

УДК 621.43.001.03

**Ю. М. Чоха**

Національний авіаційний університет

Проспект Космонавта Комарова, 1, 03058 Київ, Україна

## **Прикладні моделі застосування комплексного методу поглибленого діагностування складних динамічних об'єктів експлуатації**

*Розглянуто моделі застосування універсального комплексного контрольно-розрахункового методу та особливості його практичної реалізації у середовищі автоматизованих розрахунково-інформаційних систем для забезпечення оперативної поглибленої оцінки поточного технічного стану типових складних об'єктів авіатехніки.*

**Ключові слова:** автоматизована обробка даних, поглиблене діагностування, комплексний метод, об'єкт експлуатації.

### **Вступ**

Сучасні об'єкти авіатехніки (АТ) — як повітряні судна в цілому, так і їхні конструктивні частини (а саме планер, силова установка, функціональні системи) — відносяться до складних динамічних технічних об'єктів. Після їхнього виготовлення та у період регулярного використання за призначенням виникає необхідність визначення поточного технічного стану (ТС) кожного окремого екземпляру об'єкта АТ і прийняття щодо нього конкретного експлуатаційного рішення. Таким чином, авіаперсоналу, який здійснює експлуатацію типової АТ, необхідно постійно шукати відповідь на два традиційних питання: «У якому технічному стані знаходиться даний об'єкт АТ?» та «Що робити далі з цим об'єктом АТ?». При цьому методи і засоби, які використовуються для отримання відповіді на перше питання, розробляються в межах наукового напрямку «технічна діагностика», а для пошуку відповіді на друге питання застосовуються методи і засоби підтримки прийняття рішень. У [1, с. 24] справедливо зазначено, що «... процеси прийняття рішень тільки тоді стають реально працюючими, коли вони набувають чітко визначену послідовність організаційно-технологічних етапів».

Серед значної кількості існуючих методів і засобів контролю та діагностування об'єктів АТ, які застосовуються в процесах їхнього технічного обслуговування і льотно-технічної експлуатації для управління поточним ТС, найбільш поширеним є постійний параметричний контроль з реєстрацією даних від вбудованих штатних систем з подальшою оцінкою наявності (або відсутності) тренда конт-

рольованих параметрів методами імовірнісної статистики. Прийняття рішення при цьому забезпечується шляхом використання авіаперсоналом бортових (типу МСРП, БАСК, БОР і т.п.), наземних (типу «Луч», «Аналіз», «Контроль» і т.п.) або наземно-бортових (EIDS, XMAN, «Експерт» і т.п.) систем контролю та діагностування (СКД) для типових об'єктів АТ [2]. Проте, враховуючи ту обставину, що переважна більшість сучасних складних авіаційних об'єктів експлуатації (таких як авіадвигуни та їхні функціональні системи) обладнуються незначною кількістю засобів прямого вимірювання параметрів, ефективність існуючих штатних СКД і якість аналізу параметричної інформації залишаються на низькому рівні, що приводить до несвоєчасного виявлення несправностей конструктивних вузлів (елементів) цих об'єктів АТ і неможливості оперативного прийняття авіаперсоналом відповідних експлуатаційних рішень. Як наслідок, збільшується кількість відмов і дострокового припинення експлуатації складних кошторисних об'єктів АТ, знижується рівень безпеки польотів повітряних суден.

Тому особливо важливим і актуальним питанням для авіаційної галузі є вирішення науково-прикладної проблеми підвищення ефективності штатних систем контролю параметрів і якості аналізу параметричної інформації складних динамічних об'єктів АТ для забезпечення оперативної підтримки прийняття авіаперсоналом експлуатаційних рішень як у польоті, так і в міжпольотний період при виконанні оперативного технічного обслуговування.

### **Моделі застосування комплексного методу діагностування**

Одним із перспективних шляхів вирішення вказаної проблеми для процесів поточного діагностування складних об'єктів АТ низького рівня контролепридатності і оперативного прийняття рішення є розробка нових комплексних розрахунково-інформаційних (РІ) методів з глибиною діагностування до конструктивного вузла (елемента), які реалізуються в середовищі гібридних динамічних автоматизованих систем діагностування та підтримки прийняття рішення (АСД ППР). У зв'язку з цим розроблено концептуальну модель комплексного підходу до вирішення проблеми оперативного поглибленого діагностування складних технічних об'єктів (рис. 1) із застосуванням автоматизованої оцінки його поточного ТС з використанням наземних і бортових АСД ППР, а також аналітичну модель застосування комплексного контрольно-розрахункового методу діагностування динамічних об'єктів авіатехніки (рис. 2), яка базується на застосуванні нових РІ-методів діагностування конструктивних вузлів (елементів) типових складних динамічних об'єктів АТ та інформаційних технологій, що реалізують їх у середовищі АСД ППР типу «Експерт-об'єкт АТ» [3].

На основі цих моделей комплексного інформаційно-аналітичного підходу до процесів діагностування типових складних об'єктів АТ пропонується до реалізації новий універсальний комплексний контрольно-розрахунковий (ККР) метод оперативної оцінки їхнього поточного ТС, який, на відміну від існуючих імовірнісних методів параметрично-трендового діагностування, забезпечує послідовне комплексне детерміноване визначення виду поточного технічного діагнозу екземплярів об'єктів АТ у цілому і на поглиблених рівнях (до вузла/елемента) з одночасною пропозицією відповідних технологічних рекомендацій авіаперсоналу з бази

знань середовища АСД ППР. Це дозволяє істотно (у 2–3 рази) підвищити рівень якості аналізу параметричної інформації та знизити тривалість і працездатність процесів діагностування складних динамічних об'єктів без їхніх конструктивних доопрацювань [3]. Реалізація ККР-методу базується на детермінованому системному аналізі параметрів у розширеному діагностичному просторі, яке забезпечується застосуванням робочих алгоритмів аналітичних (багатопараметричних) інформативно-діагностичних моделей (ІДМ) їхніх робочих процесів, спеціалізованих баз знань авіафахівців, нових методів ідентифікації поточного ТС кожного екземпляру об'єктів, що діагностуються, методик прогнозування динаміки деградації ТС, автоматизованих індикативних засобів оперативного інформування авіаперсоналу про результати діагностування з наданням йому конкретних технологічних рекомендацій для прийняття експлуатаційних рішень [3–5].

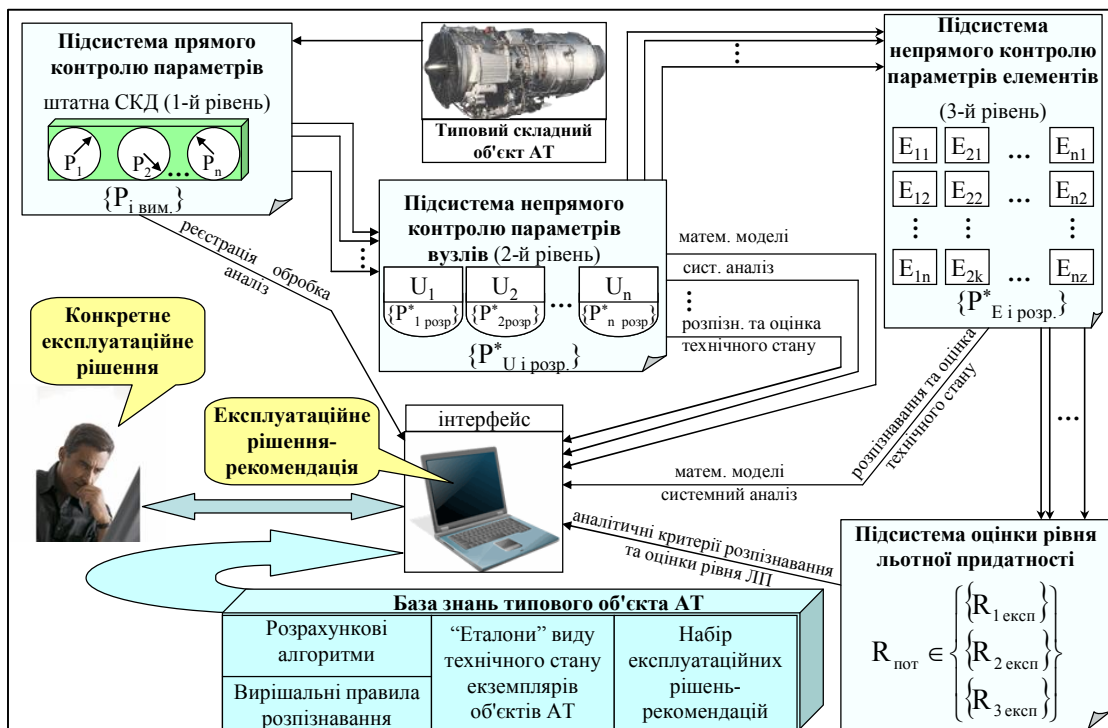


Рис. 1. Концептуальна модель комплексного підходу до вирішення проблеми оперативного поглибленого діагностування складних технічних об'єктів

Узагальнена модель застосування комплексного методу поглибленого діагностування складного динамічного об'єкта АТ (на прикладі авіадвигуна) (рис. 3) містить чотири умовних етапи:

**I етап** — формування бази поточних даних екземпляру типового об'єкта АТ у вигляді сукупності  $\{P_{i \text{ вим.}}\}$  вимірених і зареєстрованих штатною СКД поточних усереднених значень параметрів та умов зовнішнього середовища на усталеному режимі роботи даного екземпляру об'єкта АТ; приведення вимірених параметрів до стандартних атмосферних умов і діагностичного режиму; подання сукупності  $\{P_{i \text{ вим.пр.}}\}$  на вхід бази знань АСД ППР типу «Експерт-об'єкт АТ»;

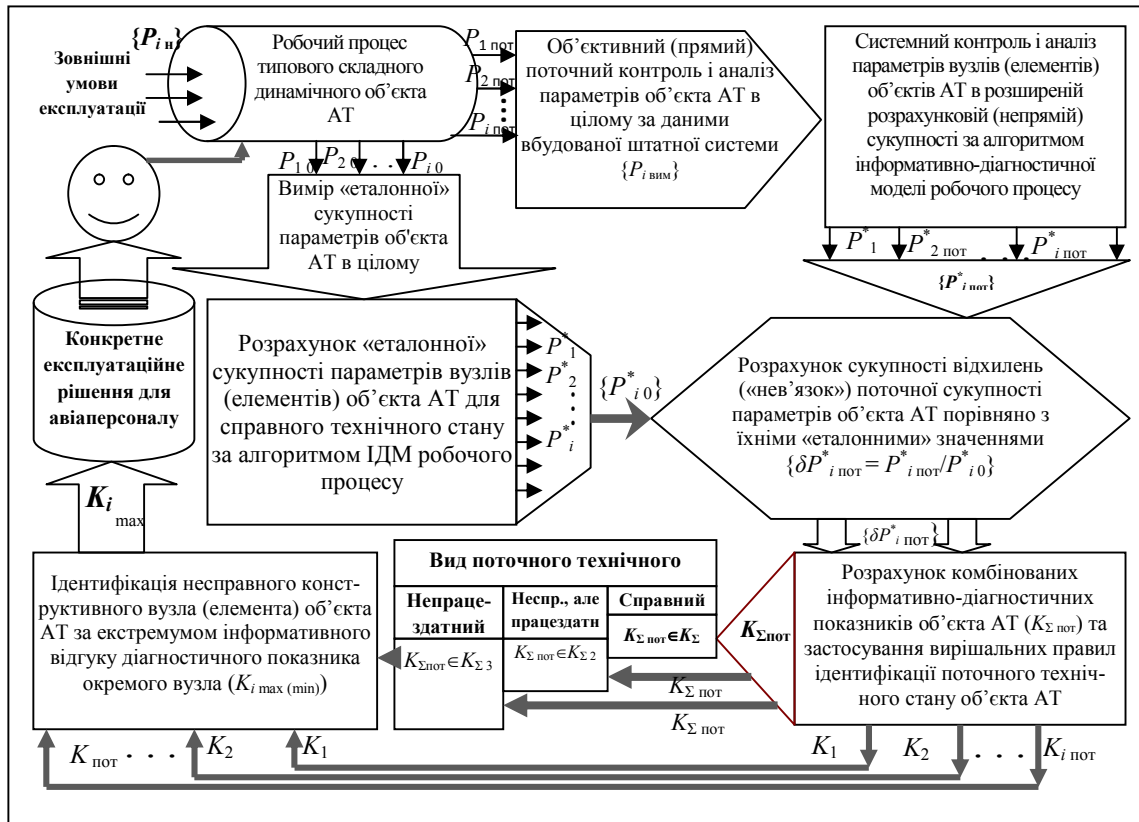


Рис. 2. Аналітична модель застосування комплексного контрольно-розрахункового методу діагностування динамічних об'єктів авіатехніки

**II етап** — кардинальне розширення поточної інформативно-діагностичної бази екземпляру об'єкта АТ шляхом реалізації спеціального розрахункового алгоритму багатопараметричної ІДМ його робочого процесу та формування розширеної поточної сукупності  $\{P_{ip}^*\}$  розрахункових параметрів, які характеризують поточний ТС як даного об'єкта АТ у цілому, так і його вузлів (елементів); подання сукупності  $\{P_{ip}^*\}$  на вхід блоку порівняння значень параметрів у базі знань АСД ППР;

**III етап** — визначення виду поточного технічного діагнозу екземпляру об'єкта АТ шляхом порівняння поточної  $\{P_{ip}^*\}$  сукупності значень параметрів з «еталонною» сукупністю  $\{P_{i0}^*\}$  тих же параметрів того ж екземпляру об'єкта АТ, які виміряні і розраховані заздалегідь на початку його експлуатації і характеризують його справний ТС та зберігаються в архівному блоці бази знань АСД ППР. Після визначення сукупності відносних відхилень  $\{\delta P_i\} = \{P_{ip}^* / P_{i0}^*\}$ , що характеризують наявність або відсутність істотних відхилень параметрів, і застосування спеціальних вирішальних правил, визначається як загальний технічний діагноз

даного екземпляру об'єкта АТ, так і його оцінка на поглиблених рівнях (до конструктивного вузла/елемента); представлення результатів оцінки поточного діагнозу на вхід блоку експлуатаційних рішень бази знань АСД ППР;

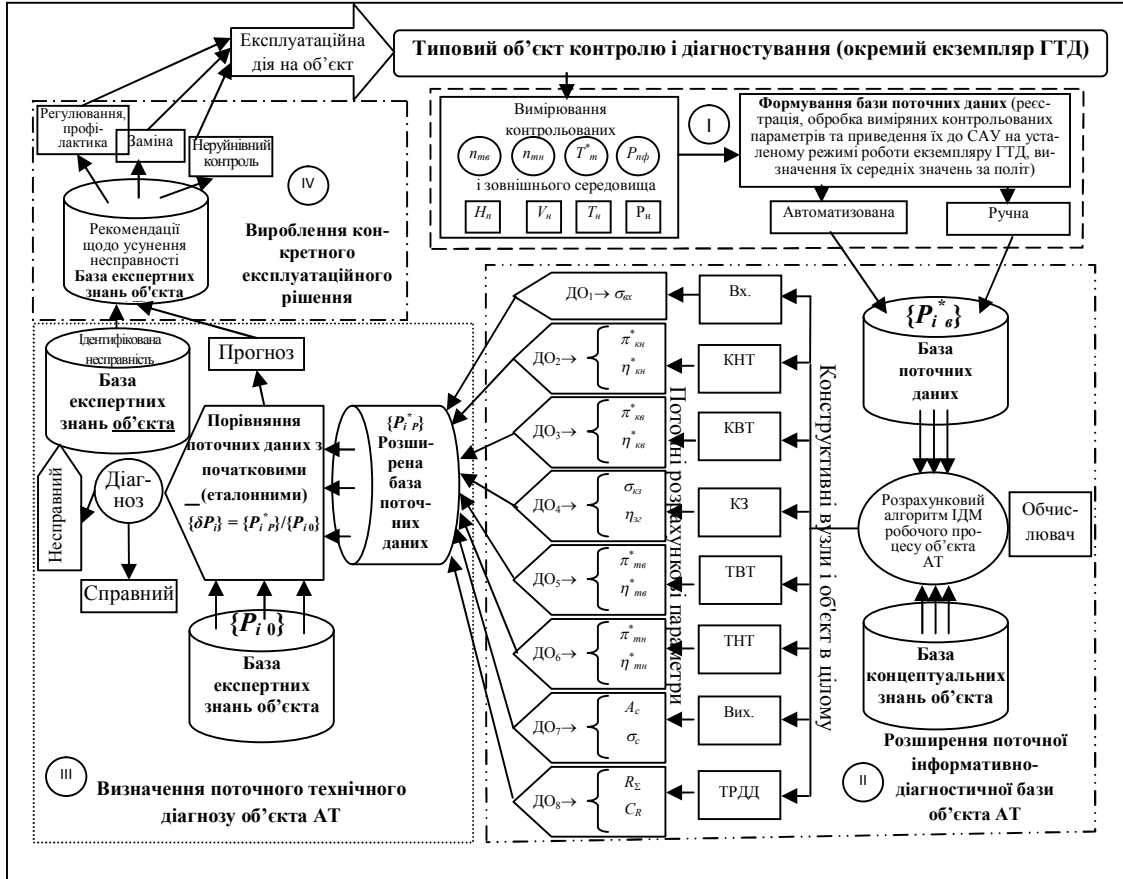


Рис. 3. Узагальнена модель застосування комплексного методу поглибленого діагностування складного динамічного об'єкта АТ (на прикладі авіадвигуна)

**IV етап** — визначення експлуатаційного рішення і технологічних рекомендацій авіаперсоналу за результатами оцінки поточного технічного діагнозу шляхом надання спеціального інформаційного повідомлення і набору технологічних операцій, які заздалегідь розроблені для кожного можливого варіанта технічного діагнозу типового об'єкта АТ і зберігаються в архіві бази знань АСД ППР.

Таким чином, принципово більш висока ефективність ККР-методу порівняно з існуючими полягає в поєднанні сучасних інформаційних технологій у вигляді сформованої бази знань, спеціальних розрахункових алгоритмів, вирішальних правил і їхнього програмного забезпечення, які реалізуються в середовищі АСД ППР типу «Експерт-об'єкт АТ», з детермінованим інформаційним середовищем штатної СКД екземпляру типового об'єкта АТ. Таке поєднання інформаційних середовищ забезпечує високу оперативність оцінки виду поточного ТС, підтримку прийняття авіаперсоналом рішення і мінімальні працевитрати на процес діагностування складних об'єктів АТ на поглиблених рівнях, а також кардинальне підвищення рівнів параметричної інформативності об'єктів АТ та якості аналізу їх-

ніх параметрів без істотних конструктивних доопрацювань та практичну можливість реалізації їхньої експлуатації за ТС з контролем параметрів. Однією з основних відмінностей ККР-методу від існуючих є модель застосування методу порівняння ІДМ робочого процесу об'єкта АТ (рис. 4), який знаходиться в справному (еталонному) ТС, з ІДМ робочого процесу цього ж об'єкта, що знаходиться в поточному ТС [3].

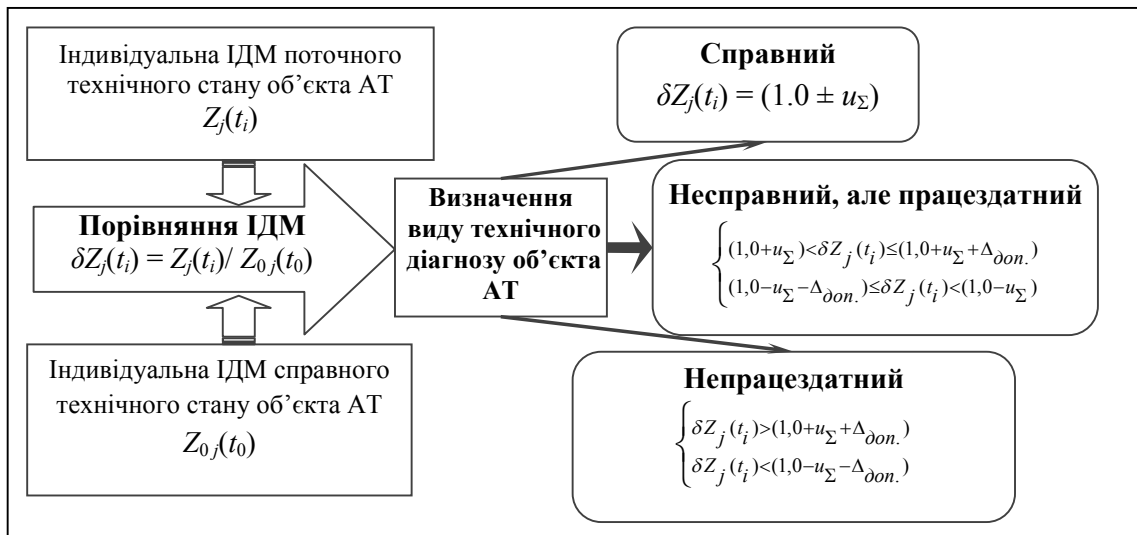


Рис. 4. Модель застосування методу порівняння інформативно-діагностичних моделей робочого процесу типового об'єкта АТ

Це дає можливість комплексно і більш глибоко, ніж у даний час, контролювати й оцінювати зміни ТС вузлів окремих екземплярів об'єктів АТ без їхніх конструктивних доопрацювань в умовах реальної експлуатації. Аналітична структура моделі умовного порівняння ІДМ поточного та еталонного ТС має наступний вигляд:

$$\delta Z_j(t_i) = \frac{z_j(t_i)}{z_{0j}(t_0)} = \delta \varphi_j [\delta x_i + \delta y_i + u_\Sigma], \text{ де } \delta x_i, \delta y_i \text{ — відповідно відносні відхилення поточних значень вимірюваних і розрахункових контрольованих параметрів об'єкта АТ від їхніх початкових значень, які відповідають технічним умовам; } u_\Sigma \text{ — сумарна похибка вимірювання (розрахунку) } i\text{-х параметрів ІДМ.}$$

Виходячи із суті запропонованої моделі застосування комплексного контрольно-розрахункового методу поточного контролю і оцінки ТС складних динамічних об'єктів АТ, пропонуються прикладні функціонально-аналітична (рис. 5) і структурно-інформаційна моделі автоматизованої системи діагностування та підтримки прийняття рішень типу «Експерт-об'єкт АТ» (рис. 6), які пояснюють процеси взаємодії бази знань і функціонування АСД ППР у процесах діагностування екземплярів об'єктів АТ [3].

## Моделі практичної реалізації комплексного методу діагностування авіадвигунів

Виходячи із суті запропонованої моделі застосування комплексного контрольно-розрахункового методу поточного контролю і оцінки ТС складних динамічних об'єктів АТ, пропонуються прикладні функціонально-аналітична (рис. 5) і структурно-інформаційна моделі автоматизованої системи діагностування та підтримки прийняття рішень типу «Експерт-об'єкт АТ» (рис. 6), які пояснюють процеси взаємодії бази знань і функціонування АСД ППР у процесах діагностування екземплярів об'єктів АТ [3].

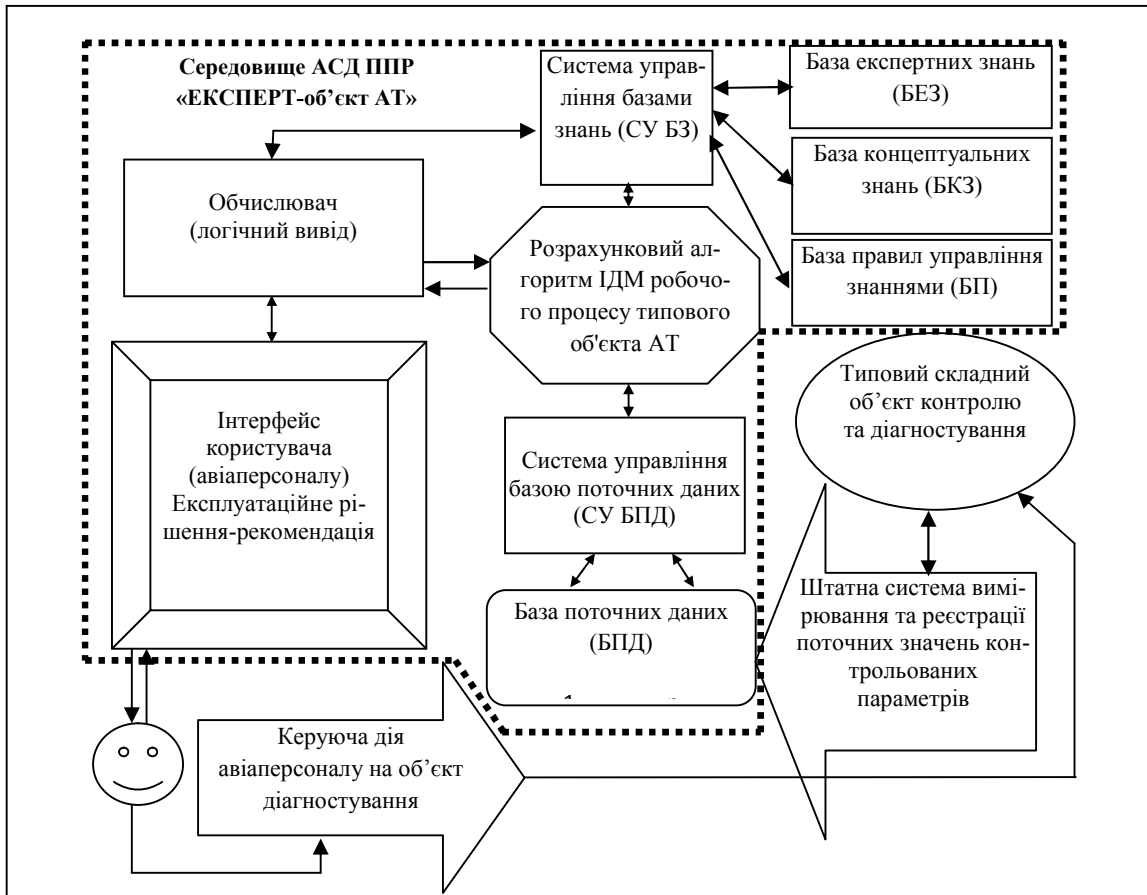


Рис. 5. Функціонально-аналітична модель АСД ППР типу «Експерт-об'єкт АТ»

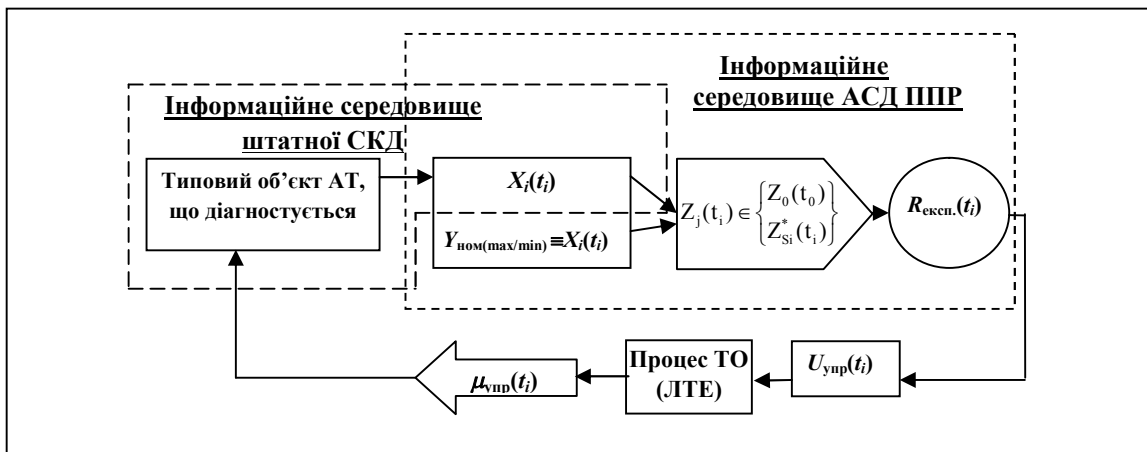


Рис. 6. Структурно-інформаційна модель АСД ППР типу «Експерт-об'єкт АТ»

При цьому прикладна модель АСД ППР типового об'єкта АТ повинна задовольняти наступним аналітичним моделям його технічних станів.

1. Аналітична інформативно-діагностична модель робочого процесу об'єкта АТ для справного (еталонного) технічного стану:

$$Z_0(t_0) = f(\{X_i = Y_{\text{ном}}; t_0\}).$$

2. Аналітична інформативно-діагностична модель робочого процесу об'єкта АТ для несправного ТС:

$$Z_{Si}^*(t_i) = f(\{X_i \geq Y_{\text{max}}; t_i\}),$$

або

$$Z_{Si}^*(t_i) = f(\{X_i \leq Y_{\text{min}}; t_i\}).$$

3. Аналітична інформативно-діагностична модель робочого процесу об'єкта АТ для поточного ТС:

$$Z_j(t_j) = f(\{X_j = Y_i; t_j\}) \in \{Z_0(t_0) \text{ або } Z_{Si}^*(t_i)\}.$$

Граничні умови:

— множина несправних ТС  $\{S_i\}$  об'єкта АТ кінцева:

$$\{S_i\} \in S, i = 1, 2, \dots, |S| \dots;$$

— множина окремих експлуатаційних несправностей  $\{O_i\}$  об'єкта АТ кінцева:

$$\{O_i\} \in O, i = 1, 2, \dots, |O| \dots;$$

— забезпечується повна сумісність АСД ППР зі штатною СКД, тобто має місце відповідність бази знань (БЗ), що міститься в середовищі АСД ППР ( $BZ|_{АСД\ ППР} \{Y_{\text{ном}}; Y_{\text{max}}; Y_{\text{min}}\}$ ), бази поточних даних (БПД), що сформована штатною СКД типового об'єкта АТ ( $БПД|_{СКД} \{X_i(t_i)\}$ ):

$$BZ|_{АСД\ ППР} Y_{\text{ном}}; Y_{\text{max}}; Y_{\text{min}} = БПД|_{СКД} \{X_i(t_i)\};$$

— усі окремі екземпляри об'єктів АТ, що діагностуються, належать до класу об'єктів безперервної дії, тобто значення контрольованих параметрів і діагностичних ознак об'єктів змінюються за часом їхнього напрацювання безперервно:

$$\{X_i = f(t_i)\};$$



— рішення-рекомендації для авіаперсоналу з питань експлуатації  $\{R_{\text{експ}} = (t_i)\}$  під час роботи АСД ППР залежать від значення функціоналу  $\{Z_j(t_j)\}$ , який оцінює вид поточного технічного стану об'єкта діагностування (тобто, вид його технічного діагнозу):

$$\{R_{\text{експ}}(t_i)\} = f\{Z_j(t_j)\}.$$

### Умови практичного використання комплексного методу

Для практичного застосування даного методу діагностування потрібно виконати наступні умови:

- визначення Замовником конкретних типів об'єктів АТ, які потребують оперативного діагностування та автоматизованої підтримки прийняття рішення в умовах експлуатації;
- наявність теоретичних і практичних основ побудови спеціалізованих гібридних динамічних автоматизованих систем діагностування складних об'єктів;
- наявність сформованого колективу фахівців-розробників (експертів, інженерів по знаннях і системних програмістів);
- забезпечення фінансової підтримки;
- реалізація прикладних методик синтезу адекватних багатопараметричних інформативно-діагностичних моделей робочих процесів типових об'єктів АТ;
- використання спеціальних методів оперативної ідентифікації виду поточного ТС окремих екземплярів об'єктів діагностування без їхнього демонтування;
- застосування сучасного програмного забезпечення для моделювання середовищ спеціалізованих баз знань автоматизованих систем;
- використання новітніх інструментальних засобів обробки та відображення різних видів інформації.

### Інформаційні технології реалізації комплексного методу в середовищі АСД ППР типу «ЕКСПЕРТ-об'єкт АТ»

Для апробації комплексного контрольно-розрахункового методу і виконання зазначених умов його реалізації на конкретних складних об'єктах АТ (різномісних авіадвигунах) розроблені:

1) прикладні методики та розрахункові алгоритми аналітичних ІДМ робочих процесів двоконтурних газотурбінних двигунів [3], в яких використовується повна система нелінійних рівнянь і критеріїв динамічної подібності, що описує параметри на вході і виході кожного конструктивного вузла проточної частини, враховує їхню спільну роботу і закони управління на ustalених режимах роботи. Це дозволяє істотно (більш, ніж на порядок) розширити інформативно-діагностичну базу об'єктів АТ низького рівня контролепридатності і дає можливість визначити зміну параметрів вузлів (елементів) залежно від різновидів можливих експлуатаційних пошкоджень. Працездатність і адекватність ІДМ забезпечується реалізацією методу лінійної оптимізації параметрів з обмеженням за технічними умовами, а їхнє підтвердження здійснюється шляхом порівняння отриманих результатів

аналітичного моделювання з відомими тестовими експериментальними даними по окремим типам авіадвигунів, отриманих в ОКБ їхніх виробників, а також з даними комплексних експериментальних досліджень, що виконані на натурному газодинамічному стенді типового авіадвигуна;

2) алгоритм реалізації нового виду інформативно-пошукового підходу для оперативного автоматизованого розпізнавання у вигляді комбінованого функціонально-тестового (КФТ) методу ідентифікації [4]. Цей метод, на відміну від існуючих функціональних або тестових методів ідентифікації, базується на використанні послідовної комбінації спеціальних розрахунково-функціональних алгоритмів і вирішальних тестових правил для ідентифікації виду поточного ТС як окремих екземплярів складних об'єктів АТ, які діагностуються в цілому, так і їхніх конструктивних вузлів. Даний метод реалізовано у вигляді робочих алгоритмів і адаптовано в межах вищерозглянутого ККР-методу діагностування об'єктів АТ на чотирьох умовних етапах із застосуванням чітких вирішальних правил на прикладі діагностування типових складних об'єктів АТ (типу авіадвигунів);

3) узагальнений алгоритм вирішення задачі діагностування типових складних динамічних об'єктів АТ до вузла ККР-методом у поєднанні з алгоритмами реалізації КФТ-методу ідентифікації на прикладах різнотипних двигунів і автоматизований інформативно-діагностичний сигналізатор [5] з варіантами баз знань і програмного забезпечення, які практично реалізують їх у середовищі АСД ППР типу «Експерт-об'єкт АТ» для підтримки прийняття експлуатаційних рішень.

Результати тестової апробації запропонованого методу демонструють його працездатність, достовірність, ефективність і можливість реалізації у реальних умовах експлуатації складних об'єктів АТ на авіапідприємствах. При цьому показано, що використання автоматизованих АСД ППР на всіх етапах процесу оцінки ТС силової установки до конструктивного вузла дозволяє забезпечити збільшення рівня його оперативності в 3,3 рази (для силової установки Як-40) і в 2,7 рази (для силової установки Іл-76), а рівень якості аналізу параметричної інформації у процесах діагностування таких складних об'єктів АТ підвищується в два рази [3].

Це призводить до кардинального якісного підвищення рівня параметричної інформативності процесів їхнього діагностування від існуючого низького до високого рівня без значних економічних витрат і дозволяє значною мірою знизити показники тривалості і працездатності цього процесу.

## **Висновки**

До переваг розглянутого комплексного методу діагностування складних динамічних об'єктів АТ із застосуванням середовищ автоматизованих систем підтримки прийняття рішень варто віднести:

- універсальність застосування методу для різнотипових об'єктів АТ;
- оперативність визначення оцінки поточного технічного стану кожного окремого екземпляру об'єкта АТ, що діагностується, без його демонтажу з повітряного судна в умовах експлуатації з визначенням конкретних технологічних рекомендацій авіаперсоналу для підтримки прийняття експлуатаційного рішення;
- мінімальні працевитрати на технологію діагностування складного об'єкта АТ у цілому і його окремих конструктивних вузлів;

- забезпечення діагностування типових об'єктів АТ на поглиблених рівнях (до конструктивного вузла/елемента);
- кардинальне підвищення рівнів параметричної інформативності, контролепридатності і експлуатаційної технологічності без істотних конструктивних доопрацювань сучасних об'єктів АТ;
- значне підвищення рівнів автоматизації та інформаційного забезпечення процесів діагностування складних динамічних об'єктів АТ;
- практичне забезпечення можливості реалізації стратегії технічного обслуговування об'єктів АТ за технічним станом з контролем параметрів.

1. *Морозов А.А.* Ситуационные центры: информационные технологии будущего / А.А. Морозов, В.А. Ященко. — К.: Интертехнодрук, 2008. — 332 с.
2. *Безпека авіації* / Бабак В.П., Харченко В.П., Максимов В.О. та ін. — К.: Техніка, 2004. — 584 с.
3. *Чоха Ю.М.* Прикладні автоматизовані системи діагностування та підтримки прийняття експлуатаційних рішень: Методи, моделі, інформаційні технології: Монографія / Ю.М. Чоха, В.В. Кретов. — Київ: Ун-т Україна, 2010. — 488 с.
4. *Пат. 34671* Україна, МПК G07C 3/00. Спосіб комбінований функціонально-тестовий оперативної оцінки технічного діагнозу газотурбінного двигуна і його конструктивних вузлів проточної частини / Чоха Ю.М.: опубл. 26.08.2008; Бюл. №16.
5. *Пат. 30615* Україна, МПК G07C 3/14. Сигналізатор автоматизований інформаційно-діагностичний для оперативної оцінки технічного діагнозу складних динамічних об'єктів технічної експлуатації / Чоха Ю.М.: опубл. 11.03.2008; Бюл. № 5.

Надійшла до редакції 12.02.2013