

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ВНУТРІШНІХ СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ  
Циклова комісія технічного обслуговування авіаційної техніки**

## **ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

**з навчальної дисципліни  
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль»  
обов'язкових компонент  
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
Технічне обслуговування та ремонт повітряних суден і авіадвигунів**

**за темою – «Способи діагностування авіаційної техніки»**

**Харків 2021**

### **ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 23.09.2021 № 8

### **СХВАЛЕНО**

Методичною радою  
Кременчуцького льотного коледжу  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 22.09.2021 № 2

### **ПОГОДЖЕНО**

Секцією науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 22.09.2021 № 8

Розглянуто на засіданні циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, протокол від 30.08.21 № 1

**Розробники:** викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки Яніцький А.А.

### **Рецензенти:**

Завідувач кафедри технологій аеропортів Національного авіаційного університету, д.т.н., професор Тамаргазін О.А.

Викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ, к.т.н.,с.н.с. Тягній В.Г.

### **План лекції.**

1. Загальна характеристика способів діагностування АТ.
2. Апаратурні способи реалізації алгоритмів діагностування АТ.
3. Програмні способи реалізації алгоритмів діагностування.
4. Програмно-апаратурні способи реалізації алгоритмів діагностування.

### **Рекомендована література :**

#### **Основна література:**

1. Кеба І.В. Діагностика авіаційних і ГТД, 1980. 220 с.

#### **Допоміжна література:**

- 1.Машошин О.Ф. Діагностика авіаційної техніки. Навчальний посібник. М.: МГТУ ГА, 2007. 141 с.
- 2.Кеба І.В. „ Конструкція и льотна експлуатація авіаційного двигуна ГТД-350”, М.: Транспорт, 1987. 224с.
- 3.Мозгалецький А.В., Гаскаров Д.В. Технічна діагностика. Навчальний посібник для вузів. — М.: Висш. школа, 1975. 207 с.
- 4.Лозовський В.Н. Бондал Г.В., Каксис О.В. Діагностика авіаційних деталей. М. : Машинобудування, 1988. 280 с.
- 5.Лозицький Л.П., Янко А.К., Лапшов В.Ф. Оцінка технічного стану авіаційних ГТД. М.: Повітряний транспорт, 1982. 140 с.
- 6.Макаровський І.М. Основи технічної експлуатації и діагностики авіаційної техніки: Уч. посібник . Самара: СГАУ, 2004. 116 с.

#### **Інформаційні ресурси в Інтернеті**

1. <http://klk.univd.edu.ua/uk/dir/177/biblioteka>
2. URL:<http://www.usndt.com.ua/index.htm>

## Текст лекції

# Способи діагностики авіаційної техніки

## 1. Способи діагностики АТ і їх можливості

У процесі діагностування авіаційної техніки при її експлуатації за станом можна виділити три основні етапи (рис. 1.). Перший з них - оперативна діагностика, завдання якої полягає у визначенні, чи можна продовжувати нормальну експлуатацію даного об'єкта АТ ( "система справна") або цей об'єкт повинен бути підданий до чергового польоту будь-яким процедурам обслуговування ( "система не - справна").

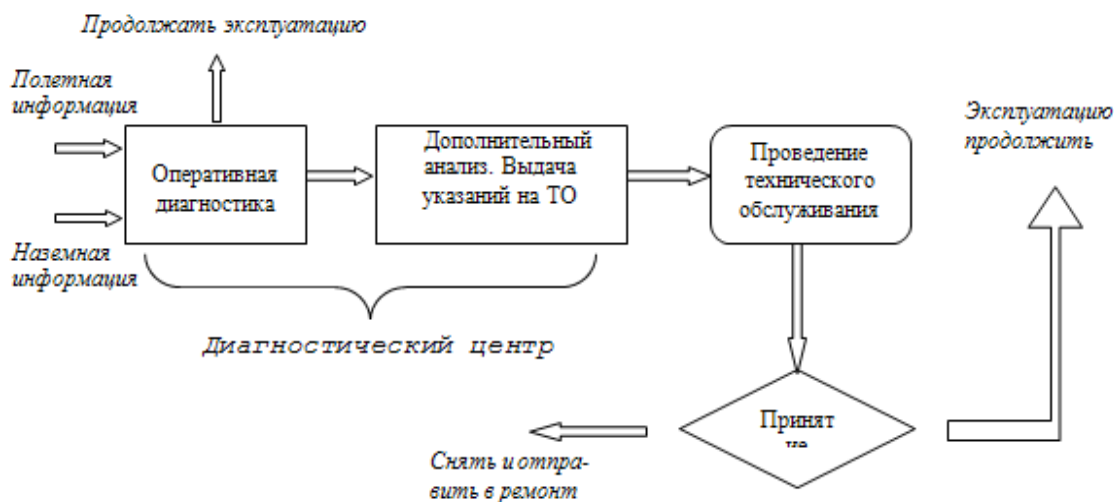


Рис. 1. Загальна схема експлуатаційної діагностики

Таке завдання в тому чи іншому обсязі для всіх спостережуваних об'єктів АТ повинна вирішуватися, як правило, в кінці кожного польотного дня, "на завтра". Оперативність досягається належною організацією потоку інформації і застосуванням комп'ютерної техніки для її обробки.

Другий етап - додатковий діагностичний аналіз, результатом якого є перелік процедур обслуговування елементів і систем АТ, визнаних несправними, без зняття їх з літака ( "на крилі").

Третій етап - виконання зазначених процедур обслуговування, після чого приймається рішення про подальшу експлуатацію об'єкта АТ або зняття його з літака і напрямку в ремонт.

В даний час широко поширені і значно розвинені методи і засоби діагностики, засновані на різних фізичних принципах, що дозволяють охопити контролем найбільш відповідальні вузли, агрегати і системи. Як приклад зупинимося на методах діагностики авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) (рис. 2.), що є найбільш відповідальними об'єктами АТ. Умовно їх можна розділити на методи прямих вимірювань структурних діагностичних параметрів, що визначають технічний стан ВМД, і методи безрозбірної (оперативної) діагностики по непрямим параметрах. В якості

непрямих використовують діагностичні параметри, які містять інформацію про зміну структурних характеристик стану двигуна. Ці методи дозволяють отримати досить точні результати оцінки, наприклад, зносу окремих елементів. Однак їх застосування ускладнено низькою технологічністю ВМД і в більшості випадків викликає необхідність розбирання двигуна. Це знижує вірогідність контролю, оскільки стан будь-якого технічного об'єкта після розбирання неадекватно його станом до цих процедур. Необхідно відзначити також, що в процесі експлуатації розбирання ВМД в більшості випадків є неможливою.

Методи оперативної діагностики по непрямим параметрах позбавлені перелічених недоліків, хоча в даний час вони не завжди дозволяють локалізувати місце дефекту. Використання методів вимірювань структурних характеристик може бути необхідним у випадку неможливості застосування методів оперативної діагностики або для уточнення результатів контролю.

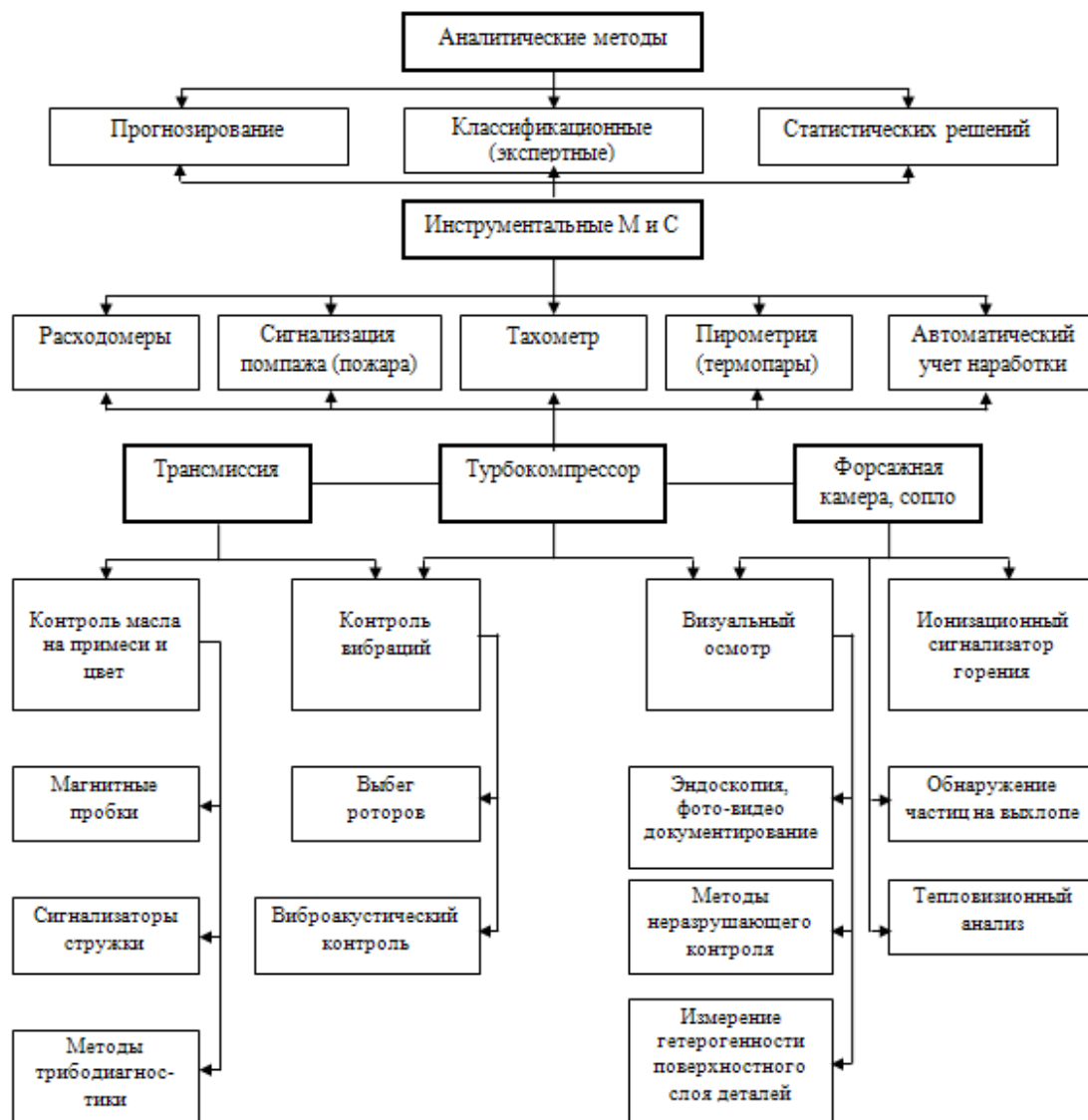


Рис. 2. Методи і засоби діагностики ВМД

До основних з використовуваних і перспективних методів оперативної

діагностики ВМД відносять:

- діагностику за результатами аналізу термогазодинамічних параметрів;
- діагностику по теплових параметрах;
- по віброакустичними параметрам;
- трібодіагностику;
- оптико-візуальну діагностику;
- аналіз продуктів згоряння;
- вимір вибігу ротора.

Застосування кожного з методів здійснюється за допомогою діагностичного обладнання. Так, наприклад, для аналізу складу домішок в маслі використовують різні за складністю і принципам дії засоби - від найпростіших магнітних пробок, встановлених в магістралях маслосистеми двигуна, до складних спектроаналізаторів.

Діагностика несправностей по теплових параметрах передбачає отримання інформації як від термодатчиків (термоперетворювачів), так і від фотоелектричних пірометрів і тепловізорів, останнім часом успішно впроваджуються в діагностичній практиці.

Контроль віброакустических параметрів передбачає застосування різних типів віброперетворювачів і сигнальної апаратури. Розробляються методи оцінки напруженості конструктивних елементів за допомогою голографічних установок (створення т.зв. "вібропортретов").

Часом виявлення несправностей згаданими методами вимагає створення досить складного математичного апарату, що дозволяє ідентифікувати ознаки з конкретними дефектами.

Відносно різноманіття методів пояснюється тим, що жоден з них не дозволяє врахувати всі вимоги, що пред'являються до формування діагнозу зі 100% вірогідністю, оскільки вони несуть специфічну інформацію різної цінності.

Жоден з методів не дозволяє оцінити стан двигуна з достатнім ступенем деталізації.

За допомогою поєднання ряду методів можна здійснити більш глибокий контроль (як правило, на землі), однак це часто вимагає спеціальних умов і тривалого часу.

Отже, для діагностики АТ доцільно використовувати параметри, які мають максимальної інформативності, що доповнюють і уточнюють один одного.

Таким чином, завдання оцінки інформаційного потенціалу параметрів, використовуваних для цілей діагностики АТ, є на сьогоднішній день дуже актуальною.

## 2. Аналіз методів технічної діагностики авіаційної техніки

Порівняльний аналіз інформативності методів діагностики АТ, представлений нижче, заснований на загальновизнаному підході, висунутому М. Бонгард про величину функції ймовірності наближення до мети ("адресою" дефекту) при реєстрації значень параметра. Правда, будь-яких кількісних характеристик згаданої функції в цьому розділі посібника не наводиться. Цей взаємозв'язок (інформативність - метод) підтверджена практикою експлуатації, де непрямим критерієм інформативності служить безпомилковість діагнозу при прояві ознаки, що реєструється даним методом.

## 2.1 Теплові методи та їх ефективність

Одними з найбільш інформативних методів оцінки стану АТ є методи контролю теплових параметрів. В даний час їх використання в польоті обмежується контролем температури в різних точках, наприклад проточної частини двигуна, і порівнянням її з допустимими значеннями. Більшого розвитку теплові методи знайшли при стендових випробуваннях ГТД. Основною перевагою їх є можливість отримання інформації без суттєвої розбирання авіадвигуна. При термометрування робочих лопаток турбіни на них встановлюють термопари і загальний струмознімач. Це тягне за собою незручності для формування діагнозу внаслідок обмеженої кількості точок контролю.

Методи безконтактного термометрування володіють деякими перевагами. Об'єктами безконтактної термометрической діагностики можуть бути як двигун в цілому, так і окремі його агрегати і деталі. Система контролю перетворює інфрачервоне зображення у видиме так, щоб розподіл видимої яскравості було пропорційно інфрачервоної яскравості об'єкта, тобто просторового розподілу температури  $T(y, z)$  або коефіцієнта випромінювання  $\epsilon(y, z)$ . Це перетворення зазвичай здійснюють шляхом послідовного аналізу різних точок об'єкта елементарним радіометричним полем зору, що утворює на тілі об'єкта площа  $S$ . Миттєве поле вибирають малим і швидко переміщують його по об'єкту. Розподіл інфрачервоної яскравості  $L(y, z)$  об'єкта при скануванні його майданчиком  $S$  формує в приймальному сигналі  $S(t)$ , амплітуда якого змінюється в часі в відповідності зі зміною візуються яскравості. Сигнал  $S(t)$  після посилення перетворюється у видиме сигналі. Відтворення інфрачервоного зображення шляхом сатиричного аналізу дозволяє отримати теплову карту спостерігається зони (зв'язок між теплообміном в середовищі і її будовою).

Одним з інформативних методів виявлення дефектів важкодоступних вузлів ГТД є метод інфрачервоної термографії. Його поділяють на активний і пасивний методи. Активний передбачає попереднє нагрівання об'єкта. Спостереження теплових явищ на поверхні в результаті поширення тепла по матеріалу можуть дати інформацію про його внутрішню структуру. Використовуваний при цьому джерело тепла служить для створення в

матеріалі т.зв. термоудара, а приймальня термографическая система аналізує розсіювання і поширення теплових хвиль.

Обмеження сфери застосування методу пов'язані з тим, що спостереження можуть проводитися тільки в перехідному режимі, коли визначаються відносні швидкості поширення теплового потоку всередині матеріалу. Після досягнення температурного рівноваги теплові контрасти вже не спостерігаються. До того ж такі об'єкти, як авіаційні ГТД, мають велику контрольовану поверхню, і здійснити їх рівномірний нагрів представляється скрутним. Це стосується і інших функціональних систем літака - гідравлічної, паливної та ін. Складнощі в застосуванні методу пояснюються тим, що він залежить від великого числа параметрів, які повинні бути враховані для кожного застосування. До них відносяться:

- коефіцієнт випромінювання випробуваного матеріалу;
- тип інфрачервоного приймального пристрою;
- поле зору і розміщення приймального пристрою;
- швидкість переміщення приймального пристрою щодо об'єкта;
- природа і інтенсивність нагріву (за допомогою звичайних джерел або лазерів);
- фокусування теплового потоку;
- відстань між джерелом тепла і випробуваним об'єктом;
- відстань між джерелом тепла і інфрачервоної приймальною системою.

Істотним недоліком активного методу при оцінці стану функціональних систем ЛА і АТ можна вважати можливість контролю тільки тих деталей, які знаходяться на його поверхні (корпусі). Доступ до інших агрегатів вимагає їх детального розбирання.

Більш широкими можливостями в цьому плані має пасивний метод. Він полягає у використанні природного тепла, що виділяється в процесі функціонування ВМД, і в спостереженні за допомогою пасивного приймального інфрачервоного пристрою розподілу температур у часі і в просторі. Порівняння з ідеальною моделлю розсіювання тепла дозволяє визначити всі відхилення температури, важливі для процесу функціонування об'єкта. Різниця температур окремих зон характеризує умови тепловідведення від них, і, тим самим, фізико-хімічний склад, товщину, структуру, наявність дефектів і т.д. Пасивний метод видається більш перспективним і може бути використаний для визначення найбільш інформативних точок на поверхні двигуна з метою встановлення в цих зонах вбудованої системи контролю (термодатчиків).

Теплова діагностика передбачає використання широкого спектру дорогих засобів. При візуальному контролі для паралельного знімання інформації, пов'язану з електронно-оптичні перетворювачі - евапографи, еджеографи, прилади з рідкими кристалами і фоточутливими плівками, тепловізори (рис. 3.) і т.п.





Рис. 3. Тепловизор TVS-200

Незважаючи на це, безконтактна теплова діагностика є досить перспективною в силу високої інформативності. Важливо, що розроблені засоби діагностики дозволяють безпосередньо виявляти дефекти і прогнозувати їх розвиток в процесі випробувань ЛА і АТ. Існуючі методи обробки інфрачервоного термометрування дають можливість прогнозувати конкретні несправності.

## 2.2 Можливості віброакустичних методів оцінки стану авіаційної техніки

Віброакустическая діагностика АТ також в достатній мірі інформативна. Вона базується на загальних принципах розпізнавання станів технічних систем по вихідній інформації, що міститься в віброакустичний сигналі. В якості діагностичних ознак тут використовують характеристики віброакустического сигналу, що супроводжують функціонування ВМД. Як правило, рівень вібрацій двигуна контролюється за допомогою віброперетворювачів, які сигналізують про можливу несправність в польоті, але не дозволяють визначити конкретне місце її розвитку. При стендових випробуваннях для отримання інформації про вібронапруженності і коливаннях лопаток робочих коліс компресора використовують безконтактні дискретно-фазові методи. Їх застосування вимагає жорсткого закріплення двигуна на стенді і установки на корпусі і роторі компресора спеціальних віброперетворювачів. В даний час розробляються перспективні пристрої і методи віброакустического аналізу, що не дійшли поки до стадії масового експлуатаційного застосування. Як згадувалося, голографічні та акустичні методи можуть дозволити визначити найбільш інформативні точки на корпусі двигуна (амплітуда, частота і фазові характеристики вібрації, які пов'язані зі станом окремих вузлів і деталей). При обробці інформації сукупність згаданих параметрів пов'язують зі станом об'єкта  $W(t)$  в момент (період) часу  $t$ . При цьому безліч можливих станів об'єкта ділять на дві підмножини. Підмножина  $W^*$  являє собою сукупність працездатних станів, які мають запас працездатності, що визначає близькість об'єкта до гранично допустимого стану. Підмножина  $W^{**}$  включає всі стани, відповідні появі відмов в роботі двигуна.

Для постановки діагнозу всі можливі стани розбиваються на деяке число класів  $W_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , що підлягають розпізнаванню. Але якщо число класів у підмножині  $W^{**}$  визначається числом можливих відмов, то

практично здійснити класифікацію за ступенем працездатності в підмножині  $W^*$  не представляється можливим в силу безперервності зміни цих станів в просторі діагностичних ознак і часу. Крім того, така класифікація утруднена многопараметричністю об'єкта, яким і є газотурбінний двигун.

Якщо дефект супроводжується підвищеною віброактивністю, то важливим тут є локалізація джерел підвищеного рівня коливальної енергії. При цьому розрізняють два можливих варіанти: джерела шуму незалежні або статистично пов'язані. Рівень труднощів, обумовлений необхідністю поділу впливу джерел, в значній мірі знижує інформативність вібродіагностики ВМД.

До заходів, що підвищує її інформативність відносять такі:

- детальний досвід доведення в експлуатацію двигуна з метою виявлення найбільш уразливих місць, чітке розбиття на кінцеве безліч класів станів, що підлягають розпізнаванню -  $W = \{W_1, W_2, \dots, W_m\}$ ;
- обґрунтування еталонних значень вібропараметрів;
- вибір засобів вимірювання і місць їх розміщення на основі протікають в ВМД фізичних процесів;
- локалізація джерел випромінювання підвищеної коливальної енергії в досліджуваному двигуні;
- визначення динамічних характеристик окремих вузлів, агрегатів і двигуна в цілому для побудови діагностичної моделі;
- розробка алгоритмів визначення поточного стану ВМД.

Важливим моментом є формування еталонів, що представляють собою усереднені для даного класу значення ознак. За допомогою набору класифікують функцій проводиться розпізнавання параметрів віброакустичного сигналу. У підсистемі прийняття рішення визначається фактичний стан об'єкта контролю за поточними значеннями параметрів, які можуть бути використані в якості вихідних при побудові алгоритмів прогнозу можливих відмов.

Незважаючи на перераховані заходи, все ж значні труднощі викликає рішення задачі локалізації джерел випромінювання підвищеної віброактивності.

Останнім часом при вібродіагностиці ВМД почав знаходити застосування метод оптичної голографії, що володіє підвищеною інформативністю. Умовою його ефективного використання також є створення еталонів (бібліотеки вібропортретов дефектних станів ВМД). Спочатку отримують еталонний вібропортрет справного двигуна, а потім, вводячи відомі характерні дефекти, отримують вібропортрети, що відповідають конкретним дефектним станів. Порівняння останніх з еталонним може дозволити визначити інформативні точки на поверхні двигуна, чутливі до певних дефектів. Для постановки діагнозу досить ідентифікувати вібропортрет досліджуваного двигуна з набором, наявними в бібліотеці. Однак цей метод поки мало практично відпрацьований і забезпечений апаратурою.

Менш інформативною, але більш доступною вважається діагностика АТ на основі побудови діагностичних моделей, тобто зв'язків між простором станів і простором діагностичних ознак. При цьому не надається значення, в якій формі представлена ця зв'язок.

Вважають, що діагностична модель відповідає своєму призначенню, якщо вона дозволяє виконати наступні умови:

- сформулювати принципи розбивки безлічі  $W$  на два підмножини - працездатних  $W^*$  і непрацездатних  $W^{**}$  станів;
- визначити критерій для оцінки ступеня працездатності об'єкта та його приналежності до одного з класів в підмножині  $W^*$ ;
- встановити ознаки виникли відмов (розрізнити стану в підмножині  $W^{**}$ ).

В якості діагностичних моделей зазвичай використовують диференціальні і алгебраїчні рівняння, логічні співвідношення, матриці вузлових провідностей, функціональні, структурні, регресивні і інші моделі, що дозволяють зв'язати параметри технічного стану з віброакустичними станом об'єкта. До основних типів моделей можна віднести: структурно-слідчі; динамічні; регресивні.

Структурно-слідча модель об'єкта, що діагностується створюється на основі інженерного вивчення його пристрою і функціонування, статистичного аналізу показників надійності і діагностичних параметрів. Вона повинна давати наочне уявлення про найбільш вразливих і відповідальних елементах, а також зв'язку структурних параметрів з діагностичними ознаками. Це завдання необхідно вирішувати при побудові моделі будь-якого типу. Вона вирішується на основі статистичного аналізу, що вимагає значних витрат часу.

При побудові динамічної моделі діагностування об'єкт розглядають як багатовимірну систему з  $p$  входами і  $n$  виходами. Рівняння зв'язку вектора вхідних впливів

$$X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$$

і вектора вихідних сигналів

$$Y(t) = \{y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)\}$$

записують на операційному вигляді

$$Y(t) = BX(t),$$

де  $B$  - оператор системи, що містить в неявному вигляді дані про параметри технічного стану  $Z_i$  системи.

На рис. 4. показана найпростіша модель "чорного ящика".

Зміна параметрів технічного стану може викликати зміну оператора при незмінному  $X(t)$ .

Як критерій працездатності динамічного ланки приймають ступінь відповідності дійсного оператора  $V_i$  оператору нормального функціонування механізму  $V_{i0}$ , Яку можна оцінити значенням невязки відповідно до схеми, наведеної на рис. 5., де  $X$  - рівноваги вплив,  $Y_0$  - реакція номінальної моделі досліджуваного динамічного ланки,  $\Delta Y$  - невязка,  $U$  - діагностична ознака.



Рис. 4. Модель "чорного ящика"

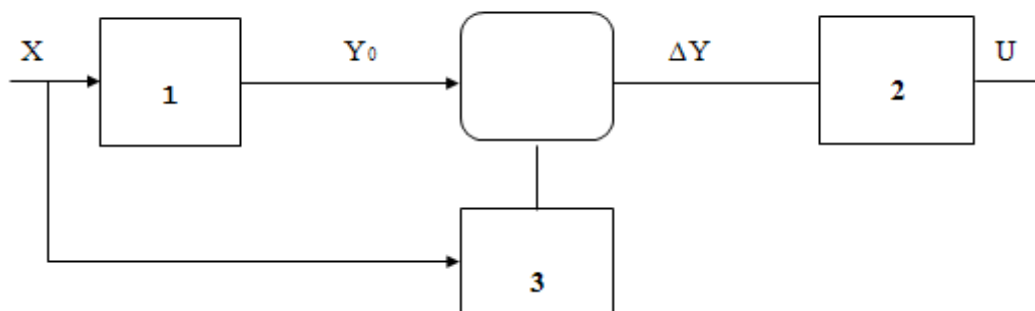


Рис. 5. Найпростіша схема динамічного ланки

- 1 - динамічний ланка об'єкта контролю;
- 2 - формує ланку;
- 3 - номінальна математична модель

За допомогою рівнянь ідентифікації можна сформуванати модель "чорного ящика", діагностичні ознаки, що представляють собою значення власних частот, декремент коливань і т.д. Однак їх конкретизація залежить від розуміння фізики процесів, породжуваних розвиваються дефектом. До цього можна додати, що використання складного математичного апарату, необхідного при побудові моделей даного типу, для вирішення практичних завдань часто представляється скрутним.

Найбільш ефективним вважають метод побудови регресійної моделі, що базується на використанні математичного апарату планування експерименту. За допомогою цього методу шукають "характерний" діагностична ознака, однозначно пов'язаний з будь-яким параметром технічного стану. Завдання моделювання зводиться до знаходження коефіцієнтів регресії і оцінці адекватності моделі відповідно до певних правил. У процесі обробки результатів експерименту оцінюють такі величини: дисперсію функції відгуку за результатами паралельних дослідів; дисперсію відтворюваності функції відгуку за результатами всіх дослідів; однородність дисперсій по F - критерієм Фішера (коефіцієнти регресії; довірчий інтервал коефіцієнтів регресії; адекватність моделі).

В результаті аналізу визначають характерний діагностична ознака, що є

функцією одного аргументу. Слід зазначити, що незважаючи на значний рівень розвитку вібраційних діагностичних моделей і алгоритмів побудови діагностичних процесів в цілому, в більшості випадків отримують оцінки стану типу "норма - не норма", що в ряді випадків є недостатнім.

При вирішенні завдань локалізації джерел вібрації (підвищення інформативності), а також встановлення зв'язків між структурними параметрами і параметрами сигналу, важливе місце відводиться розшифровці останнього. Віброакустичний сигнал будь-якого механізму має складну структуру, що залежить від динаміки функціонування і набору комплектуючих вузлів. В даний час отримано ряд залежностей зміни характеристик віброакустичного сигналу від виникаючих дефектів типових елементів різних механізмів, в тому числі і застосовуються в авіаційних двигунах. Спектри вібрації вимірюють на декількох режимах роботи ГТД для більш надійного зіставлення розрахункових частот з реальним частотним спектром вібрації.

Для деяких робочих процесів була знайдена певна зв'язок режимних та віброакустичних параметрів. Наприклад, в компресорах вихровий шум пропорційний 3,5-5-го ступеня відносної швидкості потоку середовища на лопатці, а суцільний шум підшипників кочення в значно меншій мірі залежить від навантаження і частоти обертання ротора. Тому, якщо в даному механізмі при зміні швидкісного режиму інтенсивність шуму наростає пропорційно, наприклад, 4-го ступеня частоти обертання ротора, то можна зробити висновок про його аеродинамічному походження. У ряді випадків для виявлення джерел визначають форму коливань, тобто вимірюють амплітуду і фазу, а також розподіл збуджуючих сил.

Таким чином, методи віброакустической діагностики ВМД базуються на загальних принципах діагностики технічних систем за непрямыми (в цілому малоінформативною) параметрами. До того ж область їх застосування обмежена можливістю доступу до двигуна, а також недосконалістю засобів діагностування і математичних моделей, що пов'язують структурні параметри з діагностичними ознаками. Проте в ряді випадків можна отримати кількісну оцінку запасу працездатності вузлів двигуна за результатами вимірювання віброакустичних сигналів, що дозволяє прогнозувати величини залишкових ресурсів елементів ГТД.

### 2.3 Ефективність трібодіагностики елементів ГТД

Процес руйнування зношуються деталей, як правило, починається з руйнування поверхневого шару матеріалу під дією високих динамічних напружень, що проявляється у вигляді відривів частинок матеріалу. Це призводить до підвищеної концентрації напружень в місцях відриву і як наслідок до подальшого розвитку процесу руйнування. При цьому продукти зносу несуться маслом, що циркулює в двигуні. Їх наявність і накопичення можуть служити сигналом про виникнення несправності.

Масло в даному випадку є носієм інформації про стан тертьових пар.

Як показує досвід, відрізок часу від початку процесу руйнування поверхневого шару до моменту повного руйнування деталі, як правило, досить великий, що дає можливість виявляти несправності вже на початковому етапі процесу зношування.

Кількість і форма продуктів зносу, що надходять в масло, залежить від швидкості накопичення частинок зносу.

Найбільш поширеними методами трібодіагностики є: магнітний, спектрального аналізу, колориметричний, феррографічний, метод радіоактивних ізотопів. Кожен з них більш інформативний, ніж методи вібродіагностики.

Магнітний метод (в ГА застосовується прилад ПКМ, раніше ПОЖ-М). Метод заснований на вимірюванні сили взаємодії ферромагнітних частинок масла з штучно створеним зовнішнім магнітним полем. Оскільки кількість ферромагнітних металів в якому працював масляний двигун зазвичай істотно більше, ніж інших продуктів зносу, то їх визначення може служити інтегральною оцінкою ступеня зносу тертьових пар двигуна.

Електромагнітний метод контролю, як різновид магнітного методу, заснований на взаємодії змінного магнітного поля котушки індуктивності з електромагнітним полем, що виникають від вихрових струмів металевих частинок в працюючому олії. До недоліків методу слід віднести малу чутливість аналізаторів, їх схильність до впливу зовнішніх змінних полів, а також неможливість визначення немагнітних частинок зносу.

Емісійно-спектральний метод (в ГА застосовуються установки типу МФС, МОА, Spektrooil). Цей метод використовує явище світіння газу досліджуваної речовини в результаті нагрівання його до температури понад 10000С. При таких температурах енергія руху частинок газу така, що при їх зіткненні відбуваються процеси дисоціації і іонізації, в результаті яких, поряд з атомами і молекулами, в газі утворюються вільні електричні заряди-іони і електрони. Нагрітий, частково іонізований, який проводить електричний струм газ-плазма випромінює електромагнітні коливання в оптичному діапазоні спектра. Суттєвою складовою цього випромінювання є лінійчатих спектри атомів, в яких кожному елементу відповідає своя довжина хвилі випромінювання певної інтенсивності. Досліджуючи спектр, можна визначити хімічний склад утворює його газу, і,

Інтенсивність аналітичних спектральних ліній (потужність випромінювання одиниці об'єму плазми) пропорційно пов'язана з концентрацією відповідних елементів в пробі. Установка дозволяє визначити не тільки якісний, але і кількісний склад проби. Для проведення кількісного аналізу необхідно вибрати адекватну модель спектроаналітичного процесу (зв'язок між сигналом і концентрацією досліджуваного елемента) і провести з її допомогою градування установки.

Рентгеноспектральний метод (в ГА застосовуються установки типу БАРС-3, "Спектроскан", БРА-17, "ПРИЗМА"). Метод заснований на реєстрації довжини хвилі і інтенсивності характеристичного флуоресцентного випромінювання хімічних елементів, що входять до складу

"сухий" масляної проби. Характеристичне випромінювання - це квантове випромінювання з лінійчатим (дискретним) спектром, що виникає при зміні енергетичного стану атома. Довжина хвилі характеристичного випромінювання залежить від атомного номера хімічного елемента і зменшується в міру його зростання. Явище флуоресценції пов'язано з переходом атомів, молекул або іонів з збуджених станів в нормальний стан під дією характеристичного випромінювання. Випромінювання збуджується рентгенівськими променями, спрямованими на масляну пробу.



Рис. 6. Енергодисперсійний аналізатор "Спектроскан Макс"

Аналіз починається сустановці аналізованої проби в Пробопідготовка-завантажувальний пристрій спектрометра і триває від 10 до 1000 сек. в залежності від аналізованого матеріалу і необхідної точності аналізу. Кванти випромінювання перетворюються в імпульси напруги, швидкість надходження яких вимірюється і виводиться на дисплей, і зберігаються в пам'яті комп'ютера, значення роздруковуються на принтері. Спектрометр повністю управляється комп'ютером.



Рис. 7. Рентгеноспектральний аналізатор "ПРИЗМА"

Сцинтиляційне метод. Метод реєстрації заряджених частинок за допомогою рахунку спалахів світла, що виникають при попаданні цих частинок на екран з сірчистого цинку (ZnS), є одним з перших методів реєстрації ядерних випромінювань. Ще в 1903 р Крукс і інші вчені показали, що якщо розглядати екран з сірчистого цинку, опромінюваний частками через збільшувальне скло в темному приміщенні, то на ньому можна помітити появу окремих короткочасних спалахів світла - сцинтиляцій. Було встановлено, що кожна з цих сцинтиляцій створюється окремою часткою, що потрапляє на екран. Круксом був побудований простий прилад, названий спітаріскопом Крукса, призначений для рахунку частинок. Візуальний метод сцинтиляцій був використаний в подальшому в основному для реєстрації частинок і протонів з енергією в декілька мільйонів електрон-вольт. Окремі швидкі електрони реєструвати не вдалося, так як вони викликають дуже слабкі сцинтиляції. Іноді при опроміненні електронами сірчистої-цинкового екрану вдавалося спостерігати спалахи, але це відбувалося лише тоді, коли на один і той же кристалик сірчистого цинку потрапляло одночасно досить велике число електронів. Гамма-промені ніяких спалахів на екрані не викликають, створюючи лише загальне світіння. Це дозволяє реєструвати частинки в присутності сильного випромінювання. Візуальний метод сцинтиляцій дозволяє реєструвати дуже невелике число частинок в одиницю часу. Найкращі умови для рахунку сцинтиляцій виходять тоді, коли їх число лежить між 20 і 40 в хвилину. Звичайно, метод сцинтиляцій є суб'єктивним, і результати в тій чи іншій мірі залежать від індивідуальних якостей експериментатора. Незважаючи на недоліки, візуальний метод сцинтиляцій зіграв величезну роль у розвитку ядерної та атомної фізики. За допомогою нього Резерфорд реєстрував частки при їх розсіянні на атомах. Саме ці досліді привели Резерфорда до відкриття ядра. Вперше візуальний метод дозволив виявити швидкі протони, вибивані з ядер азоту при бомбардуванні їх частинками, тобто перше штучне розщеплення ядра.

Сцинтиляційне метод реєстрації відродився в кінці сорокових років ХХ ст. на новій основі. До цього часу були розроблені фотоелектронні помножувачі (ФЕУ), що дозволяють реєструвати дуже слабкі спалахи світла. Були створені сцинтиляційні лічильники, за допомогою яких можна збільшити швидкість рахунку в  $10^8$  і навіть більше разів в порівнянні з візуальним методом, а також можна реєструвати і аналізувати по енергії як заряджені частинки, так і нейтрони і гамма-промені.

Сцинтиляційне лічильник являє собою поєднання сцинтилятора (фосфору) і фотоелектронного помножувача (ФЕП). У комплект лічильника входять також джерело електричного живлення ФЕУ та радіотехнічна апаратура, що забезпечує посилення і реєстрацію імпульсів ФЕУ. Іноді поєднання фосфору з ФЕУ проводиться через спеціальну оптичну систему (светопривід). Принцип роботи сцинтиляційних лічильника полягає в наступному. Заряджена частинка, потрапляючи в сцинтилятор, виробляє іонізацію і збудження його молекул, які через дуже короткий час ( $10^{-6}$ - $10^{-9}$



сек.) Переходять в стабільний стан, випускаючи фотони. Виникає спалах світла (сцинтиляція). Деяка частина фотонів потрапляє на фотокатод ФЕУ і вибиває з нього фотоелектрони. Останні під дією прикладеного до ФЕУ напруги фокусуються і прямують на перший електрод (динод) електронного помножувача. Далі в результаті вторинної електронної емісії число електронів лавиноподібно збільшується, і на виході ФЕУ з'являється імпульс напруги, який потім вже посилюється і реєструється радіотехнічною апаратурою. Амплітуда і тривалість імпульсу на виході визначаються властивостями як сцинтилятора, так і ФЕУ. Як фосфорів використовуються: органічні кристали, рідкі органічні сцинтилятори, тверді пластмасові сцинтилятори, газові сцинтилятори. Основними характеристиками сцинтиляторів є: світловий вихід, спектральний склад випромінювання і тривалість сцинтиляцій. При проходженні зарядженої частинки через сцинтилятор в ньому виникає деяке число фотонів з тією чи іншою енергією. Частина цих фотонів буде поглинена в обсязі самого сцинтилятора, і замість них будуть поширені інші фотони з дещо меншою енергією. В результаті процесів реабсорбції назовні виходитимуть фотони, спектр яких характерний для даного сцинтилятора. Дуже важливо, щоб спектр фотонів, що виходять з сцинтилятора, збігався або хоча б частково перекривався зі спектральною характеристикою ФЕУ. Ступінь перекриття зовнішнього спектру сцинтиляції зі спектральною характеристикою даного ФЕУ визначається коефіцієнтом узгодження. збігався або хоча б частково перекривався зі спектральною характеристикою ФЕУ. Ступінь перекриття зовнішнього спектру сцинтиляції зі спектральною характеристикою даного ФЕУ визначається коефіцієнтом узгодження. збігався або хоча б частково перекривався зі спектральною характеристикою ФЕУ. Ступінь перекриття зовнішнього спектру сцинтиляції зі спектральною характеристикою даного ФЕУ визначається коефіцієнтом узгодження.

ВАТ "НВО" Сатурн "стало першим російським підприємством, яке вкладало серйозні фінансові кошти в розробку технології діагностування за результатами сцинтиляційних вимірювань ВМД серій Д-30КП / КУ / КУ-154. В рамках бюлетенів 1756БД-Г і 1772БД-Г фахівцями розроблений експресний кількісний спосіб отримання максимально можливої діагностичної інформації про параметри частинок зносу, що знаходяться в маслі, в змивах з маслофільтра, магнітних пробок, фільтрів-сигналізаторів і ін. Використання сцинтиляционного аналізатора масла п Зволен в діагностичної авіаційної практиці оперативно оцінювати не тільки загальний технічний стан двигуна за критерієм "справний" - "не справний", але і окремо оцінювати технічний стан підшипників трансмісії і коробок приводів авіадвигунів.

Колориметричний метод (в ГА використовуються прилади типу КФК-2, ФЕК-М). В основу методу покладено закон Ламберта-Бера і принцип вимірювання коефіцієнта пропускання світла через досліджувану середу. На фотоприймач по черзі направляються світлові потоки: повний і пройшов через еталонну і потім масляну середу, далі визначається відношення цих

потоків. Як еталон використовується або дистильована вода, або масло, відповідне нормам ТУ. За значеннями оптико-колірних характеристик досліджуваних проб масла і судять про стан вузлів тертя, що омиваються маслом.

Ставлення світлових потоків, є коефіцієнт пропускання або ступінь прозорості досліджуваного розчину

$$\tau = (F\lambda / F_m\lambda) \cdot 100\%.$$

Оптична щільність (D) визначається за формулою:

$$D = 2 - \lg \tau.$$

Органолептичний метод. При цьому методі ступінь частинок зносу виявляється візуально або з використанням будь-яких пристроїв і пристосувань (магнітні пробки, фільтри, сигналізатори). Як відомо [41], на двигунах застосовуються сигналізатори стружки різного типу (електронні, електромеханічні і ін.). Ці сигналізатори мають один принциповий недолік, який пов'язаний з можливістю помилкового спрацювання через накопичення смолистих речовин в олії і різного роду сторонніх забруднень, що не мають відношення до розвитку дефекту. Сигналізатори тільки фіксують наявність зносу, але не дозволяють відслідковувати швидкість процесу накопичення стружки в олії. Таким чином, цей метод недостатньо інформативний з точки зору точності виявлення морфології частинок зносу.

Феррографічний метод (в ГА використовуються феррографи типу RF, DR в основному імпортного виробництва). Феррографія - це метод мікроскопічного аналізу частинок, відокремлених від рідин. Метод має ряд переваг в порівнянні з методами, згаданими вище, головним з яких є низька похибка вимірів.

Для оцінки стану тертьових пар користуються двома типами феррографів. Це аналітичний феррограф і прямопоказуючий феррограф. Останній оцінює масову концентрацію домішок в пробі; за допомогою аналітичного феррографа вивчаються морфологічні ознаки частинок зносу з метою встановлення "адреси" дефекту.

Частинки, які разом з маслом стікають по похилій поверхні пластини, виготовленої з кварцового скла, піддаються впливу градуированного магнітного поля, під впливом якого Fe-частинки осідають в порядку убування свого розміру. Мінімальний розмір часток - 3,0-5,0 мкм.

Концентрація частинок "влловлюється" в двох областях: на вході в зону відкладення і на відстані 4 мм від цієї зони. У цих точках проводиться вимірювання інтенсивності проходження світла через відкладення, яка пропорційна концентрації частинок в пробі.

Метод радіоактивних ізотопів

Використання методу радіоактивних ізотопів полягає в установці на двигун активованої деталі, знос якої потрібно визначити. В процесі роботи

двигуна радіоактивні частинки разом з іншими продуктами зносу потрапляють в масло. Ступінь зносу деталі визначають на основі вимірювання радіоактивності масла. Метод високо інформативний, тому що прямо вказує "адресу" дефекту. Основними способами активації масла є: установка радіоактивних вставок на заданих ділянках поверхні деталі; опромінення деталей нейтронами; введення ізотопів в метали під час їх плавки; електролітичне покриття деталей радіоактивним елементом.

Застосування радіоактивних ізотопів для дослідження зносу має низку переваг. Цей метод має високу чутливість і можливість безперервної реєстрації вимірювань безпосередньо при роботі двигуна. З його допомогою можна визначати знос заданої ділянки деталі. Крім того, метод дозволяє досліджувати ряд питань, пов'язаних з роботою і зносом двигуна: приработку деталей при пусках, характер зношування (корозійний, механічний і т.п.), витрата масла і ін.

Однак визначення зносу деталей методом радіоактивних ізотопів представляє відому складність. До цього необхідно додати, що застосування методу обмежена необхідністю спеціальної підготовки двигуна перед випробуваннями, а також біологічного захисту обслуговуючого персоналу від випромінювання. Метод дозволяє оцінювати знос тільки однієї деталі (або групи деталей). Одночасне роздільне визначення зносу декількох деталей досить складно, тому що вимагає застосування ізотопів з різними енергіями випромінювання та спеціальної апаратури для роздільної реєстрації цих випромінювань.

## 2.4 Ефективність діагностики рідинних систем ЛА і АТ

При діагностуванні рідинних систем АТ в умовах експлуатації використовують переносні і вбудовані засоби. Більшість параметрів, що характеризують стан рідинних систем, є неелектричними величинами (тиск, температура, витрата робочої рідини і ін.). Для зручності виміру і обробки діагностичних параметрів необхідна їх трансформація в електричні сигнали.

Для цього використовуються різні перетворювачі, які класифікуються за своїм принципом дії наступним чином, причому їх функціональні можливості вимірювання параметрів відзначені в дужках:

- ультразвукові (витрата, параметри робочої рідини);
- п'єзоелектричні (пульсації тиску, вібрації);
- індукційні (частота обертання);
- трансформаторні (переміщення, тиск, витрата);
- фотоелектричні (частота обертання, інтенсивність випромінювання);
- індуктивні (тиск, лінійні переміщення);
- термопари, термоопору (температура);
- тензорезисторні (відносні переміщення);
- потенциометрические (тиск, лінійні і кутові швидкості) і ін.

Прийнятну точність вимірювання витрати мають турбінні витратоміри типу РТСМ. У них вимірювані обсяги рідини відсікаються обертається крильчаткою, а частота її обертання свідчить про значення об'ємної витрати.

Простими і надійними приладами для вимірювання надлишкового тиску є пружинні манометри, для ступеня розрядження - т.зв. вакуумметри. Як чутливі елементи в цих приладах використовуються різного роду мембрани, сильфони, сельсини і т.п.



Рис. 8. Течеискатель вербу-002:

- 1 - електронний блок-перетворювач;
- 2 - ультразвуковий щуп з кабелем;
- 3 - програмне забезпечення;
- 4 - з'єднувальний шнур підзарядки акумулятора;
- 5 - акумулятор; 6 футляр

Для реєстрації витоків робочої рідини застосовуються реєстратори особливого типу, звані термісторами (напівпровідникові мікротермосопротивлення). Термістори застосовують для оцінки внутрішньої негерметичності рідинних систем. Вони встановлюються в зливні магістралі. Причиною внутрішньої негерметичності є зазвичай знос золотників, ущільнювачів втулок та інших елементів в агрегатах рідинних систем, що утворюють пари тертя. Пульсації тисків рідини передаються на корпус агрегатів з ультразвуковою частотою. Найбільша амплітуда коливань виникає в тому місці корпусу агрегату, де розташовані зношені пари тертя. Для вимірювання коливань і перетворення їх в електричний сигнал в ГА застосовують ультразвукові індикатори типу ТУЗ-1, ІКУ-1, вербу-002/5-МП, Т-2001 і ін., Звані течешукачами (рис. 8).

## 2.5 Ефективність діагностики ГТД по термогазодинамічних параметрам

Відповідно до загальноприйнятих концепціями до термогазодинамічних параметрів відносять: тиск, температуру, ставлення тисків і температур, швидкість течії, витрата палива і масла, прохідні площі перетинів проточної частини, тягу, а також частоту обертання роторів. Інформативність термогазодинамічних діагностики ВМД невисока.

Загальні підходи тут не відрізняються від підходів, що застосовуються при вібро або модельному діагностуванні, розглянутих вище. Є лише деякі

специфічні відмінності. Зазвичай при термогазодинамічних діагностуванні ВМД застосовується метод математичного моделювання "поведінки" перерахованих вище параметрів в процесі роботи двигуна. Розрізняють детерміновані, імовірнісні і комбіновані моделі ВМД. У детермінованих моделях всі взаємозв'язки, змінні і константи задаються точно (що вельми складно при профілактиці відмов). Дана умова забезпечує можливість однозначного визначення результуючої функції. В імовірнісних моделях задаються відповідні закони розподілу випадкових величин, що призводить до ймовірнісної оцінкою цієї функції. Найчастіше застосовують детерміновані моделі. Тут ознаками стану двигуна можуть бути: тяга  $R$ , витрата палива  $C_r$ , температура газів перед (Т) або за турбіною (ТГ), параметри робочого тіла по тракту, параметри паливної, масляної систем і т.д. Прикладами можливих несправностей можуть служити: прогари лопаток турбіни, жар частини камер згоряння, деформація елементів проточної частини і т.п. Рішення приймають по критичним відхилень термогазодинамічних параметрів.

Зміна температури газу за турбіною порівнюють з еталонною математичною моделлю. Еталонна модель будується по вихідним формулярний даними двигуна. Температура контролюється на злітному режимі, якому відповідав би контрольна температура за турбіною. У деяких випадках температуру Т, а також параметри  $T_n$  і  $P_n$  використовують для підрахунку тяги двигуна і порівнюють її з тією тягою, яка повинна бути в конкретно заданих умовах.

Певні можливості закладені в діагностичний параметр "витрата палива". Досвід показує, що пошкодження проточної частини ГТД збільшує витрату палива на 120-150 кг / год при одночасній зміні інших термодинамічних параметрів. Витрата палива досить добре відображає стан камер згоряння і соплових апаратів турбін. Однак точне вимірювання витрати утруднено через похибки витратомірів, викликаних необхідністю обліку щільності гасу при різних температурах.

У певних умовах діагностику ВМД можна здійснювати і по тиску палива перед форсунками  $P_f$ , Але і тут похибки вимірювань можуть відігравати вирішальну роль.

Для мінімізації похибок оцінки стану ГТД за результатами вимірювань термогазодинамічних параметрів, значення параметрів приводять до стандартних умов, а їх вимір має проводитися на одних і тих же висотах і режимах роботи двигуна.

Результати досліджень в області термогазодинамічних діагностики ВМД дозволили встановити, що найбільш чутливим та інформативним показником стану проточної частини двигунів є адіабатичний ККД турбіни  $\eta_t$ . Звичайно, безпосередньо заміряти  $\eta_t$  неможливо, однак, його можна виразити через частоту обертання роторів, ступінь підвищення тиску до і температуру газів перед турбіною  $T_g^*$ . Ця залежність буде емпіричної і специфічною стосовно до даного типу двигуна.

Детерміновані моделі діагностування ГТД можуть виражатися через

систему рівнянь стану двигуна, вирішивши яку можна сформулювати діагноз, здійснити прогноз і дати рекомендації щодо попередження або усунення можливої відмови. Діагностичні рівняння є кінцеве безліч виразів, побудованих для збільшення витрати повітря, температури газу перед турбіною, питомої витрати та інших термогазодинамічних параметрів. У правій частині цих рівнянь містяться відхилення параметрів, які визначають шляхом порівняння поточних значень з еталонними значеннями (при певному режимі роботи двигуна).

Найбільш відповідальним етапом термогазодинамічних діагностування ГТД є складання діагностичних рівнянь. Число діагностичних рівнянь визначається класами можливих станів ВМД.

Останнім часом для діагностики ВМД пропонується використовувати комплексні параметри, які в аналітичній формі пов'язують між собою кілька параметрів і, тим самим, найбільш повно характеризують робочі процеси, що відбуваються в двигуні. Так, для діагностування ТВД в ряді підприємств використовують відношення температури газів за турбінної  $T_g$  до тиску масла у вимірювачі крутного моменту Рікмен. При цьому в якості критерію оцінки стану двигуна по комплексному параметру використовують відносне відхилення контрольованого параметра від еталонного:

$$\Delta K = \frac{V_{\text{зам}} - U_e}{U_e},$$

де замість  $U_e$  -  $T_g / \text{Рікмен}$  - комплексний параметр, приведений до стандартних атмосферних умов. Використання даної величини для контролю технічного стану ТВД в процесі проведення стендових випробувань, а також в умовах експлуатації виявилось ефективним для оцінки працездатності двигуна.

## 2.6 Методи діагностики проточної частини ГТД

Поряд з описаними вище методами контролю і діагностики АТ найбільш загальну і оперативну інформацію про стан відповідальних вузлів і деталей двигуна, таких як лопатки компресора і турбіни, камери згоряння, диски, зварні шви корпусів і т.д., дають оптичні методи контролю з використанням бороскопів, фіброскопів і ендоскопів. Цими приладами успішно виявляється велика група дефектів типу: тріщин, прогарів, викривлення (порушення макрогеометрії деталей), корозії, ерозії, вироблення контактних поверхонь, зносу елементів лабіринтових ущільнень, нагарообразовання і ін.

На сьогоднішній день на російському ринку пропонують свою продукцію ряд вітчизняних і зарубіжних фірм - виробників ендоскопів: "Інтек", "Карл Шторц", "Намікон", "Олімпас", "Оптимед", "Ріхард Вольф", "Мачіда", "Сіміт", "Казанське оптико-механічне об'єднання", "Точприлад", "Еверест-ВІТ" та ін. Існуючі оптичні прилади для виявлення зазначених дефектів умовно можна розділити на три групи.

Перша група приладів - це прямі ендоскопи з лінзовою оптикою, торцевих і боковим зором, з прямими і кутовими окулярами. Ці прилади розрізняються по діаметру і довжині робочої частини. У них різні оптичні характеристики і різна механізація. До цієї групи належать такі прилади, як Н-200, УСП-8М, РВП-491 і ряд інших.

Ендоскопи призначені для огляду і виявлення поверхневих дефектів (тріщин, забоїн, рисок і т.д.) на робочих лопатках всіх ступенів компресора і турбіни двигунів в експлуатації. Конструкція приладу дозволяє оператору, не змінюючи свого положення, оглядати всі поверхні, розташовані навколо робочої частини ендоскопа. При підготовці до роботи прилад підключають до джерела електричного струму і вводять через оглядового люк в корпусі в проточну частину двигуна.

Ендоскоп УСП-8М служить для огляду і виявлення дефектів на сопловому апараті турбіни першого ступеня, форсунках і стінках камери згоряння. Конструктивно він складається з труби з об'єктивом, освітлювальним пристроєм і окуляра.

Ендоскоп РВП-491 призначений для огляду робочих лопаток турбіни і за конструкцією аналогічний ендоскоп УСП-8М. Для фіксації об'єктива на певній відстані від об'єкта, а також для зручності роботи з приладом під час огляду є упор, яким прилад встановлюється на кромку оглядається лопатки.

До другої групи приладів можна віднести ендоскопи з одним або декількома рухомими ланками, з'єднаними між собою універсальними оптичними шарнірами. Їх відмінною рисою є можливість огляду криволінійних каналів.

Ендоскоп Н-185 призначений для виявлення тріщин на проміжному кільці соплового апарату першого ступеня турбіни двигуна непрямим методом, що полягає в огляді задньої внутрішньої оболонки турбіни з метою виявлення на ній кольори мінливості, що утворюються від газів, що виходять з внутрішнього контуру двигуна через тріщини (при наявності таких) на проміжному кільці соплового апарату. Конструктивно прилад являє собою трубу, що складається з об'єктивної частини з поворотними і нерухомими ланками ("колінами") основний, проміжної, трьох подовжувальних труб і окуляра. На рухомому ланці об'єктивної частини укріплено освітлювальний пристрій. Всі частини приладу легко збираються і розбираються без застосування інструменту. Ендоскоп Н-170 призначений для огляду і виявлення дефектів на сопловому апараті першого ступеня турбіни, форсунках і деталях камери згоряння. Прилад являє собою досить складну шарнірно-лінзову систему, що складається з головного ланки з об'єктивом і освітлювальним пристроєм, декількох проміжних ланок і ланки окуляра, з'єднаних між собою за допомогою оптичних шарнірів. Завдяки великому числу ступенів свободи прилад проникає через складний криволінійний канал - оглядові люки в оболонках двигуна і кільцеву камеру згоряння, забезпечуючи тим самим контроль нижній частині соплового апарату, форсуночного плити і елементів камери згоряння на двигунах, які не мають нижніх люків. з'єднаних між собою за допомогою оптичних шарнірів.

Завдяки великому числу ступенів свободи прилад проникає через складний криволінійний канал - оглядові люки в оболонках двигуна і кільцеву камеру згоряння, забезпечуючи тим самим контроль нижній частині соплового апарату, форсуночного плити і елементів камери згоряння на двигунах, які не мають нижніх люків. з'єднаних між собою за допомогою оптичних шарнірів. Завдяки великому числу ступенів свободи прилад проникає через складний криволінійний канал - оглядові люки в оболонках двигуна і кільцеву камеру згоряння, забезпечуючи тим самим контроль нижній частині соплового апарату, форсуночного плити і елементів камери згоряння на двигунах, які не мають нижніх люків.

До третьої групи діагностичних приладів відносяться волоконно-оптичні ендоскопи з гнучкою робочою частиною (рис. 9). Представником цієї групи є вітчизняні ендоскопи типу Н-280, ряд ендоскопів фірми "Сіміт" (медтехніка), а також імпортовані "Олімпас", призначені для огляду і виявлення дефектів практично на всіх елементах турбокомпресора і камери згоряння. Крім того, згадані фірми також включені до державного реєстру контрольно-вимірювальних засобів, дозволених до використання в ГА Росії.

Волоконно-оптична дефектоскопія ґрунтується на перспективних досягненнях технічної фізики, електроніки, радіотехніки, обчислювальної техніки і механіки. Сукупна використання переваг окремих елементів і пристроїв забезпечує більш ефективну реалізацію алгоритмів і програм по сприйняттю і обробці первинної інформації. Функціональні можливості оптики, важливі властивості елементів оптоелектроніки, класичні методи механіки в поєднанні з унікальними властивостями волоконної оптики і процесорної техніки дозволяють оптимізувати структуру і склад технічних засобів ендоскопії, як за якістю, так і за надійністю.



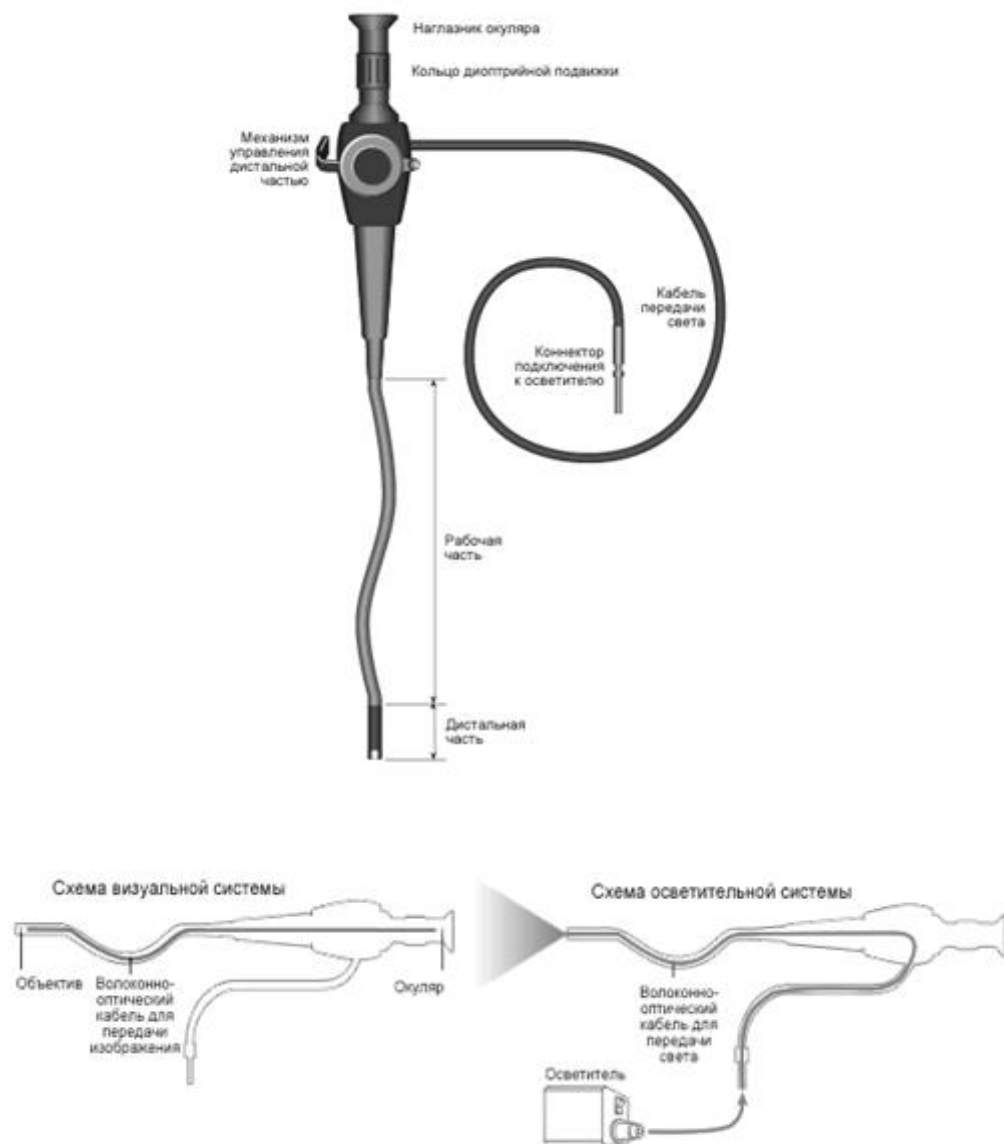


Рис. 9. Модель гнучкого эндоскопа

Технічну основу волоконно-оптичної ендоскопії становить безліч різних по виконанню, форм, розмірів і матеріалів елементів традиційної волоконної оптики. Переважне застосування знаходять поодинокі одножильні світлопроводи і багатожильні джгути з циліндричних або конічних моноволокон.

Ендоскопи складаються з нерозбірними труби з окуляром і освітлювачем, об'єктива і волоконних світловодів, призначених для підсвічування і передачі зображення по криволінійному каналу.

Останнім часом ведуться розробки нових оптичних приладів. Гнучкі фото-відео ендоскопи спочатку розроблялися з урахуванням вимог документування результатів контролю. Так, наприклад, фотоендоскоп Н-300 призначений для огляду та фотографування робочих лопаток всіх ступенів компресора і турбіни двоконтурних двигунів як з боку вхідних, так і з боку вихідних кромки. На відміну від відомих ендоскопів з фотопріставками Н-300 має штатний фотоапарат і оптичну систему, що дозволяє одночасно

виробляти як візуальне спостереження, так і фотографування без будь-яких переналадок матеріальної частини. Наявність в поле зору приладу масштабної сітки для визначення величини дефектів, поворотні об'єктиви, окуляр,

Ендоскоп Н-295 крім звичайної механізації забезпечений відкидним дистанційно керованим дзеркалом, що дозволяє через один люк оглядати робочі лопатки компресора з двох сторін.

Волоконно-оптичний ендоскоп Н-290 призначений для оглядів криволінійних профільних каналів, утворених деталями осей стулок реверсу тяги.

Особливістю гнучких відеоскоп (наприклад, 6 серії Olympus IV6C6, IV8C6, 7 серії Olympus - IPLEX SX) є установка мініатюрної телевізійної камери безпосередньо за об'єктивом на дистальному кінці робочої частини світловода. Дана конструкція при сучасному рівні технології виробництва кольорових мініатюрних об'єктивів (350000 - 550000 пікселів) дозволяє різко підвищити (в порівнянні з фіброскоп однакового діаметра) якість створюваного зображення. При цьому вихідний сигнал обробляється і може бути записаний на штатних накопичувальних пристроях (Flash карті до 512 Мб і більше) як у вигляді цифрового знімка, так і в реальному часі на відеомагнітофоні різного формату.

Поряд з ендоскопією в практиці діагностики проточної частини ГТД все ширше знаходять застосування деякі дефектоскопи. Зокрема, диски турбіни контролюються на наявність мікротріщин вихрострумівий приладом "Фазек" (Німеччина), перетворювач якого закріплюється в межлопаточном каналі соплового апарату турбіни. Кромки лопаток турбіни перевіряються індуктивним дефектоскопом ЗИТ-1СМА.

Інформативність розглянутих методів вельми висока. Розглянуті засоби контролю добре зарекомендували себе в експлуатації.

### 3. Методи узагальненої оцінки стану технічних систем

3.1 Методи згорток приватних параметрів контролю до узагальненим показником. Аналіз існуючих методів безрозбірної діагностики АТ пок

азав, що в даний час кожен з методів має певну область застосування і дозволяє оцінити стан окремих вузлів і агрегатів. Для повного і детального контролю доцільно використовувати сукупність різних методів. При цьому виникає необхідність узагальнення діагностичної інформації. Існує ряд підходів до узагальненої оцінки стану технічних систем. Вони зводяться до виявлення інформативного узагальненого параметра стану об'єкта. Ідея полягає в тому, що процес поступової зміни рівня працездатності, що характеризується багатьма компонентами, описується одновимірної функцією, чисельні значення якої залежать від контрольованих компонентів процесу. Така функція розглядається як узагальнений параметр процесу. При цьому може виявитися,

Узагальнений параметр повинен відповідати певним вимогам.

Ці вимоги в числі інших передбачають обробку приватних параметрів контролю, що включає:

- ранжування за ступенем значущості;
- визначення серед приватних параметрів критерію, що має вирішальне значення при постановці діагнозу об'єкта.

Частные параметры ранжируют на 3 группы: существенные, второстепенные и несущественные. Для каждой группы определяют по статистическим данным свои весовые коэффициенты и назначают пределы допуска. Среди существенных параметров выбирается один, изменение которого полагают определяющим при оценке реакции состояния объекта в целом. Практическое использование такого подхода при подготовке частных параметров для включения их в качестве составляющих в обобщенный параметр представляется затруднительным. Поскольку статистические данные по множеству ГТД не отражают текущего состояния конкретного двигателя, то при эксплуатации по фактическому состоянию необходимо использовать вместо них данные контроля. При этом для разных двигателей в разные моменты времени существенность каждого параметра может быть не адекватна. Она определяется остаточной надежностью двигателя по данному параметру. Следовательно, разбиение частных параметров на группы по их существенности для всего периода эксплуатации не представляется возможным. Кроме того, в каждом конкретном случае решающее значение для оценки работоспособности ГТД может иметь любой параметр, уход которого за пределы допуска способен привести к отказу. Таким образом, предлагаемый подход к ранжированию частных параметров в большей степени ориентирован для использования при организации планово-предупредительной стратегии эксплуатации и не вполне применим для эксплуатации ГТД по фактическому техническому состоянию.

К обобщенному параметру предъявляются следующие основные требования. Параметр должен:

- максимально характеризовать качество объекта;
- быть критичным к изменению частных параметров;
- характеризовать наступление критического состояния объекта.

При свертке частных параметров к обобщенному, необходимо решить следующие задачи:

- определить относительные значения частных параметров;
- оценить значимость частного параметра для оценки состояния объекта;
- построить математическое выражение для обобщенного параметра.

Визначення відносних значень приватних параметрів вважають за необхідне, оскільки стан об'єкта може характеризуватися параметрами, що мають різну розмірність. Всі контрольовані параметри призводять до єдиної системи вимірювання, в якій вони можуть бути порівнянними. Однією з

таких систем є система безрозмірного (нормованого) відносного обчислення. Для кожного параметра  $x_i$  ( $i = 1, k$ ) виділяють допустиме значення  $x_i^*$ , При досягненні якого об'єкт втрачає працездатність і оптимальне, з точки зору надійності, значення  $x_{iopt}$  (Як правило, воно дорівнює номінальному значенню  $x_{in}$ ). Якщо в процесі експлуатації дотримується умова  $x_i(t) > x_i^*$ , Тоді можна записати безрозмірний (нормований) параметр  $x_i'(t)$  у вигляді:

$$x_i'(t) = \frac{x_i(t) - x_i^*}{x_{i_{nom}} - x_i^*} \quad (1)$$