

УДК 004.9

Н.Г. ШИРМОВСЬКА, І.Р. МИХАЙЛЮК, Г.І. ЛЕВИЦЬКА, Т.О. ВАВРИК, Н.Т. ЛАЗАРІВ  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

## МЕТОДИКА ДІАГНОСТУВАННЯ ДЕФЕКТІВ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ ТА АЛГОРИТМ ДІАГНОСТУВАННЯ НА ОСНОВІ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ

*У статті пропонується розробка алгоритму діагностування, а також дається оцінка стану газоперекачувального агрегату за параметрами вібрації за допомогою експертної системи. Також розглянуті правила побудови експертних систем зі змінними величинами. Визначення технічного стану агрегату за вібраційними параметрами виробляється як відповідно до змісту відповідної інформації в момент часу, так і на основі аналізу зміни її в часі.*

*Ключові слова: діагностичні параметри, вібрація, сигнатурний аналіз, частота, експертна оцінка.*

N.G. SHYRMOVSKA, G.I. LEVYTSKA, I.R. MUHAJLUK, T.A. VAVRYK, N.T. LAZARIV  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

## METHODS OF DIAGNOSTIC OF GAS PUMPING RIG DEFECTS AND ALGORITHM OF DIAGNOSTIC BASED ON EXPERT SYSTEM

*The article proposes the development for the algorithm of diagnostics, it also assesses the state of gas pumping rig according to the vibration parameters with the help of expert system. The rules for building the expert systems with variable values are also considered. Determination of the rig technical state by vibration parameters is made to the content of the relevant information in time and also based on the analysis of changes over the time.*

*Keywords: diagnostic parameters, vibration, signature analysis, frequency, expert evaluation.*

### Вступ

Надійність роботи газоперекачувального агрегату (ГПА) залежить від ряду факторів, в тому числі і від вібрації, яка згубно відбивається на його технічному стані. При вібрації окремі деталі та вузли піддаються впливу знакозмінних навантажень. Це приводить до підвищеної напруженості, в результаті чого знижується міцність деталей і в кінцевому випадку може наступити руйнування.

Таким чином забезпечення якісного контролю вібраційного стану ГПА за допомогою експертної системи дає можливість зменшити витрати на проведення технічних оглядів, та планово-попереджувальних ремонтів, збільшити строки експлуатації технологічного обладнання, а також за рахунок своєчасної сигналізації про наявність дефектів, зменшити руйнування та фізичний знос механізмів.

### Методика діагностування дефектів

Визначення технічного стану агрегату по вібраційних параметрах виробляється як по змісту відповідної інформації в момент часу, так і на основі аналізу зміни її в часі.

Як діагностичні параметри використовуються різноманітні параметри вібрації (у тому числі і спектри вібрації) [1,2], параметри випадкового процесу зміни вібрації, спеціальні функції параметрів вібрації (наприклад, напівсума і напіврізниця оборотної вібрації в двох обраних кряпках, відношення деяких параметрів вібрації в різних напрямках). У ряді випадків необхідно вимірювати і враховувати невібраційні параметри, що впливають на вібрацію.

Кількісні і якісні характеристики значень діагностичних параметрів і їх змін, що характерні для деякого дефекту, є ознаками цього дефекту [3, 4]. У дефекту може бути кілька ознак, а деяка ознака може бути загальним для групи різних по природі дефектів. Наприклад, наявність у спектрі вібрації деяких низькочастотних гармонік може бути ознакою і зачіпання ротора за статорні елементи, і субгармонійних коливань під дією дисбалансу, і недосконалості форми розточки підшипника ковзання. У сукупності ознак дефекту може не виявитися жодного, котрий сам по собі був би необхідним і (або) достатнім для діагностування.

У принципі можливо експериментальними і математичними методами одержати кількісні оцінки впливу будь-якого дефекту на діагностичні параметри для будь-яких умов, хоча це, як правило, зв'язано з великими труднощами і витратами. Однак така робота знецінюється тією обставиною, що невлітими відмінності динамічних характеристик агрегату роблять на ці оцінки вирішальний вплив. Різні експерти оцінюють максимально можливі відмінності значень впливу заданих дефектів на вібраційні параметри однотипних машин у межах від 10 до 1000 разів. Найбільші відмінності відносяться до високочастотних складових спектра вібрації.

При всіх описаних складностях всебічний облік експериментальних даних, математичних і експериментальних оцінок роблять задачу вібродіагностики в більшості випадків розв'язною.

Для підвищення вірогідності діагнозу з урахуванням приведених розумінь доцільно: повне використання усіх відомих ознак дефектів, імовірністю яких не можна зневажити за результатами аналізу діагностичних параметрів, що спостерігаються.

Стан агрегату визначається як нормальний при одночасному виконанні наступних умов:

- інтенсивність вібрації в контрольованих точках відповідає стандартним нормам;

- діагностичні параметри знаходяться в межах, що відповідають заданому режиму роботи агрегату;
- на стаціонарному режимі спостерігається стаціонарна вібрація: параметри її мінливості не виходять за межі, характерні для заданого режиму;
- відсутні істотні раптові зміни вібрації;
- відсутній істотний монотонний ріст вібрації в часі (тренд);
- відсутня істотна низькочастотна вібрація;
- відсутні істотні зміни спектрального складу вібрації.

Кількісні оцінки (еталони якості) для визначення виконання цих умов визначаються нормативними документами, результатами статистичної обробки даних вібровимірювань (архівних) і експертними оцінками.

Приведена технологія визначення нормального стану, власне кажучи, є процедурою, що у технічній діагностиці називається сигнатурним аналізом. Сигнатура – стандартний набір значень контрольованих параметрів вібрації, включаючи параметри спектра вібрації, що відповідає нормальному стану агрегату. Сигнатура визначається статистичними методами на основі вібровимірювань при різних режимах протягом достатнього часу адаптації системи вібродіагностики. Для кожного характерного режиму агрегату може бути визначена відповідна сигнатура. Істотні, статистично достовірні зміни сигнатури – свідчення появи ненормальності.

Для кожного епізоду, при якому порушуються критерії нормального стану агрегату (рис. 1), у зв'язку з необхідністю діагностування виникає задача вибору діагностичних параметрів з доступної безлічі даних. Насамперед, варто вибрати точки, у яких параметри вібрації не відповідають еталонам якості.

Для цих точок виділяються ті гармонійні складові, котрі вносять найбільший вклад у порушення еталона якості. Параметри цих складових і їхні функції є основними діагностичними параметрами, по яких визначають групу можливих причин вібрації. Інші параметри використовуються для уточнення діагнозу.

Розділимо спектр вібрації на чотири зони: *оборотна вібрація*, *низькочастотна вібрація*, *подвійна оборотна вібрація* і *високочастотна вібрація*.

Оборотна і подвійна оборотна вібрації є синхронними: точно визначені їхні частоти ( $f_0$  і  $2f_0$ ) і можуть бути визначені фази.

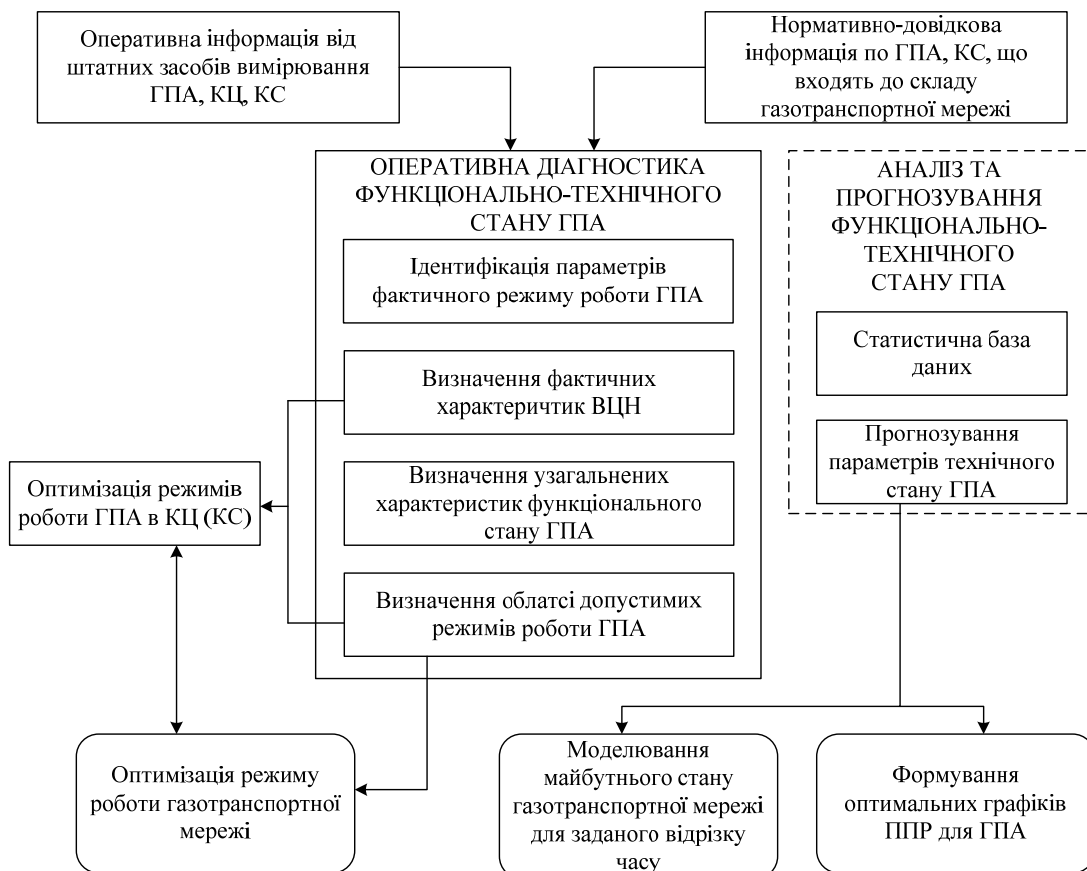


Рис. 1. Структурна схема модельно-програмного комплексу оперативної діагностики функціонально-технічного стану ГПА

Низькочастотна вібрація (НЧВ) частіше має половинну оборотну частоту ( $f/2$ ), іноді частоту  $f/3$ , і є при цьому синхронною. Нерідко спостерігаються несинхронні (некратні) частоти НЧВ, що звичайно мають частоту власних коливань ротора.

## Оцінка стану насосного агрегату за величиною віброшвидкості

Числове значення середньої квадратичної віброшвидкості, мм/с	Оцінка стану насосного агрегату
Не більше 2,8	відмінний
Понад 2,8 до 4,5	добрий
Понад 4,5 до 7,1	задовільний
Понад 7,1	недопустимий

Високочастотні складові звичайно мають багатий спектр.

Для великих енергетичних турбоагрегатів у першому наближенні важливо знати не дискретні складові високочастотного спектра, а загальний внесок високочастотних складових в інтенсивність вібрації. Для даного випадку діагностичним параметром є середньоквадратичне значення вібрації для всіх гармонік вище  $2f_0$ .

У якості діагностичних, крім параметрів спектра, використовуються інші параметри вібраційного процесу, що відповідають потребам конкретних діагностичних алгоритмів, що одержують шляхом спеціальної обчислювальної обробки вібраційних сигналів.

Додатково до описаних частот, ударна взаємодія між тілами і доріжками кочення підшипника збуджує коливання елементів машини й елементів підшипника на власних частотах. Кожен елемент при ударному впливі збуджується на своїй власній частоті. Ці дефекти впливають ударними імпульсами на різні частини підшипника, змушуючи їх вібрувати по власних формах коливань.

Прояв власних частот елементів підшипника (рис. 2) досить тісно зв'язаний з роторними частотами. Але на відміну від частот кратних частоті обертання, вібрація на власних частотах майже завжди породжується декількома різними елементами підшипника, що генерують кілька різних частот різної амплітуди. Амплітуда на власних частотах має тенденцію випадково змінюватись.

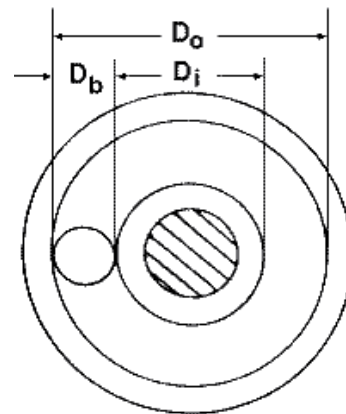


Рис. 2. Розрахунок частот кінематичного порушення, що генеруються підшипником

- Дефект сепаратора або кульки:

$$F_{cage} = [D_i / D_i + D_o] \times RPM \quad (1)$$

- Дефект кульки:

$$F_{ball} = [D_o / D_b \times D_i / (D_i + D_o)] \times RPM \quad (2)$$

- Дефект внутрішнього кільця:

$$F_{inner} = [D_o / (D_i + D_o)] \times M \times RPM \quad (3)$$

- Дефект зовнішнього кільця:

$$F_{outer} = [D_i / (D_o + D_i)] \times M \times RPM \quad (4)$$

де  $D_i$  – діаметр внутрішнього кільця;

$D_o$  – діаметр зовнішнього кільця;

$D_b$  – діаметр кульки;

$M$  – число тіл кочення;

$RPM$  – частота обертання вала;

$F$  – частота прояву дефекту.

Одиночний дефект на внутрішнім або зовнішнім кільці підшипника генерує вібрацію на частоті перекошування тіла кочення (рис. 3). У процесі розвитку несправності розмір області ушкодження росте, вносячи свій внесок у розвиток нових дефектів. Отже, буде спостерігатися збільшення числа частот і ширини спектра. Ці частоти будуть модулюватися силами дисбалансу на частоті обертання вала або інших сил.

Наприклад, припустимо, що машина працює на частоті обертання 3 600 об/хв і обчислена кратність частоти перекошування кульки для дефекту на внутрішнім кільці дорівнює 25 292 циклів/хв. У спектрі виявляються обидві ці частоти, але, крім них, також будуть виявлятися сумарна ( $3600 + 25292 = 28892$  циклів/хв.) і різницева частоти ( $25292 - 3600 = 21692$  циклів/хв.).

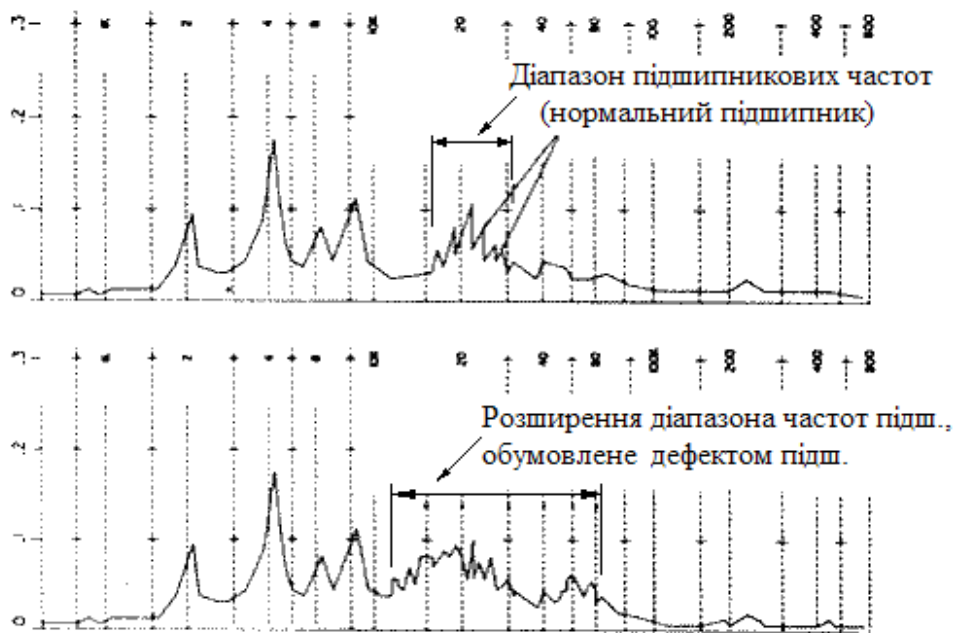


Рис. 3. Приклади прояву сумарних і різницевої частот

Коли uszkodження підшипника зв'язані з утомою, стиранням або іншими подібними ефектами, породжувані вібрації звичайно є випадковими і високочастотними. У спектрах таких вібрацій немає помітних максимумів і сам сигнал є неперіодичним, як у випадку дискретного крапкового викрашування доріжки кочення. Рівень випадкових вібрацій також міняється випадковим образом. Випадкові вібрації можуть бути як широкополосними, так і вузькополосними. Дослідження амплітудних і частотних характеристик випадкових вібрацій часто є корисним для розуміння її причин і серйозності дефектів.

Хоча зміна рівня випадкової вібрації в часі непередбачено, амплітуду цієї вібрації можна вимірити й оцінити (рис. 4). Чим більше амплітуда цієї вібрації, тим серйозніше дефект. Серйозність дефекту можна оцінити за допомогою вимірів енергії імпульсів (gSP), застосування якої розглянуто в наступному розділі.

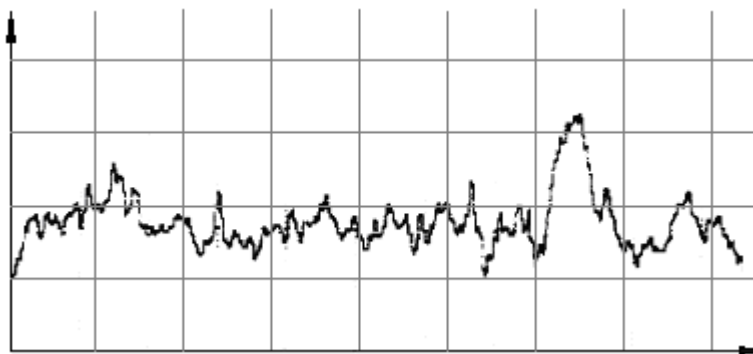


Рис. 4. Залежність амплітуди випадкової вібрації від часу

### Проектування та реалізація експертної системи

При проектуванні та реалізації ЕС необхідно виділити сукупність знань, яка структурується для спрощення процесу прийняття рішення. В нашому випадку інформація приймає форму фактів або правил.

На рис. 5 показано, що в архітектуру динамічної ЕС в порівнянні із статичною ЕС вводяться компоненти: підсистема моделювання функціонування технічного об'єкта (ТО) в часі і підсистема зв'язку ТО із зовнішнім оточенням. Остання здійснює зв'язок із ТО через систему датчиків і контролерів. Крім того, традиційні компоненти статичної ЕС (база знань і машина виводу) зазнають істотні зміни, щоб відобразити тимчасову логіку подій, що відбуваються в реальному часі.

Результатами рішення є побудований діагноз і знайдена залежність діагностичної величини від ознак дефекту. Ціль аналізу полягає в тому, щоб обґрунтувати діагноз і прийняти рішення про спосіб його можливої корекції.

Відношення точок вимірювання – це одна із поіменованих таблиць. Ім'я таблиці (в даному випадку "Точка вимірювання") визначаються змістовним відношенням. Ступінь відношення дорівнює кількості стовпців таблиці.

Як ефективні засоби збереження фактів використовуються правила зі змінними величинами. Змінні в правилах заміняють певну сукупність фактів. Розглянемо наступні правила:

Якщо гармоніка1  $\geq 1.2$  і гармоніка2  $\geq 0.54$ , то – розцентровка валів компресора і

електродвигуна.



Рис. 5. Архітектура динамічної експертної системи

Якщо гармоніка1  $\geq 21.08$  і гармоніка2  $\geq 0.498$ , то – розцентровка валів редуктора і проміжного валу. Через використання змінних ці правила можна об'єднати в одне:

Якщо точка вимірювання має характеристику X і точка вимірювання має характеристику Y, то – дефект – Z.

Для правил із змінними будують реляційні таблиці, в яких містяться фактичні значення змінних.

Відомо [5, 6], що доступна експерту інформація про нафтогазові об'єкти і взаємозв'язки між ними в загальному випадку є суттєво невизначеною. Тим не менше експерт все-таки здатний робити певні логічні висновки на основі цієї інформації.

На рис. 6 показано, як в середовищі ESTA розробленої експертної системи можна вибрати контрольну точку вимірювання.

На рис. 7 показано, як в середовищі ESTA розробленої ЕС вводяться значення амплітуди вібрації гармонік по п'яти заданим підшипникам.

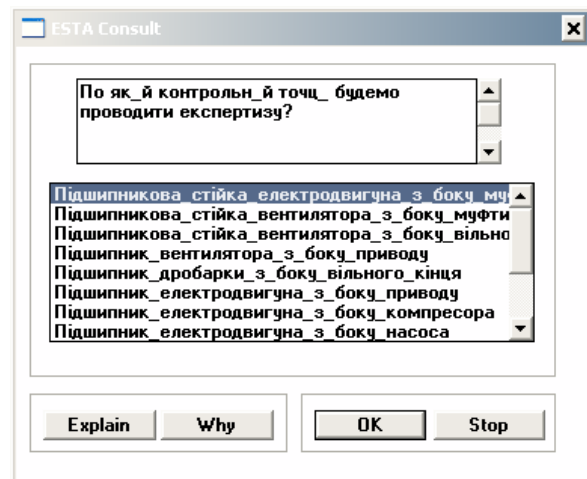


Рис. 6. Вибір контрольної точки вимірювання

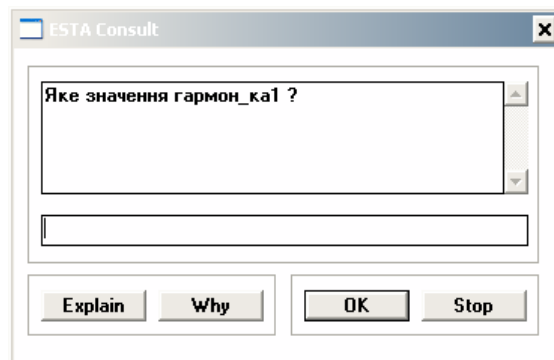


Рис. 7. Ввід значення гармоніки

На рис. 8 показана оцінка стану ГПА по заданим точкам вимірювання.

Точка вимірювання – підшипникова стійка електродвигуна з боку муфти, значення амплітуди по гармоніках – 1.5, 0.58, 0.5, 0.23, 0.02.

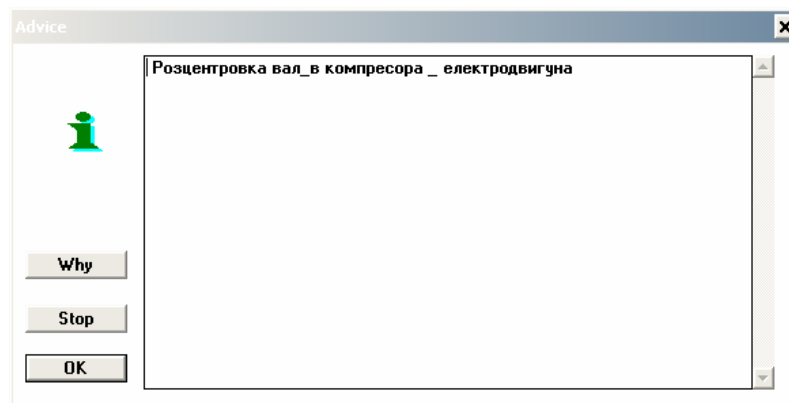


Рис. 8. Оцінка стану ГПА

### Висновок

В даній роботі виконаний вибір середовища реалізації експертної системи – діагностування ГПА за параметрами вібрації. Виконано обґрунтування експертної оболонки ESTA. Використання вибраної методики діагностування дефектів з метою досягнення оптимальних умов визначення нормального стану агрегату дозволили зменшити кількість відмов та дефектів ГПА в окремих вузлах.

При розробці ЕС діагностування ГПА передбачена розробка загальної структури, виконана побудова бази знань та побудова внутрішніх правил. Проведена апробація стану ГПА за значеннями амплітуди в спектрі вузла ГПА. Розроблене програмне забезпечення показало свою працездатність в робочому діапазоні технологічних параметрів ГПА. Досліджені значення амплітуди в контрольних точках дозволили виявити ряд дефектів ГПА, що є важливим при експлуатації в нормальному робочому технологічному режимі. Експлуатація експертної системи дозволяє використовувати її в режимі порадики, шляхом виявлення дефекту чи визначення нормального режиму роботи ГПА.

### Література

1. Заміховський Л.М. Основи теорії надійності і технічної діагностики систем : навч. посібник / Л.М. Заміховський, В.П. Калявін. – Івано-Франківськ : Полум'я, 2004. – 360 с.
2. Заміховський Л.М. Проектування систем діагностування : навч. посібник / Л.М. Заміховський, В.П. Калявін. – Івано-Франківськ : Полум'я, 2004. – 248 с.
3. Локазюк В.М. Інтелектуальне діагностування мікропроцесорних пристроїв та систем : навч. посібник для вузів / В.М. Локазюк, О.В. Поморова, А.О. Домінов. – Хмельницьк, 2001. – 286 с.
4. Локазюк В.М. Контроль і діагностування обчислювальних пристроїв та систем : навч. посібник для вузів / В.М. Локазюк. – Хмельницький : ТУП, 2001. – 242 с.
5. Ширмовська Н.Г. Проектування та реалізація експертних систем для технологічних об'єктів нафтогазового комплексу / Н.Г. Ширмовська // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2009. – № 1(126). – С. 224–228.
6. Ширмовська Н.Г. Експертна система діагностування газоперекачувального агрегату за параметрами вібрації / Н.Г. Ширмовська, К.Г. Ширмовська // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2010. – № 1(144). – С. 114–118.

Рецензія/Peer review : 6.4.2016 р. Надрукована/Printed : 19.4.2016 р.  
Рецензент : д.т.н., проф. Юрчишин В.М.