

УДК 621.165; 621.438 ; 621.224

Ю. Г. ЄФРЕМОВ, канд. техн. наук; с.н.с. ПМаш НАН України, Харків

МЕТОДИКО-АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ МОБІЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ З ОЦІНКИ ВІБРАЦІЙНОГО СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ АГРЕГАТІВ

Описано методико-алгоритмічне забезпечення мобільного вимірювально-діагностичного комплексу оцінки технічного стану енергообладнання по параметрах вібрації. Програмне забезпечення комплексу складається з модулів реєстрації, візуалізації й первинної обробки інформації, автоматизованого контролю вібраційного стану, аналізу вібропараметрів і визначення дисбалансу роторів. Наведено приклад експериментальних досліджень вібраційного стану допоміжного обладнання (димосос Д-25Х2ШБ) енергоблоку. Визначено, що в СКЗ віброшвидкості опор димососа значний вклад вносить низькочастотна вібрація (1–10 Гц).

Ключові слова: вібрація, вібраційний стан, система діагностики, спектральні характеристики.

Вступ

Основним завданням оперативного контролю технічного стану обладнання за параметрами вібрації є спостереження за їх розвитком у часі. Для рішення цього завдання необхідно здійснювати періодичні вимірювання вібраційних параметрів, виявляти їх зміну, проводити побудову трендів, що визначають основні тенденції цих змін та порівнювати їх з граничними значеннями. При цьому необхідно мати зручний інструмент для вимірювання, реєстрації та аналізу цих параметрів.

Для рішення задачі оперативного контролю, аналізу і діагностування технічного стану за вібраційними параметрами в ПМаш НАН України створено засоби вимірювальної техніки [1]. До складу мобільного комплексу входять автономні пристрої (вимірювач вібрації зі смуговим спектроаналізатором «ИВПА-07», вимірювач вібрації «ИВПБ-1» з функцією визначення дисбалансу жорстких роторів, тахометр оптичний «ТО-М» та мобільний багатоканальний вимірювально-діагностичний комплекс «СКВД-10» на базі ноутбука. Комплекс складається з шести вихорострумових датчиків віброшвидкості, двох вихорострумових датчиків вібропереміщення (переміщення), датчика мітки, восьмиканальної плати функціонального перетворення частотно-модульованого сигналу в сигнал по напрузі, 32 каналної плати АЦП Е-440 (виробництва *L-Card*), акумулятора та ноутбука. Комплекс має модульну структуру. Його розширення може бути здійснено шляхом додавання відповідних датчиків з функціональними перетворювачами.

Мета дослідження, постановка задачі

Для функціонування комплексу потрібно розробити методичне та програмне забезпечення (ПЗ) реєстрації, візуалізації і первинної обробки інформації, автоматизованого контролю технічного стану обладнання за параметрами вібрації, аналізу вібропараметрів та визначення дисбалансу роторів. При розробці методичного та програмного забезпечення функціонування комплексу враховувалось, що кінцевому користувачу можуть бути потрібні не всі функції, що закладено в створене ПЗ. Кількість функцій впливає на кінцеву вартість продукту, тому було зроблено декілька незалежних модулів, які є самодостатніми.

Матеріали дослідження

До складу мобільного комплексу входить автономний пристрій – віброметр «ИВПА-07», який доцільно використовувати саме для оперативного контролю

© Ю. Г. Єфремов, 2015

енергетичного обладнання. Періодичність контролю параметрів вібрації переносними засобами регламентується місцевими і відомчими нормами та інструкціями або за наявною інформацією про швидкість розвитку дефектів від моменту їх виявлення до передаварійного стану. При виявленні змін вібраційного стану обладнання доцільно провести більш детальні його дослідження за допомогою комплексу «СКВД-10». Функції реєстрації вібраційних та інших сигналів, їх візуалізації та первинної обробки (нормалізації, фільтрації та обчислення основних показників сигналу) у реальному часі виконує розроблений програмний модуль «*RecParam*». Модуль працює у двох режимах: реєстрації та візуалізації сигналів.

У режимі реєстрації здійснюється опитування каналів, нормалізація, обчислення основних показників сигналу та реєстрація осцилограм у базу даних. Інформація про об'єкт дослідження, параметри опитування (період часової реалізації, кількість таких реалізацій та кількість точок у одній реалізації, кількість записів осцилограм), шлях до бази даних, де будуть архівуватися осцилограми, поріг спрацювання компаратора каналу фазової мітки та значення дільника (для обчислення частоти обертання) вноситься користувачем у файл ініціалізації. Оптимальні настройки параметрів опитування вимірювальних каналів комплексу для реєстрації осцилограм наступні: період часової реалізації – 0,02 с, кількість реалізацій – 50, кількість точок у одній реалізації – 160, кількість записів осцилограм – не менше 3. Крім того необхідно внести інформацію по кожному каналу АЦП, який потрібно опитати: логічний номер каналу, що відповідає фізичному номеру плати АЦП, тип величини, що вимірюється (вібропереміщення, віброшвидкість, віброприскорення, частота обертання, переміщення, напруга), напрямок встановлення датчика (вертикальний, поперечний, осьовий, інший), номер опори, тарувальний коефіцієнт, зміщення відносно нуля. Вказані вище параметри опитування можуть бути як експортовані у файл ініціалізації, так і імпортовані з підготовленого наперед файлу. Для економії часу при зборі даних доцільно підготувати так званий лист обходу обладнання, де завчасно закласти потрібні параметри опитування. Зареєстровані осцилограми користувач може експортувати в текстовий файл для подальшої роботи в інших пакетах обробки сигналів. У режимі візуалізації модуль «*RecParam*» виконує функції опитування каналів, нормалізації, обчислення основних показників сигналу та візуалізації у вигляді: часової розгортки сигналу, його спектру та фігури Ліссажу.

Автоматизована оцінка вібраційного стану енергообладнання у реальному часі забезпечується за допомоги розробленого програмного модуля «*Monitoring*». Для цього щосекундно виконується обчислення по всіх контрольних точках (максимум 32 точки) паралельно (за миттєвим значенням вібропереміщень роторів і за миттєвим значенням віброшвидкості опор за 32 оберти з дискретністю 160 точок за період обертання) значень розмахів вібропереміщень і СКЗ віброшвидкості. За обчисленими значеннями контрольованих параметрів вібрації формуються на інтервалі часу 20 с обновлювані масиви. Їх значення після усереднення за перші 20 с приймаються за вихідні для подальшого використання. Значення обчислених параметрів щомиті обновлюються і порівнюються з допустимим рівнем параметрів вібрації. По рівнях вібрації опор і валопроводу відповідно до нормативних документів устанавлюються три зони: одна – без обмеження терміну експлуатації і дві зони з обмеженими термінами експлуатації [2–4]. Інформація на екрані монітора обновлюється з секундним інтервалом, при зміні рівня вібрації і перевищенні припустимого рівня та при переході в зони з обмеженим терміном експлуатації стовпчикова діаграма змінює свій колір на жовтий чи червоний (рис. 2).

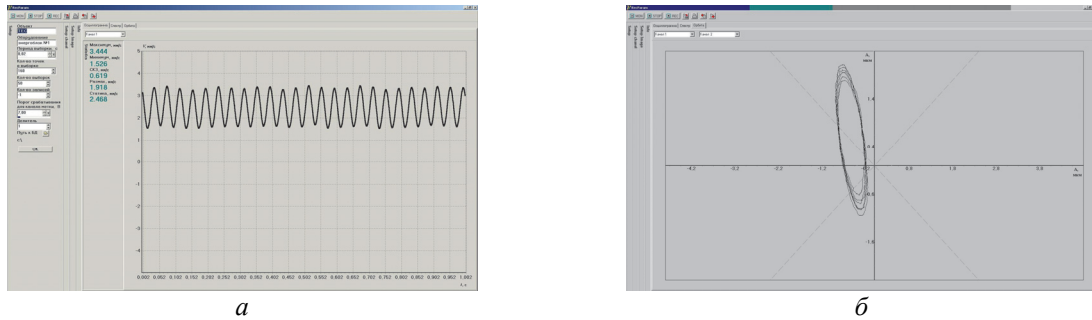


Рис. 1 – Графічний інтерфейс програми «RecParam»: а – осцилограма сигналу; б – фігура Ліссажу

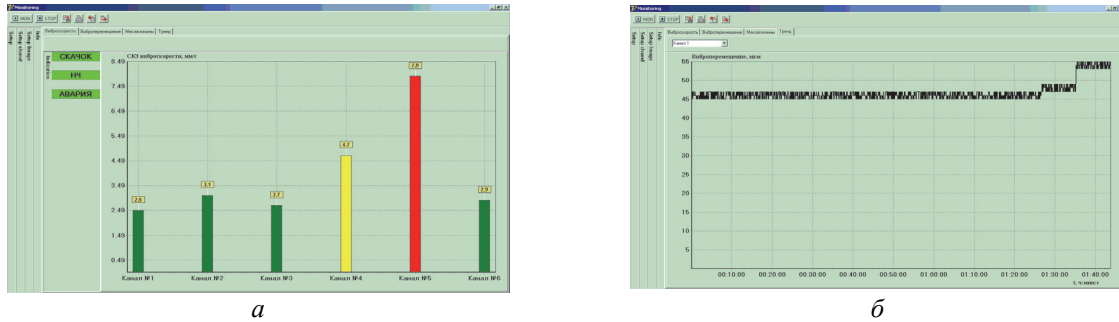


Рис. 2 – Графічний інтерфейс програми «Monitoring»: а – стовпчикова діаграма СКЗ віброшвидкості опор; б – тренд розмаху вібропереміщення ротора

Для детальної й оперативної оцінки, коли рівень параметрів вібрації зростає, безперервно формуються по всіх контрольних точках буфери миттєвих значень вібропереміщень роторів і миттєвих значень віброшвидкості опор. Це дозволяє в оперативному режимі розглянути і проаналізувати характер коливань роторів і опор, спектральні характеристики, орбітальні і фазові траєкторії. Крім того, щосекундно обчислюються СКЗ низькочастотної складової вібропереміщення роторів і віброшвидкості опор та формуються масиви для контролю рівня параметрів низькочастотної вібрації. В тому випадку, коли виникає НЧ складова віброшвидкості з рівнем, що перевищує 0,5 мм/с, видається світловий сигнал у виді прапорця «НЧ вібрація». Норми вібрації по низькочастотним складовим вібропереміщень валопроводу поки що відсутні. Вони можуть бути встановлені за даними експериментальних досліджень НЧ вібрації роторів, адекватних рівням НЧ вібрації опор.

Основні функції програмного модуля «Monitoring»:

- обчислення, контроль та реєстрація розмаху вібропереміщення ротора, СКЗ віброшвидкості опор, частоти обертання та інших механічних величин;
- обчислення та контроль низькочастотної складової вібропереміщення ротору і віброшвидкості опор;
- контроль стрибка розмаху вібропереміщення ротору, СКЗ віброшвидкості опор, частоти обертання та інших механічних величин;
- сигналізація про зміну рівня вібраційного стану обладнання;
- обчислення та візуалізація спектральних складових вібропереміщення ротора, віброшвидкості опор та інших механічних величин;
- візуалізація розмахів вібропереміщення ротора, СКЗ віброшвидкості опор та інших механічних величин у вигляді стовпчикової діаграми або їх зміни за часом;
- візуалізація фігур Ліссажу;
- реєстрація осцилограм;

– формування трендів параметрів вібрації та даних для аналізу причин зміни вібраційного стану.

Результати обробки інформації, що отримана за допомоги програмного модуля «*Monitoring*» користувач може експортувати в текстовий файл для подальшої роботи в інших пакетах обробки сигналів, надрукувати або зробити експорт зображення у графічний файл.

Особливістю балансування роторів за допомоги комплексу «СКВД-10» є використання для цього параметрів вібрації роторів поряд з параметрами вібрації опор. На властивості взаємозалежності базується метод роздільного зрівноважування [5], що полягає в наступному:

– вектори вібрації розкладають на симетричну й кососиметричну складові;
– статична і динамічна складові дисбалансу урівноважуються роздільно, перша – по симетричним, друга – по кососиметричним складовим вібрації.

Процес динамічного балансування може здійснюватися у власних підшипниках або на балансувальному станку. Для цього необхідно виконати наступні операції:

– провести вимірювання при k критичній швидкості оборотних складових вібропереміщення опор або вала в підшипнику у вигляді векторів;

– розмістити на валу пробну систему вантажів, що відповідає k формі невірноваженості та зробити пуск ротора із цією системою вантажів;

– провести вимірювання параметрів вібрації опор або вала із установленою системою пробних вантажів;

– по збільшенню параметрів вібрації і відомої величини пробного вантажу розрахувати балансувальну чутливість і необхідний для k форми небалансу вантаж (величину та місце (кут) установки);

– повторити перераховані вище операції для $k = 1, 2, \text{ і } 3$, тобто від початкової частоти урівноважування до робочої частоти обертання вала.

Результати дослідження

З використанням розробленого мобільного комплексу проведено вібродослідження димососу Д-25Х2ШБ турбоагрегату К-300-240 для визначення вимог до стаціонарних засобів контролю вібраційного стану допоміжного енергообладнання. Димосос Д-25Х2ШБ призначений для відсмоктування димових газів з топків котлів на твердому паливі паропродуктивністю 640 т/год [6]. Основними вузлами димососа є робоче колесо, ходова частина, нагнітальний равлик, дві всмоктувальні кишені (ліва і права) і два направляючі апарати (лівий і правий). Ходова частина складається з: трубчатого вала з привареними з двох сторін цапфами; двох різнімих чавунних корпусів підшипників; двох радіальних сферичних роликотидшипників і пружної втулково-пальцевої муфти, що з'єднує вал машини безпосередньо з валом електродвигуна. Підшипник з боку електродвигуна є опорно-упорним, з іншого боку – опорним. Опорний підшипник вільно переміщається в корпусі, за рахунок чого компенсуються можливі температурні зміни довжини вала. Корпуси підшипників кріпляться до загального фундаменту за допомогою фундаментних болтів. Димосос експлуатується при частотах обертання 600 і 500 об/хв.

Шість датчиків віброшвидкості було встановлено спочатку на дві опори (№ 1, 2) димососа, а потім на дві опори (№ 3, 4) електродвигуна у трьох напрямках (вертикальному, поперечному та осьовому). Вимірювання та реєстрація миттєвих значень віброшвидкості проводилося паралельно по 6 каналах. Тривалість виборки – 2,5 с. Період опитування – 0,05 мкс. У таблиці 1 приведено обчислені значення СКЗ віброшвидкості опор V_s у різних діапазонах частот: V_{s1} – 10–1000 Гц; V_{s2} – 1–10 Гц.

Вібраційний стан димососа задовольняє нормам вібрації [2–4], максимальне значення $V_{s1} = 1,8$ мм/с зареєстровано у вертикальному напрямку на 4 опорі димососа. У якості прикладу наведено осцилограми віброшвидкості опор № 1–2 у поперечному напрямку (рис. 3, 4) та їх спектральні характеристики (рис. 5, 6). Значний вклад у СКЗ віброшвидкості опор вносить низькочастотна вібрація (1–10 Гц), тому для контролю вібраційного стану димососа по вібропараметрах необхідно використовувати вимірювальні канали, що забезпечують вимірювання СКЗ віброшвидкості від 0,3 до 15 мм/с у діапазоні частот 1–1000 Гц.

Таблиця 1.

Вібропараметри опор 1–4 димососа

№ опори	Напрямок вимірювання	V_{s1} , мм/с	V_{s2} , мм/с
1	вертикальний	0,8	0,2
1	поперечний	0,6	0,2
1	осьовий	1,3	0,2
2	вертикальний	0,3	0,2
2	поперечний	0,5	0,4
2	осьовий	0,7	0,2
3	вертикальний	0,3	0,2
3	поперечний	0,8	0,3
3	осьовий	0,5	0,2
4	вертикальний	1,8	0,1
4	поперечний	1,0	0,1
4	осьовий	1,1	0,3

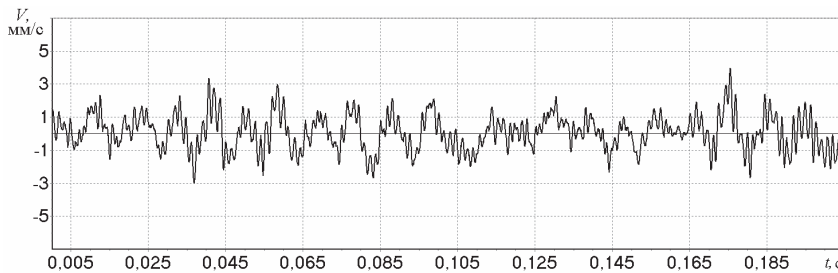


Рис. 3 – Осцилограма віброшвидкості у поперечному напрямку (опора № 1)

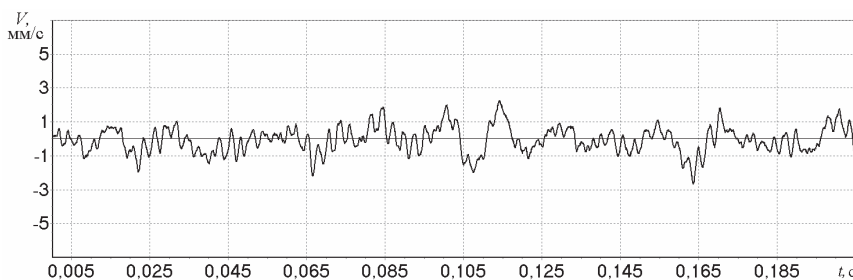


Рис. 4 – Осцилограма віброшвидкості у поперечному напрямку (опора № 2)

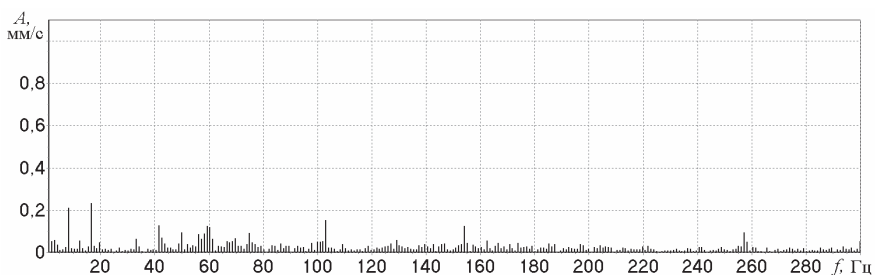


Рис. 5 – Спектральні характеристики віброшвидкості у поперечному напрямку (опора № 1)

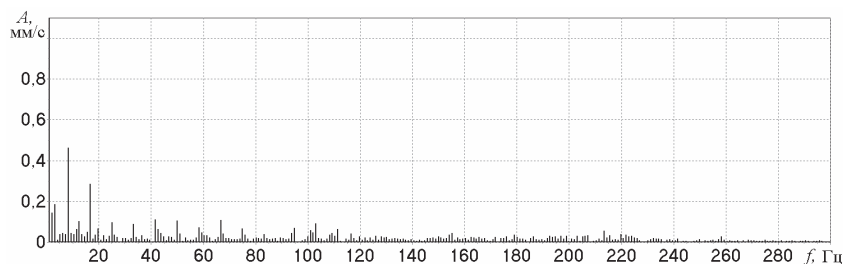


Рис. 6 – Спектральні характеристики віброшвидкості у поперечному напрямку (опора № 2)

Висновки

Створено методично-програмне забезпечення функціонування мобільного багатоканального вимірювально-діагностичного комплексу «СКВД-10», що дозволяє: реєстрацію, візуалізацію і первинну обробку сигналів (нормалізацію, фільтрацію та обчислення основних показників сигналу); моніторинг технічного стану обладнання за параметрами вібрації; визначення спектральних характеристик, трендів вібропараметрів та дисбалансу роторів. З використанням розробленого мобільного комплексу проведено вібродослідження елементів обладнання енергоблоку. Результати досліджень будуть використані при створенні експертної системи для мобільного вимірювально-діагностичного комплексу.

Список літератури: 1. Мобільні засоби оцінки вібраційного стану енергетичних агрегатів [Текст] / М. Г. Шульженко, Ю. Г. Єфремов, В. Й. Цибулько, О. В. Депарма // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – № 12(1055). – С. 104–110. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2078-774X. 2. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила / ОЕП «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики». – Київ, 2003. – 597 с. 3. 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. 4. 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. 5. Рунов, Б. Т. Исследование и устранение вибрации паровых турбоагрегатов [Текст] / Б. Т. Рунов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 351 с. 6. Донвентильатор. Дымососы Д и ДН двустороннего всасывания [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.donvent.com/ru/node/25>. – Заглавие с экрана. – 12.01.2015.

Bibliography (transliterated): 1. Shul'zhenko, M. G., et al. "Mobil'ni zasoby ocinky vibracijnogo stanu energetychnyh agregativ." *Visnyk NTU "KhPI". Serija: Energetychni ta teplofizychni procesy j ustatkuvannja.* No 12(1055). Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. 104–110. ISSN 2078-774X. Print. 2. OEP "Galuzevij rezervno-investicijnij fond rozvitku energetiki". *Tehnichna ekspluatacija elektrichnih stancij i merezh. Pravila.* Kiev, 2003. Print. 3. *GOST 25364–97. Agregaty paroturbinnnye stacionarnnye. Normy vibracii opor valoprovodov i obshhie trebovanija k provedeniju izmerenij.* Moscow : IPK Izd-vo standartov, 1998. 01 July 1999. Print. 4. *GOST 27165–97. Agregaty paroturbinnnye stacionarnnye. Normy vibracii valoprovodov i obshhie trebovanija k provedeniju izmerenij.* Moscow : IPK Izd-vo standartov, 1998. 01 July 1999. Print. 5. Runov, B. T. *Issledovanie i ustranenie vibracii parovyh turboagregatov.* Moscow : Jenergoizdat, 1982. Print. 6. Scientific Production Association "Donventiljator" "Exhaust fans Д and ДН of two-way suction." *ООО "NPO "Donventiljator" © 2003-2012.* Donventiljator. Web 12 January 2015 <<http://www.donvent.com/en/node/202>>.

Поступила (received) 03.02.2015