

УДК 378.1:620.9

ТРЕНАЖЕР ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ВМІНЬ ВІБРАЦІЙНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ

© Антоненко Н.С., Прокопенко О.О.
Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Антоненко Наталія Сергіївна: ORCID: 0000-0001-5576-3388; nsantonenko@yandex.ru; кандидат технічних наук, кафедра теплоенергетики та енергозберігаючих технологій; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Прокопенко Олена Олександрівна: ORCID: 0000-0002-6834-3056; tetaet@i.ua; кандидат технічних наук, кафедра теплоенергетики та енергозберігаючих технологій; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна

Викладено основні питання щодо формування вмінь вібраційного діагностування газоперекачувального обладнання та його вузлів із використанням комп'ютерного тренажеру. Тренажер є програмним комплексом, що поєднує в собі імітаційну динамічну модель устаткування і оболонку, що включає методичний супровід процесу діагностування. Тренажер імітує роботу з вібродіагностичним комплексом «Simon», який призначений для контролю вібрації газоперекачувальних агрегатів із метою визначення їхнього технічного стану. База даних тренажера складається з масивів, в яких зберігаються результати вимірювання вібрації реальних газоперекачувальних агрегатів у процесі 167 досліджень. Тренажер реалізує відомі такі методики аналізу технічного стану устаткування, як виміри середньоквадратичного значення і пікових значень, спектральний, порядковий і гармонійний аналізи. Це досягається за рахунок того, що вібросигнал поступає в тренажер у вигляді повної інформації про вібраційний стан агрегату. Розглянуто програмно-реалізовані алгоритми пошуку дефектів. Наведено результати впровадження тренажеру в навчальний процес. Проаналізовані основні етапи роботи з тренажером.

Ключові слова: практична підготовка фахівців, формування практичних навичок, віртуальний тренажер, вібродіагностика, діагностування технічного обладнання, вібраційний стан, працездатність обладнання.

Прокопенко Е.А., Антоненко Н.С. «Тренажер для формування уменій вібраційного діагностування»

Изложены основные вопросы относительно формирования умений вибрационного диагностирования газоперекачивающего оборудования и его узлов с использованием компьютерного тренажера. Тренажер является программным комплексом, который совмещает в себе имитационную динамическую модель оборудования и оболочку, которая включает методическое сопровождение процесса диагностирования. Тренажер имитирует работу с вибродиагностическим комплексом «Simon», который предназначен для контроля вибрации газоперекачивающих агрегатов с целью определения их технического состояния. База данных тренажера состоит из массивов, в которых хранятся результаты измерения вибрации реальных газоперекачивающих агрегатов в процессе 167 исследований. Тренажер реализует такие известные методики анализа технического состояния оборудования, как измерения среднеквадратичного значения и пиковых значений, спектральный, порядковый и гармоничный анализы. Это достигается за счет того, что вибросигнал поступает в тренажер в виде полной информации о вибрационном состоянии агрегата. Рассмотрены программно-реализованные алгоритмы поиска дефектов. Приведены результаты внедрения тренажера в учебный процесс. Проанализированы основные этапы работы с тренажером.

Ключевые слова: практическая подготовка специалистов, формирование практических навыков, виртуальный тренажер, вибродиагностика, диагностирование технического оборудования, вибрационное состояние, работоспособность оборудования.

О. Прокопенко, Н. Антоненко «The training Simulator for Vibration-based Diagnostics»

The article is concerned with a simulator for vibration-based diagnostics educating of a gas-compressor unit. A trainer is a programmatic complex which combines the simulation dynamic model of equipment and shell in itself that includes methodical accompaniment of diagnostic process. A trainer imitates to the robot with a vibrodiagnostic complex "Simon" that is intended for control of the gascompressor units vibration with the purpose of determination of their technical state. The database of trainer consists of arrays in that the results of measuring of vibration of the real gascompressor units are kept in the process of 167 researches. A trainer realizes well-known methodologies of analysis of the technical state of equipment such as measuring of root-mean-square and pick meaning, spectral, index and harmonious analyses. It is arrived at due to that a vibrosignal enters into the trainer as complete information about vibratory condition of the aggregate. Software algorithm of fault location was taken account to. The result of introduction for the educational process is shown. The basic stages of work with the simulator are analyzed.

Keywords: practical educating of specialists, forming of practical skills, virtual trainer, vibrodiagnostics, diagnostician of the technical state, vibration behavior, capacity of equipment .

Постановка проблеми. Безпека роботи обладнання, що експлуатують, є актуальною проблемою та одним із центральних питань організації праці будь-якого підприємства.

Стратегія експлуатації за станом є рішенням, яке дозволяє планомірно стежити за працездатністю техніки. Вона полягає в оптимізації, зокрема за часом проведення, процедури технічного обслуговування, причому ухвалення рішення про проведення або не проведення ремонтно-відновлювальних робіт приймається тільки за результатами розрахункових показників, які адекватно характеризують технічний стан обладнання.

Одним із сучасних методів визначення технічного стану є вібраційне діагностування (ВД) [1 - 2]. ВД базується на застосуванні спектрального і кепстрального аналізів вібраційного сигналу [3] для визначення всіх видів дефектів і прогнозування залишкового ресурсу досліджуваних агрегатів та забезпечує не лише своєчасне виведення аварійно небезпечного устаткування з експлуатації, але й успішну підготовку до ремонту, допомагаючи визначити його об'єм і необхідні запасні частини задовго до виведення.

Діагностування в техніці, як і в медицині, вимагає від фахівців високого рівня професійної кваліфікації, навичок володіння сучасними методами та засобами. Але задача освоєння практичних навичок є однією із складних у процесі підготовки фахівців.

У статті розглянуто питання щодо використання комп'ютерного тренажеру для формування практичних навичок вібраційного діагностування технічних агрегатів у майбутніх фахівців.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині в наукових дослідженнях і освіті, у виробничій і інших сферах діяльності людини визначальне значення мають інформаційно-обчислювальні системи [4]. Розвиток інформатики і застосування комп'ютерів в наукових дослідженнях ставлять нині питання про перегляд основних концепцій представлення наукових знань навіть у вже глибоко розроблених і дуже формалізованих галузях і висувають на перший план завдання структуризації цих знань [5].

Сучасний розвиток комп'ютерної техніки дозволяє створювати віртуальні тренажери, які надають можливості навчання роботі із складною апаратурою та відпрацювання навичок фахівців [5]. Використання вибродіагностичного обладнання призводить до матеріальних витрат, тому економічна вигода від створення та використання у навчальному процесі тренажеру, який дозволить сформувати вміння вибродіагностичного обстеження технічних об'єктів, очевидна.

Мета статті. Викладення основних питань і результатів формування вмінь вібраційного діагностування газоперекачувального обладнання та його вузлів із використанням комп'ютерного тренажера.

Виклад основного матеріалу. Для формування у студентів практичних навичок використання методики ВД застосовується комп'ютерний тренажер. При використанні тренажера активно поєднуються такі форми навчання, як програмоване та проблемне.

Робота з тренажером є прототипом виконання майбутніх виробничих завдань і створює активну навчальну ситуацію, в якій студент має прийняти самостійне рішення, тобто дати мотивований технічний висновок про технічний стан досліджуваного об'єкту.

Об'єктом дослідження при роботі з тренажером є газоперекачувальний агрегат (ГПА).

При організації роботи з тренажером використовується проблемно-ситуаційне навчання, як спосіб моделювання професійної підготовки фахівців. При цьому для студентів створюється ситуація, максимально наближена до реальних умов професійної діяльності на виробництві, що дозволяє їм мотивовано й усвідомлено опанувати знаннями і вміннями, які вони вже мають.

Тренажер є програмним комплексом, що поєднує в собі імітаційну динамічну модель устаткування і оболонку, що включає методичний супровід процесу діагностування.

Тренажер імітує роботу з вібродіагностичним комплексом «Simon», який призначений для контролю вібрації газоперекачувальних агрегатів із метою визначення їхнього технічного стану [6].

Розглянемо основні етапи роботи з тренажером та алгоритми, що реалізовані програмно.

Із метою забезпечення максимальної правдоподібності робота тренажера починається з виводу на екран монітору мнемосхеми досліджуваного ГПА, на якій студент має вказати місця встановлення датчиків вібрації.

Датчики розміщуються в точках, в яких найчіткіше простежуються вібрація основних елементів ГПА: на фланці кришки виносної коробки приводів - канал № 1; на передньому фланці корпусу компресора низького тиску (КНТ) - канал № 2; на задньому фланці корпусу компресора високого тиску (КВТ) - канал № 3; на передньому фланці опорного вінця силової турбіни - канал № 4. Схема розміщення вимірювальних каналів показана на рис. 1.

База даних тренажера складається з масивів, в яких зберігаються результати вимірювання вібрації реальних газоперекачувальних агрегатів в процесі 167 досліджень. Вибір варіанту вихідних даних здійснюється на основі псевдовипадкових величин.

Тренажер реалізує такі відомі методики аналізу технічного стану устаткування, як виміри середньоквадратичного значення (СКЗ) і пікових значень, спектральний, порядковий і гармонійний аналіз [7]. Це досягається за рахунок того, що, на відміну від усіх аналогів, вібросигнал поступає в тренажер не у вигляді СКЗ, а у вигляді спектру з роздільною здатністю один Герц, тобто у вигляді повної інформації про вібраційний стан агрегату.

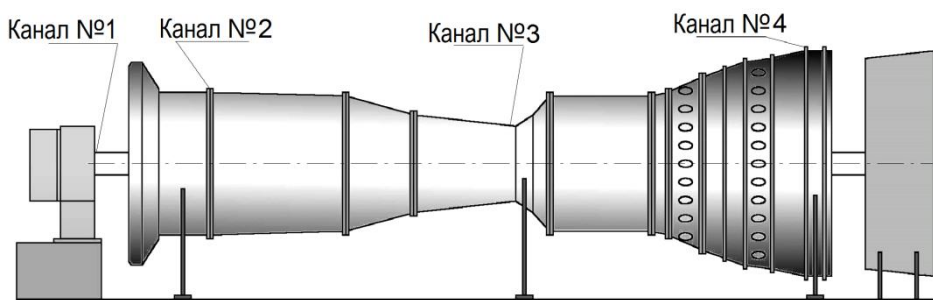


Рис. 1. Місця установки вібродатчиків

Тренажер містить реалізовані програмно алгоритми пошуку дефектів і попередження користувачів тренажеру про зміну стану ГПА. Алгоритми розроблені на підставі методики вібродіагностування ГПА [8].

Методи досліджень засновані на теорії розпізнавання образів. Віброконтроль передаварійного стану деталей і вузлів інтерпретується як розпізнавання класів технічних станів $\bar{\xi}_j \xi_{i,1}, \dots, \xi_{i,n}$, де $\xi_{i,k}$ $k=1, \dots, n$ – компоненти (ознаки) вектору класу $\bar{\xi}_j$ за сукупності віброакустичних характеристик.

Алгоритми розпізнавання засновані на порівнянні тієї або іншої міри близькості розпізнаваного стану $\bar{\xi}_j \xi_{i,1}, \dots, \xi_{i,n}$, де $\xi_{i,k}$ $k=1, \dots, n$ – компоненти (ознаки) вектору технічного стану $\bar{\xi}_j$, із кожним класом. Тут використовують просте порівняння в певних частотних діапазонах, двійково-вісімкові коди і коди чисел Фібоначчі в розподілі амплітуд на різних частотних гармоніках. Відстань за Хеммінгом і відстань Евкліда використовуються для спеціально відібраних дискретних складових спектру. Найбільш використовуваною метою схожості є скалярний твір двох векторів або нормований коефіцієнт кореляції:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n \xi_{ik} \xi_{jk} \left[\left(\sum_{k=1}^n \xi_{ik}^2 \right) \left(\sum_{k=1}^n \xi_{jk}^2 \right) \right]^{-1/2}.$$

Застосовано імовірнісні оцінки різниці порівнюваних спектрів у всьому частотному діапазоні, де будують гістограми і імовірнісні моменти розподілу різниці спектрів.

На рис. 2 представлений вид вікна тренажеру, з областями дефектації чотирьох окремих каналів, а також таблицею наявності дефектів. У таблиці вказано в процентному співвідношенні вірогідності наявності відповідних дефектів на досліджуваному ГПА.

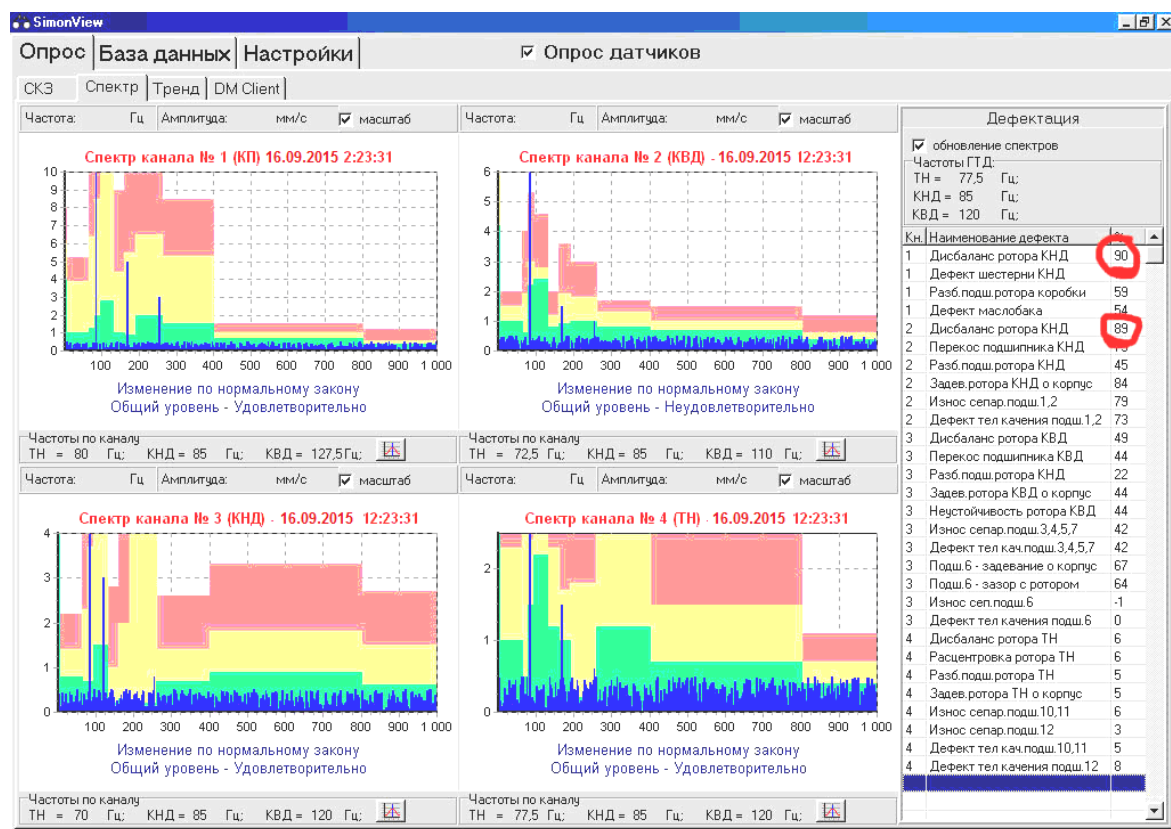


Рис. 2. Вікно дефектації каналів

У показаному на рисунку випадку з вірогідністю 90% в досліджуваному агрегаті є присутнім дефект «Дисбаланс ротора КНТ».

Опорні маски вібраційного спектру включено до тренажеру як окремий модуль.

Враховуючи, що різні ротори (вузли) ГПА збуджують вібрацію строго на певних частотах, що визначаються частотою обертання роторів, увесь досліджуваний діапазон частот (10 Гц ÷ 1 кГц) було розбито на десять частотних діапазонів, які відповідають гармонійним складовим конкретних роторів. Для кожного частотного діапазону було визначено рівні опорних масок у вигляді СКЗ віброшвидкості.

Діапазон 10 ÷ 65 Гц включає частоти обертання сепараторів (f_c) усіх підшипників, субгармоніки частоти обертання роторів половинної кратності ($0,5f_1$; $0,5f_2$; $0,5f_3$;...) і різницеву частоту ($f_3 - f_2$).

Діапазон 65 ÷ 80 Гц — частоту обертання ротора турбіни нагнітача (ТН) (f_1).

Діапазон 80 ÷ 95 Гц — частоту обертання ротора компресора низького тиску (КНТ) (f_2).

Діапазон 95 ÷ 130 Гц (f_3) частоту обертання ротора компресора високого тиску (КВТ) і комбінаційну частоту $0,5(f_2 + f_3)$.

Діапазон 130 ÷ 160 Гц — другу гармоніку частоти ротора СТ ($2f_1$) і субгармоніку ротора КНТ ($1,5f_2$).

Діапазон 160 ÷ 190 Гц — другу гармоніку частоти ротора КНТ ($2f_2$) і субгармоніку ротора КВД ($1,5f_3$).

Діапазон 190 ÷ 260 Гц — другу гармоніку частоти ротора КВТ ($2f_3$), третю гармоніку частоти ротора СТ ($3f_1$), комбінаційну частоту ($f_2 + f_3$) і субгармоніку ротора КНД ($2,5f_2$).

Діапазон 260 ÷ 400 Гц — треті гармоніки частоти ротора КНТ ($3f_2$) і КВТ ($3f_3$), субгармоніку ротора КВТ ($2,5f_3$) і комбінаційну частоту $1,5(f_2 + f_3)$.

Два широкосмугові діапазони 400 ÷ 800 Гц і 800 ÷ 1000 Гц використовується для діагностики підшипників.

Технічний стан ГПА визначається відповідним йому вібраційним станом. Залежно від інтенсивності спектральних складових вібрації передбачені такі якісні оцінки їх вібраційного стану: «відмінно», «добре», «задовільно» і «незадовільно».

Області «відмінно» і «добре» передбачені для оцінки якості ремонту і характеризують зборку вузлів в повній відповідності з технічними умовами, а технічний стан, який відповідає еталонному і бездефектному агрегату.

Область «задовільно» відповідає експлуатації ГПА з вібрацією вузлів, у межах, що не перевищують допустимого значення та характеризують мінімальною вірогідністю появи дефектів в період міжремонтної експлуатації агрегату; технічний стан характеризують початковою стадією розвитку дефектів.

Область «незадовільно» — це область, в якій експлуатація ГПА з такою вібрацією вузлів, яка вимагає вжиття відповідних заходів і яку характеризують підвищеною вірогідністю виходу вузлів агрегату з ладу.

На рис. 3 представлено опорні маски по чотирьох вищезгаданих рівнях для каналу № 1 (коробка приводів).

На першому етапі дефектації по чотирьох каналах виміру виконують накладення спектрів, що поступили як вхідні дані в програму, на відповідні опорні маски.

Якщо отриманий при порівнянні спектру і опорної маски загальний рівень відповідає зонам «відмінно» або «добре», то подальшу обробку досліджуваних спектрів не здійснюють і видають висновок про нормальний стан вузлів агрегату по досліджуваному каналу під час дослідження.

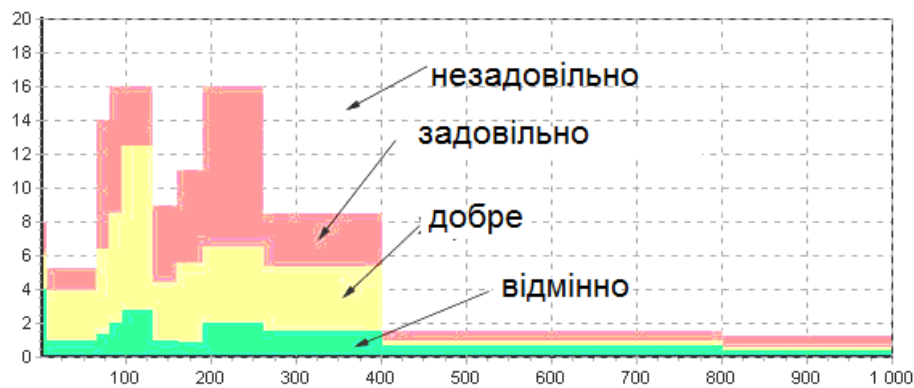


Рис. 3. Опорні маски каналу №1

Оскільки частоти обертання роторів агрегату (перші і подальші гармоніки) розташовані у відповідних областях спектру, але не є фіксованими (змінюються від режиму роботи ГПА), то на наступному етапі обробки спектру проводять процедуру ідентифікації трьох основних роторних гармонік — частот обертання ТН, КНТ і КВТ. Уся подальша ідентифікація будується на підставі цих даних. Пошук відповідних гармонік здійснюють виділенням найбільш сильних гармонік у відповідних областях спектру в точках, де ці гармоніки видимі найкраще.

Подальша обробка здійснюється для кожного каналу окремо. Для кожного каналу побудовані універсальні маски дефектів відповідно до Методики [5]. Всього алгоритм дефектації дозволяє робити висновки про наявність 29 різноманітних дефектів агрегату.

Так, за спектром каналу № 1 можна визначити наявність таких дефектів: «Дисбаланс ротора КНТ», «Дефект шестерні КНТ», «Розпущеність підшипника ротора коробки», «Дефект маслобака».

За спектром каналу № 2 розроблений алгоритм дозволяє виявити: «Дисбаланс ротора КНТ», «Перекіс підшипника КНТ», «Розпущеність підшипника ротора КНТ», «Зачіпання ротора КНТ за корпус», «Знос сепаратора підшипників №№ 1 і 2», «Дефект тіл котіння підшипників №№ 1 і 2».

За каналом № 3 можна визначити: «Дисбаланс ротора КВТ», «Перекіс підшипника КВТ», «Розпущеність підшипника ротора КНТ», «Зачіпання ротора КВТ за корпус», «Нестійкість ротора КВТ», «Знос сепаратора підшипників №№ 3,4,5,7», «Дефект тіл котіння підшипників №№ 3,4,5,7», «Зачіпання за корпус підшипника № 6», «Проміжок із ротором підшипника № 6», «Знос сепаратора підшипника № 6», «Дефект тіл котіння підшипника № 6».

За спектром каналу № 4 алгоритм дозволяє робити висновок про наявність таких дефектів: «Дисбаланс ротора ТН», «Розцентровка ротора ТН», «Розпущеність підшипника ротора ТН», «Зачіпання ротора ТН за корпус», «Знос сепаратора підшипників №№ 10 і 11», «Знос сепаратора підшипника № 12», «Дефект тіл котіння підшипників №№ 10 і 11», «Дефект тіл котіння підшипника № 12».

Перевірка наявності відповідного дефекту і обчислення вірогідності його присутності роблять по масках дефектів. Маски дефектів, які закладені в програму, розроблені нормованими, тобто амплітуда максимальної гармоніки маски дефекту дорівнює 1 мм/с. Так, маска дефекту «Дисбаланс ротора КНТ» виглядає таким чином: перша гармоніка ротора КНТ — 1 мм/с; друга гармоніка ротора КНТ — 0,2 мм/с, третя гармоніка ротора КНТ — 0,1 мм/с. Маска дефекту «Дефект маслобака» виглядає так: перша гармоніка ротора КНТ — 0,8 мм/с; гармоніка $7,4 \times \text{КНД}$ — 1 мм/с. Тому перед проведенням порівняння із спектром по кожному дефекту відповідну маску нормують відповідно до амплітуди максимальної гармоніки досліджуваного спектру.

Після проведення нормування для кожного передбачуваного дефекту обчислюють коефіцієнт кореляції маски цього дефекту з досліджуваним спектром. Коефіцієнт, який отримують в результаті, помножений на 100, і є вірогідністю наявності дефекту в агрегаті.

На рис. 4 представлено приклад накладення маски на досліджуваний спектр.

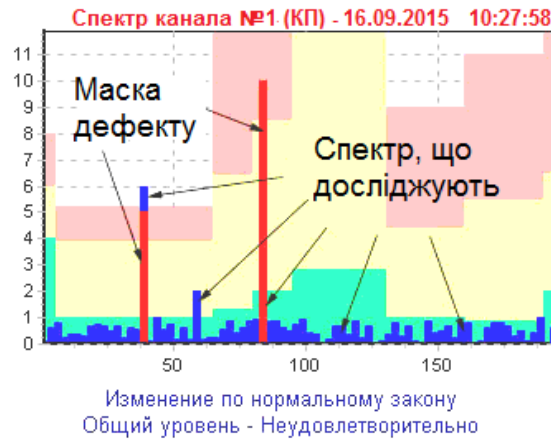


Рис. 4. Накладення маски дефекту на спектр

У даному випадку на спектрі явно видно першу гармоніку ротора КНТ з амплітудою 10 мм/с, гармоніка 0,48× КНТ з амплітудою 6 мм/с, а також викид на частоті 60 Гц з амплітудою 2 мм/с. Накладення на цей спектр маски дефекту «Дефект шестерні КНТ» має такий результат: перша гармоніка КНТ — 1 мм/с; 0,48 × КНД — 0,5 мм/с. Порівняння досліджуваного спектру з представленою маскою дає коефіцієнт кореляції 0,88. Тобто з вірогідністю 88% можна зробити висновок про наявність відповідного дефекту в агрегаті.

Окрім перерахованих методів, дослідження в алгоритмі також застосовуються рекомендації ISO 2372, в яких вказано, що збільшення амплітуди в два з половиною рази (8 дБ) є значним, а вдесятеро (20 дБ) – є серйозним, оскільки може призвести до погіршення оцінки стану агрегату з «добре» до «неприпустимо».

При дослідженні отриманий спектр також порівнюють із раніше збереженим спектром по відповідному каналу і, якщо виявляється значне різке збільшення якої-небудь гармоніки, про це повідомляють користувачеві.

Прогнозування ресурсу деталей і вузлів є заснованим на екстраполяції трендів віброакустичного сигналу в часі. Математичні моделі вибиралися на основі фізичних процесів розвитку параметрів вібрації в період життя і старіння ГПА, ГТУ і ЦБН у виді

$$\xi_{ik} = A_{\xi} + B_{\xi} \exp C_{\xi} t, \quad k = 1, \dots, n,$$

де t — час;

$A_{\xi}, B_{\xi}, C_{\xi}$ — коефіцієнти, які визначаються за розрахунком $t = t_j$ при $k = 1, \dots, n$.

Програмна частина тренажеру характеризується простим і зрозумілим інтерфейсом користувача. В той же час застосовані при розробці рішення дозволяють студенту, що працює з тренажером, не лише спостерігати миттєвий вібраційний стан агрегату, але і проводити попередні дослідження на предмет виявлення дефектів вузлів ГПА.

Розглянемо основні етапи роботи студента з тренажером. Перший етап – сприйняття інформації – процес, що включає діяльність по визначенні (виміряних та розрахованих) характеристиках агрегату, сприйняття в об'єкті окремих ознак, які відповідають задачі діагностування, ознайомлення з виявленими дефектами. Другий етап – оцінка інформації, її аналіз та узагальнення на основі сформованих у процесі навчання критеріїв оцінювання. Оцінка проводиться зіставленням сприйнятої інформаційної моделі із складеною у студента

внутрішньою образно-концептуальною моделлю. Третій етап прийняття рішення про дії – акт, який формується на основі виконаного аналізу інформаційної та образно-концептуальної моделей – обґрунтування технічного стану елементів і агрегату в цілому. Четвертий етап – видання технічного висновку та технічного прогнозу. П'ятий – контроль за результативністю роботи.

Ефективність роботи з тренажером визначається психологічною структурою діяльності студента, яка спрямована на діагностування агрегату, інакше кажучи, структурою орієнтування в умовах визначення дефектів та видання технічного висновку.

Орієнтування майбутнього фахівця формується і функціонує на чотирьох рівнях: “інформаційному” (рівні адекватного сприйняття інформації), “змістовному” (рівні основних цілей), “функціональному” (рівні засобів обґрунтування технічного висновку) та “операційному” (рівні видання технічного прогнозу). В реальній діяльності майбутнього фахівця ці рівні виступають одночасно та нерозривно. При роботі з тренажером кожен рівень формується окремо, а після відпрацьовуються взаємозв'язки та взаємопереходи між ними. Таким чином, в основі використання тренажеру для формування вмінь вібраційного діагностування окремих вузлів і агрегатів ГПА лежить кероване формування у студентів цілісного орієнтування у сприйнятті інформації, цілях, умовах вибору і обґрунтування та видання технічного прогнозу.

Висновки і перспективи подальших досліджень

Для формування у студентів умінь діагностувати технічний стан систем та їх елементів за допомогою комп'ютерної техніки, розроблено та впроваджено в навчальний процес комп'ютерний тренажер для вібраційного діагностування газоперекачувальних агрегатів. Перевагою використання тренажеру є можливість моделювання і безпечного дослідження екстремальних і аварійних режимів роботи устаткування.

При використанні тренажеру активно поєднуються такі форми навчання, як програмоване та проблемне, використовується організація проблемно-ситуативного навчання як способу моделювання професійної підготовки фахівців.

Ефективність роботи з тренажером визначається структурою орієнтування майбутнього фахівця, яка функціонує на чотирьох рівнях: “інформаційному”, “змістовному”, “функціональному” та “операційному”.

У подальшому представляє інтерес розширення переліку алгоритмів дослідження вібростану обладнання та розробка програмного забезпечення, що надасть можливість використовувати ці алгоритми при вібродіагностичних роботах на тренажері.

Список використаних джерел

1. Игуменцев Е. А. Определение остаточного ресурса газотранспортного оборудования / Е. А. Игуменцев, Е. А. Прокопенко // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики : материалы 16-й Международной конференции (1-5 октября 2008 г., г. Ялта). — Ялта, 2008. — Ч. I. — С. ???
2. Генкин М. Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. / М. Д. Генкин, А. Г. Соколова. — М.: Машиностроение, 1987. — 288 с.
3. Гольдин А. С. Вибрация роторных машин / А. С. Гольдин — М.: Машиностроение, 2000. — 344 с.
4. Норенков И. П. Информационные технологии в образовании / И. П. Норенков, А. М. Зимин — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. — 352 с.
5. Белов М. А. Принципы проектирования виртуальной компьютерной лаборатории на основе технологии облачных вычислений / М. А. Белов, О. Е. Антипов // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании – 2010 : сборник трудов международной конференции. — Одесса: УКРНИИМФ, 2010. — С. ???.
6. Игуменцев Е. А. Оптимизация технического обслуживания газоперекачивающих агрегатов / Е. А. Игуменцев, Е. А. Прокопенко, Я. С. Марчук // Приладобудування 2004: стан і перспективи : збірка наукових праць III науково-технічної конференції. — Київ, 2004. С. 215-216.
7. Бендат Дж. Применение корреляционного и спектрального анализа / Дж. Бендат, А. Пирсон ; пер с англ. — М.: Мир, 1983. — 312 с.

8. Игуменцев Е. А. Методика вибродиагностики технического состояния газоперекачивающих агрегатов ГПА-10 и ГПА-10-01 в условиях эксплуатации на компрессорных станциях газовой промышленности / Е. А. Игуменцев, В. И. Работягов, В. В. Шмидт // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 1996. — № 1. — С. 11-20.

References

1. Igumencev, EA & Prokopenko, EA 2008, 'Opredelenie ostatochnogo resursa gazotransportnogo oborudovaniya', *Sovremennye metody i sredstva nerazrushajushhego kontrolja i tehnicheckoj diagnostiki*, materialy 16-j Mezhdunarodnoj konferencii, Jalta, 1-5 oktjabrja, part 1.
2. Genkin, MD & Sokolova, AG 1987, *Vibroakusticheckaja diagnostika mashin i mehanizmov*, Mashinostroenie, Moskva.
3. Goldin, AS 2000, *Vibracija rotornyh mashin*, Mashinostroenie, Moskva.
4. Norenkov, IP & Zimin, AM 2004, *Informacionnye tehnologii v obrazovanii*, Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo tehnicheckogo universiteta imeni N. Je. Baumana, Moskva.
5. Belov, MA & Antipov, OE 2010, 'Principy proektirovanija virtualnoj kompjuternoj laboratorii na osnove tehnologii oblachnyh vychislenij', *Sovremennye problemy i puti ih reshenija v nauke, transporte, proizvodstve i obrazovanii – 2010*, sbornik trudov mezhdunarodnoj konferencii, UKRNIMF, Odessa.
6. Igumencev, EA, Prokopenko, EA & Marchuk, JaS 2004, 'Optimizacija tehnicheckogo obsluzhivaniya gazoperekachivajushhih agregatov', *Pryladobuduvannya 2004: stan i perspektyvy*, zbirka naukovykh prats III naukovo-tekhnicchnoyi konferencii, Kyjiv, pp. 215-216.
7. Bendat, Dzh 1983, *Primenenie korreljacionnogo i spektralnogo analiza*, Mir, Moskva.
8. Igumencev, EA, Rabotjagov, VI & Shmidt, VV 1996, 'Metodika vibrodiagnostiki tehnicheckogo sostojanija gazoperekachivajushhih agregatov GPA-10 i GPA-10-01 v uslovijah jekspluatacii na kompressornyh stancijah gazovoj promyshlennosti', *Tehnicheckaja diagnostika i nerazrushajushhij kontrol*, no. 1, pp. 11-20.

Стаття надійшла до редакції 10.11.2015 р.