroenginebuilding*, 2003, no. 2, pp. 176-178.

6. Tkach, M., Halynkin, Y., Proskurin, A., Kluchnyk, V., & Bobylev, I. An Experimental Study of the Vibrational Characteristics of a Diamond Circular Blade Using Electronic Speckle-Pattern Interferometry and FEM, *Acta Mechanica et Automatica*, 2021, pp. 16-23. DOI: 10.2478/ama-2021-0003.

7. Kim, G., Han, P., An, K., Choe, D., Ri, Y., & Ri, H. Free vibration analysis of functionally graded double-beam system using HAAR wavelet discretization method. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2021, vol. 24, iss. 2, pp. 414-427. DOI: 10.1016/j.jestch.2020.07.009.

8. Giania, S., & Hakula, H. Free vibration of perforated cylindrical shells of revolution: Asymptotics and effective material parameters. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*, 2023, vol. 403(2), pp. 1-22. DOI: 10.1016/j.cma.2022.115700.

9. Gulizzi, V., Benedetti, I., Milazzo, A. High-order accurate transient and free-vibration analysis of plates and shells. *Journal of Sound and Vibration*, 2024, vol. 587, pp. 2-19. DOI: 10.1016/j.jsv.2024.118479.

10. Xue, X., Zheng, C., Lai, F., Wu, X. Mechanical property of cylindrical sandwich shell with gradient core of entangled wire mesh. *Defence Technology*, 2024, vol. 31, pp. 510-522. DOI: 10.1016/j.dt.2023.01.003.

11. Zheng, T., Yuan, L., Zhao, C., Shang, L., Zhao, W. Research on seismic performance of honeycomb plate cylindrical reticulated shell structure. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, vol. 18, article no. e01897. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e01897.

12. *SolidWorks*. Available at: <https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-simulation>. Data zvernennja (accessed 20.05.2024).

13. Tkach, M. R., Zolotyj, Yu. G., Proskurin, A. Yu., Galy`nkin, Yu. M., Zhuk, I. Yu., & Klyuchny`k, V. S. Pry`strij z pidvy`shhenoyu zavadostijkistyu dlya doslidzhennya koly`van` konstrukcij metodom elektronnoyi speklinterferometriyi [A device with increased interference resistance for studying the vibrations of structures by the method of electronic speckle interferometry]. *Patent UA № 146326*, 2021.

Надійшла до редакції 24.06.2024, розглянута на редколегії 15.08.2024

EXPERIMENTAL AND CALCULATION STUDY OF A TUBULAR PART WITH SECTIONS

Mykhailo Tkach, Yurii Halynkin, Yuriy Zolotyy, Andriy Monakhov, Serhiy Dotsenko, Iryna Zhuk

When creating modern engineering products, considerable attention must be paid to strength parameters under dynamic loads. Such parameters include the forms of self-oscillations and their corresponding frequencies. Determining these parameters allows us to identify dangerous modes of operation of the part and predict its strength, as well as

the shape and frequency of oscillations, which are the basis for further calculations. This work was devoted to determining the parameters of the dynamic strength of a cylindrical part with a diameter of 105 mm, height of 86 mm, and wall thickness of 2.48 mm made of 40 steel. For this part, the forms of the oscillations and the corresponding frequencies of the solid part were first determined. Then, four slits were made along the axis of rotation 1 mm wide at an equal distance between them. Studies were conducted for slots with depths of 0.25, 0.50, and 0.75 from the height (21.5 mm, 43.0 mm, and 64.5 mm, respectively). For each case, the forms of the oscillations and their corresponding frequencies are determined, as presented in this study. The forms of the oscillations and their corresponding frequencies were determined by finite element modeling in the SolidWorks software complex. The parameters of the created three-dimensional model were as follows: maximum element size of 4.86389 mm; minimum element size of 4.86389 mm; mesh quality: high; total nodes of 16913; total elements of 8096; maximum aspect ratio of 4.7645. To verify the calculated values, experimental studies were conducted to determine natural frequencies and forms of oscillations using the real-time speckle interferometry method. For this purpose, specialized equipment developed at the National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov was used, the design of which was protected by a patent from Ukraine. For example, images of interferograms of the oscillating forms of the studied sample with slits of 0.50 height are presented. A comparative analysis of the effect of the depth of cuts was carried out, from which it can be seen that for the first and second forms, the frequency of natural oscillations changes from 474 Hz to 279 Hz, for the third from 722 Hz to 641 Hz, and for the fifth from 1339 Hz to 561 Hz, a decrease in the frequency of occurrence of natural forms of oscillations is explained by a decrease in the stiffness of the studied part, and the corresponding dependences are shown in the form of a graph.

Keywords: vibration mode; vibration frequency; tubular part; electronic speckle pattern interferometry; FEM simulation.

Ткач Михайло Романович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Галинкін Юрій Миколайович – канд. техн. наук, доц. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Золотий Юрій Григорович – зав. лаб. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Монахов Андрій Анатолійович – асп. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Доценко Сергій Михайлович – доц. каф. енергетичного машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Первомайськ, Україна.

Жук Ірина Юрївна – старш. викл. каф. гігієни, соціальної медицини, громадського здоров'я та медичної інформатики, Чорноморський державний університет імені Петра Могили, Миколаїв, Україна.

Mykhailo Tkach - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Engineering Mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: mykhaylo.tkach@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4944-7113.

Yurii Halynkin - PhD, Associate Professor at the Department of Engineering Mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: yurii.galynkin@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5272-4156.

Yuriy Zolotoy – Head of the Laboratory of the Department of Engineering Mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: goldspekl@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6292-6624.

Andriy Monakhov - PhD Student of the Department of Engineering Mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: monachow88@gmail.com, ORCID: 0009-0000-8525-0102.

Serhiy Dotsenko - Associate Professor of the Department of Power Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Pervomaisk, Ukraine, e-mail: dotsenkosm2016@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2913-3790.

Iryna Zhuk – Senior Lecturer at the Department of Hygiene, Social Medicine, Public Health and Medical Informatics, Petro Mohyla Black Sea State University, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: Iryna.zhuk@chmnu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-7350-1944.