

9. *Elastic-plastic analysis of interaction between an interface and crack in bi-materials* / M. Belhouari, A. Amiri, A. Mehidí, K. Madani, B. Bel Abbes Bachir // *Int. J. Damage Mech.* – 2014. – Vol. 23. – P. 299–326.
10. *Мустафаев, А. Б.* Взаимодействие берегов щели переменной ширины при изгибе полосы (балки) под воздействием температурного поля / А. Б. Мустафаев // *Механика машин, механизмов и материалов.* – 2014. – № 3 (28). – С. 30–36.
11. *Мирсалимов, В. М.* Решение задачи о частичном контактировании берегов щели переменной ширины под действием температурного поля / В. М. Мирсалимов, А. Б. Мустафаев // *Физ.-хим. механика материалов.* – 2015. – Т. 51, № 1. – С. 86–92.
12. *Mirsalimov, V. M.* A contact problem on partial interaction of faces of a variable thickness slot under the influence of temperature field / V. M. Mirsalimov, A. B. Mustafayev // *Mechanika.* – 2015. – Vol. 21. – P. 19–22.
13. *Мир-Салим-заде, М. В.* Периодическая контактная задача для стрингерной пластины / М. В. Мир-Салим-заде // *Тяжелое машиностроение.* – 2015. – № 6. – С. 37–42.
14. *Мир-Салим-заде, М. В.* Закрытие щели, исходящей из контура кругового отверстия в стрингерной пластине / М. В. Мир-Салим-заде // *Вестн. Чуваш. пед. ун-та им. И. Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния.* – 2016. – № 1 (27). – С. 78–89.
15. *Mirsalimov, V. M.* Simulation of partial closure of a variable width slot with interfacial bonds in end zones in an isotropic medium / V. M. Mirsalimov // *Int. J. Damage Mech.* – 2016. – Vol. 25. – P. 266–279.
16. *Мир-Салим-заде, М. В.* Частичный контакт берегов щели переменной ширины в подкрепленной стрингерами пластине / М. В. Мир-Салим-заде // *Физ.-хим. механика материалов.* – 2016. – Т. 52, № 3. – С. 29–34.
17. *Mirsalimov, V. M.* Inhibition of a curvilinear bridged crack by induced thermoelastic stress field / V. M. Mirsalimov, A. B. Mustafayev // *J. Thermal Stresses.* – 2016. – Vol. 39. – P. 1301–1319.
18. *Мусхелишвили, Н. И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мусхелишвили – М.: Наука, 1966. – 707 с.
19. *Гахов, Ф. Д.* Краевые задачи / Ф. Д. Гахов. – М.: Наука, 1977. – 640 с.

Поступила в редакцию 01.11.16

¹ М. Г. Шульженко, д-р техн. наук

¹ П. П. Гонтаровський, канд. техн. наук

¹ Н. Г. Гармаш, канд. техн. наук

¹ А. О. Глядя

² В. Л. Швецов, канд. техн. наук

² М. М. Гришин, канд. техн. наук

² О. М. Губський

¹ Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків, e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua, garm_n@mail.ru

² Публічне акціонерне товариство «Турбоатом», м. Харків, e-mail: shvetsov@turboatom.com.ua

Ключові слова: сейсмостійкість, турбоагрегат, фундамент, основа, акселерограма, стрижневий елемент, коливання.

УДК 539.3

СЕЙСМОСТІЙКІСТЬ ТУРБОАГРЕГАТУ К-540-23,5/50

Розглядається сейсмостійкість турбоагрегату К-540-23,5/50 з фундаментом із використанням створеної розрахункової методики оцінки коливань системи турбоагрегат-фундамент-основа. Розрахункова модель динамічної системи складається зі стрижнів і зосереджених мас з їх моментами інерції, що з'єднуються між собою жорстко або лінійними чи нелінійними пружно-демпферними елементами. Сейсмічне навантаження описується з використанням акселерограм реальних землетрусів. Наводяться результати для розрахункових схем різного рівня складності. Визначаються максимальні значення переміщень та навантаженості найбільш відповідальних елементів системи.

Вступ

Швидкий розвиток світової енергетики супроводжується будівництвом електростанцій у різних географічних зонах, у тому числі і в сейсмонебезпечних [1]. У зв'язку з цим висувуються вимоги до сейсмостійкості енергетичного обладнання – збереження його міцності, герметичності та працездатності при сейсмічних діях [2, 3]. При можливих землетрусах у системі турбоагрегат-фундамент-основа (ТФО) може відбуватися часткове руйнування фундаменту; вихід із ладу підшипників, кон-

© М. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровський, Н. Г. Гармаш, А. О. Глядя, В. Л. Швецов, М. М. Гришин, О. М. Губський, 2016

денсаторів; руйнування валопроводу, шпоночних з'єднань, елементів кріплення; великі відносні зміщення роторів і циліндрів, що призводять до зачіпання, і т. д. [4]. Тому розв'язання задачі забезпечення сейсмостійкості турбоагрегатів пов'язано з аналізом поведінки системи ТФО при динамічних впливах для виявлення навантаженості елементів та підвищення надійності системи.

Постановка задачі

Для оцінки сейсмостійкості турбоагрегату необхідна побудова розрахункової моделі з урахуванням основних складових системи ТФО [5], що впливають на показники її сейсмостійкості. При цьому сейсмічне навантаження моделюється прискореннями ґрунту у трьох напрямках, які задаються за допомогою реальних або синтезованих акселерограм [6].

Для оцінки сейсмостійкості турбоагрегату К-540-23,5/50 за розробленими на основі методу скінченних елементів методикою та програмним забезпеченням [7] розглядається розрахункова модель системи ТФО, яка включає фундаментну плиту з двома конденсаторами, рамно-стрижневий фундамент, на якому розміщені корпуси циліндрів високого (ЦВТ), середнього (ЦСТ) і два корпуси циліндрів низького тиску (ЦНТ-1, ЦНТ-2) з вбудованими підшипниками, корпус генератора та виносні підшипники, на які опирається валопровід. Сейсмічне навантаження передається від ґрунту на нижню фундаментну плиту, при цьому податливість ґрунту враховується за моделлю Вінклера.

Нижня фундаментна плита моделюється (рис. 1) решіткою із подовжніх вагомих стрижнів, сумарна жорсткість яких у площині xz співпадає із згинною жорсткістю плити. Їх маса також відповідає масі плити. Для врахування жорсткості плити в площині yz вводяться поперечні невагомні стрижні, осі яких жорстко з'єднуються з осями подовжніх стрижнів.

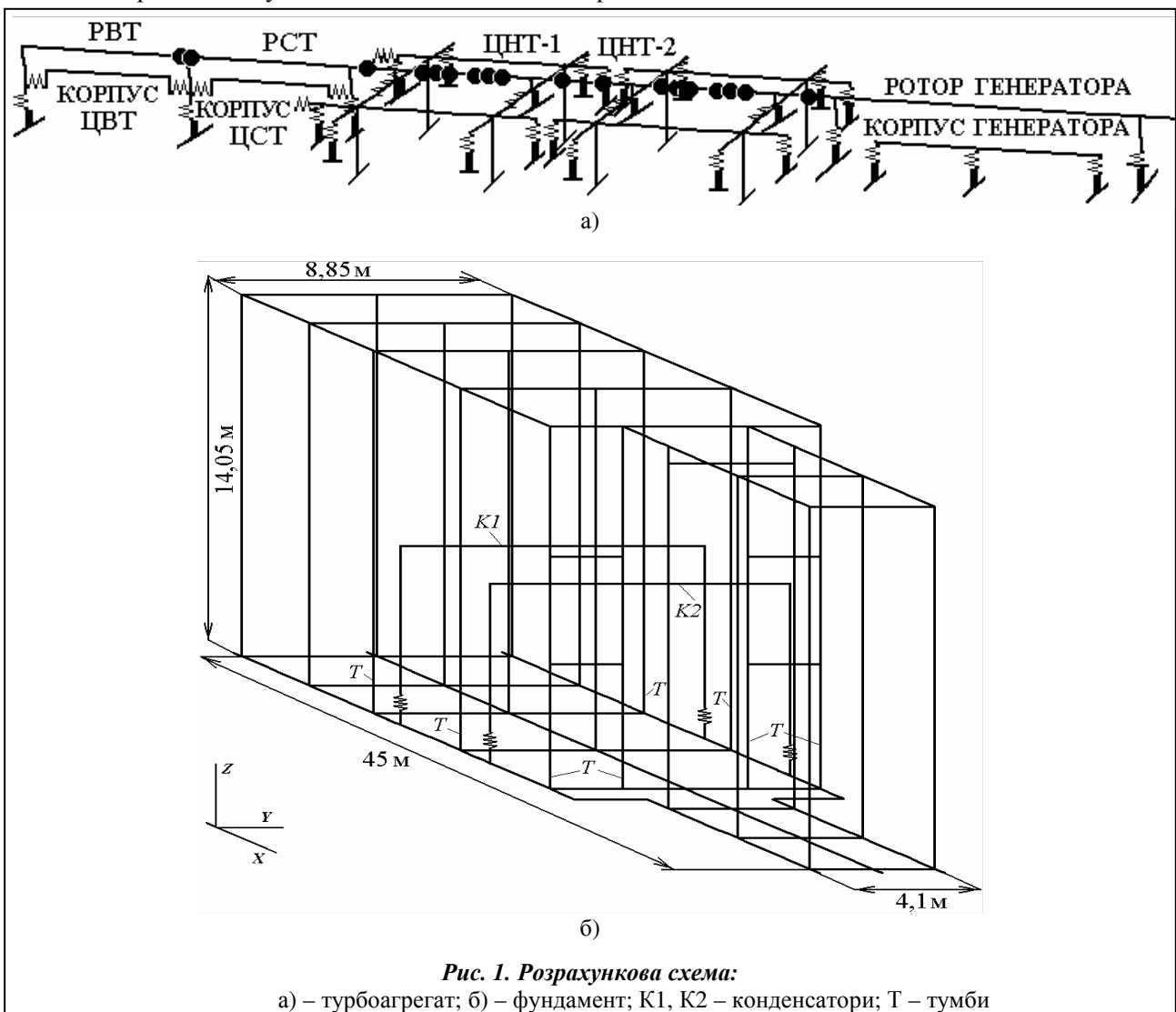


Рис. 1. Розрахункова схема:

а) – турбоагрегат; б) – фундамент; К1, К2 – конденсатори; Т – тумби

Вертикальні балки, які моделюють складову частину рамного фундаменту, опираються на тумби в зоні конденсаторів. Останні розташовані на нижній плиті на податливих елементах і задані стрижнями, перпендикулярними осі турбоагрегату. Конденсатори кріпляться до корпусів низького тиску за допомогою металевих коробів, кожен з яких моделюється чотирма стрижнями кутового профілю.

Корпус циліндра високого тиску моделюється стрижнем з поперечним перерізом у вигляді кільця з фланцями. Він опирається на стільці корпусів першого і другого підшипників, які кріпляться до рами шпонками, які, в свою чергу, Т-подібними вертикальними шпонками з'єднані з корпусом ЦВТ на відстані на 0,8 м нижче осі валопроводу. Перший підшипник може здійснювати переміщення в осьовому напрямку разом із корпусом ЦВТ.

Корпус циліндра середнього тиску також моделюється стрижнем із поперечним перерізом у вигляді кільця з фланцями і опирається на стільці другого і третього корпусів підшипників. Корпус ЦСТ, як і ЦВТ, з'єднується з корпусами виносних підшипників Т-подібними вертикальними шпонками на відстані на 0,8 м нижче осі валопроводу. Третій підшипник може переміщуватись в осьовому напрямку разом із корпусом ЦСТ.

Корпуси циліндрів низького тиску є просторовими пластинчато-стрижневими конструкціями. При побудові еквівалентних моделей корпусів ЦНТ (рис. 2) зберігалися масово-геометричні та основні динамічні характеристики конструкції, одержані при розрахунках пластинчато-стрижневих конструкцій методом скінченних елементів. Відповідність еквівалентних розрахункових моделей вихідній пластинчато-стрижневій моделі корпусу ЦНТ оцінювалась за частотою основних резонансів з урахуванням рівня переміщень у точках моделі, що знаходяться на осьовій лінії X .

Корпуси ЦНТ-1 і ЦНТ-2 мають складне з'єднання з фундаментом у вигляді шпонок і системи пружин. У корпуси ЦНТ вбудовані підшипники, які моделюються вертикальними стрижнями A , B (рис. 2). Корпус генератора моделюється трьома стрижнями з перерізами у вигляді кілець.

Валопровід турбоагрегату складається із п'яти роторів: ротора високого тиску (РВТ), ротора середнього тиску (РСТ), двох роторів низького тиску (РНТ) і ротора генератора. Опieraється він на 10 опорних і один упорний підшипник (другий), який знаходиться між ЦВТ і ЦСТ на початку РСТ. Ротори моделюються трубчатими стрижневими елементами різного поперечного перерізу з розподіленою масою, а фланці роторів – зосередженими масами. Ділянки роторів з облопаченими дисками (т.з. бочки ротора) моделюються ділянкою, маса якої включає маси облопачених дисків. Валопровід опieraється на корпуси підшипників через пружно-демпферний масляний шар.

Корпуси виносних підшипників моделюються вертикальними стрижнями коробчатого перерізу, які в поперечному, а для корпусу упорного підшипника – і в осьовому напрямку закріплені двома парами горизонтальних шпонок.

Розрахунки сейсмостійкості турбоагрегату К-540-23,5/50 виконувались із використанням трьох реальних акселерограм, поданих на рис. 3. За допомогою масштабних коефіцієнтів вони приводяться до рівня восьмибального землетрусу.

Результати досліджень

Сейсмостійкість потужного турбоагрегату оцінювалась за рівнем максимальних переміщень, швидкостей і прискорень у характерних точках верхньої плити фундаменту, корпусів циліндрів турбоагрегату, генератора та виносних підшипників, а також валопроводу та конденсаторів. Визначались максимальні зусилля і тиск на колодки упорного підшипника та зусилля і напруження в елементах кріплення турбоагрегату на фундаменті.

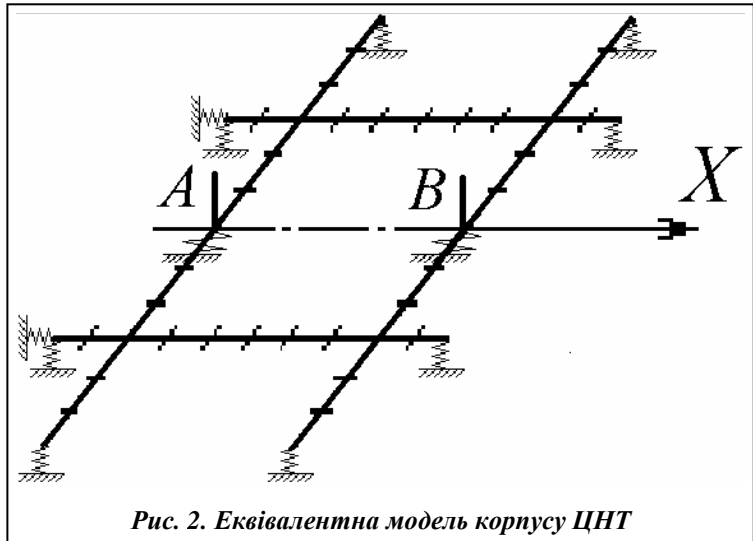


Рис. 2. Еквівалентна модель корпусу ЦНТ

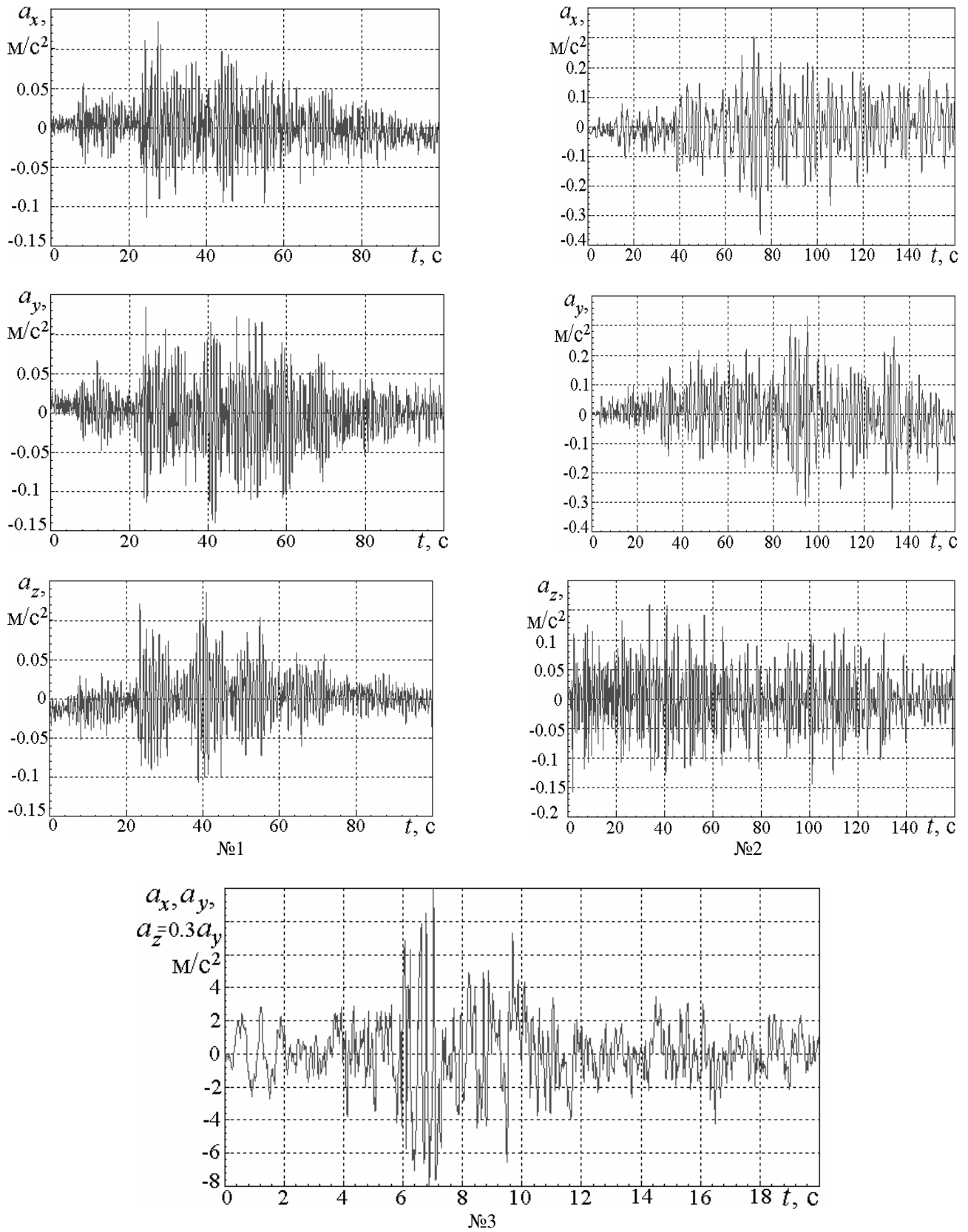


Рис. 3. Акселерограми сейсмічного навантаження

Створене програмне забезпечення [7] дозволяє розглядати розрахункові схеми ТФО різного рівня складності. Для оцінки результатів, одержаних за розрахунковими моделями різної складності, використовувалося сейсмічне навантаження за акселерограмою № 2 (рис.3).

У першому варіанті розрахункової моделі маса турбоагрегату розподілялась в вузлах скінченних елементів верхньої фундаментної плити. У другому варіанті – турбоагрегат задавався валопроводом, корпусами циліндрів і підшипників у вигляді стрижневих елементів відповідної жорсткості і маси, при цьому кріплення корпусів підшипників і циліндрів моделювалось пружними елементами. У табл. 1 наводяться значення максимальних переміщень, зусиль та прискорень у вибраних характерних точках.

Таблиця 1. Результати для різних розрахункових схем системи ТФО

Назва величини	Позначення	Схема	
		1	2
переміщення верхньої фундаментної плити	U_x^{max} , мм	19,6	17,5
навантаження на колодки упорного підшипника	P_x^{max} , Т	–	31,7
	σ_x^{max} , МПа	–	3,52
прискорення верхньої фундаментної плити	a_x^{max} , м/с ²	0,856	0,807
переміщення конденсатора K1 відносно фундаментної плити	U_x^{max} , мм	–	1,6
переміщення конденсатора K2 відносно фундаментної плити	U_x^{max} , мм	–	1,3
навантаження на шпонки корпусу упорного підшипника	P_x^{max} , Т	–	47,1
	P_y^{max} , Т	–	31,5
переміщення упорного підшипника	U_x^{max} , мм	–	19,1
прискорення упорного підшипника	a_x^{max} , м/с ²	–	0,861
переміщення корпусу ЦНТ-2	U_x^{max} , мм	–	17,70
переміщення РНТ-2	U_x^{max} , мм	–	19,10
вбудований підшипник ЦНТ-2 з боку генератора	U_x^{max} , мм	–	18,00

Для точок фундаменту першого і другого варіантів розрахункових схем ТФО спостерігаються практично однакові значення переміщень і прискорень верхньої плити. Для другого варіанта визначено навантаження на колодки упорного шідшипника, переміщення і прискорення характерних точок турбоагрегату та значення зусиль в місцях їх кріплення на верхній фундаментній плиті, які неможливо отримати при використанні першої розрахункової схеми.

Другий варіант розрахункової схеми повніше відображає конструктивні особливості системи ТФО, оцінку сейсмостійкості турбоагрегату доцільно проводити для цього варіанта. При розрахунках на акселерограмах (рис. 3) виділялися відрізки часу з максимальним рівнем прискорення [5], для акселерограми № 1 – від 22 до 50 с, № 2 – від 70 до 95 с, а № 3 – від 0 до 20 с. Результати розрахунків із різними акселерограмами наводяться в табл. 2.

У табл. 3 наводяться значення максимальних зусиль у шпонках кріплення корпусів на верхній фундаментній плиті та максимальні навантаження пружних елементів конденсаторів і колодок упорного підшипника. Ці елементи конструкції в першу чергу визначають можливість її подальшої роботи після сейсмічних навантажень.

Тиск на колодки упорного підшипника, максимальне значення якого не повинне перевищувати 15 МПа [2], під дією сейсмічних навантажень, заданих акселерограмами № 1 – № 3, відповідно складає 5,36; 3,52 і 6,07 МПа. У розглянутих випадках дотримуються вимоги по міцності упорного підшипника.

Результати розрахунків показали, що навіть при однаковій бальності землетрусів сейсмічні навантаження, що описуються різними акселерограмами, викликають різні максимальні значення переміщень і навантажень точок системи ТФО (табл. 2). Наприклад, переміщення конденсаторів турбоагрегату становлять 27,9 і 27,5; 19,1 і 18,8 та 27,4 і 26,7 мм відповідно до акселерограм № 1 – № 3.

Графічний інтерфейс розробленого програмного забезпечення [7] дозволяє переглянути анімацію руху турбоагрегату і фундаменту при сейсмічному навантаженні у будь-який момент часу,

зміну за часом переміщень, швидкостей і прискорень у характерних точках, вибраних для аналізу, а також зміну зусиль в елементах кріплення корпусів турбоагрегату на фундаменті.

На рис. 4 показано зміну за часом переміщень упорного підшипника, які викликані дією сейсмічного навантаження, поданого акселерограмою № 1.

На рис. 5 показано зміну за часом осьового зусилля на колодки упорного підшипника від землетрусу, що моделюється акселерограмою № 1.

Таблиця 2. Максимальні переміщення і прискорення елементів системи ТФО

Елемент системи	U_x^{max} , мм			a_x^{max} , м/с ²		
	Акселерограма					
	№1	№2	№3	№1	№2	№3
верхня плита	25,4	17,5	26,0	4,30	0,807	6,11
упорний підшипник	27,2	19,1	27,4	4,28	0,861	5,79
корпус ЦВТ	26,0	18,0	26,2	4,33	0,821	5,73
ротор ЦВТ	27,2	19,1	27,4	4,39	0,861	5,81
корпус ЦСТ	26,0	18,0	26,2	4,18	0,821	5,79
ротор ЦСТ	27,3	19,1	27,5	4,22	0,862	5,79
корпус ЦНТ-2	25,4	17,7	26,5	3,46	0,800	6,23
ротор ЦНТ-2	27,4	19,1	27,5	3,51	0,865	5,76
вбудований підшипник ЦНТ-2 з боку генератора	26,2	18,0	25,4	3,30	0,829	6,23
корпус генератора	25,0	17,4	25,2	3,01	0,789	6,13
ротор генератора	27,4	19,1	27,6	3,28	0,865	5,81
конденсатор K1	27,9	19,1	27,4	4,08	0,883	5,83
конденсатор K2	27,5	18,8	26,7	3,56	0,870	5,57

Таблиця 3. Максимальні зусилля в шпонках кріплення корпусів циліндрів і виносних підшипників на верхній фундаментній плиті

Назва пружного зв'язку	Зусилля, т	Акселерограма		
		№1	№2	№3
шпонки корпусу упорного підшипника	P_x	71,1	47,1	75,2
	P_y	69,9	31,5	55,7
шпонки корпусу ЦВТ	P_x	41,9	28,3	43,2
	P_y	21,4	11,5	21,4
шпонки корпусу ЦСТ	P_x	45,7	30,8	47,9
	P_y	33,0	13,9	30,0
шпонки корпусу ЦНТ-1	P_x	135,7	84,9	150,4
	P_y	168,1	71,0	170,4
шпонки корпусу ЦНТ-2	P_x	145,8	88,6	124,2
	P_y	242,6	119,6	236,4
шпонки корпусу генератора	P_x	87,8	60,8	103,3
	P_y	51,8	27,1	49,2
навантаження на пружні елементи конденсатора K1	P_x	13,8	9,5	13,9
	P_y	11,7	6,1	10,3
навантаження на пружні елементи конденсатора K2	P_x	13,5	9,3	13,5
	P_y	10,1	5,4	9,2
навантаження на колодки упорного підшипника	P_x	48,3	31,7	54,7

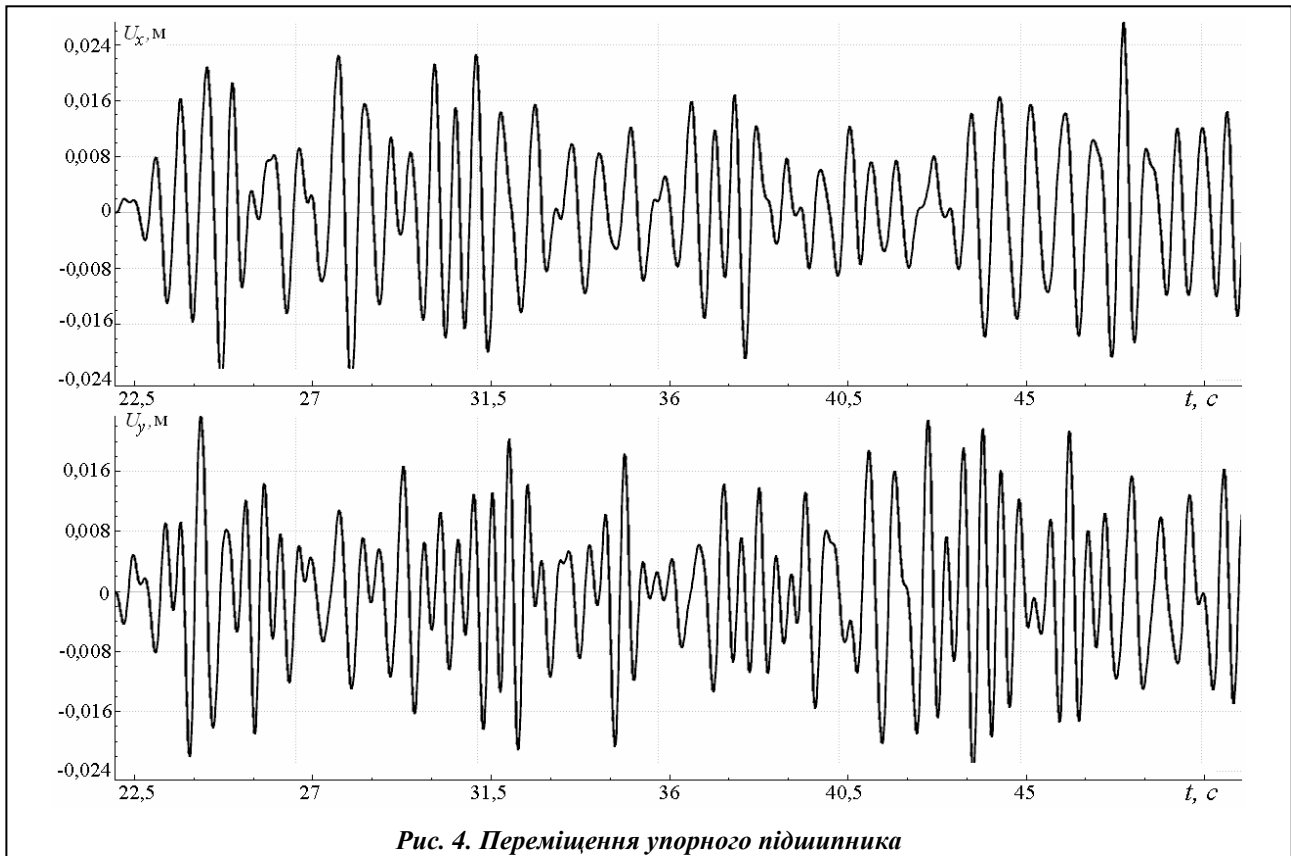


Рис. 4. Переміщення упорного підшипника

Висновки

Аналіз результатів розрахунків сейсмостійкості турбоагрегату при різних сейсмічних навантаженнях засвідчує, що осьові зусилля на колодки упорного підшипника при восьмибальному землетрусі не перевищують 55 т.

Максимальні переміщення верхньої фундаментної плити 26 мм спостерігаються уздовж осі турбоагрегату, а переміщення в поперечному напрямку мають менші, але сумірні значення, на відміну від рамно-стінового фундаменту [5], де вони менші майже на порядок. Максимальні переміщення нижньої фундаментної плити вздовж осі турбоагрегату для всіх акселерограм не перевищують 1 мм (допустиме зміщення верхньої фундаментної плити по відношенню до нижньої складає 50 мм).

Переміщення роторів у напрямку осі турбоагрегату відносно корпусів циліндрів для акселерограм № 1 – № 3 відповідно становить: для ЦВТ – 1,2 мм; 1,1 мм і 1,2 мм, для ЦСТ – 1,3 мм; 1,1 мм і

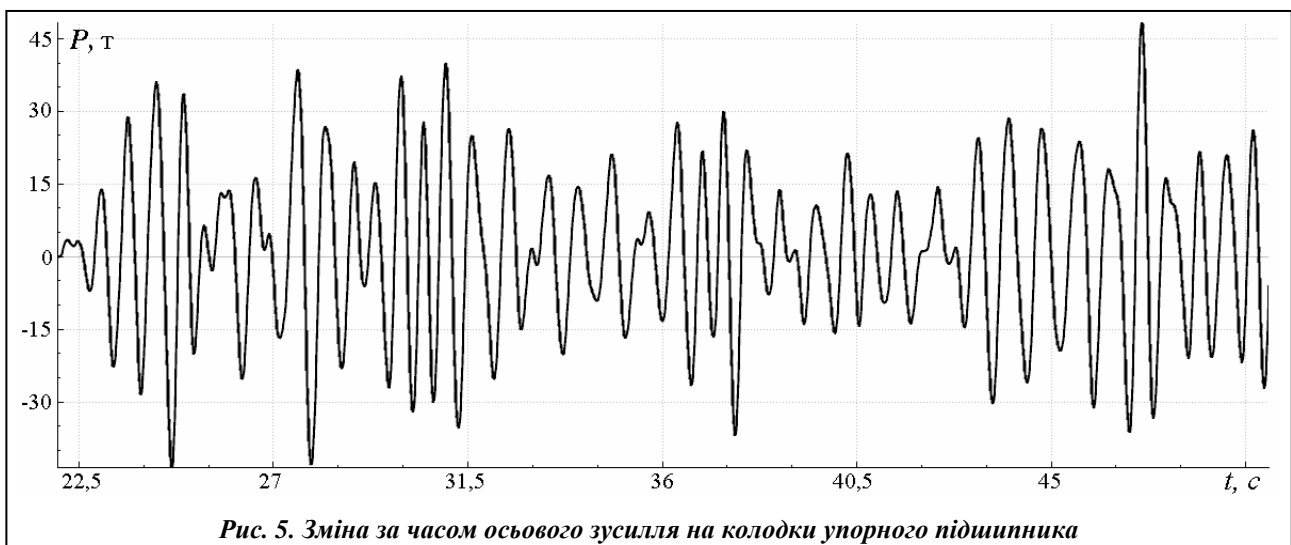


Рис. 5. Зміна за часом осьового зусилля на колодки упорного підшипника

1,3 мм, для ЦНТ – 2,0 мм; 1,4 мм і 1,0 мм, для генератора – 2,4 мм; 1,7 мм і 2,4 мм, які не перевищують нормативних значень (для ЦВТ – 2 мм, для ЦНТ – 5 мм). Переміщення роторів відносно корпусів у поперечному напрямку на порядок менші.

Результати розрахунків свідчать, що найбільш навантаженими частинами системи є шпоночні з'єднання, але напруження, які виникають у них під час землетрусів у розглянутих випадках, не досягають допустимих значень і шпоночні елементи мають значні запаси по міцності.

Література

1. *Кендзера, О. В.* Сейсмічна небезпека і захист від землетрусів. Практичне впровадження розробок Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України / О. В. Кендзера // Вісн. НАН України. – 2015. – № 2. – С. 44–57.
2. *РТМ 108.020.37-81.* Оборудование атомных энергетических установок. Расчет на прочность при сейсмическом воздействии. – Введ. 04.06.81. – Л.: НПО Центр. котлотурбин. ин-т, 1981. – 39 с.
3. *ПНАЭ Г-5-006-87.* Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. – М.: Госатомэнергонадзор СССР, 1987. – 10 с.
4. *Костарев, В. В.* Сейсмостойкость турбоагрегатов АЭС / В. В. Костарев // Тр. Центр. котлотурбин. ин-та. – 1984. – Вып. 212. – С. 82–88.
5. *Оцінка реакції потужного турбоагрегату на сейсмічне навантаження* / М. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровський, Н. Г. Гармаш і др. // Вібрації в техніці та технологіях. – 2016. – № 2 (82). – С. 85–93.
6. *Амбриашвили, Ю. К.* Методы выбора и построения синтезированных акселерограмм для расчета энергетических объектов на сейсмические воздействия / Ю. К. Амбриашвили, В. В. Пискарев / Тр. Центр. котлотурбин. ин-та. – 1984. – Вып. 212. – С. 114–122.
7. *Гонтаровский, П. П.* Методика расчета динамики системы турбоагрегат-фундамент-основание энергоблоков при сейсмических воздействиях / П. П. Гонтаровский, Н. Г. Гармаш, Н. Г. Шульженко // Вісн. НТУ «ХП». Сер. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – № 8 (1180). – С. 153–160.

Надійшла до редакції 13.11.16