

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

ОЦЕНКА КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМЫ ТУРБОАГРЕГАТ-ФУНДАМЕНТ-ОСНОВАНИЕ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

АННОТАЦИЯ С использованием созданной расчетной методики проведена оценка колебаний системы турбоагрегат-фундамент-основание мощных турбоагрегатов при сейсмических воздействиях. Расчетная модель динамической системы состоит из произвольно ориентированных стержней и сосредоточенных масс. В стержневых конечных элементах с распределенными параметрами учитываются все виды деформаций, имеющие место при колебаниях стержней. Воздействие сейсмической нагрузки моделируется с использованием акселерограмм реальных землетрясений. Проведен анализ частот и форм собственных колебаний динамических систем. Получены спектральные характеристики используемых сейсмограмм.

Ключевые слова: колебания, турбоагрегат, фундамент, сейсмическое воздействие, акселерограмма.

N. SHULZHENKO, P. GONTAROVSKIY, N. GARMASH, A. GLYADYA

ESTIMATING THE VIBRATIONS OF TURBOUNIT-FOUNDATION-BASE SYSTEM EXPOSED TO SEISMIC LOADS

ABSTRACT *Vibration Parameters of the turbounit-foundation-base system of powerful turbine units exposed to seismic loads were evaluated using the computation technique and the software developed on the basis of the method of finite elements. The computation model of dynamic system that allows us to take into consideration the structural peculiarities of basic elements consists of arbitrary oriented rods and concentrated masses with the moments of inertia interconnected by rigid or linear and nonlinear elastically damped elements. Rod-type finite elements with distributed parameters take into account all the types of strains caused by rod oscillations. The seismic load action is simulated using the accelerograms of real earthquakes. The mode shape and self-oscillation modes of turbounit-foundation-base system have been analyzed. Spectral characteristics of the seismograms used have been defined. It has been established that the seismic loading pattern considerably affects the stress of individual system elements even at the same earthquake intensity. To estimate the seismic resistance spatial computation models were used to take into consideration the structural specific features of turbounit-foundation-base system and seismic loads should be considered in the three mutually perpendicular axes. The obtained research data can be used for the design of powerful turbine units to evaluate their seismic resistance.*

Key words: *oscillations, turbine unit, foundation, seismic load, and the accelerogram.*

Введение

Надежная работа турбоагрегатов большой мощности тепловых и атомных электростанций обеспечивается прочностными свойствами фундамента и основания, воспринимающими все статические и динамические нагрузки от установленного на фундаменте оборудования и различных внешних воздействий. Фундаменты турбоагрегатов большой мощности представляют собой пространственные рамные конструкции, сочетающие жесткие балки верхнего строения с относительно гибкими стойками. Рамная конструкция опирается на нижнюю фундаментную плиту. Конструкция фундамента турбоагрегата определяется требованиями как по статическим, так и по динамическим характеристикам, связанными с необходимостью обеспечения эксплуатационной надежности фундамента. Выполнение требований по динамическим характеристикам фундаментов турбоагрегатов обеспечивается правильным выбором параметров рамной конструкции с учетом взаимодействия элементов в системе турбоагрегат-фундамент-основание (ТФО).

Цель работы

При проектировании энергетического оборудования высокие требования ставятся к его сейсмостойкости, то есть к сохранению прочности и работоспособности при сейсмических воздействиях [1, 2]. Возможные землетрясения могут вызывать в системе ТФО частичное разрушение фундамента; разрушения валопровода или шпоночных соединений, элементов крепления; выход из строя упорных подшипников, конденсаторов; большие относительные смещения роторов и цилиндров, приводящие к задеванию и т.д. [3]. Поэтому определение параметров вибрации и анализ поведения системы ТФО при сейсмических воздействиях различной интенсивности является актуальной задачей, позволяющей повысить общую прочность и надежность, а также обеспечить сейсмостойкость энергетического оборудования.

Постановка задачи

Для анализа динамики системы ТФО при сейсмических воздействиях на основе метода конечных элементов разработана расчетная методика и программное обеспечение [4]. Элементы расчетной схемы моделируются произвольно ориентиро-

ванними стержнями и сосредоточенными массами с моментами инерции, которые соединяются абсолютно жестко или с помощью упруго-демпферных связей. В стержневых элементах с распределенными параметрами учитываются все виды деформаций, которые имеют место при колебаниях стержней. Сейсмическое нагружение моделируется переменными инерционными силами, которые передаются от грунта на нижнюю фундаментную плиту. При этом податливость почвы учитывается моделью Винклера.

Корректная оценка параметров вибрации сложных динамических систем ТФО мощных турбоагрегатов под влиянием сейсмических воздействий требует построения расчетных моделей, в которых учитываются все элементы, влияющие на их прочность и работоспособность [5, 6]. При этом характеристики этих элементов должны максимально соответствовать поведению реальной конструкции во время возможных землетрясений. Сейсмическое воздействие моделируется ускорениями грунта в трех направлениях, которые задаются с помощью реальных или синтезированных акселерограмм [7]. Нижняя фундаментная плита, вертикальные плиты рамно-стеновых фундаментов и корпуса цилиндров низкого давления (ЦНД) представляются решеткой из стержней.

Как показали результаты исследований динамики систем ТФО турбоагрегатов К-1100-5,9/25 и К-540-23,5/50 (в дальнейшем для краткости будем использовать обозначения К-1100 и К-540) при сейсмических воздействиях [5, 6], расчетные модели высокого уровня сложности с подробной дискретизацией валопроводов, корпусов, конденсаторов и элементов фундамента несущественно влияют на полученные амплитуды колебаний и деформации элементов крепления турбоагрегата и конденсаторов на фундаменте по сравнению с грубой дискретизацией на конечные элементы. В расчетных схемах турбоагрегатов К-1100 и К-540 количество узлов конечных элементов составляло соответственно 1401 и 941 с шестью степенями свободы в каждом. Различные виды сейсмических воздействий по-разному влияют на сейсмостойкость турбоагрегатов, что вызвано различием их собственных частот и форм колебаний. Поэтому для обоих турбоагрегатов по разработанной расчетной методике [4] были получены собственные частоты, представленные в табл. 1, и формы собственных колебаний.

Обсуждение результатов

Кратко проанализируем некоторые формы колебаний систем ТФО. Три конденсатора турбоагрегата К-1100 установлены на податливых стержневых опорах на нижней фундаментной плите и слабо связаны с корпусом ЦНД [5], поэтому первая частота является кратной шести и соответ-

ствует колебаниям конденсаторов в горизонтальной плоскости вдоль и поперек турбоагрегата. Вторая частота собственных колебаний является кратной трем и соответствует крутильным колебаниям конденсаторов в горизонтальной плоскости. Третья частота – это колебания турбоагрегата с верхней фундаментной плитой вдоль его оси, сопровождающаяся изгибом вертикальных элементов фундамента. Четвертая – колебания валопровода с упорным подшипником вдоль оси турбоагрегата. Изгибные формы колебаний верхней фундаментной плиты в горизонтальной плоскости, сопровождающиеся изгибами вертикальных элементов, соответствуют с пятой по восьмую и десятую собственным частотам. Более высокие формы колебаний являются синфазными и противофазными перемещениями отдельных элементов системы ТФО (стоек, корпусов цилиндров и т.д.)

Таблица 1 – Частоты собственных колебаний

№ п/п	Частоты системы ТФО К-1100, Гц	Частоты системы ТФО К-540, Гц
1	1,964	1,887
2	2,146	2,193
3	2,441	2,792
4	4,913	5,319
5	5,337	5,512
6	5,805	6,462
7	7,452	7,285
8	8,880	7,713
9	9,999	11,245
10	10,017	11,428
11	10,899	12,356
12	11,125	12,765
13	11,245	13,115
14	12,118	13,334
15	12,571	14,602
16	12,823	14,802
17	13,011	15,632
18	13,250	16,898
19	13,599	17,287
20	14,150	17,610

Конденсаторы турбоагрегата К-540 крепятся к корпусам ЦНД и опираются на податливые пружины, установленные на нижней фундаментной плите [6], их перемещения связаны с перемещениями корпусов ЦНД и деформациями балок фундамента, поэтому кратные частоты для этой системы отсутствуют. Первая собственная частота системы ТФО соответствует крутильным колебаниям конденсаторов в горизонтальной плоскости, вторая – это их синфазные колебания поперек оси турбоагрегата совместно с изгибными деформациями верхней плиты. Третья частота соответствует крутильным колебаниям верхней фундаментной плиты в горизонтальной плоскости, сопровождающимся изгибами стоек. Четвертая и пятая

форми – это противофазные колебания конденсаторов в горизонтальной плоскости, а шестая – их синфазные колебания вдоль оси турбоагрегата. Седьмая собственная частота соответствует изгибным деформациям верхней фундаментной плиты в горизонтальной плоскости, девятая – ее вертикальным изгибным колебаниям вместе с турбоагрегатом. Восьмая форма – это продольные колебания валопровода вдоль его оси в противофазе с верхней плитой. Более высокие формы колебаний содержат совместные деформации нескольких элементов системы ТФО.

Поскольку параметры вибрации турбоагрегата при сейсмических воздействиях существенно зависят от вида акселерограмм, получение их спектральных характеристик позволяет объяснить возникновение максимальных перемещений элементов системы ТФО при совпадении частоты сейсмических воздействий с собственной частотой колебаний системы. Спектральные характеристики акселерограмм, используемых при анализе сейсмостойкости турбоагрегатов К-1100 и К-540 [5, 6], получены по соотношению

$$S_{x,y,z}(\omega) = \int_{t_n}^{t_k} g_{x,y,z}(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (1)$$

где $S_{x,y,z}(\omega)$ – амплитуда спектрального разложения по частоте ω ; $g_{x,y,z}(t)$ – зависимость амплитуды ускорений акселерограммы от времени t ; t_n, t_k – начальное и конечное значения интервала по времени, в котором рассматриваются сейсмограммы. Интегралы (1) получены численно с использованием метода трапеций, при этом шаг по времени соответствовал шагу задания используемых акселерограмм, а шаг частоты ω равнялся 0,1 Гц.

На рис. 1–3 представлены спектральные характеристики акселерограмм № 1–3 [5, 6], которые получены на участках наибольшей сейсмической активности, с длиной по времени от 22 до 50 с, от 70 до 95 с и от 0 до 20 с соответственно. На рис. 4 изображены спектральные характеристики синтезированной сейсмограммы [1]. Как видно из рисунков, спектральные характеристики различных сейсмограмм существенно отличаются, а воздействия их ускорений уменьшаются с частотой и практически затухают в районе 6–9 Гц. Спектральная характеристика синтезированной сейсмограммы плавно затухает во всем диапазоне частоты от нуля до 10 Гц, несмотря на короткое время воздействия (4,35 с).

При расчетах динамики систем ТФО с различными сейсмограммами [5, 6] формы их колебаний изменялись на протяжении всего времени сейсмического воздействия. Как правило, это были продольные, поперечные и крутильные колебания верхней фундаментной плиты вместе с турбоагрегатом, которые являются суперпозицией, в основном, первых восьми форм колебаний. Это зависит

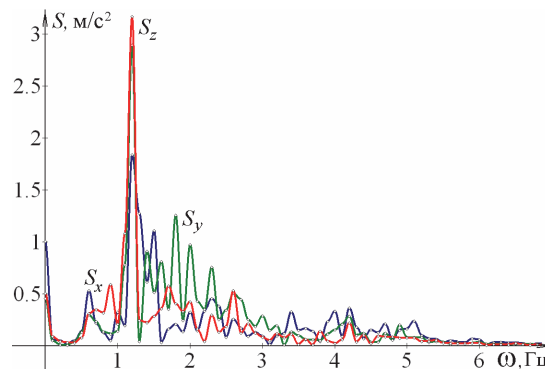


Рис. 1 – Спектральная характеристика акселерограммы № 1

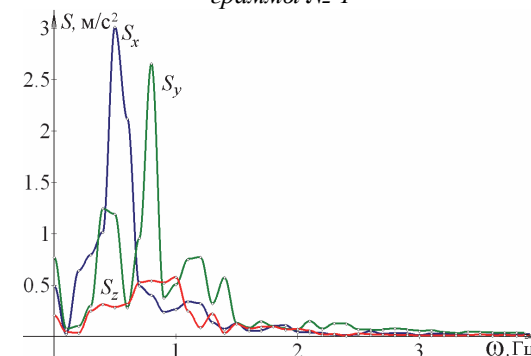


Рис. 2 – Спектральная характеристика акселерограммы № 2

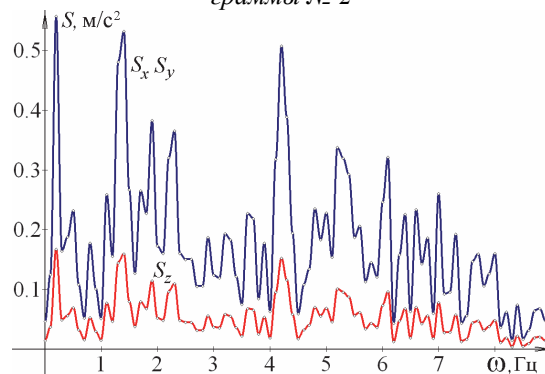


Рис. 3 – Спектральная характеристика акселерограммы № 3

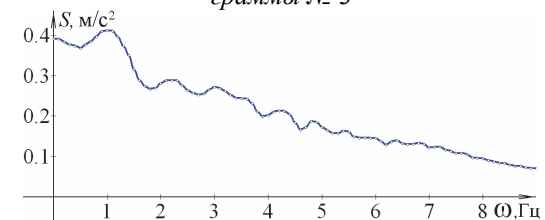


Рис. 4 – Спектральная характеристика синтезированной акселерограммы

от интенсивности воздействия при землетрясениях в различные моменты времени и от близости их частоты к тем или иным собственным частотам колебаний систем ТФО. На рис. 5 в качестве примера показаны формы колебаний системы ТФО К-540 в моменты времени 32,8 с и 38,3 с при воздействии сейсмограммы № 1 [6].

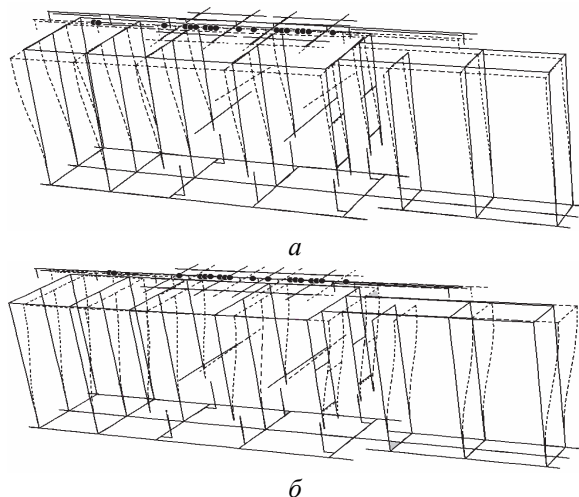


Рис. 5 – Формы перемещений системы ТФО:
а – время 32,8 с; б – время 38,3 с

Результаты исследований показали, что максимальные амплитуды колебаний элементов систем ТФО турбоагрегатов К-1100 и К-540 при сейсмических воздействиях и максимальные усилия в элементах их крепления на фундаменте значительно (более чем в 2 раза) отличаются для различных сейсмограмм, которые были приведены к одному уровню семибалльного землетрясения. Наименьшие амплитуды колебаний и усилия в элементах турбоагрегата наблюдались при использовании акселерограммы № 2.

Выводы

Анализ динамики систем ТФО турбоагрегатов К-1100 и К-540 при воздействии сейсмических нагрузений показал, что амплитуды колебаний верхней плиты в горизонтальном направлении существенно зависят от типа фундамента. Если для рамного фундамента колебания вдоль и поперек оси турбоагрегата соизмеримы между собой [6], то в случае рамно-стенового фундамента [5] колебания в поперечном направлении почти на порядок меньше, что объясняется высокой жесткостью его вертикальных стенок.

Результаты воздействия различных землетрясений на системы ТФО существенно отличаются, несмотря на одинаковую балльность сейсмограмм. При оценке сейсмостойкости расчетные модели должны быть пространственными и учитывать особенности конструкций систем ТФО, а сейсмические воздействия необходимо рассматривать в трех перпендикулярных направлениях. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании мощных турбоагрегатов для их оценки на сейсмостойкость.

Список литературы

- 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 **Костарев, В. В.** Сейсмостойкость турбоагрегатов АЭС / **В. В. Костарев** // Труды ЦКТИ. – 1984. – Вып. 212. – С. 82–88.
- 4 **Гонтаровский, П. П.** Методика расчета динамики системы турбоагрегат-фундамент-основание энергоблоков при сейсмических воздействиях / **П. П. Гонтаровский, Н. Г. Гармаш, Н. Г. Шульженко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 8(1180). – С. 153–160. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.22.
- 5 **Шульженко, М. Г.** Оцінка реакції потужного турбоагрегату на сейсмічне навантаження / **М. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровський, Н. Г. Гармаш, А. О. Глядя, В. Л. Швецов, М. М. Гришин, О. М. Губський** // Вібрації в техніці та технологіях. – 2016. – № 2(82). – С. 85–93. – ISSN 2306-8744.
- 6 **Шульженко, М. Г.** Сейсмостійкість турбоагрегату К-540-23,5/50 / **М. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровський, Н. Г. Гармаш, А. О. Глядя, В. Л. Швецов, М. М. Гришин, О. М. Губський** // Проблеми машиностроєння. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 43–50. – ISSN 0131-2928.
- 7 **Амбришвили, Ю. К.** Методы выбора и построения синтезированных акселерограмм для расчета энергетических объектов на сейсмические воздействия / **Ю. К. Амбришвили, В. В. Пискарев** // Труды ЦКТИ. – 1984. – Вып. 212. – С. 114–122.

Bibliography (transliterated)

- 1 (1981), *Oborudovanie atomnykh energeticheskikh ustanovok. Raschet na prochnost pri seysmicheskoy vozdeystvii: RTM 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.
- 2 (1987), *PNAE G-5-006-87. Normy proektirovaniya seysmostoykikh atomnykh stantsiy [PNAE-G-5-006-87. The rules of designing earthquake-resistant nuclear power plants]*, Gosatomenergonadzor USSR, Moscow, Russian.
- 3 **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.
- 4 **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.
- 5 **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 navantazheniya [Estimation the reaction of a powerful turbine unit on the seismic load]", *Vibratsiyi v tehnitsi ta tehnologiiyah* [Vibration in engineering and technology], No. 2(82), pp. 85–93, ISSN 2306-8744.
- 6 **Shulzhenko, M. G., Gontarovskiy, P. P., Garmash, N. G., Glyadya, A. O., Shvetsov, V. L., Grishin, M. M. and Gubskiy, O. M.** (2016), "Seystiyykist turboagregatu K-540-23,5/50 [Seismic stability of turbine unit K-540-23,5/50]", *Problemy Mashinostroenie* [Journal of Mechanical engineering], No. 4, pp. 43–50, ISSN 0131-2928.
- 7 **Ambriashvili, J. K and Piskarev, V. V.** (1984), "Metody vyibora i postroyeniya sintezirovannykh akselerogram dlya rascheta energeticheskikh ob'ektov na seysmicheskie 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.

Сведения об авторах (About authors)

Шульженко Николай Григорьевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела вибрационных и термочувствительных исследований, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины; г. Харьков, Украина; e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua.

Shulzhenko Nikolay Grigor'evich – Doctor of Technical Science, Professor, head of a department of vibration and termostrength researches, A. N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems (IPMach) NAS of Ukraine, Str. Pozharsky 2/10, Kharkov, Ukraine, 61046.

Гонтаровский Павел Петрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела вибрационных и термочувствительных исследований, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины; г. Харьков, Украина; e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua.

Gontarovskiy Pavel Petrovich – Candidate of Technical Science (Ph. D.), Senior Staff Scientist, Senior Staff Scientist of Department of Vibration and Termostrength Researches, A. N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems (IPMach) NAS of Ukraine; Str. Pozharsky 2/10, Kharkov, Ukraine, 61046.

Гармаш Наталия Григорьевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела вибрационных и термочувствительных исследований, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина; e-mail: garm_n@mail.ru, ORCID 0000-0002-4890-8152.

Garmash Nataliya Grigor'evna – Candidate of Technical Science (Ph. D.), Senior Staff Scientist, Senior Staff Scientist of Department of Vibration and Termostrength Researches, A. N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems (IPMach) NAS of Ukraine; Str. Pozharsky 2/10, Kharkov, Ukraine, 61046.

Глядя Алла Александровна – ведущий инженер, отдел вибрационных и термочувствительных исследований, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины; г. Харьков, Украина.

Glyadya Alla Aleksandrovna – Lead Engineer, Department of Vibration and Termostrength Researches, A. N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems (IPMach) NAS of Ukraine; Kharkov, Ukraine.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Шульженко, Н. Г. Оценка колебаний системы турбоагрегат-фундамент-основание при сейсмических воздействиях / **Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Н. Г. Гармаш, А. А. Глядя** // 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.

Please cite this article as:

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.

Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Шульженко, М. Г. Оцінка коливань системи турбоагрегат-фундамент-основа при сейсмічних впливах / **М. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровський, Н. Г. Гармаш, А. О. Глядя** // 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.

АНОТАЦІЯ З використанням створеної розрахункової методики проведена оцінка коливань системи турбоагрегат-фундамент-основа потужних турбоагрегатів при сейсмічних впливах. Розрахункова модель динамічної системи складається з довільно орієнтованих стержнів і зосереджених мас. У стержневих скіченних елементах з розподіленими параметрами враховуються всі види деформацій, що мають місце при коливаннях стержнів. Вплив сейсмічного навантаження моделюється з використанням акселерограм реальних землетрусів. Проведений аналіз частот і форм власних коливань динамічних систем. Отримані спектральні характеристики використаних сейсмограм.

Ключові слова: коливання, турбоагрегат, фундамент, сейсмічний вплив, акселерограма.

Поступила (received) 13.02.2017