

УДК 621.125

РОЗРАХУНКОВЕ ВИЗНАЧЕННЯ СЕЙСМОСТІЙКОСТІ ОБЛАДНАННЯ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

С. А. Пальков

sergpalkov@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2215-0689

І. А. Пальков

igorpalkov1987@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4639-6595

Акціонерне товариство

«Турбоатом»,

61037, Україна, м. Харків,

пр. Московський, 199

Запропоновано алгоритм підтвердження сейсмостійкості обладнання розрахунковим методом і визначено межі його застосування. Розроблено математичну модель обладнання і наведено приклад визначення власних частот та напружень в конструкції в тривимірній постановці. Використано два основних типи розрахунку – статичний і динамічний. У статичному розрахунку визначався напружено-деформований стан конструкції. Проведено порівняння значень отриманих напружень з допустимими для застосовуваних матеріалів, на підставі чого було зроблено висновки щодо міцності конструкції при сейсмічному впливі. Результатом динамічного розрахунку стало визначення жорсткості конструкції. Порівняння отриманих значень напружень з допустимими для даного обладнання дозволило зробити висновок щодо його стійкості до сейсмічного впливу. Оцінку сейсмостійкості виконано на прикладі конденсатора парової турбіни К-1000-60/1500. Розрахунок на сейсмостійкість вказаного обладнання виконано при інтенсивності сейсмічного впливу 6 балів за шкалою MSK-64. В ході розв'язання поставленої задачі отримано результати розподілу напружень в корпусі та інших елементах конструкції конденсатора від дії навантажень під час нормальної експлуатації та проектного землетрусу. Розрахунок обладнання на сейсмостійкість виконано за допомогою методу скінченних елементів. Це дозволило подати суцільне тіло у вигляді сукупності окремих скінченних елементів, що взаємодіють між собою в скінченному числі вузлових точок. До цих точок прикладаються деякі зусилля взаємодії, що характеризують вплив розподілених внутрішніх напружень, прикладених уздовж реальних границь суміжних елементів. Для проведення такого розрахунку в пакеті CAD моделювання створено тривимірну модель. Отриману геометричну модель імпортовано в програмний комплекс, що дозволило істотно скоротити трудомісткість. Застосування розрахункового методу дозволяє значно знизити обсяг випробувань при підтвердженні сейсмостійкості обладнання. Отримано результати просторового складного напруженого стану конструкції конденсатора парової турбіни від дії під час нормальної експлуатації та проектного землетрусу.

Ключові слова: турбіна, сейсмостійкість, напруження, землетрус, акселерограма, скінченний елемент, власна частота.

Вступ

Роботи з підтвердження сейсмостійкості обладнання різного призначення обумовлені активним будівництвом об'єктів в сейсмонебезпечних зонах, зміною нормативних документів в частині сейсмостійкості і створенням нових видів обладнання (в тому числі великогабаритного), до яких раніше не висувалося вимоги з сейсмостійкості.

На цей час існує загальна тенденція до зменшення кількості випробувань, натурних макетів, застосування більш сприятливих режимів випробувань, що пов'язано з їх значною трудомісткістю та дорожнечою. Однак внаслідок сейсмічного впливу навіть малої інтенсивності виникають складні задачі, що потребують оперативного розв'язання. Це виражається в тому, що на вибухонебезпечних об'єктах енергетичної промисловості, де використовується різноманітне електротехнічне обладнання, що має різні динамічні характеристики, під час землетрусів може мати місце порушення в забезпеченні електроенергією і втрата керованості об'єктом. На таких небезпечних об'єктах, як атомні електростанції, рекомендується враховувати сейсмічні впливи, починаючи вже з 4 балів, а все електротехнічне обладнання повинно поставлятися обов'язково з документацією, що підтверджує його сейсмостійкість.

Розрахунок на сейсмостійкість є обов'язковим етапом перевірного розрахунку обладнання турбоустановки і служить для визначення можливості використання в сейсмічних районах обладнання електростанцій, спроектованих відповідно до вимог нормативних документів. На цей час вимоги до сейсмостійкості енергетичного обладнання увійшли до розряду обов'язкових при проектуванні не тільки атомних, а й теплових електростанцій, розміщених в сейсмонебезпечних районах. Велика увага, яка приділя-

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.

© С. А. Пальков, І. А. Пальков, 2021

ється питанню забезпечення сейсмостійкості обладнання електростанцій, визначається не тільки небезпечною радіоактивного зараження навколишнього середовища, загибелі людей, великих матеріальних втрат при землетрусах, а й можливістю істотно підвищити надійність обладнання за нормальних умов експлуатації [1]. Це пов'язано з тим, що розрахунок на сейсмостійкість є по суті додатковим аналізом всієї конструкції при динамічному впливі, який має широкий спектр частот від доль до декількох десятків герц та включає в себе практично всі робочі і власні частоти обладнання. В результаті вже на стадії проектування виявляються слабкі елементи конструкції, які неможливо виявити при традиційних методах аналізу. Згідно з загальним підходом до антисейсмічного проектування, сейсмостійкість турбоагрегату вважається забезпеченою, якщо вплив проектного землетрусу не порушує його працездатності і забезпечується вироблення електроенергії з негарантованою економічністю під час і після землетрусу.

Вимоги в частині сейсмостійкості по-різному регламентуються в вітчизняних та зарубіжних стандартах. На пострадянському просторі основною вимогою є ГОСТ 17516.1–90 [2] для введених в експлуатацію атомних електростанцій (АЕС) і норми проектування НП-031-01 [3] для знову споруджуваних. Із зарубіжних стандартів основоположним в частині сейсмостійкості (сейсмічної кваліфікації) є стандарт МЕК 60980 [4]. Ці ж стандарти містять рекомендації щодо застосування розрахункового методу для підтвердження сейсмостійкості.

Розрахунковий метод дозволяє провести підтвердження сейсмостійкості великогабаритного устаткування, обладнання, яке вже знаходиться в експлуатації (наприклад при модернізації), дає можливість узагальнити результати випробувань на сейсмостійкість одного виробу на серію аналогічних виробів. Важливою є також можливість прогнозувати результати випробувань і проводити їх розрахункову корекцію при неможливості створення для них штатних умов.

Розрахунковий метод включає в себе кілька основних етапів:

- аналіз вимог;
- створення математичної моделі обладнання;
- розрахунок конструкції на задані навантаження.

Алгоритм розрахункового підтвердження сейсмостійкості має використовувати два основних типи розрахунку – статичний і динамічний. У статичному розрахунку обчислюються напруження і переміщення в конструкції, проводиться їх порівняння з допустимими для застосовуваних матеріалів значеннями, на підставі чого робиться висновок про міцність конструкції при сейсмічних впливах [5]. Результатом динамічного розрахунку є визначення жорсткості конструкції. Порівняння отриманих значень напружень з допустимими для даного обладнання дозволяє зробити висновок щодо його стійкості до сейсмічних впливів.

Існує кілька способів задання сейсмічних впливів [3, 4], основні з них: використання акселерограми землетрусу, спектри відгуку або рівень впливу в балах за шкалою MSK-64.

Питання розрахункової оцінки сейсмостійкості обладнання електростанцій вивчалися в роботах багатьох видатних вчених та наукових інститутів [6–13].

У роботі [8] висвітлено результати дослідження сейсмічної крихкості обладнання компонентів атомних електростанцій. Наведено приклад спрощеної моделі корпусу реактора, що опирається на систему ізоляції фундаменту. В роботі [9] розглянуто методологію аналізу сейсмічної стійкості АЕС в Словаччині, що базується на нових результатах геологічного та сейсмотектонічного моніторингу. Описано сейсмічні навантаження, що базуються на імовірнісному аналізі сейсмічного ризику. В [10] наведено результати наукових досліджень процесу оптимізації статичних та динамічних характеристик запропонованої пружинно-демпферної трикомпонентної системи сейсмоізоляції в умовах експлуатації енергоблока з реактором ВВЕР-1200, виконаних фахівцями «ЦКТИ-Вібросейсм» спільно з фірмою GERB. В роботі [12] вивчається динамічний відгук конструкції з тривимірною системою ізоляції, де автори, базуючись на отриманих результатах, дають рекомендації щодо введення додаткових обмежень системи. В [13] наведено результати вивчення сейсмостійкості будівельних конструкцій за спектрами відгуків, отриманих під час землетрусу в Кумамото, Японія. Вивчається вплив різноманітних конструктивних ізоляційних елементів на напружений стан будівель.

Виходячи з цього загального принципу, в даній роботі згідно з [14] оцінювалася сейсмостійкість елементів конденсатора парової турбіни К-1000-60/1500 за методикою, в основу якої покладено метод скінченних елементів (МСЕ) [15].

Даний розрахунок на сейсмостійкість виконано при інтенсивності сейсмічного впливу 6 балів за шкалою MSK-64. В ході розв'язання поставленої задачі отримано результати розподілу напружень в корпусі та інших елементах конструкції конденсатора від дії навантажень під час нормальної експлуатації (НЕ) та проектного землетрусу (ПЗ).

Особливості конструкції конденсатора

Конденсатор турбіни К-1000-60/1500 складається з трьох конденсаторів, ідентичних по конструкції, з'єднаних за допомогою перехідних патрубків з вихлопними патрубками турбіни [16, 17]. Відпрацьована пара з трьох циліндрів низького тиску (ЦНТ-1, 2, 3) надходить в два бічних конденсатори, розташовані по обидві сторони ЦНТ.

Система обпирання бічних конденсаторів забезпечує відносні температурні переміщення елементів системи «ЦНТ – Конденсатор». ЦНТ має з кожного боку по чотири вихлопних патрубки прямокутного перерізу. З кожного боку ЦНТ з'єднується з корпусом конденсатора двома перехідними патрубками за допомогою чотирьох вставок з лінзовими компенсаторами.

Перехідний патрубок на вході в корпус конденсатора має прямокутний переріз, висота якого відповідає висоті корпусу конденсатора, а ширина – половині його довжини. При використанні дифузійної конструкції перехідного патрубка знижується швидкість входу пари в корпус конденсатора та забезпечується рівномірний розподіл пари по вхідному перерізу трубного пучка. З'єднання перехідних патрубків як з корпусами конденсатора, так і з проміжними компенсуючими елементами ЦНТ виконується за допомогою зварювання. При такому з'єднанні ЦНТ з корпусом конденсатора виникають бічні зусилля, що діють на корпус конденсатора в сторону ЦНТ та визначаються перепадом тиску і площею його вихлопних патрубків.

Зусилля, що діють на кожен конденсатор, передаються на фундамент турбіни гнучкими боковими опорами, що встановлюються по обидві сторони трубного пучка між конденсатором та фундаментом турбіни (всього чотири групи по дві опори).

Опори виконані з труб. Кожна труба жорстко кріпиться з одного боку до корпусу конденсатора біля кінцевих трубних дощок та спеціальним чином укріплених водяних камер, а з іншого – до закладених у фундамент металевих конструкцій.

Навантаження від ваги конденсатора з водою сприймається системою гнучких стрижнів, розташованих уздовж конденсатора. Із зовнішнього боку конденсатора опора має один ряд стрижнів, з внутрішньої сторони (у перехідного патрубка) – два ряди. В кожному ряді по 24 стрижні. Така опора жорстко закладається в елементи конструкції нижньої плити фундаменту та приварюється до конденсатора.

З умов компоновки циркуляційних трубопроводів конденсатора підведення і відведення охолоджуючої води виконано в нижній частині водяних камер.

Постановка задачі та опис методики розрахунку

Розрахунок обладнання на сейсмостійкість в даній роботі виконувався за допомогою МСЕ. Цей метод дозволяє подати суцільне тіло у вигляді сукупності окремих скінченних елементів (СЕ). Вони взаємодіють між собою в скінченному числі вузлових точок, до яких прикладаються деякі зусилля взаємодії, що характеризують дію розподілених внутрішніх напружень, прикладених уздовж реальних границь суміжних елементів. Проблема зводиться до розрахунку пружної системи зі скінченним числом ступенів свободи. Заміна вихідної конструкції сукупністю дискретних елементів передбачає рівність енергій конструкції та її дискретної моделі. Напруження в цих елементах визначаються комбінацією напружень від заданих та динамічних навантажень. Результуючі напружень порівнюються з допустимими.

СЕ модель обладнання створюється на основі конструкторської документації, яка може бути подана у вигляді паперових або електронних креслень, а також у вигляді тривимірної моделі. Найбільш часто зустрічаються перші два варіанти. За ними доводиться фактично заново створювати геометрію СЕ моделі.

Для проведення даного розрахунку в масштабі 1:1 у пакеті CAD моделювання була створена тривимірна модель конденсатора парової турбіни К-1000-60/1500 (рис. 1). Отримана геометрична модель імпортувалася до розрахункового комплексу, що дозволило істотно скоротити трудомісткість. У розрахунковому комплексі геометрична модель розбивалася на скінченні елементи, задавалися властивості матеріалів і прикладалися граничні умови.

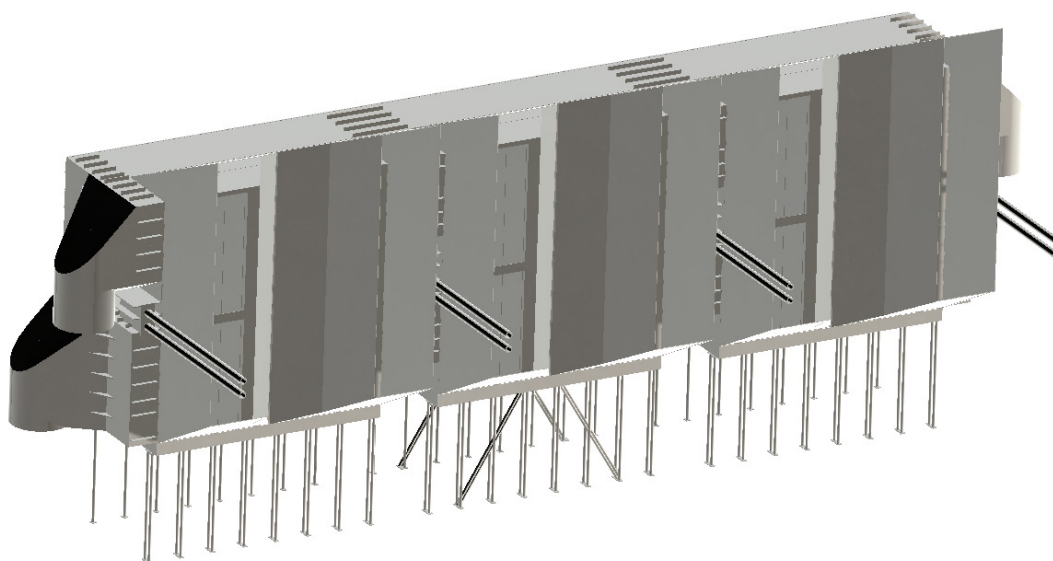


Рис. 1. Тривимірна модель конденсатора парової турбіни K-1000-60/1500

Визначення реакції конструкції на сейсмічні навантаження проводиться з використанням методики розрахунку конструкцій від узагальненого сейсмічного навантаження [18].

Розрахунок конструкції за вищевказаною методикою можна умовно розділити на 3 етапи.

1. Обчислення власних частот та форм коливань конструкції.

Розрахунок вільних коливань проводиться без урахування динамічних навантажень, але є першим і обов'язковим кроком під час розв'язання більш складних динамічних задач [18].

Диференціальне рівняння вільних коливань має такий вигляд:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0.$$

При аналізі вільних коливань передбачається пружне поведінка конструкції, тому очікуваний відгук є гармонійним

$$\{x\} = \{\phi_j\} \cos(\omega_j t),$$

де ϕ_j визначає форму коливань j -ї моди (власний вектор), а ω_j є власною частотою для цієї моди.

Підстановкою в попереднє рівняння отримуємо

$$-\omega_j^2 [M]\{\phi_j\} \cos(\omega_j t) + [K]\{\phi_j\} \cos(\omega_j t) = 0,$$

$$(-\omega_j^2 [M] + [K]) \cdot \{\phi_j\} \cos(\omega_j t) = 0.$$

Власні частоти ω_j можна знайти з рівняння

$$([K] - \omega_j^2 [M]) \cdot \{\phi_j\} = 0.$$

2. Обчислення модальних (що відповідають кожній з власних форм) інерційних сейсмічних навантажень на конструкцію для заданого напрямку впливу.

Для визначення сейсмічних навантажень в просторовій динамічній системі при трикомпонентній сейсмічній взаємодії, що задана спектрами відгуку для трьох взаємно перпендикулярних напрямків, використовується формула [19, 20]

$$\{S\}_j = [M]\{X\}_j \frac{\{X\}_j' [M] (\{\cos a\}_x \alpha_{jx} + \{\cos a\}_y \alpha_{jy} + \{\cos a\}_z \alpha_{jz})}{\{X\}_j' [M]\{X\}_j},$$

де $\{\cos a\}_x$, $\{\cos a\}_y$, $\{\cos a\}_z$ – вектори направляючих косинусів кутів між узагальненими координатами системи та напрямом сейсмічної взаємодії по осях системи координат x , y , z відповідно;

$\alpha_{jx}, \alpha_{jy}, \alpha_{jz}$ – прискорення з частотою ω_j , що визначається за спектрами відгуків за напрямками x, y, z відповідно.

3. Визначення значень напружень та переміщень в перерізах конденсатора від дії сейсмічних та експлуатаційних навантажень.

Для визначення розрахункових значень напружень в перерізах конструкції використовуються величини результуючих внутрішніх зусиль, що обчислюються шляхом послідовного врахування в розрахунковій моделі системи сейсмічних навантажень і далі сумуються за середньоквадратичною залежністю [19]

$$N_k^p = \sqrt{\sum_{j=1}^S N_{kj}^2},$$

де N_k^p – результуюче зусилля визначеного типу на k -му перерізі, що розглядається; N_{kj} – величина зусиль визначеного типу на k -му перерізі, отриманого для j -ї форми коливань.

Величини переміщень в конструкції при сейсмічній взаємодії визначаються за формулою

$$x_i = \sqrt{\sum_{j=1}^S x_{ij}^2},$$

де x_i – розрахункова величина переміщення точки конструкції в напрямку i -ї узагальненої координати ($i=1 \dots N$); x_{ij} – i -й елемент вектора $\{x\}_j$, що являє собою переміщення точки конструкції в напрямку i -ї узагальненої координати при коливаннях по j -й власній формі.

З огляду на те, що розглянута конструкція конденсатора знаходиться в умовах складного напруженого стану, оцінка її міцності проводиться на підставі аналізу головних напружень за теорією граничного стану Мізеса–Генки, також відомої як теорія енергії формозміни [21].

Три значення головних напружень σ_0 являють собою корені кубічного рівняння, що визначається компонентами вектора напружень

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & \frac{1}{2}\sigma_{xy} & \frac{1}{2}\sigma_{xz} \\ \frac{1}{2}\sigma_{xy} & \sigma_y - \sigma_0 & \frac{1}{2}\sigma_{yz} \\ \frac{1}{2}\sigma_{xz} & \frac{1}{2}\sigma_{yz} & \sigma_z - \sigma_0 \end{vmatrix} = 0.$$

Головні напруження позначаються через σ_1, σ_2 і σ_3 і впорядковані таким чином, що σ_1 являє собою найбільше позитивне напруження, а σ_3 – найбільше негативне.

При обчисленні головних напружень σ_1, σ_2 і σ_3 , еквівалентні напруження за Мізесом подано як

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{\left\{ \frac{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]}{2} \right\}}.$$

Еквівалентні напруження пов'язані з еквівалентними деформаціями таким співвідношенням:

$$\sigma_{\text{екв}} = 2\epsilon_{\text{екв}} G,$$

де $G = E/(2(1+\nu))$ – модуль зсуву; E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона.

Перевірка сейсмостійкості конструкції при поєднанні навантажень НЕ та ПЗ здійснюється порівнянням отриманих сумарних напружень з відповідними допустимими значеннями за [19].

В даному дослідженні були враховані такі навантаження НЕ та ПЗ [17, 19].

Навантаження НЕ:

- 1) маса конденсатора з водою в робочому стані $m=1659,5$ т;
- 2) атмосферний тиск, що діє на корпус конденсатора зовні;
- 3) тиск охолоджувальної води в теплообмінних трубках, бічних і про-проміжних водяних камерах $P_e=0,2$ МПа.

Як навантаження ПЗ враховані інерційні сейсмічні навантаження, що задаються спектрами відгуків за напрямками x , y , z з відповідними прискореннями з частотою ω_j . Для можливості моделювання динамічного впливу нижня плита фундаменту прийнята абсолютно жорсткою. Розрахункова жорсткість компенсатора між ЦНТ і конденсатором складала: по осі турбоагрегату $5 \cdot 10^7$ Н/м та $1 \cdot 10^7$ Н/м – в напрямку подачі пари з ЦНТ в конденсатор через перехідні патрубки.

Для розрахунку конструкції конденсатора парової турбіни К-1000-60/1500 використовувалася тільки синтезована акселерограма СА-482 через відсутність даних сейсмічного впливу на можливих майданчиках установки агрегату. Акселерограма Са-482, що взята з [19] та зображена на рис. 2, була приведена до інтенсивності 6 балів за шкалою МСК-64 (максимальне прискорення на ґрунті $0,05g$). Принцип побудови СА-482 дає можливість забезпечити 80%-ну вірогідність неперевиконання реакції споруди в порівнянні з розрахунками сейсмостійкості конструкції для реальних акселерограм. Таким чином, в переважній більшості випадків забезпечується точність розрахунку при проектуванні перспективного обладнання, що не має прив'язки до конкретного майданчика будівництва, що підтверджується досвідом його використання [19]. Спектри відповідей отримано для відносного демпфірування $\kappa=2\%$. Точність розрахунку забезпечується розміщенням корпусу конденсатора на висоті близько 4 м, а не на висоті 14 м, для якої акселерограму було побудовано.

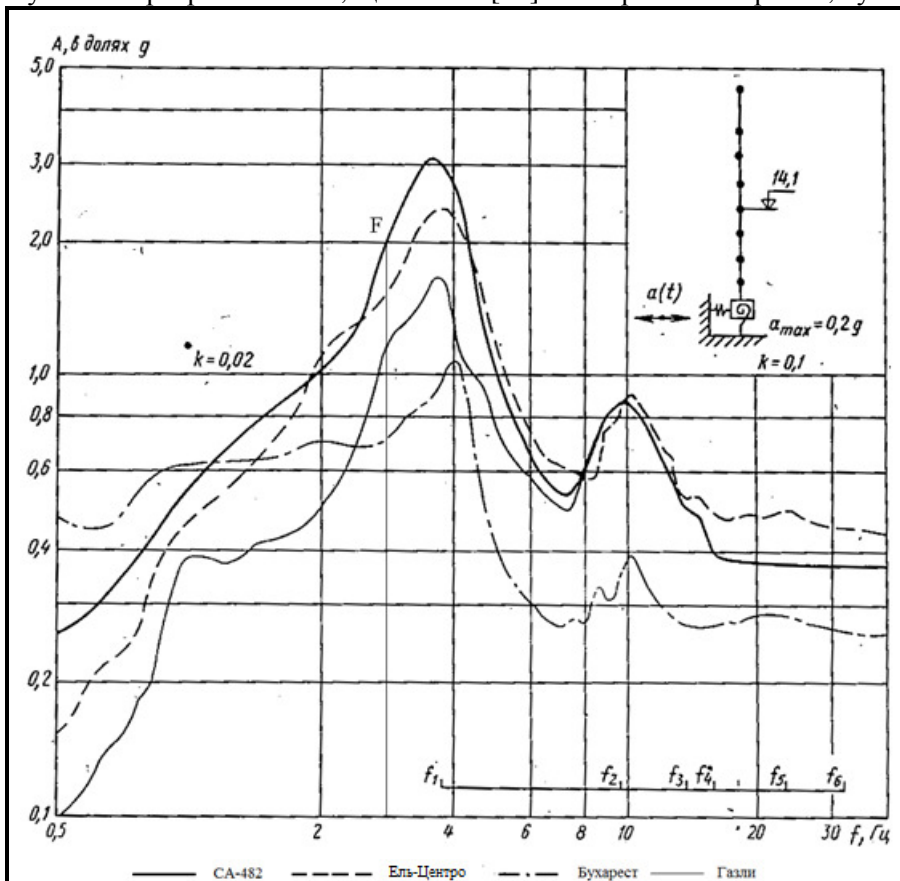


Рис. 2. Поверхові спектри відгуку на висоті 14, м будівлі реактора [19]

Підготовка СЕ моделі

При створенні СЕ моделі статичної та динамічної задач використовувався 10-вузловий об'ємний скінченний елемент в формі тетраедра (рис. 3) [15, 22]. Даний елемент дозволяє задавати граничні умови в залежності від типу кінематичного зв'язку, а саме переміщень, швидкостей, прискорень і т.д.

При виборі СЕ-моделі було проведено аналіз з визначення оптимального розміру СЕ. В результаті аналізу визначено, що оптимальний розмір СЕ становить 150 мм. При подальшому зменшенні розміру СЕ точність розрахунку змінюється несуттєво. При цьому кількість елементів стрімко зростає. Загальний вигляд розрахункової СЕ-моделі конденсатора показаний на рис. 4. При розбитті вихідної моделі було отримано близько 2.1 млн. скінченних елементів та 4 млн. вузлів.

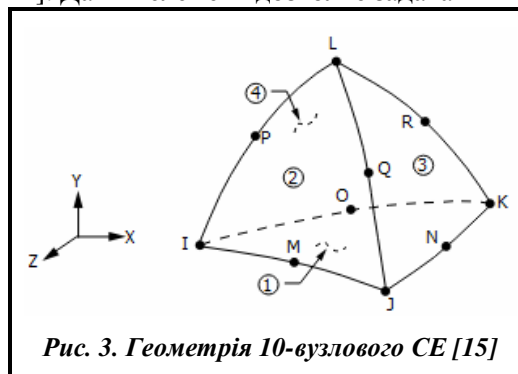


Рис. 3. Геометрія 10-вузлового СЕ [15]

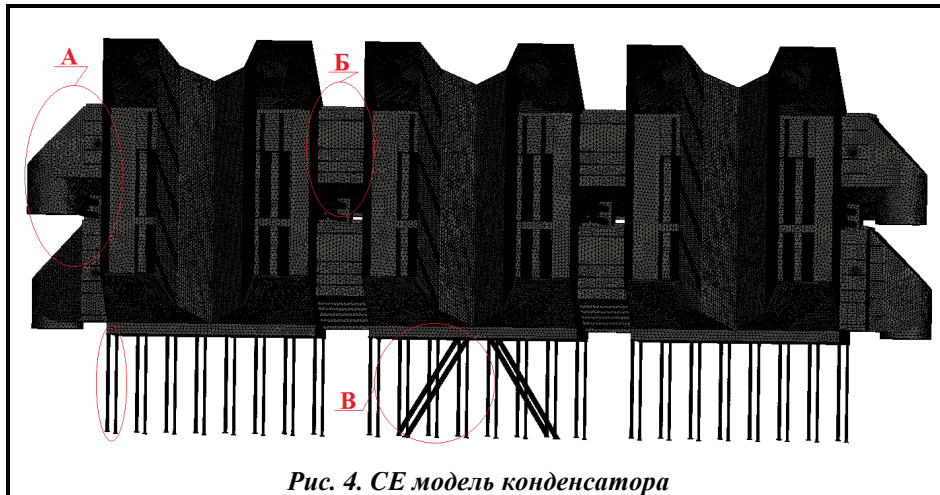


Рис. 4. СЕ модель конденсатора

На рис. 4 позначені окремі фрагменти розрахункової СЕ моделі конденсатора: А – бічна камера; Б – проміжна камера; В – косі опори під середнім конденсатором; а також бічні і вертикальні опори.

Аналіз отриманих результатів

Для конденсатора були отримані власні форми коливань, частоти яких наведені нижче

Номер форми	1	2	3	4	5
Частота, Гц	2,6379	3,5551	3,5583	3,5735	3,5855

Ці форми власних коливань зображені на рис. 5.

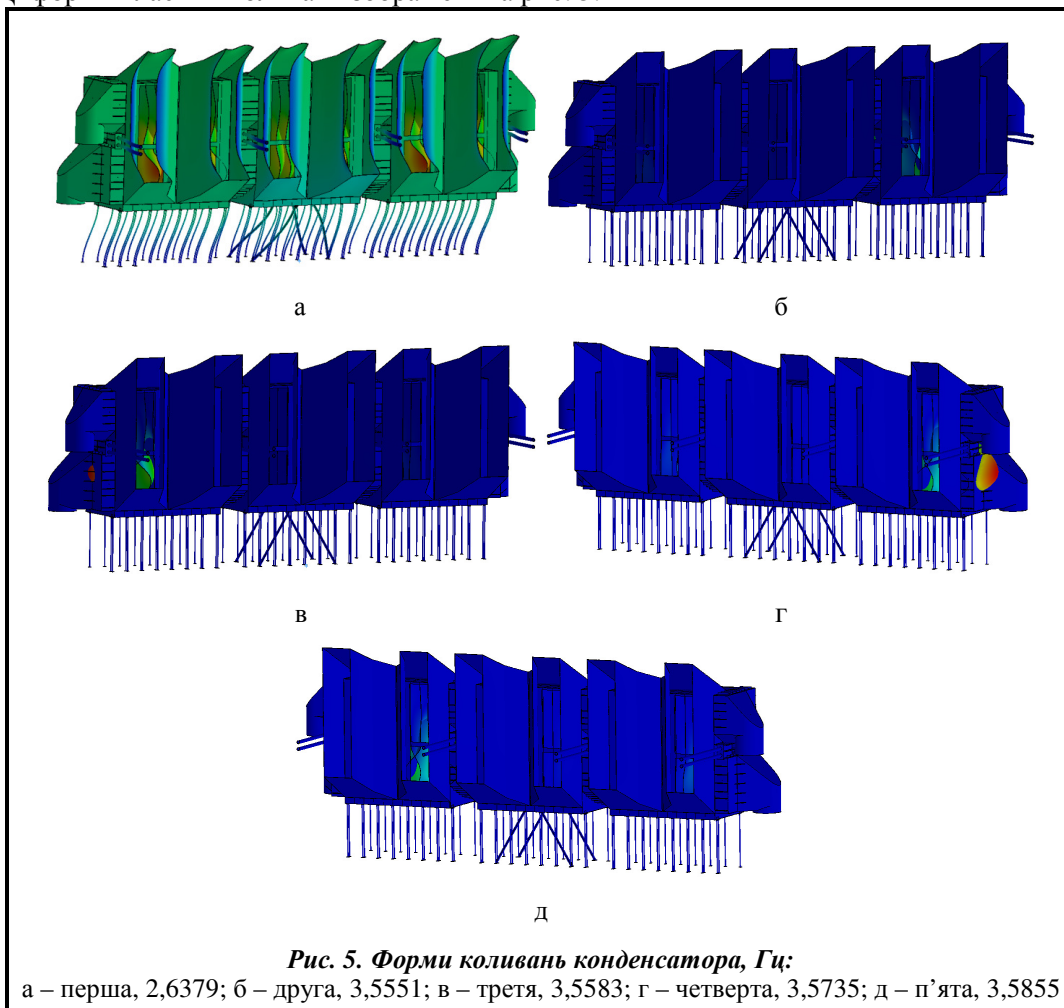


Рис. 5. Форми коливань конденсатора, Гц:

а – перша, 2,6379; б – друга, 3,5551; в – третя, 3,5583; г – четверта, 3,5735; д – п'ята, 3,5855

Наведені на рис. 5 форми коливань конденсатора характеризуються значною складністю. Отримані результати можемо описати таким чином:

Перша форма – найбільша амплітуда коливань конструкції конденсатора в горизонтальному напрямку (рис. 5, а);

Друга форма – коливання задньої стінки корпусу конденсатора в районі 2-го (справа) перехідного патрубку (рис. 5, б);

Третя форма – коливання задньої стінки корпусу конденсатора в районі 1-го (зліва) перехідного патрубку (рис. 5, в);

Четверта форма – коливання передньої стінки нижньої правої водяної камери (рис. 5, г);

П'ята форма – коливання задньої стінки корпусу конденсатора в районі 2-го (зліва) перехідного патрубку (рис. 5, д).

Аналіз експериментальних досліджень сейсмостійкості подібних конструкцій [19, 20] показав, що в області сейсмічного резонансу знаходиться тільки перша власна частота коливань. Більш високі власні частоти перебувають на значній відстані від області сейсмічного резонансу. Зазвичай вже друга власна частота є вище верхньої границі спектральної кривої. В даній роботі виконано розрахунок перших п'яти власних частот.

Відповідно до [3, 14] і за аналогією з формулою

$$A_p = \sqrt{A_x^2(f_1) + A_y^2(f_1) + A_z^2(f_1)},$$

за першою власною частотою (рис. 5), використовуючи синтезовану акселерограму СА-482 (при цій частоті в точці фактично отримуємо подвоєння інерційної навантаження щодо ґрунту) та використовуючи значення максимального рівня прискорень розрахункових землетрусів [19] (беремо значення для 6 балів – 0,05g), знаходимо інерційні сейсмічні навантаження (прискорення), які становлять для горизонтальної площини $a=0,98 \text{ м/с}^2$ та для вертикальної – 67% від горизонтальної складової.

Максимальний рівень прискорень розрахункових землетрусів [19] наведено нижче

Сейсмічність площадки	5	6	7	8	9	10
Максимальний рівень прискорень (в долях g)	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8

Беручи до уваги, що розрахункова модель є голономною, консервативною системою з обмеженим числом ступенів свободи, скористаємося методом безпосереднього інтегрування рівнянь руху, а саме рівнянь Лагранжа другого роду [23]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = N_i \quad (i=1, \dots, n),$$

де $t, q_i, \dot{q}_i$ ($i=1, \dots, n$) – змінні Лагранжа, через які виражається функція Лагранжа; T – кінетична енергія; N_i – узагальнена сила.

Корпус конденсатора виготовлений з вуглецевої сталі марки 20. Розрахунок номінальних допустимих напружень відповідно до норм [2] проводиться за формулою

$$[\sigma] = \min \{ R_m^T / 2,6; R_{p0,2}^T / 1,5 \}.$$

Допустимі напруження розраховані за нормами [6] і наведені нижче.

Матеріал – сталь 20;

$R_{p0,2}^{50} = 216 \text{ МПа}$ – мінімальне значення межі плинності за розрахункової температури $T=50 \text{ }^\circ\text{C}$;

$R_m^{50} = 363 \text{ МПа}$ – мінімальне значення межі міцності за розрахункової температури $T=50 \text{ }^\circ\text{C}$;

$[\sigma] = 140 \text{ МПа}$ – номінальне значення допустимих напружень;

Комбіновані навантаження НЕ та ПЗ (σ_s)₂ = 1,9 · $[\sigma]$, МПа = 265 МПа.

В результаті розв'язання задачі визначення напружено-деформованого стану при поєднанні навантажень НЕ та ПЗ отримано розподіл еквівалентних напружень в конструкції конденсатора (рис. 6) та в елементах його корпусу (рис. 7).

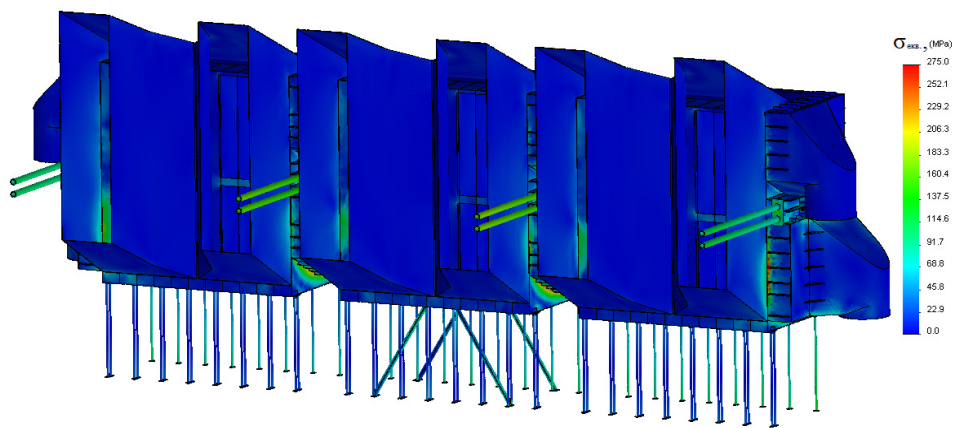


Рис. 6. Розподіл еквівалентних напружень при поєднанні навантажень НЕ та ПЗ

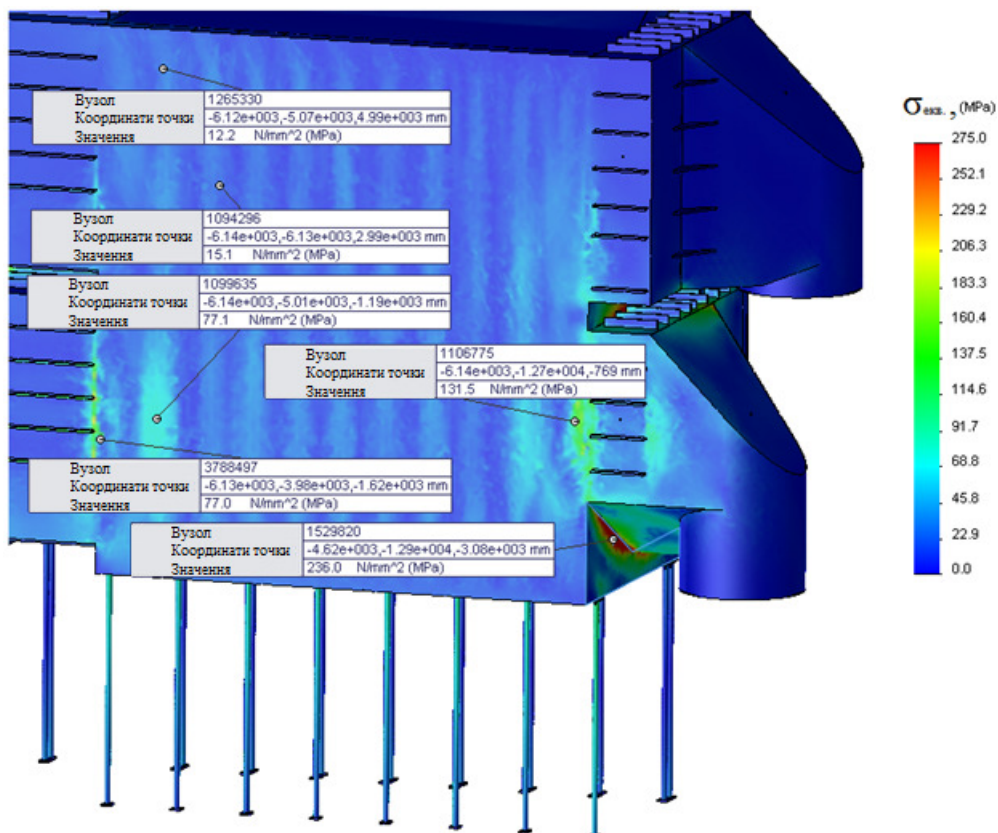
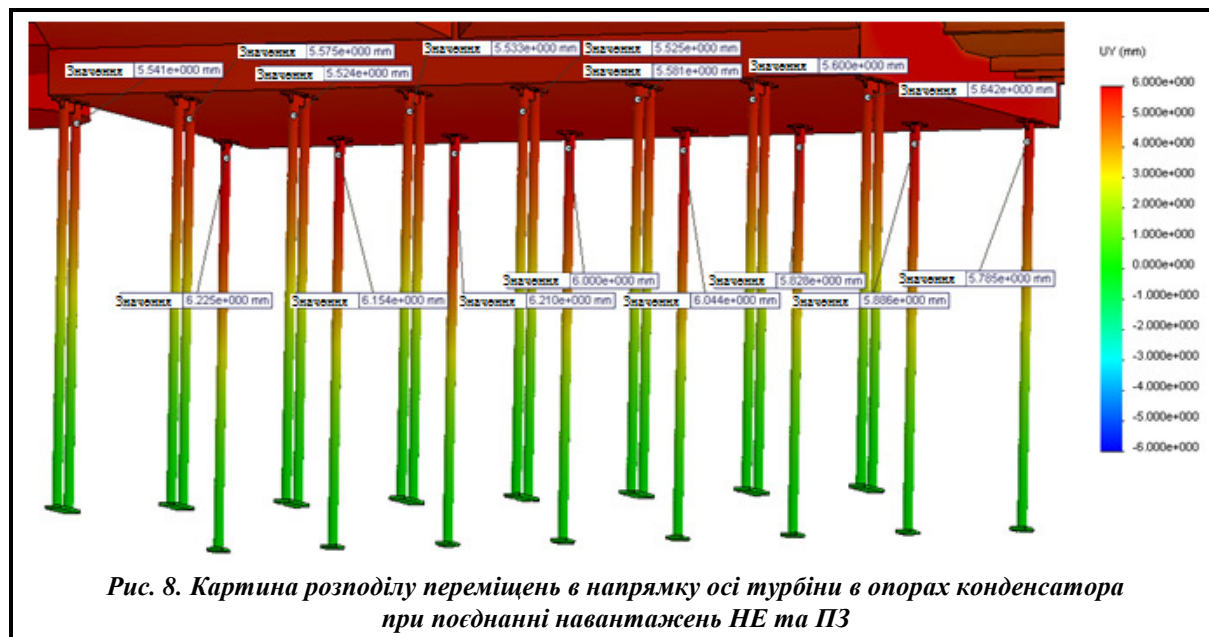


Рис. 7. Розподіл еквівалентних напружень в корпусі конденсатора при поєднанні навантажень НЕ та ПЗ

Максимальні еквівалентні напруження в елементах корпусу конденсатора, як показано на рис. 6, при поєднанні навантажень НЕ і ПЗ склали 236 МПа, що не перевищує допустимого значення 265 МПа.

Окрім максимальних еквівалентних напружень при поєднанні навантажень НЕ та ПЗ в опорах конденсатора, напружено-деформований стан при сейсмічній взаємодії також оцінювався по переміщеннях опор (рис. 8).

Як впливає з рисунка, для розглянутого рівня навантажень переміщення опор конденсатора в напрямку осі турбіни не перевищують 6 м.



Висновки

Гарантоване забезпечення сейсмостійкості, що є важливим для безпеки обладнання електростанцій, – дуже актуальна задача.

Застосовувані до цього часу розрахункові методики обґрунтування сейсмостійкості, зважаючи на низку спрощень, раніше продиктованих обмеженими можливостями програмної і комп'ютерної бази, не завжди задовольняють постійно зростаючі вимоги комплексної оцінки характеристик надійності обладнання системи «фундамент–урбоагрегат».

Розвиток розрахункових програм і апаратного забезпечення дозволив істотно поліпшити якість підготовки моделей, використовувати складні динамічні розрахунки. Це дає можливість значно знизити обсяг випробувань при підтвердженні сейсмостійкості обладнання.

Актуальність даної роботи полягає в розробці методів підвищення ефективності розрахункового обґрунтування сейсмічної безпеки обладнання електростанцій шляхом реалізації можливостей зниження обсягів і вартості робіт, викликаних проведенням натурних випробувань. Метою роботи є вивчення можливості заміни натурних випробувань на числовий експеримент при збереженні необхідного рівня достовірності та надійності оцінки сейсмостійкості обладнання.

Запропоновано алгоритм підтвердження сейсмостійкості обладнання розрахунковим методом.

Розроблено математичну модель обладнання і наведено приклад визначення власних частот, напружень і переміщень в конструкції.

В ході роботи виконано визначення власних частот та розрахунок на міцність конструкції з оцінкою її сейсмостійкості.

На першому етапі розв'язання задачі отримано значення перших п'яти власних частот конструкції конденсатора та їхні форми коливань. Найнижча власна частота склала 2,379 ц.

З урахуванням значень власних частот на другому етапі розв'язання задачі визначено навантаження для розрахунку на міцність, які вибиралися виходячи з нижчої резонансної частоти за синтезованою акселерограмою СА-482 з урахуванням інтенсивності землетрусу обладнання відповідно до РТМ 108.020.37-81.

Розрахунок проводився за одночасної дії навантажень у вертикальному і горизонтальних напрямках. За результатами розрахунку можна зробити висновок, що запас міцності даної конструкції конденсатора є достатнім для сейсмічного впливу 6-бального рівня.

Наведена методика дозволяє не тільки визначити особливості складного напружено-деформованого стану обладнання, що безпосередньо взаємодіє з фундаментом та сприймає навантаження під час землетрусу, а й дозволяє визначити граничні умови для виконання подальшого аналізу надійності суміжного обладнання.

Література

1. Пальков І., Пальков С. Напружено-деформований стан елементів парових турбін в умовах пластичного деформування. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2020. Т. 4 (88). С. 14–17. [https://doi.org/10.32918/nrs.2020.4\(88\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2020.4(88).02).
2. ГОСТ 17516.1 – 90. Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам [Введ. 01.01.91]. М.: Стандартинформ, 1991. 42 с.
3. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций: НП-031-01. М.: Госатомнадзор России, 2001. 50 с.
4. IEEE/IEC 60980-344-2020 – IEEE/IEC International Standard – Nuclear facilities – Equipment important to safety – Seismic qualification. PPUB, 2020. 82 p.
5. Кириллов А. П., Амбриашвили Ю. К. Сейсмостойкость атомных электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1985. 184 с.
6. Гонтаровский П. П., Гармаш Н. Г., Шульженко Н. Г. Методика расчета динамики системы турбоагрегат-фундамент-основание энергоблоков при сейсмических воздействиях. *Вестн. НТУ «ХПИ». Сер. Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование*. 2016. № 8 (1180). С. 153–160. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2016.08.22>.
7. 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.
8. De Grandis S., Domaneschi M., Perotti F. A numerical procedure for computing the fragility of NPP components under random seismic excitation. *Nuclear Eng. and Design*. 2009. Vol. 239. Iss. 11. P. 2491–2499. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.06.027>.
9. Králík J. Risk-based safety analysis of the seismic resistance NPP structures. Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURO-DYN 2011. Leuven, Belgium, 4–6 July 2011. 2011. P. 292–299. <https://doi.org/10.13140/2.1.1075.3281>.
10. Беляев В. С., Костарев В. В., Васильев П. С. Методы и средства обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений, в соответствии с действующими российскими нормами. *ЦКТИ-Вибросейсм*. 2018. С. 1–5.
11. Iiba M., Kashima T., Morita K. Behavior of seismically isolated buildings based on observed motion records during the 2011 Great East Japan Earthquake. *Proc. 13th World Conf. on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures – commemorating JSSI 20th Anniversary*, Sendai, Japan, September 2013. 2013. P. 272–283.
12. Eltahawy W., Ryan K., Çeşmeci Ş., Gordaninejad F. Fundamental dynamics of 3-dimensional seismic isolation. *16th World Conf. on Earthquake*. 2017. P. 12–24.
13. Morita K., Takayama M. Behavior of seismically isolated buildings during the 2016 Kumamoto Earthquake. *Proc. of the 2017 NZSEE conf.* New Zealand. 2017. P. 113–124.
14. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) / Госатомэнергонадзор СССР. М.: Энергоатомиздат, 1989. 525 с.
15. Зенкевич О. К. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
16. Косяк Ю. Ф. Паротурбинные установки атомных электростанций. М.: Энергия, 1978. 312 с.
17. Аронсон К. Э., Блинков С. И., Брезгин В. И. Теплообменники энергетических установок / под. ред. Ю. М. Бродова: учеб. для вузов. Екатеринбург: Сократ, 2003. 968 с.
18. Шакирзянов Р. А., Шакирзянов Ф. Р. Динамика и устойчивость сооружений: учеб. пособие. Казань: Казан. архит.-строит. ун-т, 2015. 120 с.
19. Оборудование атомных энергетических установок. Расчет на прочность при сейсмическом воздействии: РТМ 108.020.37-81 [Введ. 04.06.81]. Л.: НПО Центр. котлотурбин ин-т, 1981. 39 с.
20. Цема А. Д. Исследование сейсмостойкости насосных агрегатов типа КсВ. *Энергомашиностроение*. 1986. № 9. С. 26–28.
21. Туренко А. Н., Богомолов В. А., Степченко А. С. и др. Компьютерное проектирование и расчет на прочность деталей автомобиля: учеб. пособие. Харьков: Харьк. автодор.ун-т, 2003. 336 с.
22. Клованич С. Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики. Запорожье: Мир геотехники, 2009. 400 с.
23. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний: учеб для вузов. М.: Ленанд, 2017. 405 с.

Надійшла до редакції 21.05.2021

Расчетное определение сейсмостойкости оборудования атомных электростанций**С. А. Пальков, И. А. Пальков**

Акционерное общество «Турбоатом», 61037, Украина, г. Харьков, пр. Московский, 199

Предложен алгоритм подтверждения сейсмостойкости оборудования расчетным методом и определены границы его применения. Разработана математическая модель оборудования и приведен пример определения собственных частот и напряжений в конструкции в трехмерной постановке. Используются два основных типа расчета – статический и динамический. В статическом расчете определялось напряженно-деформированное состояние конструкции. Проведено сравнение значений полученных напряжений с допустимыми для применяемых материалов, на основании чего были сделаны выводы о прочности конструкции при сейсмическом воздействии. Результатом динамического расчета стало определение жесткости конструкции. Сравнение полученных значений напряжений с допустимыми для данного оборудования позволило сделать вывод о его устойчивости к сейсмическому воздействию. Оценка сейсмостойкости выполнена на примере конденсатора паровой турбины К-1000-60/1500. Расчет на сейсмостойкость указанного оборудования выполнен при интенсивности сейсмического воздействия 6 баллов по шкале MSK-64. В ходе решения поставленной задачи получены результаты распределения напряжений в корпусе и других элементах конструкции конденсатора от действия нагрузок при нормальной эксплуатации и проектном землетрясении. Расчет оборудования на сейсмостойкость выполнен с помощью метода конечных элементов. Это позволило представить сплошное тело в виде совокупности отдельных конечных элементов, взаимодействующих между собой в конечном числе узловых точек. К этим точкам прикладываются некоторые усилия взаимодействия, характеризующие влияние распределенных внутренних напряжений, действующих вдоль реальных границ смежных элементов. Для проведения такого расчета в пакете CAD моделирования создана трехмерная модель. Полученная геометрическая модель импортирована в программный комплекс, что позволило существенно сократить трудоемкость. Применение расчетного метода позволяет значительно снизить объем испытаний при подтверждении сейсмостойкости оборудования. Получены результаты пространственного сложного напряженного состояния конструкции конденсатора паровой турбины от действия нагрузок во время нормальной эксплуатации и проектного землетрясения.

Ключевые слова: турбина, сейсмостойкость, напряжение, землетрясение, акселерограмма, конечный элемент, собственная частота.