

А. С. Кошмак¹, В. Б. Крицький², В. О. Куров¹, Ю. О. Оборський¹, Т. В. Пирогов¹, В. О. Посох¹

¹ ДП «Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування», просп. Героїв Сталінграда, 64/56, Київ, 04213, Україна

² АТ «Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут «Енергопроект»», просп. Перемоги, 4, Київ, 01135, Україна

Оцінка сейсмостійкості великогабаритного електротехнічного обладнання методом розрахункового аналізу

Ключові слова:

електродвигун асинхронний,
оцінка сейсмостійкості,
розрахунковий метод,
випробування,
ротор,
підшипник

Виконано аналіз можливості оцінки сейсмостійкості великогабаритного електротехнічного обладнання розрахунковим методом як альтернативи експериментальному методу, який на сьогодні є пріоритетним. Розглянуто вимоги нормативних документів щодо проведення випробувань та виконано аналіз можливостей випробувальних лабораторій України. У результаті виявлено значні обмеження наявних випробувальних вібростендів щодо габаритів та маси обладнання, що унеможлиблює проведення оцінки сейсмостійкості експериментальним методом. Проведено аналіз актуальних стандартів і спеціальних нормативних документів з випробувань виробів на сейсмічні впливи, встановлено уточнення з розділення електротехнічного обладнання за своїми конструктивними особливостями, що дають змогу виконувати підтвердження сейсмостійкості певних груп обладнання розрахунковими методами. Обґрунтовано можливість оцінювання сейсмостійкості великогабаритного електротехнічного обладнання розрахунковими методами та визначено підходи і критерії оцінювання такого обладнання. У результаті виконаних розрахунків сейсмостійкості асинхронного вертикального електродвигуна АСВО 15-23-34М1 (у тому числі його основних елементів: ротора, статора, підшипників, елементів кріплення), який використовується як приводи вентиляторів градирень на АЕС, зроблено висновок, що електродвигуни цього типу витримують сейсмічні навантаження та зберігають працездатність за умов землетрусу інтенсивністю до 8 балів за шкалою ДСТУ Б.В.1.1-28:2010.

Вступ

В останні роки вимоги до сейсмостійкості обладнання, що експлуатується та поставляється на АЕС, зростають. Одну з ключових ролей у цьому відіграла аварія 2011 р. на Фукусімській АЕС. Відповідно до положень нормативного документа НП 306.2.208-2016 [2] основним рекомендованим методом оцінки сейсмостійкості обладнання є експериментальний метод

як найбільш достовірний. Особливо це стосується електротехнічного та електромеханічного обладнання інформаційних і керуючих систем, а також засобів автоматизації та зв'язку. Проте на практиці провести випробування на сейсмостійкість великогабаритного електротехнічного обладнання, що експлуатується та поставляється на АЕС, є вкрай складним завданням. Це питання стосується не тільки змонтованого обладнання, що перебуває в експлуатації і не може бути

© А. С. Кошмак, В. Б. Крицький, В. О. Куров,
Ю. О. Оборський, Т. В. Пирогов, В. О. Посох, 2021

демонтовано для проведення випробувань, але й нового обладнання, що поставляється на АЕС, з огляду на його масу та розміри, які не дозволяють провести випробування на наявних установках.

З розвитком комп'ютерних технологій зростає точність моделювання все більш складних конструкцій та фізичних процесів. Крім того, використання сучасних розрахункових кодів, що використовують метод скінченних елементів, дає можливість виявляти найбільш критичні елементи обладнання та більш ефективно проводити контроль стану обладнання під час його експлуатації. У цій статті порушується важливе питання можливості використання альтернативного способу оцінки сейсмостійкості за допомогою використання розрахункових кодів.

Об'єкт аналізу

У статті як приклад аналізу сейсмостійкості електротехнічного обладнання розглядається асинхронний вертикальний електродвигун типу АСВО 15-23-34М1 (рис. 1). Такий тип електродвигунів використовується як приводи вентиляторів градирень на АЕС.

Оцінка можливості підтвердження сейсмостійкості обладнання експериментальним методом

Вимоги до обладнання для випробувань та умови їхнього проведення. Згідно з діючими нормами НП 306.2.208-2016 [2] до електродвигунів, що експлуатуються або поставляються на АЕС України, висуваються такі вимоги до їхньої сейсмостійкості:

електродвигуни I категорії сейсмостійкості повинні бути сейсмостійкими за умов максимального розрахункового землетрусу (МРЗ) інтенсивністю до 8 балів за шкалою ДСТУ Б.В.1.1-28 [3], витримувати сейсмічні навантаження і зберігати працездатність під час і після завершення землетрусу;

електродвигуни II категорії сейсмостійкості повинні бути сейсмостійкими за умов проектного землетрусу (ПЗ) інтенсивністю до 7 балів за шкалою ДСТУ Б.В.1.1-28 [3], витримувати сейсмічні навантаження і зберігати працездатність під час і після завершення землетрусу.

Підтвердження сейсмостійкості двигунів має виконуватись в умовах одночасної дії прискорень у трьох взаємно перпендикулярних напрямках (горизонтальних X, Y та вертикальному Z).

Відповідно до вимог п. 2 глави 5 розділу III НП 306.2.208-2016 [2] «Обґрунтування сейсмостійкості виробів виконується експериментальними методами. Інші методи можуть застосовуватися лише в разі достатніх обґрунтувань коректного функціонування виробів під час і після сейсмічних впливів згідно з технічною документацією на відповідні вироби».

Згідно з вимогами п. 4 глави 5 розділу III НП 306.2.208-2016 [2] «Випробування виробів виконується в зібраному, закріпленому, відрегульованому та працездатному стані в режимі, що імітує робочий стан».

Враховуючи вищезазначене, для виконання експериментального підтвердження функціонування електродвигуна під час і після сейсмічних впливів необхідно мати наведене нижче випробувальне обладнання:

електродинамічний вібростенд необхідної вантажопідйомності з можливістю встановлення та ви-

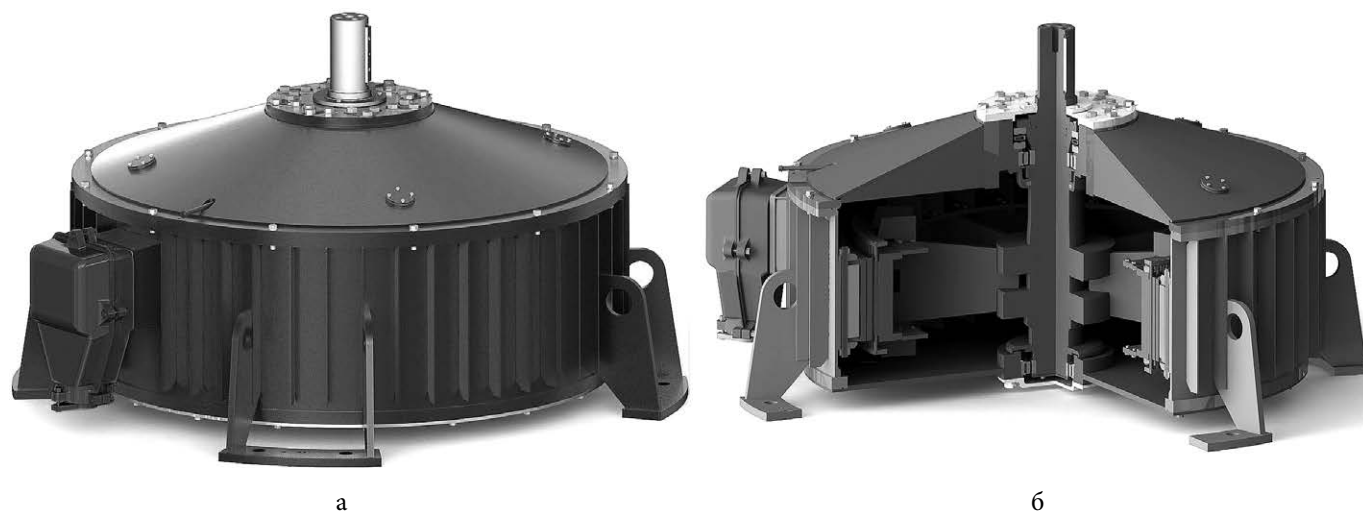


Рис. 1. Загальний вигляд (а) та вигляд у розрізі (б) двигуна АСВО 15-23-34М1

пробувань безпосередньо електродвигуна, імітатора додаткового навантаження на вал і підшипники двигуна, а також з урахуванням необхідної технологічної підставки, на якій повинен бути встановлений електродвигун для випробувань у робочому положенні;

пускову, комутаційну апаратуру та кабельні комунікації необхідної потужності та напруги для включення електродвигуна в мережу під час випробувань;

необхідне електричне (або механічне) обладнання для можливості створення навантаження робочого режиму (прямим механічним навантаженням або методом непрямого електричного навантаження);

у разі випробувань електродвигунів з охолодженням водою (через вбудовані в корпус двигуна водяні повітроохолоджувачі) необхідно також передбачити подачу необхідної для охолодження двигуна кількості води і її масу під час випробувань.

Аналіз можливості проведення випробувань електродвигунів на сейсмостійкість. У зв'язку з відсутністю технічної можливості проведення випробувань на сейсмостійкість виробником виконано аналіз можливості проведення випробувань асинхронних електродвигунів АСВО 15–23–34М1 на сейсмостійкість експериментальним методом за участю спеціалізованих організацій, акредитованих Національним агентством акредитації України (НААУ), а саме:

ПАТ «НВП «Хартрон-Аркос», м. Харків;

ПАТ «НВП «Радій», м. Кропивницький;

АТ «Сумський завод «Насосенергомаш», м. Суми;

ДП «Державний центр з підтвердження оцінки відповідності», м. Харків.

До вказаних організацій було направлено відповідні запити про можливість проведення випробувань. З огляду на відповіді виявилось, що в цих організацій або відсутнє відповідне обладнання, або наявне обладнання за своїми характеристиками вантажопідйомності не може бути використано для проведення випробувань вказаного електродвигуна експериментальним методом. При цьому варто наголосити, що маса двигунів АСВО 15–23–34М1 є однією з найнижчих серед обладнання цього класу.

Враховуючи, що на сьогодні на території України відсутні акредитовані спеціальні організації (випробувальні лабораторії), які мають у наявності обладнання з можливістю випробування великих (масою понад 600 кг) електродвигунів на сейсмостійкість, можна зробити висновок, що обґрунтування сейсмостійкості такого обладнання експериментальними методами на цей момент не представляється можливим [4].

Обґрунтування можливості оцінки сейсмостійкості великогабаритних електродвигунів розрахунковими методами

Аналіз вимог нормативної документації щодо можливості використання розрахункового методу оцінки сейсмостійкості. Вищенаведені вимоги до експериментального (або іншого) методу обґрунтування сейсмостійкості сформульовано безвідносно його типу, габаритних розмірів, маси та конструктивних особливостей устаткування, зазначеного в п. 1 глави 5 розділу III НП 306.2.208-2016 [2].

При цьому, відповідно до діючих стандартів і спеціальних нормативних документів з випробувань виробів на сейсмічні впливи, існують такі уточнення з розділення електротехнічного обладнання за своїми конструктивними особливостями, а саме:

«електричне обладнання, устаткування інформаційних і керуючих систем, до складу якого входять реле, розподільні пристрої, контактори, вимикачі, перетворювачі, датчики й подібні пристрої, чутливі до ударів і вібрацій» (п. 7.2, СОУ НАЕК 182:2019 [5]);

«вироби без вимірювальних приладів і контактних електричних апаратів... допускається не випробовувати на вібростійкість, а розраховувати на міцність» (п. 5.2, ГОСТ 30546.1-98 [6]).

Також у чинних на сьогодні стандартах з випробувань виробів на сейсмічні впливи є уточнення про можливість застосування розрахунково-експериментальної оцінки відповідності виробів вимогам із сейсмостійкості в таких випадках (відповідно п. 5.1.1 та п. 5.1.4 ГОСТ 30546.1-98 [6]):

за відсутності випробувального устаткування відповідної вантажопідйомності;

для оцінки виробів, що не мають резонансних частот у діапазоні 1–30 Гц.

Аналогічні уточнення є в наведених нижче нормативних документах:

п. 4.6 ГОСТ 30546.2–98 [7]: «Якщо маса і габаритні розміри готових виробів не дозволяють проводити їх випробування на наявному обладнанні, ... то такі вироби оцінюють на відповідність вимогам сейсмостійкості за спеціальною програмою ... (в тому числі розрахунковим або розрахунково-експериментальним методами ...);»

п. 7.3 СОУ НАЕК 182:2019 [5]: «Метод аналізу (розрахунковий метод) найменш достовірний, але найбільш консервативний метод — застосовується, коли випробування економічно не виправдані або неможливі (наприклад, через відсутність випробувального

устаткування відповідної вантажопідйомності), або в разі неможливості проведення випробувань із технічних причин. Кваліфікація обладнання методом аналізу виконується на основі моделювання і розрахункової оцінки обладнання».

На підставі вищевказаного зроблено висновок про можливість застосування розрахункового методу оцінки сейсмостійкості електротехнічного обладнання та асинхронних електродвигунів зокрема.

Обґрунтування повноти оцінки та критерії відповідності за умов використання розрахункових методів. Основною метою розрахункового обґрунтування сейсмостійкості великих асинхронних електродвигунів є підтвердження збереження ними своєї конструктивної цілісності і працездатності під час і після завершення сейсмічного впливу при МРЗ або ПЗ. Водночас під час виконання таких розрахунків враховуються:

вимоги щодо сейсмічних впливів і навантажень на електродвигун;

геометричні розміри електродвигуна та величина повітряного проміжку між статором і ротором двигуна;

конструктивні особливості електродвигунів, в тому числі:

маса вала, ротора та інших елементів конструкції; кількість і місце розташування підшипникових вузлів усередині електродвигуна;

спосіб передачі крутного моменту до приводного механізму і додаткові осьові або радіальні зусилля, що виникають унаслідок передачі крутного моменту через пружну муфту;

напрямок і місця прикладання навантажень на вал і підшипники електродвигуна як за нормального функціонування двигунів, так і за сумарного впливу максимальних спектральних прискорень в умовах сейсмічних впливів.

Під час оцінювання електродвигунів на сейсмостійкість особлива увага приділяється найбільш навантаженим вузлам їхніх конструкцій — ротору, підшипникам і елементам кріплення. Основним завданням розрахунку ротора є підтвердження жорсткості та міцності вала за нормальних умов роботи, а також за умов механічних впливів, еквівалентних заданому сейсмічному навантаженню. Основним завданням розрахунку підшипників є підтвердження довговічності і збереження працездатності підшипників кочення (ковзання) електродвигуна під час нормальних умов роботи, а також під час механічних впливів, еквівалентних заданому сейсмічному наван-

таженню, з урахуванням динамічної вантажопідйомності підшипників.

Критеріями розрахунку ротора є:

допустимий прогин вала;

допустима критична частота обертання;

допустимі механічні напруження.

Критеріями розрахунку підшипників є:

ресурс (довговічність) підшипників за нормальних умов експлуатації;

величина динамічного навантаження на підшипники за сейсмічних впливів;

ресурс (довговічність) підшипників від впливу механічних факторів нормальних умов експлуатації з урахуванням навантажень від сейсмічних впливів (ПЗ або МРЗ залежно від заданої категорії сейсмостійкості двигуна згідно з НП 306.2.208-2016 [2]).

На підставі отриманих підтверджень жорсткості і міцності вала; довговічності і збереження працездатності підшипників електродвигуна, а також аналізу частоти власних коливань елементів конструкції від частоти вимушених коливань робиться загальний висновок про підтвердження збереження електродвигуном своєї конструктивної цілісності та працездатності під час і після проходження заданого сейсмічного впливу.

Виконання оцінки сейсмостійкості електродвигуна АСВО 15–23–34МУ1 розрахунковим методом

Застосування методу граничної сейсмостійкості. Оцінка сейсмостійкості електродвигуна АСВО 15-23-34МУ1 методом розрахункового аналізу виконувалася із застосуванням «Методики розрахункового аналізу сейсмостійкості елементів діючих АЕС у рамках методу граничної сейсмостійкості» [8]. Розрахунок на міцність проводився за допомогою розрахункового коду APM Structure 3D, який є дозволенним для використання під час обґрунтування безпеки АЕС України. Розрахунковий аналіз сейсмостійкості елементів діючих АЕС у рамках методу граничної сейсмостійкості проводиться з метою визначення інтегрального параметра сейсмостійкості HCLPF, що характеризує рівень сейсмічної стійкості цього елемента. Параметр HCLPF, який виражається в одиницях прискорення вільного падіння g , порівнюється з величиною максимального прискорення на ґрунті (PGA), яка визначається для майданчика АЕС та характеризує інтенсивність землетрусу, прийнятого як сейсмічні вимоги. Сейсмостійкість елемен-

та вважається підтвердженою за виконання умови $HCLPF > PGA$. Для обчислення величини граничної сейсмостійкості $HCLPF$ використовується коефіцієнт запасу FS [8].

Під час проведення лінійно-пружного розрахунку величина параметра $HCLPF$ у розмірності максимального прискорення землетрусу на майданчику АЕС (g), що може витримати розглянутий елемент, визначається співвідношенням

$$HCLPF = FS \cdot F_{\mu} \cdot PGA, \quad (1)$$

де F_{μ} — коефіцієнт пластичності, який приймається відповідно до п. 4.4.21 методики [8]; PGA — прискорення нульового періоду (пікове прискорення).

Крім того, одним із критеріїв розрахунку є допустимий прогин вала та допустимі механічні напруження. Допустимий прогин вала, що приймався відповідно до [9] для асинхронних двигунів, не повинен перевищувати 10% від повітряного проміжку.

Вихідні дані, що використовуються під час розрахунків. Електродвигун серії АСВО 15-23-34МУ1 виготовлений згідно з технічними умовами ТУ У 3.07-21270229-035-95ТУ [10] за кресленнями БИАН.528622.001 СБ [11]. Ескіз електродвигуна наведено на рис. 2. Згідно з технічними умовами [10] двигуни виготовляються для використання на АЕС України, потреб народного господарства та експортування як комплектуючих виробів до вентиляторів градирень. Тип вентилятора, який застосовується в градирні, ХК-70/4 ТУ У29.2-31202656-001:2005 [1].

Згідно з технічними умовами [10] кліматичне виконання електродвигунів для постачання на території країни, а також для постачання на експорт у країни з помірним кліматом — У, категорії І за ГОСТ 15150 [12]. Граничне значення температури повітря під час експлуатації виробів з кліматичним виконанням У категорії І становить $+45^{\circ}\text{C}$, саме це значення повітря використовувалося під час виконання розрахунків сейсмостійкості електродвигунів серії АСВО 15-23-34МУ1.

Побудова розрахункової моделі та виконання розрахунку. Під час побудови розрахункової моделі враховувалися геометричні та масові характеристики двигуна, його технічні параметри та матеріали елементів конструкції. Маса двигуна — 3 140 кг. Маса вентилятора, встановленого на двигуні, врахована як зосереджена маса на валу. Маса вентилятора (з урахуванням вертикального навантаження від підйомної сили) — 1 015 кг. Обмотка статора та ротора в розрахунковій моделі враховувались у вигляді розподіле-

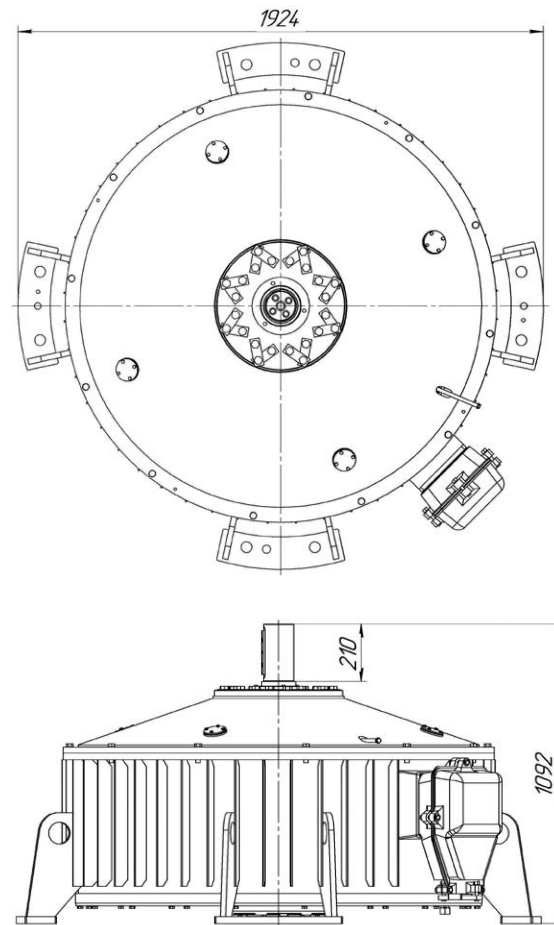


Рис. 2. Ескіз електродвигуна

ної маси. Під час побудови моделі використовувалися об'ємні елементи (рис. 3).

До розрахункової моделі застосовано такі граничні умови:

вузли кріплення двигуна до фундаменту задавались із жорстким закріпленням;

для ротора враховувалася відцентрова сила від його обертання (у розрахунковій моделі на деталі ротора задавалася гранична умова «частота обертів», яка й моделює відцентрову силу);

зусилля передачі, викликане вентилятором та прикладене до робочого кінця вала як окреме зусилля, та визначене відповідно до [13];

відцентрова сила від питомого дисбалансу, що враховувалася в розрахунковій моделі як прикладене окреме зусилля до центральної частини вала, визначене відповідно до [14];

сила одностороннього магнітного тяжіння моделювалася як віддалене зусилля на обмотки ротора, визначене відповідно до [13].

Розрахунок на сейсмічні впливи виконувався лінійно-спектральним методом з урахуванням

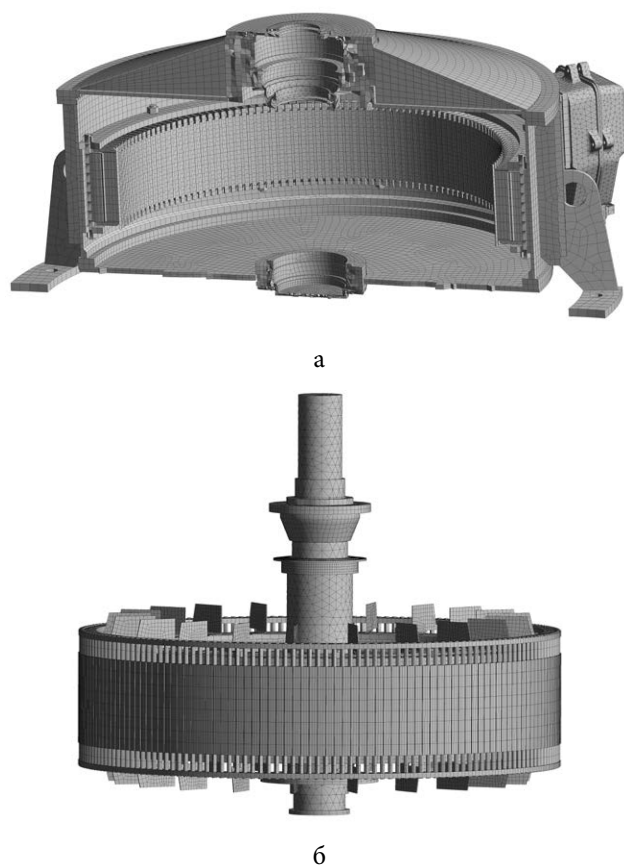


Рис. 3. Розрахункова модель статора (а) і ротора електродвигуна (б)

власних форм коливань обладнання. Сейсмічні навантаження визначалися з використанням спектрів відгуку за ГОСТ 30546.1–98 [6] із 5%-им коефіцієнтом демпфування для висотної відмітки +70 м для обладнання I категорії сейсмостійкості, що встановлено на проміжних конструкціях. Відповідно до п. 10 глави 1 розділу III НП 306.2.208–2016 [2] розрахунок виконувався з урахуванням одночасної дії сейсмічного впливу за трьома компонентами (двома горизонтальними та вертикальною).

Напруження, що виникають в елементах двигуна в разі поєднання навантажень від НУЕ, МРЗ і НУЕ+МРЗ наведено на рис. 4–6.

Враховуючи результати виконаних розрахунків, зроблено висновок, що міцність елементів двигуна за сейсмічного впливу (НУЕ+МРЗ) виконується. Також можна зробити висновок, що умова міцності при НУЕ+ПЗ також буде виконана, оскільки навіть розрахункові напруження при НУЕ+МРЗ є меншими, ніж допустимі значення напружень для НУЕ+ПЗ.

Оцінка міцності двигуна АСВО 15–23–34МУ1 відповідно до вимог [13] показала, що для двигуна всі розглянуті елементи відповідають критеріям міцності за

умов поєднання навантажень нормальної експлуатації та сейсмічних впливів. Мінімальне значення величини граничної сейсмостійкості становить $HCLPF = 0,142$ g.

Прогин ротора при НУЕ+МРЗ, $f = 0,116$ мм становить 8,9% від величини повітряного проміжку $\delta_1 = 1,3$ мм, що не перевищує 10%.

Розрахунок підшипників. Метою розрахунку підшипників є підтвердження довговічності та збереження працездатності підшипників за нормальних умов роботи, а також за механічних впливів, еквівалентних заданому сейсмічному навантаженню з урахуванням динамічної вантажопідйомності підшипників.

Критеріями розрахунку є:

ресурс (довговічність) підшипників за нормальних умов експлуатації (не менше 50 000 год) [15];

величина статичного (короткочасного) навантаження на підшипники від сейсмічних впливів;

величина динамічного навантаження на підшипники за нормальних умов роботи та сейсмічних впливів.

Розрахунок проводився згідно з [16–18] з урахуванням навантаження від робочого колеса вентилятора, а також з урахуванням ексцентриситету ротора.

В опорах 1 (нижня) і 2 (верхня) встановлено однорядні радіальні роликові підшипники типу NU226EM та NU228EM відповідно (виробник — компанія URB, Румунія), які сприймають тільки радіальні зусилля. В опорі 3 (верхня) встановлено кульковий упорний підшипник 51240M (виробник — компанія URB, Румунія), який сприймає тільки осьові зусилля.

Фактори, що впливають на реальний термін служби підшипників у певних умовах експлуатації враховуються в розрахунку ресурсу підшипників у вигляді поправочних коефіцієнтів a_1 , a_2 та a_3 :

коефіцієнт надійності a_1 — обирається для надійності 90% [19];

коефіцієнт матеріалу a_2 — обирається згідно з [19] (враховує властивості матеріалів, термічну обробку сталі та технологію виготовлення підшипників);

коефіцієнт умов роботи a_3 — обирається згідно з [15] (для звичайних умов використання підшипників).

Взаємодія вала та корпусу двигуна через підшипники моделювалася як жорстка взаємодія за відповідними напрямками (залежно від типу підшипника). Зусилля в контрольних вузлах цієї взаємодії (F_x , F_y , F_z) приймалися як розрахункові зусилля для аналізу ресурсу підшипників. Розрахунковий ресурс підшипників (млн обертів) обчислюється за формулами [15, 19]

$$L_1 = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \left(\frac{C_1}{F_1} \right)^{10/3}, \quad F_1 = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}; \quad (2)$$

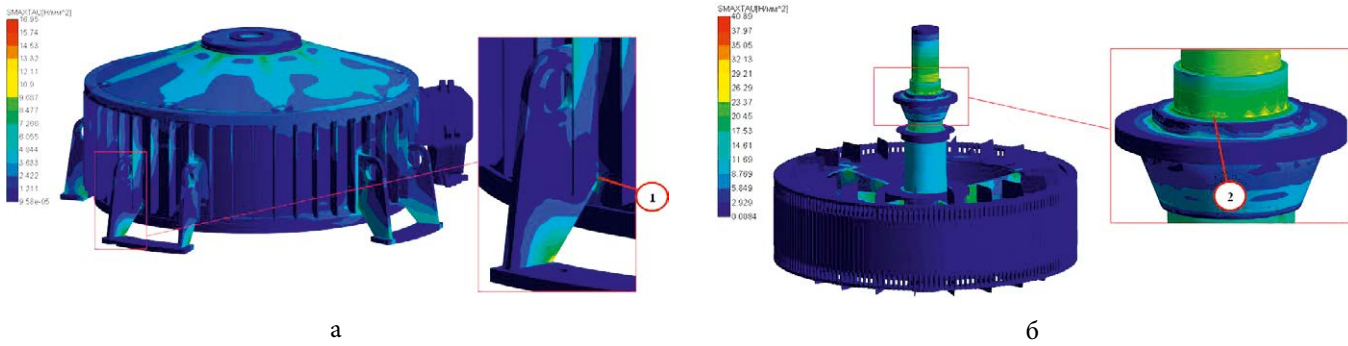


Рис. 4. Розподіл напружень при НУЕ: у статорі (а) і роторі (б)

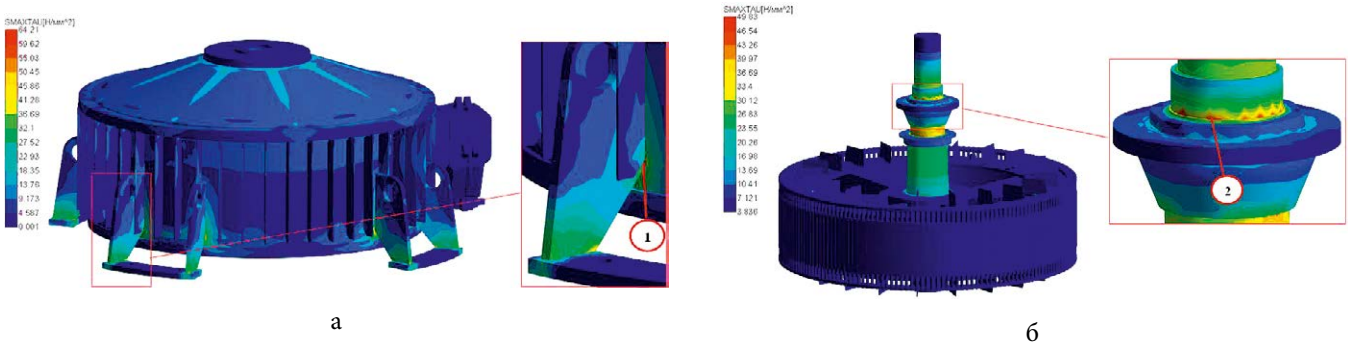


Рис. 5. Розподіл напружень при МРЗ: у статорі (а) і роторі (б)

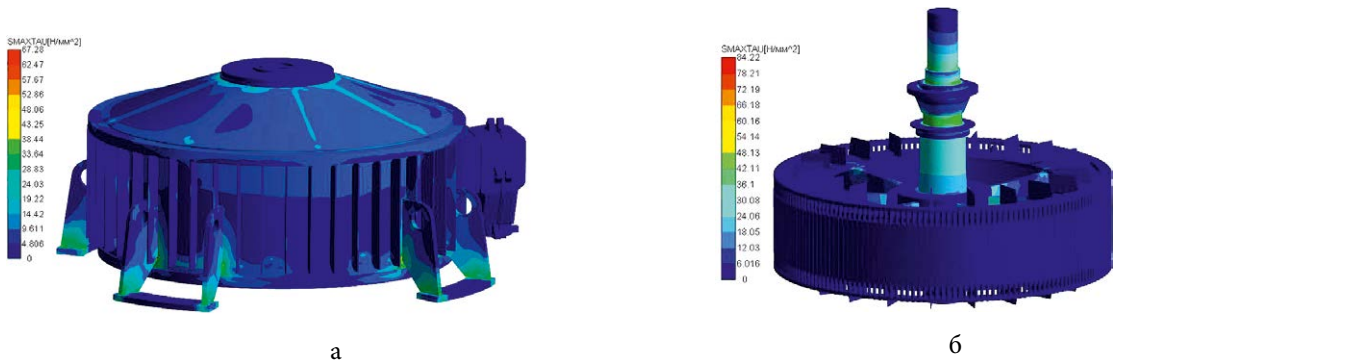


Рис. 6. Розподіл напружень при НУЕ+МРЗ: у статорі (а) і роторі (б)

$$L_2 = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \left(\frac{C_2}{F_2} \right)^{10/3}, \quad F_2 = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}; \quad (3)$$

$$L_3 = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \left(\frac{C_3}{F_3} \right)^3, \quad F_3 = F_2; \quad (4)$$

де $i = 1, 2, 3$ — номер підшипника; C_i — динамічна вантажопідйомність підшипника.

Розрахункова довговічність підшипників L_{hi} обчислюється за формулою [15, 19]

$$L_{hi} = \frac{L_i \cdot 10^6}{60 \cdot n}, \quad (5)$$

де L_i — розрахунковий ресурс підшипників; n — частота обертання вала.

У результаті аналізу виконаних розрахунків визначено, що значення розрахункової довговічності підшипників при НУЕ та НУЕ+МРЗ не менше значення, указанного в технічній документації (50 000 год). З отриманих результатів розрахунку підшипників можна зробити висновок, що працездатність, довговічність і ресурс підшипників в умовах заданого сейсмичного навантаження підтверджено.

Розрахунок інших елементів електродвигуна.

Для підтвердження міцності та працездатності двигуна також були розраховані такі його елементи:

шпонка;
шпильки М36, за допомогою яких електродвигун кріпиться до фундаменту;
лапи електродвигуна згідно з ДБН В.2.6–198:2014 [20].

Розрахунок указаних елементів також підтвердив їхню міцність в умовах заданих сейсмічних навантажень:

середнє дотичне напруження зрізу шпонки та напруження зминання шпонки не перевищують допустимі значення;

умова міцності шпильок на зріз при НУЕ+МРЗ виконується;

умова міцності елементів кріплення електродвигуна при дії навантажень НУЕ+МРЗ згідно з нормами ДБН В.2.6–198:2014 [20] забезпечується.

Висновки

У статті порушується проблема підтвердження сейсмостійкості великогабаритного електротехнічного обладнання на прикладі великих асинхронних електродвигунів.

Виконаний аналіз нормативних документів щодо оцінки сейсмостійкості такого обладнання, показав, що в разі підтвердження сейсмостійкості електротехнічного обладнання експериментальним методом устанавлюються досить жорсткі вимоги щодо умов проведення випробувань, які в багатьох випадках є досить складними в реалізації або взагалі не можуть бути дотримані. При цьому обґрунтування сейсмостійкості великих асинхронних двигунів розрахунковими методами можна вважати можливим та таким, що не суперечить чинним сьогодні стандартам і нормативним документам.

У результаті аналізу можливості проведення випробувань на сейсмостійкість експериментальним методом електродвигуна АСВО 15-23-34М1, який використовується як приводи вентиляторів градирень, зроблено висновок про відсутність в Україні спеціалізованих організацій з обладнанням для проведення випробувань на сейсмостійкість електродвигунів масою більше 600 кг. Враховуючи наведене, можна зробити висновок, що обґрунтування сейсмостійкості такого обладнання експериментальними методами в Україні на сьогодні неможливе, а тому в цій статті розглянуто обґрунтування сейсмостійкості електродвигунів АСВО 15-23-34МУ1 розрахунковими методами.

Враховуючи результати виконаних розрахунків, зроблено висновок, що сейсмостійкість двигуна АСВО 15-23-34МУ1 при МРЗ інтенсивністю до 8 балів

за шкалою ДСТУ Б.В.1.1-28 [3] підтверджена. Двигун витримує сейсмічні навантаження та зберігає працездатність під час та після землетрусу. Мінімальне значення величини граничної сейсмостійкості двигуна визначається сейсмостійкістю статора та становить $HCLPF = 0,142 g$.

За результатами проведених аналізів можна зробити висновок, що застосування розрахункового методу оцінки сейсмостійкості великогабаритного електротехнічного обладнання не суперечить вимогам чинних нормативних документів та може використовуватися як заміна експериментальному методу в тих випадках, коли експериментальне випробування є неможливим або недоцільним. Сучасні комп'ютерні технології моделювання та розрахунку дають змогу провести всесторонню оцінку сейсмостійкості обладнання та отримати результати високої достовірності.

Розрахунок на міцність проводився за допомогою розрахункового коду APM Structure 3D, який дозволено для використання під час обґрунтування безпеки АЕС України та верифіковано [21, 22] для виконання розрахунків міцності та визначення напружено-деформованого стану обладнання та конструкцій.

Список використаної літератури

1. ТУ У 29.2-31202656-001:2005. Колёса рабочие вентиляторов для градирен и аппаратов воздушного охлаждения. — Киев : Авиапромсервис, 2012. — 23 с.
2. НП 306.2.208–2016. Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій / Державна інспекція ядерного регулювання України. — Київ, 2016. — 37 с.
3. ДСТУ Б.В.1.1-28:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Шкала сейсмічної інтенсивності. — Київ: Міненергобуд України, 2011. — 79 с.
4. Кудлай А. В. Крупные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором для АЭС. Анализ возможности проведения испытаний на сейсмостойкость экспериментальным и расчетным методом / А. В. Кудлай. — Киев : ЗКЭМ, 2019. — 9 с.
5. СОУ НАЕК 182:2019. Квалификация оборудования, важного для безопасности, на сейсмические воздействия. Общие требования. — Киев : НАЭК «Энергоатом», 2019. — 36 с.
6. ГОСТ 30546.1-98. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и методы расчета их сложных конструкций в части сейсмостой-

- кости. — Москва : ИПК Издательство стандартов, 1999. — 58 с.
7. ГОСТ 30546.2-98. Испытания на сейсмостойкость машин, приборов и других технических изделий. Общие положения и методы испытаний. — Москва : ИПК Издательство стандартов, 1999. — 16 с.
 8. МТ-Т.0.03.326-13. Методика расчетного анализа сейсмостойкости элементов действующих АЭС в рамках метода граничной сейсмостойкости. — Киев : НАЭК «Энергоатом», 2013. — 51 с.
 9. Шлыгин В. В. Прочностные и размерные расчеты электрических машин / В. В. Шлыгин. — Москва; Ленинград : Госэнергоиздат, 1963. — 320 с.
 10. ТУ У 3.07-21270229-035-95. Двигатели асинхронные АСВО 15 габарита модернизированные. Технические условия. — 1995. — 25 с.
 11. БИЯН.528622.001 СБ. Двигатели асинхронные типа АСВО 15-го габарита. Сборочный чертеж.
 12. ГОСТ 15150. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. — Москва: Стандартинформ, 2010. — 71 с.
 13. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — Москва : Энергоатомиздат, 1989. — 525 с.
 14. Балансировка машин и приборов / под ред. В. А. Щепетильникова. — Москва : Машиностроение, 1979. — 294 с.
 15. Подшипники качения. Справочник-каталог / под ред. В. Н. Нарышкина и Р. В. Коросташевского. — Москва : Машиностроение, 1984. — 280 с.
 16. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. Т. 1. — 8-е изд., перераб. и доп. / под ред. И. Н. Жестковой. — Москва : Машиностроение, 2001. — 920 с.
 17. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. Т. 2. — 8-е изд., перераб. и доп. / под ред. И. Н. Жестковой. — Москва : Машиностроение, 2001. — 912 с.
 18. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. Т. 3. — 8-е изд., перераб. и доп. / под ред. И. Н. Жестковой. — Москва : Машиностроение, 2001. — 864 с.
 19. Каталог URB Rolling Bearings, General Catalogue. — 560 с. — Режим доступа: www.urbgroup.com/wp-content/uploads/2013/11/urb-catalog.pdf.
 20. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування — Київ : Мінрегіонбуд України, 2014–206 с. — 560 с.
 21. Верификационный отчет. Конечно-элементная программная система APM Structure 3D v.15. Том 1. — Королев : Научно-технический центр «Автоматизированное Проектирование Машин». — 360 с.
 22. Верификационный отчет. Конечно-элементная программная система APM Structure 3D v.15. Том 2. — Королев : Научно-технический центр «Автоматизированное Проектирование Машин». — 245 с.

**A. S. Koshmak¹, V. B. Krytskyi², V. O. Kurov¹,
Y. O. Oborskyi¹, T. V. Pyrohov¹, V. O. Posokh¹**

¹SE “State Scientific Engineering Center for Control System and Emergency Response”, 64/56, Heroiv Stalinhrada ave, Kyiv, 04213, Ukraine

²JSC “Research and Design Institute ‘Energoprojekt’”, 4, Peremohy ave, Kyiv, 01135, Ukraine

Analysis of Seismic Resistance of Large-Sized Electrical Equipment by the Method of Computational Analysis

In the framework of this article, the problem of confirming the seismic resistance of large-sized electrical equipment is raised using the example of large asynchronous electric motors.

The analysis of regulatory documents for the assessment of the seismic resistance of such equipment showed that confirmation of seismic resistance should be performed by an experimental method and other methods can be applied only with sufficient justification of the correct functioning of products. At the same time, rather stringent requirements are established for the test conditions, which in many cases are rather difficult to implement or cannot be met at all.

The analysis of the possibility of testing the ASVO 15-23-34M1 electric motor, which is used as fan drives for seismic resistance by an experimental method, under the conditions of specialized organizations accredited in Ukraine, has been carried out. It was found that the existing test installations, due to their characteristics of carrying capacity, cannot be used to carry out tests for seismic resistance of electric motors weighing more than 600 kg. Considering the above, we can conclude that the justification of the seismic resistance of such equipment by experimental methods in Ukraine today is impossible.

The analysis of current standards and special normative documents for seismic testing has been carried out. In these documents, clarifications are established on the separation of electrical equipment according to their design features,

which make it possible to confirm the seismic resistance of certain groups of equipment by calculation methods.

The requirements for the assessment of seismic resistance by the computational method and the evaluation criteria are established. The main purpose of such an assessment is to confirm that the engine retains its structural integrity and performance during and after the passage of seismic action.

An assessment of the seismic resistance of the ASVO 15–23–34M1 electric motor was carried out by the method of computational analysis using the method of limiting seismic resistance. A finite element model of an electric motor has been built taking into account all the necessary operational and seismic loads. Strength analysis was carried out using the APM Structure 3D code.

Taking into account the results of the performed calculations, it can be concluded that the seismic resistance of the engine during an earthquake with an intensity of up to 8 points according to the DSTU BV.1.1–28:2010 scale is confirmed. The engine withstands seismic loads and remains operational during and after the passage of an earthquake. The minimum value of the ultimate seismic resistance of the engine is determined by the seismic resistance of the stator HCLPF = 0.142 g.

Based on the results of the analyses carried out, it can be concluded that the use of the computational method for assessing the seismic resistance of large-sized electrical equipment does not contradict the requirements of the current regulatory documents and can be used as a replacement for the experimental method in cases where tests are impossible or impractical. Modern computer simulation and calculation technologies allow for a comprehensive assessment of the equipment seismic resistance and obtain high reliability results.

References

1. TU U29.2-31202656-001:2005. *Kolosa rabochiye ventilyatorov dlya gradiren i apparatov vozdušnogo okhlazhdeniya* [Fan wheels for cooling towers and air coolers]. Kyiv: Aviapromservis, 2012, 23 p. (in Russ.)
2. State Inspectorate for Nuclear Regulation of Ukraine (2016). NP 306.2.208-2016. *Vymohy do seysmostiykoho proektuvannya ta otsinky seysmichnoyi bezpeky enerhoblokov atomnykh stantsiy* [Requirements for seismic design and seismic safety assessment of nuclear power units]. Kyiv, 37 p. (in Ukr.)
3. Ministry of Communities and Territories Development (2011). DSTU B.V.1.1–28:2010. *Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiynykh vplyviv, vid pozhezhi. Shkala seysmichnoyi intensyvnosti* [Protection against dangerous geological processes, harmful operational influences, from fire. Seismic intensity scale]. Kyiv, 79 p. (in Ukr.)
4. Kudlay A. V. (2019). *Krupnyye asinkhronnyye dvigateli s korotkozamknutym rotorom dlya AES. Analiz vozmozhnosti provedeniya ispytaniy na seysmostoykost' eksperimental'nym i raschetnym metodom* [Large asynchronous squirrel-cage motors for nuclear power plants. Analysis of the possibility of conducting seismic resistance tests by experimental and calculation method]. Kyiv: LEMP, 9 p. (in Russ.)
5. NNEGС “Energoatom” (2019). SOU NAEK 182:2019. *Kvalifikatsiya oborudovaniya, vazhnogo dlya bezopasnosti, na seysmicheskiye vozdeystviya. Obshchiye trebovaniya* [Qualification of equipment important to safety for seismic effects. General requirements]. Kyiv, 36 p. (in Russ.)
6. GOST 30546.1–98. *Obshchiye trebovaniya k mashinam, priboram i drugim tekhnicheskim izdeliyam i metody rascheta ikh slozhnykh konstruksiy v chasti seysmostoykosti* [General requirements for machines, instruments and other technical products and methods for calculating their complex structures in terms of seismic resistance]. Moscow: IPK Izdatelstvo standartov, 1999–58 p. (in Russ.)
7. GOST 30546.2–98. *Ispytaniya na seysmostoykost' mashin, priborov i drugikh tekhnicheskikh izdeliy. Obshchiye polozheniya i metody ispytaniy* [Tests for seismic resistance of machines, instruments and other technical products. General provisions and test methods]. Moscow: IPK Izdatelstvo standartov, 1999, 16 p. (in Russ.)
8. NNEGС “Energoatom” (2013). MT-T.0.03.326–13. *Metodika raschetnogo analiza seysmostoykosti elementov deystvuyushchikh AES v ramkakh metoda granichnoy seysmostoykosti* [Methodology for the computational analysis of seismic resistance of operating NPP elements within the framework of the boundary seismic resistance method]. Kyiv, 51 p. (in Russ.)
9. Shlygin V. V. (1963). *Prochnostnyye i razmernyye raschety elektricheskikh mashin* [Strength and dimensional calculations of electrical machines]. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat, 320 p. (in Russ.)
10. TU U3.07-21270229-035-95. *Dvigateli asinkhronnyye ASVO 15 gabarita modernizirovannyye. Tekhnicheskiye usloviya* [Asynchronous motors ASVO type, size 15, modernized. Technical conditions]. 1995, 25 p. (in Russ.)
11. BIYAN.528622.001 SB. *Dvigateli asinkhronnyye tipa ASVO 15-go gabarita. Sborochnyi chertezh* [Asynchronous motors of ASVO type, size 15. Assembly drawing].
12. GOST 15150. *Mashiny, pribory i drugiye tekhnicheskiye izdeliya. Ispolneniya dlya razlichnykh klimaticheskikh rayonov. Kategorii, usloviya ekspluatatsii, khraneniya i transportirovaniya v chasti vozdeystviya klimaticheskikh faktor-*

- ov vneshney sredey* [Machines, devices and other technical products. Versions for different climatic regions. Categories, operating conditions, storage and transportation in terms of the impact of climatic environmental factors]. Moscow: Standartinform, 2010, 71 p.
13. USSR State Committee for the Supervision of Safe Work in the Nuclear Power Industry (1989). PNAEG-7-002-86. *Norms for calculating the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants*. Moscow: Energoatomizdat, 525 p. (in Russ.)
 14. Shchepetilnikov V. A. (ed.) (1979). *Balansirovka mashin i priborov* [Balancing machines and devices]. Moscow: Mashinostroyeniye, 294 p. (in Russ.)
 15. Naryshkin V. N., Korostashevskiy R. V. (eds.) (1984). *Podshipniki kacheniya. Spravochnik-katalog* [Rolling bearings. Directory-catalog]. Moscow: Mashinostroyeniye, 280 p. (in Russ.)
 16. Anur'yev V. I.; Zhestkovoy I. N. (ed.) (2001). *Spravochnik konstruktora-mashinostroitel'ya* [Handbook of the constructor-mechanical engineer]. Vol. 1. Moscow: Mashinostroyeniye, 920 p. (in Russ.)
 17. Anur'yev V. I.; Zhestkovoy I. N. (ed.) (2001). *Spravochnik konstruktora-mashinostroitel'ya* [Handbook of the constructor-mechanical engineer]. Vol. 2. Moscow: Mashinostroyeniye, 912 p. (in Russ.)
 18. Anur'yev V. I.; Zhestkovoy I. N. (ed.) (2001). *Spravochnik konstruktora-mashinostroitel'ya* [Handbook of the constructor-mechanical engineer]. Vol. 3. Moscow: Mashinostroyeniye, 864 p. (in Russ.)
 19. *URB Rolling Bearings, General Catalogue*. 560 p. Available at: <https://www.urbgroup.com/wp-content/uploads/2013/11/urb-catalog.pdf>
 20. Ministry of Communities and Territories Development (2014). DBN V.2.6-198:2014. *Steel structures. Design standards*. Kyiv, 206 p. (in Russ.)
 21. Verification report. *Finite element software system APM Structure 3D*, v. 15. Vol. 1. Korolev: Research and Software Development Centre APM, 360 p. (in Russ.)
 22. Verification report. *Finite element software system APM Structure 3D*, v. 15. Vol. 2. Korolev: Research and Software Development Centre APM, 245 p. (in Russ.)

Надійшла 14.06.2021

Received 14.06.2021