

УДК 621.165; 621.438; 621.224

М. Г. ШУЛЬЖЕНКО, д-р техн. наук, проф.; зав. від. ПМаш НАНУ, Харків;
Ю. Г. ЄФРЕМОВ, канд. техн. наук; с.н.с. ПМаш НАНУ, Харків;
В. Й. ЦИБУЛЬКО, головний конструктор ПМаш НАНУ, Харків;
О. В. ДЕПАРМА, головний електронник ПМаш НАНУ, Харків

МОБІЛЬНІ ЗАСОБИ ОЦІНКИ ВІБРАЦІЙНОГО СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ АГРЕГАТІВ

Описано апаратні засоби мобільного багатофункціонального вимірювально-діагностичного комплексу неруйнівного контролю й оцінки технічного стану енергетичних і транспортних агрегатів тривалої експлуатації. Наведено технічні характеристики й функціональні можливості мобільних пристроїв оперативного контролю й аналізу вібростану устаткування. Наведено приклад використання розробленого мобільного комплексу при діагностуванні причин підвищеної вібрації турбоагрегату К-200-130. Результати можуть застосовуватися при рішенні завдань вібродіагностики й встановлення причин підвищеної вібрації енергетичних агрегатів.

Ключові слова: вихорострумний датчик, перетворювач, вібрація, вібраційний стан, система діагностики.

Вступ

Проблема підвищення надійності і безпеки експлуатації енергоблоків з мінімальними витратами може вирішуватися з використанням засобів і новітніх інформаційних технологій діагностування вібраційного стану з визначенням небезпечних несправностей. У відповідності з Правилами технічної експлуатації електричних станцій і мереж та ГОСТ 25364-97, ГОСТ 27165-97 необхідно контролювати вібраційний стан потужних турбоагрегатів як по параметрах вібрації опор, так і по параметрах вібрації вала. На цей час стаціонарними системами вібраційної діагностики оснащено біля 10 % всіх турбоагрегатів електростанцій України. Аналіз пошкоджуваності устаткування турбін ТЕС і ТЕЦ показує, що більша частка ушкоджень допоміжного устаткування призводить до відмови турбоустановки в цілому [1]. Використання стаціонарних систем вібродіагностики для допоміжного устаткування економічно невиправдане. Для оцінки технічного стану по вібраційних параметрах турбоагрегатів, які не оснащені стаціонарними системами вібродіагностики, а також для діагностування вібростану допоміжного устаткування доцільно використовувати мобільні вимірювально-діагностичні системи.

Аналіз дослідження, постановка задачі

Існуючі мобільні засоби мають не більш 2–4 вимірювальних каналів для оцінки параметрів коливань їх необертюваних частин [2]. У зв'язку з цим актуальним є створення мобільного багатофункціонального вимірювально-діагностичного комплексу з функціональними можливостями стаціонарної системи діагностики (багатоканальне безперервне та паралельне вимірювання вібраційних, механічних та інших величин), з можливостями вимірювання параметрів коливань обертюваних частин (роторів) в доступних місцях та оцінки наявності найбільше небезпечних несправностей агрегатів.

Матеріали дослідження

У створених в ПМаш НАН України стаціонарних системах діагностування вібростану ТА, що в цей час експлуатуються на ТЕЦ і ТЕС України, для вимірювання параметрів вібрації роторів та опор, частоти обертання й формування синхромітки переміщення використовуються вихорострумні датчики із частотно-модульованим

© М.Г. Шульженко, Ю.Г. Єфремов, В.Й. Цибулько, О.В. Депарма, 2014

(ЧМ) вихідним сигналом власної розробки [3–6]. Для мобільного комплексу необхідно було зменшити розмір цих датчиків.

Зменшення габаритів датчиків призводить до зменшення розмірів їх чутливих елементів, що впливає на характеристики датчиків. Тому необхідно було підібрати сучасні електронні компоненти для їх розміщення у нових малогабаритних корпусах датчиків, знайти оптимальний розмір чутливих елементів та створити для цих датчиків функціональні перетворювачі.

На базі створених раніше вихорострумових датчиків переміщення (вібропереміщення) роторів та віброшвидкості необертюваних частин розроблено вихорострумові датчики різних типорозмірів для багатофункціонального вимірювально-діагностичного комплексу (рис. 1). Для визначення просторового положення об'єкта відносно горизонту розроблено вихорострумовий датчик уклону поверхні (інклінометр). Датчик використовується у системах вібраційної діагностики для визначення перекосів підшипника (рис. 2).

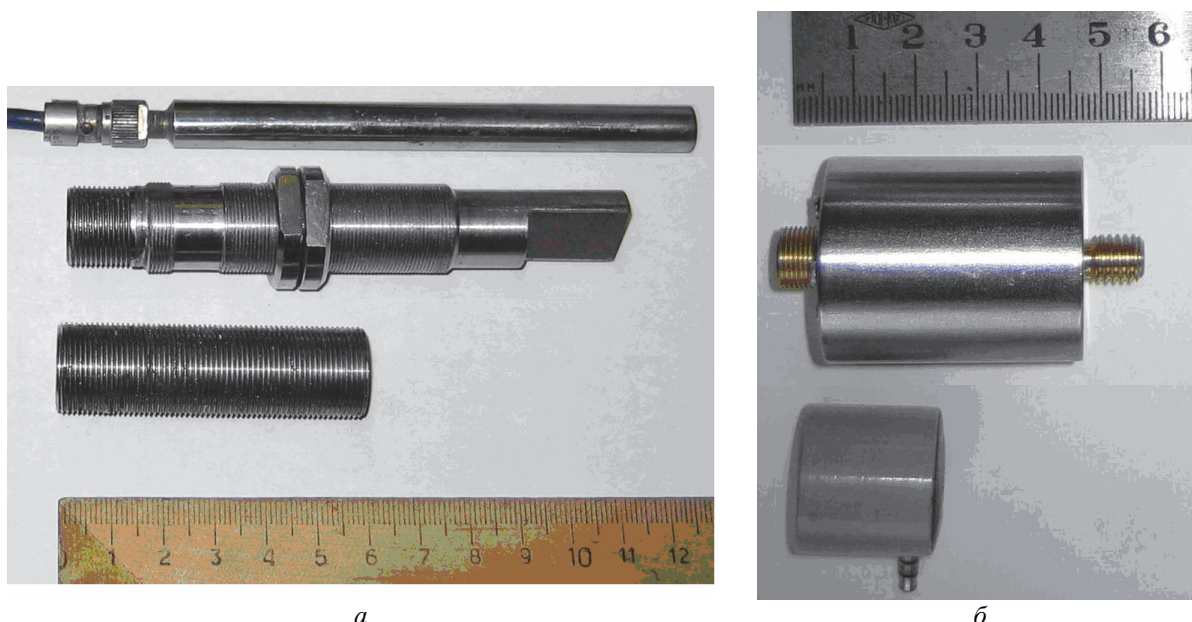


Рис. 1 – Вихорострумові датчики для використання у мобільному комплексі:
а – переміщення, вібропереміщення обертових частин;
б – віброшвидкості необертюваних частин

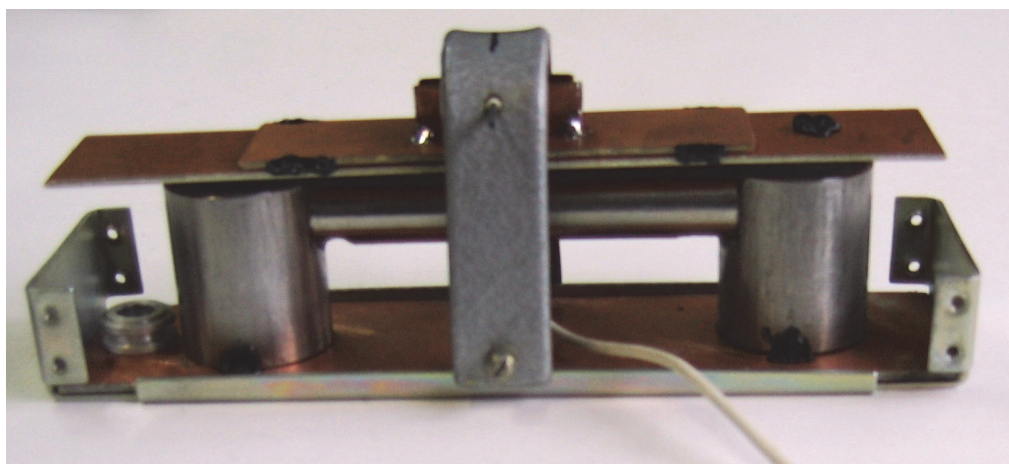


Рис. 2 – Зовнішній вигляд датчика уклону поверхні

Датчики містять вимірювальну котушку індуктивності, автогенератор, перетворювач частоти, опорний генератор, котушку індуктивності автогенератора та нерухливий струмопровідний елемент.

Створені датчики є перешкодостійкими до впливу електромагнітних полів і не вимагають настроювання на метал об'єкта, на тип і довжину кабелю, лінії зв'язку й не чутливі до впливу бічного металу [5, 6].

Для введення в комп'ютер частотно-модульованого сигналу, отриманого з датчика, необхідно його перетворити частотним детектором у напругу. Це робиться створеними функціональними перетворювачами.

Функціональний перетворювач включає наступні модулі, які зібрані на мікросхемах з навісними елементами й відповідними зв'язками:

- вхідний пристрій (ВП) забезпечує подачу електроживлення на датчик; сигналізацію про несправності й блокування лінії зв'язку; посилення й обмеження ЧМ-сигналу датчика й перетворення його в послідовність імпульсів, що подається на частотний детектор (ЧД);

- перетворювач частота-напруга (частотний детектор – ЧД) перетворює послідовність імпульсів (ЧМ сигнал) в амплітудно-модульований (АМ) сигнал, пропорційний вимірювальній величині;

- модуль нормування, що забезпечує нормування в сигнал, пропорційний вимірювальній величині.

Для підключення функціональних перетворювачів до модуля АЦП використовується крос-плата. Крос-плата дозволяє підключати 6 функціональних перетворювачів, оптичний датчик синхромітки та 6 аналогових сигналів. Зв'язок пристроїв автоматики, що мають промисловий інтерфейс RS-485, з ноутбуком мобільного комплексу забезпечує створений адаптер USB-RS485. Для багатоканального вводу, виводу й обробки аналогової й цифрової інформації в складі мобільного комплексу на базі ноутбука використовується програмно-апаратний пристрій з USB-інтерфейсом-модуль E-440 (виробництва L-Card, Росія).

Мобільний комплекс складається з:

- комплексу технічних засобів вимірювання переміщення та вібрації обертових та необертових частин обладнання;

- комплексу технічних засобів прийому, цифрової обробки, аналізу, відображення й зберігання даних;

- інформаційно-діагностичного комплексу (математичне й програмно-методичне забезпечення).

Розроблений мобільний комплекс (рис. 3) забезпечує виконання наступних завдань:

- контроль і аналіз вібраційного стану енергетичного обладнання відповідно до вимог діючих стандартів і правил [7–9];

- попередження про розвиток аварійної ситуації шляхом виявлення дефектів на ранній стадії їхньої появи й розвитку;

- виявлення причин зміни вібраційного стану енергетичного обладнання й діагностування конкретних дефектів (несправностей), що вимагають прийняття оперативних дій персоналом;

- забезпечення віброналадки;

- оцінка якості експлуатації й ремонту при порівнянні пускових амплітудно-частотних характеристик з еталонними вибіговими характеристиками.

Функціонально комплекс забезпечує:

- безперервне паралельне синхронне з обертанням валопроводу опитування (приймання сигналів) датчиків вібрації з періодом не більшим, ніж 10^{-4} с;
- комплексну обробку сигналів і одержання необхідних параметрів вібрації роторів валопроводу й опор підшипників по всіх вимірювальних каналах у реальному часі;
- контроль за змінами вібраційних і технологічних параметрів і накопичення баз даних про їх зміни й взаємозв'язки для алгоритмізації й організації експертної оцінки вібраційного стану турбоагрегата (ТА) й прогнозування його розвитку;
- сигналізацію про досягнення значеннями параметрів вібрації тривожного рівня;
- гармонічний, субгармонічний і спектральний аналіз сигналів вібрації й контроль за змінами їх складових (амплітуд і фаз);
- формування й протоколювання тимчасових трендів по параметрах вібрації і їх складових, у тому числі й відповідно до вимог діючих стандартів і правил [7–9];

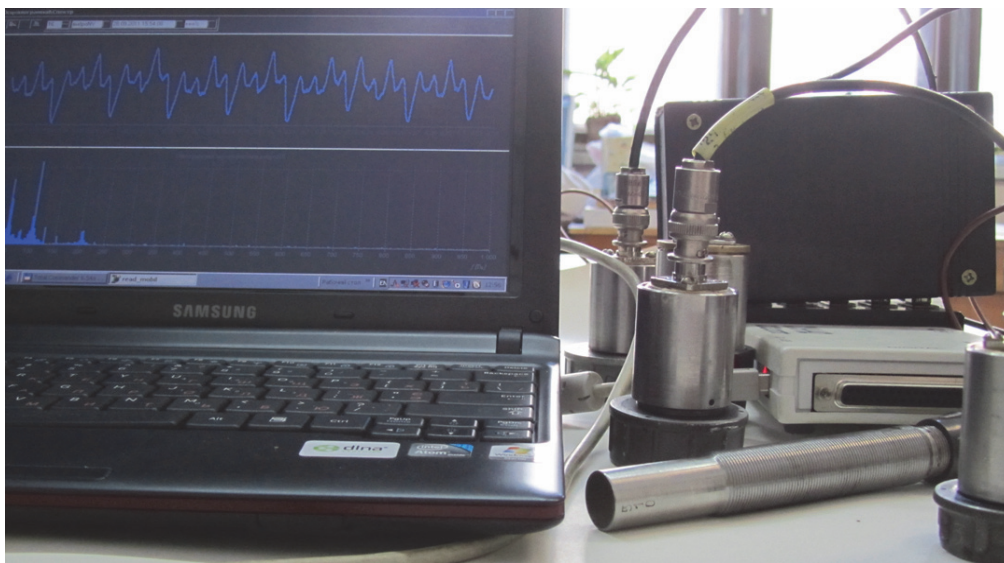


Рис. 3 – Мобільний комплекс на базі нетбука



Рис. 4 – Мобільні пристрої:
а – тахометр; б – віброметр із полосовим спектроаналізатором;
в – пристрій визначення місця дисбалансу жорстких роторів

- архівування всіх отриманих і обчислених даних для детального аналізу причин зміни вібростану в діалоговому режимі й виявлення характерних ознак;
- порівняння сформованих баз даних вібраційних параметрів з нормативними значеннями;
- візуалізація параметрів вібрації і їх змін у вигляді графіків, діаграм, спектрів, таблиць, орбітальних траєкторій руху шийок роторів у радіальній площині підшипників і фазових годографів віброшвидкості опор підшипників і вібропереміщень шийок роторів та інших.

Апаратні засоби комплексу забезпечують:

- вимірювання відносних радіальних вібропереміщень шийок роторів валопроводу у двох ортогональних напрямках підшипника у діапазоні частот 5–500 Гц і амплітуд 10–500 мкм;
- вимірювання вібрації опор підшипників у двох-трьох взаємно перпендикулярних напрямках в діапазоні частот не менших, ніж 3–1000 Гц з амплітудою віброшвидкості 0,5–16 мм/с;
- вимірювання відносних осьових переміщень валопроводу в діапазоні ± 2 мм і вібропереміщень у діапазоні частот 0–500 Гц з амплітудою 10–250 мкм;
- вимірювання переміщень об'єкта в діапазоні 0–100 мм;
- формування помітки імпульсних сигналів для синхронізації вимірювання сигналів вібрації з обертанням валопроводу та вимірювання частоти обертання.

Похибка вимірювання параметрів вібрації не перевищує 5 % на базовій частоті.

Мобільний комплекс допускає приймання сигналів від штатних систем технологічного й вібраційного контролю як по цифровим інтерфейсам, так і по аналоговим каналам.

На базі мікропроцесора типу *Atmega* та датчика вібрації з напівпровідниковою мікроелектромеханічною системою (ДВК-хЕМ) розроблено мобільні пристрої (рис. 4) вимірювання частоти обертання (тахометр), загального рівня й спектрального складу вібрації (віброметр) та визначення місця дисбалансу жорстких роторів (пристрій балансування). Електроживлення пристроїв автономне, від акумулятора. Вага датчика не більше 40 г, вимірювального блоку – не більше 250 г.

Тахометр дозволяє вимірювати швидкість обертання частин механізмів і машин оптичним способом. Діапазон вимірювання від 20 до 60000 об/хв (від 0,3 до 1 кГц). Вимірювання інтервалів часу здійснюється між фотомітками, нанесеними на поверхню об'єкта, або по контрастних елементах рухомих частин механізмів. Результат вимірювання відображається на 4-х розрядному світлодіодному індикаторі у форматі *RPM (revolutions per minute – обертів у хвилину)* або *RPS (revolutions per second – обертів у секунду, частота)*. Настроювання параметрів (колір мітки, інтенсивність випромінювання, поріг чутливості й подільник) дозволяє адаптувати тахометр до певних умов експлуатації.

Віброметр дозволяє оперативно оцінити вібраційний стан агрегату шляхом вимірювання загального рівня й спектрального складу вібрації. Діапазон вимірювання СКЗ віброшвидкості 0,5–50,0 мм/с з дискретністю 0,1 мм/с у смузі частот 10–1000 Гц. Очікувана зведена похибка вимірювання СКЗ віброшвидкості на базовій частоті 160 Гц у межах 5 %, в діапазоні частот 20–800 Гц – у межах 10 %, на краях частотного діапазону – не більше 20 %.

Портативний пристрій визначення амплітуди й фази обертової складової вібросигналу нерівноваженості ротора забезпечує вимірювання амплітуди обертової складової вібросигналу в діапазоні від 10 до 999 мкм з дискретністю індикації 1 мкм,

фази у діапазоні 0–360° з дискретністю індикації 1° і частоти обертання у діапазоні 5,0–50,0 Гц (300–3000 об/хв). Мобільні пристрої пройшли досліду експлуатацію на декількох електростанціях України і інших промислових підприємствах та використовуються персоналом для оперативного контролю та аналізу вібростану турбоагрегатів та іншого обладнання.

Результати дослідження

З використанням розробленого мобільного комплексу проведено вібродослідження турбоагрегатів на декількох ТЕС України. В якості прикладу наведено осцилограми вібропереміщення вала та їх спектральні характеристики (рис. 5), а також траекторія руху шийки вала у розточці підшипника (рис. 6), що отримано за допомогою мобільного комплексу. Розроблено рекомендації зі зниження рівня вібрації в підшипниках. Результати роботи використано при проведенні регламентних робіт на турбіні з метою підвищення надійності динамічної роботи агрегату К-200-130 ЛМЗ.

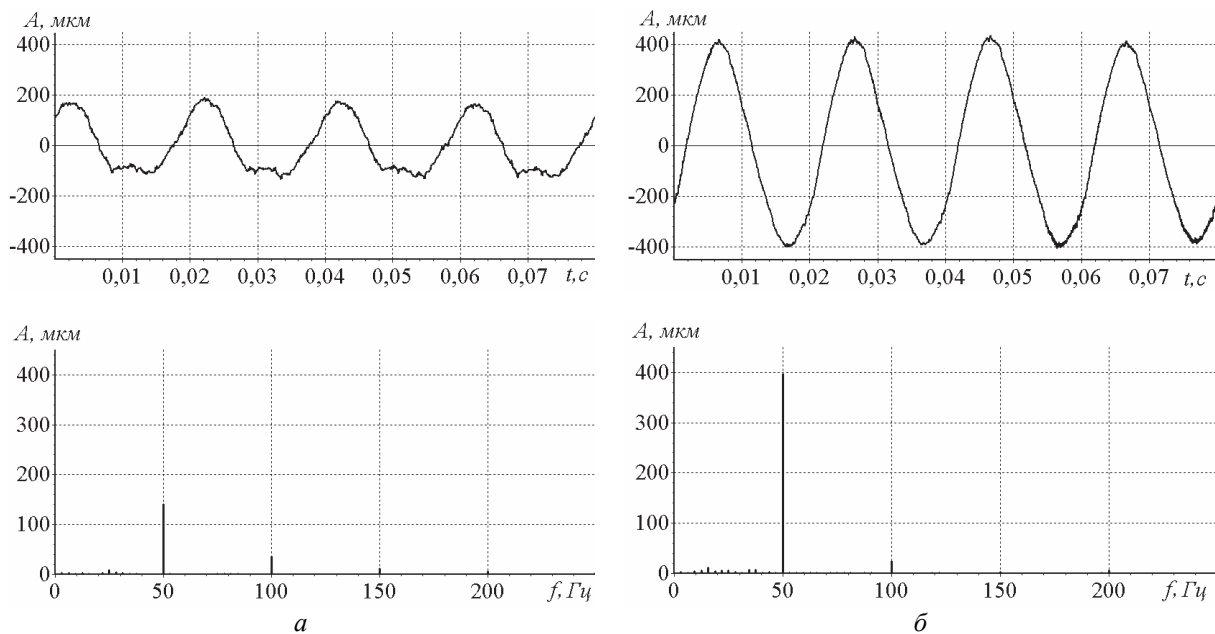


Рис. 5 – Вібропереміщення вала (опора № 1) та їх спектральні характеристики:
а – вертикальна; б – поперечна

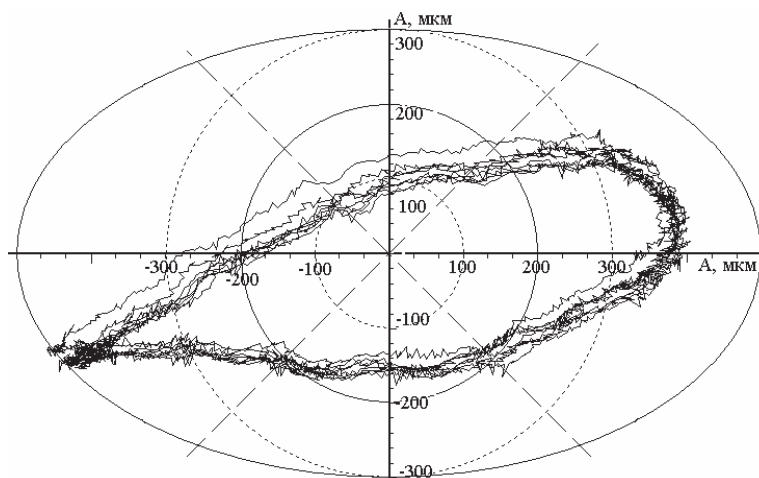


Рис. 6 – Траекторія відносного руху центра вала у розточці підшипника (опора № 1)

Висновки

Створені мобільні засоби вимірювання переміщення, вібропереміщення обертових частин обладнання, віброшвидкості необертових частин обладнання, частоти обертання задовольняють вимогам діючих стандартів і правил [7–9] та використані у мобільному багатофункціональному вимірювально-діагностичному комплексі неруйнівного контролю й оцінки технічного стану енергетичних і транспортних агрегатів тривалої експлуатації. Проведено вібродослідження турбоагрегатів для оцінки їх вібростану й встановлення причин підвищеної вібрації. Результати досліджень будуть використані при створенні експертної системи для мобільного вимірювально-діагностичного комплексу. Описані засоби можуть використовуватися як автономні вимірювальні засоби, так і в складі мобільних та стаціонарних комплексів при діагностуванні вібраційного стану агрегатів.

Список літератури: 1. Плотник, П. Н. Анализ повреждаемости оборудования турбин ТЭС [Текст] / П. Н. Плотник, Б. Е. Мурманский, А. С. Руденко // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: сб. трудов Междунар. науч.-техн. конф. – Харьков, 2000. – С. 327–333. 2. Гольдин, А. С. Вибрация роторных машин [Текст] / А. С. Гольдин. – М.: Машиностроение, 2000. – 344 с. 3. Шульженко, Н. Г. Задачи термочности, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований) [Текст]: моногр. / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Б. Ф. Зайцев. – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2011. – 370 с. – Напечатано в России. – ISBN 978-3-8465-1493-1. 4. Шульженко, Н. Г. Средства вибродиагностики, оценки термочности и ресурса энергетического и транспортного оборудования [Текст] / Н. Г. Шульженко, Ю. Г. Ефремов, П. П. Гонтаровский // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – Донецк: ДонГТУ, 2012. – № 3(30). – С. 40–43. – ISSN 1816-1219. 5. Помехоустойчивые измерители вибрации [Текст] / Н. Г. Шульженко, Л. Д. Метелев, В. И. Цыбулько, А. И. Чугреев, Ю. Н. Гуров, Ю. Г. Ефремов // Вибрация машин: измерение, снижение защита: материалы 2-й Междунар. науч.-техн. конф. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – С. 35–39. 6. Помехоустойчивые измерители вибрации и их применение в динамике машин [Текст] / Н. Г. Шульженко, Л. Д. Метелев, В. И. Цыбулько, Ю. Г. Ефремов // Вибрации в технике и технологиях. – 2005. – № 2(40). – С. 104–107. 7. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила [Текст] / ОЕП «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики». – Київ, 2003. – 597 с. 8. ГОСТ 25364-97. Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации опор валопроводов и общие требования к проведению измерений. – Взамен ГОСТ 25364-88; введ. 1999-07-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. – 6 с. 9. ГОСТ 27165-97. Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации валопроводов и общие требования к проведению измерений. – Взамен ГОСТ 27165-86; введ. 1999-07-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. – 8 с.

Bibliography (transliterated): 1. Plotnik, P. N., B. E. Murmanskij and A.S. Rudenko. "Analiz povrezhdaemosti oborudovaniya turbin TJeS." *Sovershenstvovanie turboustanovok metodami matematicheskogo i fizicheskogo modelirovaniya: sb. trudov Mezhdunar. nauch-tehn. konf.* Kharkov, 2000. 327–333. Print. 2. Gol'din, A. S. *Vibracija rotornyh mashin.* Moscow: Mashinostroenie, 2000. Print. 3. Shul'zhenko, N. G., P. P. Gontarovskij and B. F. Zajcev. *Zadachi termoprochnosti, vibrodiagnostiki i resursa jenergoagregatov (modeli, metody, rezul'taty issledovanij).* Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2011. ISBN 978-3-8465-1493-1. Print. 4. Shul'zhenko, N. G., Ju. G. Efremov and P. P. Gontarovskij. "Sredstva vibrodiagnostiki, ocenki termoprochnosti i resursa jenergeticheskogo i transportnogo oborudovaniya." *Vibracija mashin: izmerenie, snizhenie, zashhita.* No. 3(30). Doneck: DonGTU, 2012. 40–43. ISSN 1816-1219. Print. 5. Shul'zhenko, N. G., et al. "Pomehoustojchivye izmeriteli vibracii." *Vibracija mashin: izmerenie, snizhenie zashhita: materialy 2-j Mezhdunar. nauch.-tehn. konf.* Doneck: DonNTU, 2004. 35–39. Print. 6. Shul'zhenko, N. G., et al. "Pomehoustojchivye izmeriteli vibracii i ih primenenie v dinamike mashin." *Vibracii v tehnikе i tehnologijah* 2(40) (2005): 104–107. Print. 7. "Tehnichna ekspluatacija elektrychnyh stancij i merezh. Pravyla." *OEP "Galuzevyj rezervno-investycijnyj fond rozvytku energetyky".* Kiev, 2003. Print. 8. *GOST 25364-97. Agregaty paroturbinnye stacionarnye. Normy vibracii opor valoprovodov i obshhie trebovaniya k provedeniju izmerenij.* Moscow: IPK Izd-vo standartov, 1998. Print. 9. *GOST 27165-97. Agregaty paroturbinnye stacionarnye. Normy vibracii valoprovodov i obshhie trebovaniya k provedeniju izmerenij.* Moscow: IPK Izd-vo standartov, 1998. Print.

Поступила (received) 11.02.2014