

## МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

---

---

УДК 004.04

DOI: 10.31471/1993-9981-2018-2(41)-5-17

### ПОБУДОВА БАЗИ ЗНАНЬ ТА ЇЇ ВНУТРІШНІХ ПРАВИЛ ДЛЯ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ

*Н. Г. Ширмовська\*, Г. І. Левицька, Я. І. Заячук, І. Р. Михайлюк*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ,  
Україна, e-mail: shirmovskaya@gmail.com, tel. +38034276019*

У статті пропонується розробка експертної системи діагностування, а саме, побудова бази знань та внутрішніх правил оцінки стану газоперекачувального агрегату за параметрами вібрації. Виконаний вибір середовища реалізації експертної системи. На основі виконаних досліджень відмов та дефектів газоперекачувального агрегату, запропонована методика діагностування дефектів, сформульовані умови визначення нормального стану функціонування установки. При розробці експертної системи пропонується загальна структура, побудова бази знань, побудова внутрішніх правил діагностування газоперекачувального агрегату. Розглянуті правила побудови експертних систем із змінними величинами. 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. Представлено експертну систему, яка забезпечує аналіз перехідних станів об'єктів управління, описано базу знань та кількість правил, на які спираються висновки експертної системи.

Ключові слова: експертна система, інтелектуальні технології, діагностування, база знань.

В статье предлагается разработка экспертной системы диагностики, а именно, построение базы знаний и внутренних правил оценки состояния газоперекачивающего агрегата по параметрам вибрации. Выполнен выбор среды реализации экспертной системы. На основе выполненных исследований отказов и дефектов газоперекачивающего агрегата, предложена методика диагностирования дефектов, сформулированы условия определения нормального состояния функционирования установки. При разработке экспертной системы предлагается общая структура, построение базы знаний, построение внутренних правил диагностирования газоперекачивающего агрегата. Рассмотрены правила построения экспертных систем с переменными величинами. Определение технического состояния агрегата по вибрационным параметрам производится как по содержанию соответствующей информации в момент времени, так и на основе анализа изменения ее во времени. Представлена экспертная система, которая обеспечивает анализ переходных состояний объектов управления, описаны база знаний и количество правил, на которые опираются выводы экспертной системы.

Ключевые слова: экспертная система, интеллектуальные технологии, диагностирование, база знаний.

The article proposes the development of an expert diagnostic system, namely, the construction of a knowledge base and internal rules for assessing the condition of the gas pumping unit by the parameters of vibration. The choice of environment for the implementation of the expert system was carried out. On the basis of the performed researches of failures and defects of the gas pumping unit, the method of diagnosing those defects were proposed, and also the conditions to determine the normal state of the functioning of the installation were formulated. When developing the expert system, a general structure, the construction of a knowledge database, and the construction of internal rules for the diagnosis of the gas pumping unit were proposed. The rules of construction of the expert systems with variable values were considered. The determination of the technical condition of the unit using vibration parameters is made both by the content of the relevant information at the time, and on the basis of analysis of its change over the time. An expert system was offered that provides an analysis of transitional states of control objects, also describes the knowledge base and the number of rules that are used for conclusions of the expert system.

Key words: expert system, intellectual technologies, diagnostics, knowledge database.

### Вступ

Надійність роботи газоперекачувального агрегату (ГПА) залежить від ряду факторів [1-8], в тому числі і від вібрації, яка згубно відбивається на його технічному стані. При вібрації окремі деталі та вузли піддаються впливу знакозмінних навантажень. Це призводить 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.

### 1. Розробка структури експертної системи

Основним елементом, з яким оперує система, є функція двох змінних, яка задана на регулярній сітці (полі). У вигляді полів представляються значення амплітуд в контрольних точках досліджуваної структури і сам діагноз діагностування ГПА.

Формовані системою значення амплітуд в контрольних точках описують локальні особливості середовища діагностування в околах вузлів. Значення амплітуд в контрольних точках вибираються і кодується спеціалістами так, щоб поле шуканого діагнозу могло бути з достатньою точністю функції полів цих ознак. Основні засоби системи призначені для того, щоб допомогти спеціалісту знайти і проаналізувати дану діагностуючу функцію і одержане поле діагностування.

Для знаходження діагностуючої функції використовується вибірка з гармонік, для якого даються оцінки діагностування. В вибірку входять вибрані точки і точки, по яких є додаткова інформація стосовно діагнозу. Точки вибірки повинні рівномірно заповнювати оцінку (механічну причину) дефекту і мати рівну представленість для різних значень діагностуючого дефекту.

Оцінки діагнозу в точках вибірки роблять експерти. Спеціалісти, що приймають участь в експертизі, дають оцінки незалежно одне від

одного. При оцінюванні враховуються зареєстровані події або досліджені об'єкти ГПА, відомості про діагностуюче явище і знання про особливості дефекту і тенденціях оцінки, що досліджується.

Як оцінки, можуть використовуватися зареєстровані значення діагнозу. Проте, в ряді випадків відмова від експертних оцінок і формальна заміна їх даними про зареєстровані спостереження збіднюють вхідну інформацію і можуть суттєво погіршити результати діагностування.

Діагностуюча функція  $FC(x, g)$ , де  $x$  – вектор ознак;  $g$  – вектор оцінюваних параметрів, шукається в деякому наперед вибраному класі функцій, виходячи із умов найкращої оцінки діагнозу в точках вибірки.

Важливим питанням є оцінювання точності залежності діагнозу від значень амплітуд в контрольних точках. Відомі методи оцінювання точності вимагають введення ряду статистичних тверджень, що явно не впливають із задачі, яка розв'язується. Тому, як формальний показник точності рішення, використовується величина середньої помилки оцінок діагнозу.

Величина середньої похибки не може служити єдиним критерієм правильності. При хорошому діагностуванні можуть існувати окремі зони, в яких діагноз сильно відрізняється від представлень експерта. В результаті аналізу одержаних розбіжностей спеціаліст повинен дати діагностичну інтерпретацію одержаного діагнозу і діагностичної функції, а також прийняти рішення про необхідність корекції моделі діагностованого дефекту. При цьому, може бути змінений вид діагностичної функції або внесені зміни в склад вихідних даних, введені або знайдені засобами системи додаткові поля ознак, змінено кодування ознак, додані додаткові точки вибірки і т. д. На кожному кроці ітерації спеціаліст формує модель діагностованого дефекту і готує вхідні дані. Далі знаходиться діагностуюча функція. Функція інтерпретується, як гіпотеза про шукану закономірність, що узгоджується з наявними знаннями і даними. Результати аналізуються і спеціаліст приймає рішення про необхідність виконання наступної ітерації.

В системі ESTA використовуються наступні типи даних:

- каталоги спектрів (значення амплітуд в контрольних точках);
- діагностовані дефекти (вихідні і одержані засобами системи поля за допомогою значень амплітуд в контрольних точках).

Знання експертів складаються із знань про механічну причину дефекту і знань про величину значення амплітуди в контрольній точці гармоніки спектру.

Знання про характер залежності між діагностичною величиною і ознаками дефекту носять якісний характер. Із загальних теоретичних положень, або, користуючись якісними моделями і емпіричними даним, спеціаліст може визначити характер зміни діагностованої величини в залежності від змін окремо кожної із ознак при умові незмінності решти. Ці знання використовуються для вибору значень амплітуд в контрольних точках, для розробки способів їх кодування, обґрунтування рекомендацій по обчисленню вторинних ознак засобами системи, а також для знаходження і аналізу діагностичної функції.

В системі ESTA функція діагностування шукається у вигляді:

$$FC(x, g) = \sum_{i=1}^I \psi_i(x_i, g) \quad (1.1)$$

де  $\psi_i(x_i, g)$  – кусково-лінійна функція від ознаки  $x_i$ , в якій вузли наперед задані, а вектор параметрів  $g$  визначає значення функції в вузлах. Вибраний клас функцій дозволяє при відносно малій розмірності вектора параметрів врахувати наявні в спеціалістів представлення про неперервність залежності діагнозу від діагностичних ознак і про характер нелінійності шуканої закономірності.

Крім цього цей клас функцій зручний при інтерпретації результатів діагнозу: кожна із функцій  $\psi_i(x_i)$  можна інтерпретувати, як нелінійний вклад ознаки  $x_i$  в діагноз, а поле діагностування, як суму полів нелінійно перетворених ознак.

Частина знань про характер зв'язку між діагнозом і ознаками представлена в системі у вигляді фреймів і використовується для підтримки пояснення отриманих результатів.

Знання про значення діагнозу на вибірці пунктів дефектів формалізовані і представлені у вигляді інтервальних експертних оцінок.

Вид інтервальної експертної оцінки підбирається таким чином, щоб методика діагностування була простою і зручною для експерта, і разом з тим забезпечувала одержання достатньо повної інформації про значення діагностичної оцінки:

$$EE = (p^{(1)}, p^{(2)}, w^{(1)}, w^{(2)}) \quad (1.2)$$

де  $p^{(1)}, p^{(2)}$  – границі інтервалу для значення діагностованого дефекту. В задачах функціональних залежностей інтервал  $[p^{(1)}, p^{(2)}]$  вибирається так, щоб всередині інтервалу всі значення діагностованої величини були би, на думку експерта, найбільш імовірними і рівно можливими. В задачах розпізнання діагностуюча функція повинна приймати різні значення при наявності чи відсутності дефекту. Із цих міркувань вибираються інтервали  $[p^{(1)}, p^{(2)}]$  для комірок, де зареєстрована точка вимірювання значення вібрації дефекту, і для комірок, де, на думку експертів, дефектів бути не може;

$w^{(1)}, w^{(2)}$  – вагові коефіцієнти, з допомогою яких експерт вказує ступінь своєї впевненості в можливості того, що значення діагностованої величини може бути менше або більше відповідної границі інтервалу  $p^{(1)}$  або  $p^{(2)}$ .

Головна математична задача, що вирішується при побудові діагнозу, є задача функції багатьох змінних в деякому класі функцій:

$$\{FC(x, g) / g \in G\}, \quad (1.3)$$

де  $G$  – область допустимих значень вектора параметрів  $g$ . Розв'язок полягає в знаходженні оцінки вектора параметрів  $\bar{g}$  по вибірці спостережень  $\{OB_{j,n}, x_n\}$ , де  $OB_{j,n}$  – інтервальна оцінка значення діагностованої величини, визначена  $j$ -м експертом в  $n$ -й точці вибірки;  $x_n$  – вектор дефекту в  $n$ -й точці.

Оцінка вектора параметрів  $\bar{g}$  має вигляд :

$$\bar{g} = \arg \min_{g \in G} \sum_n \sum_j pf(FC(x_n, g), OB_{j,n}) \quad (1.4)$$

де  $pf(FC, S)$  – штрафна функція, що визначає величину штрафу за неточність експертної

$$pf(FC, OB) = (w^{(1)}(|FC - p^{(1)}| + p^{(1)} - FC)/2 + w^{(2)}(|FC - p^{(2)}| - p^{(2)} + FC)/2)^q, \quad (1.5)$$

де  $w^{(1)} > 0, w^{(2)} > 0, p^{(1)} \leq p^{(2)}, q \geq 1$ .

Якщо діагностуюча функція  $FC(x, a)$  лінійна по параметрах, то мінімізуючий функціонал є випуклим. Якщо при цьому область  $G$  допустимих значень вектора  $g$  також випукла, то при оцінюванні можна використати ітераційні алгоритми градієнтного типу.

Очевидно, що в частковому випадку, коли використовуються експертні оцінки, в яких завжди  $p^{(1)} = p^{(2)}, w^{(1)} = w^{(2)}$  при  $q = 1$  алгоритм оцінювання співпадає з методом найменших модулів, а при  $q = 2$  – співпадає з методом найменших квадратів.

В експертних оцінках неминуче зустрічаються протиріччя. Можлива ситуація, коли оцінки великого числа менш компетентних експертів можуть значно вплинути на оцінки найбільш кваліфікованих експертів. Формальна процедура вибору найбільш компетентних експертів базується на незалежності встановлення експертних оцінок і реалізує просту ідею: представлення і експертні оцінки компетентних експертів краще відображають шукані закономірності і тому близькі між собою.

В системі ESTA при знаходженні діагностуючої функції одночасно виконується вибір найбільш суттєвих ознак. Це здійснюється з допомогою покрокової процедури: вибирається ознака, що дає найкраще спостереження, на наступному кроці до неї підбирається друга ознака, яка дає найменшу похибку в парі з першою ознакою і т. д. Починаючи з деякого кроку похибка на навчальній вибірці починає спадати незначно, а похибка на контрольній вибірці починає зростати, що вказує на недоцільність подальшого нарощування ознак.

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. Для вибраного класу функцій діагноз

оцінки  $OB$  значенням дігностуючої функції;

природнім чином розпадається на адитивні компоненти. Це дозволяє пояснювати значення прогнозу в аналізованих точках, використовуючи значення  $\psi_i(x_i, a)$  – внесків ознак  $x_i$  в діагноз  $FC(x, a)$ .

Формалізувати всі міркування спеціаліста про характер шуканої залежності наперед не вдається. Спеціаліст намагається інтерпретувати знайдену залежність в термінах якісних представлень. При одержанні не інтерпретованих функцій  $\psi_i(x_i)$  спеціаліст може скорегувати залежність: вибрати інші вузли в функції  $\psi_i(x_i, g)$ , змінити кодування ознаки  $x_i$ , або відмовитися від цієї ознаки взагалі. Інтерпретація підтримується візуалізацією функцій  $\psi_i(x_i, g)$  і процедурою пояснення діагнозу в точках вибірки. Процедура пояснення дає текстову інтерпретацію впливу на діагноз в аналізованій точці кожної з ознак. Співставлення апіорних знань про характер функцій  $\psi_i(x_i, g)$  зі знайденою залежністю може виявитися підказкою для нової інтерпретації залежності, або може бути прийнята як основа для корекції моделі.

Ціль процедури обґрунтування полягає в тому, щоб підтвердити діагноз в деякій точці або вказати на причини його неточності. При обґрунтуванні знаходиться група точок, що подібна до аналізованої за певними ознаками. Для деяких із виявлених точок може бути наявна додаткова інформація про діагноз дефекту, наприклад, зареєстровані значення діагнозу або експертні оцінки діагностованої величини. Ця інформація може підтверджувати діагноз в точці, що аналізується, або заперечувати його. Спеціаліст-експерт може з цим погодитися, або ні. У випадку незгоди перед ним виникає конкретна задача: пояснити, чим аналізована точка відрізняється від точок, виділених процедурою. Це може привести спеціаліста до висновків про необхідність введення додаткових ознак, про необхідність зміни кодування ознак, про додавання точок у вибірку.

Результати спостережень можуть бути введені трьома способами:

- шляхом введення спостережень  $OB_i$  з допомогою природної мови;
- шляхом введення з допомогою природної мови ключевих слів, які приводять в дію цілі групи спостережень  $OB_i$ ;
- шляхом оцінювання бази даних, що містить інформацію про об'єкт, і перетворення інформації з допомогою нечіткого інтерпретатора.

Введення ключових слів викликає відповідні розділи із довідника спостережень. Інженер-когнітолог може зв'язувати з цими спостереженнями відповідні нечіткі значення.

Після того, як зібрані всі спостереження, здійснюється логічний висновок типу “спостереження-спостереження”. Список спостережень містить всі необхідні пункти даних, що включають нечіткі значення, результати вимірів і висновку, числові значення, дані спостережень. Після цього список спостережень перевіряється на несуперечливість.

На наступному кроці оцінюються проміжні комбінації спостережень. Після проходження перевірки на відповідність обчислюються нечіткі значення для всіх комбінацій спостережень. Одержані в результаті списки тепер повні і не містять ніяких протиріч. Нечіткі значення  $\mu_{FCj} = 1.00$ , тобто підтверджені діагнози  $FCj$  для точок вимірювання  $DEq$

$$\begin{aligned} \varepsilon \leq \mu_{FCj} \leq 0.99, \mu_{FCj} = \max \{ & \mu_{W^1_{DEFC}}(DE_q, FC_j); \mu_{W^4_{DEFC}}(DE_q, FC_j); \mu_{W^{10}_{DEFC}}(DE_q, FC_j) \} \\ \text{якщо } (\varepsilon \leq \mu_{W^1_{DEFC}}(DE_q, FC_j) \leq 0.99 & \\ \text{або } \varepsilon \leq \mu_{W^4_{DEFC}}(DE_q, FC_j) \leq 0.99 & \\ \text{або } \varepsilon \leq \mu_{W^{10}_{DEFC}}(DE_q, FC_j) \leq 0.99). & \end{aligned} \quad (1.8)$$

Оскільки значення  $\mu_{FCj}$  не залежать від числа правил, які можуть бути використані для підтримки  $FCj$ , то може бути введена евристична функція, що враховує число критеріїв, присутніх, або частково присутніх, які передбачають, але не підтверджують істинність діагнозу  $FCj$ . Таким чином, ця функція обчислює відповідне число точок

визначаються з допомогою такого співвідношення:

$$\begin{aligned} \mu_{FCj} = 1.00, \text{ якщо} \\ \mu_{W^1_{DEFC}}(DE_q, FC_j) = 1.00 \text{ або} \\ \mu_{W^4_{DEFC}}(DE_q, FC_j) = 1.00 \quad (1.6) \end{aligned}$$

Нечіткі значення  $\mu_{FCj} = 0.00$ , тобто виключені прогнози  $FCj$  для точки вимірювання  $DEq$  визначаються з допомогою:  $\mu_{FCj} = 0.00$ ,

$$\begin{aligned} \text{якщо } (\mu_{W^2_{DEFC}}(DE_q, FC_j) = 1.00 \text{ або} \\ \mu_{W^3_{DEFC}}(DE_q, FC_j) = 1.00 \text{ або} \\ \mu_{W^5_{DEFC}}(DE_q, FC_j) = 1.00 \text{ або} \\ \mu_{W^6_{DEFC}}(DE_q, FC_j) = 1.00). \end{aligned}$$

Відношення типу “дефект розцентровка, дефект підшипника, дисбаланс, дефект нагнітача, дефект в зубчатій передачі, турбулентність” допускають логічний висновок наступних діагнозів (такі, що підтверджуються або такі, що виключаються):

$$\mu_{FCj} = \begin{cases} 1.00, \text{ якщо } \mu_{W^{10}_{DEFC}}(DE_q, FC_j) = 1.00 \\ 1.00, \text{ якщо } \mu_{W^{11}_{DEFC}}(DE_q, FC_j) = 1.00 \\ 1.00, \text{ якщо } \mu_{W^{12}_{DEFC}}(DE_q, FC_j) = 1.00 \end{cases} \quad (1.7)$$

Можливим діагнозам відповідають нечіткі значення  $\mu_{FCj}$ , такі, що:

$PNR_{FCj}$ . Ці значення корисні тоді, коли треба робити вибір між різними можливими діагнозами, хоча кінцевою ціллю повинно бути одержання підтвердженого діагнозу. Число точок  $PNR_{FCj}$  обчислюється таким чином:

$$PNR_{FCj} = 100 \sum \left\{ \alpha \min^{k^*} [\mu_{WDEOB}(DE_q, OB_i); \mu_{W^f_{OBFC}}(OB_i, FC_j)] + \beta \min [\mu_{WDEOB}(DE_q, OB_i); \mu_{W^{cd}_{OBFC}}(OB_i, FC_j)] \right\} \quad (1.9)$$

де  $k^*$  - число спостережень по дефекту  $DE_q$ , які виникають при означенні  $FC_j$ , а  $\alpha + \beta = 1.00$ . Ми приймаємо  $\alpha = 0.09$  і  $\beta = 0.91$ , тобто степінь підтвердження береться в десять разів більш значимим, ніж частота появи по відношенню до значення  $PNR_{FCj}$ . Множення суми на 100 виконується для того, щоб досягти одержання легких для читання і запам'ятовування значень числа точок. Та чи прийме спеціаліст-експерт діагноз ЕС у великій степені залежить від здатності системи пояснити одержані нею результати. За запитом користувача надається інформація, що додатково пояснює підтвержені і можливі діагнози. Ця інформація має вигляд назв дефектів, їх означень, відповідних їм вимірних нечітких значень.

Однією із основних цілей побудови ЕС є забезпечення можливості ітеративних консультацій, що починаються з простих і легко доступних даних. Як правило, на основі цих даних може бути виведено число можливих діагнозів, а далі для підтвердження або виключення цих гіпотез, потрібно подальше дослідження. ЕС використовує інформацію, що зберігається в базі даних, для того, щоб робити припущення про форму, яку повинні приймати ці додаткові дослідження. Очевидно, що

спостереженнями для подальшого дослідження є саме ті спостереження, які повинні підтвердити, або виключити певний діагноз. Крім того, вказуються ті спостереження, які можуть перевести на більш високий рівень в ранжованому списку всіх можливих діагнозів даний можливий діагноз.

Підтвержені діагнози і будь-які інші можливі діагнози в сукупності повинні пояснювати будь-яке спостереження чи результат лабораторного дослідження. Непояснені дані означають, як правило, що необхідно дослідити додатково певну сукупність об'єктів.

## 2. Побудова бази знань

Кожен виділений об'єкт предметної області має певні характеристики та властивості. Наприклад, для об'єкту точка вимірювання типовими атрибутами є дефект та значення амплітуд з гармоніки 1, 2 і т. і. Атрибути приймають певні значення. Так, дефект – розцентровка, гармоніка 1 може приймати значення 1.2, гармоніка 2 – 0.54 і т. і.

В таблиці 2.1 наведено опис об'єкту точки вимірювання.

Таблиця 2.1 – Представлення фактів з допомогою триплетів О - А - З

Об'єкт	Атрибут	Значення
Точка вимірювання	назва	Підшипникова стійка електродвигуна з боку муфти
Точка вимірювання	розцентровка	Розцентровка валів компресора і електродвигуна
Точка вимірювання	гармоніка 1	1.2
Точка вимірювання	гармоніка 2	0.54

Використання триплетів О-А-З для опису реальних об'єктів не враховує, власне, характер і вид взаємозв'язків, які можуть мати причинно-наслідковий характер, чи бути відношеннями типу «частина-ціле» і т. і. На

форму зв'язків не встановлюється ніяких обмежень.

В таблиці 2.2 представлено опис властивостей конкретного об'єкту, що здійснюється через використання пар атрибут-значення (А-З):

Таблиця 2.2 – Представлення фактів з допомогою пар А-3

Атрибут	Значення
назва	Підшипникова стійка електродвигуна з боку муфти
розцентровка	Розцентровка валів компресора і електродвигуна
гармоніка 1	1.2
гармоніка 2	0.54

Відношення між окремими характеристиками об'єктів представлено у вигляді таблиць, в яких кількість стовбців відповідає степені відношення, а один рядок дорівнює відповідному кортежу.

Дані про кожний об'єкт, що описується в таблиці 2.3 (про кожну точку вимірювання), займають один цілий рядок. Структура всіх рядків співпадає. Степінь відношення  $n$  вказує

на те, що описуються однотипні об'єкти, що мають по  $n$  атрибутів. Якщо система зустрине в базі знань відношення А і В з степенями відповідно 5 і 7, то вона розуміє, що мова йде про різні типи об'єктів, один з яких має 5, а другий 7 атрибутів.

В таблиці 2.3 зображено відношення, куди записані відомості про кілька точок вимірювання, по яких працюватиме система.

Таблиця 2.3 – Фрагмент відношення степеня 4

Точка вимірювання	Назва дефекту	Гармоніка 1	Гармоніка 2
Підшипникова стійка електродвигуна з боку муфти	Розцентровка	1.2	0.54
Підшипникова стійка вентилятора з боку муфти	Розцентровка	11	19.58
Підшипник вентилятора з боку приводу	Дефект підшипника	0.31	0.15
...	...	...	...

Відношення точок вимірювання – це одна із поіменованих таблиць. Ім'я таблиці (в даному випадку "Точка вимірювання") визначається смисловим відношенням. Степінь відношення дорівнює кількості стовбців таблиці.

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

Якщо гармоніка1  $\geq$  1.2 і гармоніка2  $\geq$  0.54

то розцентровка валів компресора і електродвигуна.

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.

В таблиці 2.4 описується вся та інформація, що і в вихідних правилах. Назва таблиці відповідає назві абстрактного об'єкту, а заголовки стовбців – атрибутам об'єкту.

Використання фреймів дозволяє об'єднувати всі характеристики окремого об'єкту в одну групу і маніпулювати з нею, як з єдиним цілим.

Таблиця 2.4 – Опис об'єкту "дефект"

Дефект (Механічна причина)	Характеристика X	Характеристика Y
Розцентровка валів компресора і електродвигуна	гармоніка1 $\geq 1.2$	гармоніка2 $\geq 0.54$
Розцентровка валів редуктора і проміжного валу	гармоніка1 $\geq 21.08$	гармоніка2 $\geq 0.498$
Нормальний режим роботи газоперекачувального агрегату	гармоніка1 $\geq 0.39$	гармоніка2 $\geq 0.16$

Фрейму присвоюється ім'я, що співпадає з назвою об'єкту, який він описує. Фрейм складається з слотів. Вся наявна інформація про

об'єкт структурується і її окремі компоненти записуються в слоти.

В табл. 2.5, як приклад, показано фрейм, з допомогою якого описується абстрактна категорія "точка вимірювання".

Таблиця 2.5 – Фрейм "точка вимірювання"

Фрейм: точка вимірювання	
назва точки вимірювання	?
Дефект	?
Гармоніка 1	?
Гармоніка 2	?
Діагностування	Діагностування
Оцінка (механічна причина)	Нормальний режим роботи, гармоніка1 $\geq 0.39$

Фрейм містить інформацію, загальну для всіх точок вимірювання. Символ "знак питання" означає, що вміст слоту ще невідоме системі.

Верхня частина фрейму призначена для зберігання фактичної інформації. Відповідні слоти можна було би без проблем записати у вигляді триплетів О-А-З чи  $n$ -их відношень. Заповнювачем слоту "діагностування" є посилання на інший фрейм.

### 3. Побудова внутрішніх правил

Відомо, 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.

Наші знання про реальний світ характеризуються неповнотою, неточністю і неузгодженістю. Застосування теорії нечітких множин робить можливим означення неточних нафтогазових об'єктів, як нечітких множин. Вона пропонує лінгвістичний підхід, що уявляє

собою ефективно наближення нафтогазових текстів.

Точність існує тільки за допомогою абстракції. Абстракція може бути означена, як здатність людини розпізнавати і вибирати потрібні властивості явищ і об'єктів реального світу. Це приводить до побудови концептуальних моделей, що визначають абстрактні класи явищ і об'єктів. Тим не менше, в дійсності кожне явище, кожний об'єкт реального світу є унікальним.

Абстрактні моделі явищ і об'єктів реального світу, такі, як математичні структури, рівності і висловлювання являють собою штучні конструкції. Вони являють собою ідеальні структури, ідеальні рівності, ідеальні висловлювання.

В нафтогазовій справі немає потреби розглядати мікроявища і мікрооб'єкти, щоб зіткнутися з проблемами неповноти, невизначеності і неузгодженості. Недостатня кількість інформації, її неточність і суперечлива природа є дуже важливим фактом.

Розглядаються чотири класи об'єктів:



- спостереження, ознаки, результати діагностування і одержані дані ( $OB_i$ );
- гіпотези і сценарії ( $FC_j$ );
- проміжні комбінації ( $IC_k$ );
- комбінації спостережень ( $OC_l$ ).

Спостереження  $OB_i$  приймають значення  $\mu_{OB_i}$  із  $[0,1] \cup \{v\}$ . Значення  $\mu_{OB_i}$  показує, в якій степені проявляються спостереження  $OB_i$ .

Після цього будується бінарне нечітке відношення  $W_{p_{OB}} \subset \Pi \times \Sigma$ , що визначається умовою  $\mu_{W_{DEOB}}(DE_q, OB_i) = \mu_{OB_i}$  для точки вимірювання  $DE_q$ , де

$DE_q \in \Pi (\Pi = \{DE_1, \dots, DE_r\})$  і  $OB_i \in \Sigma (\Sigma = \{OB_1, \dots, OB_m\})$ .

Діагнози також приймають значення із  $[0,1] \cup \{v\}$ . Нечіткі значення  $0.00 < \mu_{FC_j} < 1.00$

уявляють собою можливі діагнози, тоді як значення  $\mu_{FC_i} = 1.00$  і  $\mu_{FC_i} = 0.00$  відповідають підтверженому діагнозу і непідтверженому діагнозу відповідно. Ще не розглянуті діагнози приймають значення  $\mu_{FC_i} = v$ . Формально будується відношення  $W_{DEFC} \subset \Pi \times \Delta$ , що визначається умовою  $\mu_{W_{DEFC}}(DE_q, FC_j) = \mu_{FC_j}$  для точки вимірювання  $DE_q$ , де  $FC_j \in \Delta (\Delta = \{FC_1, \dots, FC_n\})$ .

Обидва об'єкти, що розглядаються: проміжні комбінації і комбінації спостережень – приймають значення  $\mu_{ICK}$  і  $\mu_{OCl}$  відповідно із  $[0,1] \cup \{v\}$ , де  $v$  означає, що дійсне значення ще не визначено. Відношення  $P_{DEOVC} \subset \Pi \times K$  задається умовою  $\mu_{W_{DEOVC}}(DE_q, OC_l) = \mu_{OVC_l}$  для точки вимірювання  $DE_q$ , де виконується  $OC_l \in K (K = \{OC_1, \dots, OC_n\})$ , і  $W_{DEOVC}$  формально описує комбінації спостережень по даній точці вимірювання.

Нечіткі логічні зв'язки визначаються наступним чином:

$$Z_1 \wedge Z_2 = \min\{Z_1, Z_2\}, \text{ якщо } Z_1 \in [0,1] \text{ і } Z_2 \in [0,1];$$

$$Z_1 \wedge Z_2 = v, \text{ якщо } Z_1 = v \text{ і/або } Z_2 = v;$$

$$Z_1 \vee Z_2 = \max\{Z_1, Z_2\}, \text{ якщо } Z_1 \in [0,1] \text{ і } Z_2 \in [0,1];$$

$$Z_1 \vee Z_2 = Z_1, \text{ якщо } Z_1 \in [0,1] \text{ і } Z_2 = v;$$

$$Z_1 \vee Z_2 = Z_2, \text{ якщо } Z_1 = v \text{ і } Z_2 \in [0,1];$$

$$Z_1 \vee Z_2 = v, \text{ якщо } Z_1 = v \text{ і } Z_2 = v;$$

$$Z_1 = 1 - Z_1, \text{ якщо } Z_1 \in [0,1];$$

$$Z_1 = v, \text{ якщо } Z_1 = v.$$

Слід відмітити, що введення величини  $v$  для відсутніх операндів, яка обов'язково повинна бути включена в означення зв'язок і заперечення, із практичних міркувань, призводить до порушення деяких законів (наприклад, законів де Моргана). Ці закони справедливі для класичних нечітких зв'язків  $Z_1 \wedge Z_2 = \min\{Z_1, Z_2\}$ ,  $Z_1 \vee Z_2 = \max\{Z_1, Z_2\}$  по відношенню до заперечення  $Z_1 = 1 - Z_1$ , але тепер вони втрачають силу.

Між нафтогазовими об'єктами розглядаються такі відношення:

– відношення спостереження-діагноз ( $OB_i FC_j$ );

– відношення комбінація спостережень-діагнозів ( $OC_l FC_j$ );

– відношення спостереження-спостереження ( $OB_i OB_j$ );

– відношення діагноз-діагноз ( $FC_i FC_j$ ).

Ці відношення характеризуються наступними двома параметрами:

– частота появи ( $f$ );

– степінь підтвердження ( $cd$ ).

Відношення між нафтогазовими об'єктами задаються у вигляді правил відношення з відповідними їм парами відношень. Загальне формулювання такого правила має вигляд:

ЯКЩО (антецедент) ТО (консеквент)  
ПРИ ( $f, cd$ ).

Пари відношення ( $f, cd$ ) містять або числові значення  $\mu_f$  і  $\mu_{cd}$ , або лінгвістично нечіткі значення  $\lambda_f$  і  $\lambda_{cd}$  або і ті, і інші. Характерні значення корисні в тому смислі, що вони роблять нечіткий висновок легко здійснюваним. Нижче наведені деякі приклади правил відношень.

Приклад 1:

ЯКЩО (гармоніка1  $\geq 0.39$ ) ТО (Нормальний режим роботи газоперекачувального агрегату)

ПРИ (0.75 = часто, 0.25 = слабо).

Приклад 2:

ЯКЩО (гармоніка1  $\geq 3.38$ )

ТО (дефект – розцентровка валів редуктора і електродвигуна)

ПРИ (0.25 = рідко, 1.00 = завжди).

Приклад 3:

ЯКЩО (гармоніка1  $\geq 1.2 \wedge$  гармоніка2  $\geq 0.54 \wedge$  гармоніка3  $\geq 0.49 \wedge$  гармоніка4  $\leq 0.23 \wedge$  гармоніка5  $\leq 0.04$ )

ТО (дефект – розцентровка валів компресора і електродвигуна)

ПРИ ( $v, 0.90$  = дуже сильно).

Значення  $\mu_f$  і  $\mu_{cd}$  інтерпретуються, як значення нечітких відношень між антецедентами і консеквентами. Так:

$OB_i FC_j$  (відношення появи)  $W_{OBFCf} \subset \Sigma \times \Delta$

$OB_i FC_j$  (відношення підтвердження)

$W_{OBFCcd} \subset \Sigma \times \Delta$

$OC_1 FC_j$  (відношення появи)  $W_{OCFCf} \subset K \times \Delta$

$OC_1 FC_j$  (відношення підтвердження)

$W_{OCFCcd} \subset K \times \Delta$

$OB_i OB_j$  (відношення появи)  $W_{OBOBf} \subset \Sigma \times \Sigma$

$OB_i OB_j$  (відношення підтвердження)

$R_{OBOBcd} \subset \Sigma \times \Sigma$

$FC_i FC_j$  (відношення появи)  $R_{FCFCf} \subset \Delta \times \Delta$

$FC_i FC_j$  (відношення підтвердження)

$R_{FCFCcd} \subset \Delta \times \Delta$ .

Система набуття знань здатна одержувати інформацію про нафтогазові об'єкти і відношення між ними. Відношення зберігаються у вигляді числових значень із проміжку [0, 1]. Інформація може бути одержана одним із двох способів:

а) з допомогою числових або лінгвістичних оцінок, що одержуються від спеціалістів-експертів;

б) шляхом статистичного оцінювання бази знань, що містить інформацію про нафтогазові об'єкти з підтвердженими результатами діагнозів.

Інформація про відношення може бути зібрана в числовому або лінгвістичному вигляді з використанням наперед визначених лінгвістичних значень для означення параметрів, таких як частота появи  $f$  і степінь підтвердження  $cd$  (табл. 3.6). Таким чином можуть бути одержані емпіричні знання, що спираються на міркування, і визначаючі знання.

Таблиця 3.6 – Лінгвістичні нечіткі значення

Частота появи			Степінь підтвердження		
Значення $\lambda_f$	Інтервал	Характерне значення $\mu_f$	Значення $\lambda_{cd}$	Інтервал	Характерне значення $\mu_{cd}$
завжди	[1.00, 1.00]	1.00	завжди	[1.00, 1.00]	1.00
майже завжди	[0.98, 0.99]	0.99	майже завжди	[0.98, 0.99]	0.99
дуже часто	[0.83, 0.97]	0.90	дуже сильно	[0.83, 0.97]	0.90
часто	[0.68, 0.82]	0.75	сильно	[0.68, 0.82]	0.75
середнє	[0.33, 0.67]	0.50	середнє	[0.33, 0.67]	0.50
рідко	[0.18, 0.32]	0.25	слабо	[0.18, 0.32]	0.25
дуже рідко	[0.03, 0.17]	0.10	дуже слабо	[0.03, 0.17]	0.10
майже ніколи	[0.01, 0.02]	0.01	майже ніколи	[0.01, 0.02]	0.01
ніколи	[0.00, 0.00]	0.00	ніколи	[0.00, 0.00]	0.00

Ці відношення мають ту важливу властивість, що вони можуть бути інтерпретовані статистично. Частоти появи  $f$  і степінь підтвердження  $cd$  становить:

$$\mu_f = G(OB_i \cap FC_j) / G(FC_j) = G(OB_i / FC_j) \quad (3.10)$$

$$\mu_{cd} = G(OB_i \cap FC_j) / G(OB_i) = G(FC_j / OB_i) \quad (3.11)$$

де  $G(OB_i \cap FC_j)$  – абсолютна частота появи  $OB_i$  і  $FC_j$ ;

$G(FC_j)$  – абсолютна частота появи  $FC_j$ ;

$G(OB_i)$  – абсолютна частота появи  $OB_i$ ;

$G(OB_i / FC_j)$  – умовна частота  $OB_i$  при умові  $FC_j$ ;

$G(FC_j / OB_i)$  – умовна частота  $FC_j$  при умові  $OB_i$ .

З допомогою означень (3.10) і (3.11) розширене статистичне оцінювання відомих відношень між нафтогазовими об'єктами, або ще не визначених відношень, може бути здійснено шляхом використання даних про вже діагностовані і вивчені дефекти.

В таблиці 3.7 присутні декілька типів значень атрибута: точні значення, інтервальні значення, нечіткі значення (наприклад, “високе”, “біля 9”, “середнє”) і невизначені значення. Неточні значення атрибута відповідають або частковому (неповному, або нечіткому) знанню, або грубою оцінкою.

**Таблиця 3.7 – Зведена таблиця числового і лінгвістичного оцінювання точок вимірювання**

Точка вимірювання	A	B	C	D	E
Підшипникова стійка електродвигуна з боку муфти	7.0	досить низьке	досить високе	невідомо	[40-43]
Підшипникова стійка вентилятора з боку муфти	біля 8.0	[0.7-0.9]	високе	низьке	41
Підшипникова стійка вентилятора з боку вільного кінця	[6.9- 8.1]	0.8	[9-10]	середнє	біля 42
Корпус редуктора	низьке	досить високе	дуже високе	[0.005-0.013]	[41-44]
Підшипник вентилятора з боку приводу	біля 7.6	біля 1	низьке	дуже високе	досить високе
Підшипник дробарки з боку вільного кінця	середнє	[0.7-0.8]	9.5	високе	низьке
Корпус підшипника провідного валу з боку вільного кінця	[7.9- 8.7]	невідомо	біля 9	0.0075	середнє

де А – гармоніка 1, В – гармоніка 2, С - гармоніка 3, D – гармоніка 4, Е – гармоніка 5.

В таблиці 3.8 область значень атрибута ТИП дискретна:  $D_{ТИП} = \{a, b, c, d\}$ , де кожне число відповідає певному типу характеристик. Той факт, що тут наявні області двох типів (неперервні і дискретні), тягне за собою два способи представлення функцій розподілу можливостей.

Л. Заде запропонував оцінювати степінь належності числами із інтервалу [0, 1] [9]. Фіксування конкретних значень при цьому носить суб'єктивний характер. Важливим є як характер змін, так і тип шкали, в якій одержують інформацію від експерта.

Таблиця 3.8 – Відношення з кількома атрибутами

характеристика1	характеристика2	Дефект (Механічна причина)
гармоніка 1	гармоніка 2	Дефект 1
гармоніка 1	гармоніка 2	Дефект 2
гармоніка 1	гармоніка 2	Дефект 3
гармоніка 1	гармоніка 2	Дефект 4
гармоніка 1	гармоніка 2	Дефект 5

При проектуванні інформаційної системи “ESTA” адаптували і модифікували метод інтервальних оцінок запропонований в роботі Л. Заде [9].

Припустивши, що степені належності нам відомі, наприклад, у вигляді  $\mu_{OB}(v_i) = \xi_i$   $i = (1, 2, \dots, m)$ , то попарні порівняння можна представити матрицею відношень  $C = ((c_{ij}))$ ,  $c_{ij} = \xi_i / \xi_j$ .

Так як відношення порівняння в реальному світі неточні через свою емпіричність, то потрібно обчислювати окремі оцінки для  $\xi$ . В процесі рішення задачі формується матриця порівнянь розглядуваної множини елементів. Елементи матриці показують наскільки один елемент краще іншого. При формуванні оцінок попарних порівнянь від експерта вимагається вираження досвіду у вигляді:

- встановити який із двох даних елементів є більш важливим ;
- оцінити сприйняття інтенсивності розрізнення в виді рангу важливості по відповідній шкалі.

Розглянемо поняття “клас  $F$ ”, яке описується функцією належності на множині об’єктів  $C = \{c^0, \dots, c^{m-1}\}$ . В  $C$  є тільки два об’єкти  $c^k$   $c^l$  про які можна сказати, що  $c^k$  ідеальний представник тих об’єктів, які належать  $C$ , а  $c^l$  ідеальний представник тих об’єктів, що не належать цьому поняттю. Завдання експерта полягає в ранжуванні об’єктів відповідно до їх належності, чи не належності описаному поняттю. Результуюча матриця попарних порівнянь задає порядок пар об’єктів по степенях відмінностей в парях.

На другому етапі визначається та максимальна кількість класів, яка може бути описана даним набором параметрів. Для кожного елемента  $v$  значення функції

належності класу  $F_1$  доповнює до одиниці значення функції належності класу  $F_2$ . Таким чином, система класів повинна складатися із класів, що представляють протилежні події. Сума значень функції належності довільного елемента  $v$  до системи таких класів буде дорівнювати одиниці. В випадку, коли число класів і їх склад чітко невизначений, то вводиться додатковий віртуальний клас, що включає всі не виявлені класи. Завдання експертів полягає в процентній оцінці степені прояву кожного класу в конкретному стані  $v$ .

Вибірку об’єктів доцільно брати такою, щоб рівномірно представити степені належності від 0 до 1 по відношенню до розглядуваної нечіткої множини. При цьому повинні бути присутні хоча б два об’єкти степені належності, рівні відповідно 0 і 1. В результаті опитування експертів отримається процентна оцінка степенів належності.

Нехай інтервал  $[y_{mb}, y'_{ml}]$  відображає думку  $l$ -го експерта ( $l=1, \dots, n1$ ) про значення  $m$ -ї ( $m=1, \dots, n2$ ) ознаки оцінюваного поняття  $OB$ . Повний опис цього поняття  $l$ -им експертом представлятиметься у вигляді

$$\Omega_l = [y_{1l}, y'_{1l}] \times \dots \times [y_{2l}, y'_{2l}] \quad (3.12)$$

Нижче наведений алгоритм, що дозволяє обчислювати коефіцієнти компетентності експертів, а також приводити вихідну “розмиту” функцію, що являє собою середнє значення експертних оцінок до характеристичної функції нерозмитої чіткої множини:

- а) Для кожної ознаки  $m$  розглядаються всі інтервали, що запропоновані експертами, знаходять їх об’єднання, які складаються з інтервалів, що не перетинаються:

$$[y_{mk}, y'_{mk}], (m=1, \dots, n1; k=1, \dots, n2) \quad (3.13)$$

- б) На основі одержаних множин будуюмо результуючу множину  $Z_k$ :

$$Z_k = [y_{1k}, y'_{1k}] \times \dots \times [y_{nk}, y'_{nk}], k=1, \dots, n_2 \quad (3.14)$$

в) Обчислюємо для  $x \in Z_k$ :

$$\xi_l(y) = \begin{cases} 1, Z_k \cap \Omega_l \neq \emptyset \\ 0, Z_k \cap \Omega_l = \emptyset \end{cases} \quad (3.15)$$

г) Приймаємо номер ітерації  $in=1$ ;

д) Вводимо коефіцієнти компетентності для експертів:

$$\{CC_l^{in}\}_{l=1}^{n1} = \{1/n1\}_{l=1}^{n1} \quad (3.16)$$

е) Обчислюємо наближення функції належності при нормованих значеннях:

е) Обчислюємо функціонал неузгодженості думки 1-го експерта з думкою групи експертів на  $in$  – ітерації:

$$FD_l^{in} = \sum_{y \in Z_k} [f^{in}(y) - \varphi_l(y)]^2, l=1, \dots, n1 \quad (3.18)$$

$$CC_l : \sum_{l=1}^{n1} CC_l^{ni} = 1, f^{in}(y) = \sum_{l=1}^{n1} \varphi_l(y) * CC_l^{in}, y \in Z_k \quad (3.17)$$

ж) Обчислюємо:

$$\Phi = \sum_{l=1}^{n1} 1/FD_l^{in} \quad (3.19)$$

з) Збільшуємо крок ітерації на одиницю.

і) Обчислюємо:

$$CC_l^{in} = \Phi / FD_l^{in-1} \quad (3.20)$$

и) Якщо тепер величина  $\max |CC_l^{in-1} - CC_l^{in}|$  близька до нуля, то ітераційний процес припиняється і за наближення функції належності приймається  $f(y) = \mu_s(y)$ , в протилежному випадку виконується перехід до пункту е).

При розробці експертної системи діагностування ГПА передбачена розробка загальної структури, виконана побудова бази знань та побудова внутрішніх правил. 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.

1. Верба В. Проектний аналіз: Підручник. / В. Верба, О. Загородніх. – К.: КНЕУ, 2000. – 322с.

2. Заміховський Л. М. Проектування систем діагностування: Навч. посібник. / Л. М. Заміховський, В. П. Калявін. – Івано-Франківськ: Полум'я, 2004. – 248 с.

3. Николайчук Я. М. Проектування систем діагностування. Навчальний посібник / Николайчук Я. М., Возна Н. Я., Потух І. Р. – Тернопіль: ТзОВ: «Терно-граф», 2010. – 392 с.

4. Локазюк В. М. Контроль і діагностування обчислювальних пристроїв та систем: Навч. посібник для вузів. / Локазюк В. М. – Хмельницький: ТУП, 2001. – 242 с.

5. Заміховський Л. М. Вибір раціональної діагностичної ознаки для контролю технічного стану відцентрових насосних агрегатів системи підтримання пластового тиску / Л. М. Заміховський. Ю. В. Паньків // Східно Європейський журнал передових технологій. – 2008. – № 32. – С. 58–61.

6. Sebastian Costel Mustata, Dragos Dracea, Augustina Sandina Tronac, Nicoleta Sarbu, Elena Constantin. Diagnosis and vibration diminishing in pump operation. International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automatio. 2014. № 25. 970–976 p. doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.456

7. Michael Robichaud J., Eng P. Reference Standards for Vibration Monitoring and Analysis. Bretech Engineering Ltd, 2011. 90 p.

8. Сундуков Е. В. Проблемы измерения и нормирования обшей вибрации энергетических установок на базе авиационных ГТД / Е. В. Сундуков // Труды международной научно-технической конференции. Сер. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королева. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва. – 2003. С. 202–205.

9. R.R Yager, L.A Zadeh An introduction to fuzzy logic applications in intelligent system. Springer Science & Business Media, 2014.- pp.27-44.

Поступила в редакцію 20.12.2018 р.

Рекомендували до друку: докт.техн.наук, проф. Горбійчук М. І., докт. техн. наук, проф. Олійник А. П..