

УДК 519 : 539:534

С. В. КРАСНИКОВ

## МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ ПРОДОЛЬНО АРМОВАНОГО ЕЛЕМЕНТУ ФУНДАМЕНТУ

Розглядаються вібраційні характеристики фундаментів парових турбін. Наведено результати дослідження вібраційних характеристик типового елемента залізобетонного фундаменту. Розглянуто різні варіанти армування залізобетонного елемента фундаменту. Побудовано дві серії моделей типового елемента. Аналіз вібраційних характеристик розглядається з двох точок зору: кількісного та якісного. Проведено розрахунки за тридцятьма варіантами та аналіз отриманих результатів. Було розраховано власні форми коливань та їх частоти. Докладно наведено аналіз власних частот типового елемента. Зроблено висновки щодо схем армування, що мають найбільший вплив на власні коливання. Для моделювання та розрахунків було використано метод скінчених елементів.

**Ключові слова:** працездатність, вібрація, власні частоти, форми коливань, фундамент, парова турбіна.

**Вступ.** Енергоблок електростанції складається з устаткування та фундаменту. Більшість з них мають фундаменти, що виготовлено з залізобетону. Ці фундаменти мають значний ресурс, що перевищує аналогічні величини устаткування енергоблоку. Тому при модернізації енергоблоків частково або повністю замінюється лише устаткування. Щодо фундаменту приймається рішення ступеню його придатності до подальшої експлуатації. Значний час експлуатації фундаментів призводить до значних змін структури. Визначення цих змін є складною та дорогою задачею. Внаслідок цих факторів структурні зміни фундаменту є невідомими. Проте вплив структурних змін на жорсткостні та інерційні характеристики фундаменту є важливим елементом оцінки працездатності енергоблоку в цілому [1, 2]. Тому є актуальною задача визначення впливу різних схем армування та вібраційні характеристики фундаменту при наявності значного часу експлуатації.

**Мета роботи.** Моделювання типового елемента залізобетонного фундаменту енергоблоку та визначення впливу різних схем армування на базові вібраційні характеристики. Об'єкт дослідження – продольно армована залізобетонна балка з квадратним перетином. Предмет дослідження – чутливість власних форм та частот до структурних змін з армування.

**Математична та розрахункова модель.** Моделювання та розрахунки виконано за допомогою методу скінчених елементів. Загальне рівняння для визначення власних коливань механічної системи має наступний вигляд:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [K]\{q\} = 0, \quad (1)$$

де  $[M]$  – матриця мас,  $[K]$  – матриця жорсткості,  $\{q\}$  – вектор переміщень.

Залізобетонні фундаменти складаються зі стін та балок [1 - 8]. Було побудовано п'ять базових моделей типового елемента фундаменту. Параметри моделей представлено у табл. 1. Базові моделі для аналізу вібраційних характеристик показано на рис. 1. Загальний опис конструкції та моделей зроблено в [4].

За моделями 4 та 5 зроблено серії моделей з різною структурою армування. За моделлю 4 з попередніх досліджень [4] взято дві базові моделі 4\_1 та 4\_5,

що показані на рис.2. За цими моделями 4\_1 та 4\_5 зроблено моделі з армуванням, що показано на рис. 3 - 5. Моделі, що мають основою модель 5 показано на рис. 6 - 10.

Таблиця 1 – Параметри скінчено-елементних моделей

Номер моделі	Кількість скінчених елементів	Кількість вузлів	Кількість ступенів волі
1	3282	774	2199
2	7218	1606	4575
3	84818	14861	41856
4	65563	11606	32325
5	43020	44206	137295

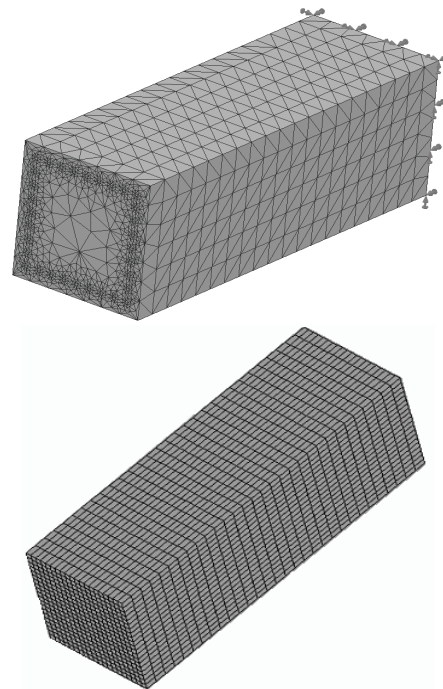


Рисунок 1 – Моделі 4 та 5 для залізобетонного елемента

З рисунків 2 - 10 видно, що моделі серій 4 та 5 мають загальну різницю за щільністю армування. Базові моделі 4 та 5 відрізняються кількістю арматури у два рази. Моделі 4\_1 та 4\_5 відрізняються орієнтацією армування. Моделі за рис. 2 – 10 мають різну структуру армування, що можна умовно розділити на три групи: відсутність однієї арматури (моделі 4\_6, 4\_14, 4\_15, 5\_10 - 5\_13), симетричний розподіл армування

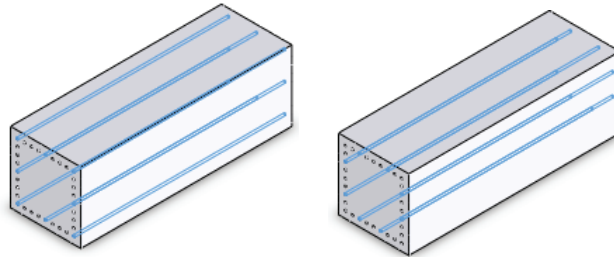


Рисунок 2 – Армування моделей 4\_1 та 4\_5

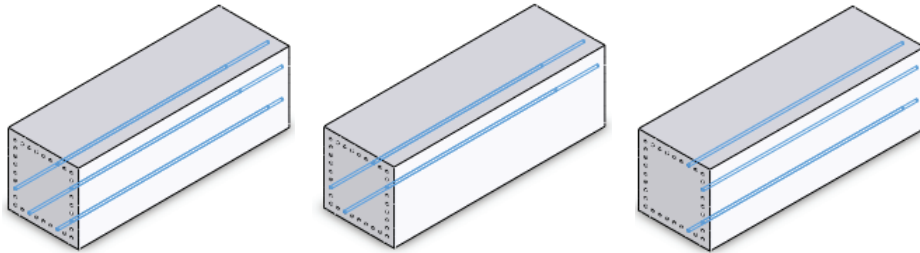


Рисунок 3 – Армування моделей 4\_6, 4\_7, 4\_8

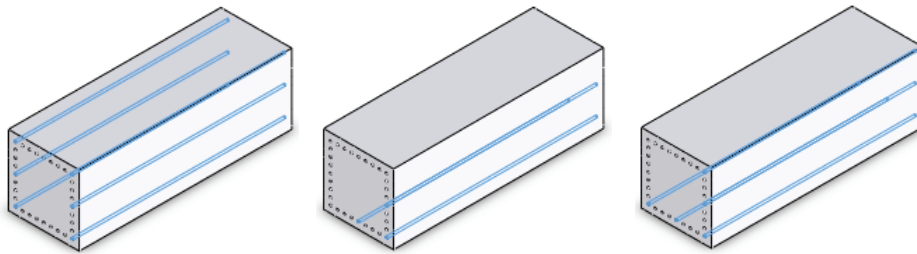


Рисунок 4 – Армування моделей 4\_9, 4\_10, 4\_11

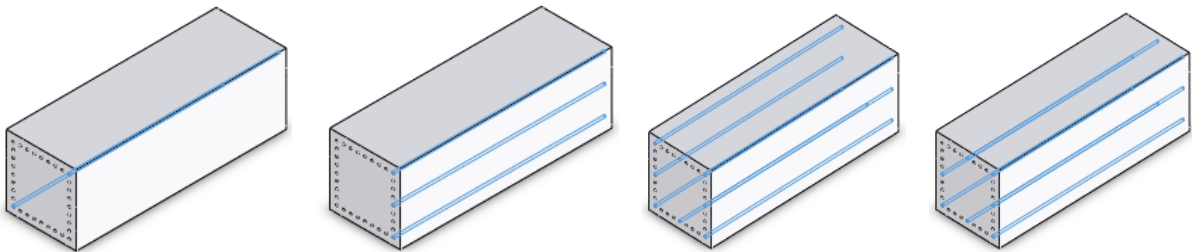


Рисунок 5 – Армування моделей 4\_12, 4\_13, 4\_14, 4\_15

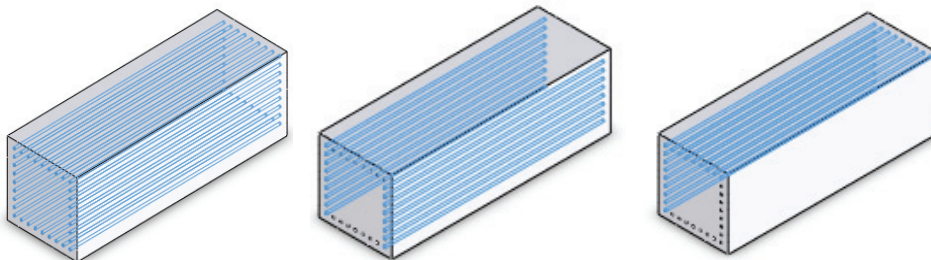


Рисунок 6 – Армування моделей 5\_1, 5\_2, 5\_3

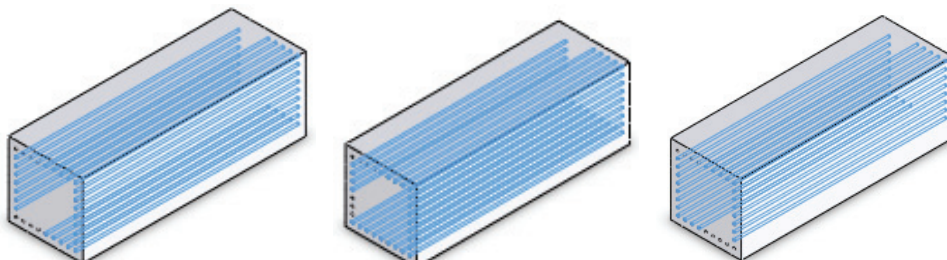


Рисунок 7 – Армування моделей 5\_4, 5\_5, 5\_6

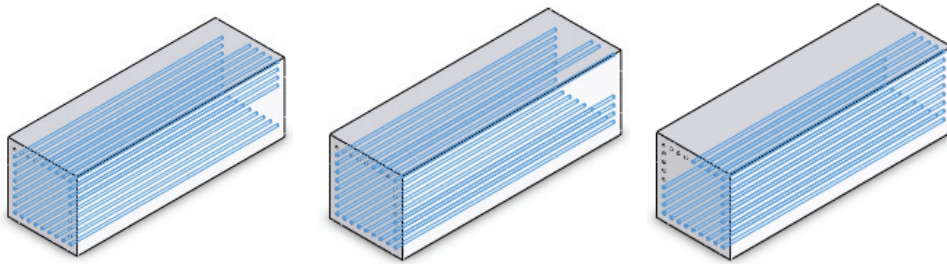


Рисунок 8 – Армування моделей 5\_7, 5\_8, 5\_9

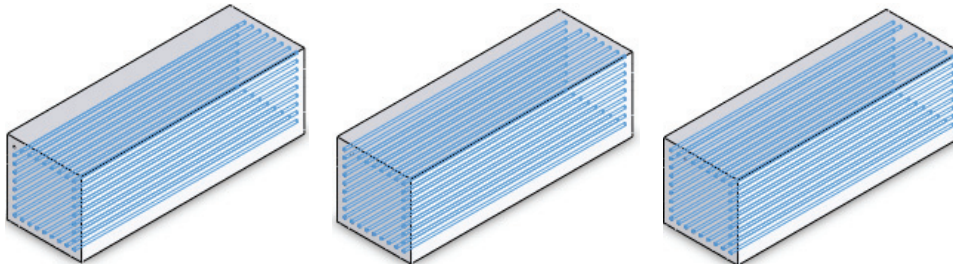


Рисунок 9 – Армування моделей 5\_10, 5\_11, 5\_12

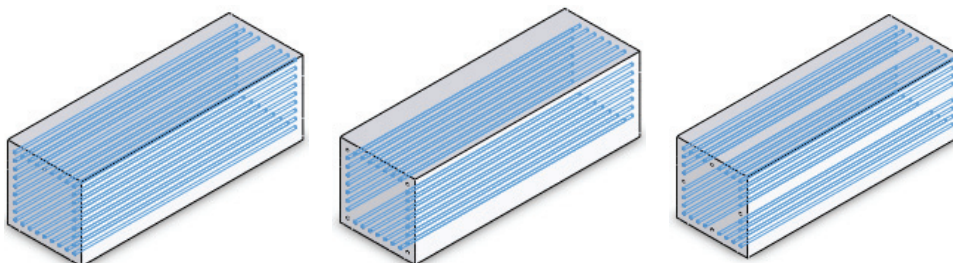


Рисунок 10 – Армування моделей 5\_13, 5\_14, 5\_15

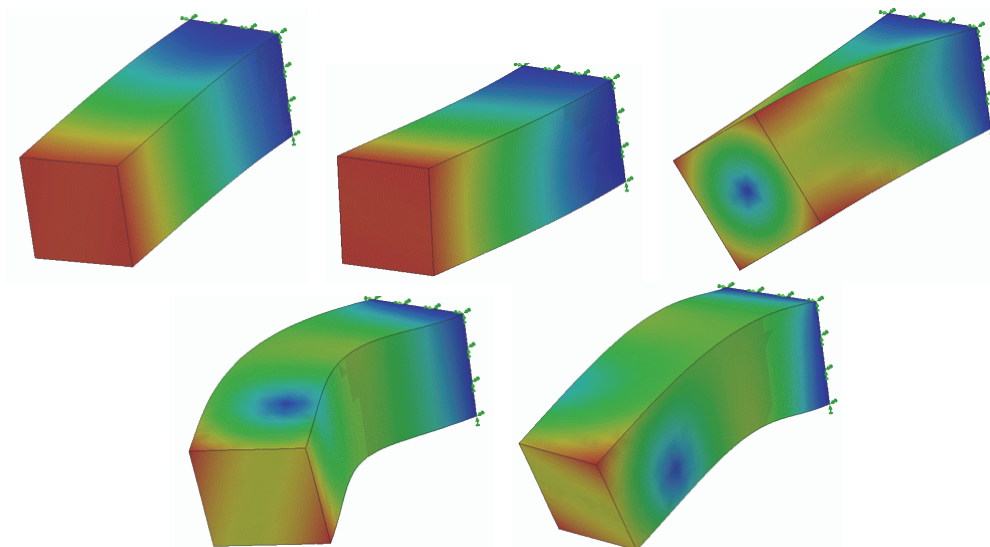


Рисунок 11 – Перші п'ять форм власних коливань

(моделі 4\_1 - 4\_5, 4\_7, 4\_9, 4\_12, 5\_1, 5\_2, 5\_6, 5\_14, 5\_15), несиметричний розподіл армування (моделі 4\_6, 4\_8, 4\_10, 4\_11, 4\_13, 4\_14, 4\_15, 5\_3, 5\_4, 5\_5, 5\_7 - 5\_13).

**Розрахункові дослідження.** За показаними вище моделями зроблено розрахунки власних коливань. Згідно з розмірами конструкції базового елемента до аналізу було взято перші п'ять форм коливань, та їх частоти. Власні форми коливань показано на рис. 11.

Аналіз перших 5 власних форм коливань за моделями 4\_1, 4\_5, 5\_1 (рис. 11) показав їх збіжність та наступні загальні характеристики:

- 1 форма власних коливань є згінною без вузловою;
- 2 форма власних коливань є згінною без вузловою, кратною до першої;
- 3 форма власних коливань є крутильною без вузловою;
- 4 форма власних коливань є згінною з одним вуз-



лом;

5 форма власних коливань є згінною з одним вузлом, кратною до четвертої форми коливань.

Аналіз перших п'яти власних форм коливань за моделями серії 4 показав наступне: симетрична зміна армування на вигляд власних форм не впливає; несиметрична зміна армування на вигляд власних форм майже не впливає, незначні зміни мають четверта та п'ята форми коливань у вигляді зміни на невелику величину положення вузлової точки.

Аналіз власних форм коливань за моделями серії 5 показав, що при симетричній та несиметричній зміні армування вигляд власних форм має зміни. Найменша різниця форм коливань у моделей 5\_7, 5\_9, 5\_10, 5\_11, 5\_12, 5\_13, де вигляд власних форм коливань майже збіжний з моделлю 5\_1. Найбільші зміни у моделі 5\_3 - перша та друга форма коливань декілька змінили напрямок коливань, вигляд інших форм коливань не змінився. У моделях 5\_2, 5\_4, 5\_5, 5\_6, 5\_8 зміни мають лише четверта та п'ята форма коливань у вигляді незначного переміщення вузлової точки. Загальні зміни перших п'яти власних форм за моделями серій 4 та 5 мають незначний характер у порівнянні з формами коливань моделей 4\_1, 4\_5, 5\_1, що показані на рис. 11.

Результати розрахунків власних частот за моделями серій 4 та 5 показано у табл. 2 - 3.

Таблиця 2 – Власні частоти за моделями серії 4

Мо- дель	Частота, Гц				
	1	2	3	4	5
4	62,91	62,92	185,0	287,5	287,7
4_1	61,10	61,11	183,7	282,1	282,2
4_2	60,88	60,89	183,2	281,3	281,4
4_3	60,54	60,55	184,2	280,6	280,6
4_4	61,70	61,71	184,1	283,9	284,1
4_5	60,93	60,94	184,0	281,6	281,7
4_6	60,6	61,00	183,9	280,7	281,7
4_7	60,3	61,00	183,8	279,8	281,6
4_8	60,6	60,60	183,9	280,7	280,7
4_9	60,8	61,20	183,5	281,4	282,2
4_10	60,4	60,70	183,8	280,1	281,0
4_11	60,7	61,00	183,6	280,8	281,9
4_12	60,2	61,00	183,4	279,5	280,6
4_13	60,6	60,70	183,6	280,6	280,9
4_14	61,0	61,10	183,6	281,8	282,2
4_15	60,8	61,10	183,8	281,2	282,3

Таблиця 3 – Власні частоти за моделями серії 5

Мо- дель	Частота, Гц				
	1	2	3	4	5
5_1	59,8	59,8	171,9	272,4	272,4
5_2	58,9	59,9	174,0	271,8	274,3
5_3	59,3	59,5	173,8	272,8	273,2
5_4	59,3	59,9	173,1	272,1	273,6
5_5	59,6	59,6	173,1	272,8	272,9
5_6	59,0	60,2	173,1	271,4	274,3
5_7	59,1	60,1	173,1	271,7	274,0
5_8	59,6	59,6	173,1	272,8	272,9
5_9	59,2	60,0	172,3	271,9	273,8
5_10	59,6	59,8	172,1	272,1	272,7
5_11	59,7	59,8	172,1	272,3	272,7
5_12	59,7	59,8	172,0	272,3	272,7

5_13	59,7	59,8	172,0	272,4	272,7
5_14	59,5	59,5	172,7	272,3	272,3
5_15	59,8	59,8	172,3	272,9	272,9

З наведених у табл. 2, 3 даних видно, що власні частоти перекривають діапазон 0 - 270 Гц. Враховуючи робочі частоти існуючих енергоблоків цього діапазону цілком достатньо для аналізу власних частот елементів фундаменту. Порівняння табл. 2 та 3 показує, що збільшення щільності арматури призводить до зменшення значень власних частот. Аналізуючи кожну з табл. 2 та 3 видно, що зі зменшенням кількості арматури значення власних частот зменшується. Найбільші зміни значень власних частот у моделей 4\_1, 4\_4, 4\_9, 4\_14, 4\_15, 5\_2, 5\_6. У моделей 4\_1, 4\_4, 4\_9, 5\_2, 5\_6 розподіл армування симетричний. Моделі 4\_14, 4\_15 мають відсутність однієї арматури у порівнянні з базовою моделлю 4\_1. Відповідні до них моделі серії 5 - 5\_13, 5\_14 мають одні з найменших змін частот серед моделей своєї серії. Таким чином найбільші зміни власних частот можливі при симетричній різниці структури армування залізобетонних елементів фундаментів.

**Висновки.** Розроблено дві серії по 15 моделей типового залізобетонного елемента фундаменту з різною структурою армування. Проведено розрахунки власних коливань для всіх моделей. Аналіз власних форм коливань показав, що найбільші зміни при несиметричній зміні структури армування. Найбільші зміни власних форм коливань при підвищеному армуванні та несиметричній зміні структури у два рази (модель 5\_3). Аналіз власних частот показав, що їх найбільші зміни можливі при симетричних змінах армування. При меншій щільності армування значні зміни власних частот можливі також при усуненні однієї з арматур, в особливості розташованою у куті перетину балки.

**Список літератури:** 1. *Абашидзе А.И.* Фундаменты машин тепловых электростанций / *А.И.Абашидзе, Ф.В.Сапожников, А.Т.Казанджян.* – М.: Энергия, 1975. – 256 с. 2. *Шульженко Н.Г.* Численный анализ колебаний систем турбоагрегат-фундамент / *Н.Г.Шульженко, Ю.С.Воробьев.* – К.: Наукова думка, 1991. – 232 с. 3. *Жовдак В.О.* Моделирование фундамента для многокорпусного турбоагрегата / *В.О.Жовдак, С.В.Красников, А.В.Торяник, О.С.Степченко* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2008. – № 36. – С. 81-88. 4. *Красников С.В.* Моделирование та дослідження міцності продольно армованого елемента фундаменту / *С.В.Красников* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 55. – С. 47-49. 5. *НІТАСНІ.* Turbine and Generator Foundation Design and construction & recommendation. – Tokyo: Japan, 2009. – 104 p. 6. *Adhhikari Sukanta* Turbo-Generator Foundation / *Sukanta Adhhikari* // Structural Engineering Forum of India. – New Delhi: SEFI, 2010. – P. 1-19. 7. *Chowdhury Indrajit* Dynamics of Structure and foundation a unified approach / *Chowdhury Indrajit, Dasguptu P. Shambhu.* – Leiden: CRC Press, 2009. – 616 p. 8. *Gu Ping* New dynamic participation factor for turbine generator foundation Practice Periodical on Structural Design and Construction / *Gu Ping.* – VA.: American Society of Civil Engineers, 2009. – № 15 (1). – P. 54-62. 9. *Zhiqiang Hu* A Seismic Analysis on Steam Turbine Considering Turbine and

Foundation Interaction / Zhiqiang Hu, Wei Wang, Puning Jiang, Qinghua Huang, Jianhua Wang, Sihua Xu, Jin He and Lei Xiao // ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition Volume 1B.-Düsseldorf: International Gas Turbine Institute, 2014. – PP. V01BT27A041, 8 pages. **10.** Turnbull Alan Corrosion pitting and environmentally assisted small crack growth / Alan Turnbull // Proceedings. Mathematical, Physical, and Engineering Sciences. – London: The Royal Society, 2014. – PP. 20140254, 19 pages.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Abashidze A.I. Fundamenty mashin teplovykh elektrostancij. A.I.Abashidze, F.V.Sapozhnikov, A.T.Kazandzhyan. Moscow: Energiya, 1975. 256 Print. **2.** Shul'zhenko N.G. Chislennyj analiz kolebanij sistem turboagregat-fundament. N.G.Shul'zhenko, Yu.S.Vorob'ev. Kyiv: Naukova dumka, 1991. 232 Print. **3.** Zhovdak V.O. Modelirovanie fundamenta dlya mnogokorpusnogo turboagregata. V.O.Zhovdak, S.V.Krasnikov, A.V.Toryanik, O.S.Stepchenko. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Dynamika i micnist' mashyn. Kharkiv: NTU "KhPI", 2008. No 36. 81-88 Print. **4.** Krasnikov S.V. Modelyuvannya ta doslidzhennya micnosti prodol'no armovanoho elementu fundamentu. S.V.Krasnikov. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Dynamika i micnist' mashyn. Kharkiv:

NTU "KhPI", 2015. No 55. 47-49 Print. **5.** HITACHI. Turbine and Generator Foundation Design and construction & recommendation. Tokyo: Japan, 2009. 104 Print. **6.** Adhhikari Sukanta Turbo-Generator Foundation. Sukanta Adhhikari. Structural Engineering Forum of India. New Delhi: SEFI, 2010. 1-19 Print. **7.** Chowdhury Indrajit Dynamics of Structure and foundation a unified approach. Chowdhury Indrajit, Dasgupta P. Shambhu. Leiden: CRC Press, 2009. 616 Print. **8.** Gu Ping New dynamic participation factor for turbine generator foundation Practice Periodical on Structural Design and Construction. Gu Ping. VA.: American Society of Civil Engineers, 2009. No 15 (1). 54–62 Print. **9.** Zhiqiang Hu A Seismic Analysis on Steam Turbine Considering Turbine and Foundation Interaction. Zhiqiang Hu, Wei Wang, Puning Jiang, Qinghua Huang, Jianhua Wang, Sihua Xu, Jin He and Lei Xiao. ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition Volume 1B.-Düsseldorf: International Gas Turbine Institute, 2014. V01BT27A041, 8 pages Print. **10.** Turnbull Alan Corrosion pitting and environmentally assisted small crack growth. Alan Turnbull. Proceedings. Mathematical, Physical, and Engineering Sciences. London: The Royal Society, 2014. 20140254, 19 pages Print.

Надійшла (received) 21.12.2015

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Красніков Сергій Васильович**, кандидат технічних наук, доцент, Харківській національній автомобільно-дорожній університет: тел. (+038057) 707-37-30; e-mail: vsevkr@yandex.ru

**Krasnikov Sergij Vasylovych**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University: phone (+038057) 707-37-30; e-mail: vsevkr@yandex.ru

УДК 621.375

**Г. Ю. МАРТИНЕНКО, О. М. МАРУСЕНКО**

### ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПАРАМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ РОТОРІВ ВІДЦЕНТРОВИХ КОМПРЕСОРИВ ЗА ДОПОМОГОЮ РІЗНИХ МОДЕЛЕЙ

Проведено аналіз власних частот і форм коливань моделей ротора, побудованих і розрахованих за допомогою програмних комплексів машинобудівного призначення. Розроблено програмний продукт для побудови моделей ротора, проведення розрахунків їх динамічних характеристик з наочним представленням результатів. Програма забезпечує зв'язок з макросом і програмним комплексом для проведення розрахунку, а також з браузером для перегляду отриманих результатів.

**Ключові слова:** динаміка ротора, магнітні підшипники, критичні швидкості, параметричне моделювання.

**Вступ.** Широка область застосування відцентрових компресорів призводить до невеликої серійності їх випуску і різноманітності конструктивних рішень компресорів. При розробці нових конструкцій експериментальна перевірка має особливе значення, займає багато часу та потребує значних коштів. Правильний вибір методів розрахунку та проектування значно скорочує тривалість і вартість експериментів для отримання необхідних якостей компресорів [1-3]. Тому актуальною задачею є параметричне моделювання складних конструкцій та його автоматизація, що проводиться на основі існуючих спеціалізованих програмних пакетів – систем автоматизованого проектування та інженерного аналізу.

Одним з основних елементів відцентрового ком-

пресора є ротор (вал з робочими колесами та іншими навісними елементами), який зазвичай працює на високих швидкостях обертання. При використанні таких роторів необхідно враховувати особливості їх конструкцій і поведінки під дією різних навантажень [4, 5]. Актуальною задачею стає вибір найбільш раціональних конструкцій ротора та способів їх обпирання. Існують як контактні так і безконтактні системи обпирання роторів. В роботі розглядаються конструкції ротора з жорсткими та пружними опорами [6, 7]. Пружні опори представляють собою масляні підшипники ковзання з пружними вкладками або магнітні підшипники.

Аналіз роторної динаміки в різних програмних комплексах розширює об'єм отриманих результатів,