

С. І. Владов, Ю. М. Шмельов, Л. М. Пилипенко, К. Г. Котляров, С. А. Грибанова,  
О. В. Гусарова

## РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛЕЙ КОНТРОЛЮ І ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА ТВ3-117

**Предметом** дослідження в статті є авіаційний двигун ТВ3-117 та методи контролю і діагностики його технічного стану. **Мета** роботи – розробка інформаційної та динамічної моделей контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 задля визначення основних вимог до експертної системи. В статті вирішуються наступні **завдання**: розробки інформаційної та динамічної моделей контролю і діагностики авіаційного двигуна ТВ3-117 з використанням методології системного аналізу. Використовуються такі методи: методи системного аналізу, методи системного програмування, методи побудови інформаційних моделей. Отримано наступні **результати**: Розроблено інформаційну модель, що визначає логічну структуру баз даних і знань, а також способи та механізми управління ними та взаємодії (обґрунтування змісту, наповнення, управління інформаційними потоками). Розроблено динамічну модель, що визначає правила роботи з експертною системою, які є основою для створення інтерфейсу (сценаріїв) з користувачем і визначають динаміку взаємодії експертної системи з базами даних і знань, моделі контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117. **Висновки**: Розроблено комплекс інформаційних моделей процесу контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117, на основі технології IDEF/IX, що дозволило визначити логічну структуру і механізми взаємодії баз даних і баз знань в складі розроблюваної експертної системи контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117. Побудована динамічна модель процесів контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі IDEF / CPN, що дозволило визначити вимоги до механізму логічного висновку в процесі виконання функцій контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 експертною системою. Перспективи дослідження – завершальним етапом системного моделювання є системний проєкт, який формує контури дослідницького прототипу експертної системи і перелік вимог, що реалізують його.

**Ключові слова**: інформаційна модель; динамічна модель; експертна система; авіаційний двигун; база даних; база знань.

### Вступ

Безпека функціонування авіаційного газотурбінного двигуна ТВ3-117 в процесі його експлуатації вимагає безперервного контролю і діагностики його параметрів, що вимагає безперервного вдосконалення апаратури діагностування і контролю, обумовленого збільшенням числа контрольованих параметрів, ускладненням конструкції, зростанням числа датчиків і виконавчих механізмів. У цих умовах найбільш актуальною проблемою є розробка і впровадження інтелектуальних технологій [1–3], серед яких є технології системного аналізу, експертні системи, нейромережеві технології тощо, здатних якісно і ефективно вирішувати поставлені задачі (на рівні спеціаліста-експерта). Це особливо важливо зараз, оскільки своєчасне виявлення і локалізація відмов дозволить виключити численні аварійні і катастрофічні ситуації, що почастішали останнім часом.

Роль людського фактору зі зростанням числа контрольованих і діагностованих параметрів падає [1–3], оскільки пов'язана з численними помилками контролю та прийняття рішень (особливо в умовах НІ-факторів: невизначеності ситуації; численні перешкоди і неточності вимірювань; неповнота і недостовірність контролю тощо).

При використанні методології безпечної експлуатації авіаційних двигунів за технічним станом однією з основних проблем є розробка і впровадження ефективної діагностики, що дозволяє своєчасно виявляти дефекти, що виникають в основних деталях

при вичерпанні їх ресурсів [4, 5]. З огляду на важливість надійної роботи двигуна для забезпечення безпеки польоту повітряного судна, існуючі норми льотної придатності вимагають проведення великого обсягу різних перевірок в ході як стендових, так і льотних випробувань. При цьому в двигунах є деталі і вузли, по відношенню до яких діагностика в повній мірі не може бути застосованою. Зокрема, це стосується лопаток і дисків компресорів і турбін, руйнування яких призводить до тяжких наслідків, у тому числі до руйнування двигуна і повітряного судна. Щоб уникнути подібних наслідків, при оцінюванні ресурсу двигуна проводяться розрахунки міцності, які дають можливість виявити найбільш пошкоджені деталі і найбільш ушкоджують режими експлуатації.

Однак для того щоб такі розрахунки були об'єктивними й ефективними, необхідна наявність повного обсягу характеристик циклічного деформування матеріалів, характеристик циклічної повзучості, циклічної пластичності, характеристик циклічної міцності з урахуванням спільної дії вібраційних напружень, а також наявність повного обсягу характеристик, що визначають розвиток тріщин до граничного стану. У даний час такі характеристики у повному обсязі відсутні, що значно знижує ефективність розрахункових методів. У низці випадків в якості таких характеристик використовуються результати лабораторних ресурсних або прискорених еквівалентно-циклічних випробувань лопаток турбіни, а також дисків компресорів і турбін при їх циклічному навантаженні температурної навантаженням з одночасним

накладенням вібраційного навантаження. Але й при лабораторних випробуваннях не завжди вдається досягти відповідності навантажень на установках навантажень на двигуні, оскільки це навантаження істотно залежить від виконуваного в експлуатації профілю польоту.

Усе це призводить до того, що під час випробувань не вдається відтворити в повному обсязі такі дефекти, як розтріскування зсередини на входних кромках лопаток турбіни високого тиску, тріщини на галтелях титанових дисків турбокомпресора, тріщини на зварних корпусах камери згоряння тощо.

Ефективним засобом підвищення достовірності оцінюванні технічного стану авіаційних двигунів може служити експертна інформація, яка формується в результаті інтуїтивно-логічного аналізу вихідних даних із залученням відповідного математичного апарату групою експертів, що дозволяє виявити об'єктивну природу параметрів технічного стану досліджуваного об'єкта і розширити на цій основі можливості в достовірній оцінці технічного стану останнього. У даний час наявність вбудованих CASE засобів у сучасних базах даних (Oracle, Informix, R-Base тощо), а також в більшості експертних систем визначає основну роль системного моделювання при створенні складних інформаційних систем [6–8].

Формалізація інформаційного портрета авіаційного двигуна в рамках методології системного моделювання є окремою проблемою, оскільки системна модель в кінцевому рахунку збирає всю інформацію про процес контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна в інформаційну "купу". Тому основною задачею, що розв'язується на даному етапі, є "прозорість" представлення двигуна і його підсистем в процесі контролю і діагностики (виділення основних функцій і розв'язуваних задач), зв'язок інформаційних потоків з визначеними раніше структурами баз даних і знань, а також його взаємозв'язок в рамках сценаріїв роботи з експертною системою і зовнішніх інтерфейсів зі SCADA-системами, PDM і STEP-стандартами, CALS-технологією, іншими CASE засобами [6–8].

Таким чином, на основі системної моделі, на етапі проектування інформаційної системи контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна, з використанням SADT-методології і IDEF-технології необхідно виконати наступну послідовність кроків:

- розробити множину функціональних моделей з метою виділення повної множини функцій і задач, що розв'язуються експертною системою;

- розробити множину інформаційних моделей, що визначають логічну структуру баз даних і знань, а також способи та механізми управління ними та взаємодії (обґрунтування змісту, наповнення, управління інформаційними потоками);

- розробити динамічну модель, яка визначає правила роботи з експертною системою, які є основою для створення інтерфейсу (сценаріїв) з користувачем і визначають динаміку взаємодії експертної системи з базами даних і знань.

У даній роботі розв'язується задача розробки інформаційних і динамічної моделі авіаційного двигуна ТВ3-117, який призначений для вертольотів цивільної авіації. За паливною економічністю й ваговими характеристиками авіаційний двигун ТВ3-117 стоїть в ряду кращих світових зразків.

### Розробка інформаційної моделі

Комплекс інформаційних моделей для динамічних баз даних і знань спільно з вирішувачем і планувальником утворюють ядро майбутньої експертної системи і, перш за все, показує інформаційно-логічну взаємодію файлів даних в базах даних і знань експертної системи. Інформаційна модель процесу контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 у загальному вигляді може бути представлена як [9]:

$$M = \langle F, A, V, P, Q, O, R \rangle; \quad (1)$$

де  $F = \{f_i, i = \overline{1, I}\}$  – множина функцій процесу контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117;  $A = \{a_j, j = \overline{1, J}\}$  – множина задач (процедур), що реалізуються в процесі контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117;  $V = \{v_l, l = \overline{1, L}\}$  – множина вимірних параметрів авіаційного двигуна ТВ3-117;  $Q = \{q_k, k = \overline{1, K}\}$  – множина результатів процесу контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117;  $P = \{p_m, m = \overline{1, M}\}$  – персонал, який відповідає за процес контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117;  $O = \{o_n, n = \overline{1, N}\}$  – множина об'єктів і процесів контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117;  $VQ = V \cup Q$  – повна множина інформаційних елементів процесу контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117;  $R = \{r_s, s = \overline{1, S}\}$  – множина взаємозв'язків між компонентами  $\{F, A, V, Q, P, O\}$ .

Інформація, що описує процес контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117, представляється у вигляді сукупності множин. Реальні показники можуть відрізнитися і результатів оцінки його технічного стану.

Інформаційна модель процесу контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 приведена на рис. 1. Вона показує послідовність (логіку) виконуваних дій при маніпулюванні з окремими файлами в базі даних експертної системи. Кожен з розглянутих інформаційних об'єктів визначається значенням відповідних атрибутів. Всі вони взаємодіють з різномірною базою знань, що містить концептуальні та експертні знання, а також прецеденти.

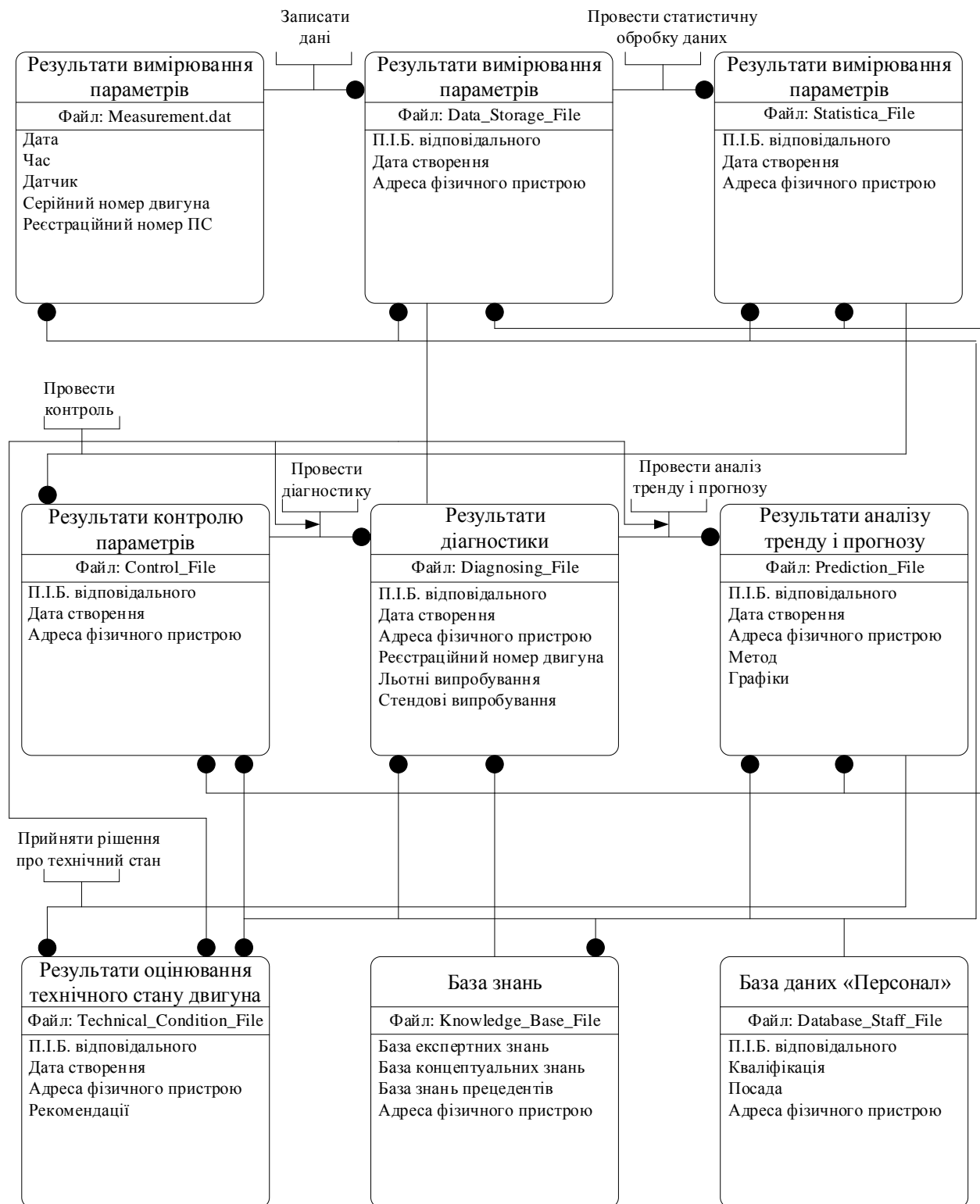


Рис. 1. Інформаційна модель процесу контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 експертною системою

Процес взаємодії різномірних баз знань експертної системи контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 показаний на рис. 2, де основною сполучним, координаційним і обчислювальним елементом є вирішувач, який здійснює спільно з планувальником управління процесом взаємодії між системами управління базами даних і знань [9, 10].

Змістовним компонентом розглянутих вище баз знань є:

- для експертної бази знань (формалізовані знання експертів у вигляді правил продукцій), розширених елементами нечіткої логіки (лінгвістичними змінними, що відображають якість процесу контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117);

- для концептуальної бази знань (знання експертів у вигляді окремих понять предметної області, описуваних рівняннями, таблицями, графіками, а також розширеним банком алгоритмів тощо);

- для бази знань прецедентів – типові, раніше розглянуті ситуації, формалізовані у вигляді дерева причинно-наслідкових зв'язків, типових алгоритмів, стандартних утиліт, процедур виведення тощо).

Змістовним компонентом баз даних є:

- дані про випробування серійних авіаційних двигунів;
- індивідуальні характеристики і паспортні дані окремих двигунів;
- нормативні галузеві документи;
- протоколи (звіти) про випробуваннях тощо.

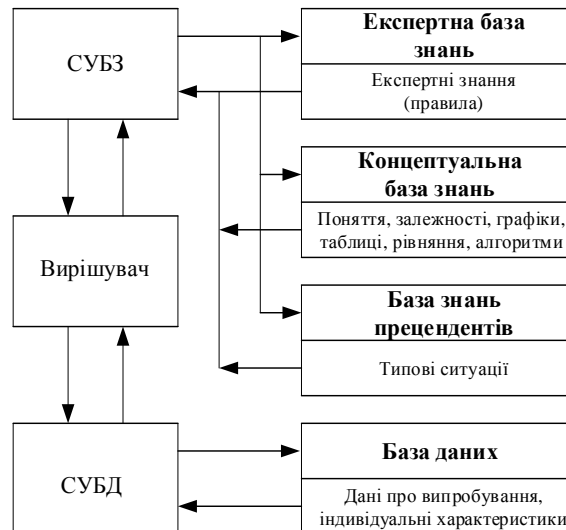


Рис. 2. Взаємодія різних баз знань і бази даних у процесі контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 експертною системою

На рис. 3. показана хронологічна (реляційна, багатовимірна, часова) база даних контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117, яка зберігає результати контролю і

діагностики, отримані в ході як стендових, так і льотних випробувань серійних або індивідуальних двигунів.

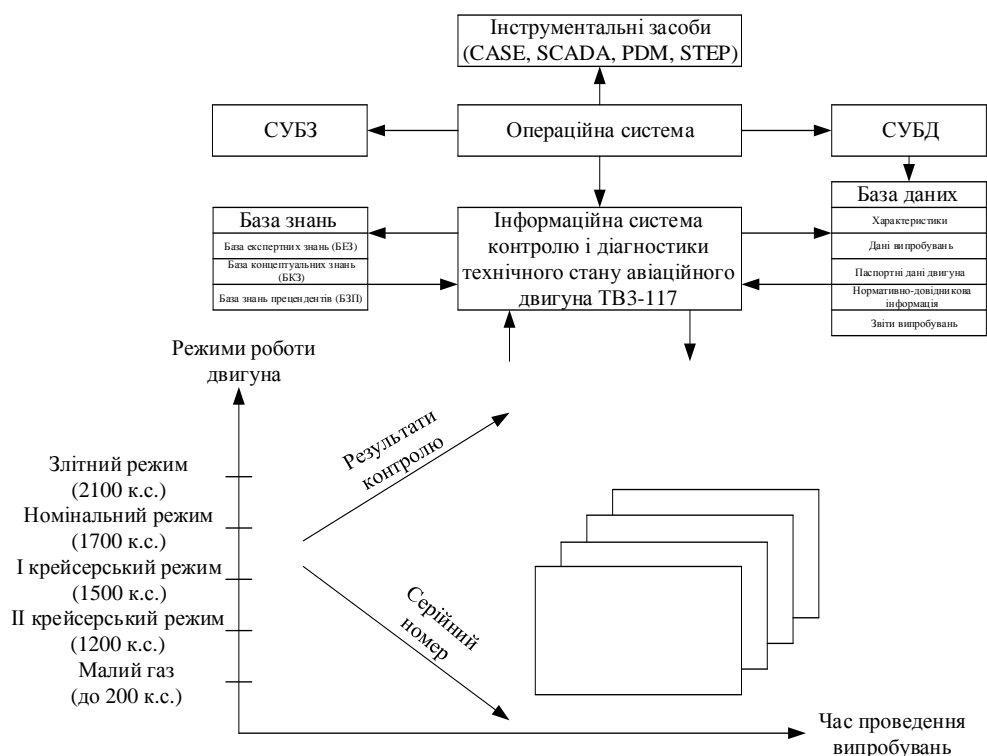


Рис. 3. Хронологічна база даних контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117

Користувач на основі меню-орієнтованого інтерфейсу може здійснювати різні запити до бази даних як для окремих двигунів та їх параметрів, так і для групи серійних двигунів. Для цього йому необхідно вказати наступну інформацію: тип двигуна, серійний номер, номер випробувального стенду (у випадку стендових випробувань), режим випробувань, дату проведення випробувань, які системи і параметри цих систем контролюються тощо. На підставі введених даних буде здійснено пошук інформації як за окремими полями бази даних, так і за групою полів. Для розробки такої бази даних необхідно сформулювати низку вимог, реалізація яких дозволить правильно вибрати СУБД і на її основі здійснити формування системного проєкту та експертної системи контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 [9–15].

Серед основних вимог, що пред'являються до розроблюваної бази даних (БД), можна виділити

наступні: розподілений (мережевий) характер БД, віддалений доступ, багатовимірність, обробка поряд з класичними і нечіткими запитами, виняток інформаційної надмірності БД, забезпечення цілісності БД, забезпечення функцій інформаційно-пошукової системи, меню-орієнтований інтерфейс [12, 13].

### Розробка динамічної моделі

Метою розробки динамічної моделі є відпрацювання логіки функціонування і взаємодії планувальника, вирішувача і баз знань експертної системи у процесі контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117. Сценарій функціонування розроблюваної експертної системи показаний на рис. 4.

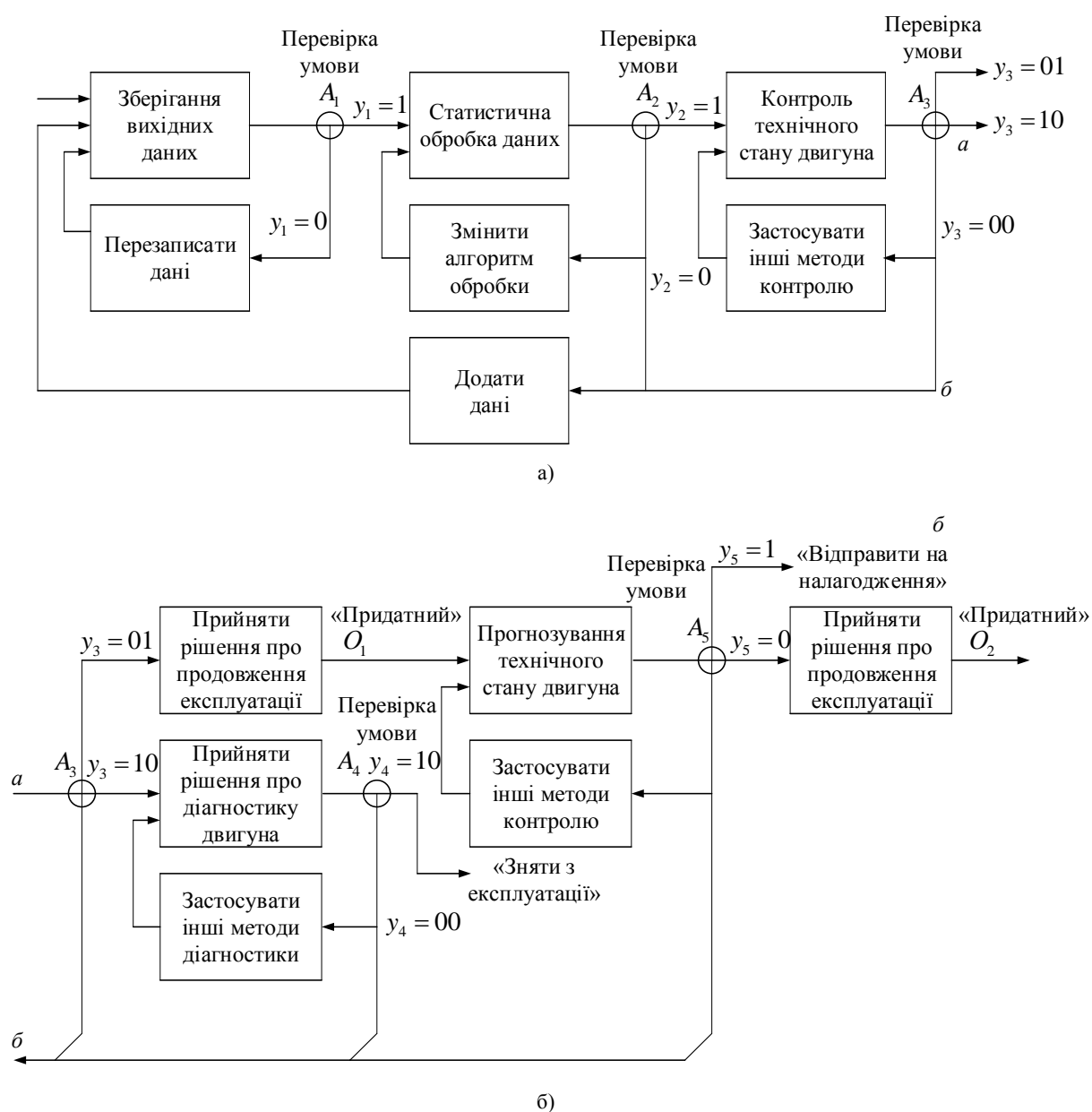


Рис. 4. Сценарій контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117



На рис. 4. позначено:  $A_1$  – дані записані вірно, продубльовані, мають доступ і захищені від несанкціонованого доступу;  $A_2$  – результати статистичної обробки виконані відповідно до заданих вимог;  $A_3$  – можна зробити однозначний висновок про технічний стан двигуна:  $y_3 = 01$  – двигун справний,  $y_3 = 10$  – двигун несправний,  $y_3 = 00$  – не можна зробити висновки;  $A_4$  – можна зробити висновок про технічний стан двигуна:  $y_4 = 01$  – двигун справний,  $y_4 = 10$  – двигун несправний з локалізацією місця відмови,  $y_4 = 00$  – не можна зробити висновки;  $A_5$  – можна зробити висновок про результати прогнозу технічного стану двигуна:  $y_5 = 0$  – двигун справний у майбутні моменти часу його функціонування;  $y_5 = 1$  – двигун несправний у майбутні моменти часу його функціонування.

Розглянемо процес функціонування розробленої експертної системи контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117. Виміряні у процесі льотної експлуатації (або стендових випробувань) параметри авіаційного двигуна ТВ3-117 нормуються, калібруються, масштабуються і записуються в тимчасову базу даних "Випробування двигуна" у вигляді окремого файлу. У разі виникнення нештатної ситуації (втрата всієї або частини вимірної інформації внаслідок перешкод, шумів, збоїв тощо) у проєктованій експертній системі передбачена можливість перезапису даних. Для цього процес вимірювань дублюється і дані вимірювань одночасно записуються у кілька файлів. Далі здійснюється покомпонентне порівняння всіх записів файлу у базі даних і тимчасового файлу, що зберігається, наприклад, на сервері бригади "Надійності", що проводить випробування двигуна. У разі повного збігу тимчасовий файл знищується, в іншому випадку дані з цього файлу копіюються у базу даних "Випробування двигуна".

Наступним етапом процесу контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117, виконуваних експертною системою, є статистична обробка даних вимірювань, з метою виявлення аномальних даних.

Відповідно до логіки роботи проєктованої експертної системи (умова  $A_2$ ): якщо в процесі статистичної обробки даних, застосований метод не задовольняє заданим вимогам, наприклад метод найменших квадратів, то він може бути замінений будь-яким альтернативним або новим методом (включеним до середі експертної системи за бажанням користувача), додаткових даних з бази даних "Випробування двигуна".

Якщо вимоги статистичної обробки даних повністю виконані, то експертна система здійснює контроль технічного стану двигуна відповідно до умови  $A_2$ . Слід зазначити, що найбільш поширеним методом контролю є метод допускового контролю [16–19]. Якщо в процесі контролю експертна система не може зробити однозначний висновок про стан

двигуна, то, як і в разі статистичної обробки даних, вона переходить до використання альтернативного методу контролю, наприклад, контролю за змінними допусками або нечіткими правилами із застосуванням нейромережових методів тощо, тобто плавний перехід від кількісних моделей до якісних з використанням методів штучного інтелекту, а вони як і на попередньому етапі можуть потребувати додаткові дані з бази даних "Випробування двигуна". Якщо у процесі контролю авіаційного двигуна експертна система робить висновок про його справності, то останньою приймається рішення про подальшу експлуатацію двигуна з подальшим розв'язком задачі прогнозу його технічного стану. Якщо у процесі контролю технічного стану двигуна експертна система може зробити однозначний висновок про несправності його технічного стану, то наступним логічним кроком є локалізація місця прояви відмови. Для цього експертною системою розв'язується задача діагностики. У процесі розв'язку даної задачі експертною системою можливі наступні рішення [9, 15]:

- двигун справний і приймається рішення про продовження його експлуатації;
- двигун несправний і приймається рішення про зняття його з експлуатації;
- неможливо зробити однозначний висновок про стан двигуна і тоді в цьому випадку експертна система буде використовувати інші діагностичні методи, наприклад, метод діагностичних матриць, метод порівняння, будь-який інший альтернативний метод або методи, які враховують якісну зміну характеристик двигуна (методи штучного інтелекту), а вони, як і в процесі контролю, можуть потребувати додаткові дані з бази даних "Випробування двигуна".

Якщо у процесі контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 експертна система приймає рішення "Придатний", то у подальшому вона здійснює прогноз його технічного стану, за результатами якого перевіряється умова  $A_5$  (рис. 4, б).

Якщо в процесі прогнозу експертна система приймає рішення "Придатний" в майбутні моменти часу його функціонування, то приймається остаточне рішення про придатність двигуна і його подальшої експлуатації. В іншому випадку, авіаційний двигун ТВ3-117 відправляється на налагодження. Якщо в процесі прогнозу технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 експертна система не може зробити однозначний висновок про результати прогнозу, то вона як і на попередніх кроках (статистичної обробки, контролю, діагностики) використовує інші методи прогнозу, наприклад, змінного середнього, експоненціального згладжування або методи штучного інтелекту, де, як уже зазначалося вище, можуть бути з атребувані додаткові дані з бази даних "Випробування двигуна".

До інтерфейсу експертної системи пред'являються наступні вимоги:

- меню-орієнтований інтерфейс, який визначає послідовність розв'язуваних експертною системою задач контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117;

- автономний режим роботи (призначений для користувача режим);

- режим роботи з експертом (робота з базою знань).

Основними вимогами до бази знань є:

- різнорідний (гібридний) характер оброблюваних знань (семантичні мережі, фрейми, продукції);

- реалізація нечітких правил;

- гібридний характер представлення знань (концептуальні, експертні, база знань прецедентів; нейромережіві бази знань);

- виключення інформаційної надмірності знань в базі знань;

- динамізм поповнення знань в базі знань (нейромережі за необхідністю можуть донавчатися в режимі реального часу);

- можливість взаємодії з іншими базами знань;

- узагальнення знань і формування пояснень на основі обчислювальної моделі.

#### Вимоги до експертної системи контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117

Сукупність функціональної [9], інформаційної, динамічної моделей, а також глосарію процесу контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 утворюють системний проєкт. Глосарій (словник баз даних і знань) автоматично формується у процесі створення експертної системи та її підсистем у вигляді динамічного файлу. Зокрема, при розробці баз даних і знань, а також при реалізації відповідних запитів, на основі яких і формується цей файл. Він є сполучною ланкою всіх компонент експертної системи і на його основі в подальшому реалізується логіка взаємодії інформаційної і динамічної моделей з базами даних і знань.

Задачі обробки результатів вимірювань пов'язані з обчисленням непрямих значень фізичних параметрів, які визначаються набором вихідних даних (вимірювань) і конкретної процедурної обробки.

Задачі реєстрації та відображення полягають в реєстрації у базі даних експертної системи відліків, даних вимірювань, прямих і непрямих параметрів.

Задачі контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 припускають формування інформації про правильність функціонування двигуна, локалізація можливої відмови, прогнозу зміни його основних характеристик у процесі експлуатації.

Розв'язок цих задач визначається набором вихідних даних (результатами вимірювань, прямими і непрямими параметрами тощо), конкретними методами, методиками та алгоритмами контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117.

Задачі прийняття рішення про технічний стан авіаційного двигуна ТВ3-117 здійснюються персоналом, який проводить його експлуатацію (випробування), на основі інформації, отриманої експертною системою на попередніх етапах.

Таким чином, основні вимоги до розроблюваної експертної системи контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117, структура якої наведена на рис. 5, наступні:

- реалізація функцій контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 в експертній системі на основі функціональної моделі;

- розробка баз даних і знань на основі інформаційних і динамічної моделей контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117;

- можливість роботи не тільки з кількісною, але і з якісною інформацією (нечіткі дані, шуми вимірювань, збої тощо);

- гібридність баз знань (бази концептуальних та експертних знань, бази знань прецедентів; нейромережіві бази знань);

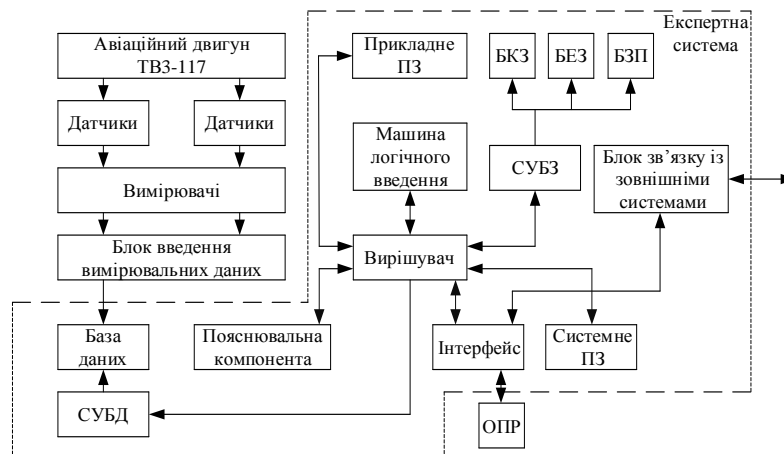


Рис. 5. Структура експертної системи контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117: БД – база даних; СУБД – система управління базою даних; БКЗ – база концептуальних знань; БЕЗ – база експертних знань; БЗП – база знань прецедентів; СУБЗ – система управління базами знань; ПЗ – програмне забезпечення; ОПР – особа, яка приймає рішення

- меню-орієнтований інтерфейс;
- протоколювання роботи користувача (збір статистики);
- модифікація баз знань (режим експерта);
- реалізація FDI-методу [9], що дозволяє на основі вектору відхилень, між вимірюваними параметрами індивідуального двигуна і його розрахунковими значеннями по адекватній математичній моделі, в основі концептуальних знань, локалізувати місце відмови в процесі контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117;
- можливість функціонального розширення експертної системи програмами-утилітами користувача;
- клієнт-серверна архітектура, віддалений доступ до мережі розподілених експертних систем;
- відкритість і розширюваність експертної системи);
- підтримка об'єктно-орієнтованої парадигми і нових інформаційних технологій (CASE, CALS, SCADA, PDM, STEP тощо) [4–8].

Основні рівні ієрархії типових задач в базі знань експертної системи, наведеної на рис. 5, можуть бути з точки зору контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 представлені як: обробка результатів вимірювань; реєстрація і відображення результатів; контроль, діагностика, прогноз

технічного стану двигуна; прийняття рішення про технічний стан двигуна.

### Висновки

Таким чином, на підставі отриманих результатів досліджень можна зробити наступні висновки:

Розроблено комплекс інформаційних моделей процесу контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117, на основі технології IDEF/1X, що дозволило визначити логічну структуру і механізми взаємодії баз даних і баз знань в складі розробленої експертної системи контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117.

Розроблено динамічну модель процесів контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі IDEF / CPN, що дозволило визначити вимоги до механізму логічного висновку в процесі виконання функцій контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 експертною системою.

Перспективи дослідження – завершальним етапом системного моделювання є системний проект, який формує контури дослідницького прототипу експертної системи і перелік вимог, що реалізують його.

### Список літератури

1. Shmelov Yu., Vladov S., Derevyanko I., Dieriabina I., Chyzhova L. Identification of rear model of TV3-117 aircraft engine based on the basis of neuro-multi-functional technologies. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2019. No. 1 (7). P. 43–49. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.7.043>
2. Жернаков С. В., Равилов Р. Ф. Контроль и диагностика технического состояния авиационного двигателя на основе экспертной системы С-PRIZ. *Вестник УГАТУ*. 2012. Т. 16. № 6 (51). С. 3–11.
3. Снчев С. В., Товкач С. С. Діагностування технічного стану авіаційних двигунів на основі нечіткої логіки. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2013. № 1 (8). С. 216–224.
4. Chachurski R., Glowacki P., Czecinski S. Methods of counting aircraft turbine engines operating cycles. *Transactions of the institute of aviation*. 2011. No. 207. P. 5–13.
5. Fedorchenko D., Novikov D. Cycle counting methods of the aircraft engine. *International journal of environmental and science education*. 2016. Vol. 11. No. 4. P. 3832–3846.
6. Imam A. T., Alnsour A. J., Al-Hroob A. The definition of intelligent computer aided software engineering (I-CASE) tools. *Journal of information engineering and applications*. 2015. Vol. 5. No. 1. P. 47–56.
7. Dias G. Evolution of computer aided software engineering (CASE) Tools: A user experience. *International journal of computer science and software engineering*. 2017. Vol. 6. Issue 3. P. 55–60.
8. Idoudi N., Louati N., Duvallat C., Bouaziz R., Sadeg B., Gargouri F. A framework to model real-time databases. *International journal of computing & information sciences*. 2008. Vol. 6. No. 1. P. 19–29.
9. Жернаков С. В. Методология системного анализа для решения проблемы информационного мониторинга состояния авиационного двигателя. *Вестник УГАТУ*. 2010. Т. 14. № 3 (38). С. 71–81.
10. Жернаков С. В., Васильев В. И. Контроль и диагностика технического состояния авиационных двигателей на основе интеллектуального анализа данных. *Вестник УГАТУ*. 2006. Т. 7. № 2 (15). С. 84–100.
11. Shmelov Y., Vladov S., Klimova Y., Kirukhina M. Expert system for identification of the technical state of the aircraft engine TV3-117 in flight modes. *System Analysis & Intelligent Computing: IEEE First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC)*, 08–12 October 2018. P. 77–82.
12. Angeli C. Diagnostic expert systems: from expert's knowledge to real-time systems. *Advanced knowledge based systems: Model, applications & research*. 2010. Vol. 1. P. 50–73.
13. Andoga R., Fozo L., Madarasz L., Karol T. A digital diagnostic system for a small turbojet engine. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2013. Vol. 10. No. 4. P. 45–58.
14. Golanski P., Madrzycki P. Use of the expert methods in computer based maintenance support of the M-28 aircraft. *Scientific journal of polish naval academy*. 2015. No. 2 (201). P. 5–12.
15. Li G., Ba Z., Zhang H. Expert system of fault diagnosis for flight simulator based on fault tree analysis. *Advanced materials research*. 2015. Vol. 1055. P. 371–374.
16. Бармин И. В., Юсупов Р. М., Прохорович В. Е., Птушкин А. И. Концепция управления состоянием сложных технических комплексов за пределами плановых сроков эксплуатации. *Информационные технологии*. 2000. № 5. С. 2–7.



17. Lingfei X., Yanbin D., Jixiang H., Bin J. Sliding mode fault tolerant control with adaptive diagnosis for aircraft engines. *International journal of turbo & jet-engines*. 2018. Vol. 35. Issue 1. P. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.1515/tjj-2016-0023>
18. Nyulaszi L., Andoga R., Butka P., Fozo L., Kovacs R., Moravec T. Fault detection and isolation of an aircraft turbojet Engine using a multi-sensor network and multiple model approach. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2018. Vol. 15. No. 2. P. 189–209. DOI: <https://doi.org/10.12700/APH.15.1.2018.2.10>
19. Feng L., Jinquan H., Yaodong X. Fault diagnostics for turbo-shaft engine sensors based on a simplified on-board model. *Sensors*. 2012. Vol. 12. No. 8. P. 11061–11076. DOI: <https://doi.org/10.3390/s120811061>

## References

- Shmelov, Yu., Vladov, S., Derevyanko, I., Dieriabina, I., Chyzhova, L. (2019), "Identification of rear model of TV3-117 aircraft engine based on the basis of neuro-multi-functional technologies", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. No. 1 (7). P. 43–49. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.7.043>
- Zhernakov, S. V., Ravilov, R. F. (2012), "Monitoring and diagnostics of the technical condition of the aircraft engine based on the expert system C-PRIZ" ["Kontrol i diagnostika tehničeskogo sostoyaniya aviatsionnogo dvigatelya na osnove ekspertnoy sistemyi C-PRIZ"], *Bulletin of USATU*, Vol. 16, No. 6 (51), P. 3–11.
- Enchev, S. V., Tovkach, S. S. (2013), "Diagnostic of the technical condition aviation engines is based on fuzzy logic" ["Diahnostuvannia tehničnogo stanu aviatsiinykh dvyhuniv na osnovi nechitkoi lohiky"], *The scientific bulletin of Kherson state maritime academy*, No. 1 (8), P. 216–224.
- Chachurski, R., Glowacki, P., Czecinski, S. (2011), "Methods of counting aircraft turbine engines operating cycles", *Transactions of the institute of aviation*, No. 207, P. 5–13.
- Fedorchenko, D., Novikov, D. (2016), "Cycle counting methods of the aircraft engine", *International journal of environmental and science education*, Vol. 11, No. 4, P. 3832–3846.
- Imam, A. T., Alnsour, A. J., Al-Hroob, A. (2015), "The definition of intelligent computer aided software engineering (I-CASE) tools", *Journal of information engineering and applications*, Vol. 5, No. 1, P. 47–56.
- Dias, G. (2017), "Evolution of computer aided software engineering (CASE) Tools: A user experience", *International journal of computer science and software engineering*, Vol. 6, Issue 3, P. 55–60.
- Idoudi, N., Louati, N., Duvallet, C., Bouaziz, R., Sadeg, B., Gargouri, F. (2008), "A framework to model real-time databases", *International journal of computing & information sciences*, Vol. 6, No. 1, P. 19–29.
- Zhernakov, S. V. (2010), "System analysis methodology for solving the problem of information monitoring of the aircraft engine state" ["Metodologiya sistemnogo analiza dlya resheniya problemy informatsionnogo monitoringa sostoyaniya aviatsionnogo dvigatelya"], *Bulletin of USATU*, Vol. 14, No. 3 (38), P. 71–81.
- Zhernakov, S. V., Vasiliev, V. I. (2006), "Monitoring and diagnostics of the aircraft engines technical condition based on data mining" ["Kontrol i diagnostika tehničeskogo sostoyaniya aviatsionnykh dvigatelej na osnove intellektualnogo analiza dannykh"], *Bulletin of USATU*, Vol. 7, No. 2 (15), P. 84–100.
- Shmelov, Y., Vladov, S., Klimova, Y., Kirukhina, M. (2018), "Expert system for identification of the technical state of the aircraft engine TV3-117 in flight modes", *System Analysis & Intelligent Computing: IEEE First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), 08–12 October 2018*, P. 77–82.
- Angeli, C. (2010), "Diagnostic expert systems: from expert's knowledge to real-time systems", *Advanced knowledge based systems: Model, applications & research*, Vol. 1, P. 50–73.
- Andoga, R., Fozo, L., Madarasz, L., Karol, T. (2013), "A digital diagnostic system for a small turbojet engine", *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 10, No. 4, P. 45–58.
- Golanski, P., Madrzycki, P. (2015), "Use of the expert methods in computer based maintenance support of the M-28 aircraft", *Scientific journal of polish naval academy*, No. 2 (201), P. 5–12.
- Li, G., Ba, Z., Zhang, H. (2015), "Expert system of fault diagnosis for flight simulator based on fault tree analysis", *Advanced materials research*, Vol. 1055, P. 371–374.
- Barmin, I. V., Yusupov, R. M., Prokhorovich, V. E., Ptushkin, A. I. (2000), "Concept of managing the state of complex technical complexes beyond the planned lifetime" ["Konceptziya upravleniya sostoyaniem slozhnykh tehničeskikh kompleksov za predelami planovykh srokov e'kspluataczii"], *Information technology*, No. 5, P. 2–7.
- Lingfei X., Yanbin D., Jixiang H., Bin J. (2018), "Sliding mode fault tolerant control with adaptive diagnosis for aircraft engines", *International journal of turbo & jet-engines*, Vol. 35, Issue 1, P. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.1515/tjj-2016-0023>
- Nyulaszi, L., Andoga, R., Butka, P., Fozo, L., Kovacs, R., Moravec, T. (2018), "Fault detection and isolation of an aircraft turbojet Engine using a multi-sensor network and multiple model approach", *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 15, No. 2, P. 189–209. DOI: <https://doi.org/10.12700/APH.15.1.2018.2.10>
- Feng, L., Jinquan, H., Yaodong, X. (2012), "Fault diagnostics for turbo-shaft engine sensors based on a simplified on-board model", *Sensors*, Vol. 12, No. 8, P. 11061–11076. DOI: <https://doi.org/10.3390/s120811061>

Надійшла (Received) 01.10.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Владов Сергій Ігорович** – кандидат технічних наук, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, викладач циклової комісії фізико-математичних дисциплін та інформатики, Кременчук, Україна; e-mail: [ser26101968@gmail.com](mailto:ser26101968@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8009-5254>.

**Владов Сергей Игоревич** – кандидат технических наук, Кременчугский летный колледж Харьковского национального университета внутренних дел, преподаватель цикловой комиссии физико-математических дисциплин и информатики, Кременчуг, Украина.

**Vladov Serhii** – PhD (Engineering Sciences), Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs, Teacher of the Department of Physical and Mathematical Disciplines and Informatics, Kremenchuk, Ukraine.

**Шмельов Юрій Миколайович** – кандидат технічних наук, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, заступник директора коледжу з навчальної роботи, викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, Кременчук, Україна; e-mail: nv.klk@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7344-3924>.

**Шмелев Юрий Николаевич** – кандидат технических наук, Кременчугский летный колледж Харьковского национального университета внутренних дел, заместитель директора колледжа по учебной работе, преподаватель цикловой комиссии авиационного и радиоэлектронного оборудования, Кременчуг, Украина.

**Shmelov Yurii** – PhD (Engineering Sciences), Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University, Deputy College Chief for Curriculum, Teacher of the Department of Aviation and Radio Electronic Equipment, Kremenchuk, Ukraine.

**Пилипенко Людмила Миколаївна** – Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, голова циклової комісії фізико-математичних дисциплін та інформатики, Кременчук, Україна; e-mail: lypdil1965@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5221-0921>.

**Пилипенко Людмила Николаевна** – Кременчугский летный колледж Харьковского национального университета внутренних дел, председатель цикловой комиссии физико-математических дисциплин и информатики, Кременчуг, Украина.

**Pylypenko Liudmyla** – Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs, Head of the Department of Physical and Mathematical Disciplines and Informatics, Kremenchuk, Ukraine.

**Котляров Кирило Геннадійович** – Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, викладач циклової комісії фізико-математичних дисциплін та інформатики, Кременчук, Україна; e-mail: fmi.nv.klk@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6097-9084>.

**Котляров Кирилл Геннадиевич** – Кременчугский летный колледж Харьковского национального университета внутренних дел, преподаватель цикловой комиссии физико-математических дисциплин и информатики, Кременчуг, Украина.

**Kotliarov Kyrylo** – Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs, teacher of department of physical and mathematical disciplines and informatics, Kremenchuk, Ukraine.

**Грибанова Світлана Анатоліївна** – Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, викладач циклової комісії фізико-математичних дисциплін та інформатики, Кременчук, Україна; e-mail: fmi.nv.klk@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5831-2363>.

**Грибанова Светлана Анатольевна** – Кременчугский летный колледж Харьковского национального университета внутренних дел, преподаватель цикловой комиссии физико-математических дисциплин и информатики, Кременчуг, Украина.

**Hrybanova Svitlana** – Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs, Teacher of the Department of Physical and Mathematical Disciplines and Informatics, Kremenchuk, Ukraine.

**Гусарова Оксана Василівна** – Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, викладач циклової комісії фізико-математичних дисциплін та інформатики, Кременчук, Україна; e-mail: fmi.nv.klk@gmail.com; ORCID: [orcid.org/0000-0002-9823-0044](https://orcid.org/0000-0002-9823-0044).

**Гусарова Оксана Васильевна** – Кременчугский летный колледж Харьковского национального университета внутренних дел, преподаватель цикловой комиссии физико-математических дисциплин и информатики, Кременчуг, Украина.

**Husarova Oksana** – Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs, Teacher of the Department of Physical and Mathematical Disciplines and Informatics, Kremenchuk, Ukraine.

## РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛЕЙ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ТВ3-117

**Предметом** исследования в статье является авиационный двигатель ТВ3-117 и методы контроля и диагностики его технического состояния. **Цель** работы – разработка информационной и динамической моделей контроля и диагностики технического состояния авиационного двигателя ТВ3-117 для определения основных требований к экспертной системе. В статье решаются следующие **задачи**: разработки информационной и динамической моделей контроля и диагностики авиационного двигателя ТВ3-117 с использованием методологии системного анализа. Используются следующие **методы**: методы системного анализа, методы системного программирования, методы построения информационных моделей. Получены следующие **результаты**: Разработано информационную модель, которая определяет логическую структуру баз данных и знаний, а также способы и механизмы управления ими и взаимодействия (обоснование содержания, наполнения, управление информационными потоками). Разработано динамическую модель, которая определяет правила работы с экспертной системой, что является основой для создания интерфейса (сценариев) с пользователем и определяют динамику взаимодействия экспертной системы с базами данных и знаний, модели контроля и диагностики технического состояния авиационного двигателя ТВ3-117. **Выводы**: Разработан комплекс информационных моделей процесса контроля и диагностики технического состояния авиационного двигателя ТВ3-117, на основе технологии IDEF / 1X, что позволило определить логическую структуру и механизмы взаимодействия баз данных и баз знаний в составе разрабатываемой экспертной системы контроля и диагностики технического состояния авиационного двигателя ТВ3-117. Построена

динамическая модель процессов контроля и диагностики технического состояния авиационного двигателя ТВ3-117 на основе IDEF / CPN, что позволило определить требования к механизму логического вывода в процессе выполнения функций контроля и диагностики технического состояния авиационного двигателя ТВ3-117 экспертной системой. Перспективы исследования – завершающим этапом системного моделирования является системный проект, который формирует контуры исследовательского прототипа экспертной системы и перечень требований, реализующих его.

**Ключевые слова:** информационная модель; динамическая модель; экспертная система; авиационный двигатель; база данных; база знаний.

## RESEARCH OF INFORMATION AND DYNAMIC MODELS OF CONTROL AND DIAGNOSTICS OF TV3-117 AIRCRAFT ENGINE TECHNICAL STATE

The **subject** matter of the article is TV3-117 aircraft engine and methods for monitoring and diagnosing its technical condition. The goal of the work is development of information and dynamic models for monitoring and diagnosing the technical condition of TV3-117 aircraft engine to determine the basic requirements for an expert system. The following tasks were solved in the **article**: development of information and dynamic models for monitoring and diagnostics of TV3-117 aircraft engine using the methodology of system analysis. The following **methods** used are – methods of system analysis, methods of system programming, methods of constructing information models. The following **results** were obtained – An information model has been developed that defines the logical structure of databases and knowledge, as well as methods and mechanisms for managing and interacting with them (substantiation of content, content, management of information flows). A dynamic model has been developed that defines the rules for working with an expert system, which is the basis for creating an interface (scenarios) with a user and determines the dynamics of the interaction of an expert system with databases and knowledge, a model for monitoring and diagnosing of TV3-117 aircraft engine technical condition. **Conclusions:** A set of information models was developed for the process of monitoring and diagnosing the technical condition of the TV3-117 aircraft engine, based on IDEF / IX technology, which made it possible to determine the logical structure and mechanisms of interaction between databases and knowledge bases as part of an expert system for monitoring and diagnosing the technical condition of TV3-117 aircraft engine. A dynamic model of the processes for monitoring and diagnosing the technical condition of TV3-117 aircraft engine based on IDEF / CPN was developed, which made it possible to determine the requirements for the inference mechanism in the process of performing the functions of monitoring and diagnosing the technical condition of TV3-117 aircraft engine by an expert system. Research prospects – the final stage of system modeling is a system project that forms the contours of a research prototype of an expert system and a list of requirements that implement it.

**Keywords:** information model; dynamic model; expert system; aircraft engine; database; knowledge base.

### *Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions*

Владов С. І., Шмельов Ю. М., Пилипенко Л. М., Котляров К. Г., Грибанова С. А., Гусарова О. В. Розробка інформаційної та динамічної моделей контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2019. № 4 (40). С. 44–54. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.9.044>.

Vladov, S., Shmelov, Y., Pylypenko, L., Kotliarov, K., Hrybanova, S., Husarova, O. (2019), "Research of information and dynamic models of control and diagnostics of TV3-117 aircraft engine technical state", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (10), P. 44–54. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.10.044>.