

ВІДГУК

офіційного опонента Львова Геннадія Івановича
на дисертаційну роботу Яценко Андрія Сергійовича
«ПІДВИЩЕННЯ ВІБРОНАДІЙНОСТІ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ АЕС НА
ОСНОВІ СТВОРЕННЯ ДОСТОВІРНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ
ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ РОТОР-КОРПУС»,
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин

1. Актуальність теми

Розвиток ядерної енергетики України нерозривно пов'язано з модернізацією діючого і створенням нового насосного обладнання для процесів теплообміну і водо підготовки. Надійність є головною вимогою, що пред'являються до насосних агрегатів, тому що вони забезпечують працездатність і радіаційну безпеку атомних станцій. Збільшення потужності одиничних блоків атомних електростанцій потребує створення насосів на більш високі технологічні параметри, що зумовлює зростання їх динамічної напруженості. Дослідження, що спрямовані на зниження вібрацій відцентрових насосних агрегатів, є важливою складовою забезпечення надійності таких агрегатів.

Важливе місце в цих дослідженнях займає аналіз вільних коливань із метою запобігання резонансів. Аналіз динамічних характеристик відцентрових агрегатів вимагає розгляду спільних коливань системи ротор-корпус з урахуванням їх динамічної взаємодії. На теперішній час відсутні розрахункові методики для великих багатоступеневих насосних агрегатів, які дозволяють на етапі проектування провести достовірний аналіз динамічних властивостей і провести оптимізацію конструкцій системи ротор-корпус.

Тому тема, якій присвячена дисертаційна робота Яценко Андрія Сергійовича, є актуальною. Дисертаційну роботу виконано в акціонерному товаристві «Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут атомного та енергетичного насособудування», а її результати впроваджені в промислово-виробничу практику, що підтверджує актуальність роботи.

2. Наукова новизна дисертаційної роботи

Наукова новизна виконаної дисертації перш за все полягає в тому, що автором роботи створено та обґрунтовано розрахункові моделі системи «ротор – корпус – фундамент» двокорпусного відцентрового насосного агрегату з різним ступенем деталізації.

На основі розробленої методики вперше отримано залежності власних частот коливань насосного агрегату від податливості рами та фундаменту.

Шляхом чисельних досліджень отримано залежність впливу податливості кріплення на динамічні характеристики вертикального насосного агрегату при

зміні ступінчастості ротора. Встановлено значний вплив конструкцій підшипникових опор на динамічні характеристики ротора.

Виявлено вплив пружних сил у шпаринних ущільненнях на виникнення додаткових взаємодій у системі «ротор – корпус», що обумовило необхідність розглядати насосні агрегати як систему в цілому при визначенні динамічних характеристик.

3. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі

Обґрунтованість результатів дисертаційної роботи обумовлена тим, що вони засновані на фундаментальних рівняннях теорії коливань, а чисельні данні отримані за допомогою сучасного програмного забезпечення на основі методу початкових параметрів, та за допомогою сертифікованого програмного комплексу «Ansys».

Достовірність наукових положень і висновків підтверджується узгодженістю результатів чисельних розрахунків, отриманими різними методами. Про достовірність результатів свідчить практичний збіг власних частот коливань динамічної системи «Живильний насосний агрегат – віброплатформа» з власними частотами коливань підсистем насосного агрегату.

При порівнянні результатів розрахунку власних частот коливань двокорпусного відцентрового насосного агрегату зі спектром власних частот, що отримано експериментальним шляхом, виявлено гарний збіг розрахункового дослідження з експериментальними даними.

Позитивний ефект від використання результатів та рекомендацій, наведених в дисертаційній роботі, в акціонерному товаристві «Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут атомного та енергетичного насособудування» також свідчить про їхню достовірність та застосовність до вирішення задач, які ставить перед інженерами та науковцями сучасна промисловість України.

4. Практичне значення отриманих результатів

Створено комплексний підхід до розробці математичних моделей і програм розрахунку динамічних характеристик системи «ротор – корпус – фундамент» з використанням тривимірних та балочні моделей, що становлять практичну базу для проектування відцентрових насосів та аналізу їх робочих та вібраційних характеристик.

Розроблено алгоритм визначення динамічних характеристик насосних агрегатів, який може бути застосовано при проектуванні нових або модернізації діючих насосних агрегатів атомних електричних станцій.

Запропоновано шляхи запобігання резонансних режимів роботи вертикальних насосних агрегатів в практично потрібному діапазоні зміни частоти обертання.

Створена в дисертаційній роботі методика дозволяє інженерам та науковцям, без необхідності написання додаткових програм, отримувати за допомогою скінченно-елементних комплексів динамічні властивості систем «ротор – корпус – фундамент», що було використано в практиці проектно-дослідних робіт АТ «Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут атомного та енергетичного насособудування», та підтверджено відповідним актом впровадження.

5. Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

Основні наукові положення і результати досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковані в 13 наукових працях, серед яких 7 статей у фахових виданнях за переліком ДАК МОН України, 2 статті у періодичних виданнях, що індексуються науково-метричною базою Scopus, 1 стаття у складі монографії та 3 тези доповідей і матеріалів конференцій.

Результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на 5 наукових конференціях, зокрема на 3 міжнародних. Матеріали дисертаційної роботи використовувались у звітах по науково дослідних роботах АТ «ВНДІАЕН».

Аналіз публікацій дозволяє зробити висновок, що основні результати дисертації знайшли повне відображення в наукових виданнях.

Автореферат у повній мірі відбиває основні положення та отримані автором результати досліджень.

6. Оцінка змісту дисертаційної роботи

Основний зміст дисертаційної роботи складається зі вступу, п'яти розділів та висновків.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, задачі, об'єкт та предмет досліджень, основні наукові результати, їхня наукова новизна та практичне значення, зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, зазначено особистий внесок здобувача у роботи, що виконані у співавторстві, наведено відомості про публікації та інформацію про апробацію результатів досліджень.

Перший розділ присвячено аналізу існуючих методів і методик динамічного аналізу вібрації роторних машин. Відмічене, що нормативно-технічна документація по нормуванню вібрації не регламентує допустимі рівні вібрації роторних машин на нестационарних режимах і за межами встановлених робочих діапазонів.

Систематизовано основні джерела збуджень вібрації відцентрових насосних агрегатів, що викликають різні просторові коливання валопроводу і корпусу відцентрового насоса, приводного електродвигуна і інших вузлів, що входять до складу агрегату. Зроблено огляд публікацій, присвячених дослідженням збуджуючих сил, обумовлених неоднорідністю потоку, впливу шпаринних ущільнень на динаміку роторів відцентрових насосів.

Проаналізовано вплив гідростатичних, циркуляційних, гіроскопічних, інерційних і демпфуючих сил при різних режимів течії в шпаринах. Зроблено огляд існуючих методів розрахунку податливості підшипників кочення і рідинної плівки підшипників ковзання, що дозволяють врахувати їх характеристики при аналізі динамічних властивостей роторів відцентрових насосів.

Велика увага приділена існуючим числовим методам розрахунку вільних і вимушених коливань складних роторних систем: методу початкових параметрів, методам динамічної податливості і жорсткості, методу скінченних елементів та їх поєднанню. Зроблено висновок, що на сьогоднішній день одним із найкращих програмних середовищ для виконання динамічних розрахунків є комерційні пакети американської фірми ANSYS Inc. Продукти цієї фірми сумісні з програмами геометричного модулювання (CAD-системами), CATIA, Pro/ENGINEER, SolidWorks та інш.

У **другому розділі** виконано аналіз впливу корпусів підшипників на динамічні характеристики ротора відцентрових насосних агрегатів. Приведено опис методу початкових параметрів стосовно до розрахунків власних крутильних і згинально-крутильних коливань валопроводів. При цьому зв'язки між ротором і корпусом насоса моделюються пружними опорами в місцях розташування підшипників і шпаринних ущільнень. Корпуси підшипникових опор моделюються масою і жорсткістю конструкції корпусу. Розрахунок жорсткості конструкцій корпусів підшипникових опор виконано за допомогою програмного комплексу Ansys. Отримані таким чином значення жорсткостей конструкції корпусів підшипникових опор використовуються при розрахунках динамічних характеристик ротора за допомогою балкових моделей.

Як альтернатива використано розрахунки динаміки ротора на повних тривимірних моделях в комплексі Ansys. При цьому результати розрахунку динаміки ротора за допомогою балкових моделей виявляються досить близькими до отримуваних за допомогою програмних систем скінчено-елементного аналізу.

Третій розділ присвячено аналізу горизонтального двокорпусного відцентрового живильного насосного агрегату, який створює неконсервативну динамічну систему «Живильний насосний агрегат – віброплатформа». Ця система складається з основних частин: віброплатформа, електродвигун, насос, ротор електродвигуна, ротор насоса та корпусів підшипникових опор.

Проведено розрахунок власних частот основних елементів системи «Живильний ВНА – віброплатформа». Ротор насоса, що служить джерелом вібрацій всієї системи, досліджено за допомогою побудови діаграм Кемпбела.

Проведено розрахунки динамічних характеристик корпусів підшипників, корпусу насоса, корпусу електродвигуна, віброплатформи з проектними масово-інерційними характеристиками.

Виконано експериментальне визначення власних частот коливань двокорпусного живильного насосного агрегату. Збуджування вільних коливань зроблено імпульсним шляхом, методом удару. Власні частоти коливань знаходились за допомогою швидкого перетворення Фур'є. Для побудови

спектрограми був використаний віброаналізатор ВД-1854 з віброперетворювачами АП-100ВМ. При порівнянні результатів розрахунку власних частот коливань динамічної системи «Живильний насосний агрегат – віброплатформа» зі спектром власних частот коливань, отриманих експериментально, виявлено добре узгодження розрахункових результатів з експериментальними.

У четвертому розділі проводиться аналіз динамічних характеристик системи вертикальних насосних агрегатів. Розрахунок динаміки ротора виконано на балкової моделі круглого поперечного перерізу шматочно-постійної жорсткості і погонної маси з дискретно розташованими деталями. Встановлено, що конструкція ротора жорстка, а перша власна частота коливань знаходиться вище робочого діапазону частот обертання. Аналіз динамічних характеристик внутрішнього корпусу насоса привів до таких же висновків.

Корисна інформація для проектування отримана внаслідок дослідження впливу кількості робочих коліс ротора на динамічні характеристики відцентрового вертикального насосного агрегату.

П'ятий розділ присвячено конструктивним засобам запобігання резонансних режимів насосних агрегатів.

Розглянуто приклад збільшення жорсткості рами для віддалення власних частот коливань підсистеми «Насос – рама – фундамент» від резонансу. Агрегат з початковим варіантом рами мав третю власну частоту коливань 52.11 Гц, що знаходиться близько до збуджуючої частоти 49,5 Гц. Після модернізації рами перша власна частота коливань підсистеми «насос – рама – фундамент» склала 59 Гц. Також приведено приклад відлаштування від резонансу вертикального насосного агрегату шляхом вирізання вікон та зменшення жорсткості ліхтаря електродвигуна. Експериментальним шляхом доведено адекватність приведених конструктивних способів відлаштування відцентрових вертикальних та горизонтальних насосних агрегатів від резонансів.

У висновках коротко висвітлюється ступінь розв'язання поставлених в роботі задач, що свідчить про повноту їхнього вирішення та досягнення поставленої мети.

7. Зауваження по дисертаційній роботі

1. В розділі 2.1 розглянута одномасова модель ротора відцентрового насоса та приведені відомі рівняння малих коливань незрівноваженого ротора з урахуванням квазіпружних сил в ущільненнях. Але в подальшому в роботі одномасова модель ротора не використовується.

2. Аналіз динамічних характеристик валопроводів виконується методом початкових параметрів, в основі якого покладені балкові моделі. Балкові моделі дають достатню точність для валів, довжина яких значно більша за діаметр. В приведеній на рисунку 2.5 розрахунковій моделі ротора двокорпусного відцентрового насоса є ділянки, довжина яких менша за діаметр. Це може привести до значної похибки, особливо стосовно моментів та напружень.

3. В розділі 3.6 приведено результати аналізу в програмному комплексі «Ansys Workbench» коливань електродвигуна на жорсткій основі. З приведеної на рисунку 3.13 інформації не зрозуміло, як моделювався електродвигун і чому при збереження масово-інерційних характеристик електродвигуна отримано тільки дві власні частоти коливань.

4. В роботі приведено багато результатів, отриманих за допомогою метода скінчених елементів в системі ANSYS. Відомо, що точність результатів залежить від якості скінчено елементної моделі. Але в роботі не приведено приклади побудованих моделей, немає аналізу збіжності результатів при збільшенні кількості елементів. Не використана можливість оцінки відносної похибки між результатами в точках інтегрування елементів і результатами, усередненими по вузлах.

8. Висновок

На основі вивчення змісту дисертаційної роботи, автореферату і публікацій вважаю, що дисертація Ященко Андрія Сергійовича «Підвищення вібронадійності відцентрових насосів АЕС на основі створення достовірних математичних моделей динамічної системи ротор-корпус» відповідає паспорту спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин. Дисертація є завершеним науковим дослідженням, у якому поставлена і вирішена важлива науково-практична задача із забезпечення вібронадійності відцентрових насосних агрегатів АЕС, що реалізується на основі створення достовірної математичної моделі динамічної системи насосного агрегату. Робота виконана на високому рівні, містить нові, цінні з наукової і практичної точок зору результати, написана технічно грамотною мовою. Результати роботи підтверджені актами про впровадження у виробництво та навчальний процес.

Дисертація відповідає вимогам п.п. 9, 11 і 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567, а її автор, Ященко Андрій Сергійович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри динаміки і міцності машин
Національного технічного університету «Харківський
політехнічний інститут»,
доктор технічних наук, професор



Львов Г.І.

3 грудня 2018 р.

Підпис д.т.н., проф. Львова Г.І. засвідчую,
Учений секретар НТУ "ХПІ"



Заковоротний О.Ю.