

## ІНТЕГРАЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНА СИСТЕМА, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЄ ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗА СТАНОМ СИЛОВИХ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

*Ефективність стратегії технічного обслуговування, яка застосовується, безпосередньо залежить від повноцінності наявної інформації про реальний технічний стан об'єкта в процесі експлуатації. Поточний стан динамічного об'єкта, визначений за технічного діагностування кожного конкретного об'єкта технічного обслуговування, має обумовлювати перелік і обсяги відповідних профілактичних та відновлювальних робіт. Застосовуються наступні три різновиди організації технічного обслуговування динамічних об'єктів за станом: з контролем рівня надійності об'єкту експлуатації; з контролем параметрів об'єкту експлуатації; гібридний. Оскільки, силові установки як об'єкт експлуатації відзначаються високою функціональною значимістю, при цьому мають недостатній ступінь резервування та невисокий рівень експлуатаційної технологічності, доцільним виявляється застосування стратегії технічного обслуговування за станом з контролем параметрів, що передбачає неперервний, або періодичний контроль визначальних параметрів, або параметрів, за якими оцінюється фактичний поточний технічний стан кожного окремого об'єкта експлуатації.*

*Наведено загальні принципи, на основі яких може бути побудована інтегральна інформаційно-обчислювальна системи обробки параметрів, яка є головним елементом автоматизованої системи керування технічним станом газотурбінної установки. Синтезована адаптивна система динамічного контролю параметрів, що характеризують поточний технічний стан силової установки. Контур керування технічним станом об'єкта замкнений від'ємним зворотним зв'язком, що дає можливість застосування стратегії технічного обслуговування за станом з контролем параметрів. Система автоматичного керування, що використовує принцип зворотного зв'язку, будується традиційно на лінійній динамічній моделі об'єкта керування, використовується сукупність лінійних диференціальних та алгебраїчних рівнянь, що пов'язують між собою відхилення функціональних параметрів від їх номінальних значень, приведені до безрозмірної форми.*

*Ключові слова: газотурбінні установки, лінійна динамічна модель, технічне обслуговування за станом, інформаційне забезпечення.*

**Вступ і постановка проблеми.** Газотурбінні установки (ГТУ) знайшли широке застосування в авіації, а також в енергетиці, трубопроводному, залізничному і морському транспорті тощо. При технічній експлуатації вищенаведених динамічних об'єктів традиційно застосовується метод технічної експлуатації за ресурсом зі стратегією технічного обслуговування за наробітком. У більшості випадків ГТУ є високотехнологічними, а тому і високо кошторисними об'єктами, експлуатація яких з використанням стратегії технічного обслуговування за наробітком є економічно недоцільною, внаслідок суттєвого недовикористання їх фактичного ресурсу.

Забезпечення безвідмовності ГТУ представляє собою важливу задачу, що потребує глибокого вивчення та використання методології системного підходу. При цьому головними принципами, що покладені в основу даного підходу повинні бути: комплексність вивчення проблеми; своєчасність проведення заходів з аналізу надійності парку ГТУ, діагностування технічного стану (ТС) агрегатів; оперативність розробки рекомендацій і корегування програм технічного обслуговування; забезпечення адаптивності комплексу заходів в залежності від зміни ТС та умов експлуатації. Ефективність системи вказаних заходів залежить від повноти та об'єму інформації про ТС агрегатів, а відповідно і від можливостей методів контролю, що використовують при діагностуванні їх ТС. Однак методи, що застосовують нині для контролю ТС ГТУ, характеризуються недостатньою інформативністю та, доволі часто, низькою достовірністю результатів, що потребує їх комплексного

використання сумісно з іншими методами. А це, відповідно, впливає на вартість технічного обслуговування, збільшення трудовитрат і часу виконання контролю ТС.

Силові ГТУ є об'єктами експлуатації з високою функціональною значимістю, що мають недостатній ступінь резервування, а також невисокий рівень експлуатаційної технологічності. Тому для них доцільне застосування стратегії технічного обслуговування за станом з контролем параметрів, за якої передбачається неперервний або періодичний контроль параметрів, що визначають фактичний поточний ТС кожного окремого об'єкта експлуатації. Вибір вимірюваних параметрів, які підлягають такому контролю, як правило, неоднозначний, що обумовлено як специфічними особливостями динамічного об'єкта, так і різноманітним характером зв'язків несправностей з функціональними параметрами. Однак, незважаючи на зазначену неоднозначність, вимоги, що визначають вибір вимірюваних функціональних параметрів, носять загальний характер, згідно з яким вимірювані параметри повинні мати прийнятні точність і стабільність показань у часі; мати найбільшу серед інших параметрів діагностичну цінність; ґрунтуватися на штатних вимірюваннях; забезпечувати простоту і зручність експлуатації вимірювальних засобів. У зв'язку з цим задача розробки підходів, щодо застосування сучасних вискоефективних методів контролю ТС для діагностики агрегатів ГТУ є актуальною, а її рішення представляє важливу наукову проблему.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням оптимізації профілактичних і відновлювальних робіт та ремонтів на ГТУ присвячено багато досліджень із використанням теорії надійності й масового обслуговування [1 - 19 та ін]. Аналіз цих робіт показав, що найбільш оптимальною є система обслуговування обладнання «за технічним станом».

Так, у роботі [4] автором проведено аналіз стану розвитку автоматизованих систем контролю, діагностики і прогнозування ТС складних технічних систем різного призначення. Визначено переваги їх застосування в процесі управління життєвим циклом складних технічних систем.

У науковій статті [5] проведено аналіз характеристик процесу експлуатації агрегатів систем автоматичного керування. За результатами аналізу розроблені вимоги до математичної моделі процесу технічної експлуатації агрегатів, обрано клас моделі та метод моделювання, що дозволило розробити формалізований опис процесу технічної експлуатації одиничного агрегату систем автоматичного керування. За результатами аналізу обрано модель прогнозування показника надійності агрегатів та спосіб статистичного контролю рівня надійності.

У статті [7] розглянуто напрямок створення сучасного науково-методичного апарату побудови бортових вимірювальних систем, які дозволяють підвищити достовірність проведення вимірювань з метою оцінювання ТС бортового обладнання літальних апаратів, що експлуатуються за станом.

У роботі [8] запропоновано підхід, на базі якого може бути створено інтегральну інформаційно-обчислювальну систему обробки параметрів автоматизованої системи керування ТС силової ГТУ.

Наукове дослідження [9] присвячено розробці інформаційної та динамічної моделей контролю і діагностики ТС авіаційного двигуна задля визначення основних вимог до експертної системи. Використовуються такі методи: методи системного аналізу, методи системного програмування, методи побудови інформаційних моделей. За підсумками дослідження 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).

**Метою статті** є визначення найбільш ефективних (з точки зору економічної доцільності) шляхів підтримання справності та надійної експлуатації силових ГТУ на основі розробки автоматизованої системи керування їх ТС.

**Виклад основного матеріалу.** Для силових ГТУ за рівнем діагностичної цінності вимірювані функціональні параметри умовно можуть бути розділені на дві групи. До першої групи з більшою діагностичною значимістю відносяться: температура перед турбіною і за

турбіною, тиск за компресором, частоти обертання, температура масла в системі змащування, вібрація валу. До другої групи вимірюваних параметрів з меншою діагностичною значимістю можна віднести всі інші вимірювані параметри: температура на виході камери згоряння, тиск на виході турбіни, температура в порожнині колеса турбіни, температура на виході компресора, витрата палива та інші. Але, як свідчить досвід експлуатації ГТУ, сумарний вплив несправностей, що в них виникають, на вихідні функціональні параметри суттєво нижче рівня відхилень, які викликані зміною режиму роботи ГТУ та зміною зовнішніх умов експлуатації. Тому для зменшення впливу зміни режимів та випадкових змін зовнішніх умов функціонування ГТУ, зазвичай, використовуються комплексні діагностичні параметри, які, як правило, є приведеними до безрозмірної форми відхиленнями вихідних функціональних параметрів від їх номінальних величин, що відповідають справному стану ГТУ.

Слід зазначити, що будь-який динамічний об'єкт технічного обслуговування, в першу чергу, є об'єктом автоматичного регулювання, що використовується за своїм функціональним призначенням і характеризується сукупністю вхідних (регулюючих) параметрів, що утворюють вектор  $u(t) = (u_1(t), \dots, u_m(t))^T$  і сукупністю вихідних (регульованих) параметрів, що утворюють вектор  $x(t) = (x_1(t), \dots, x_r(t))^T$ , а також сукупністю спостережуваних (вимірюваних) параметрів, що утворюють вектор  $y(t) = (y_1(t), \dots, y_n(t))^T$ ,  $m \leq r < n$ . При цьому основна задача системи автоматичного регулювання – забезпечення номінальних (штатних) режимів функціонування об'єкта технічного обслуговування. Для побудови систем автоматичного регулювання за принципом від'ємного зворотного зв'язку традиційно використовуються лінійні динамічні моделі об'єктів регулювання, що пояснюються малістю відхилень значень вихідних функціональних параметрів від їх номінальних значень, тобто використовується сукупність лінійних диференціальних та алгебраїчних рівнянь, які пов'язують між собою приведені до безрозмірної форми відхилення функціональних параметрів від їх номінальних значень. Отже, в якості параметрів, що характеризують поточний ТС об'єкта технічного обслуговування, доцільно розглядати параметри його лінійної динамічної моделі (коефіцієнти підсилення, сталі часу) [2], [10]. Ці параметри характеризують ТС справного об'єкта і, водночас, є нечутливими до випадкових змін зовнішніх умов та режимів функціонування. Складаючи лінійну динамічну модель варто керуватися наступним правилом: лінійна динамічна модель повинна зв'язувати функціональні параметри об'єкта технічного обслуговування, що мають найбільшу діагностичну цінність. У цьому випадку параметри лінійної динамічної моделі цілком характеризують поточний ТС динамічного об'єкта і їх зміна у часі характеризує процес "старіння" об'єкта технічного обслуговування.

В загальному випадку [19] рівняння лінійної динамічної моделі для силової ГТУ можуть бути записані у вигляді

$$\begin{cases} T \frac{dx}{dt} + x = Ku(t) \\ y(t) = K_1 x(t) + K_2 u(t) \end{cases} \quad (1)$$

де  $T$  – невироджена матриця узагальнених сталих часу, розміру  $r \times r$ , а матриці  $K$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  – матриці коефіцієнтів підсилення, розмірів  $r \times m$ ,  $n \times r$ ,  $n \times m$  відповідно.

Рівняння (1) – це рівняння руху, а рівняння (2) – це рівняння спостереження.

Загальна кількість параметрів у цих матрицях  $N = (n + r)(m + r)$  суттєво перевищує кількість спостережуваних параметрів  $n$ . Серед параметрів лінійної динамічної моделі виділяються статистично незалежні (або слабо залежні) параметри, які називають визначальними, тобто множина параметрів лінійної динамічної моделі факторизується і у кожний клас потрапляють параметри з високим ступенем взаємної кореляції.

Цілком зрозуміло, що для замикання контуру керування ТС динамічного об'єкта від'ємним зворотним зв'язком, в першу чергу, необхідно мати можливість неперервного контролю параметрів, що характеризують його ТС. У тих випадках, коли поточний ТС динамічного об'єкта оцінюється за значеннями відхилень функціональних параметрів від їх

номіналів, неперервний контроль здійснюється за допомогою штатних контрольно-вимірювальних систем. Якщо ж оцінка поточного ТС динамічного об'єкта виконується за допомогою параметрів його лінійної динамічної моделі, то для здійснення неперервного контролю цих параметрів, необхідно синтезувати адаптивну систему динамічного контролю.

Під динамічним контролем будемо розуміти сукупність дій, що спрямовані на визначення поточного ТС об'єкта, або його окремого вузла, за результатами вимірювання параметрів з високою діагностичною цінністю, які змінюються у часі. Динамічний контроль використовується для оцінки поточного ТС інерційних об'єктів, на відміну від статичного контролю, що використовується для оцінки ТС безінерційних об'єктів, або ж таких інерційних об'єктів, час перехідних процесів в яких є значно менший ніж час, що відводиться на сам контроль. Неперервний контроль визначальних параметрів здійснюється в результаті неперервного контролю й ідентифікації параметрів лінійної динамічної моделі.

Неперервність контролю визначальних параметрів гарантує обсяг інформації про ТС об'єкта, що виключає можливість раптових відмов. Для поступових відмов можуть бути розроблені спеціальні методи їхнього прогнозування, основною задачею яких є своєчасне виявлення передвідмовного стану об'єкта. При цьому процес зміни відповідних параметрів, що характеризують ТС об'єкта, зазвичай, має монотонний характер. Слід зазначити, що при прогнозуванні, як правило, користуються не моделями систем, а адаптивними моделями визначальних параметрів, що здатні реагувати на зміни ТС об'єкта технічного обслуговування. Принципи побудови системи динамічного контролю параметрів, що характеризують поточний ТС, і адаптивних моделей прогнозування цих параметрів є універсальними для широкого класу динамічних об'єктів, а лінійна динамічна модель об'єкта технічного обслуговування (1)-(2), що задовольняє сформульованим вище вимогам, створюється для кожного об'єкта індивідуально.

Нехай  $t_0$  – час початку діагностування. Для кожного  $t > t_0$  за формулою Коші маємо

$$x(t) = e^{-T^{-1}(t-t_0)}x(t_0) + \int_{t_0}^t e^{-T^{-1}(t-\tau)}T^{-1}Ku(\tau)d\tau,$$

де  $e^{-T^{-1}(t-t_0)}$  – нормована матриця Коші, стовпчики якої це  $r$ -лінійно незалежних розв'язки однорідної системи диференціальних рівнянь, що відповідає системі диференціальних рівнянь (1),  $x(t_0)$  – вектор початкових умов, який, у загальному випадку, не дорівнює нулю.

Для вектора спостережуваних параметрів  $y(t)$  при кожному  $t > t_0$  маємо

$$y(t) = K_1e^{-T^{-1}(t-t_0)}x(t_0) + \int_{t_0}^t K_1e^{-T^{-1}(t-\tau)}T^{-1}Ku(\tau)d\tau + K_2u(t).$$

Позначимо  $y_0(t) = y(t) - K_1e^{-T^{-1}(t-t_0)}x(t_0)$ , тобто

$$y_0(t) = \int_{t_0}^t K_1e^{-T^{-1}(t-\tau)}T^{-1}Ku(\tau)d\tau + K_2u(t). \quad (3)$$

Тоді за кожного фіксованого  $t > t_0$  та справного стану силової ГТУ множина усіх можливих реалізацій вектора  $y_0(t)$  утворює, у загальному випадку,  $m$ -вимірну гіперплощину в  $n$ -вимірному евклідовому просторі ( $m < n$ ).

З іншого боку, за кожного фіксованого  $t > t_0$  співвідношення (3) визначає лінійний неперервний оператор  $A_t$ , при чому областю значень цього оператора є  $m$ -вимірна гіперплощина в  $n$ -вимірному евклідовому просторі. Як відомо [20], для кожного лінійного неперервного оператора  $A_t$  існує спряжений оператор  $A_t^*$ , а відповідно, за умови, що добуток  $A_t^*A_t$  є взаємнооднозначним оператором, може бути визначений оператор

$$P_t = E - A_t(A_t^*A_t)^{-1}A_t^*,$$

де  $E$  – одиничний оператор, що діє в  $n$ -вимірному евклідовому просторі.

Легко бачити, що оператор  $P_t$  задовольняє наступному співвідношенню  $P_t^2 = P_t^* = P_t$ , а це свідчить про те, що оператор  $P_t$  за кожного фіксованого  $t$  є оператором ортогонального проектування, що діє в  $n$ -вимірному евклідовому просторі. Тому, якщо скоригований вектор спостережуваних параметрів  $y_0(t)$  у деякий фіксований момент  $t > t_0$  не буде належати гіперплощині справних станів динамічного об'єкта, тобто

$$y_0^\perp(t) = P_t y_0(t) = y_0(t) - y_{0pr}(t) \neq 0, \quad (4)$$

де  $y_{opr}(t)$  – це ортогональна проекція вектора  $y_0(t)$  на  $m$ -вимірну гіперплощину справних станів динамічного об'єкта, то реальний поточний ТС об'єкта не відповідає лінійній динамічній моделі справного об'єкта і необхідно виконувати ідентифікацію параметрів лінійної динамічної моделі, що буде відповідати його новому поточному ТС. Таким чином, лінійна динамічна модель буде "старіти" синхронно зі зміною реального ТС динамічного об'єкта. Зазначимо, що умова (4) – є достатньою (а на практиці і необхідною) умовою невідповідності параметрів лінійної динамічної моделі поточному ТС динамічного об'єкта.

Структурна схема системи динамічного контролю параметрів, що характеризують ТС силової ГТУ, представлена на рис. 1.

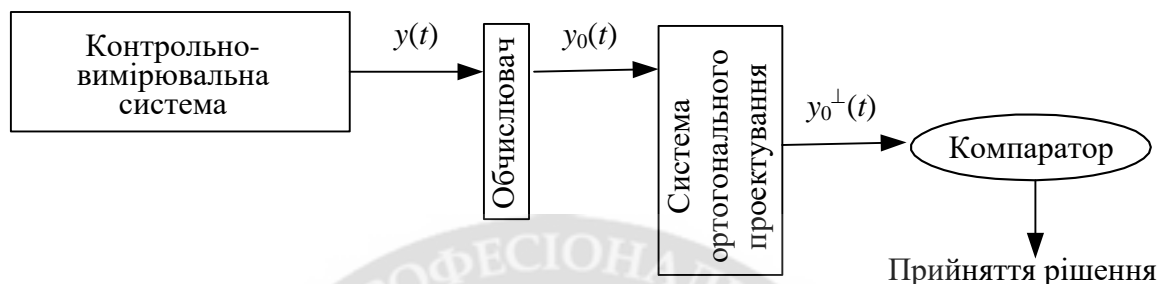


Рисунок 1 - Структурна схема системи динамічного контролю параметрів

Матриця передаточних функцій  $H(p)$  системи ортогонального проектування, яка наведена на рис. 1, має вид

$$H(p) = E - (K_1(Tp + E)^{-1}K + K_2) \times \\ \times [K^T(T^T p + E)^{-1} K_1^T K_1 (Tp + E)^{-1} K + K^T(T^T p + E)^{-1} K_1^T K_2 + K_2^T K_1 (Tp + E)^{-1} K + K_2^T K_2]^{-1} \\ \times (K^T(T^T p + E)^{-1} K_1^T + K_2^T), \quad (5)$$

де  $E$  – це  $n$ -вимірна одинична матриця.

При цьому на вхід системи ортогонального проектування з виходу обчислювача буде подаватися скоригований вектор спостережуваних параметрів

$$y_0(t) = y(t) - K_1 e^{-T^{-1}(t-t_0)} x(t_0).$$

Якщо матриці лінійної динамічної моделі  $T$ ,  $K$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ , що входять до системи рівнянь (1, 2), ідеально відповідають поточному ТС динамічного об'єкта, то для будь-якого  $t > t_0$

$$y_0^{\perp}(t) \equiv 0. \quad (6)$$

Порушення ж цієї тотожності у деякий момент часу  $t_1 > t_0$  свідчить про те, що деякі параметри лінійної динамічної моделі об'єкта не відповідають його реальному ТС в цей момент часу і підлягають корекції. Істотною перевагою запропонованої схеми є те, що висновок про адекватність моделі поточному ТС об'єкта можна зробити за повної відсутності інформації про вхідні параметри і, тим більше, без будь-яких тестових впливів на об'єкт. Зазначимо, що метод ортогонального проектування дозволяє не тільки контролювати параметри лінійної динамічної моделі, що характеризують поточний ТС динамічного об'єкта, але й є придатним для визначення рядка (рядків) матриці передаточних функцій лінійної динамічної моделі силової ГТУ

$$W(p) = K_1(Tp + E)^{-1}K + K_2, \quad (7)$$

який містить параметри, що не відповідають поточному ТС. Ця процедура також може бути здійснена за повної відсутності інформації щодо вектора  $u(t)$  [11].

Слід зазначити, що наведена система динамічного контролю є системою сигнального діагностування, що функціонує в реальному часі. Адаптація параметрів лінійної динамічної моделі до поточного ТС силової ГТУ відбувається лише після того, як в деякий момент часу

$t_1$  вперше спостерігається нерівність  $y_0^\perp(t_1) \neq 0$ . Ідентифікація нових значень параметрів лінійної динамічної моделі може бути виконана одним із відомих методів параметричної ідентифікації, при цьому елементи матриці сталих часу  $T$  можуть бути визначені внаслідок аналізу перехідних процесів, а елементи матриць  $K, K_1, K_2$  – внаслідок аналізу як перехідних, так і усталених режимів. Після ідентифікації нових значень параметрів лінійної динамічної моделі об'єкта матриця передаточних функцій системи ортогонального проектування також адаптується до нового ТС об'єкта, внаслідок чого виконання тотожності (6) поновиться і буде виконуватися до деякого моменту  $t_2 > t_1$ , у який будемо мати  $y_0^\perp(t_2) \neq 0$ . В момент часу  $t_2$  процедура адаптації системи неперервного моніторингу до нового ТС силової ГТУ повторюється. Таким чином, синтезована система динамічного контролю параметрів лінійної динамічної моделі силової ГТУ адаптується до її поточного ТС і "старіє" синхронно з нею.

Параметри лінійної динамічної моделі, що визначаються під час ідентифікації в моменти часу  $t_1, t_2, \dots, t_n$  надходять до бази даних інтегральної інформаційно-обчислювальної системи, в якій на основі одержаної первинної інформації здійснюється оцінка поточного ТС силової ГТУ і прогнозування ТС з метою своєчасного виявлення передвідмовного стану контрольованого об'єкта.

Як вже зазначалося, процес зміни параметрів, що характеризують ТС об'єкта, зазвичай, має монотонний характер. Виходячи із цього, з кожного класу параметрів з високим ступенем кореляції необхідно вибрати по одному представнику, який швидше за всіх наближається до границі області, що характеризує передвідмовний стан ГТУ. Вибрані параметри утворюють вектор визначальних параметрів  $v(t) = (v_1, \dots, v_k)^T, k \in N$ .

Справний стан об'єкта технічного обслуговування в момент часу  $t$  еквівалентний виконанню співвідношення  $v(t) \in D$ ,

де  $D$  – поле допуску для вектора визначальних параметрів. Зважаючи на те, що при кожному фіксованому  $t$ , про істинне значення вектора  $v(t)$  можна судити тільки по вектору  $\tilde{v}(t)$  – вектору точкових оцінок координат вектора  $v(t)$ , то висновок про ТС динамічного об'єкта можна зробити лише з визначеною довірчою імовірністю  $P_{\text{дов}}$ .

Тому, якщо імовірність

$$P\{\tilde{v}(t) \in D_\varepsilon\} \cong 1,$$

де  $D_\varepsilon \subset D$ , то з довірчою імовірністю  $P_{\text{дов}}$  можна стверджувати, що в поточний момент часу  $t$  стан динамічного об'єкта відповідає справному.

Для того, щоб можна було зробити висновок про імовірний стан ГТУ в майбутньому необхідно, як вже відзначалось, виконувати прогнозування вектора визначальних параметрів, при цьому слід використовувати адаптивні моделі прогнозування для кожної координати вектора визначальних параметрів, що здатні реагувати на зміни ТС динамічного об'єкта. При використанні адаптивних методів прогнозування, наприклад, адаптивного методу експоненціального згладжування, динамічний ряд згладжується за допомогою зваженої ковзної середньої, вага якої, враховуючи монотонний характер зміни параметру, визначається останніми значеннями динамічного ряду. Це дає можливість отримати оцінку параметрів тренду, яка характеризує не середній рівень досліджуваного ряду, а тенденцію, що склалася на момент останнього спостереження.

Принципи побудови адаптивної системи неперервного контролю параметрів, що характеризують ТС, і адаптивних моделей прогнозування цих параметрів є універсальними для широкого класу динамічних об'єктів, а не лише для силових ГТУ, проте лінійна динамічна модель об'єкта технічного обслуговування створюється для кожного об'єкта індивідуально. Слід зауважити, що для більшості динамічних об'єктів, які знаходяться в експлуатації, не передбачалося використання стратегії технічного обслуговування за станом, отже і відсутні системи вбудованого контролю визначальних параметрів, а самі визначальні параметри не призначені розробником, тому задача організації технічного обслуговування за наробітком з прогнозуванням передвідмовного стану, а також технічного обслуговування за

станом з контролем параметрів, повинна вирішуватися на базі штатних контрольно-вимірвальних систем.

На основі інформації про поточний ТС силової ГТУ та з урахуванням результатів прогнозування робиться висновок про можливість її подальшої технічної експлуатації, або ж про необхідність проведення ремонтних робіт певного обсягу. Таким чином, контур керування ТС силової ГТУ стає замкнутим.

Підсумовуючи наведені міркування можна зробити висновок, що інтегральна інформаційно-обчислювальна система (ІОС) повинна вирішувати дві основні задачі: достовірну оцінку поточного ТС динамічного об'єкта і прогнозування передвідмовного стану у середньостроковій та довгостроковій перспективі.

Виходячи з вищезазначеного, структура ІОС обробки параметрів, що характеризують ТС ГТУ, має вигляд, наведений на рис. 2.



Рисунок 2 - Структурно-функціональна схема ІОС обробки параметрів, що характеризують поточний технічний стан силової ГТУ

Проілюструємо одержані теоретичні результати на прикладі оновального турбореактивного двигуна (ТРД) з нерегульованим соплом. Лінійна динамічна модель для оновального ТРД наведена в [21] та має вигляд

$$\begin{cases} (0.5p + 1)x_n = 0.333x_{G_T} \\ (0.5p + 1)x_{T_3} = (0.333p + 0.370)x_{G_T}, \\ (0.5p + 1)x_{T_4} = (0.293p + 0.06)x_{G_T} \end{cases}$$

де  $x_{G_T}$  – витрата палива (регулюючий параметр),  $x_n$  – число обертів двигуна,  $x_{T_3}$  – температура газу перед турбіною,  $x_{T_4}$  – температура газу за турбіною,  $x_n$ ,  $x_{T_3}$ ,  $x_{T_4}$  – спостережувані параметри.

Позначимо  $u(t) = x_{G_T}$ ,  $y_0(t) = (y_1(t), y_2(t), y_3(t))^T = (x_n, x_{T_3}, x_{T_4})^T$  – скоригований вектор спостережуваних параметрів. Тоді, відповідно до співвідношення (7)

$$W(p) = \begin{pmatrix} w_1(p) \\ w_2(p) \\ w_3(p) \end{pmatrix} = K_1(Tp + E)^{-1}K + K_2, \quad \text{де } K_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ -0.889 \\ -1.580 \end{pmatrix}, \quad K_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.666 \\ 0.586 \end{pmatrix},$$

$$K = (0.333), \quad T = (0.5).$$

Відповідно до співвідношення (5) матриця передаточних функцій системи ортогонального проектування  $H(p)$  має вигляд

$$H(p) = \begin{pmatrix} \frac{0.197p^2 + 0.281p + 0.141}{0.197p^2 + 0.281p + 0.252} & -\frac{0.111p + 0.123}{0.197p^2 + 0.281p + 0.252} & -\frac{0.098p + 0.020}{0.197p^2 + 0.281p + 0.252} \\ \frac{0.111p + 0.123}{0.197p^2 + 0.281p + 0.252} & \frac{0.086p^2 + 0.035p + 0.115}{0.197p^2 + 0.281p + 0.252} & -\frac{0.098p^2 + 0.128p + 0.022}{0.197p^2 + 0.281p + 0.252} \\ \frac{0.098p + 0.020}{0.197p^2 + 0.281p + 0.252} & \frac{0.098p^2 + 0.128p + 0.022}{0.197p^2 + 0.281p + 0.252} & \frac{0.111p^2 + 0.246p + 0.248}{0.197p^2 + 0.281p + 0.252} \end{pmatrix}$$

Подальше моделювання будемо виконувати в програмному середовищі MATLAB.

Припустимо, що на виході обчислювача спостерігається вектор

$$y_0(t) = (y_{01}(t), y_{02}(t), y_{03}(t))^T.$$

На рис.3 наведено три варіанти (а, б, в) графіків координат вектора  $y_0(t)$ .

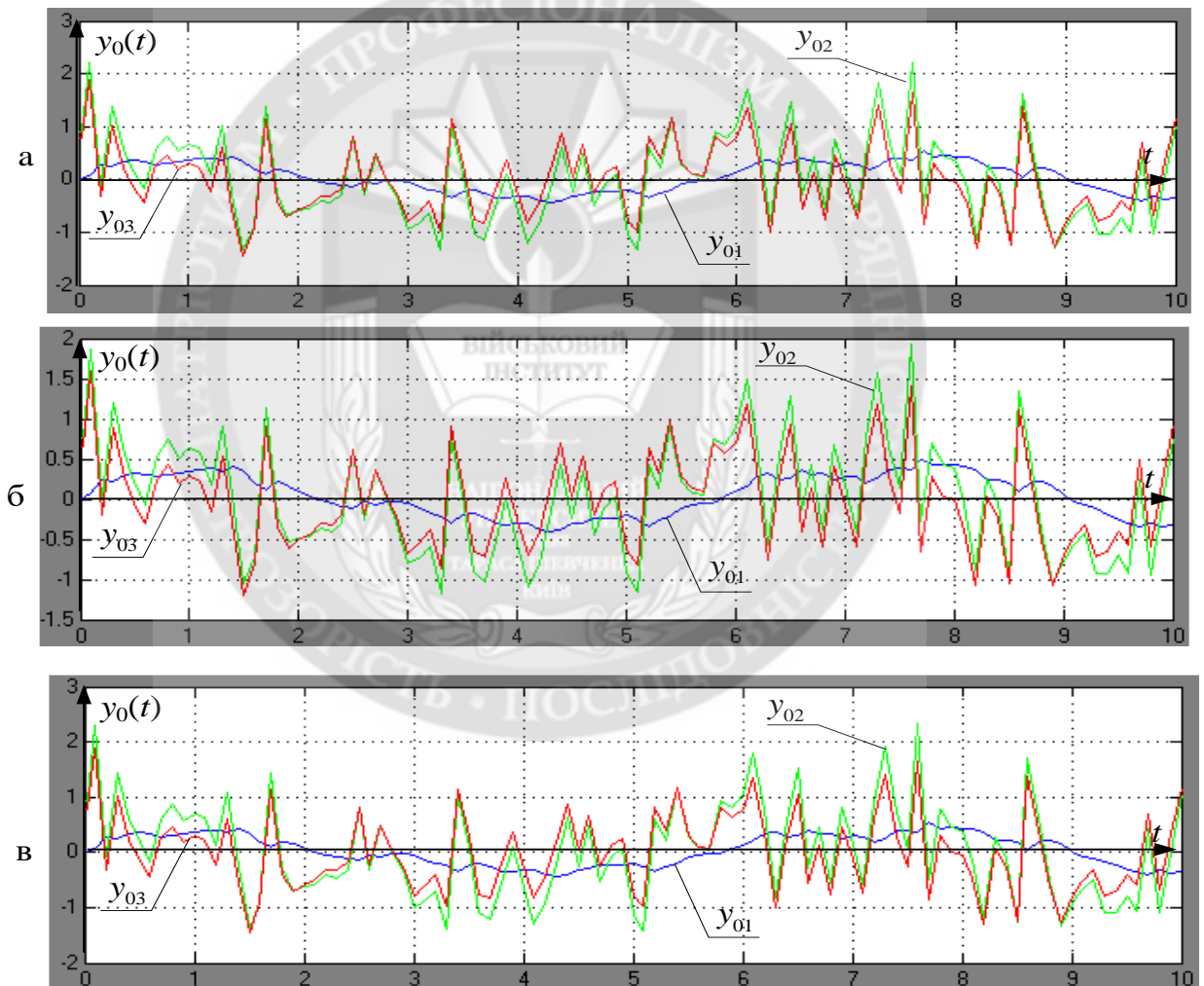


Рисунок 3 - Варіанти скоригованого спостережуваного вихідного вектора  $y_0(t)$

На виході системи ортогонального проектування спостерігаємо вектор  $y_0^\perp(t)$ , відповідні графіки координат якого наведено на рис. 4.

Якщо на рис. 3 відповідні координати вектора спостережуваних параметрів  $y_0(t)$  в усіх трьох варіантах практично не відрізняються, то на виході системи ортогонального проектування відповідні координати вектора  $y_0^\perp(t)$  суттєво різняться.

На рис.4 (варіант а), кожна координата вектора  $y_0^\perp(t)$  відхиляється від нульового значення не більше ніж на  $\varepsilon = 3 \times 10^{-4}$ , що знаходиться в межах прийнятої похибки обчислень  $\delta = 10^{-3}$ , тому, в цьому випадку, слід вважати  $y_0^\perp(t) \equiv 0$ , тобто не має підстав вважати, що параметри лінійної динамічної моделі не відповідають поточному ТС ТРД.

Максимальне відхилення першої координати вектора  $y_0^\perp(t)$  на рис.4 (варіант б) дорівнює  $\varepsilon = 9 \times 10^{-2}$ , що суттєво перевищує прийнятну похибку обчислень  $\delta = 10^{-3}$ , тому відхилення координат вектора  $y_0^\perp(t)$  від нуля є наслідком того, що деякі параметри лінійної динамічної моделі не відповідають поточному технічному стану ТРД.

В результаті ідентифікації отримаємо нове значення сталої часу  $T = 0.6c$  (попереднє значення  $T = 0.5c$ ).

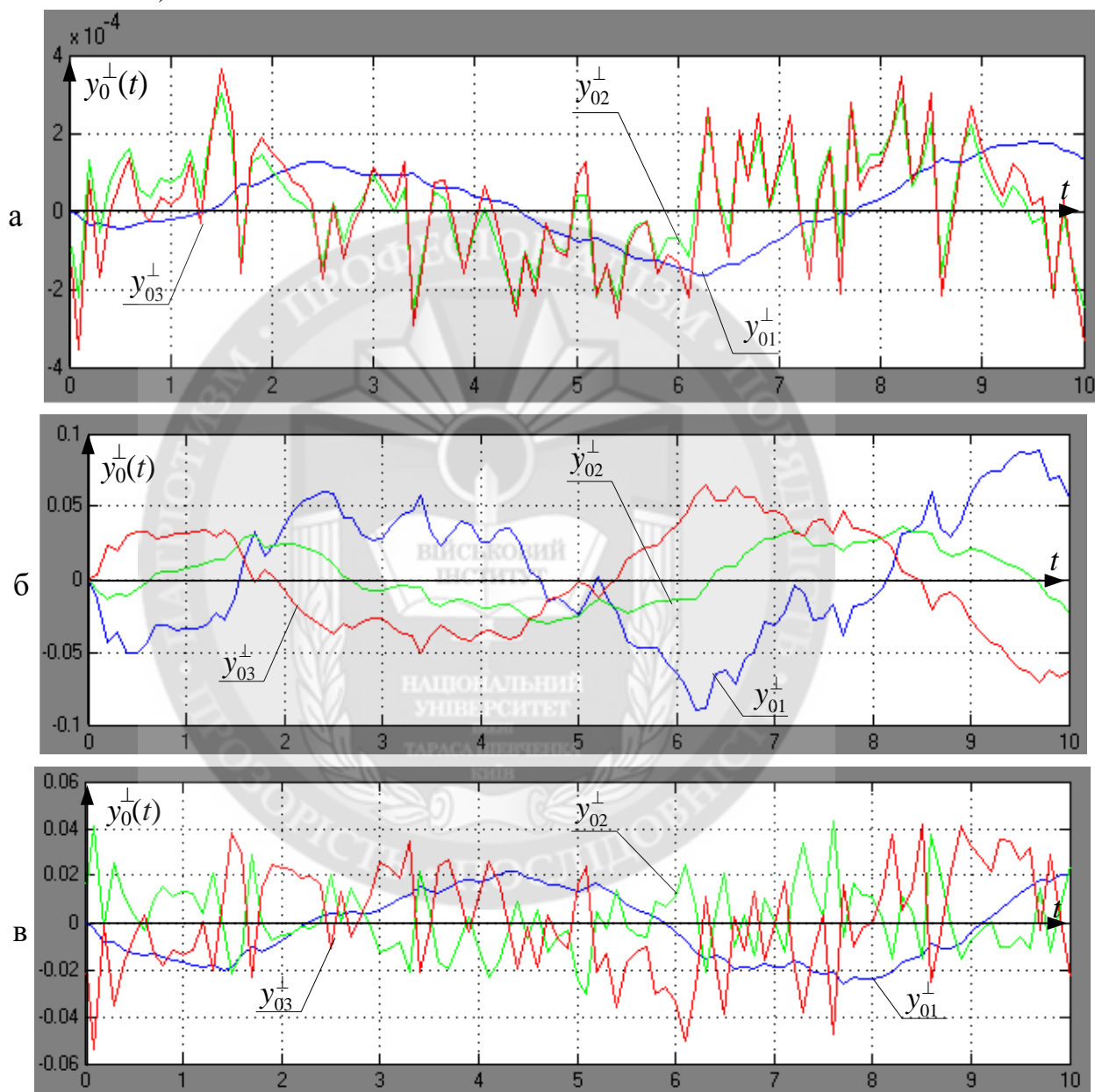


Рисунок 4 - Варіанти вихідного вектора системи ортогонального проектування  $y_0^\perp(t)$

Максимальне відхилення третьої координати вектора  $y_0^\perp(t)$  на рис.4 (варіант в) дорівнює  $\varepsilon = 6 \times 10^{-2}$ , що також суттєво перевищує прийнятну похибку обчислень  $\delta = 10^{-3}$ , тому це відхилення є також наслідком невідповідності деяких параметрів лінійної динамічної моделі поточному стану ТРД.

Використовуючи процедуру знаходження рядка матриці передаточних функцій, що містить елементи, параметри яких не відповідають поточному ТС об'єкта [3] визначаємо, що

корекції підлягає другий елемент матриці  $K_2$ . За результатами ідентифікації маємо нове значення  $k_{22} = 0.696$  (попереднє значення  $k_{22} = 0.666$ ).

### Висновки

1. Інтегральна інформаційно-обчислювальна система повинна вирішувати дві основні задачі: достовірну оцінку поточного ТС динамічного об'єкта і прогнозування передвідмовного стану у середньостроковій та довгостроковій перспективах.

2. Головною умовою при організації технічного обслуговування динамічних об'єктів за станом з контролем параметрів є наявність можливості неперервного контролю параметрів, що характеризують поточний ТС. Вибір таких параметрів є неоднозначним, що обумовлено як специфічними особливостями динамічного об'єкта, так і різноманітним характером зв'язків несправностей з контрольованими параметрами. Разом з тим, незважаючи на зазначену неоднозначність, вимоги до визначальних параметрів носять загальний характер: визначальні параметри повинні мати прийнятні точність і стабільність показань у часі, мати найбільшу серед інших параметрів діагностичну цінність, не залежати від змін зовнішніх умов експлуатації та режимів функціонування, ґрунтуватися на штатних вимірюваннях.

3. Система неперервного контролю параметрів, що характеризують ТС динамічного об'єкта, повинна бути адаптивною, тобто змінюватись відповідно до зміни ТС ГТУ. Використання в якості характеристики поточного ТС об'єкта сукупності параметрів його лінійної динамічної моделі обґрунтовано для широкого класу об'єктів, система керування яких працює в режимі стабілізації, а тому, синтезована на базі цієї моделі адаптивна система неперервного моніторингу забезпечує можливість оцінки поточного ТС силової ГТУ та дає можливість прогнозування ТС. При цьому адаптація параметрів лінійної динамічної моделі об'єкта до нового ТС ГТУ повинна здійснюватися за умови найменшого втручання в штатний режим роботи ГТУ.

4. При прогнозуванні слід використовувати адаптивні моделі визначальних параметрів, які здатні реагувати на зміни ТС об'єкта технічного обслуговування, що дає можливість попередження поступових відмов та своєчасного виявлення передвідмовного стану ГТУ.

### ЛІТЕРАТУРА:

1. Зарицкий С.П. Диагностика газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом: монография. М.: Недра, 1987. 197 с.
2. Ігуменцев Є.О., Прокопенко О.О. Підвищення безпеки експлуатації газотранспортного комплексу України. Якість технологій та освіти: Збірник наук. пр. Укр. інж.-пед. акад. Харків, 2011. Вип. 2. С. 101–104.
3. Ільченко Б.С. Діагностування функціонально-технічного стану газоперекачувальних агрегатів: монографія. Харків: ХНАМГ, 2011. 228 с.
4. Деркач І.І. Стан та проблеми розвитку автоматизованих систем контролю технічного стану складних технічних систем. Військово-технічний збірник, 2013, № 2(9). С. 20-23 .
5. Трофименко І.В. Модель прогнозування показника надійності суднових агрегатів. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил, Харків, ХУПС, 2018, № 1(55). С. 140-145.
6. Горбійчук М.І., Когутяк М.І., Скріпка О.А. Контроль технічного стану газоперекачувальних агрегатів. Методи та прилади контролю якості. 2005, № 13. С. 18–19.
7. Єрко В.Б. Науково-методичний підхід щодо побудови бортових вимірювальних систем для оцінювання технічного стану бортового обладнання літальних апаратів, які експлуатуються за стратегією технічного обслуговування «за станом». Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, Харків, ХУПС, 2013, № 3(12). С.44-48.
8. Пашенко С.В., Бельська О.А., Юхачов В.В. Інформаційне забезпечення технічного обслуговування за станом силових газотурбінних установок. Системи озброєння і військова техніка, Харків, ХУПС, 2011, № 1(25). С.130-134.
9. Vladov Serhii, Shmelov Yurii, Pylypenko Liudmyla, Kotliarov Kyrylo, Hrybanova Svitlana and Husarova Oksana Research of information and dynamic models of control and diagnostics of TV3-117 aircraft engine technical state. Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries, Published by Kharkiv National University of Radioelectronics,

URL:[https://www.researchgate.net/publication/339638590\\_research\\_of\\_information\\_and\\_dynamic\\_models\\_of\\_control\\_and\\_diagnostics\\_of\\_TV3-117\\_aircraft\\_engine\\_technical\\_state](https://www.researchgate.net/publication/339638590_research_of_information_and_dynamic_models_of_control_and_diagnostics_of_TV3-117_aircraft_engine_technical_state).

10. Бельская А.А. Локализация неисправностей в линейных системах большой размерности при отсутствии информации о входном сигнале// Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції «Авіа-2006». – К.: НАУ, 2006, Т. II. С. 31–34.

11. Aslanyan A., Belskaya A. Informational providing of technical operation “on condition”. K: National Aviation University, The third world congress «Aviation in the XXI-st century»: «Safety in aviation and space technology», 2008. С. 18-21.

12. Shmelov Yu., Vladov S., Derevyanko I., Dieriabina I., Chyzhova L. Identification of rear model of TV3-117 aircraft engine based on the basis of neuromulti-functional technologies. Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries. 2019. № 1 (7). P. 43–49.

13. Chachurski R., Glowacki P., Czecinski S. Methods of counting aircraft turbine engines operating cycles. Transactions of the institute of aviation. 2011. №. 207. P. 5–13.

14. Fedorchenko D., Novikov D. Cycle counting methods of the aircraft engine. International journal of environmental and science education. 2016. Vol. 11. № 4. P. 3832–3846.

15. Dias G. Evolvement 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.

16. Idoudi N., Louati N., Duvallet C., Bouaziz R., Sadeg B., Gargouri F. A framework to model real-time databases. International journal of computing & information sciences. 2008. Vol. 6. № 1. P. 19–29.

17. 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.

18. 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.

19. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей /С. В. Епифанов, Б. И. Кузнецов, И.М. Богаенко и др. К.: Техника, 1998. 312 с.

20. Треногин В.А. Функциональный анализ. К.: Наука, 1980. 495 с.

21. Шевяков А.А. Автоматика авиационных и ракетных силовых установок. К.: Техніка, 1970. 548с.

#### REFERENCES:

1. Zaritskiy, S.P. (1987) "Diagnostics of gas compressor units with a gas turbine drive] M.: Nedra, 197 p. (in Russian).

2. Ihumentsev, E.O. and Prokopenko, O.O. (2011) "Pidvyshchennya bezpeky ekspluatatsiyi hazotransportnoho kompleksu Ukrayiny" [Increasing the safety of operation of the gas transport complex of Ukraine] *Yakisttekhnohyy ta osvity: Zbirnyk nauk. pr. Ukr. inzh. ped. akad. Kharkiv. Vyp. 2*, pp. 101–104. (in Ukrainian).

3. Ichenko, B.S. (2011) "Diahnostuvannya funktsionalno-tekhnichnoho stanu hazoperekachivalnykh ahrehativ" [Diagnostics of the functional and technical condition of gas pumping units], monohrafiya. Kharkiv, KHNAMEH, 228 p. (in Ukrainian).

4. Derkach, I.I. (2013) "Stan ta problemy rozvytku avtomatyzovanykh system kontrolyu tekhnichnoho stanu skladnykh tekhnichnykh system" [The state and problems of the development of automated systems for monitoring the technical condition of complex technical systems.] *Viyskovo-tekhnichnyy zbirnyk*, № 2(9), pp. 20-23. (in Ukrainian).

5. Trofymenko, I.V. (2018) "Model prohnuzuvannya pokaznyka nadiynosti sudnovykh ahrehativ" [A model for predicting the reliability indicator of ship units.] *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitryanykh Syl, KHUPS*, № 1(55), pp. 140-145. (in Ukrainian).

6. Horbiychuk, M.I., Kohutyak M.I. and Skripka O.A. (2005) "Kontrol tekhnichnoho stanu hazoperekachivalnykh ahrehativ" [Control of the technical condition of gas pumping units] *Metody ta pryklady kontrolyu yakosti*, № 13, pp. 18–19. (in Ukrainian).

7. Yerko, V.B. (2013) "Naukovo-metodychnyy pidkhid shchodo pobudovy bortovykh vymiryvalnykh system dlya otsinyuvannya tekhnichnoho stanu bortovoho obladnannya litalnykh aparativ, yaki ekspluatuyutsya za stratehiyeyu tekhnichnoho obsluhovuvannya «za stanom»" [A scientific-methodical approach to the construction of on-board measurement systems for assessing the technical condition of on-board equipment of aircraft that are operated according to the "as condition" maintenance strategy] *Nauka i tekhnika Povitryanykh Syl. Zbroynykh Syl Ukrayiny, Kharkiv, KHUPS*, № 3(12), pp. 44-48. (in Ukrainian).

8. Pashchenko, S.V., Byelska O.A. and Yukhachov V.V. (2011) "Informatsiyne zabezpechennya tekhnichnoho obsluhovuvannya za stanom sylovykh hazoturbinykh ustanovok" [Information provision of technical maintenance according to the state of power gas turbine installations] Systemy ozbroynennya i viyskova tekhnika, Kharkiv, KHUPS, № 1(25), pp.130-134. (in Ukrainian).
9. Vladov, S., Shmelov, Y., Pylypenko, L., Kotliarov, K., Hrybanova, S. and Husarova, O. Research of information and dynamic models of control and diagnostics of TV3-117 aircraft engine technical state. Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries, Published by Kharkiv National University of Radioelectronics, URL:[https://www.researchgate.net/publication/339638590\\_research\\_of\\_information\\_and\\_dynamic\\_models\\_of\\_control\\_and\\_diagnostics\\_of\\_TV3-117\\_aircraft\\_engine\\_technical\\_state](https://www.researchgate.net/publication/339638590_research_of_information_and_dynamic_models_of_control_and_diagnostics_of_TV3-117_aircraft_engine_technical_state).
10. Belskaya, A.A. (2006) "Lokalizatsyya neyspravnostey v lyneynykh systemakh bolshoy razmernosty pry otsustvyy ynfornatsyy o vkhodnom syhnaile" [Localization of malfunctions in large scale linear systems in the absence of information about the input signal] Materialy VII mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi «Avia-2006». K., NAU, T. II, pp. 31–34.
11. Aslanyan, A. and Belskaya, A. (2008) Informational providing of technical operation “on condition”. K, National Aviation University, The third world congress «Aviation in the XXI-st century»: «Safety in aviation and space technology», pp. 18-21.
12. Shmelov, Y., Vladov, S., Derevyanko, I., Dieriabina, I. and Chyzhova, L. (2019) Identification of rear model of TV3-117 aircraft engine based on the basis of neuromulti-functional technologies. Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries. № 1 (7). P. 43–49.
13. Chachurski, R., Glowacki, P. and Czecinski, S. (2011) Methods of counting aircraft turbine engines operating cycles. Transactions of the institute of aviation. №. 207, pp. 5–13.
14. Fedorchenko, D. and Novikov, D. (2016) Cycle counting methods of the aircraft engine. International journal of environmental and science education. Vol. 11. № 4, pp. 3832–3846.
15. Dias, G. Evolvement of computer aided software engineering (CASE) Tools: A user experience (2017). International journal of computer science and software engineering. Vol. 6. Issue 3, pp. 55–60.
16. Idoudi, N., Louati, N., Duvallet, C., Bouaziz, R., Sadeg, B. and Gargouri, F. (2008) A framework to model real-time databases. International journal of computing & information sciences. Vol. 6. № 1, pp. 19–29.
17. Shmelov, Y., Vladov, S., Klimova, Y. and 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), pp. 77–82.
18. Angeli, C. (2010) Diagnostic expert systems: from expert’s knowledge to real-time systems. Advanced knowledge based systems: Model, applications & research. Vol. 1, pp. 50–73.
19. "Sintez sistem upravleniya i diagnostirovaniya gazoturbinykh dvigateley" [Synthesis of control systems and diagnostics of gas turbine engines] /Yepifanov, S.V., Kuznetsov, B.I. Bogayenko, I.M i dr. (1998) //K. Tekhnika, 312p. (in Russian).
20. Trenogin, V.A. (1980) "Funktsionalnyy analiz" [Functional Analysis] M., Nauka, 495 p. (in Russian).
21. Shevyakov, A.A. (1970) "Avtomatika aviatsionnykh i raketnykh silovykh ustanovok" [Automation of aviation and rocket power plants] K. Tekhnika, 548 p. (in Russian).

**Ph.D. Belska O.A., Ph.D. Chernykh Y.O.**

### **INTEGRATED INFORMATION AND COMPUTER SYSTEM, WHAT MAINTENANCE PROVIDES POWER GAS TURBINE PLANTS BY CONDITION**

*The effectiveness of the chosen maintenance strategy is determined by the completeness of information about the current technical condition of the facility. The real current state of a dynamic object should specify the list and scope of preventive and remedial work for each specific maintenance object. Existing strategies and programs according to the technical condition of dynamic objects are conditionally divided into three groups: with control over the level of reliability of the operating object; with control of the parameters of the object of operation; hybrid. Power gas turbine plants are objects of operation with high functional significance. They have an insufficient degree of redundancy, as well as a low level of operational manufacturability. Therefore, it is advisable for them to apply a maintenance strategy as per the parameter control.*

*The article proposes general principles on the basis of which an integral information-computing system for processing parameters can be built. This system is the main element of the automated control system for the technical condition of the gas turbine power plant. Synthesized adaptive system for dynamic control of parameters characterizing the current technical state of a gas turbine power plant. Closing the control loop of the technical condition of the object with negative feedback allows you to switch from the strategy of its maintenance according to the operating time to the maintenance strategy according to the state with the control of parameters.*

*The integrated information-computing system should solve two main tasks: a reliable assessment of the current technical state of a dynamic object and prediction of a pre-failure state in the medium and long term. The main condition for organizing the maintenance of dynamic objects according to the state with the control of parameters is the possibility of continuous monitoring of the parameters characterizing the current technical state. The choice of such parameters is ambiguous, which is due to both the specific features of dynamic object and diverse nature of relationship between faults and controlled parameters.*

*The requirements for the determining parameters are of a general nature: the parameters must have acceptable accuracy and stability of readings over time; have the greatest diagnostic value among other parameters; not depend on changes in external operating conditions and modes of operation; based on standard measurements. The system of continuous monitoring of parameters characterizing technical state of a dynamic object must be adaptive. It should change in accordance with the change in technical condition of the gas turbine power plant. The use of a set of parameters of its dynamic linear model as characteristic of the current technical state of an object is justified for a wide class of objects.*

*The control system of such objects operates in the stabilization mode, therefore, the adaptive system of continuous monitoring synthesized on the basis of this model provides the possibility of assessing the current technical state of the gas turbine power plant and makes it possible to predict its technical state. At the same time, the adaptation of the parameters of the linear dynamic model of the object to the new technical condition of the gas turbine plant should be carried out with the least interference in the normal operation of the plant.*

*Key words: gas turbine plants, linear dynamic model, state-of-the-art maintenance, information support.*

