

## АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

УДК 629.735

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/06>

### **Владов С.І.**

Кременчуцький льотний коледж  
Харківського національного університету внутрішніх справ

### **Шмельов Ю.М.**

Кременчуцький льотний коледж  
Харківського національного університету внутрішніх справ

### **Пилипенко Л.М.**

Кременчуцький льотний коледж  
Харківського національного університету внутрішніх справ

### **Назаренко Н.П.**

Кременчуцький льотний коледж  
Харківського національного університету внутрішніх справ

### **Тугова Н.В.**

Кременчуцький льотний коледж  
Харківського національного університету внутрішніх справ

### **Дерев'янюк І.Г.**

Кременчуцький льотний коледж  
Харківського національного університету внутрішніх справ

### **Пономаренко А.В.**

Кременчуцький льотний коледж  
Харківського національного університету внутрішніх справ

## РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПОНЕНТНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА ТВ3-117 НА ОСНОВІ СЕМАНТИЧНОЇ МЕРЕЖІ

*Предметом дослідження в статті є авіаційний двигун ТВ3-117 і методи контролю та діагностики його технічного стану. Мета роботи – реалізація компонентних математичних моделей авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі семантичної мережі для контролю та діагностики його технічного стану. У статті вирішуються наступні завдання: обґрунтування передумов розробки математичних моделей авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі семантичної мережі, розроблення обчислювальної моделі авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі семантичної мережі. Використовуються такі методи: методи математичного моделювання, методи побудови багаторівневої обчислювальної моделі на основі семантичної мережі. Отримано наступні результати: визначено, що контроль і діагностика технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 може бути реалізована на основі FDI-методу на базі моделей двигуна, що є мережею з елементарних (тришарових) блоків або незамкнених графів з однією вершиною-параметром і трьома ребрами. Ці елементарні об'єкти містять параметри, посилання на трьох «сусідів» і потрібні алгоритми зв'язку – попарно з двома з трьох «сусідів». Активізує об'єкти в мережі програма-вирішувач відповідно до «прапорів», які виставляють об'єкти. Алгоритми елементарних об'єктів аналізують, які параметри, що приходять від «сусідів», вибирають з урахуванням цього один із трьох власних алгоритмів для виконання, виставляють для зовнішнього вирішувача*

значення «прапора». Водночас задачі контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 розв'язуються без ітерацій. Висновки: запропоновано метод побудови математичної моделі авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі розширеної семантичної мережі, що дозволяє шляхом реконфігурації математичної моделі й адаптації її характеристик до індивідуального двигуна, розв'язувати широкий набір задач контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 у польотних режимах. Отримана мережа може розширюватися шляхом залучення нових параметрів у складі додаткових елементарних блоків відповідно до закономірностей, що описують закономірності робочих процесів і взаємозв'язок у вузлах двигуна.

**Ключові слова:** авіаційний двигун, математична модель, семантична мережа, граф.

**Постановка проблеми.** Безпека функціонування авіаційного двигуна ТВ3-117 вимагає безперервного контролю та діагностики його технічного стану в режимі реального часу. В цих умовах найбільш актуальною проблемою є розробка й впровадження інтелектуальних технологій – активних експертних систем (далі – ЕС) [1–3], здатних якісно й ефективно розв'язувати поставлені задачі. Це особливо важливо зараз, оскільки своєчасне виявлення та локалізація відмов дозволить виключити численні аварійні й катастрофічні ситуації, тому що це пов'язано із численними похибками контролю та прийняття рішень. Рівень впливу людського чинника зі зростанням числа контрольованих і діагностованих параметрів знижується [4], а спектр задач контролю та діагностики параметрів авіаційних двигунів істотно розширився з впровадженням активних ЕС на борт повітряного судна (далі – ПС). Зокрема, можливе проведення на борту ПС не тільки реєстрації та запобігання аварійних ситуацій, а й налаштування, налагодження, поглиблений діагноз стану рухових установок. Зазначене вище потребує розробки й адаптації в середовищі баз знань (далі – БЗ) активних ЕС, незважаючи на відомі методи, методики й алгоритми нових методологій і принципи побудови ЕС контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117. Усе це повинно стати складовою частиною загальної інформаційно-керувальної системи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Як відомо [5], діагностику авіаційних двигунів можна здійснювати з різним ступенем деталізації. В активній ЕС може бути організований трирівневий діагноз стану й несправностей двигуна [5]: аварійний діагноз, або діагноз малої глибини; діагноз середньої глибини; діагноз значної глибини. Аварійний діагноз здійснюється за таблицями несправностей (граф причинно-наслідкових зв'язків, допусковий контроль) [6–8]. Якщо ж аварійний діагноз не дає переконливої відповіді, то прийняття рішення щодо активної ЕС здійснюється на основі гетерогенної БЗ (далі – ГБЗ), у складі якої застосовуються семантичні мережі, фрейми, продукції, логічні моделі.

Основною вимогою, що висувається до таких ЕС, є робота в реальному масштабі часу й гетерогенні (різномірні) БЗ. Забезпечення режиму реального часу здійснюється активною ЕС за допомогою інтерфейсу із зовнішнім світлом (датчики – контролери – виконавчі механізми). ГБЗ включає: бази концептуальних знань (далі – БКЗ) (поняття з конкретної предметної області, факти, математичні залежності, закономірності, таблиці тощо); бази експертних знань (далі – БЕЗ) (евристика; апріорна, апостеріорна, експертна інформація тощо); бази знань прецедентів (далі – БЗП).

Збережені знання в ГБЗ можуть бути статичними й динамічними. Статичні ГБЗ накопичують досвід експлуатації двигуна незалежно від часу. Динамічні ГБЗ накопичують досвід у режимі реального часу: запам'ятовується характеристика перехідного процесу (перехідні й несталі режими роботи); частотні характеристики тощо. БЗП у середовищі активної ЕС є новою парадигмою [9–10] в процесі прийняття рішень під час виникнення проблемних ситуацій у реальному масштабі часу.

**Постановка завдання.** В основу ідеології розроблених експертних систем контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 покладено використання методу FDI (Fault Detection and Identification), який базується на порівнянні результатів вимірювань газодинамічних показників у режимі реального часу з формулярними [7; 8].

Для організації контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 із застосуванням FDI-методу важливо уявляти й знати, яким чином «обробляються» його моделі універсальною програмою-вирішувачем під час постійного контролю та діагностики параметрів авіаційного двигуна. Натепер моделі авіаційних двигунів формуються на основі об'єктноорієнтованого підходу. Обчислення за такої умови зводяться до «обробки» динамічно сформованих моделей вирішувачів.

Найчастіше розв'язок задач контролю та діагностики проводиться з використанням компонентної математичної моделі, складеної з об'єктів, що утворюють багаторівневу структуру

з односпрямованою асоціативністю в самій моделі [11; 12], коли внутрішні рівневі зв'язки між об'єктами реалізуються як односпрямовані «потоки», а вертикальні зв'язки – як спрямовані знизу вгору «адитивні» зв'язки. Двосторонню асоціативність забезпечує зовнішній (відносно моделі) вирішувач. Моделювання різних експлуатаційних ситуацій за допомогою таких моделей здійснюється варіаційними методами, коли користувач указує вирішувачу, які параметри варіювати, які підтримувати, а які «табулювати» – змінювати за певним законом.

Іноді формування такого закону розрахунку проводиться автоматично – шляхом аналізу параметрів «вільних» об'єктів й оцінки їхньої ролі в моделях. Варіації зазвичай створює вирішувач із використанням одного з оптимізаційних алгоритмів, що забезпечує мінімізацію функції «нев'язок» і функції мети, яка динамічно формується (для оптимізації групи параметрів з урахуванням заданих вагових коефіцієнтів). Функція «нев'язок» і функція мети штрафуються за вихід параметрів із зазначених користувачем меж. Такий підхід дозволяє уніфікувати процедури контролю та діагностики. Однак він вимагає застосування варіаційного методу, що свідомо знижує точність, надійність отримання результату й збільшує витрати машинних ресурсів. Тому провадяться кроки для пошуку й реалізації альтернативних методів, описаних у статті.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Задля поставленої в роботі мети розглянемо математичну модель авіаційного двигуна ТВ3-117 у вигляді компонентної обчислювальної моделі, яка характеризується набором зовнішніх параметрів – вектором  $U$  й алгоритмом  $M$ , що моделює зв'язки компонент вектору  $U$  (зовнішніх параметрів) між собою. Якщо це алгоритм звичайного вигляду, то він спрямований і вимагає надати з вектора  $U$  вектор вхідних даних  $X$  і вектор вихідних даних  $Y$ :  $U = X \cap Y$ . Водночас кожній проектно-доводчій ситуації відповідає свій склад компонент векторів, заданих вхідних  $X$  і «вільних» (до моменту початку виконання завдання) вихідних  $Y$  даних алгоритму  $M$ . Якщо відповідно до цього групувати їх на вході й виході з алгоритму  $M$ , то отримаємо такі варіанти:  $U = X_1 \cap Y_1 = X_2 \cap Y_2 = \dots = X_i \cap Y_i$ , де  $i$  – варіант ситуації, що відрізняється тим, які параметри  $Y_i$  задані й тому ввійшли до вектора  $X_i$ , а які на момент розв'язку задачі не задані (вільні) й тому увійшли до вектора  $Y_i$ . Відповідно, в базі моделей (далі – БМ) БЗ і БД вирішувач повинен знаходити для конкретної ситуації свій варіант алгоритму  $M_i$  з набору:  $Y_1 = F(X_1)$ ,  $Y_2 = F(X_2)$ , ...,  $Y_i = F(X_i)$  і розв'язувати задачу «безпосередньо», без ітерацій.

Щоб перенести такий підхід на максимально низький рівень компонентної моделі, необхідно виділити елементарні структури, придатні для об'єднання в мережу. Такою елементарною структурою може бути пара взаємопов'язаних параметрів авіаційного двигуна ТВ3-117  $x$  і  $y$ . Якщо в традиційній постановці записується  $y = p(x)$ , то в запропонованому варіанті це еквівалентно моделі, заданій парою алгоритмів  $M$  і  $M'$ , тобто «евристиками»:  $y = F(x)$  і  $x = F'(y)$ . Однак, така структура (рис. 1) може з'єднуватися з іншими тільки послідовно. Тому елементарні структури повинні бути як мінімум потрійними. Відомо, що існують альтернативи – моделі можна зображувати графами (або мережами) або ж структурними схемами. За такої умови в першому випадку параметри є вершинами, а алгоритми – ребрами, в другому – все навпаки.

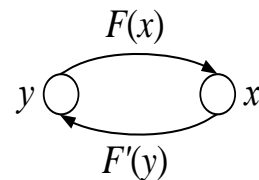


Рис. 1. Елементарна бінарна обчислювальна модель

Розглянемо перший варіант (рис. 2, а). Припустимо, зовнішній параметр  $u_1$  пов'язаний із трьома «сусідами»  $u_2$ ,  $u_3$ ,  $u_4$  так, що він може бути однозначно визначений через кожні два з них за допомогою функціоналів вигляду:

$$u_1 = P_{23} [f_{12}(u_2), f_{13}(u_3)];$$

$$u_1 = P_{43} [f_{14}(u_2), f_{13}(u_3)];$$

$$u_1 = P_{24} [f_{12}(u_2), f_{14}(u_4)]; \quad (1)$$

де функції  $P_{23}$ ,  $P_{43}$  і  $P_{24}$  характеризують оператори в складі відповідних алгоритмів, у тому числі арифметичні дії, наприклад,  $u_1 = f_{12}(u_2)f_{13}(u_3)$  або  $u_1 = f_{12}(u_2) + f_{13}(u_3)$ .

В останньому випадку для двох інших поєднань заданих «параметрів-сусідів»  $u_2$ ,  $u_3$  можна записати аналогічним чином  $u_1 = f_{14}(u_4) + f_{13}(u_3)$  і  $u_1 = f_{12}(u_2) + f_{13}(u_3)$ . Вид оператора, що використовується у функції  $P_{ij}$  – знак або складніший оператор для кожної пари «параметрів-сусідів» з їхніми функціями впливу  $f_{ij}(u_{ij})$  – може зберігатися в БД і використовуватися під час розв'язку задачі. Тоді

відповідна елементарна структура матиме вигляд фрейму й буде зображуватися ланкою мережі (типу «вершина з трьома ребрами»), показаним на рис. 2, б.

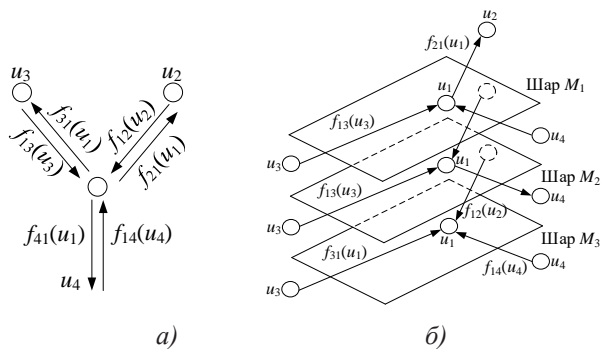


Рис. 2. Елементарна обчислювальна модель у вигляді тришарового незамкнутого графа

У кожному напрямку від вершини йдуть або приходять до неї ребра, на яких визначені взаємно зворотні функції: наприклад,  $f_{12}(u_2)$  і  $f_{21}(u_1)$  – це функції взаємного впливу параметрів (вершин)  $u_1$  і  $u_2$  один на одного. Цілком логічно, що елементарна структура тришарова – в кожному шарі своя пара заданих параметрів, свій напрямок графа. Так само будь-яке дерево зводиться до двійкового, де в кожній вершині три зв'язки, тоді можна показати, що будь-яка мережева модель може бути зображена показаними на рис. 2, б структурами.

Для другого варіанту подібним чином можна сформулювати елементарні блоки для структурних схем. Припустимо, що модель зображується функціоналом  $F(x_1, x_2, x_3) = 0$ . Практично завжди таку модель можна представити трійкою евристик:  $x_1 = F(x_2, x_3)$ ,  $x_2 = F(x_1, x_3)$ ,  $x_3 = F(x_1, x_2)$ . У цьому випадку елементарний структурний блок буде мати вигляд, як показано на рис. 3. Він теж логічно тришаровий – у кожному шарі є поєднання пари заданих і вихідних параметрів і свій напрямок руху в цьому блоці.

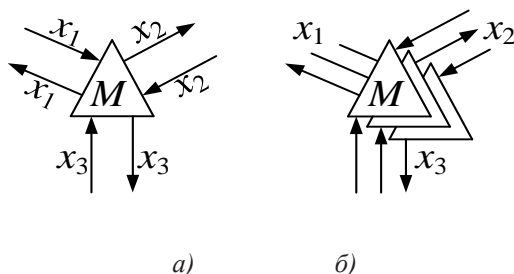


Рис. 3. Елементарний структурний блок для формування обчислювальної моделі

В обох варіантах такого роду структури (у вигляді: а – елементарних незамкнутих графів

або б – блоків, які логічно об'єднують три шари) можуть групуватися в мережу й створювати складні, але впорядковані структури (виникають аналогії з кристалічною або органічною решітками). Водночас елементарні осередки можуть бути три-, чотири-, п'яти-, шестикутними тощо (рис. 4).

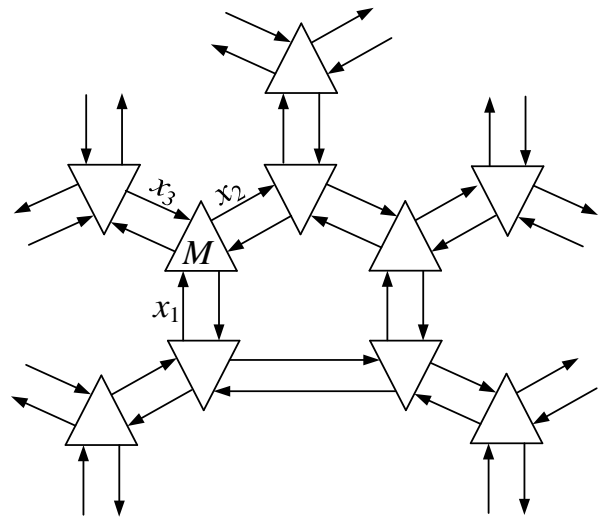


Рис. 4. Фрагмент обчислювальної моделі з елементарних структурних блоків

Якщо є необхідність, структури можуть бути тривимірними. Але логічно – вони, як і їхні складові частини елементарних блоків, тришарові. У такій тришаровій мережі в кожному шарі, в кожній вершині або елементарному блоці є тільки один напрямок подальшого руху вирішувача – в напрямку «третього сусіда» або вихідного параметра. Вибір вирішувачів (або самою вершиною, або елементарним блоком) одного з трьох алгоритмів  $M_i$  під час звернення до вершини (або елементарного блоку) еквівалентний вибору шару й напрямку для подальшого просування мережею. Для розпізнавання вирішувачів станів об'єктів (і їхніх входів) у них є ознака – «прапор»  $F$ , значення якого визначається числом заданих «параметрів-сусідів» і тим, чи виконувався вже алгоритм об'єкта в цій задачі.

Так, для першого варіанту (рис. 2, а) прапор кожної вершини  $F$  задається двома числами  $mn$ , де  $m$  – число заданих параметрів-«сусідів» (0, 1, 2, 3),  $n$  – ознака завдання самої вершини (0 – параметр у вершині не заданий і не обчислений, інакше 1). Тоді вирішувач повинен відшукувати й звертатися до вершин із прапором  $F = 20$ . Прапор  $F = 31$  – нормально виконаний алгоритм об'єкта, а якщо прапор  $F = 30$  – це ознака некоректності в задачі,

тоді потрібно виконати два або всі три алгоритми для цієї вершини й перевірити «нев'язування». У разі перевищення допустимої величини (точність задана в БД для цієї вершини) – виводиться діагностика.

У другому варіанті (рис. 2, б) перша величина  $m$  у «прапорі»  $F$  дорівнює числу заданих параметрів (ребер) блоку (0, 1, 2, 3), а друга  $n$  повідомляє вирішувач – запускався даний блок ( $F = 1$ ) чи ні ( $F = 0$ ). Тут вирішувач також шукає блоки з «прапором»  $F = 20$  і звертається до них, обираючи відповідний алгоритм (один із трьох). Прапор  $F = 31$  – нормально виконаний алгоритм блоку. Ознака некоректності – коли блок ще не виконувався, а всі три параметри вже задані ( $F = 30$ ).

Остання ситуація виникає в обох варіантах хоча б один раз під час «обходу» вирішувачів. Навіть у випадку коректної задачі це відбувається в останній вершині або елементарному блоці, коли всі інші параметри вже визначені. Водночас перевірка, яку проводить вирішувач, є перевіркою дотримання точності.

Вибираючи в кожній вершині (а) або блоці (б) алгоритм, вирішувач просувається далі по відповідному шару. Відповідно до об'єктного підходу, як уже зазначалося, вибір одного з алгоритмів залежно від того, які параметри задані, може здійснювати логічна процедура в алгоритмі самого об'єкта (вершині або елементарному блоці). Вирішувачу необхідно тільки стежити за появою необхідних прапорів й активізувати «готові до виконання» об'єкти (вершини або блоки).

Обчислювальна модель авіаційного двигуна ТВ3-117 може складатися з фрагментів такої структури. Під час використання елементарних блоків «вільні» (не зайняті) двонапрямні ребра (входи-виходи) – це зовнішні параметри фрагмента мережі, які в конкретній ситуації відіграють роль входних чинників (якщо задані) або вихідних параметрів (якщо не задані) для компонентної моделі. До незайнятих («вільних») ребер можуть підключатися інші елементарні блоки або фрагменти структурних схем при нарощуванні цієї моделі.

Для першого варіанту подана модель зобразиться фрагментом мережі (рис. 5), з типових структур (модулів) якої може бути сформована загальна «павутина» – мережа, що характеризує модель авіаційного двигуна ТВ3-117 у цілому (рис. 6). На рис. 5 і 6 двонапрямними стрілками умовно замінені парні, протилежно спрямовані ребра.

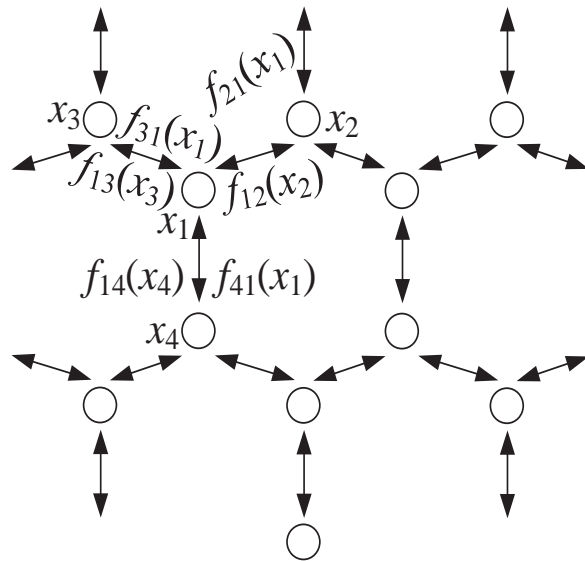


Рис. 5. Фрагмент семантичної мережі, яка виконує роль сполучного обчислювального осередку

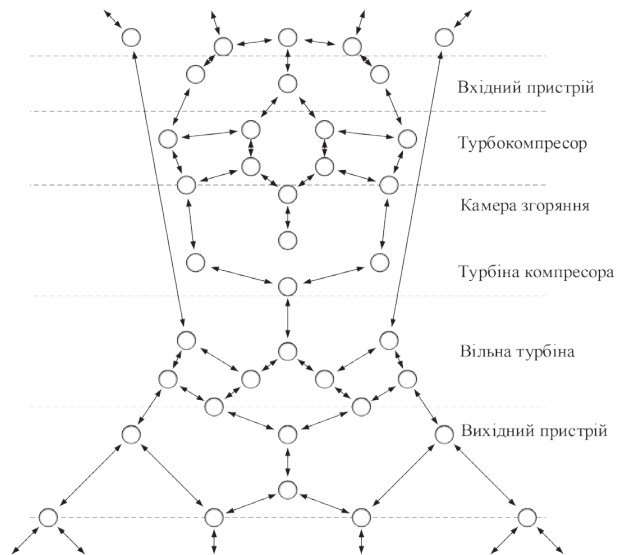


Рис. 6. Схема багаторівневої обчислювальної моделі авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі семантичної мережі

Області поблизу центру цієї мережі, де вершини (або дуги) – це основні вихідні дані двигуна, відповідають укрупненим моделям. Розширення меж мережі, тобто залучення нових параметрів, пов'язаних із розташованими ближче до центру, відповідає деталізації моделі двигуна. Певні зони в загальній мережі відповідають моделям окремих систем і підсистем двигуна. Відповідно, у БД, де зберігаються параметри й еталонні моделі двигуна, виділяються поля, в яких для кожного параметра зберігаються посилання на трьох «сусідів»: для варіанту  $a$  – на сусідні вершини (параметри) й на пов'язані з ними описи ребер мережі

(функціонали), або для варіанту  $b$  – на елементарні структурні блоки й зв'язувальні з ними ребра мережі.

У конкретній ситуації звернення до БД («дерево проєкту») дозволяє отримати значення певних параметрів; частина ж інших зовнішніх параметрів виявляється не заданою (вільною). Окрім того, є можливість відредагувати, задати або звільнити якийсь параметр. Під час роботи з такою моделлю програма-вирішувач діє залежно від того, як подана модель у вигляді мережі (рис. 4) з елементарних фрагментів незамкнених графів, або у вигляді структурної схеми (рис. 3) – з елементарних блоків. Так, у другому випадку вирішувач вибирає блоки  $M_i$  з прапором  $F = 20$ , для яких задана пара параметрів. Активізуючи їх (обираючи один із трьох внутрішніх алгоритмів, що може виробляти сам елементарний блок), він отримує треті параметри для цих блоків, тобто робить третє ребро теж заданим. Далі перегляд мережі повторюється, вибираються та активізуються нові блоки, які мають значення прапорів  $F = 20$  – поки не виявиться певною вся мережа. На кожному кроці ті блоки, які вже активізувалися, більше не розглядаються, оскільки в них прапор  $F = 31$ . Водночас можуть виявитися ще до активізації будь-якого блоку заданими все три його параметри – прапор  $F = 30$  (тобто виявляються придатними всі три внутрішніх алгоритми). Тоді повідомляється про «нев'язування» після виконання всіх трьох алгоритмів і порівняння результатів. Воно може виявитися в межах допустимості (що визначає користувач), або це результат некоректності завдання зовнішніх даних, неузгодженості в БД тощо. Проблема вирішується тим, що один або кілька параметрів мережі оголошуються користувачем «вільними».

У першому варіанті навпаки – все починається з параметрів. Перегляд мережі виявляє не задані вершини (параметри) з прапором  $F = 20$ , для яких задані обидва «сусіда», обирає відповідні дуги, активізує їх і визначає значення параметрів у шуканих вершинах. Водночас для результату кожної дуги використовується свій оператор у рекурентному вираженні – додавання, віднімання, множення, ділення або складніша дія. Ці оператори також зберігаються в БД або БЗ разом з описом дуг для кожного параметра. Далі цикл повторюється, поки не буде визначена вся мережа. Конфліктні ситуації, як це описано для другого варіанту, розпізнаються та вирішуються подібним чином.

Запропонований підхід добре узгоджується з об'єктною орієнтацією в сучасних інформаційних

технологіях. Локалізація параметрів і зменшення їхнього числа, спрощення зв'язків між ними дозволяє виділити елементарні блоки або елементарні дуги. Формування мережевої моделі для конкретного двигуна може виконуватися з використанням технології SADT.

Розглянемо формування центральної частини мережі, яка описує авіаційний двигун ТВ3-117 у найбільш укрупненій постановці – на рівні основних вихідних даних. З урахуванням особливостей робочого процесу основними закономірностями є рівняння збереження кількості руху (імпульсів), рівняння енергії, рівняння нерозривності. Задамо їм відповідно імена елементарних блоків  $B_1$ ,  $B_2$  і  $B_3$ . Зображуючи ці блоки в складі структурної схеми й деталізуючи параметри за викладеною методикою, для кожної із цих моделей (рівнянь) отримуємо фрагменти мережі (рис. 7, 8).

Як показано на рис. 7, у такій постановці модель двигуна в багатовимірному просторі параметрів є «клаптиковою поверхнею» у вигляді каркаса мережі з характерними точками (якщо розглядати значення параметрів у вершинах як координати в багатовимірному просторі, де в кожного параметра своя вісь і шкала), «переміщаючи» які отримуємо нову форму й нове положення в просторі параметрів цієї поверхні. До «вихідних» із вершин або блоків «назовні» стрілок (параметрів або дуг-функціоналів) можуть підключатися зовнішні системи.

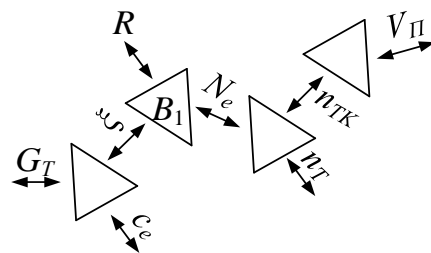


Рис. 7. Структурна мережа, що моделює закон збереження кількості руху на рівні двигуна

Рівняння, що моделює закон збереження кількості руху, запишемо у вигляді:

$$B_1: R = \zeta_T \left( 39,5 \eta_0 D \rho^{\frac{1}{2}} \xi N_e \right)^{\frac{2}{3}}; \quad (2)$$

де  $R$  – тяга, яка на значному віддаленні від Землі визначається за формулою Жуковського;  $\zeta_T$  – коефіцієнт витрати тяги;  $\eta_0 = \frac{c_T^2}{2m_k}$  – відносний коефіцієнт корисної діяльності гвинта на режимі висіння;  $c_T$  – коефіцієнт тяги;  $m_k = \frac{2N_{H.B}}{\rho F_{OM} (\omega r)^2}$  – коефіцієнт обертального моменту;  $N_{H.B}$  – потужність

на валу опорного гвинта;  $F_{OM}$  – площа, що обмітається опорним гвинтом;  $\omega r$  – окружна швидкість кінця лопаті;  $D$  – діаметр опорного гвинта;  $\xi = \frac{c_e N_{номп}}{G_T}$  – коефіцієнт витрати потужності;  $c_e$  – питома витрата палива;  $N_{номп}$  – потрібна потужність вертольоту на режимі горизонтального польоту;  $G_T$  – витрата палива;  $N_e = f(n, n_T, p_H, T_H)$  – наявна потужність;  $n = f(V_{II})$  – частота обертання ротора турбокомпресора;  $V_{II}$  – швидкість польоту;  $n_T$  – частота обертання вільної турбіни;  $p_H, T_H$  – відповідно тиск і температура навколишнього середовища;  $\rho$  – густина повітря.

На рис. 8 показано, як з урахуванням вищевикладеного до вихідного блоку  $B_2$  підключаються додаткові блоки. Вершина цього «пагорба» знаходиться в центрі мережі, де розташовуються основні параметри двигуна. Геометрична інтерпретація тут пов'язана з тим, що в блочно-ієрархічній моделі двигуна всі вузли авіаційного двигуна ТВ3-117 розділені за рівнями – вхідний пристрій, турбокомпресор, камера згоряння тощо. Кожному з вузлів відповідає певна ділянка мережі. Введення поняття «рівень» дозволяє виділяти потрібні фрагменти мережі під час розв'язку конкретних задач.

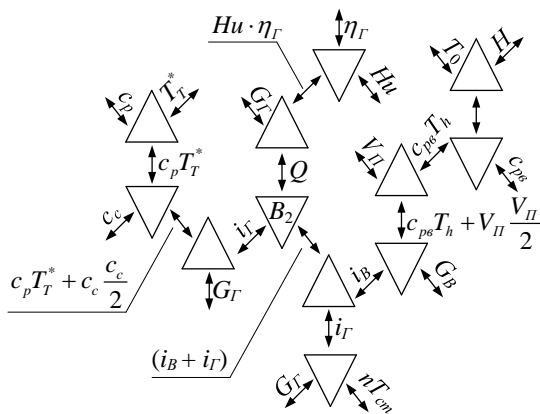


Рис. 8. Структурна мережа, що моделює закон збереження енергії на рівні двигуна

Рівняння, що моделює закон збереження енергії на рівні двигуна, має вигляд:

$$B_2: Q = i_T - (i_B + i_T); \quad (3)$$

де  $Q$  – теплопідведення;  $i_T$  – повна ентальпія газу;  $i_B$  – повна ентальпія повітря;  $i_T$  – ентальпія палива.

Подібним чином для деталізації мережі, що моделює  $B_2$  – закон збереження енергії – на рівні основних даних двигуна (рис. 8), використовується зв'язок:

$$i_T = G_T \left( c_p T_T^* + \frac{c_c^2}{2} \right); \quad (4)$$

де  $c_p$  – теплоємність робочого тіла;  $T_T^*$  – загальмована температура робочого тіла.

$$Q = G_T H_u \eta_T; \quad (5)$$

де  $G_T$  – витрата палива;  $H_u$  – нижча теплотворна здатність;  $\eta_T$  – повнота згоряння;

$$i_B = G_B \left( c_{ps} T_H + \frac{V_{II}^2}{2} \right); \quad (6)$$

де  $c_{ps}$  – теплоємність повітря;  $T_H = f(T_0, H)$  – температура атмосферного повітря, яка підпорядковується закону стандартної атмосфери;  $T_0$  – атмосферна температура в землі;  $H$  – висота польоту.

Як видно, фрагменти мережі, що моделюють основні рівняння на рівні двигуна, мають помічені кружками «вільні» параметри – незайняті дуги, якими ці фрагменти об'єднуються в загальну мережу, що моделює двигун.

Оскільки закони збереження енергії та кількості руху незалежні, то кожна з відповідних моделей добре поєднується з моделлю рівняння нерозривності. Однак, якщо ми хочемо мати модель, що об'єднує всі три рівняння, то дві дуги  $G_B$  і  $G_T$  виявляться ні до чого приєднати (вони вже виявляються «зайняті»). Це приводить до розуміння того, що додатково необхідні елементарні блоки-роздільники вигляду, показаного на рис. 9.

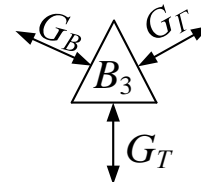


Рис. 9. Елементарна семантична мережа, що моделює закон збереження маси (нерозривності) на рівні двигуна

Рівняння, що моделює закон збереження маси (нерозривності) на рівні двигуна, має вигляд:

$$B_3: G_T = G_B + G_T; \quad (7)$$

де  $G_T$  – витрата газу;  $G_B$  – витрата повітря;  $G_T$  – витрата палива.

Така структура означає появу деякої надмірності в базі моделей (моделі зберігаються у БД), але додаткові блоки по структурі дуже прості й відповідають функціоналу:

$$F(G_B = 0) \text{ або } G_B = 0,5 G_B + 0,5 G_B, \quad (8)$$

Під час роботи зі складною моделлю вирішувач, стикаючись із такими блоками, виявляє, що в них ще до активізації задані всі три параметри, але це не призводить до аварійних повідомлень і зупинок, оскільки під час виконання будь-якого з трьох алгоритмів блоку забезпечено узгодження результату з третім заданим вихідним ребром.

Отримана мережа може розширюватися шляхом залучення нових параметрів у складі додаткових елементарних блоків відповідно до закономірностей, що описують закономірності робочих процесів і взаємозв'язок у вузлах двигуна.

Отже, контроль і діагностика технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 може бути реалізована на основі FDI-методу на базі моделей двигуна, що є мережею з елементарних (тришарових) блоків або незамкнених графів з однією вершиною-параметром і трьома ребрами. Ці елементарні об'єкти містять параметри, посилання на трьох «сусідів» і потрібні алгоритми зв'язку – попарно

з двома з трьох «сусідів». Активізує об'єкти в мережі програма-вирішувач відповідно до «прапорів», які виставляють об'єкти. Алгоритми елементарних об'єктів аналізують, які параметри, що приходять від «сусідів», обирають з урахуванням цього один із трьох власних алгоритмів для виконання, виставляють для зовнішнього вирішувача значення «прапора». Водночас задачі контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 розв'язуються без ітерацій. Але для реалізації наведеного методу моделювання необхідна розробка специфічної керівної програми-вирішувача.

**Висновки.** У роботі запропоновано метод побудови математичної моделі авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі розширеної семантичної мережі, що дозволяє шляхом реконфігурації математичної моделі й адаптації її характеристик до індивідуального двигуна розв'язувати широкий набір задач контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 у польотних режимах.

#### Список літератури:

1. Жернаков С.В. Активная экспертная система мониторинга и управления ремонтом авиационных газотурбинных двигателей. *Радиоэлектроника. Информатика. Управление*. 2001. № 2. С. 80–84.
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. Васильев В.И., Жернаков С.В. Контроль и диагностика технического состояния авиационных двигателей на основе экспертных систем. *Вестник УГАТУ*. 2007. Т. 9, № 4 (22). С. 11–23.
4. Машошин О.Ф. Оценка диагностической ценности информации при решении задач в области эксплуатации авиационной техники. *Научный вестник МГТУ ГА*. 2015. № 219. С. 53–56.
5. De Giorgi M. G., Campilongo S. and Ficarella A. A diagnostics tool for aero-engines health monitoring using machine learning technique. *Energy Procedia*. 2018. Vol. 148. P. 860–867.
6. Ntantis E.L. Diagnostic Methods for an Aircraft Engine Performance. *Journal of Engineering Science and Technology*. Rev. 8 (4). P. 64–72.
7. Шмельов Ю.М., Владов С.І., Клімова Я.Р. Застосування методології системного аналізу до вирішення проблеми ідентифікації технічного стану авіаційного двигуна ТВ3–117. *Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи* : матеріали Регіональної наук.-практ. конференції студентів, аспірантів і молодих науковців, м. Вінниця, 06–08 червня 2018 р. Вінниця : ВНТУ, 2018. С. 278–282.
8. Шмельов Ю.М., Владов С.І., Хебда А.С., Котляров К.Г. Застосування правил нечіткої логіки у задачі ідентифікації технічного стану авіаційного двигуна ТВ3–117. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2018. Т. 30 (69), № 3. С. 34–40.
9. Shmelov Y., Vladov S., Klimova Y. and 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. 2018. P. 77–82.
10. Golanski P., Perz-Osowska M. and Szczekala M. A demonstration model of a mobile expert system with augmented reality user interface supporting M–28 aircraft maintenance. *Journal of KONBiN*. 2014. No. 3 (31). P. 23–31.
11. Otto B., Folmer E. and Ebner V. A characteristics framework for semantic information systems standards. *Information Systems and e-Business Management*. 2012. Vol. 10, Issue 4. P. 571–602.
12. Sarkar S., Singh D. S., Srivastav A. and Ray A. Semantic sensor fusion for fault diagnosis in aircraft gas turbine engines. *Proceedings of the 2011 American Control Conference*, 29 June–01 July 2011. P. 220–225.



**Vladov S.I., Shmelov Yu.M., Pylypenko L.M., Nazarenko N.P., Tutova N.V., Derevyanko I.G., Ponomarenko A.V. IMPLEMENTATION OF COMPONENT MATHEMATICAL MODELS OF TV3-117 AIRCRAFT ENGINE BASED ON SEMANTIC NETWORK**

*The subject of the study in the article is the TV3-117 aircraft engine and methods for monitoring and diagnosing its technical condition. The purpose of the work is the implementation of component mathematical models of the aircraft engine TV3-117 based on the semantic network for monitoring and diagnosing its technical condition. The following tasks are solved: substantiation of the prerequisites for the development of mathematical models of the TV3-117 aircraft engine based on the semantic network, development of a computational model of the TV3-117 aircraft engine based on the semantic network. The following methods are used: methods of mathematical modeling, methods for constructing a multi-level computational model based on the semantic network. The following results were obtained: It was determined that the control and diagnostics of the technical condition of the TV3-117 aircraft engine can be implemented based on the FDI method based on engine models, which is a network of elementary (three-layer) blocks or open graphs with one vertex parameter and three edges. These elementary objects contain parameters, links to three “neighbors” and triple communication algorithms – in pairs with two of the three “neighbors”. The solver program activates the objects in the network in accordance with the “flags” that expose the objects. Algorithms of elementary objects analyze which parameters that come from the “neighbors”, taking into account this, choose one of three proprietary algorithms for execution, set the values of the “flag” for the external solver. At the same time, the tasks of monitoring and diagnosing the technical condition of the TV3-117 aircraft engine are solved without iterations. Conclusions: A method is proposed for constructing a mathematical model of the TV3-117 aircraft engine based on an extended semantic network, which allows reconfiguring the mathematical model and adapting its characteristics with an individual engine to solve a wide range of tasks for monitoring and diagnosing the technical condition of the TV3-117 aircraft engine in flight modes. The resulting network can be expanded by attracting new parameters as part of additional elementary units in accordance with the laws describing the laws of work processes and the relationship in the engine nodes.*

**Key words:** aircraft engine, mathematical model, semantic network, graph.