

П. П. ГОНТАРОВСЬКИЙ, Н. Г. ГАРМАШ, А. О. ГЛЯДЯ

АНАЛІЗ КОЛИВАНЬ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЕНЕРГОБЛОКУ ПОТУЖНІСТЮ 200 МВт ПРИ КІНЕМАТИЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

Забезпечення надійності енергетичного обладнання на всіх режимах роботи є важливим і актуальним завданням. Визначені характеристики вібронавантажених відповідальних елементів енергоблоку потужністю 200 МВт при перехідних коливальних процесах, викликаних сейсмічним навантаженням. Для дослідження коливань використовуються розроблені розрахункова методика й програмне забезпечення. Отримані результати показали, що переміщення роторів відносно корпусів циліндрів, верхньої фундаментної плити відносно нижньої в розглянутому випадку не перевищують допустимих значень. Результати проведених досліджень можуть бути використані при оцінці сейсмостійкості турбоагрегатів різної потужності.

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

П. П. ГОНТАРОВСКИЙ, Н. Г. ГАРМАШ, А. А. ГЛЯДЯ

АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ОТВЕТСТВЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГОБЛОКА МОЩНОСТЬЮ 200 МВт ПРИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ

Обеспечение надежности энергетического оборудования на всех режимах работы является важной и актуальной задачей. Определены характеристики вибронануженности ответственных элементов энергоблока мощностью 200 МВт при переходных колебательных процессах, вызванных сейсмической нагрузкой. Для исследования колебаний используются разработанные расчетная методика и программное обеспечение. Полученные результаты показали, что перемещение роторов относительно корпусов цилиндров, верхней фундаментной плиты относительно нижней в рассмотренном случае не превышают допустимых значений. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при оценке сейсмостойкости турбоагрегатов различной мощности.

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

P. GONTAROVSKIY, N. GARMASH, A. GLYADYA

ANALYZING THE VIBRATIONS OF THE CRITICAL COMPONENTS IN THE POWER GENERATING UNIT OF 200MW UNDER KINEMATIC LOADINGS

An important problem that should be resolved during the power plant operation is related to the reliability control for all modes of operation including extreme external dynamic effects of a natural character, in particular the earthquakes. The vibrations of the elements of power equipment exposed to seismic forces occur due to kinematic perturbations that are transmitted from the ground to the bottom base plate. In this connection, the following requirements are set up to the seismic stability of the power equipment of power plants that include its strength, impermeability and its serviceability when exposed to seismic forces. The loading of the fasteners of the turbine generating unit of 200MW arranged on the base was analyzed in the case of exposure to seismic forces. Calculation methods and the software were used that were developed using the finite element method. The computational model of the dynamic system, in particular the turbine generating unit-bed and base consisted of arbitrary-oriented rods and lumped masses that are rigidly interconnected with each other or these can also be interconnected by linear and nonlinear elastically-damped elements. The rod finite elements with distributed parameters allow us to take into consideration all the types of deformations that occur during rod vibrations. The computational method allows us to take into consideration the structural peculiarities of the system and the peculiarities of its behavior during possible earthquakes. The kinematic perturbation that simulates the seismic action transmitted from the ground to the bottom bed plate is assigned by the accelerogram that includes acceleration in three mutually perpendicular directions. The computations were done for the synthesized seismogram of the earthquake of wind force 7 that results in the broadest spectrum of the loading in comparison with other real seismograms. The analysis of the computational data obtained for the seismic stability of the turbine generating unit of 200MW showed that the displacement of rotors towards the turbine generating unit axis relatively the cylinder bodies and the displacement of the upper bed plate relatively the bottom bed plate is lower than permissible values in the case of the earthquake of wind force 7. The keyed joints are the most loaded system assemblies though the strains that arise in them during the kinematic perturbations in question also fail to attain permissible values. The obtained research data are of practical importance and can be used for the assessment of the seismic stability of turbine generating units of a different power.

Key words: turbine generating unit, base, kinematic perturbation, seismic load and elastically-damped elements.

Вступ

Необхідність підвищення безпеки експлуатації енергетичного обладнання [1, 2] вимагає визначення характеристик вібро-напруженості несучих елементів конструкцій турбомашин при перехідних коливальних процесах, що обумовлені рапто-вим кінематичним та силовим навантаженням. Оцінка вібронавантажених відповідальних елементів конструкцій дозволяє зменшити кількість позапланових ремонтів турбінного обладнання, що

потребують значних матеріальних затрат.

Використання при проектуванні сучасних моделей та методів, які дозволяють урахувати реальні умови навантаження, особливості побудови складних конструкцій і відображають вплив нестационарних процесів на характеристики вібраційної міцності елементів енергетичного обладнання дозволяє проводити розрахункові дослідження, результати яких можуть бути успішно застосовані на практиці [3–7].

Енергетичне обладнання повинне задоволь-

© П. П. Гонтаровський, Н. Г. Гармаш, А. О. Глядя, 2020

няти умовам сейсмостійкості [8–10], тобто збереження міцності та працездатності при можливих сейсмічних впливах. Розв'язання проблеми забезпечення сейсмостійкості енергоукомплектування вимагає детального аналізу поведінки конструкції під впливом різних динамічних навантажень, що моделюють сейсмічні дії. Дослідження вібронанавантаженості системи турбоагрегат-фундамент-основа (ТФО) з використанням сучасних математичних моделей дозволяє визначити конструктивні елементи й з'єднання, які зазнають найбільшого впливу при можливих землетрусах, та підвищити загальну надійність і працездатність устаткування.

У роботі для оцінки коливань системи ТФО турбоагрегата потужністю 200 МВт із використанням розрахункових моделей різного рівня складності при сейсмічних збудженнях різної інтенсивності застосована розроблена на основі методу скінченних елементів (МСЕ) розрахункова методика оцінки сейсмостійкості елементів конструкцій [3, 6].

Мета роботи

Розрахункова оцінка коливань та характеристик вібронапруженості відповідальних елементів енергоблоку потужністю 200 МВт при перехідних коливальних процесах, що обумовлені раптовим кінематичним навантаженням.

Постановка задачі

Розв'язання задачі забезпечення сейсмостійкості турбоагрегатів пов'язано з аналізом поведінки системи ТФО при динамічних впливах різної інтенсивності для виявлення навантаженості і відсутності зачіпання елементів та підвищення надійності системи [8].

Об'єктом дослідження коливань елементів системи ТФО при кінематичних збудженнях являється енергоблок К-200-130 ЛМЗ. Турбоагрегат, який включає циліндри високого, середнього і низького тисків та електрогенератор ТГВ-200, змонтований на рамному фундаменті.

Для дослідження коливань системи ТФО при сейсмічному навантаженні, яке моделюється прискореннями ґрунту у трьох перпендикулярних напрямках, використовуються розроблені розрахункова методика та програмне забезпечення [3].

Рівняння руху системи ТФО інтегруються методом Ньюмарка із заданим кроком за часом Δt в системі координат, що пов'язана з ґрунтом. Рамний фундамент, корпуси підшипників і циліндрів турбоагрегата, а також валопровід, моделюються стержневими елементами і зосередженими масами, що з'єднуються між собою жорстко або за допомогою пружно-демпферних елементів (рис. 1).

Розрахунки коливань системи ТФО здійснюються за допомогою МСЕ у декартовій системі координат XYZ , де вісь X направлена вертикально угору, вісь Z – вздовж осі турбоагрегата, вісь Y – у поперечному напрямку до осі турбоагрегата. Стержневі скінченні елементи враховують деформації зсуву і інерції повороту поперечних перетинів без збільшення кількості вузлових невідомих в системі розрахункових рівнянь МСЕ.

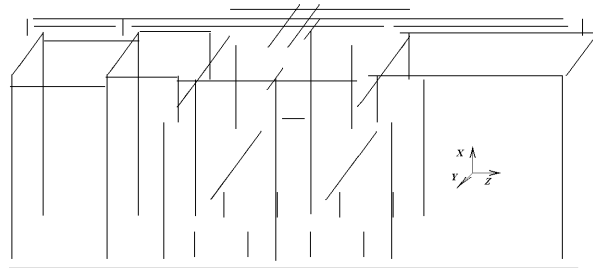


Рис.1 – Розрахункова модель турбоагрегата

Кінематичне збудження від ґрунту передається на нижню фундаментну плиту. При цьому податливість ґрунту враховується через пружну модель Вінклера.

Результати розрахункових досліджень коливань елементів системи ТФО

Для системи ТФО проведено розрахунки власних частот і форм коливань. Слід зазначити, що власні частоти коливань знаходяться близько одна від одної (у діапазоні до 12 Гц 20 частот) і форми коливань дуже складні. На рис. 2 зображено першу форму власних коливань системи ТФО.

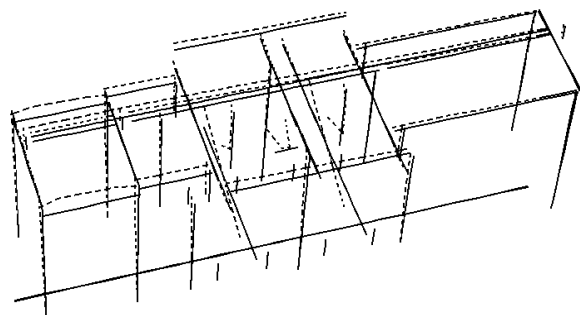


Рис 2 – Перша форма коливань системи ТФО

Сейсмічний вплив характеризується коливанням ґрунту при землетрусі, що викликає кінематичне збудження коливань досліджуваного об'єкта. При цьому сейсмічний вплив у загальному випадку представляється трикомпонентними акселерограмами (записами зміни прискорення за часом) для двох горизонтальних і вертикального напрямків [11].

Акселерограми можуть представлятися або інструментальними записами реальних землетру-

сів (природних і штучних, тривалістю від 5 с до 30 с), або синтезованими функціями, що узагальнюють у собі спектральні властивості реальних землетрусів.

При сейсмічній дії на систему ТФО впливають всі три компоненти акселерограми. Встановлено, що горизонтальні прискорення у більшості випадків перевищують вертикальні.

Вихідними даними для розрахунку на сеймостійкість системи ТФО є: бальність і максимальні рівні прискорення акселерограми. У розрахунках використовувалась синтезована акселерограма [1], яка представляє собою псевдогармонічний процес з безперервно зростаючою частотою і змінною амплітудою. Ця акселерограма у порівнянні з реальними має значно меншу тривалість (біля 4,35 с) і узагальнює у собі основні властивості і особливості дійсного сейсмічного впливу на величину динамічної реакції системи ТФО. Оцінка сеймостійкості системи проводилась при семибальному землетрусі (за допомогою масштабних коефіцієнтів акселерограма приведена до означеного рівня землетрусу).

Дослідження впливу сейсмічного навантаження на елементи системи ТФО турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ проводились за допомогою аналізу максимальних переміщень, швидкостей і прискорення у характерних точках верхньої плити фундаменту, корпусів циліндрів турбоагрегата, генератора та виносних підшипників, валопроводу та конденсатора (табл. 1).

Оцінювались зусилля і тиск на колодки упорного підшипника, зусилля і напруження в місцях кріплення елементів турбоагрегата на фундаменті. Ці елементи конструкції є найбільш відповідальними за надійність роботи системи ТФО при сейсмічних навантаженнях.

За допомогою створеного графічного інтерфейсу програмного забезпечення [3] розглянуто рух турбоагрегата і фундаменту, а також графіки зміни за часом переміщень, швидкостей і прискорень характерних точок та графіки зміни зусиль в елементах кріплення корпусів турбоагрегата на фундаменті.

Максимальні переміщення нижньої фундаментної плити спостерігаються в поперечному напрямку і не перевищують 2,4 мм. Допустиме переміщення верхньої фундаментної плити відносно нижньої вздовж осі турбоагрегата становить 50 мм [1], а в розглянутому випадку переміщення досягає значень, менших 24,4 мм.

Переміщення роторів у напрямку осі турбоагрегата відносно корпусів циліндрів відповідно становлять: для циліндра високого тиску – 1 мм,

для циліндра середнього тиску – 1,1 мм, для циліндра низького тиску – 1,2 мм, для генератора – 5,1 мм. При цьому нормативні значення переміщень для циліндра високого тиску – 2 мм, низького тиску – 5 мм. Переміщення роторів відносно корпусів у поперечному напрямку на порядок менші.

Переміщення конденсатора у напрямку осі турбогенератора дещо перевищують допустимі (33 мм). Для зменшення податливості конденсатора доцільно було б встановити обмежувачі.

Важливі значення мають одержані результати для тих частин системи ТФО, які найбільше відповідальні за працездатність конструкції під дією сейсмічних збурень. У табл. 2 наводяться значення максимальних зусиль у пружних елементах кріплення турбоагрегата на фундаменті.

Таблиця 1 – Переміщення і прискорення у характерних точках системи ТФО

Елемент системи	Переміщення, мм		Прискорення, м/с ²	
	U_z^{\max}	U_z^{\min}	a^{\max}	a^{\min}
Верхня плита	20,2	-22,0	11,70	-10,70
Упорний підшипник	22,1	-22,5	7,74	-5,63
Корпус ЦВТ	21,5	-22,0	7,05	-6,07
Ротор ЦВТ	22,1	-22,5	7,48	-6,38
Корпус ЦСТ	21,5	-21,9	6,79	-5,22
Ротор ЦСТ	22,2	-22,6	7,60	-5,36
Корпус ЦНТ	22,4	-23,3	6,16	-5,28
Ротор ЦНТ	22,2	-22,6	6,10	-5,38
Корпус генератора	17,6	-18,9	11,40	-10,40
Ротор генератора	22,3	-22,7	8,57	-8,03
Конденсатор	36,2	-33,7	8,57	-9,84

Таблиця 2 – Максимальні зусилля в пружних елементах

Назва пружного елемента	Позначення	Зусилля, тс
Шпонки корпусу упорного підшипника	P_z^{\max}	18,3
Шпонки корпусу ЦВТ	P_y^{\max}	68,4
Шпонка корпусу ЦСТ	P_y^{\max}	100,2
Шпонки корпусу ЦНТ	P_y^{\max}	109,8
	P_z^{\max}	212,2
Шпонки корпусу генератора	P_y^{\max}	41,9
	P_z^{\max}	190,5
Пружні елементи конденсатора	P_y^{\max}	2,8
	P_z^{\max}	2,4
Колодки опорного підшипника ЦСТ	P_x^{\max}	3,1
Колодки упорного підшипника	P_z^{\max}	53,8

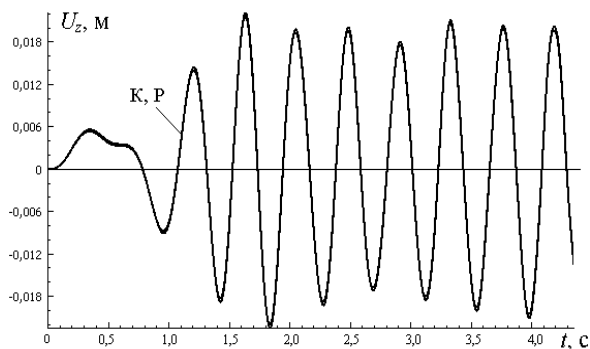


Рис. 3 – Переміщення корпусу і ротора циліндра високого тиску

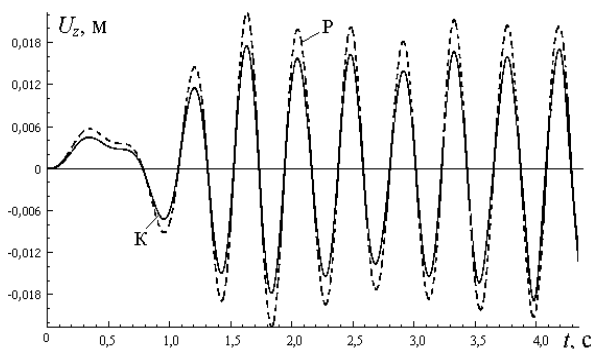


Рис. 4 – Переміщення корпусу і ротора генератора

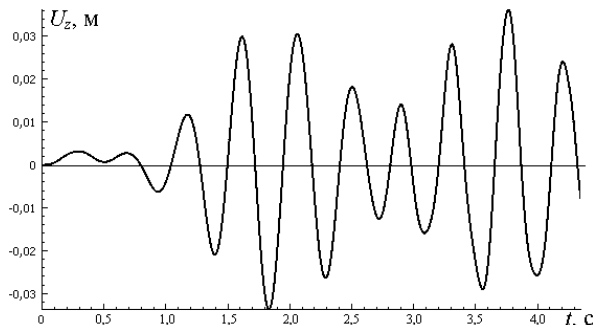


Рис. 5 – Переміщення конденсатора

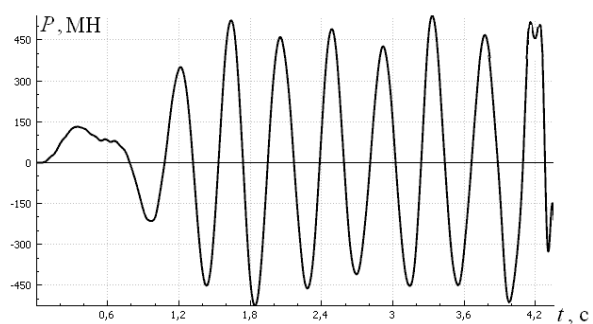


Рис. 6 – Зміна за часом осьового зусилля на колодки упорного підшипника

Тиск на колодки упорного підшипника турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ при семибальному землетрусі становить 7,08 МПа. Згідно з [1] максимальний тиск на колодки упорного підшипника не повинен перевищувати 15 МПа. Це дозволяє зробити висновок, що у розглянутому випадку забезпечується міцність покриття упорного підшипника.

На рис. 3–5 показано зміну за часом перемішень корпусу і ротора ЦВТ, корпусу і ротора генератора, конденсатора у напрямку осі турбоагрегата, які викликані дією сейсмічного навантаження.

На рис. 6 показано зміну за часом осьового зусилля на колодки упорного підшипника від кінематичного збурення, викликаного землетрусом.

Висновки

Аналіз результатів проведених розрахунків сейсмостійкості турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ показав, що переміщення роторів у напрямку осі турбоагрегата відносно корпусів циліндрів, переміщення верхньої фундаментної плити відносно нижньої менші за допустимі значення.

Осьові зусилля на колодки упорного підшипника не перевищують 54 тс, а тиск на колодки упорного підшипника становить 7,08 МПа, що майже вдвоє менше допустимого значення.

Результати розрахунків свідчать, що найбільше навантаженими частинами системи ТФО є шпоночні з'єднання, але напруження, які виникають у них під час розглянутих кінематичних збурень, що моделюють семибальний землетрус, не досягають допустимих значень і шпоночні елементи мають значні запаси по міцності.

Одержані результати проведених досліджень можуть бути використані при оцінці сейсмостійкості турбоагрегатів різної потужності.

Список літератури

1. Оборудование атомных энергетических установок. Расчет на прочность при сейсмическом воздействии: РТМ 108.020.37-81. Ленинград: НПО ЦКТИ, 1981. 39 с.
2. ПНАЭ Г-5-006-87. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. Москва: Госатомэнергонадзор СССР, 1987. 10 с.
3. Гонтаровский П. П., Гармаш Н. Г., Шульженко Н. Г. Методика расчета динамики системы турбоагрегат-фундамент-основание энергоблоков при сейсмических воздействиях. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2016. № 8(1180). С. 153–160. ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line). doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.22.
4. 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 машиностроєння*. 2016. Т. 19, № 4. С. 43–50. ISSN 0131-2928. doi: 10.15407/pmach2016.04.043.
5. 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.* 2017. № 10 (1232). С. 25–29. ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line). doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.03
- Гонтаровський П. П., Гармаш Н. Г. Оцінка навантаженості нелінійних з'єднань елементів системи турбоагрегат-фундамент-основа при сейсмічних діях. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування.* 2018. № 13 (1289). С. 57-61. ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line). doi: 10.20998/2078-774X.2018.13.10.
 - 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.
 - Кириллов А. П., Амбриашвили Ю. К. *Сейсмостойкость атомных электростанций.* Москва: Энергоатомиздат, 1985. 184 с.
 - Костарев В. В. Сейсмостойкость турбоагрегатов АЭС. *Труды ЦКТИ.* 1984. Вып. 212. С. 82–88.
 - Кендзера О. В. Сейсмічна небезпека і захист від землетрусів. Практичне впровадження розробок Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН. *Вісник НАН України.* 2015. № 2. С. 44–57. ISSN 1027-3239.
 - Амбриашвили Ю. К., Пискарев В. В. Методи вибору і побудови синтезованих акселерограмм для расчета энергетических объектов на сейсмические воздействия. *Труды ЦКТИ.* 1984. Вып. 212. С. 114–122.
 - Shulzhenko, M. G., Gontarovskiy, P. P., Garmash, N. G., Glyadya, A. O., Shvetsov, V. L., Grishin, M. M. and Gubskiy, O. M. (2016), “Seymostiykist turboagregatu K-540-23,5/50 [Seismic stability of turbine unit K-540-23,5/50]”, *Journal of Mechanical Engineering*, vol.19, no. 4, pp. 43–50, ISSN 0131-2928. doi: 10.15407/pmach2016.04.043.
 - Shulzhenko, N., Gontarovskiy, P., Garmash, N. and Glyadya, A. (2017), “Otsenka kolebaniy sistemy turboagregat-fundament-osnovaniye pri seysmicheskikh vozdeystviyakh [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 (print), ISSN 2707-7543 (on-line), doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.03.
 - Gontarovskiy, P. P. and Garmash, N. G. (2018) “Otsinka navantazhenosti nelineynykh z'yednan elementiv systemy turboagregat-fundament-osnova pry seysmichnykh diyakh [Estimating the loading of nonlinear element connections in the unit-foundation-base turbine system at seismic activities]”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 13(1289), pp. 57–61, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), doi: 10.20998/2078-774X.2018.13.10.
 - 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.
 - Kirillov, A. P., Ambriashvili, Yu. K. (1985), *Seysmostoykost' atomnykh elektrostantsiy* [Seismic resistance of nuclear power plants], Moscow, 184 p.
 - 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.
 - Kenzera, O.V. (2015) “Seysmichna nebezpeka i zakhyst vid zemletrusiv. Praktychne vprovadzheniya rozrobok Instytutu heofizyky im. S. I. Subbotina [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.
 - Ambriashvili, J. K and Piskarev, V. V. (1984), “Metodyi vyibora i postroeniya sintezirovannykh akselerogramm dlya rascheta energeticheskikh ob'ektov na seysmichskie vozdeystviya [Methods for selecting and building the synthesized accelerograms for the calculation of energy facilities on seismic effects]”, *Proc. Central Boiler and Turbine Institution*, no. 212, pp. 114–122.

References (transliterated)

Надійшла (received) 23.03.2020

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 НАН України, м. Харків, Україна; e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8503-0959>, Scopus 6602344237.

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 НАН України, м. Харків, Україна; e-mail: garm.natalya@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4890-8152>, Scopus 35733650500.

Глядя Алла Олександрівна (Глядя Алла Александровна, Glyadya Alla) – провідний інженер відділу вібраційних і термоміцнісних досліджень, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, м. Харків, Україна; e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8624-9701>, Scopus 6507452772.