

УДК 681.3.069:681.3.015

Ю. М. Чоха, О. П. Федорчук

Авіапідприємство ТОВ «КБ Вертикаль»

а/с № 98, 03115 Київ, Україна

тел. 459-42-31

Особливості реалізації комплексного контрольно-розрахункового методу в процесах діагностування складних динамічних об'єктів авіатехніки

Розглянуто методологічні етапи здійснення універсального комплексного контрольно-розрахункового методу і особливості його практичної реалізації в середовищі автоматизованих розрахунково-інформаційних систем для забезпечення оперативної поглибленої оцінки поточного технічного стану типових складних об'єктів авіатехніки та підтримки прийняття авіаперсоналом експлуатаційного рішення.

Ключові слова: об'єкт авіатехніки, система контролю параметрів, метод діагностування, система підтримки прийняття рішення.

Вступ

Серед значної кількості існуючих методів і засобів контролю та діагностування об'єктів авіатехніки (АТ), що застосовуються в процесах їхнього технічного обслуговування (ТО) і льотно-технічної експлуатації (ЛТЕ) для управління поточним технічним станом (ТС), найбільш розповсюдженим є постійний параметричний контроль з реєстрацією даних від вбудованих штатних систем і наступною оцінкою наявності (або відсутності) тренду контрольованих параметрів методами імовірнісної статистики. Прийняття рішення при цьому забезпечується шляхом використання авіаперсоналом бортових (типу МСРП, БАСК, БУР 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. Проте, зважаючи на 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 та якість аналізу параметричної інформації залишається на низькому рівні, що приводить до несвоечасного виявлення несправностей конструктивних вузлів (елементів) цих об'єктів АТ і неможливості оперативного прийняття авіаперсоналом відповідних експлуатаційних рішень. Як наслідок цього збільшується кількість відмов і дострокового припинення експлуатації складних кошторисних об'єктів АТ, і знижується рівень безпеки

© Ю. М. Чоха, О. П. Федорчук

польотів повітряних суден.

Тому особливо важливим і актуальним питанням для авіаційної галузі є вирішення **науково-прикладної проблеми** щодо підвищення ефективності штатних систем контролю параметрів та 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.

Модель реалізації комплексного контрольньо-розрахункового методу діагностування

Одним із перспективних шляхів щодо вирішення зазначеної проблеми для процесів поточного діагностування складних об'єктів АТ низьких рівнів контролепридатності та оперативності прийняття рішення являється розроблення нових комплексних розрахунково-інформаційних (PI) методів із глибиною діагностування до конструктивного вузла (елемента), які реалізуються в середовищах гібридних динамічних автоматизованих систем діагностування та підтримки прийняття рішення (АСД ППР). У зв'язку з цим розроблено концептуальну інформаційну модель застосування автоматизованої оцінки поточного ТС типового складного об'єкта АТ із використанням наземних і бортових АСД ППР і розроблено її методологічну модель, що базується на застосуванні нових розрахунково-інформаційних методів діагностування конструктивних вузлів (елементів) типових складних динамічних об'єктів АТ та інформаційних технологій, які їх реалізують у середовищі АСД ППР типу «ЕКСПЕРТ – об'єкт АТ».

На основі моделі комплексного інформаційно-аналітичного підходу до процесів діагностування типових складних об'єктів АТ пропонується до реалізації новий універсальний комплексний контрольньо-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 в цілому та на поглиблених рівнях (до вузла/елемента) з одночасним виробленням відповідних технологічних рекомендацій авіаперсоналу з бази знань середовища АСД ППР. Це дозволяє суттєво (у декілька разів) підвищити рівень якості аналізу параметричної інформації та знизити тривалість і працеемність процесів діагностування складних динамічних об'єктів без їхніх конструктивних доопрацювань. Реалізація ККР-методу базується на детермінованому системному аналізі параметрів у розширеному діагностичному просторі, що забезпечується застосуванням робочих алгоритмів аналітичних багатопараметричних інформативно-діагностичних моделей (ІДМ) їхніх робочих процесів, спеціалізованих баз знань авіафахівців, інформаційно-пошукових методів ідентифікації поточного ТС кожного екземпляра об'єктів, що діагностуються, методик прогнозування динаміки деградації ТС та автоматизованих індикативних засобів оперативного інформування авіаперсоналу про результати діагностування та надання йому конкретних технологічних рекомендацій для прийняття експлуатаційних рішень. Особливостями реалізації даного методу на кожному з 4-х умовних етапів процесу діагностування типового складного об'єкта АТ є наступні (рис. 1).

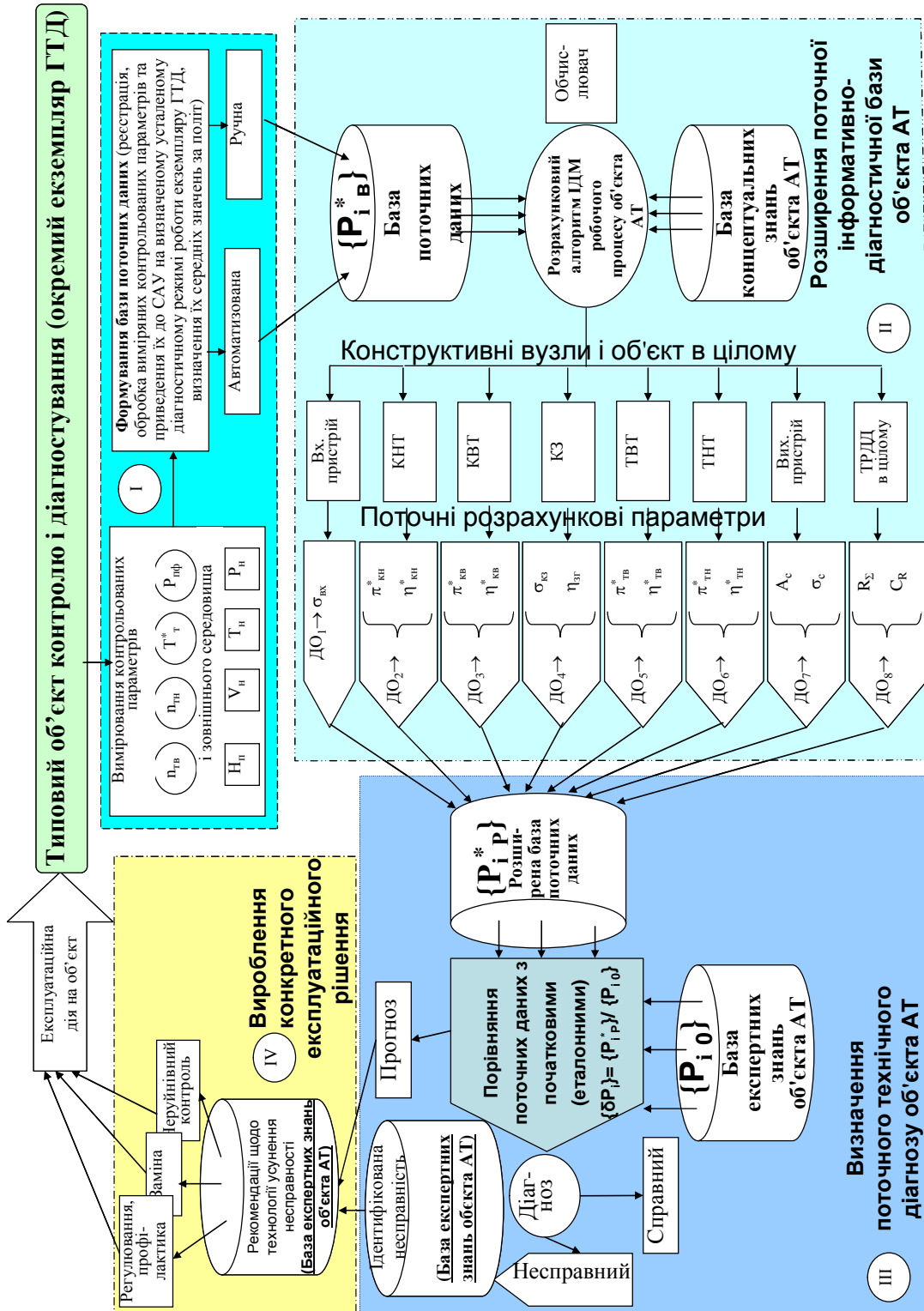


Рис. 1. Модель реалізації КKR-методу діагностування складного динамічного об'єкта АТ (на прикладі авіадвигуна)

I-й етап — формування бази поточних даних екземпляра типового об'єкта АТ у вигляді сукупності $\{P_{i_6}^*\}$ виміряних і зареєстрованих штатною СКД поточних усереднених значень параметрів та умов зовнішнього середовища на усталеному режимі роботи даного екземпляра об'єкта АТ; приведення виміряних параметрів до стандартних атмосферних умов і діагностичного режиму; подання сукупності $\{P_{i_{в.пр.}}^*\}$ на вхід бази знань АСД ППР типу «ЕКСПЕРТ – об'єкт АТ».

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

III-й етап — визначення виду поточного технічного діагнозу екземпляра об'єкта АТ шляхом порівняння поточної сукупності $\{P_{i_p}^*\}$ значень параметрів з «еталонною» сукупністю $\{P_{i_0}^*\}$ тих же параметрів того ж екземпляра об'єкта АТ, які виміряні та розраховані заздалегідь на початку його експлуатації, характеризують його справний ТС і зберігаються в архівному блоці бази знань АСД ППР; після визначення сукупності відносних відхилень $\{\delta P_i\} = \{P_{i_p}^*\} / \{P_{i_0}^*\}$, що характеризує наявність або відсутність суттєвих відхилень параметрів, і застосування спеціальних вирішальних правил визначається як загальний технічний діагноз даного екземпляра об'єкта АТ, так і його оцінка на поглиблених рівнях (до конструктивного вузла/елемента); подання результатів оцінки поточного діагнозу на вхід блоку експлуатаційних рішень бази знань АСД ППР.

IV-й етап — визначення експлуатаційного рішення та технологічних рекомендацій авіаперсоналу за результатами оцінки поточного технічного діагнозу шляхом надання спеціального інформаційного повідомлення та набору технологічних операцій, які заздалегідь розроблені для кожного можливого варіанта технічного діагнозу типового об'єкта АТ і зберігаються в архіві бази знань АСД ППР. Отже, принципово вища ефективність ККР-методу в порівнянні з існуючими полягає у поєднанні сучасних інформаційних технологій у вигляді сформованої бази знань, спеціальних розрахункових алгоритмів, вирішальних правил та їхнього програмного забезпечення, що реалізуються в середовищі АСД ППР типу «ЕКСПЕРТ – об'єкт АТ», із детермінованим інформаційним середовищем штатної СКД екземпляра типового об'єкта АТ. Таке поєднання інформаційних середовищ забезпечує оперативність оцінки виду поточного ТС, підтримку прийняття авіаперсоналом рішення та мінімальні трудовитрати на технологію діагностування складних об'єктів АТ на поглиблених рівнях, а також кардинальне підвищення рівнів параметричної інформативності об'єктів АТ та якості аналізу їхніх параметрів без суттєвих конструктивних доопрацювань і практичну можливість реалізації їхньої експлуатації за ТС з контролем параметрів. Однією з основних відмінностей ККР-методу від існуючих є застосування методу порівняння ІДМ робочого процесу

об'єкта АТ, що знаходиться у справному (еталонному) ТС із ІДМ робочого процесу цього ж об'єкта, що знаходиться у поточному ТС (рис. 2) [1].

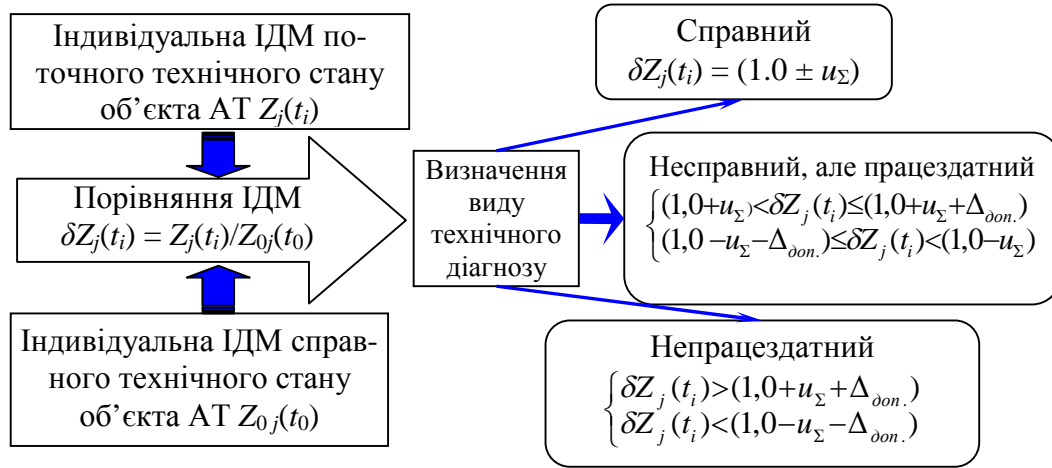


Рис. 2. Модель застосування методу порівняння ІДМ робочого процесу типового об'єкта АТ

Це дає змогу комплексно і більш глибоко, ніж у поточний 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:

$$\delta Z_j(t_i) = Z_j(t_i) / Z_{0j}(t_0) = \delta \phi_j [\delta x_i + \delta y_i + u_\Sigma],$$

де $\delta x_i, \delta y_i$ — відповідно відносні відхилення поточних значень виміряних і розрахункових контрольованих параметрів об'єкта АТ від їхніх початкових значень, що відповідають ТУ; u_Σ — сумарна похибка вимірювання (розрахунку) i -х параметрів ІДМ.

Виходячи із суті запропонованої моделі реалізації ККР методу поточного контролю й оцінки ТС складних динамічних об'єктів АТ, прикладна модель АСД ППР типового об'єкта АТ має задовольняти наступним аналітичним моделям його технічних станів.

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

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

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

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

або

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

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

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

Граничними є наступні умови:

— множина несправних ТС об'єкта АТ кінцева:

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

— множина окремих експлуатаційних несправностей об'єкта АТ кінцева:

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

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

$$\text{БЗ}_{|АСДППР}\{Y_{ном}; Y_{max}; Y_{min}\} \equiv \text{БПД}_{|СКД}\{X_i(t_i)\};$$

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

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

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

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

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

Для апробації ККР-методу та виконання зазначених достатніх умов його реалізації на конкретному складному об'єкті АТ (типовому авіадвигуні) розроблено:

1) прикладні методики та розрахункові алгоритми аналітичних ІДМ робочих процесів двоконтурних газотурбінних двигунів (ГТД) [2], в яких застосовано повну систему нелінійних рівнянь і критеріїв динамічної подібності, що описують параметри на вході і виході кожного конструктивного вузла проточної частини й

враховують їхню спільну роботу та закони керування на ustalених режимах роботи. Це дозволяє суттєво (більше, ніж на порядок) розширити інформативно-діагностичну базу об'єктів АТ низького рівня контролепридатності та надає можливість визначення зміни параметрів вузлів (елементів) у залежності від різновидів можливих експлуатаційних пошкоджень. Працездатність та адекватність ІДМ забезпечується реалізацією методу лінійної оптимізації параметрів із обмеженням за технічними умовами, які перевірялись і доводилися шляхом порівняння одержаних результатів аналітичного моделювання з відомими тестовими експериментальними даними по окремих типах авіадвигунів, отриманих у конструкторських бюро їхніх виробників, а також із даними комплексних експериментальних досліджень, виконаних авторами на натурному газодинамічному стенді типового авіадвигуна;

2) алгоритм реалізації нового виду інформаційно-пошукового підходу до оперативного автоматизованого розпізнавання у вигляді комбінованого функціонально-тестового (КФТ) методу ідентифікації [3]. 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, що діагностують у цілому, так і їхніх конструктивних вузлів. Проаналізовано особливості реалізації його алгоритму в межах вищезрозглянутого ККР-методу діагностування об'єктів АТ на 4-х умовних етапах із застосуванням чітко визначених вирішальних правил на прикладі діагностування типових складних об'єктів АТ (типу авіадвигунів);

3) розроблено і представлено узагальнений алгоритм рішення задач діагностики типових складних динамічних об'єктів АТ до вузла ККР-методом у сполученні з алгоритмами реалізації КФТ-методу ідентифікації на прикладах різнотипових двигунів і автоматизований інформативно-діагностичний сигналізатор [4, 5] (рис. 3) з варіантами баз знань й 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 в реальних умовах експлуатації складних об'єктів АТ в авіапідприємствах.

В якості прикладу на рис. 4, 5 представлено програмну реалізацію роботи ККР-методу в середовищі АСД ППР «ЕКСПЕРТ – об'єкт АТ» щодо поточного діагностування типового авіадвигуна (типу Д-30КП) і відображення даних технічного діагнозу з експлуатаційним рішенням для авіаперсоналу.

Для оцінки ефективності застосування ККР-методу в середовищі прикладної АСД ППР «ЕКСПЕРТ – об'єкт АТ» проведено порівняльний розрахунковий аналіз значень критерію ефективності (K_E) систем діагностування типових авіадвигунів із використанням як їхніх штатних СКД, так і доопрацьованих надбудовами АСД ППР шляхом реалізації відомої методики оцінки даного критеріального показника [6]:

$$K_E = \prod_{i=1}^n P_i = P_1 \cdot P_2 \dots P_n,$$

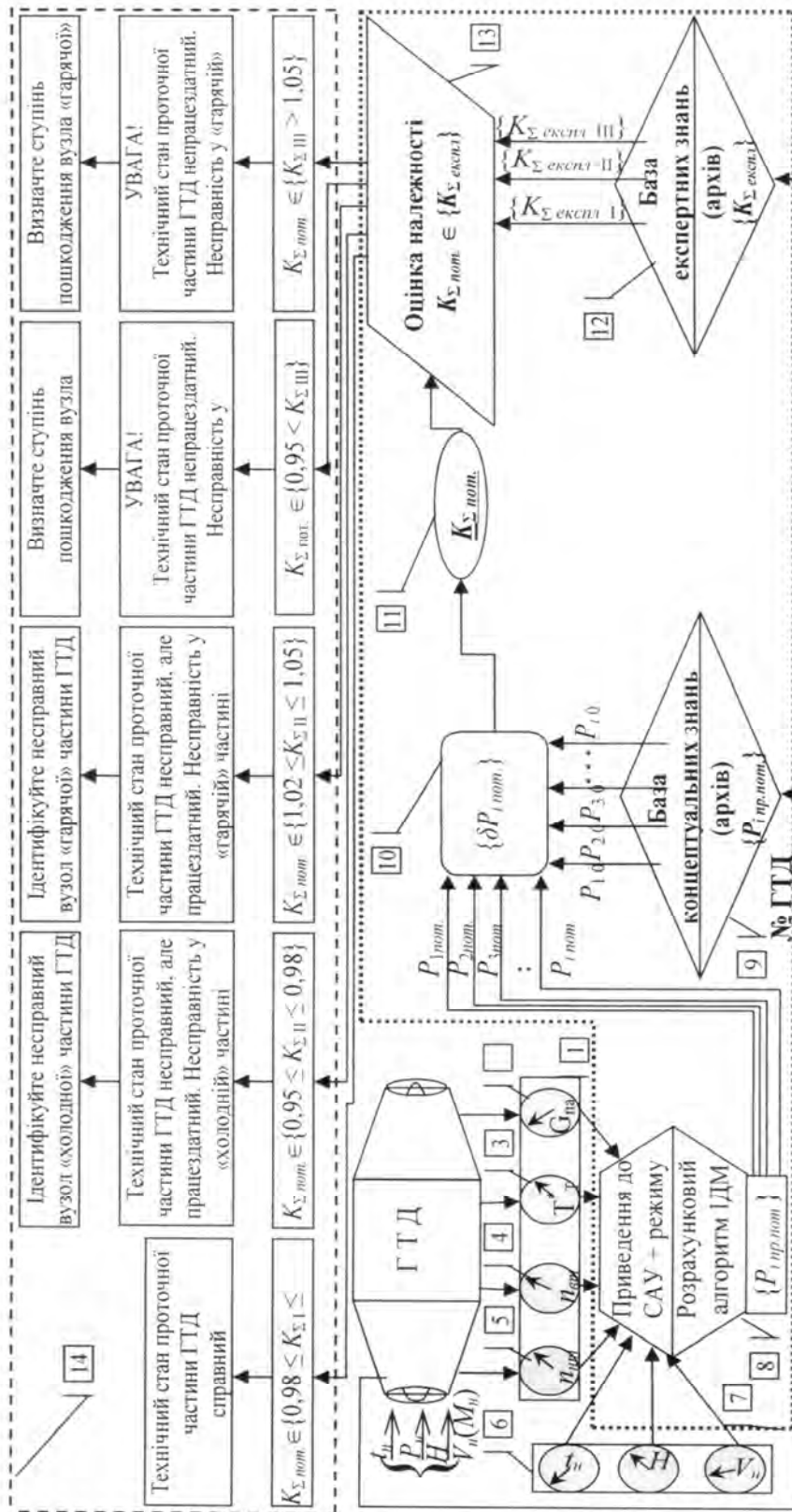


Рис. 3. Структурно-функціональна схема автоматизованого інформативно-діагностичного сигналізатора для оперативного контролю та оцінки технічного стану проточної частини ГТД: 1, 2, 3, 4, 5, 6 — панелі та прилади штатної СКД ГТД; 7, 14 — АСДППР «ЕКСПЕРТ – об'єкт АТ»; 8 — розрахунковий блок обчислення поточних значень параметрів конструктивних вузлів ГТД; 9, 12 — бази знань автоматизованої системи; 10, 11 — розрахункові блоки; 13 — аналітичний блок оцінки належності поточного значення комплексного інформативно-діагностичного показника (КІДП) ($K_{\Sigma, пот.}$) конкретному експлуатаційному діапазону КІДП $\{K_{\Sigma, експл. I}, K_{\Sigma, експл. II}, K_{\Sigma, експл. III}\}$; 14 — система індикації рішень автоматизованої системи

де $P_1 = e^{-\lambda_{\Sigma} t_i}$ — імовірність відсутності прояву характерних несправностей у неконтрольованій частині ГТД; λ_{Σ} — інтенсивність прояву характерних несправностей; t_i — час напрацювання ГТД із початку експлуатації (або після останнього ремонту) на момент діагностування;

$P_2 = (1 - q_{ГТД})^{n_{\Sigma}+1}$ — імовірність правильної оцінки ТС ГТД; $q_{ГТД}$ — імовірність несправного ТС ГТД; n_{Σ} — загальна кількість характерних несправностей ГТД;

$P_3 = 1 - (1 - P_{30})^{m+1}$ — імовірність правильного функціонування засобів контролю і діагностування ГТД; P_{30} — імовірність безвідмовної роботи нерезервованих засобів контролю ГТД; m — загальна кількість засобів контролю ГТД;

$P_4 = n_g/n_{\Sigma}$ — достовірність алгоритму діагностування ГТД при появі однієї характерної незалежної несправності; n_g — кількість характерних несправностей ГТД, що ідентифікувались штатними засобами контролю і діагностування.

$P_5 = 1 - \alpha_{\Sigma}(t_i) = (1 - q_{ГТД})^{n_g+1}$ — достовірність оцінки ТС ГТД (імовірність появи похибок 1-го (α_{Σ}) роду → «хибне» діагностування);

$P_6 = 1 - \beta_{\Sigma}(t_i) = 1 - [1 - (1 - q_{ГТД})^{n_{\Sigma}+1}]^{n_g/n_{\Sigma}}$ — достовірність оцінки ТС ГТД (імовірність появи похибок 2-го (β_{Σ}) роду → «невиявлення» несправностей).

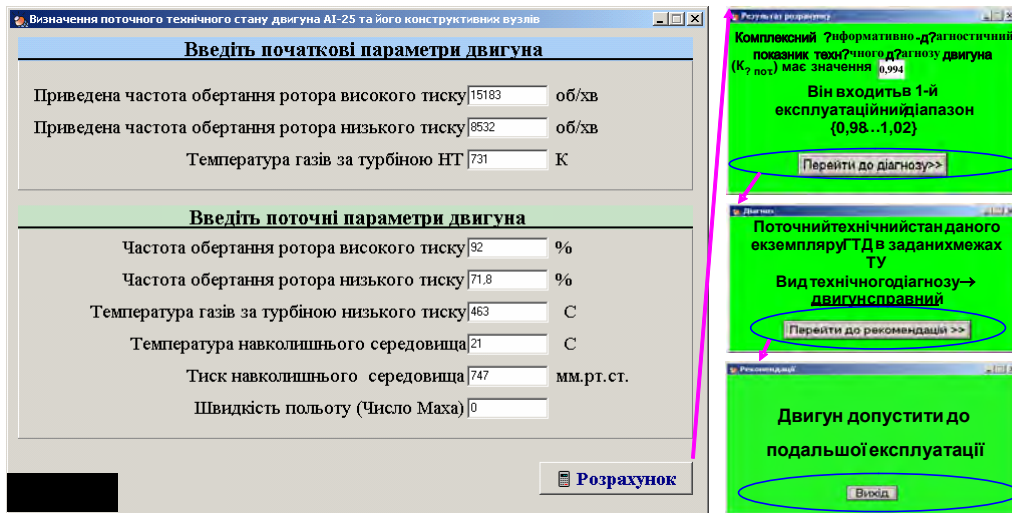


Рис. 4. Програмна реалізація ККР-методу для справного технічного стану ГТД

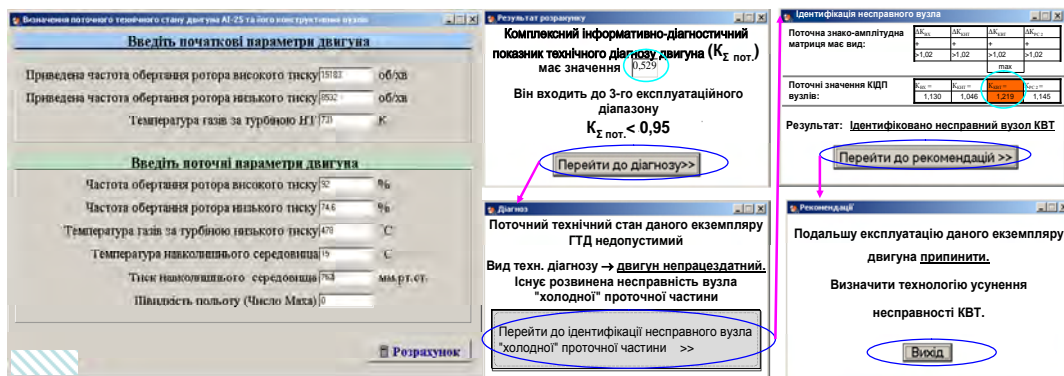


Рис. 5. Програмна реалізація ККР-методу для несправного технічного стану ГТД

Отримані розрахункові порівняльні значення критерію ефективності застосування штатних СКД та їхніх доопрацьованих варіантів із надбудовами АСД ППР для типових силових установок наведені в таблиці.

Розрахункові порівняльні значення критерію ефективності застосування штатних та доопрацьованих СКД типових силових установок повітряних суден Як-40 та Іл-76

Тип використаної СКД сучасного ГТД		Складові критерію ефективності						K_E
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	
АІ-25	Штатна	0,80	0,80	0,99	0,80	0,84	0,72	0,307
	Штатна + АСД	0,95	0,95	0,999	0,95	0,93	0,96	0,765
Д-30КП	Штатна	0,80	0,90	0,99	0,88	0,91	0,87	0,497
	Штатна + АСД	0,95	0,95	0,999	0,95	0,96	0,98	0,806

Висновки

До переваг розглянутого ККР-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 екземпляра об'єкта АТ, що діагностують, без його демонтуювання з повітряного судна в умовах експлуатації із визначенням конкретної технологічної рекомендації авіаперсоналу для підтримки прийняття експлуатаційного рішення;
- мінімальні трудовитрати на технологію діагностування складного об'єкта АТ у цілому та окремих конструктивних вузлів; забезпечення діагностування типових об'єктів АТ на поглиблених рівнях (до конструктивного вузла/елемента);
- кардинальне підвищення рівнів параметричної інформативності, контролепридатності та експлуатаційної технологічності без суттєвих 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 експлуатації об'єктів АТ за технічним станом з контролем параметрів.

1. Чоха Ю.М. Реалізація комплексного контрольно-розрахункового методу діагностування в середовищі експертної системи типового ГТД / Ю.М. Чоха, В.А.Лихоманенко, О.П. Федорчук // Труды Національної академії оборони України. — 2005. — Вип. 58. — С. 297–302.

2. Чоха Ю.М. Математична діагностична модель робочого процесу ТРДД з низьким рівнем контролепридатності / Ю.М. Чоха // Вестник двигателестроения. — Запоріжжя: ОАО «Мотор Січ». — 2003. — № 1. — С. 100–103.

3. Чоха Ю.Н. Методика применения функционально-тестового метода идентификации неисправностей ТРДД в среде динамической ЭСД / Ю.М. Чоха // Вестник двигателестроения. — Запоріжжя: ОАО «Мотор Січ», 2004. — № 2. — С.173–176.

4. Пат. 30615 Україна, МПК G07C 3/14. Сигналізатор автоматизований інформативно-діагностичний для оперативної оцінки технічного діагнозу складних динамічних об'єктів технічної експлуатації / Ю.М. Чоха та ін. — НАУ. — № 2007 06233; Заявл. 05.06.2007; Опубл. 11.03.2008. — Бюл. № 5.

5. Заявка № 2007 06234 Україна. Спосіб комбінований функціонально-тестовий оперативної оцінки технічного діагнозу газотурбінного двигуна і його конструктивних вузлів проточної частини / Чоха Ю.М. та ін. — Заявл. 05.06. 2007; позит. ріш. № 7443/1 від 04.06.2008.

6. Лозицкий Л.П. Оценка технического состояния авиационных ГТД / Л.П. Лозицкий, А.К. Янко, В.Ф. Лапшов. — М.: Транспорт, 1982. — 160 с.

Надійшла до редакції 22.07.2008