

ВИМІРЮВАННЯ, КОНТРОЛЬ І ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА

УДК 622.691.4:519.718.2

СУЧАСНИЙ СТАН ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ

Л. М. Заміховський, С. В. Зікратий, Л. О. Штаєр

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 727170,
e-mail: leozam@ukr.net

Проведено огляд відомих результатів досліджень з оцінки надійності систем автоматичного управління газоперекачувальних агрегатів та їх діагностичного забезпечення. Стабільність роботи газотранспортної системи України безпосередньо залежить від надійності і ефективності роботи газоперекачувальних агрегатів та систем управління ними. Актуальність питання оцінки надійності систем автоматичного управління полягає в тому, що такі системи створювалися поетапно – в міру розвитку газотранспортної системи, і вирішували тільки локальні задачі, актуальні на момент їх розробки та впровадження. При створенні вказаних систем не враховувалися такі актуальні для сьогодення принципи побудови, як уніфікація, надійність та відкритість. Аналіз та систематизація відомих результатів досліджень з оцінки надійності систем автоматичного управління газоперекачувальних агрегатів та їх діагностичного забезпечення (моделей, алгоритмів, процедур і методів діагностування) дозволить в подальшому удосконалити існуючі та розробити методичку оцінки технічного стану систем автоматичного управління газоперекачувальних агрегатів за їх фактичним станом. В роботі розглянуто моделі, алгоритми та методи, дана характеристика найпоширеніших, визначено переваги та недоліки кожного з них. Зроблено висновок про відсутність на сьогодні системного підходу (методики) до визначення технічного стану існуючих систем автоматизованого управління газоперекачувальних агрегатів за даними експлуатації.

Ключові слова: метод діагностування, технічний стан, алгоритм діагностування.

Проведен обзор известных результатов исследований оценки надежности систем автоматичного управления газоперекачивающих агрегатов и их диагностического обеспечения. Стабильность работы газотранспортной системы Украины напрямую зависит от надежности и эффективности работы газоперекачивающих агрегатов и систем управления ими. Актуальность вопроса оценки надежности систем автоматичного управления состоит в том, что такие системы создавались поэтапно – по мере развития газотранспортной системы, и решали только локальные задачи, актуальные на момент их разработки и внедрения. При создании указанных систем не учитывались такие актуальные на сегодняшний день принципы построения, как унификация, надежность и открытость. Анализ и систематизация известных результатов исследований по оценке надежности систем автоматичного управления газоперекачивающих агрегатов и их диагностического обеспечения (моделей, алгоритмов, процедур и методов диагностирования) позволит в дальнейшем усовершенствовать существующие и разработать методичку оценки технического состояния систем автоматичного управления газоперекачивающих агрегатов по их фактическому состоянию. В работе рассмотрены модели, алгоритмы и методы: дана характеристика наиболее распространенных, определены преимущества и недостатки каждого из них. Сделан вывод об отсутствии на сегодняшний день системного подхода (методики) к определению технического состояния существующих систем автоматизированного управления газоперекачивающих агрегатов по данным эксплуатации.

Ключевые слова: метод диагностирования, техническое состояние, алгоритм диагностики.

The review of well-known results of studies on the reliability of automated systems of gas pumping units and their diagnostic support was performed. Stability of the gas transportation system of Ukraine directly depends on the reliability and efficiency of the gas pumping units operation and their control systems. The urgency of assessing the reliability of automation control systems lies in the fact that such systems were emerging gradually, with the gas transportation system development, and they solved only local problems at the time of their development and implementation. When these systems were developed, many factors, were not taken into account: unification, reliability and openness. The analysis and systematization results of the reliability evaluation of automated systems of gas pumping units and their diagnostic support (diagnostic models, algorithms, procedures and methods) will

allow further improvement of existing ones and development of a method to evaluate the technical state of automation control systems of gas pumping units. The paper described models, algorithms and methods, characteristic of the most common systems, their advantages and disadvantages were determined. It was concluded that at present there is no systematic approach (methodology) to determine the technical state of existing systems of automated control of gas pumping units according to the operation data.

Key words: diagnostic method, technical state, diagnostic algorithm.

Постановка проблеми. Газоперекачувальний агрегат (ГПА) є ключовим елементом всієї газотранспортної системи України. Роль управління, діагностування, контролю і захисту ГПА покладено на систему автоматичного управління (САУ). Розвиток засобів комплексної автоматизації, скорочення кількості обслуговуючого персоналу, більш складні умови експлуатації обладнання вимагають забезпечення високої надійності роботи як нових, так і ГПА, які знаходяться в експлуатації. Стабільність всієї газотранспортної системи (ГТС) безпосередньо залежить від надійності і безпеки роботи газоперекачувального обладнання та систем їх управління. Для оцінки надійності ГТС необхідний системний, комплексний підхід, який би розглядав надійність всіх елементів системи. В контексті великої кількості ГПА і САУ ГПА в складі ГТС актуальність оцінки технічного стану об'єктів ГТС не викликає запитань.

Аналіз досліджень і публікацій. Парк ГПА ПАТ «Укртрансгаз» є достатньо великим (налічує сотні ГПА), на яких встановлені системи автоматичного управління (САУ), автоматизовані системи управління (АСУ). Ці системи побудовані на різноманітних апаратно-програмних засобах, зокрема релейної автоматики, а отже, номенклатура є морально застарілою. За даними [1] аналізу поточного стану САУ ГПА в управлінні магістральних газопроводів (УМГ) «Київтрансгаз» свідчить, що для 67% систем перевищено паспортний ресурс експлуатації, ще 17% вичерпають свій ресурс протягом 1-3 років; по системах САУ компресорної станції (КС) відповідно 59% та 18%. Через відсутність запасних частин (не випускаються), відсутність деяких виробників САУ та розробників програмного забезпечення САУ неможливо забезпечити безвідмовну роботу систем автоматики.

Дана робота є аналізом праць провідних вчених, таких як: Гаврилюк Е. А., Григор'єв Л. І., Дьяченко М. Д., Жуков С. Ф., Ільченко Б. С., Калантаренко А. А., Калінін В. В., Кофанов Ю. Н., Кубрін С. С., Манцеров С. А., Панов А. Ю., Пегушин С. Л., Русев В. Н., Свердлов А. Б., Седих І. А., Сінічкін С. Г., Стрельников В. П., Сукманов А. І., Шуміхін А. Г.

Висвітлення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Історично склалося, що впровадження систем автоматики відбувалося за принципом: окрема одиниця технологічного обладнання – окрема САУ. Результатами такого підходу [1] можна вважати достатньо велику кількість різноманітних систем на КС від різних виробників з незначним залишковим

ресурсом (більшість САУ працює понад 30-ть років, на багатьох ГПА присутні системи управління, що відпрацювали свій ресурс). В останні роки встановлювались САУ на базі апаратно-програмних засобів різних виробників: в одному компресорному цеху можуть бути системи управління, які побудовані на апаратно-програмних засобах різних фірм – німецьких, японських, вітчизняних і т.д.

Існуючі САУ КС, як правило, створювались поетапно і вирішували лише локальні задачі на момент їх розробки та впровадження. Найчастіше при створенні даних систем не враховувалися такі актуальні сьогодні принципи побудови, як уніфікація, надійність, відкритість. Виникає питання оцінки надійності, оскільки релейна автоматика, зокрема, вимагає окремого підходу до оцінки надійності з можливістю прогнозування тривалості працездатності системи.

Вказане вище вимагає напрацювання системного підходу до оцінки надійності систем управління.

В умовах старіння і зношування обладнання газотранспортної системи України одним із шляхів підвищення надійності експлуатації ГПА, що забезпечить ефективність і економічності процесу транспортування природного газу при обмежених інвестиціях, є перехід від традиційної системи підвищення надійності – системи планово-попереджувальних ремонтів (ППР) – до нової ресурсозберігаючої системи – за фактичним технічним станом. Можливість такого переходу, в першу чергу, спирається на ефективні методи математичного моделювання процесів зношування деталей і вузлів ГПА – осьових компресорів, турбін низького і високого тисків та силових нагнітачів – з метою визначення діагностичних ознак (характеристик і параметрів) їх фактичного функціонально-технічного стану за результатами вимірювання останніх за допомогою штатних технічних засобів. За даними ВАТ "Газпром", наведеними в [2], технічне обслуговування і виведення в ремонт енергоустаткування в терміни відповідно до фактичного технічного стану зменшує витрати на технічне обслуговування на 40 % і збільшує ресурс у середньому на 30 %.

Метою даної статті є аналіз та систематизація результатів досліджень щодо оцінки надійності систем автоматики ГПА та їх діагностичного забезпечення (моделей, алгоритмів і методів діагностування).

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.

В основу оцінки і прогнозування експлуатаційної надійності ГПА може бути покладена структурно функціональна модель надійності (СФМН) ГПА [3]. Ймовірність безвідмовної роботи – комплексний показник довговічності, який повною мірою характеризує надійність складних технічних систем. Структурно-функціональна модель надійності ГПА відображає узагальнений показник надійності (ПН) через структурну і функціональну декомпозицію ГПА, причини і характер відмов, раціональну номенклатуру вихідних параметрів, модель працездатності, структуру і вид вихідної інформації про надійність підсистем ГПА, а також напрацювання, режими роботи, ремонт, правила і умови експлуатації. СФМН найбільш повно характеризує надійність досліджуваного об'єкта, відображає його основні конструктивні і функціональні особливості, режими роботи, причини і характер відмов, що виникають. Встановлено [3], що структурно-функціональна модель надійності ГПА для періоду експлуатації залежить від чотирьох операторів:

$$P(t) = \Phi_1 * \Phi_2 * \Phi_3 * \Phi_4, \quad (1)$$

де Φ_1 – оператор, який визначає ймовірність виконання системи умов працездатності для заданих умов експлуатації та режимів роботи ГПА залежно від напрацювання і режиму експлуатації (визначає параметричну надійність, ймовірність P_n виконання ГПА умов працездатності для заданих параметрів у залежності від допустимих меж у певному режимі експлуатації і часу роботи:

$$P_n = \{Y_1 \in [Y_1]; Y_2 \in [Y_2]; \dots Y_i \in [Y_i]; \dots Z_j \in [Z_j]; \dots X_k \in [X_k]\}, \quad (2)$$

де Y_i – вихідні узагальнені параметри ГПА (рівень шуму в машинному залі, загальний вібростан агрегату, загазованість цеху або укриття ГПА, тиск газу на виході компресорної станції, температура газу на виході компресорної станції і т.д.);

Z_j – вихідні параметри окремих підсистем (температура, тиск і рівень машинного мастила, рівень вібрації електродвигуна, мультиплікатора, нагнітача; захист від помпажу нагнітача; обмеження за потужністю, $\cos\phi$ електродвигуна, напруга в мережі і т.д.);

X_k – вихідні параметри окремих елементів агрегату (температура підшипників електродвигуна, тиск мастила в ущільненнях нагнітача, осьове зміщення ротора нагнітача тощо);

Φ_2 – оператор, що характеризує вплив на надійність ГПА дрібних конструктивних і технологічних дефектів, що не враховуються першим оператором, а також вплив якості ремонтів і технічних обслуговувань;

Φ_3 – оператор, що враховує вплив порушень правил експлуатації ГПА на його надій-

ність через інтенсивності виникнення таких подій;

Φ_4 – оператор, що характеризує спільний вплив поточних відмов і прийнятої планово-попереджувальної системи обслуговування і ремонтів ГПА на його технічну готовність (кофіцієнт технічного використання ГПА).

В роботі [4] запропоновано для оцінки надійності комплексу засобів автоматизованих систем управління технологічним процесом (АСУ ТП) використовувати тактику послідовних контрольних випробувань на надійність для експоненціального закону розподілу ймовірності відмов [5]. Вихідними даними є:

- загальна кількість досліджуваних однотипних елементів N ;
- напрацювання на момент дослідження t , години;
- ризик споживача α ;
- ризик постачальника β ;
- бракувальне значення контрольованого показника – часу безвідмовної роботи T_β (приймають з параметрів технічної документації на обладнання або за погодженням із замовником виробів), годин;
- приймальне значення контрольованого показника T_α (приймають з параметрів технічної документації на обладнання або за погодженням із замовником), годин;
- відношення T_α / T_β .

Відтак розраховують межі відповідності згідно з методикою [5]:

$$r_+ = a(t_\Sigma / T_\alpha - t_0 / T_\alpha), \quad (3)$$

і невідповідності

$$r_- = at_\Sigma / T_\alpha + r_0, \quad (4)$$

де a – тангенс кута нахилу прямої;

r – число відмов;

r_0 – точка перетину лінії невідповідності з віссю ординат;

t_Σ – очікуване сумарне напрацювання до прийняття рішення;

t_0 – точка перетину лінії відповідності з віссю абсцис, які розраховуються згідно з [5] на основі вхідних даних.

Тоді сумарне напрацювання до прийняття рішення про відповідність (невідповідність) можна розрахувати за формулою

$$t_\Sigma = Nt - \sum_{j=1}^r t_{ej}, \quad (5)$$

де t_{ej} – тривалість відновлення працездатного стану після j -го з r відмов або тривалість заміни j -го з r відмов новим зразком;

t – напрацювання, яке вимірюється в годинах.

Як методологію для аналізу причин відмов та їх наслідків можливе застосування FMEA-методології (Failure Mode and Effects Analysis, аналіз видів і наслідків відмов).

Таблиця FMEA включає такі колонки:

- вид обладнання (наприклад, відмова давача температури);
- вид потенційної відмови (наприклад, дефект чутливого елемента давача);
- наслідки відмови (наприклад, відсутність показів на екрані оператора);
- значущість відмови (числовий коефіцієнт, який визначає вплив відмови на роботу системи);
- потенційні причини відмови (наприклад, обрив термопар);
- виникнення відмови (числовий коефіцієнт, що характеризує частоту виникнення відмови);
- методи виявлення (наприклад, візуальний огляд, продзвонювання);
- виявлення відмови (числовий коефіцієнт, що визначає складність виявлення);
- рекомендації (наприклад, обрив може бути викликаний неякісними монтажними роботами і т.п.);
- ризик споживача (числовий коефіцієнт, що розраховується, як добуток всіх числових коефіцієнтів).

На основі паспортних даних про надійність обладнання та даних про кількість відмов протягом заданого проміжку часу встановлюється відповідність розрахованих показників надійності нормативним значенням.

Дана методика дозволяє отримати лише наближені значення показників надійності, оскільки ґрунтується на використанні обмежених часом дослідження спостережень. Впродовж вказаного часу може і не виникнути жодної відмови, і в цьому випадку основними даними про надійність є паспортні дані обладнання.

В роботі [6] розглядаються особливості розробки та практичного застосування інформаційно-аналітичної системи оцінки та моніторингу надійності АСДУ під час транспортування газу. В [6] запропоновано спосіб вирішення задачі забезпечення надійності, прогнозування інтенсивності відмов, модель оцінки надійності функціонування і якості обслуговування газотранспортної системи. Інформаційно-аналітична система «Оцінка і моніторинг надійності АСДУ (АСУ ТП)» складається з таких основних модулів: журнал філій, журнал виробничих комплексів, журнал компресорних цехів, журнал об'єктів, журнал САУ ГПА, журнал відмов, журнал комплектуючих елементів, звітні форми і блок моделювання і статистичної оцінки. На основі аналізу зібраної інформації встановлено, що час безвідмовної роботи елементів АСДУ описується моделлю Вейбула-Гнеденко. Ґрунтуючись на отриманих статистичних даних напрацювання і відмов ГПА, проводиться розрахунок інтенсивності відмов і потоку відмов. Статистичні показники потоку відмов $\omega(t)$ в подальшому використовуються в аналітичних розрахунках. Запропонована модель оцінки працездатності і якості обслуговування ГТС [6] ґрунтується на методах нечіткої логіки і реалізована в середовищі MATLAB з

використанням пакета розширення Fuzzy Logic Toolbox.

В [7] запропоновані методи оцінки і моніторингу надійності, створено ІАС і інтеграційний підхід до оцінки надійності для АСДУ (АСУ ТП), які забезпечують можливість моніторингу стану технологічних об'єктів і оцінки показників надійності (керівництву диспетчерської служби), а також можливість прийняття своєчасних і обґрунтованих рішень щодо заміни і відновлення устаткування (управління виробничими службами). Робота спрямована на вирішення таких задач:

- розроблення інформаційного забезпечення у вигляді баз даних: збір, ведення, архівування як паспортної, так і всієї оперативної інформації про відмови активних елементів, включаючи рівні автоматичного управління та автоматизованого управління;
- формування на основі фактичних даних про відмови показників технічного стану обладнання.

Водночас надійність за окремими функціями АСУД не розглядається. Інформаційна система реалізована у вигляді тривірневої архітектури (клієнт-сервер додатків – сервер СУБД) і може мати розподілену структуру, що складається з центрального сервера баз даних, web-сервера для забезпечення віддаленого доступу до інформації та клієнтських робочих місць диспетчерів (АРМ). ІАС розроблено з використанням технології створення web-додатків ASP.NET.

Запропонована в [7] методика прогнозування значення параметру потоку відмов та середнього напрацювання на відмову на базі регресійної моделі включає такі етапи:

- вибір даних про відмови ГПА, САУ ГПА;
- аналіз вхідних даних на викиди (критерій Грабса);
- аналіз вхідних даних на однорідність (критерій Колмогорова-Смірнова);
- побудова графіків параметра потоку відмов та середнього напрацювання на відмову;
- побудова лінії регресії;
- визначення оптимальної регресійної моделі;
- прогнозування параметра потоку відмов та середнього напрацювання на відмову.

В [8] запропоновано застосування математичної моделі оцінки надійності функціонування ГТС. В основі моделі лежить оцінка інтенсивності відмов на базі розподілу Вейбула-Гнеденко:

$$f(t; \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \cdot t^{\beta-1}, & t > 0; \\ 0, & t \leq 0, \end{cases} \quad (6)$$

з функцією розподілу

$$F(t; \alpha, \beta) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{t^\beta}{\alpha}\right), & t > 0; \\ 0, & t \leq 0, \end{cases} \quad (7)$$

де оцінка коефіцієнтів α і β (параметри розподілу) здійснюється за статистичними даними, що накопичуються інформаційною системою, за методом максимальної правдоподібності.

Для оцінки коефіцієнтів здійснюється лінеаризація за параметрами α і β :

$$\ln(-\ln(1 - F(t))) = \beta \ln t - \ln \alpha. \quad (8)$$

У випадку усічених вибірок, функція правдоподібності матиме вигляд:

$$L(\alpha, \beta) \sim \left(1 - \exp\left(-\frac{T_0^\beta}{a}\right)\right) \cdot \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{n-r} \times \prod_{k=r+1}^n t_k^{\beta-1} \cdot \exp\left(-\frac{T_k^\beta}{a}\right), \quad (9)$$

де T_0 – момент часу з якого фіксуються відмови;

n – початковий об'єм вибірки;

t_k – момент виникнення відмови,

$k = r + 1, \dots, n$;

r – кількість відмов, що відбулися до початку спостереження.

У випадку, якщо вибірка не цензурована, функція правдоподібності має вигляд:

$$L(\alpha, \beta) = \prod_{k=1}^n f(t; \alpha, \beta) = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^n \cdot \prod_{k=1}^n t_k^{\beta-1} \cdot \exp\left(-\frac{T_k^\beta}{a}\right). \quad (10)$$

Після оцінки параметрів α і β значення для інтенсивності відмов визначається за формулою:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot t^{\beta-1}. \quad (11)$$

В [9] запропоновано як кількісну оцінку технічного стану обладнання використовувати безрозмірну числову величину – Індекс технічного стану (ІТС), що формується в результаті виконання певного алгоритму. Величина ІТС характеризує стан об'єкта з точки зору відповідності його параметрів нормативним значенням з урахуванням значущості (ваги) кожного параметра. Параметром є паспортна характеристика обладнання або характеристика, яку отримують в результаті діагностування або огляду обладнання. Для того, щоб отримати безрозмірний ІТС, кількісні та якісні значення параметрів переводяться в цілочисельні дискретні значення, що відображають ступінь відповідності параметра його номіналу. Побудова моделі оцінки технічного стану включає

- аналіз структури об'єкта оцінки;
- визначення критеріїв оцінки;
- визначення параметрів оцінки;
- аналіз і розстановка вагових коефіцієнтів;

- визначення методу розрахунку ІТС;
- визначення граничних значень ІТС.

Моніторинг параметрів здійснюється на основі інструментального контролю та експертної оцінки ІТС: всієї САУ ГПА (рівень 1) ви-

значається за сукупністю ІТС рівня 2, що є переліком виділених підсистем, які впливають на стан САУ ГПА. У свою чергу, ІТС другого рівня визначаються за критеріями (рівень 3), вплив яких на стан кожної підсистеми враховується ваговими коефіцієнтами. Критерії розраховуються на основі параметрів (рівень 4), за допомогою яких оцінюється стан того чи іншого елемента. Для розрахунку одного критерію може використовуватися як один, так і декілька параметрів. В [9] зазначають, що можна обмежитися лише трьома рівнями структурування без розбиття САУ ГПА на підсистеми. На найнижчому рівні ІТС визначається, як відношення поточного значення параметра до його паспортного значення. ІТС підсистеми визначається на основі ІТС окремих параметрів з врахуванням значень вагових коефіцієнтів, що характеризують вплив надійності окремих елементів на надійність системи загалом. Шкала (інтервал) ІТС формується на підставі експертних оцінок і включає граничні значення для аналізу ІТС. Пропонується 100-бальна шкала, де 100 – найкраща відповідність номіналу, 0 – найгірша. Відповідно до цієї шкали визначається технічний стан і, відповідно, її надійність як елемента системи, так і системи загалом. Для розрахунку ІТС всього об'єкта (САУ ГПА), як описано в роботі [10], можна застосувати співвідношення обчислення середньозваженого значення за всіма складовими:

$$I_1 = \frac{\sum_i p_{2i} I_{2i}}{\sum_i p_{2i}}, \quad I_2 = \frac{\sum_i p_{3i} I_{3i}}{\sum_i p_{3i}}, \quad I_3 = \frac{\sum_i p_{4i} I_{4i}}{\sum_i p_{4i}}, \quad (12)$$

де I_1 – ІТС системи;

I_2 – ІТС підсистем;

I_3 – ІТС критеріїв;

p_{2i} – вага ІТС i -ї підсистеми;

p_{3i} – вага ІТС i -го критерію;

p_{4i} – вага i -го параметра;

I_{2i} – ІТС i -ї підсистеми;

I_{3i} – ІТС i -го критерію;

I_{4i} – оцінка (значення) i -го параметра.

Для прогнозування відмов САУ ГПА автори [11] описують характер зміни властивостей об'єкта в часі як суму детермінованих і випадкових складових процесу. При вирішенні задач детермінованого прогнозування в прямій постановці шуканими характеристиками є значення діагностичних параметрів, в якості яких автори [11] пропонують використати ІТС. Проте, якщо розглядається детермінований процес, то неможливо відслідкувати раптові відмови (випадковий процес). Тому пропонується всі розраховані ІТС заносити до бази даних, проводити відповідні заходи залежно від ІТС. При цьому продовжується моніторинг; відповідно до методики модуль оцінки ІТС постійно корегується і вдосконалюється, що дає змогу розраховувати ІТС з максимальною достовірністю. Завдання ймовірнісного прогнозування: необхідно на конкретному підприємстві, що експлуа-

тує елемент, вести статистику відмов протягом усього його життєвого циклу для розрахунку ступеня ризику – ймовірності настання відмови. Таким чином, буде отримана величина ризику безпосередньо для конкретного випадку, тим самим максимально наблизивши її до істинного значення.

Під ступенем ризику в [11] розуміють очікувану частоту або ймовірність виникнення відмови обладнання. Застосування поняття ступінь ризику дозволяє переводити небезпеку в розряд вимірюваних величин. Ступінь ризику фактично – це міра небезпеки. Ступінь ризику також є безрозмірною величиною в межах від 0 до 100, що вносить додаткову перевагу при спільному використанні з ІГС.

Задачу діагностування в [12] розглянуто на прикладі системи управління режимами електропостачання об'єктів у порту, яка складається з робочого місця (РМ) диспетчера, РМ головного енергетика порту і 16-ти локальних систем управління (СУ) віддаленими об'єктами (СУ підстанціями). Для підвищення надійності та реалізації функцій діагностування та прогнозування, введено резервування на рівні управління. Система побудована на промислових логічних контролерах (ПЛК). Перший, основний, ПЛК має завдання збору інформації з нижнього рівня, управління режимами роботи підстанції, а також процесами функціонального і тестового діагностування пристроїв і здійснення прогнозування надійності їх роботи. Другий ПЛК здійснює тестове діагностування окремих контролерів з нижнього рівня і в будь-який момент готовий в разі несправності першого прийняти на себе функції збору інформації, управління роботою підстанції, на якій виник збій або пошкодження ПЛК або периферійного обладнання.

На першому етапі створення апаратних засобів діагностування СУ за [12], поряд з індикаторами відмов, необхідне створення засобів, що дозволяють автоматизувати існуючі перевірочні процедури з одночасним вирішенням завдань діагностування. Така автоматизована система діагностування є складним технічним пристроєм, який здійснює автоматичне обчислення сукупності параметрів управління, контролю, вимірювання і реєстрацію результатів обчислень.

Математична модель взаємодії СД і СУ може бути представлена у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= F_1(P_1, \dots, P_m, R_1, \dots, R_k) \\ \dots \\ C_n &= F_n(P_1, \dots, P_m, R_1, \dots, R_k) \end{aligned} \right\}; \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= f_1(C_1, \dots, C_n, R_1, \dots, R_k) \\ \dots \\ P_m &= f_m(C_1, \dots, C_n, R_1, \dots, R_k) \end{aligned} \right\}; \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \phi_1(P_1, \dots, P_m, O_1, \dots, O_l) \\ \dots \\ R_k &= \phi_k(P_1, \dots, P_m, O_1, \dots, O_l) \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

де C_1, \dots, C_k – сигнали впливу СД на АСУ і У;

P_1, \dots, P_m – параметри сигналів, що знімаються з датчиків АСУ і У;

R_1, \dots, R_k – сигнали внутрішнього стану СД;

O_1, \dots, O_l – сигнали, що задаються оператором у процесі діагностування.

При цьому система (13) визначає маніпуляцію управління СД, а функції F_1, \dots, F_n формують алгоритм управління. Вираз (14) є узагальненою математичною залежністю процедури контролю об'єкта, де функції f_1, \dots, f_m характеризують різні зовнішні прояви властивостей (внутрішнього стану) об'єкта діагностування. Вираз (15) дає можливість вирішити завдання самоконтролю СД, а функціональні залежності ϕ_1, \dots, ϕ_k утворюють контрольні тести.

Для оцінки працездатності можуть використовуватися тести двох видів:

1. Тест призначений для перевірки коректного функціонування всіх контролерів, що входять в АСУ:

– перевірка стану «увімкнено – вимкнено» контролерів нижнього рівня і керуючого контролера;

– перевірка контрольних сум ОЗУ і ПЗУ всіх контролерів, що входять до системи;

2. Тест призначений для перевірки достовірності передачі інформації за наявними каналами зв'язку.

У тому випадку, коли для контролюваного об'єкта вирішується повна задача прогнозування надійності, його придатність до виконання завдання визначається виконанням умови:

$$P^{PS}(t_3) > P_0, \quad (16)$$

де $P^{PS}(t_3)$ – апостеріорна ймовірність безвідмовної роботи об'єкта протягом часу виконання завдання t_3 після контролю;

P_0 – мінімально допустимий рівень ймовірності відмови, при якому об'єкт може бути допущений до виконання завдання. В даному випадку величина P_0 відіграє роль експлуатаційного допуску на якість об'єкта, що задається, виходячи з вимог до ефективності виконання завдання. Визначення раціонального рівня P_0 для даних конкретних умов – це окрема досить складна проблема.

В умовах експлуатації нерідко виникають ситуації, коли повна задача прогнозування надійності не може бути вирішена. У цих випадках може вирішуватися більш просте завдання прогнозування технічного стану, і тоді умова придатності до виконання завдання набуває вигляду:

$$m^{ps}(t) \in S_p, t_k \leq t \leq t_3, \quad (17)$$

де $m^{ps}(t)$ – апостеріорне математичне очікування;

S_p – область експлуатаційних допусків;

t_k – момент останнього контролю;

t_3 – момент передбачуваного закінчення виконання завдання.

За результатами перевірки здійснюється прогнозування надійності (ймовірність безвідмовної роботи протягом заданого часу) за методом Монте-Карло. Після введення вихідних відомостей про процес і даних контролю, обчислюється математичне очікування апостеріорного процесу

$$m_{(i)}^{(k)}, i = \overline{1, I}. \quad (18)$$

Далі необхідно сформувати множину N реалізацій апостеріорного процесу. Величина константи N визначається із загальних міркувань забезпечення заданої достовірності прогнозу. Формування їх можна починати з $i = k + 1$, оскільки при $i \leq k$ процес вироджується в детермінований. Далі кожне обчислене значення реалізації процесу $X^{(k)}(i)$ порівнюється з межами допуску $[a, b]$. Якщо при деякому i значення реалізації вийшло за межі допуску, фіксується відмова об'єкта і заноситься одиниця в лічильники числа відмов $q_v, i \leq v \leq I$.

Після того, як описаним чином будуть сформовані і проконтрольовані всі N реалізацій, прогнозована надійність обчислюється за формулою:

$$p_{(i)}^{(k)} = \frac{N - q_i}{N}, k + 1 \leq i \leq I. \quad (19)$$

В [13] на основі використання промислових даних, отриманих за допомогою системи автоматизованого збору даних нафтопромислу, проведена класифікація типів відмов обладнання, встановлені закони розподілу відмов за кожним із типів та визначено параметри цих законів. Великі обсяги баз даних (більше 1200 розслідуваних відмов) дозволили авторами [13] використовувати трипараметричний закон розподілу Гомперца:

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right), \quad (20)$$

$$\int_0^t \lambda(t) dt = K_1 t + K_2 (e^{K_3 t} - 1),$$

де K_1, K_2, K_3 – додатні константи, які визначаються розв'язанням оберненої задачі знаходження параметрів емпіричних залежностей.

Застосування розподілу Гомперца дозволяє врахувати вплив на надійність обладнання як випадкових чинників, так і явища «зношування». В [13] показано, що похибка трипараметричної моделі в середньому в 3 рази нижча, ніж у стандартного показникового (експоненційного) розподілу.

Аргументи на користь застосування дво- і вище параметричних моделей прогнозування наведені в [14], де встановлено, що прогнозовані оцінки середнього напрацювання на відмову на основі експоненційного розподілу завищені в 70-500 разів у порівнянні з аналогічними оцінками на основі двопараметричних

дифузійних законів розподілу, які дають найбільш адекватні показники надійності виробів електронної техніки.

В роботі [15] зазначено, що прогноз середнього напрацювання до відмови виробів електронної техніки на основі двопараметричних розподілів є точнішим і краще описує дані, одержані емпірично. Причиною не використання таких розподілів є недостатня статистика, яка може призвести до значних похибок оцінки двох параметрів, а також відсутність апарату розрахунку надійності систем на основі двопараметричних розподілів. Наведений в роботі [15] математичний апарат ймовірнісно-фізичної теорії надійності дозволяє вирішувати вказані проблеми. Вказано, що у довідковій літературі наводяться неповні дані про надійність елементів. Зокрема, інтенсивність відмов без вказування напрацювання t_n , при якому вона визначалася; кількість поставлених на випробування елементів N і кількість, яка відмовила r за час випробувань t_r ; мінімальне напрацювання, яке відповідає певній ймовірності відсутності відмови γ ; інтенсивність відмов, що відповідає

відомій ймовірності відмов $\left(F = \frac{r}{N}\right)$.

В роботі [15] наведено методики, які, в залежності від наявної інформації, дозволяють визначити середнє напрацювання до відмови (ресурс) виробів електронної техніки (МТТФ). Методики оцінки середнього напрацювання до відмови на основі:

– результатів випробувань або експлуатації при наявності одиничних відмов: точкова оцінка визначається за формулою:

$$\tilde{T}_0 = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \frac{t_i}{x(i/N; \nu)}, \quad (21)$$

де $x(i/N; \nu) = \frac{t_i}{T_0}$ – відносне напрацювання

визначається за значенням $F_i = i/N$ і коефіцієнта варіації ν з відповідних таблиць DN -розподілу або шляхом рішення рівняння:

$$\Phi\left(\frac{t_r - T_0}{\sqrt{t_r T_0}}\right) + \exp(2) \Phi\left(-\frac{t_r + T_0}{\sqrt{t_r T_0}}\right) = \frac{r}{N}, \quad (22)$$

де $\Phi(\cdot)$ – функція нормованого нормального розподілу;

N – кількість елементів певного типу, які задіяно (поставлено на випробування);

t_r – тривалість випробування (експлуатації);

r – кількість елементів, що відмовили за час t_r ;

– результатів випробувань або експлуатації за відсутності відмов: обчислюють нижню границю ймовірності відсутності відмови елементів, які експлуатуються на час експлуатації t_e :

$$\underline{P}(t_e) = \left(\frac{1-q}{2}\right)^{1/N}, \quad (23)$$

де q – довірча ймовірність оцінки шуканого параметра T_0 (МТТФ), що відповідає двосторонньому довірчому інтервалу.

Обчислюється нижня довірча границя параметра \underline{T}_0 для схеми експлуатації:

$$\underline{P}(t_e) = \Phi\left(\frac{T_0 - t_e}{\sqrt{T_0 t_e}}\right) - \exp(2)\Phi\left(-\frac{T_0 + t_e}{\sqrt{T_0 t_e}}\right). \quad (24)$$

З останнього рівняння одержують нижню довірчу границю параметра \underline{T}_0 у вигляді:

$$\underline{T}_0 = \frac{t_e}{x[1 - \underline{P}(t_e); 1]} = t_e K_1(\underline{P}, 1), \quad (25)$$

де $K_1(\underline{P}, 1)$ – поправочний коефіцієнт, що враховує емпіричну ймовірність відсутності відмов;

$x[1 - \underline{P}(t_e); 1]$ – відносне напрацювання $\left(x = \frac{t_e}{T_0}\right)$, яке визначається з таблиць функції DN -розподілу за значеннями $F = 1 - \underline{P}(t_e)$ і $\nu = 1$ або при рішенні рівняння:

$$F = \Phi\left(\frac{x-1}{\sqrt{x}}\right) + \exp(2)\Phi\left(-\frac{1+x}{\sqrt{x}}\right). \quad (26)$$

З використанням оцінки \underline{T}_0 , відповідної довірчої ймовірності q , визначають точкову оцінку параметра \tilde{T}_0 , розв'язуючи наступне рівняння відносно \tilde{T}_0 :

$$\Phi\left(\frac{\tilde{T}_0 - \underline{T}_0}{\sqrt{\tilde{T}_0 \underline{T}_0}}\right) - \exp(2)\Phi\left(-\frac{\tilde{T}_0 + \underline{T}_0}{\sqrt{\tilde{T}_0 \underline{T}_0}}\right) = q. \quad (27)$$

Розв'язком наведеного рівняння відносно \tilde{T}_0 є вираз:

$$\tilde{T}_0 = \frac{\underline{T}_0}{x[1 - q; 1]} = \underline{T}_0 K_2(q, 1), \quad (28)$$

де $K_2(q, 1)$ – поправочний коефіцієнт, що враховує розподіл напрацювання. Таким чином, точкова оцінка параметра T_0 має вигляд

$$\tilde{T}_0 = t_e K_1(\underline{P}, 1) K_2(q, 1). \quad (29)$$

В роботі [16] пропонується методика оцінки терміну подальшої експлуатації технічних систем на основі даних про відмови під час експлуатації та використання DN -розподілу. Як критерій настання граничного стану використовують зниження середнього напрацювання між відмовами до мінімально допустимого рівня $T_{дон}$, який встановлюють, виходячи з міркувань безпеки і економічності, з погодженням з замовником із рекомендованого ряду: $0,75T_1; 0,5T_1; 0,33T_1; 0,25T_1$, де T_1 – значення середнього напрацювання до відмови. Мінімально допустимий рівень середнього напрацювання між відмовами може бути прийнятий: $T_{дон} \leq T_{ППР}$ ($T_{ППР}$ – період планово-попереджувального ремонту).

При дослідженні надійності, зокрема електротехнічного обладнання (в т.ч. САУ) за рекомендаціями стандартів [17, 18] як теоретичну модель приймають DN -розподіл. Пропонована методика в [16] дозволяє прогнозувати залишковий термін служби в умовах малої статистики відмов, проте всі кількісні показники надійності мають оцінку достовірності і точності, які відповідають статистиці, одержаній за визначений інтервал спостережень. При дослідженні з метою оцінки технічного стану систем з достатньо тривалою експлуатацією і визначенні терміну подальшої експлуатації загальний термін спостережень розбивають на два приблизно рівних інтервали (не менше 1-3 роки), щоб спостерігалось не менше 5-10 відмов на кожному інтервалі. При малій кількості відмов значення коефіцієнта варіації ν напрацювання до відмов вибирають за рекомендаціями [17, 18]. За статистичними даними визначають середнє значення напрацювання на відмову на першому $\tilde{T}_{12} = \frac{S_1}{m_1}$ і другому $\tilde{T}_{22} = \frac{S_2}{m_2}$ інтервалах, де $S_j, j=1,2$ – загальне напрацювання всіх об'єктів за час спостережень; m_1, m_2 – кількість відмов на кожному з інтервалів.

Залишковий термін служби, в роках, визначають за формулою [16]:

$$T_{0,ci} = \frac{1}{8760K_e} \left[\frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{\tilde{T}_{12}}{\tilde{T}_{22}}} (\ln \tilde{T}_{12} - \ln T_{дон}) + t_1 \right], \quad (30)$$

де K_e – коефіцієнт інтенсивності експлуатації.

Висновки

При вирішенні практично всіх завдань надійності використовують певні теоретичні моделі надійності (функції розподілу напрацювання до відмови (на відмову)). В останні роки дослідники надійності техніки використовують рішення різноманітних завдань надійності, які засновані на застосуванні різних теоретичних моделей надійності (експоненційного, Вейбула, логарифмічно нормального, дифузійного та інших розподілів), які призводять до значної розбіжності в отриманих результатах [14].

За результатами дослідження сучасного стану проблеми оцінки надійності САК ГПА виявлено відсутність системного підходу до визначення технічного стану існуючих САУ ГПА за даними експлуатації.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на розроблення методики (алгоритмічне та програмне забезпечення) оцінки реального технічного стану обладнання САК ГПА. За методикою визначають:

- чи знаходиться обладнання в справному стані, що не вимагає будь-якого втручання;
- чи потрібна додаткова увага з боку персоналу або покращений контроль параметрів обладнання;

– чи необхідно виконання додаткових вимірювань, випробувань та інших профілактичних заходів;

– чи потрібне проведення технічного обслуговування і ремонту, модернізації, полегшення режимів роботи або виведення обладнання з експлуатації.

Вихідні дані для дослідження [19]:

– інформація про комплектність встановленого обладнання САУ ГПА;

– інформація про якість роботи обладнання САУ ГПА: з оперативної документації, яку ведуть на КЦ (журнали обліку роботи, технічного обслуговування (ТО) та ремонту, обліку дефектів та відмов, графіків (планів) ТО, актів та протоколів відомчих та Державних повірок тощо);

– інформація про працездатність засобів автоматики і телемеханіки (ЗАіТ) САУ ГПА та суміжних підсистем, які взаємодіють з ними;

– інформація з журналів обліку вимушених зупинок через ЗАіТ САУ ГПА за кількісними характеристиками з аналізом прийнятих рішень для їх усунення: перегляд диспетчерських та змінних журналів за період останніх років роботи або від чергового обстеження КЦ до часу проведення цього обстеження;

– інформація про кількість та стан запасних інструментів і приладів (ЗІП) до САУ ГПА;

– інформація про роботу мікропроцесорних САУ ГПА та суміжних підсистем: за протоколом перевірки спрацювання самодіагностування, який складають перед запуском ГПА в роботу;

– протоколи обстеження в процесі діагностування ЗАіТ САУ ГПА.

Згідно зі статистичними даними про напрацювання САУ ГПА будуть визначені показники надійності, які необхідно порівняти з критеріями за ТУ 108-1162. При цьому для забезпечення безвідмовної роботи ГПА коефіцієнт готовності обладнання повинен бути не меншим за 0,975, а напрацювання на відмову – не менше 8 000 годин.

Технічний результат від застосування розробленої методики філіями та підрозділами ПАТ «УКРТРАНСГАЗ» полягає у можливості оцінки реального технічного стану САУ ГПА та прийнятті рішення щодо можливості їх подальшої експлуатації.

Література

1 Назаренко І. В. Застосування технології розподіленого вводу-виводу в системах автоматичного керування технологічним обладнанням компресорного цеху / І. В. Назаренко, М. Я. Николайчук, В. Д. Ференець // Нафтогазова енергетика. – 2013. – № 2. – С. 79-84.

2 Льченко Б. С. Діагностування функціонально-технічного стану газоперекачувальних агрегатів: монографія / Б. С. Льченко. – Х.: ХНАМГ, 2011. – 228 с.

3 Свердлов А. Б. Анализ надежности газоперекачивающих агрегатов / А. Б. Свердлов // Надежность. – 2015. – №2(53). – С. 62-64.

4 Пегушин С. Л. Применение тактики последовательных контрольных испытаний на надежность элементов АСУ ТП и автоматической ПАЗ в условиях эксплуатации для ее учета при ФМЕА-анализе / С. Л. Пегушин, А. Г. Шумихин // Надежность. – 2014. – №4. – С. 78-86.

5 ГОСТ 27.410-87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. – Введ. 01.01.1989. – 109 с.

6 Седых И. А. Оценка и мониторинг надежности в АСДУ / И. А. Седых // Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России : материалы 8-ой Всероссийской научной конференции, посвященной 80-летию Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – М., 2010. – С. 78.

7 Седых И. А. Информационно-аналитическая система оценки и мониторинга надежности для автоматизированного диспетчерского управления трубопроводным транспортом газа: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» / И. А. Седых. – Москва, 2011. – 24 с.

8 Григорьев Л. И. Математическое обеспечение подсистемы оценки и мониторинга надежности АСДУ в транспорте газа / Л. И. Григорьев, В. В. Калинин, В. Н. Русев, И. А. Седых // Автоматизация в промышленности. – М.: 2010. – № 12. – С. 11–15.

9 Гаврилюк Е. А. Методика оценки технического состояния систем автоматического управления газоперекачивающими агрегатами / Е. А. Гаврилюк, С. А. Манцеров, С. Г. Синичкин // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11 (Ч. 10). – С. 2141-2145.

10 Кубрин С. С. Комплексная оценка технического состояния оборудования на предприятии подземной добычи угля / С. С. Кубрин, А. И. Сукманов // Российский научно-технический журнал МEGATECH Новые технологии в промышленной диагностике и безопасности. – 2012. – №3. – С. 24–28.

11 Гаврилюк Е. А. Прогнозирование отказов систем автоматического управления газоперекачивающими агрегатами на основе индекса технического состояния и степени риска / Е. А. Гаврилюк, С. А. Манцеров, А. Ю. Панов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 7 (часть 2) – С. 309-313.

12 Решение задач диагностирования и прогнозирования в автоматизированной системе управления распределенными объектами / С. Ф. Жуков, М. Д. Дьяченко, А. А. Калантаренко // Диагностика электромеханических систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://aep.at.ua/load/1-1-0-187>

13 Смородов Е. А. Методы повышения надёжности и эффективности технологического и энергетического оборудования в процессах добычи и транспорта нефти и газа: автореф. дис. на соискание уч. степени докт. техн. наук: спец. 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы», 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность» / Е. А. Смородов. – Уфа, 2004. – 47 с.

14 Кофанов Ю. Н. Методические погрешности прогнозирования среднего ресурса изделий электронной техники / Ю. Н. Кофанов, В. П. Стрельников // Надежность. – 2015. – №1. – С. 5-8.

15 Стрельников В. П. Оценка ресурса изделий электронной техники / В. П. Стрельников // Математичні машини і системи. – 2004. – № 2. – С. 186-195.

16 Стрельников В. П. Оценка регламентированного срока дальнейшей эксплуатации технических систем / В. П. Стрельников // Ядерна та радіаційна безпека. – 2008. – № 3. – С. 22-24.

17 ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. – Введ. 01.01.99. – 43 с.

18 ДСТУ 3004-95. Надежность техники. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. – Введ. 01.01.96. – 122 с.

19 СОУ 60.3-30019801-006:2004. Галузева система діагностичного обслуговування обладнання магістральних газопроводів та АГНКС. – Київ : ДК „Укртрансгаз”, 2004. – 178 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
24.10.17*

*Рекомендована до друку
професором **Олійником А.П.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором **Мельничуком С.І.**
(Івано-Франківський університет права
ім. Короля Данила Галицького,
м. Івано-Франківськ)*