

П. П. ГОНТАРОВСЬКИЙ, Н. Г. ГАРМАШ

ОЦІНКА НАВАНТАЖЕНОСТІ НЕЛІНІЙНИХ З'ЄДНАНЬ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ТУРБОАГРЕГАТ-ФУНДАМЕНТ-ОСНОВА ПРИ СЕЙСМІЧНИХ ДІЯХ

За допомогою розробленої на основі методу скінченних елементів розрахункової методики проведено аналіз навантаженості елементів кріплення турбоагрегату на фундаменті для різних варіантів їх пружно-демпферних характеристик. Розрахункова модель складалась із довільно орієнтованих стержнів та зосереджених мас. Оцінено навантаженість елементів упорного підшипника, який у більшості випадків має найменший запас міцності (несної здатності). Показано, що наявність зазорів у елементах кріплення викликає значне підвищення динамічних навантажень. Розрахунки проведено для синтезованої сейсмограми семибального землетрусу, яка викликає найбільш широкий спектр навантаження в порівнянні з іншими реальними сейсмограмами.

Ключові слова: турбоагрегат, фундамент, сейсмічне навантаження, нелінійні пружно-демпферні елементи.

П. П. ГОНТАРОВСКИЙ, Н. Г. ГАРМАШ

ОЦЕНКА НАГРУЖЕННОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ТУРБОАГРЕГАТ-ФУНДАМЕНТ-ОСНОВАНИЕ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

С помощью разработанной на основе метода конечных элементов расчетной методики проведен анализ нагруженности элементов крепления турбоагрегата на фундаменте для различных вариантов их упруго-демпферных характеристик. Расчетная модель состояла из произвольно ориентированных стержней и сосредоточенных масс. Проведена оценка нагруженности элементов упорного подшипника, который в большинстве случаев имеет наименьший запас прочности (несущей способности). Показано, что наличие зазоров в элементах крепления вызывает значительное повышение динамических нагрузок. Расчеты проведены для синтезированной сейсмограммы семибального землетрясения, которая вызывает наиболее широкий спектр нагружения по сравнению с другими реальными сейсмограммами.

Ключевые слова: турбоагрегат, фундамент, сейсмическая нагрузка, нелинейные упруго-демпферные элементы.

P. GONTAROVSKIY, N. GARMASH

ESTIMATING THE LOADING OF NONLINEAR ELEMENT CONNECTIONS IN THE UNIT- FOUNDATION-BASE TURBINE SYSTEM AT SEISMIC ACTIVITIES

A loading of the fasteners of turbine unit on the foundation exposed to seismic activities was analyzed for different options of their elastically damped characteristics. The software and computation methods developed on the basis of the method of finite elements have been used. The calculation model of the dynamic turbounit-foundation-base system consisted of arbitrary oriented rods and concentrated masses that are rigidly interconnected or connected by linear and nonlinear elastically deformed elements. Rod finite elements with distributed parameters allow us to take into consideration all the types of deformations that take place at rod vibrations. The computation model allows us to take into consideration structural peculiarities of the system and also the peculiarities of its behavior at possible earthquakes. During the computations special attention was paid to the thrust bearing that in most cases has the lowest safe load factor (load-carrying capacity). It is shown that the availability of gaps in fastening elements results in a considerable increase of dynamic loads. Taking into account nonlinear strain characteristics of the oil layer of a thrust bearing results in an increase of the pressure on its shoes. The computations were done for the synthesized seismogram of a seven-point earthquake. Previous investigations showed that this seismogram results in the broadest loading spectrum in comparison to other real seismograms. The research data can be used for the design of high-power turbine units to determine their seismic stability.

Key words: turbine unit, foundation, seismic loading, elastically-damped elements and the seismogram.

Вступ

Інтенсивний розвиток сучасної світової атомної енергетики супроводжується будівництвом атомних електростанцій (АЕС) у різноманітних географічних зонах, у тому числі й сейсмонезпечених [1]. Тому однією з основних вимог, які ставляться до атомних електростанцій, є забезпечення сейсмостійкості енергетичного обладнання [2, 3], тобто збереження його надійності, міцності та працездатності при можливих сейсмічних впливах. Розв'язання проблеми забезпечення сейсмостійкості енергоустановки приводить до необхідності детального аналізу поведінки конструкції під впливом різних динамічних навантажень, що моделюють сейсмічні дії. Проведення таких досліджень дозволяє визначити конструктивні елементи та з'єднання, найбільш уразливі при можливих

землетрусах, і підвищити загальну надійність устаткування [4].

Ціль роботи

Для коректної оцінки сейсмостійкості системи турбоагрегат-фундамент-основа (ТФО) необхідно, щоб розрахункова модель урахувала всі конструктивні особливості, які суттєво впливають на працездатність обладнання. При цьому характеристики елементів повинні максимально повно моделювати їх поведінку під час можливих землетрусів. Створена на основі методу скінченних елементів (МСЕ) розрахункова методика і програмне забезпечення [5] дозволяють проводити аналіз сейсмостійкості складних систем ТФО з використанням просторових розрахункових моделей [6], які складаються з довільно орієнтованих стержнів та зосереджених мас, що з'єднуються між собою

© П. П. Гонтаровський, Н. Г. Гармаш, 2018

за допомогою пружних чи пружно-демпферних зв'язків.

Метою даної роботи є викладення методики визначення зусиль у конструктивних елементах системи ТФО з нелінійними пружно-демпферними характеристиками та чисельна оцінка рівня їх навантаженості при врахуванні зазорів та нелінійних характеристик.

Постановка задачі

За допомогою розробленої розрахункової методики [5] проведено дослідження коливань системи ТФО К-1100-5,9/25 АЕС при сейсмічному навантаженні, яке моделюється прискореннями ґрунту в трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Податливість ґрунту враховується моделлю Вінклера. Синтезована сейсмограма [2], яка викликає найбільш широкий спектр навантаження у порівнянні з іншими реальними сейсмограмами [7], приведена до рівня семибального землетрусу (рис. 1), при цьому прискорення у вертикальному напрямку складала 1/3 від прискорень у горизонтальних напрямках. Проведено оцінку навантаженості елементів системи ТФО з урахуванням їх конструктивних особливостей та нелінійних характеристик.

При розв'язанні нестационарної задачі про коливання конструкції використовується метод Ньюмарка [8], у якому рівняння руху інтегруються за часом із заданим кроком $\Delta t = 0,005$ с.

Просторова стержнева розрахункова схема турбоагрегату і рамно-стінового фундаменту враховує всі види згинно-крутильно-подовжніх деформацій, а також моделює встановлене обладнання зосередженими масами. Вертикальні стінки фундаменту, а також корпуси циліндрів низького тиску турбоагрегату представляються решітками зі стержнів [9]. Корпуси циліндра високого тиску (ЦВТ), генератора, збудника, підшипників та конденсатори моделюються стержневими елементами відповідної жорсткості і маси та кріпляться поперечними, подовжніми та вертикальними Т-подібними шпонками. Валопровід турбоагрегату має шість роторів і опирається через пружно-демпферний масляний шар на 12 опорних та один упорний підшипник, розміщений у кінці ЦВТ. Ротори моделюються трубчатими стержневими елементами з розподіленими масами, а їх фланці – зосередженими масами. На рис. 2 наведено стержневу розрахункову схему системи ТФО.

Результати досліджень

При розрахунках коливань системи ТФО отримано переміщення, швидкості та прискорення всіх вузлів скінченноелементної моделі на кожному кроці за часом. Проведено оцінку зусиль і напружень у елементах конструкції, найбільш відповідальних

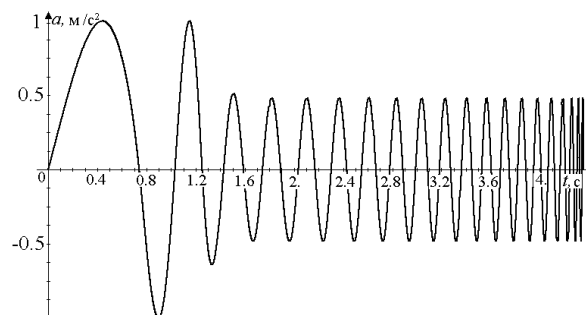


Рис. 1 – Синтезована сейсмограма

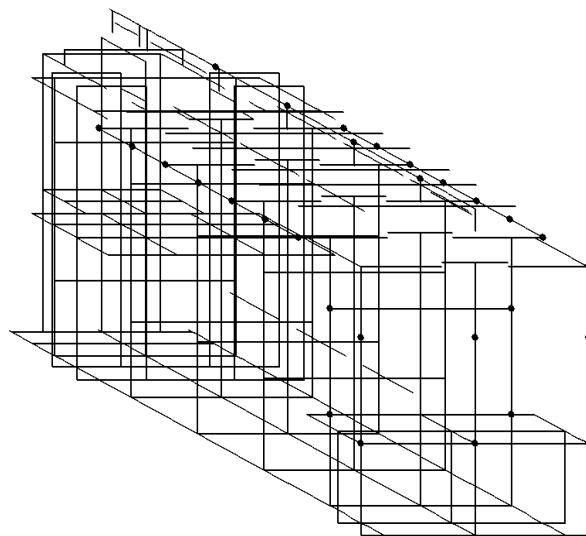


Рис. 2 – Розрахункова схема системи ТФО

за її міцність при можливих землетрусах. У цих вузлах фіксуються максимальні та мінімальні переміщення і прискорення, а також зусилля в шпоночних кріпленнях і на колодках упорного підшипника. Максимальний тиск на колодки упорного підшипника не повинен перевищувати 15 МПа [2], що відповідає вимогам міцності його покриття. На напруження у шпоночних з'єднаннях також накладаються обмеження. Графічний інтерфейс програмного забезпечення [5] дозволяє здійснювати візуалізацію геометрії конструкції, анімацію форм її деформування при сейсмічних навантаженнях та будувати графіки зміни за часом переміщень, швидкостей, прискорень та зусиль у пружно-демпферних елементах кріплення турбоагрегату. Отримані результати переміщень валопроводу відносно корпусних елементів дозволяють оцінити можливість їх зачіпання.

Як показано в роботі [5], сполучення стержнів не обов'язково повинне здійснюватись вузол у вузол, можливе з'єднання з розривом за допомогою абсолютно жорсткого елемента або пружно-демпферних зв'язків, точки приєднання яких можуть не співпадати з вузлами скінченних елементів. Це дозволяє правильно моделювати навантаження стержнів зусиллями і моментами.

Розрахункова методика передбачає можливість поряд із лінеаризованими жорсткостями крі-

плень задавати їх нелінійні характеристики. При наявності нелінійних компонент у пружно-демпферних з'єднаннях, крім лінеаризованих жорсткостей, задається залежність зусилля P_N від різниці переміщень їх кінців у вигляді:

$$P_N = \begin{cases} C(\Delta u - \delta)^\alpha, & \text{при } |\Delta u| \geq \delta, \\ 0, & \text{при } |\Delta u| < \delta, \end{cases}$$

де Δu – відносне переміщення елементів;

δ – зазор між ними;

C, α – параметри апроксимації нелінійної залежності.

При розв'язанні нелінійної задачі на кожному кроці за часом використовується метод послідовних наближень із переносом нев'язки в праву частину системи рівнянь МСЕ. Це не потребує переобчислення і триангуляції матриці розв'язуючих рівнянь. На рис. 3 представлена нелінійна залежність зусилля від відносного переміщення елементів.

На нульовій ітерації визначаються переміщення Δu_L° , їх швидкість $\Delta \dot{u}_L^\circ$ і зусилля для лінеаризованого з'єднання P_L°

$$P_L^\circ = C_L \Delta u_L^\circ + d_L \Delta \dot{u}_L^\circ,$$

а також нелінійні зусилля P_N° при тих же переміщеннях

$$P_N^\circ = C_N (\Delta u_L - \delta)^\alpha + d_N (\Delta u - \delta)^\alpha \Delta \dot{u}_L.$$

Різницю зусиль $F^\circ = P_L^\circ - P_N^\circ$ прикладаємо до пружного зв'язку, виконуємо інтегрування за часом методом Ньюмарка або Вілсона [8] і визначаємо переміщення Δu_L^1 і його швидкість $\Delta \dot{u}_L^1$ на першій ітерації (рис. 4), а також нову різницю зусиль $F^1 = P_L^1 - P_N^1$. Прикладаючи її до пружного зв'язку й виконуючи наступний підкрок, знаходимо наближений розв'язок для нелінійного з'єднання

Корпуси циліндрів і виносних підшипників турбоагрегатів кріпляться на верхній фундаментній плиті за допомогою шпоночних з'єднань, жорсткість яких досить висока. Розрахунки показують, що зміна жорсткості цих елементів у широких межах від $2 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^4$ МН/м практично не впливає на результати. Однак, наявність навіть невеликих зазорів ($\approx 0,05$ – $0,1$ мм), які забезпечують проковзування у шпоночних з'єднаннях, викликає прискорення масивних частин конструкції й ударну взаємодію в з'єднанні елементів. Проведено розрахунки зусиль у чотирьох шпонках корпусу найбільш навантаженого упорного підшипника, у його колодках, а також у шпонках кріплення корпусу генератора до верхньої фундаментної плити. Як показали дослідження, саме ці з'єднання є найбільш навантаженими при сейсмічних впливах [9]. Зазори в шпонках корпусів упорного підшипника

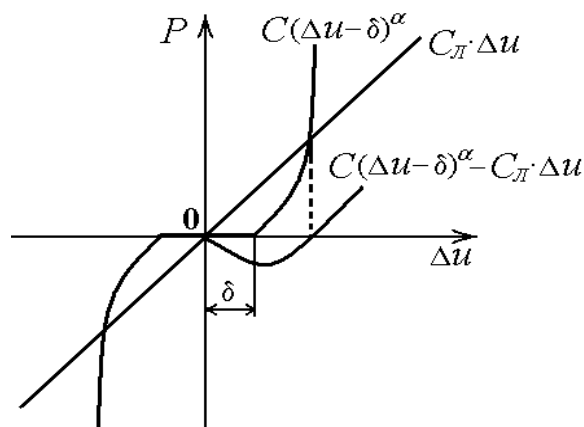


Рис. 3 – Залежність зусилля для нелінійних компонент з'єднання

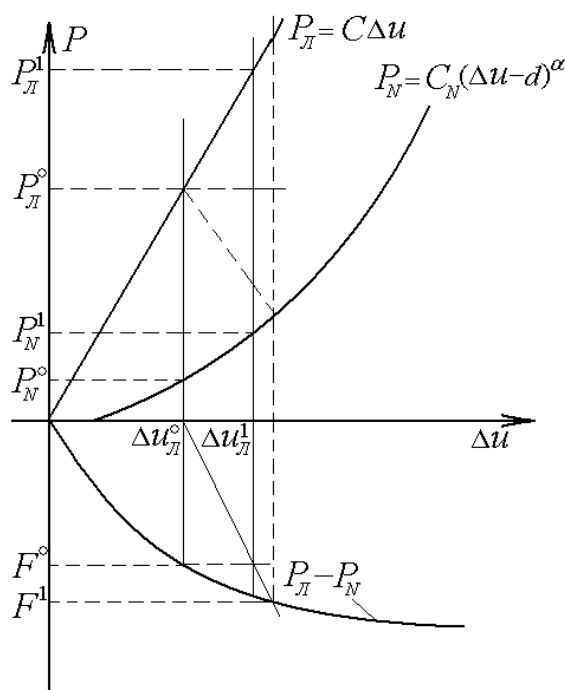


Рис. 4 – Схема визначення розв'язання для нелінійного з'єднання

і генератора приймалися рівними 0,02; 0,08; 0,1 і 0,12 мм.

Лінеаризовані жорсткості шпонок склали $2 \cdot 10^4$ МН/м, а масляного шару упорного підшипника – 1600 МН/м. Результати розрахунків для синтезованої сейсмограми семибального землетрусу з різними параметрами нелінійних залежностей у найбільше навантажених з'єднаннях системи ТФО К-1100-5,9/25 приведено в табл. 1. В останньому стовпчику розміщені результати для лінеаризованих жорсткостей. У таблиці приведено зусилля для моментів часу, коли їх значення максимальні. Слід відмітити, що взаємний вплив результатів, одержаних в упорному підшипнику і шпоночних з'єднаннях, складає менше 1 %, тобто зусилля майже незалежні між собою.

Таблиця 1 – Зусилля в пружних з'єднаннях

Елемент турбоагрегату	З'єднання	C , МН/м	α	$\delta \cdot 10^3$, м	P_N , т	P_L , т
Корпус упорного підшипника	Поперечна шпонка № 1	20200	1	0,02 0,08 0,1 0,12	217,5 276,8 304,8 338,5	216,7
	Поперечна шпонка № 2	20200	1	0,02 0,08 0,1 0,12	213,3 270,2 299,9 333,0	211,2
	Поздовжня шпонка № 1	20200	1	0,02 0,08 0,1 0,12	67,0 138,6 157,7 176,6	48,1
	Поздовжня шпонка № 2	20200	1	0,02 0,08 0,1 0,12	41,7 111,5 129,4 149,0	21,3
Корпус генератора	Поперечна шпонка № 1	20200	1	0,02 0,08 0,1 0,12	168,2 325,8 391,7 451,7	141,5
	Поздовжня шпонка № 1	20200	1	0,02 0,08 0,1 0,12	143,6 364,5 432,9 496,3	92,5
	Поздовжня шпонка № 2	20200	1	0,02 0,08 0,1 0,12	142,9 370,3 439,8 513,4	93,5
Упорний підшипник	Масляний шар	2000	1	0,2	325,5	315,6
		96000	1,5	0,25	321,2	
		1600	1,2	0,25	380,4	
		1600	1,5	0	536,3	
		2000	1,5	0,25	549,8	

При врахуванні нелінійних залежностей для характеристик пружних з'єднань час проведення розрахунків зростає приблизно у три рази. Задані зазори у шпоночних з'єднаннях збільшують поперечні переміщення корпусів на 10 %, а їх переміщення і переміщення валопроводу вздовж осі турбоагрегату, навпаки, зменшують на 9 %.

Частота зміни прискорень синтезованої сейсмограми зростає із часом (рис. 1). Максимальні зусилля при наявності зазорів у з'єднаннях у поперечних шпонках (зусилля вздовж осі турбоагрегату) виникають приблизно через 1,8 с, а в поздовжніх (зусилля в поперечному напрямку відносно осі турбоагрегату) – через 3,6 с від початку дії синтезованої акселерограми. Таким чином, максимальні зусилля в пружних з'єднаннях уздовж осі турбоагрегату виникають при більш низьких частотах збурення, а в поперечному напрямку – при більш високих частотах, що можна пояснити наближенням частоти збурення сейсмічної дії до резонансу. Найменша резонансна частота поздовжніх коливань турбоагрегату нижча від частоти поперечних

коливань [7], що пояснюється високою жорсткістю вертикальних стінок рамно-стінового фундаменту.

Висновки

Проведені дослідження показали, що наявність зазорів від 0,02 до 0,12 мм у шпоночних з'єднаннях збільшує зусилля в поперечних шпонках кріплення корпусу упорного підшипника на фундаменті приблизно в півтора рази, а корпусу генератора – втричі. У подовжніх шпонках кріплення корпусу упорного підшипника зусилля збільшуються в 4–7, а корпусу генератора – в п'ять разів. При врахуванні нелінійних характеристик масляного шару упорного підшипника тиск на його колодки збільшується приблизно в півтора рази.

Таким чином, наявність зазорів і збільшення жорсткості пружно-демпферних елементів при деформуванні може суттєво підвищувати їх навантаженість при сейсмічних діях. Тому врахування нелінійних характеристик пружно-демпферних елементів системи ТФО при розрахунках їх сейс-

мостійкості є досить актуальним. Результати проведених досліджень мають практичне значення і можуть бути використані при оцінці навантаженості енергетичного обладнання під дією сейсмічних впливів.

Список літератури

1. Кендзера О. В. Сейсмічна безпека і захист від землетрусів. Практичне впровадження розробок Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН. *Вісник НАН України*. 2015ю № 2ю С. 44–57. ISSN 1027-3239.
2. *Оборудование атомных энергетических установок. Расчет на прочность при сейсмическом воздействии: РТМ 108.020.37-81*. Ленинград: НПО ЦКТИ, 1981. 39 с.
3. *ПНАЭ Г-5-006-87. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций*. Москва: Госатомэнергонадзор СССР, 1987. 10 с.
4. Костарев, В. В. Сейсмостойкость турбоагрегатов АЭС. *Труды ЦКТИ*. 1984. Вып. 212. С. 82–88.
5. Гонтаровский П. П., Гармаш Н. Г., Шульженко Н. Г. Методика расчета динамики системы турбоагрегат-фундамент-основание энергоблоков при сейсмических воздействиях. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. № 8(1180). С. 153–160. Бібліогр.: 5 назв. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.22.
6. Шульженко М. Г., Гонтаровський П. П., Гармаш Н. Г., Глядя А. О., Швецов В. Л., Гришин М. М., Губський О. М. Сейсмостійкість турбоагрегату К-540-23,5/50. *Проблеми машиностроения*. 2016. Т. 19, № 4. С. 43–50. ISSN 0131-2928.
7. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Гармаш Н. Г., Глядя А. А. Оценка колебаний системы турбоагрегат-фундамент-основание при сейсмических воздействиях. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 10(1232). С. 25–29. Бібліогр.: 7 назв. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.03.
8. Бате К., Вильсон Е. *Численные методы анализа и метод конечных элементов*. Москва: Стройиздат, 1982. 448 с.
9. Шульженко М. Г., Гонтаровський П. П., Гармаш Н. Г., Глядя А. О., Швецов В. Л., Гришин М. М., Губський О. М. Оцінка реакції потужного турбоагрегату на сейсмічне навантаження. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2016. № 2(82). С. 85–93. ISSN 2306-8744.

References (transliterated)

1. Kendzera, O. V. (2015), "Seismic hazard assessment and protection against earthquakes. Practical applications of developments of Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine", *Herald of the Academy of Sciences*, No. 2, pp. 44–57, ISSN 1027-3239.
2. (1981), *Оборудование атомных энергетических установок. Расчет на прочность при сейсмическом воздействии: РТМ 108.020.37-81* [The equipment of nuclear power plants. Calculation of the strength of the seismic impact: RTM 108.020.37-81], Central Boiler and Turbine Institution, Leningrad, Russian.
3. (1987), *ПНАЭ Г-5-006-87. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций* [PNAE-G-5-006-87. The rules of designing earthquake-resistant nuclear power plants], Gosatomenergonadzor USSR, Moscow, Russian.
4. Kostarev, A. V. (1984), "Seysmostoykost turboagregatov AES [Seismic stability nuclear power plant of turbine units]", *Proc. Central Boiler and Turbine Institution*, No. 212. pp. 82–88.
5. Gontarovskiy, P., Garmash, N. and Shulzhenko, N. (2016), "Methodology of calculation of the dynamics of the system turbine-foundation-base power units under seismic actions", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 8(1180), pp. 153–160, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.22.
6. Shulzhenko, M. G., Gontarovskiy, P. P., Garmash, N. G., Glyadya, A. O., Shvetsov, V. L., Grishin, M. M. and Gubskiy, O. M. (2016), "Seysmostoykost turboagregatu K-540-23,5/50 [Seismic stability of turbine unit K-540-23,5/50]", *Problemy Mashinostroeniye* [Journal of Mechanical engineering], No. 4, pp. 43–50, ISSN 0131-2928.
7. Shulzhenko, N., Gontarovskiy, P., Garmash, N. and Glyadya, A. (2017), "Estimating the Vibrations of Turbounit-Foundation-Base System Exposed to Seismic Loads", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1232), pp. 25–29, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.03.
8. Bate, K. and Wilson, E. (1982), *Numerical methods of analysis and finite element method*. Stroyizdat, Moscow, Russian.
9. Shulzhenko, M. G., Gontarovskiy, P. P., Garmash, N. G., Glyadya, A. O., Shvetsov, V. L., Grishin, M. M. and Gubskiy, O. M. (2016), "Otsinka reaktsiyi potuzhnogo turboagregatu na seysmichne navantazhennya [Estimation the reaction of a powerful turbine unit on the seismic load]", *Vibratsiyi v tehnitsi ta tehnologiyah* [Vibration in engineering and technology], No. 2(82), pp. 85–93, ISSN 2306-8744.

Надійшла (received) 13.02.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гонтаровський Павло Петрович (Гонтаровский Павел Петрович, Gontarovskiy Pavel) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу вібраційних і термоміцнісних досліджень, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України; м. Харків, Україна; e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua.

Гармаш Наталія Григорівна (Гармаш Наталья Григорьевна, Garmash Nataliya) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу вібраційних і термоміцнісних досліджень, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України; м. Харків, Україна; e-mail: garm.natalya@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4890-8152>.