

отраслях энергетического, тяжелого и транспортного машиностроения // Динамические измерения (IV Всесоюзный симпозиум): Тезисы докладов. – Ленинград: НПО “ВНИИМ им. Д.И. Менделеева”, 1984. – С. 3–10. 5. Пойда А.Н., Смолин Ю.А., Коваленко В.Т., Сухопаров С.С. Динамические измерения давления в цилиндре и топливной системе дизеля // Динамические измерения (IV Всесоюзный симпозиум): Тезисы докладов. – Ленинград: НПО “ВНИИМ им. Д.И. Менделеева”, 1984. – С. 127–130. 6. Федяков Е.М., Колтаков В.К. и др. Измерение переменных давлений. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 216 с. 7. Тихан М.О., Малець Р.Б., Шинкаренко Г.А. Моделювання термомеханічних процесів в конструктивних елементах вимірювачів тиску // Машинознавство. – 2008. – №6. – С. 26–31. 8. Тихан М.О. Аналіз впливу термомеханічних процесів у мембрані тензометричного перетворювача динамічного тиску при термоударі на його додаткову похибку: Автоматика, вимірювання та керування // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2007. – №574. – С. 69–75. 9. Тихан М.О. Спосіб вимірювання тиску в умовах нестационарних температур: Приладобудування // Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. – 2008. – №35. – С. 77–84.

УДК.539.3:534.1

М.Г. ШУЛЬЖЕНКО, Ю.Г. ЄФРЕМОВ, В.І. ЦИБУЛЬКО, О.В. ДЕПАРМА
Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ВИМІРЮВАЛЬНІ ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ТУРБОАГРЕГАТІВ

Ó Шульженко М.Г., Єфремов Ю.Г., Цибулько В.І., Депарма О.В., 2011

Описано розроблені технології та комп'ютеризовані системи безперервного автоматизованого аналізу та діагностики вібраційного стану потужних турбоагрегатів ТЕС (ТЕЦ) для виявлення причин змін вібрації та попередження розвитку позаштатних ситуацій.

The developed technologies of the analysis of a vibrating state of powerful turbine units of thermal power stations and the created computerized systems of the continuous automated analysis of vibration for revealing of the reasons of change of vibration and preventions of development of unforeseen situations which are introduced on power blocks are described.

Постановка проблеми. Проблема підвищення надійності і технологічної безпеки експлуатації енергоблоків відповідно до вимог сучасного енергоринку з мінімальними витратами може вирішуватися шляхом використання засобів і новітніх інформаційних технологій діагностування вібраційного стану з визначенням небезпечних несправностей. Відомо, що вібраційний стан працюючого агрегата є одним з основних показників його технічного стану, а вібропараметри є найбільш чутливими до появи і розвитку пошкоджень.

Штатні системи контролю вібрації турбоагрегатів потужністю 100–800 МВт (в Україні їх більше 100) не забезпечують своєчасного виявлення появи і розвитку небезпечних несправностей.

Аналіз останніх досліджень. Сьогодні в області діагностики розроблені технології діагностування вібростану потужних паротурбінних агрегатів за вібраційними параметрами. У цьому напрямі здійснюють дослідження багато відомих закордонних фірм (“Shenck” Німеччина, “Bruel&Kjaer” Данія та інші), у тому числі і в Україні НПВ “Моноліт” і в СНД, зокрема, в

Російській Федерації (ВТІ, ЦКТІ, ВНДІЕ та ін.). Але сьогодні відсутні ефективні інформаційні технології вібраційної діагностики, які б уможливили однозначно (з більшою ймовірністю) ідентифікувати вібраційні характеристики і їхні зміни в процесі експлуатації агрегата.

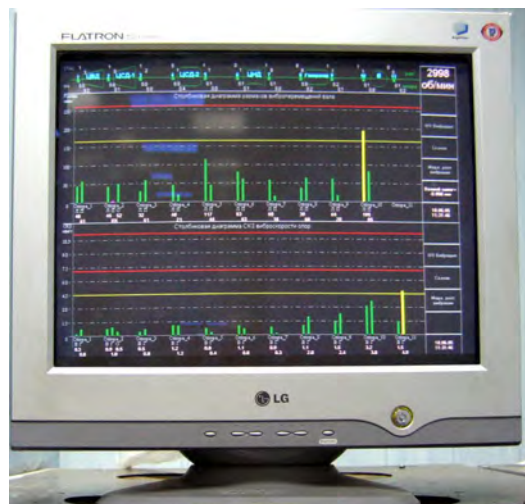
Виклад основного матеріалу. Створені в ПІМаш НАН України технології та системи автоматизованого аналізу і діагностування вібраційного стану потужних турбоагрегатів, передусім за параметрами вібрацій роторів, впроваджені на Київській ТЕЦ-5 у 1998 р., на двох енергоблоках Запорізької ТЕС в 2000 та 2002 рр. і на Харківській ТЕЦ-5 у 2004 р. [1]. Вони розроблені на основі фундаментальних наукових досягнень у цій галузі, за своїми функціональними можливостями та технічними характеристиками відповідають усім вимогам керівних документів з експлуатації електростанцій і мереж, що діють в Україні, не поступаються зарубіжним аналогам, а за ціною в кілька разів дешевші за них. Аналоги вимірювальних засобів цієї системи (давачі й пристрої безконтактного виміру вібропереміщення, осьового зсуву, ексцентриситетів, частоти обертання, контактного виміру віброшвидкості), створені на основі вихрострумових перетворювачів, експлуатуються на електростанціях України й у країнах ближнього зарубіжжя.

Варіант технічних засобів системи автоматизованого контролю й діагностування вібростану (АКДВ), що пропонується для оснащення ТА з потужністю 100–800 МВт, включає:

- комплекс технічних засобів перетворення й вимірювання вібрації роторів валопроводу і опор підшипників;
- комплекс технічних засобів прийому, цифрової обробки, аналізу, відображення й зберігання даних (рис. 1);
- комплекс математичного й програмно-методичного забезпечення автоматизованого аналізу й діагностики вібраційного стану ТА.



а



б

Рис. 1. Апаратна частина системи АКДВ ТА: а – стійка системи; б – монітор для відображення оперативної інформації

Основні характеристики системи АКДВ:

- синхронне вимірювання з періодом опитування 80 мікросекунд;
- безперервний паралельний збір і реєстрація параметрів вібрації роторів, опор і основних технологічних параметрів енергоблока;

- контроль на відповідність нормам вібрації роторів і опор;
- попередження розвитку позаштатних ситуацій;
- аналізи вібрації: спектральний, гармонічний, кореляційний, статистичний. Формування трендів, траєкторій, АФЧХ;
- експертна оцінка розвитку вібронебезпечних дефектів.

Сигнали вібрації роторів валопроводу й опор формуються вимірювальними пристроями з вихорострумowymi перетворювачами (ВСП), створеними в ІПМаш [2, 3]. Досвід використання їх на ТЕС і ТЕЦ у засобах безконтактного вимірювання переміщень, вібропереміщень і частоти обертання роторів показує, що за перешкодозахищеністю й деякими споживчими показниками вони можуть перевищувати аналоги відомих фірм. Вимірювальні пристрої вібрації включають первинний вихорострумowy перетворювач (давач) із частотно-модульованим (ЧМ) сигналом на виході й функціональний перетворювач (ФП), який перетворює ЧМ-сигнал вібрації в електричний аналоговий сигнал, пропорційний до зміни зазора до поверхні об'єкта контролю.

Вимірювальні пристрої з таким ВСП не вимагають спеціального налаштування їх на тип металу поверхні об'єкта й на тип і довжину лінії зв'язку, як того потребують вимірювальні пристрої відомих закордонних фірм. Сигнал від давача без додаткових проміжних пристроїв по кабелю з екранованим багатожильним проводом (типу МГШВБВ) може передаватися на відстань близько 200 м, а за необхідності і більшу. При цьому перешкода від електромагнітного впливу виключається шляхом посилення ЧМ-сигналу з обмеженням по амплітуді вхідними пристроями ФП. Діапазон і лінійність вимірювання переміщень забезпечується як вибором параметрів чутливого елемента давача, так і налаштуванням його частотного перетворювача, а так само схемними рішеннями у ФП. Сьогодні найповніше відпрацьована технологія виготовлення й застосування безконтактних вихорострумowych давачів з умовною позначкою ДПБ1.1, ДПБ2.1 і їхніх модифікацій. Вони функціонально однотипні й відрізняються тільки конструктивно-габаритними розмірами корпусу-екрана.

Умовами експлуатації давачів допускається температура навколишнього середовища від 0 до 80 °С (тимчасово до +100 °С і зниження до мінус 10 °С). Навколишнім середовищем може бути повітря, водяна пари й конденсат, олива і її пари, рідина ОМТІ. Напруженість електромагнітного поля може бути до 1000 А/м (тимчасово до 2000 А/м). Вплив вібрації й атмосферного тиску в місцях кріплення не регламентується.

Вихорострумowy вимірювальний пристрій, що включає безконтактний давач ДПБ з відповідним ФП, може мати такі характеристики:

- перетворення відносного переміщення (зазора) і його статичних (повільних) змін з давачем ДПБ2.1 у діапазоні 0–5 мм ($\pm 2,5$ мм) з коефіцієнтом перетворення 1 В/мм, а з давачем ДПБ1.1 у діапазоні 0–8 мм (± 4 мм) з коефіцієнтом перетворення 1 В/мм;
- перетворення відносних вібропереміщень (миттєвих змін зазора) з амплітудою до 500 мкм (розмахом до 1000 мкм) у діапазоні частот від 0 до 500 Гц із коефіцієнтом перетворення – 10 МВ/мкм. Очікувана похибка – в межах 5 %.

Для контролю частоти обертання вала й одержання опорного сигналу (синхромітки) по фазі безконтактний вихорострумowy давач з ВСП встановлюється над міткою (вона може бути у вигляді виїмки (заглиблення) на валу). Електронні тахометри з мікропроцесорними елементами забезпечують індикацію частоти обертання в діапазоні 3–10000 об/хв і вимірювання їх з похибкою в межах $\pm 0,1$ % у діапазоні обертання 10–10000 об/хв. Тахометром функціонально забезпечується запам'ятовування максимальних обертів (закидів) валопроводу ТА і енергонезалежне збереження їх після вимикання електроживлення та видача аналогового сигналу про частоту обертання і імпульсного сигналу (фазної мітки).

В ІПМаш НАН України на основі розроблених ВСП і чутливого пружно-інерційного елемента створені й випробувані експериментальні зразки контактних вихорострумowych давачів

вібрації з ЧМ-сигналом на виході типу ДВК і використані в системі АКВД на ТА Харківської ТЕЦ-5. Удосконалений зразок ДВК запатентований як винахід.

Випробування вимірювального пристрою, що містить контактний вихорострумний давач вібрації типу ДВК1-1 з ЧМ вихідним сигналом, показали, що такий вимірювальний канал може забезпечувати вимірювання віброшвидкості від 0,5 до 50 мм/с у діапазоні частот 10–500 Гц із коефіцієнтом перетворення 0,1 В·с/мм і нерівномірністю амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) в межах 2 дБ. Очікувана зведена похибка на базовій частоті – в межах 5 %.

Використання в створених і відпрацьованих контактних давачах вібрації з ВСП- і ЧМ-сигналом на виході дало змогу зберегти високу перешкодостійкість до впливу експлуатаційних чинників та споживчі (експлуатаційні) характеристики, ті що властиві безконтактним давачам з таким ВСП. В останній час виконані роботи зі зменшення нерівномірності АЧХ цих контактних давачів і з розширення частотного діапазону вимірювальних каналів з контактними давачами в ВСП за рахунок використання цифрових фільтрів високого порядку.

Експериментальна експлуатація давачів зі ЧМ вихідним сигналом на ТЕС і ТЕЦ у системах контролю вібрації підтверджує їхню надійність, перешкодостійкість в умовах електростанцій і уможливує підвищити якість отриманої інформації для контролю й діагностики вібраційного стану турбоагрегата.

Програмне забезпечення системи АКВД забезпечує контроль і діагностування вібраційного стану ТА на різних режимах його роботи (валоповорот, пуск, вибіг, неробочий хід, навантаження, робота під навантаженням).

За розгону (вибігу) ТА система накопичує масиви миттєвих значень вібросигналів. Для визначення вібростану турбоагрегата та можливих несправностей по цих вібросигналах модуль обробки інформації системи АКВД формує такі масиви інформаційних компонент: розгінні та вибігові характеристики по СКЗ віброшвидкості опор, по середньому значенню розмаху вібропереміщення шийок роторів та за значеннями амплітуд і фаз їхніх обертових і подвійно обертових складових, по яких формуються середньостатистичні характеристики та траєкторії миттєвого руху шийок роторів валопроводу у розточці підшипників ковзання.

Для оцінки вібраційного стану ТА за даними, накопиченими на етапі розгону чи вибігу, використовуються не частотні, а рядкові спектри (по гармонійних складових), що містять дані про амплітуду і (чи) фазу сигналу, як функцію від номера гармоніки частоти обертання. За такого підходу, незалежно від частоти обертання ТА, одержуємо для контролю спектр гармонік і субгармонік, які не змінюють свого положення по осі номерів гармонік. Це дає змогу слідкувати за зміною амплітуд гармонік у процесі розгону ТА, при цьому процедури інтерпретації результатів для діагностування несправностей з використанням аналізу рядкових спектрів значно спрощуються, особливо на етапі вибігу, коли немає впливу режимних чинників. Крім того, під час аналізу рядкового спектра розв'язується задача розмивання частотних складових під впливом зміни частоти обертання ТА. Це полегшує постановку правильного діагнозу, якщо спостерігається об'єднання частотних складових стандартного частотного аналізу.

За даними, накопиченими системою у режимі валоповороту ТА, обчислюється модуль максимального переміщення ротору S_{\max} :

$$S_{\max} = \max \sqrt{S_x^2(t) + S_y^2(t)},$$

де $S_x(t)$, $S_y(t)$ – переміщення роторів валопроводу у підшипниках по двох ортогональних напрямках x і y .

Допустимий рівень S_{\max} по усіх опорах ТА визначено на основі експериментальних досліджень і є не більшим, ніж 20 мкм. Такий рівень S_{\max} після прогрівання роторів дає змогу здійснювати пуск ТА з допустимим рівнем вібрації на критичних частотах без пошкодження ущільнень. Якщо після достатнього прогрівання турбіни переміщення ротора S_{\max} не знижується до

допустимого рівня, то причиною цього можуть бути не усунуті дефекти механічного характеру монтажу і ремонту ТА. На причину таких переміщень роторів у цьому випадку може вказати мнемолінія “вигину” валопроводу.

Індикаторами вібраційного стану працюючого ТА обрані стовпчикові діаграми розмахів відносного вібропереміщення роторів у підшипниках і СКЗ віброшвидкості опор по усіх контрольних точках з межами допустимих рівнів стосовно [4–6]. У режимі пуску турбоагрегата межами допустимих рівнів вібрації по валу й опорах ТА вибрано реальні середньостатистичні вибігові характеристики.

На підставі проведених досліджень і досвіду експлуатації, для здійснення діагностування вібростану турбоагрегата виявлені основні причини й ознаки вібронебезпечних дефектів і встановлений взаємозв'язок між ними з урахуванням впливу режимних чинників [1]. Ступінь впливу режимних чинників на вібраційний стан ТА враховується методом змінних коефіцієнтів [7]. Для підвищення надійності формування діагностичних масивів і трендів вібропараметрів у системі АКДВ використовується процедура попередньої обробки вихідних сигналів, що спрямована на придушення шумів і викидів, видалення можливих збоїв при оцифровці, фільтрацію й нормування сигналів.

Виявлення й аналіз деформації скручування валопроводу здійснюється за сигналами від рознесених міток уздовж вала у вигляді заглиблень шляхом періодичного моніторингу кута скрутки [8]. Мінімум на валопроводі повинно бути дві мітки. Для забезпечення контролю деформації скручування роторів та їх напівмуфт, необхідно мати по дві мітки на кожному роторі валопроводу. Контроль деформації скручування валопроводу здійснюється розробленим в ІПМаш НАНУ експериментальним пристроєм – фазометром. На вхід фазометра подаються сигнали з міток на валопроводі. На виході фазометр формує сигнал, пропорційний до деформації скручування валопроводу з дозволом 1 секунда – 1 Мвт. Отриманий сигнал подається на вхід плати АЦП робочої станції системи АКДВ ТА. Використання фазометра у системі дає змогу в реальному режимі часу відслідковувати деформації скручування валопроводу як під час навантаження, так і в стаціонарному режимі експлуатації ТА.

Для імовірнісної оцінки появи вібронебезпечних несправностей і позаштатних ситуацій розроблена інформаційно-діагностична технологія й створено програмно-методичне й математичне забезпечення. Оцінка появи і розвитку вібронебезпечних несправностей та позаштатних ситуацій виконується інтерпретатором (діагностичним модулем розпізнавання) відповідно до бази знань і бази даних.

База знань включає формалізовані правила розпізнавання дефектів та їх ознаки, що сформовані на основі даних досліджень і досвіду експлуатації ТА про вплив механічних дефектів (несправностей) і режимних чинників на вібропараметри роторів і опор підшипників. База знань може поповнюватись, якщо отримані нові додаткові дані про вплив дефекту.

Діагностична база даних формується відповідно до основних і допоміжних віброознак бази знань. Для цього як інформативні параметри використовуються полігармонічні (інтегральні) і селективні (моногоармонічні) параметри вібрації. Серед них: середньоквадратичне значення віброшвидкості, розмах вібропереміщення, параметри складових спектрів (амплітуда, фаза, частота) у вигляді векторів і годографів, параметри розгінних вибігових характеристик, спеціальні функції співвідношень складових параметрів та таких, як векторні значення півсуми і піврізниці обертової складової вібрації у двох вибраних контрольних точках в однойменних напрямках (горизонтальному, вертикальному) тощо.

Розпізнавання дефектів експертною системою можуть здійснюватися за узагальненими й об'єктно-орієнтованими правилами. Узагальнені правила складені на підставі результатів математичного моделювання, натурних випробувань і досвіду експлуатації ТА. Об'єктно-орієнтовані правила складаються для конкретного типу турбоагрегатів шляхом адаптації

узагальнених правил на підставі отриманих і накопичених експериментальних даних і з урахуванням досвіду експлуатації. При цьому об'єктно-орієнтоване правило діагностування є пріоритетним. Правила розпізнавання дефектів можуть складатися залежно від трьох можливих шляхів формування бази даних відповідно до сукупності діагностичних ознак дефектів:

- по вібраційних параметрах вала і невібраційних параметрах (режими роботи, технологічні параметри) ТА;
- по вібраційних параметрах опор підшипників і невібраційних параметрах ТА;
- по вібраційних параметрах вала й вібраційних параметрах опор підшипників і невібраційних параметрах ТА.

База даних має три рівні. Перший рівень містить осцилограми (миттєві значення вібропереміщення вала й віброшвидкості опор підшипників), часові реалізації технологічних і вібраційних параметрів (розмахи вібропереміщення вала й СКЗ віброшвидкості опор) і пускові (вибігові) характеристики. Другий рівень містить інформативні масиви параметрів і ознак (спектральні, часові, кореляційні, амплітудно-частотні і фазочастотні), які сформовані за даними першого рівня блоком обробки інформації. Для приведення до безрозмірних значень цих даних блоком обробки інформації формуються масиви значень відносних показників діагностичних ознак, що становлять третій рівень бази даних.

Формалізація інформації, що містить дані у чисельній та логічній шкалі, здійснюється з використанням функції належності нечіткої множини Ψ . Функції належності описуються в базі знань для усіх характерних ознак вібронебезпечних дефектів. Функції належності, вагові коефіцієнти й базові значення параметрів можуть уточнюватися в процесі навчання (удосконалення) алгоритму діагностування і отримання додаткових даних на засадах досліджень та експертних оцінок. При цьому чутливість алгоритму щодо оцінки появи вібронебезпечних несправностей ТА залежить від рівня початкових значень вібропараметрів (вібропереміщення вала й СКЗ віброшвидкості опор). Початкові значення вібропараметрів вибрані в межах не більше 0,5 від тих значень, за яких можлива експлуатація ТА без обмеження терміну [4–6].

Отримані в такий спосіб значення відносних показників ознак дефектів запам'ятовуються в третьому рівні бази даних і подаються на вхід модуля розпізнавання (інтерпретатора). Інтерпретатор в автоматизованому режимі виявлення дефектів шляхом застосування правил розпізнавання за відповідною сукупністю діагностичних ознак обчислює значення ймовірності наявності того чи іншого дефекту.

Алгоритми правил розпізнавання дефектів функції належності μ відповідно до множини Ψ можуть бути застосовані для оцінки появи таких дефектів, як поперечна тріщина в роторі, дисбаланс ротора, ушкодження з'єднання півмуфти, розцентрування опор та порушення стійкості руху валопроводу у підшипниках ковзання.

Діагностування вібронебезпечних несправностей ТА здійснюється в діалоговому та автоматизованому режимах, що дає можливість проведення поглибленого діагностування вібростану і за особистої участі експерта (фахівця).

Якщо визначення ймовірності появи вібронебезпечних несправностей ТА здійснюється у діалоговому режимі, то після запуску інтерпретатора експерт, використовуючи інтерфейс інтерпретатора (рис. 2), вибирає номер опори ТА, визначає, за якою сукупністю ознак і параметрів буде проведено діагностування дефектів, а потім проводить оцінку за кожною ознакою. Результати діагностування виводяться у текстовий файл у табличному вигляді, де вказується номер опори, по якій видається діагноз, а також значення ймовірності появи (розвитку) дефектів.

Інформаційно-діагностичний модуль допускає розширення і його доповнення новими ознаками, правилами й дефектами та його адаптування для конкретного типу агрегата.

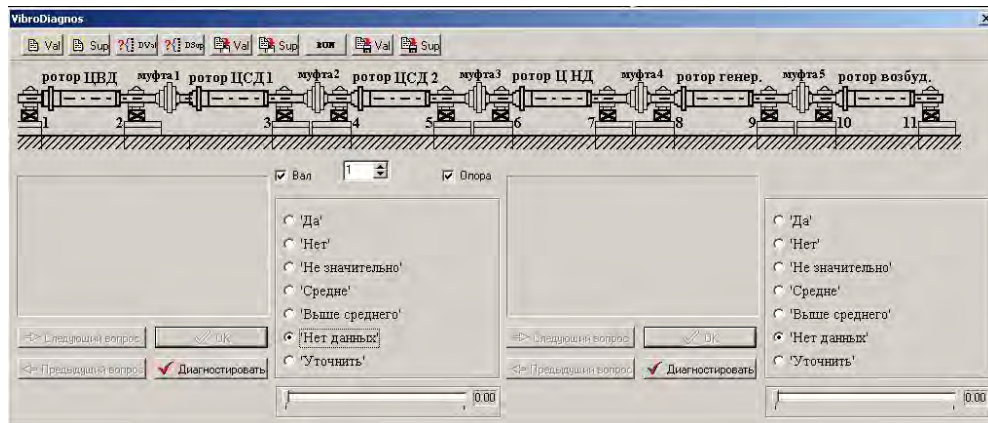


Рис. 2. Интерфейс интерпретатора

Висновки. Оснащення турбоагрегатів потужністю 100-800 МВт створеними засобами і комп'ютерними інформаційними технологіями автоматизованого аналізу й діагностування вібростану дасть змогу попередити розвиток нештатних ситуацій, підвищити безпеку експлуатації турбоагрегатів, зберегти їх техніко-економічні показники та уповільнити спрацювання ресурсу. Впровадження створених вітчизняних засобів та інформаційних технологій діагностування вібростану є важливою складовою маловитратної модернізації турбоагрегатів потужністю 100–800 МВт, які відпрацювали встановлений ресурс, з урахуванням того, що введення нових потужностей в Україні в найближчий час не передбачається.

1. Задачи термпрочности, вибродиагностики и ресурса энергетических агрегатов / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, Б.Ф. Зайцев. – Харьков: ХНАДУ, 2011. – 444 с.
2. Помехоустойчивые измерители вибрации / Н.Г. Шульженко, Л.Д. Метелев, В.И. Цыбулько, А.Н. Чугреев, Ю.Н. Гуров, Ю.Г. Ефремов // Вибрация машин: Измерение снижение защита: мат. 2-й Междунар. науч. техн. конф. – Донецк, ДонНТУ, 2004. – С. 35–39.
3. Помехоустойчивые измерители вибрации и их применение в динамике машин / Н.Г. Шульженко, Л.Д. Метелев, Ю.Г. Ефремов и др. // Вибрації в техніці та технологіях. – 2005. – № 2. – С. 105–107.
4. Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации опор валопроводов и общие требования к проведению измерений: ГОСТ 25364–97. – Взамен ГОСТ 25364–88; введ. 1999-07-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. – 6 с.
5. Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации валопроводов и общие требования к проведению измерений: ГОСТ 27165–97. – Взамен ГОСТ 27165–86; введ. 1999-07-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. – 8 с.
6. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж: Правила ГKD 34.20507-03. – К.: ОЕП “Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики”, 2003. – 597 с.
7. Influence of operational modes of a powerful turboset on its vibrational state / N.G. Shulzhenko and Yu.G. Efremov // Transactions of the Institute of fluid-flow Machinery: selected papers from the International Conference on Turbines of Large Output. – Gdańsk, 2003. – P. 147–153.
8. Методика определения параметров крутильных деформаций роторов турбоагрегатов / Н.Г. Шульженко, Л.Д. Метелев, В.И. Цыбулько, Ю.Г. Ефремов // Давачи и системы. – 2004. – № 1. – С. 30 – 31.