

УДК 539.3

СТІЙКІСТЬ ВАЛІВ, ЩО ЗНАХОДЯТЬСЯ ПІД ДІЄЮ ПЕРІОДИЧНИХ ПОЗДОВЖНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

П.П. Лізунов,

д-р техн. наук, професор

Г.М. Іванченко,

д-р техн. наук, професор

В.О. Недін,

канд. техн. наук, доцент

*Київський національний університет будівництва і архітектури
Повітрофлотський просп., 31, м. Київ. 03680*

DOI: 10.32347/2410-2547.2021.107.257-264

В роботі наведені результати дослідження впливу гармонійних періодичних поздовжніх навантажень на стійкість вала валопроводу. Такі навантаження можуть виникати під час руху судна при проходженні зон турбулентності з боку гвинта на валопровід. Також у валопроводах періодичним може бути вплив коливального руху сусідньої ділянки, який передається через з'єднувальну муфту завдяки поздовжнім переміщенням. Тому актуальним є питання стійкості таких валів при обертанні. При цьому можливі різноманітні форми коливань і втрати стійкості. У зв'язку з цим дослідження здійснено, використовуючи розроблене програмне забезпечення, в якому реалізована методика комп'ютерного моделювання коливального руху стержнів значної довжини, що обертаються під дією поздовжніх періодичних навантажень. Таке програмне забезпечення дозволяє моделювати коливальний рух валів, а також визначати параметри, при яких може відбутися втрата динамічної стійкості змодельованої системи. За допомогою зазначеного програмного забезпечення побудовані діаграми, що відображають області стійкого та нестійкого рухів стержня, якими моделюється робота ділянки валопроводу при різних параметрах системи. Процес коливального руху розглянуто у просторі з урахуванням інерційних навантажень та геометричної нелінійності стержня. Показано, що при певних значеннях швидкостей обертань і частот дії періодичного навантаження існують області нестійкого руху, при яких експлуатація обладнання може неминуче призвести до його руйнування. Здійснено аналіз отриманих результатів та зроблено висновок про можливість експлуатації обладнання у певних діапазонах частот.

Ключові слова: геометрична нелінійність, інерційні навантаження, поздовжні навантаження, динамічна стійкість, чисельне диференціювання.

Вступ. Задачі динаміки стержнів, що обертаються, а також стержнів, що знаходяться під дією поздовжніх періодичних і ударних навантажень, досліджені в роботах багатьох авторів. У роботі [10] розглянуті статика і динаміка стержня при поздовжньому навантаженні. Досліджені умові виникнення параметричних резонансів і встановлена можливість втрати стійкості при навантаженні, що менше за Ейлереве. В роботі [11] розглянута динаміка роботи стержня при короткотривалому поздовжньому ударі. В лінійній постановці знайдені умови виникнення параметричного резонансу, побудовані області нестійкості в площині «довжина стержня-навантаження» та обчислені характеристичні показники. В статті [3] розглядається задача удару пружним тілом по кінцю пружного стержня. В залежності від

параметрів задачі теоретично і експериментально визначаються: час, форма ударного імпульсу та максимальна амплітуда поперечних коливань при параметричному резонансі. В [4] розглянута задача про динамічну стійкість шарнірно обертого стержня в разі дії стрибкоподібного осьового навантаження. Застосовано метод розкладання в ряд за формами вільних коливань як для поздовжніх, так і для згинальних коливань. Побудовані області нестійкості, від яких залежить від спектральних властивостей поздовжніх і згинальних коливань, величини демпфірування і поздовжньої сили. В [5] розглядається поздовжній удар по тонкому пружному стержню, що породжує в ньому періодичну систему поздовжніх хвиль. Проведено якісний аналіз рішення, знайдена величина максимального поперечного прогину в залежності від способу навантаження. Розглянуто як короткочасний, так і тривалий імпульси. Показано, що в разі раптово прикладеного тривалого імпульсу, меншого за Ейлереву критичну силу, можливий розвиток інтенсивних поперечних коливань.

У роботі [12] розглянуті просторові коливання горизонтального стержня при періодичному гармонійному впливі розподіленої по довжині сили власної ваги. Задача також розглянута з урахуванням гіроскопічних навантажень. У [13] досліджена проблема пружної стійкості валів при циклічній зміні зовнішніх впливів, що виникають внаслідок наявності ексцентриситетів. Задача розглянута з урахуванням гіроскопічних навантажень, в лінійній постановці.

В монографії [1] приведені результати чисельних досліджень динамічної поведінки віброударної системи, яка є сильно нелінійною негладкою розривною динамічною системою. Надані результати спостережень багатьох цікавих явищ, зокрема таких, які є унікальними для негладких систем. Знайдені зони стійкого та нестійкого рухів із застосуванням методу продовження розв'язку за параметром і мультиплікаторів Флоке. Описані: розривні біфуркації; ефект гістерезису; сценарії квазіперіодичного переходу до хаосу та переходу до хаосу через переміжність К перехідний хаос; гранична криза; рідкісний атрактор; перехідні режими. Виконаний порівняльний аналіз методів моделювання удару у віброударних системах з твердим (жорстким) та м'яким ударами.

В роботі [15] наведені результати дослідження коливального руху стержня, що моделює роботу бурильної колони при обертанні після виведення його зі стану рівноваги. Відмічено, що дія зосередженої на нижньому кінці вагомому стержня сили, що стискає, призводить до збільшення амплітуди вигину стержня в його нижній частині, в наслідок чого починає відбуватися закручування стержня.

У [8] представлено результати чисельного дослідження впливу дії періодичної поздовжньої сили на поперечні коливання довгих стержнів, що обертаються. Коливальний рух розглянуто в просторі з урахуванням дії гіроскопічних сил і геометричної нелінійності стержня. Для досліджуваних об'єктів показано, що на різних швидкостях обертання та частотах дії ударного поздовжнього навантаження, коливальний рух відбувається з неоднаковою поведінкою. На певних швидкостях, з різною частотою дії

осьового навантаження, коливання мають встановлену періодичність і виникають із биттями, що є результатом дії періодичної осьової сили.

В [14] досліджено вплив поздовжніх ударних навантажень на характер поперечних коливань робочих органів перфраторів, що мають значну гнучкість. Наведені діаграми, які відображають області стійкого та нестійкого рухів стержнів при різних параметрах і граничних умовах.

У роботі [9] досліджується динамічна поведінка робочих органів вібробурильних агрегатів під дією поздовжнього ударного навантаження. Такі задачі виникають при бурінні свердловин через тверді прошарки геологічних порід або порід із включенням великоуламкових матеріалів. Процес буріння таких свердловин суттєво полегшується у разі дії віброударного навантаження. Оскільки руйнування породи при такому бурінні відбувається через спільний вплив віброударних імпульсів і обертального руху, актуальним стає питання стійкості стержня робочого органа бурового пристрою, а саме, при яких швидкостях обертань і частотах дії поздовжніх ударних навантажень може відбутися втрата його стійкості, розпочатися інтенсивний коливальний рух, що, в свою чергу, зможе призвести до виходу обладнання з ладу або його руйнування.

При дослідженні динаміки об'єктів, що розглядаються, цікавим є питання дослідження параметричних коливань стержнів і валів під дією періодичних поздовжніх гармонійних навантажень.

В даній роботі досліджується динамічна поведінка ділянки валопроводу при дії періодичного поздовжнього навантаження з боку гвинта на вал при проходженні зон турбулентності.

Постановка задачі. При здійсненні коливального руху валів та стержнів значної довжини, що обертаються, можливі різноманітні форми вигину, що змінюються в часі при різних фізичних, геометричних і динамічних параметрах.

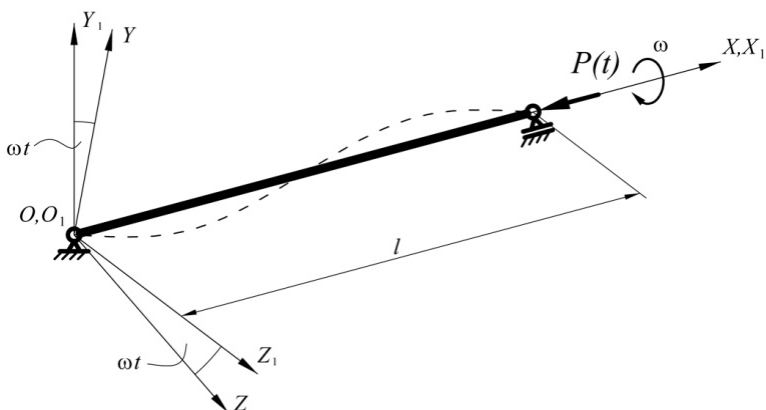


Рис. 1. Динамічна модель системи

В якості динамічної моделі розглянемо стержень довжиною l (рис. 1), на який діє періодичне поздовжнє навантаження $P(t)$. Стержень

обертається з кутовою швидкістю ω навколо прямолінійної осі O_1X_1 нерухомої системи координат $O_1X_1Y_1Z_1$. Зі стержнем пов'язана рухома система координат $OXYZ$. Коливальний рух стержня в системі координат $OXYZ$ характеризується переміщеннями $y(x,t)$ і $z(x,t)$ точок, що належать його осі, у напрямку координатних осей OY та OZ відповідно.

Коливальний рух стержня в системі координат $OXYZ$ описується відповідними рівняннями, які, з урахуванням геометричної нелінійності та дії поздовжнього навантаження, мають вигляд [6, 14]:

$$\begin{cases} \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{EI_{1(x)}}{\rho_1} \right) - \bar{m}r^2 \left(\frac{d^4 y}{dt^2 dx^2} + \omega^2 \frac{d^2 y}{dx^2} \right) - 2\omega \bar{m} \frac{dz}{dt} - \bar{m}\omega^2 y + \bar{m} \frac{d^2 y}{dt^2} + P(t) \frac{d^2 y}{dx^2} = 0 \\ \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{EI_{2(x)}}{\rho_2} \right) - \bar{m}r^2 \left(\frac{d^4 z}{dt^2 dx^2} + \omega^2 \frac{d^2 z}{dx^2} \right) + 2\omega \bar{m} \frac{dy}{dt} - \bar{m}\omega^2 z + \bar{m} \frac{d^2 z}{dt^2} + P(t) \frac{d^2 z}{dx^2} = 0, \end{cases}$$

де E – модуль пружності матеріалу стержня; I_1, I_2 – моменти інерції перерізу стержня у взаємно перпендикулярних площинах; r – радіус інерції перерізу стержня; \bar{m} – маса одиниці довжини стержня; ω – швидкість обертання стержня навколо осі, що співпадає з його віссю у недеформованому стані; $P(t) = \cos(\theta t)$ – зовнішнє періодичне поздовжнє гармонійне навантаження; $1/\rho_1, 1/\rho_2$ – головні кривини осі стержня у взаємно перпендикулярних площинах.

Методика дослідження. Для дослідження динаміки об'єктів, що розглядаються, використовується методика, яка описана в роботах [7, 14]. Згідно з цією методикою моделювання коливань при обертанні здійснюється на основі багатократного (циклічного) розв'язку системи рівнянь коливального руху для кожної точки механічної системи з метою пошуку нових координат положення цих точок у кожний наступний момент часу $t + \Delta t$.

Реалізація методики здійснена за допомогою розробленої авторами комп'ютерної програми з графічним інтерфейсом, яка дозволяє: досліджувати динаміку змодельованої системи шляхом обчислення і

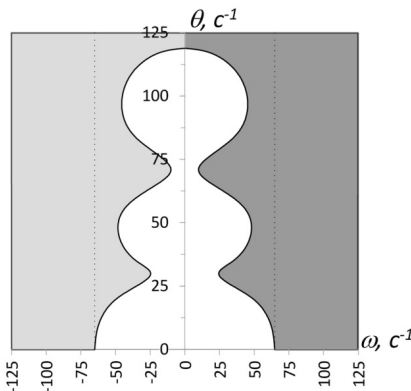


Рис. 2. Области динамічної стійкості вала довжиною $l = 5,8$ м

побудови у її вікні поточних форм вигину стержнів при коливанні; здійснювати аналіз динамічної поведінки; виявляти області стійкого та нестійкого рухів; будувати діаграми цих областей.

Результати. В даній роботі, використовуючи зазначену програму, здійснено дослідження динаміки ділянки приводу гвинта судна. Розглянуто роботу вала в діапазоні швидкості обертання $n = 1200 \dots 1200$ об./хв., з частотою дії гармонійного навантаження

$\theta=0 \dots 125 \text{ c}^{-1}$. Вал діаметром $d=0,17 \text{ м}$ і довжиною $l=5,8 \text{ м}$.

На діаграмі (рис. 2) в координатній площині ω , θ відображені області стійкого та нестійкого коливального руху в залежності від співвідношення швидкості обертання ω і частоти θ , що були визначені для зазначеного об'єкту дослідження при різних значеннях довжин стержня.

На діаграмі сірим кольором відображені області нестійкого руху, білим – стійкого. Чорною лінією, відповідно, границя області стійкого руху.

Як видно з діаграми, в робочому діапазоні швидкостей обертань і частот дії поздовжнього періодичного навантаження існують області нестійкого коливального руху. Характерним є те, що при збільшенні швидкості обертання граничне значення частоти поздовжнього навантаження, при якому є можливим стійкій коливальний рух, відповідно зменшується. При частоті дії поздовжнього навантаження θ поблизу 30 c^{-1} та 70 c^{-1} нестійка робота обладнання може розпочатися при значно менших швидкостях обертання вала, ніж при інших діапазонах частот θ .

Висновок. Представлені результати досліджень впливу поздовжніх періодичних навантажень на стійкість валу, що обертаються у просторі, на прикладі валу ділянки валопроводу привода гвинта судна ілюструють, що при певних співвідношеннях частот обертання та частот впливу поздовжнього навантаження існують області нестійкого руху, при яких експлуатація обладнання може неминуче призвести до виведення його з ладу. Безпечна експлуатація можлива в діапазонах частот, що знаходяться в області стійкого коливального руху, які відображені на діаграмі залежності частоти дії поздовжнього навантаження від швидкості обертання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Баженов В.А., Погорелова О.С., Постнікова Т.Г.* Хаос та сценарії переходу до хаосу у віброударній системі / В.А. Баженов, О.С. Погорелова, Т.Г. Постнікова – Київ: Вид-во «Каравела», 2019. – 146 с.
2. *Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М.* Численные методы. – М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2015. – 639 с.
3. *Беляев А.К.* Динамика стержня при продольном ударе телом / А.К. Беляев, Ч.-Ч. Ма, Н.Ф. Морозов, П.Е. Товстик, Т.П. Товстик, А.О. Шурпапов // Вестник СПбГУ. Математика. Механика. Астрономия. – 2017. Т. 4 (62). Вып. 3. – С. 506-515.
4. *Беляев А.К.* Динамический подход к задаче Ишлинского–Лаврентьева / А.К. Беляев, Д.Н. Ильин, Н.Ф. Морозов // Механика твердого тела. – 2013. № 5. – С. 28-33.
5. *Беляев А.К.* Параметрические резонансы в задаче о продольном ударе по тонкому стержню / А.К. Беляев, Н.Ф. Морозов, П.Е. Товстик, Т.П. Товстик // Вестник СПбГУ. Сер. 1. Т. 3 (61). – 2016. Вып. 1. – С. 77-94.
6. *Болотин В.В.* Динамическая устойчивость упругих систем. – М., Изд-во технико-теоретической литературы, 1956. – 600 с.
7. *Лізунов П.П., Недін В.О.* Вплив гіроскопічних сил на коливальний рух валів при обертанні // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2020. – Вип. 105. С. 199 – 209.
8. *Лізунов П.П., Недін В.О.* Параметричні коливання пружних стержнів, що обертаються, під дією періодичних поздовжніх сил // Управління розвитком складних систем. – 2020. – № 44. – С. 56 – 64.
9. *Лізунов П.П., Недін В.О.* Стійкість стержнів, що обертаються, під дією віброударного навантаження // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2021. – Вип. 106. С. 113 – 121.

10. *Морозов Н.Ф.* Статика и динамика стержня при продольном нагружении / Н.Ф. Морозов, П.Е. Товстик, Т.П. Товстик // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2014. – Том 7, №1. – С. 76–89.
11. *Морозов Н.Ф.* Динамика стержня при кратковременном продольном ударе / Н.Ф. Морозов, П.Е. Товстик // Вестник СПбГУ. – 2013. – Вып. 3. С.131–141.
12. *Муницын А.И.* Пространственные изгибные колебания стержня, вращающегося вокруг своей оси. // Математическое и компьютерное моделирование машин и систем. – 2008. С.64–67.
13. *Муртазин И.Р.* Исследование изгибных колебаний вращающихся валов с распределенными инерционными, упругими и эксцентриситетными характеристиками / И.Р. Муртазин, А.В. Лукин, И.А. Попов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2019. – Том 19, №14. С.756–766.
14. *Недін В.О.* Параметричні коливання стержнів, що обертаються під дією поздовжнього ударного навантаження // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2020. – Вып. 104. С. 309 – 320.
15. *Недін В.О.* Чисельне диференціювання складних форм вигину стержнів значної довжини при обертанні // Управління розвитком складних систем. – 2020. – № 43. – С. 110–115.
16. *Maurice Petyt.* Introduction to Finite Element Vibration Analysis. Cambridge University Press, 1990. – 558 p.
17. *Yimin Wei.* Influence of Axial Loads to Propagation Characteristics of the Elastic Wave in a Non-Uniform Shaft / Yimin Wei, Zhiwei Zhao, Wenhua Chen and Qi Liu // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2019 – No. 32:70. P.13.

REFERENCES

1. *Bazhenov V.A., Pohorelova O.S., Postnikova T.G.* Khaos ta stsenariyi perekhodu do khaosu u vibroudarniy systemi (Chaos and scenarios of transition to chaos in the vibratory system). – Kyiv: Vyd-vo «Karavela», 2019. – 146 pp.
2. *Bakhvalov N.S., Judkov N.P., Kobelkov G.M.* Chislennyye metody. M.: BINOM, Laboratoriya znaniy, 2015, 639 pp.
3. *Belyaev A.* Dynamics of rod under axial impact by a body / Alexander K. Belyaev, Chien-Ching Ma, Nikita F. Morozov, Petr E. Tovstik, Tatiana P. Tovstik, Anatoly O. Shurpatov // Vestnik SPbGU. Matematika. Mekhanika. Astronomiya. – 2017. V. 4 (62). –P. 506-515.
4. *Belyaev A.* Dinamicheskii podkhod k zadache Ishlinskogo–Lavrent'yeva / A.K. Belyaev, D.N. Il'in, N.F. Morozov // Mekhanika tverdogo tela. – 2013. No. 5. – P. 28-33.
5. *Belyaev A.* Parametric resonances in the problem of longitudinal impact on a thin rod / Alexander K. Belyaev, Nikita F. Morozov, Petr E. Tovstik, Tatiana P. Tovstik // Vestnik SPbGU. Matematika. Mekhanika. Astronomiya. – 2016. V. 3 (61). – P. 77-94.
6. *Bolotin V.V.* Dinamicheskaya ustoychivost uprugikh system. M.: Izdatelstvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1956, 600 pp.
7. *Lizunov P.P., Nedin V.O.* The gyroscopic forces influence on the oscillations of the rotating shafts // Strength of materials and theory of structures. – 2020. – Issue 105. P. 199–209.
8. *Lizunov P., Nedin V.* The parametric oscillations of rotating elastic rods under the action of the periodic axial forces // Management of Development of Complex Systems. – 2020, 44, 56–64.
9. *Lizunov P.P., Nedin V.O.* The stability of rotating rods under the action of vibro-impact load // Strength of materials and theory of structures. – 2021. – Issue 106. P. 113 – 121.
10. *Morozov N.F.* Static and Dynamics of a Rod at the Longitudinal Loading / N.F. Morozov, P.E. Tovstik, T.P. Tovstik // Vestnik YUUrGU. Seriya «Matematicheskoye modelirovaniye i programmirovaniye». – 2014. – Vol. 7, No. 1. – S. 76–89.
11. *Morozov N.F.* The rod dynamics under short longitudinal impact / N.F. Morozov, P.E. Tovstik // Vestnik SPbGU. – 2013. – Vup. 3. P.131–141.
12. *Munitsyn A.I.* Prostranstvennyye izgibnyye kolebaniya sterzhnya, vrashchayushchegosya vokrug svoey osi (Space bending oscillations of a rod rotating around its axis) // Matematicheskoye i komp'yuternoye modelirovaniye mashin i sistem. – 2008. S. 64–67.
13. *Murtazin I.R.* Research of flexural vibrations of rotating shafts with distributed inertial, elastic and eccentricity properties / I.R. Murtazin, A.V. Lukin, I.A. Popov // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2019. – Vol. 19, no. 4, P. 756–766.

14. *Nedin V.O.* The parametric oscillations of rotating rods under action of the axial beat load // Strength of materials and theory of structures. – 2020. – Issue 104. P. 309 – 320.
15. *Nedin V.* Numerical differentiation of complex bend forms of long rotating rods // Management of Development of Complex Systems. – 2020, 43, 110 –115.
16. *Maurice Petyt.* Introduction to Finite Element Vibration Analysis. Cambridge University Press, 1990. – 558 p.
17. *Yimin Wei.* Influence of Axial Loads to Propagation Characteristics of the Elastic Wave in a Non-Uniform Shaft / Yimin Wei, Zhiwei Zhao, Wenhua Chen and Qi Liu // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2019 – No. 32:70. P.13.

Стаття надійшла 08.10.2021

Lizunov P.P., Ivanchenko G.M., Nedin V.O.

THE STABILITY OF SHAFTS UNDER THE ACTION OF PERIODIC AXIAL LOADS

The paper presents the investigation results of the harmonic periodic axial loads' influence on the stability of shaft. Such loads can be appeared during the running of the vessel passing the turbulence zones from the side of the propeller to the shafting. In shafting, the influence of oscillatory motion performed in adjacent part, which is transmitted through the coupling due to longitudinal movements, can be periodic, too. Therefore, the question of the stability of such shafts during rotation is relevant. In this way, the task of such drill-rod study stability has actuality. In this case, the various modes of vibration and stability loss are possible. In this regard, the study was done by developed software, in which a technique of computer simulation of the oscillating motion of considerable length rotating rods under the action of axial periodic loads is implemented. Such software gives the possibility to model the oscillatory motion of rotating rods and determine the parameters by which the dynamic stability loss of the studying system can occur. Using this software the diagrams with regions of stable and unstable motion of the rotating shaft were drawn for various parameters of the considered system. The process of oscillation is considered in space with account of inertia forces and geometric nonlinearity of the rod. It is shown, that on certain rotational speeds and frequencies of vibro-impact load there are ranges of unstable motion where the run of equipment can inevitably lead to destruction. The obtained results are analyzed. The conclusion about the possibility of running the equipment in certain frequency ranges is made.

Keywords: geometric nonlinearity, inertia forces, axial forces, dynamic stability, numeric differentiation.

Лизунов П.П., Иванченко Г.М., Недин В.О.

УСТОЙЧИВОСТЬ ВАЛОВ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОДОЛЬНЫХ НАГРУЗОК

В работе приведены результаты исследования влияния гармонических периодических продольных нагрузок на устойчивость вала валопровода. Такие нагрузки могут возникать со стороны винта на валопровод при движении судна, проходящего зоны турбулентности. Также в валопроводах периодическим может быть влияние колебательного движения, совершаемого на соседнем участке, которое передается через соединительную муфту благодаря продольным перемещениям. Поэтому актуальным является вопрос устойчивости таких валов при вращении. В связи с этим исследование проведено с использованием разработанного для этих целей программного обеспечения, в котором реализована методика компьютерного моделирования колебательного движения вращающихся стержней значительной длины под действием продольных периодических нагрузок. Такое программное обеспечение позволяет моделировать колебательное движение вращающихся стержней, а также определять параметры, при которых происходит потеря динамической устойчивости смоделированной системы. С помощью указанного программного обеспечения построены диаграммы, отображающие области устойчивого и неустойчивого движений стержня, которым моделируется работа участка валопровода. Процесс колебательного движения рассмотрен в пространстве с учетом инерционных нагрузок и геометрической нелинейности стержня. Показано, что при определенных скоростях вращения и частот действия виброударной нагрузки существуют области неустойчивого движения, при которых эксплуатация оборудования может неизбежно привести к его разрушению. Проанализированы полученные результаты и сделан вывод о возможности эксплуатации оборудования в определенных диапазонах частот.

Ключевые слова: геометрическая нелинейность, инерционные нагрузки, продольные нагрузки, динамическая устойчивость, численное дифференцирование.

УДК 539.3

Лізунов П.П., Іванченко Г.М., Недін В.О. Стійкість валів, що знаходяться під дією періодичних поздовжніх навантажень // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА.2021. – Вип. 107. – С. 257-264.

У роботі наведені результати дослідження впливу гармонійних періодичних поздовжніх навантажень на стійкість вала валопроводу.

Таб. 0. Іл. 2. Бібліогр. 17 назв.

UDC 539.3

Lizunov P.P., Ivanchenko G.M., Nedin V.O. The stability of shafts under the action of periodic axial loads // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA. 2021. – Issue107. – P. 257-264.

The paper presents the investigation results of the harmonic periodic axial loads' influence on the stability of shaft.

Tab. 0. Fig. 2. Ref. 17.

УДК 539.3

Лізунов П.П., Іванченко Г.М., Недін В.О. Устойчивость валов, находящихся под действием периодических продольных нагрузок // Сопротивление материалов и теория сооружений. – 2021. – Вип. 107. С. 257-264.

В работе приведены результаты исследования влияния гармонических периодических продольных нагрузок на устойчивость вала валопровода.

Табл. 0. Ил. 2. Библиогр. 17 назв.

Автор: доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри будівельної механіки КНУБА, ЛІЗУНОВ Петро Петрович

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, КНУБА, кафедра будівельної механіки, ЛІЗУНОВ Петро Петрович

Адреса домашня: Україна, м. Київ, вул. Кавказька, 12, кв. 48

Мобільний тел.: +38(067) 921-70-05

E-mail: lizunov@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2924-3025>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, декан будівельного факультету КНУБА ІВАНЧЕНКО Григорій Михайлович.

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, КНУБА, Іванченко Григорій Михайлович.

Адреса домашня: Україна, м. Київ, вул. Заслонова, 9, п. 80.

Робочий тел.: +38(044) 248-32-37;

Мобільний тел.: +38(067) 597-19-48;

E-mail: ivgm61@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1172-2845>

Автор: кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки КНУБА, НЕДІН Валентин Олегович

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки, НЕДІН Валентин Олегович

Адреса домашня: 04213 Україна, м. Київ, вул. Північна 50, кв. 181, НЕДІН Валентин Олегович

Роб. тел.: +38(044) 241-54-62

мобільний тел.: +38(067) 764-95-52

E-mail: nedin.vo@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3138-2892>