

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

ЗА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЮ ПРОГРАМОЮ
«ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН І АВІАДВИГУНІВ»

Тема: «Удосконалення контролю технічного стану газотурбінних двигунів»

Виконав: _____ Гао Ян

Керівник: канд. техн. наук, доц. _____ П.В. Корольов

Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:

охорона праці: канд. мед. наук, проф. _____ Б.Д. Халмурадов

охорона навколишнього середовища:
д-р. техн. наук, проф. _____ В.М.Ващенко

Нормоконтролер _____

Київ 2021

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи студента

Гао Яна

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача в родовому відмінку)

1. Тема дипломної роботи: «Удосконалення контролю технічного стану газотурбінних двигунів», що затверджена наказом ректора №2137/ст від «04» жовтня 2021 р.

2. Термін виконання роботи: з 25.10.2021 р. по 31.12.2021 року.

3. Вихідні дані до роботи: Статистичні дані про відмови та несправності газотурбінних установок. Сучасні методичні та технічні ресурси удосконалення технічного стану газотурбінних двигунів.

4. Зміст пояснювальної записки: Аналіз перспективних підходів до удосконалення систем технічного контролю. Обґрунтування доцільності та розробка пропозицій щодо удосконалення контролю технічного стану газотурбінних двигунів, охорона праці, охорона навколишнього середовища, висновки до кваліфікаційної роботи.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Ілюстрації методичних та конструктивних рішень щодо удосконалення контролю технічного стану газотурбінних двигунів.

6. Календарний план-графік

№	Етапи виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання	Примітка
1	Результати аналізу перспектив розвитку систем контролю технічного стану газотурбінних двигунів (ГТД)		
2	Обґрунтування доцільності удосконалення системи контролю технічного стану ГТД		
3	Розробка пропозицій з удосконалення процедур контролю технічного стану ГТД		

4	Визначення пріоритетних напрямків зменшення шкідливого впливу газотурбінних двигунів на навколишнє середовище		
5	Розробка заходів з охорони праці при експлуатації авіаційних силових установок.		
6	Написання розділів « Охорона навколишнього середовища» та «Охорона праці»		
7	Оформлення кваліфікаційної роботи та презентації		

7. Консультанти з окремих розділів роботи:

Розділ	Консультант	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Халмурадов Б.Д.</i>		
<i>Охорона навколишнього середовища</i>	<i>Ващенко В.М.</i>		

8. Дата видачі завдання: «25» жовтня 2021 р.

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Корольов П.В.
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____ Гао Ян
(підпис здобувача) (П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: «Удосконалення контролю технічного стану газотурбінних двигунів»:

с., рис., табл., джерела.

Об'єкт дослідження – газотурбінний двигун.

Предмет дослідження – діагностування газотурбінного двигуна із застосуванням різних методів.

Мета дипломної роботи – аналіз існуючих методів, способів та приладів контролю технічного стану газотурбінних двигунів та їх удосконалення, розробка метода моніторингу наявної потужності газотурбінного двигуна, розробка методу вимірювання крутного моменту газотурбінного двигуна (ГТД), аналіз типів датчиків, що використовуються для вимірювання крутного моменту, аналіз та розгляд основ і методів лазерної віброметрії, розгляд типів існуючих віброметрів та віброаналізаторів, розгляд пропонованої методики вимірювань рівня вібрації на двигуні з використанням лазерного віброметра, проведення випробувань та короткий аналіз результатів вимірювань вібрації.

Методи дослідження.

Для вирішення поставлених завдань використовувалися елементи теорії газотурбінних двигунів, методи: математичного, натурного, комп'ютерного моделювання.

Практичне значення результатів кваліфікаційної роботи полягає в підвищенні ефективності технічної експлуатації ГТД за рахунок збільшення ймовірності точного технічного діагнозу при ідентифікації технічного стану ГТД до конструктивного вузла.

Розроблені автором рекомендації можуть бути запропоновані для удосконалення методів і засобів контролю технічного стану ГТД.

ДІАГНОСТУВАННЯ, ГАЗОТУРБІННИЙ ДВИГУН, ТЕХНІЧНИЙ СТАН, ВІЛЬНА ТУРБІНА, ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА, НАЯВНА ПОТУЖНІСТЬ, КРУТНИЙ МОМЕНТ, ЛАЗЕРНА ВІБРОМЕТРІЯ, ВІБРОМЕТР, ВІБРОАНАЛІЗАТОР

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1 ОСНОВИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

1.1 Основні поняття, терміни та визначення

1.2 Завдання і структура технічної діагностики

Висновки до розділу 1

РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ДІАГНОСТУВАННЯ.....

2.1 Загальний опис двигуна. Історія його створення

2.2 Опис основних вузлів двигуна

Висновки до розділу 2

РОЗДІЛ 3 УДОСКОНАЛЕННЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ
ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ.....

3.1 Моніторинг наявної потужності газотурбінного двигуна

3.2 Вимірювання крутного моменту

3.3 Аналіз і основи лазерної віброметрії

3.4 Методика вимірювань з використанням лазерного віброметра,
проведення випробувань та аналіз результатів вимірювань вібрації

Висновки до розділу 3.....

4 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....

Висновки до розділу 4

5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....

Висновки до розділу 5

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ГТД –	газотурбінний двигун
ДП –	діагностичний параметр
КВТ –	компресор високого тиску
ККД –	коефіцієнт корисної дії
КНТ –	компресор низького тиску
ММ –	математична модель
КЕ –	конструктивний елемент
КЗ –	камера згоряння
ПЧ –	проточна частина
САУ –	стандартні атмосферні умови
СТ –	силова турбіна
ТВТ –	турбіна високого тиску
ТНТ –	турбіна низького тиску
ТК	турбіна компресора
ВТ	вільна турбіна
ТС –	технічний стан
ТД –	технічна діагностика
ТО –	технічне обслуговування
ТОіР –	технічне обслуговування і ремонт
ВНА	вхідний напрямний апарат
ВКД	важіль керування двигуном
КМ	крутний момент
КПК	кодовий перетворювач кута
АЦП	аналого-цифровий перетворювач
ЗВКМ	засоби вимірювання крутного моменту
ПЗ	програмне забезпечення

ВВЕДЕННЯ

Сучасні газотурбінні двигуни є дорогими виробами, вартість їх ремонту також дуже висока. Тому збільшення ресурсів економічно вигідне за умови забезпечення високого рівня надійності двигунів. Це може бути досягнуто насамперед шляхом впровадження технічної діагностики, що дозволяє виявляти несправності двигуна на ранній стадії розвитку. Використання засобів і методів діагностики дозволяє запобігати відмовам двигунів у польоті і тим самим максимально використовувати індивідуальні можливості експлуатації кожного двигуна без виконання примусових ремонтів. Крім того, використання діагностики дозволяє попереджати вторинні руйнування двигунів і тим самим зменшувати витрати на відновлення двигунів, що відмовили. Для технічної діагностики двигунів використовують та вдосконалюють такі основні методи:

- ✓ візуальний огляд та огляд за допомогою оптичних пристроїв;
- ✓ методи неруйнівного фізичного контролю; контроль вібрації двигуна;
- ✓ контроль стану масла, що характеризує стан вузлів, які омиваються маслом;
- ✓ контроль параметрів, що характеризують стан ГТД. Авіаційний газотурбінний двигун є складним виробом, і жоден з перерахованих методів окремо може дати достовірну оцінку його технічного стану. Тільки вдосконалення методів комплексної оцінки може підвищити достовірність контролю технічного стану газотурбінного двигуна.

Метод візуального огляду є оперативним видом контролю технічного стану корпусів двигуна, герметичності паливної та масляної систем силової установки, вхідних напрямних апаратів та лопаток перших ступенів компресорів та останніх ступенів турбіни, а також інших доступних елементів двигуна та систем силової установки. Однак найбільш навантаженими у двигуні є перші ступені турбіни, камера згоряння, останні

ступені компресора, опори трансмісії двигуна та інші елементи, які часто недоступні для візуального контролю.

Тому в останні роки широке застосування знаходять різні оптичні пристосування, що дозволяють контролювати конструктивні елементи проточної частини двигуна, лопатки всіх ступенів компресора і турбіни, камер згоряння. Як оптичні засоби в зарубіжній практиці використовують бороскопи, що дозволяють оглядати конструктивні елементи в найбільш важкодоступних місцях. Для полегшення контролю великої кількості лопаток використовують телевізійні приставки. Для доступу до елементів проточної частини в конструкції двигуна передбачаються оглядові вікна.

Для контролю окремих конструктивних елементів двигуна використовуються різні методи неруйнівного фізичного контролю, такі як токовихревий, ультразвуковий, магнітний. Однак зазначені методи вимагають великих трудовитрат і мають обмежені сфери застосування. Тому вони використовують, як правило, як додаткові види контролю для уточнення характеру дефекту.

Деякі закордонні авіаційні компанії використовують метод рентгеноскопії конструктивних елементів двигуна, що недоступні для візуального контролю. Принцип методу заснований на дистанційному введенні радіоактивного ізотопу «іридій-192» у порожнистий вал двигуна, а зовні двигуна розміщують рентгенівську плівку для отримання зображення контрольованих деталей. Метод може бути ефективний для оцінки стану камер згоряння, лопаток соплових апаратів та інших елементів газоповітряного тракту.

Величина вібрації корпусу двигуна є одним з основних параметрів, що характеризують технічний стан двигуна. Під контролем вібрації зазвичай мають на увазі контроль інтенсивності (рівня) загальної вібрації двигуна.

Корпуси авіадвигуна відчувають вібрації, що породжуються вузлами, що обертаються, і автоколивальними процесами в газоповітряному тракті в широкому діапазоні частот. Найбільш небезпечні вібрації, викликані

неврівноваженими відцентровими силами. В даний час всі літаки з ГТД обладнані вібровимірювальною апаратурою, що дозволяє здійснювати контроль загальної вібрації двигуна низькочастотної області, тобто інтенсивність роторної вібрації.

Для оцінки рівня вібрації використовують параметр віброшвидкості, який не залежить від частоти обертання роторів.

З метою діагностики та прогнозування технічного стану двигунів необхідно проводити реєстрацію параметрів вібрації в кожному польоті та аналізувати їх зміну по напрацюванню двигунів. Саме аналіз тенденцій зміни рівня вібрації кожного двигуна дозволяє виявляти несправності в деталях, що обертаються, роторів на ранній стадії їх розвитку.

Однак оцінка зміни загального рівня вібрації двигуна, що вимірюється бортовою системою контролю, часто не дозволяє забезпечити достатню глибину контролю, тобто виявлення несправного елемента.

Постановка уточненого діагнозу може бути забезпечена шляхом виміру всього спектра вібрації та інших методів контролю. Враховуючи те, що двигуни в більшості випадків при появі дефектів у роторній частині в процесі їх експлуатації не відновлюються, постановка загального діагнозу за параметром вібрації може бути достатньою для прийняття рішення про дострокову заміну двигуна. Для ефективного контролю технічного стану зміни рівня вібрації необхідно обґрунтування норм на величину швидкості зміни рівня вібрації.

Діагностика, як наукова дисципліна і як область науково-практичної діяльності, є соціально обумовленою, змінюється в ході історичного розвитку суспільства. Її сучасний розвиток у XXI столітті здійснюється в напрямку розширення можливостей більш швидкого і точного наближення до мети, розпізнавання причин відхилень від норм технічного об'єкта. У свою чергу, розвиток діагностики характеризується нерівномірністю мінливості її окремих сторін, а також впливом один на одного різних ознак і параметрів контрольованих об'єктів з позицій інформативності, а часто навіть з позицій

надмірності потоку інформації. Це стосується всіх рівнів і розділів діагностики. Таким чином, технічною діагностикою називається наука про розпізнавання (віднесення до одного з можливих класів) стану технічної системи. При діагностуванні об'єкт встановлюється шляхом зіставлення знань, накопичених наукою, про групу та клас відповідних об'єктів [1].

Технічна діагностика – це наука, яка виникла у зв'язку зі зростаючою роллю в народному господарстві складних і дорогих технічних систем і пред'явленням до них підвищених вимог з безпеки, безвідмовності і довговічності. В цьому плані особливі вимоги пред'являються до авіаційної техніки (АТ), відмови якої призводять до тяжких наслідків.

Запобігання відмов АТ в значній мірі визначається ефективністю методів і засобів її діагностики. Вимогу про необхідність мати систему контролю технічного стану (ТС) авіаційної техніки міститься в такому основоположному документі як Авіаційні правила АП-25 «Норми льотної придатності літаків транспортної категорії»[2]. Згідно з цими вимогами для систем повітряних суден, відмова яких може слугувати безпосередньою причиною виникнення небезпечної ситуації в польоті, повинні бути передбачені контроль і діагностика їх ТС.

Для авіаційної техніки характерна поява в експлуатації різноманіття відмов і несправностей різної фізичної природи. Широку номенклатуру відмов і несправностей авіаційної техніки неможливо виявляти одним методом діагностики. Практика підтверджує, що для цілей виявлення всіх можливих несправностей АТ потрібна наявність розвиненої системи технічної діагностики, заснованої на поєднанні різноманітних методів і засобів [3].

РОЗДІЛ 1

ОСНОВИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

1.1 Основні поняття, терміни та визначення

Технічна діагностика (ТД) – область знань, що охоплює теорію, методи і засоби визначення технічного стану об'єкта, в тому числі і авіаційного газотурбінного двигуна (ГТД). Як будь-яка наука вона оперує відповідними поняттями, термінами і визначеннями, які використовуються як у літературі, присвяченій загальним питанням технічної діагностики, так і питанням діагностики авіаційної техніки, в тому числі і діагностики авіаційних двигунів.

У технічній діагностиці використовуються поняття, терміни та визначення, значення яких встановлені державними стандартами [4,5,6]. Крім того, є ряд термінів і понять, які не увійшли в стандарти, але використовуються в науково-технічній і навчальній літературі [7,8]. Нижче наведені найбільш вживані терміни і визначення.

У визначенні ТД ключовим поняттям є поняття «технічний стан». Під *технічним станом* об'єкта розуміється сукупність схильних до зміни в процесі виробництва або експлуатації властивостей об'єкта, яка характеризується в певний момент часу параметрами (параметрами стану), які встановлені технічною документацією на цей об'єкт [4,5].

Об'єкт технічного діагностування – це виріб і (або) його складові частини, що підлягають (піддаються) діагностуванню. Тобто – це матеріальний об'єкт, у якого визначається технічний стан і, в результаті, встановлюється технічний діагноз [5]. Для постановки діагнозу необхідно оцінити відповідність параметрів стану вимогам нормативно-технічної документації.

Параметр стану – це величина, що кількісно характеризує одне з основних властивостей об'єкта або процесу, що протікає в об'єкті. В якості параметрів стану можуть прийматися маса, коефіцієнт тертя, геометричні розміри, зазори, електричний опір тощо. Ці параметри ще називають

первинними. Експериментальна оцінка чисельних значень цих параметрів і порівняння їх зі значеннями, що задані нормативно-технічною документацією, і дозволяє провести оцінку технічного стану об'єкта, тобто встановити його діагноз [4÷6].

Часто на практиці неможливо зробити безпосереднє вимірювання параметрів стану. Тому в технічній діагностиці вводиться поняття *діагностичних параметрів* (ДП), під якими розуміються параметри об'єкта, які використовуються в процесі діагностування. Ці параметри в технічній літературі іноді називають вторинними. В якості ДП можуть використовуватися як параметри технічного стану, так і параметри, які характеризують різні процеси, що протікають в об'єкті діагностування, і лише непрямым чином пов'язані з параметрами стану.

Таким чином, оцінка технічного стану виконується на основі інформації про величини діагностичних параметрів. Отже, повинен бути відомий зв'язок між діагностичними параметрами і параметрами стану. Зазначений зв'язок встановлюється за допомогою так званих математичних (діагностичних) моделей [9].

Математична модель – формалізований опис об'єкта, що необхідний для вирішення завдань діагностування. Слід підкреслити, що основне призначення математичної (діагностичної) моделі це встановлення зв'язку між значеннями діагностичних параметрів і значеннями параметрів технічного стану (або безпосередньо з технічним станом) [4÷6].

Таким чином, процес постановки діагнозу можна зобразити наступним чином (рис. 1.1). На об'єкт контролю з параметрами технічного стану Z діє зовнішній вплив X . За допомогою засобів вимірювання визначають діагностичні параметри Y . Значення цих параметрів з використанням математичної моделі перетворюються на значення параметрів технічного стану Z^M . Далі ці значення порівнюються із значеннями параметрів технічного стану, даними нормативно-технічної документації $Z^{НД}$ і за результатами робиться висновок про технічний стан об'єкта контролю.

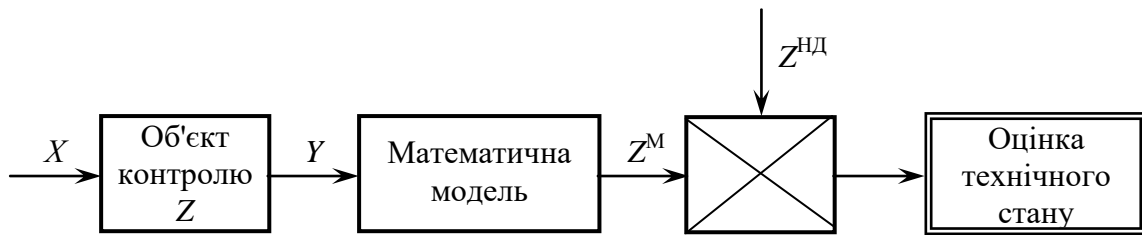


Рисунок 1.1 – Схематичне представлення процесу визначення технічного стану

Математичний опис (модель) об'єкта діагностування може бути виконана як з використанням діагностичних параметрів, так і з використанням діагностичних ознак. Відмінність цих двох понять полягає в наступному. *Діагностичні ознаки* формуються (обираються) на основі *діагностичних параметрів*, вони утворюють дискретну безліч, а поява їх конкретних значень безпосередньо пов'язана із знаходженням об'єкта діагностики у відповідному класі технічного стану (діагнозі). Наприклад – нехай діагностичний параметр висловлює температуру газів за турбіною авіаційного двигуна. Нехай визначені три класи технічного стану двигуна, які характеризуються відповідно зниженою ($<450^{\circ}\text{C}$), нормальною ($450-600^{\circ}\text{C}$) і підвищеною ($> 600^{\circ}\text{C}$) температурою. Попадання значення температури газів в один з цих інтервалів є поява діагностичної ознаки, яка відповідає двигуну зі зниженою, нормальною або підвищеною температурою.

Призначення математичних (діагностичних) моделей (ММ) не тільки у встановленні зв'язку між параметрами стану та діагностичними параметрами. ММ дозволяють складати алгоритми технічного діагностування.

Алгоритм ТД – сукупність приписів, що визначають послідовність дій при проведенні діагностування.

Залежно від того, для якого часу проводиться діагностування, розрізняють три типи діагностичних завдань. Перший тип – це завдання визначення технічного стану, в якому знаходився об'єкт в деякий момент часу в минулому – завдання генезису. Цей тип завдань вирішується в основному при розслідуванні авіаційних подій та передумов до них (рис. 1.2).

Другий тип – це завдання визначення технічного стану об'єкта в даний

момент часу, які називаються завданнями діагностування. Цей тип завдань важливий при виконанні технічного обслуговування і прийнятті рішення про подальшу експлуатацію.

Третій тип – це завдання передбачення технічного стану, в якому виявиться об'єкт в майбутній момент часу – завдання прогнозування. Цей тип завдань важливий для передбачення (прогнозування) залишкового ресурсу.



Рисунок 1.2 – Типи діагностичних завдань

Завдання діагностування, на заключному етапі, нерозривно пов'язані з завданнями класифікації, оскільки, за наявною інформацією необхідно встановити діагноз, тобто вказати клас технічного стану, до якого належить наш об'єкт діагностування. Для класифікації необхідно знати класи (діагнози), які встановлюються до початку діагностування на основі аналізу самого об'єкта, його функцій та відмов, що виникають у ньому. В принципі, кількість класів може бути нескінченною. Але існують досить загальні принципи класифікації, які відомі з теорії надійності. В теорії надійності введені поняття для чотирьох видів технічного стану [5]:

Працездатне і Непрацездатне; Справне і Несправне.

У технічній діагностиці вводиться ще два види технічного стану [5]:

Стан правильного функціонування і стан неправильного функціонування.

Стан правильного функціонування – означає, що об'єкт в поточний момент часу виконує запропонований йому алгоритм функціонування.

Стан неправильного функціонування – означає, що об'єкт в поточний момент часу не виконує запропонований йому алгоритм функціонування.

Слід розрізняти терміни контроль технічного стану і діагностування технічного стану.

Контроль ТС – це перевірка відповідності значень параметрів об'єкта вимогам технічної документації та визначення на цій основі одного із заданих видів технічного стану. Наприклад, якщо в результаті оцінки технічного стану робиться висновок про те, що об'єкт справний або несправний.

Термін *технічне діагностування* застосовується тоді, коли основним завданням процесу діагностування є пошук місця і визначення причин відмови, несправності або неправильного функціонування.

Існує ще ряд термінів, про які слід згадати.

Метод контролю (діагностики) – правила застосування до об'єкта контролю (діагностики) певних принципів і засобів контролю (діагностики). Вибір методу контролю або діагностики базується на аналізі фізичних особливостей протікання робочих процесів і розвитку несправностей в об'єкті, що діагностується

Засоби технічної діагностики (контролю) – апаратура і програмне забезпечення, за допомогою яких здійснюється визначення величини діагностичних параметрів, їх обробка та поділ об'єктів на класи.

Система технічної діагностики (контролю) – сукупність засобів, об'єкта й виконавців, яка необхідна для проведення діагностування (контролю) за правилами, встановленими в нормативно-технічній документації.

1.2 Завдання і структура технічної діагностики

Технічна діагностика АТ вирішує велике коло завдань, але основний – є розпізнавання станів технічних систем в умовах обмеженої інформації. Рішення діагностичних завдань (віднесення об'єкта до справного або несправного стану) завжди пов'язане з ризиком помилкової тривоги або пропуску дефекту. Слід зазначити, що загрожують при своєму розвитку

руйнуванням об'єктів АТ несправності можна укрупнено розділити на три групи [10]:

1) несправності дуже швидко (протягом часток секунди або декількох секунд) переходять в аварію, або, що майже те ж саме, несправності, занадто пізно виявляються за допомогою доступних засобів діагностики;

2) несправності, здатні розвиватися в аварію протягом декількох хвилин, а також несправності, характер і темп розвитку яких не можна достовірно передбачити на основі досягнутого рівня знань. Виникнення таких несправностей повинно супроводжуватися негайною видачею сигналу екіпажу літака (або персоналу випробувального стенду) для залучення уваги, оцінки ситуації та прийняття необхідних заходів;

3) несправності, що розвиваються відносно повільно або виявляються готівкою діагностичними засобами на настільки ранній стадії, що перехід їх в аварію в продовження даного польоту можна вважати практично виключеною. Раннє виявлення саме таких несправностей і становить основу прогнозування станів АТ.

Одна з практичних завдань досліджень діагностики в області динаміки розвитку несправностей АТ полягає в тому, щоб максимально скорочувати число несправностей першої і другої груп та поступово «перекласти» їх у третю, розширюючи, таким чином, можливість раннього діагностування та довгострокового прогнозування станів АТ. Висока ступінь достовірності діагнозу не тільки підвищує безпеку польотів (БП), але і сприяє істотному зниженню експлуатаційних витрат, пов'язаних з порушенням регулярності польотів, ремонтом АТ.

Досвід експлуатації АТ для вирішення завдань діагностики показує, щоб правильно поставити діагноз, необхідно на першому етапі заздалегідь знати всі можливі стани, виходячи з апріорних статистичних даних і ймовірностей прояву ситуацій, а також масив діагностичних ознак, що реагують на ці стани. Як вже зазначалося, процес якісної зміни технічних властивостей АТ відбувається безперервно, а це означає, що безліч можливих її станів

нескінченно і навіть безліч. Одна з задач діагностики полягає в тому, щоб розбити безліч станів на кінцеве і невелике число класів. У кожному класі об'єднуються стани, що володіють однаковими властивостями, обраними в якості ознак класифікації. При цьому статистична база параметрів, отриманих перерахованими вище методами діагностики, повинна бути неупередженою і реальною. Не всі параметри, які можуть бути використані в діагностиці, рівноцінні за змістом відомостей про функціонуючих системах АТ. Одні з них приносять інформацію відразу про багато властивостей працюючих модулів, інші, навпаки, вкрай бідні [1].

Тому на другому етапі цікавим видається розглянути задачі взаємозв'язку діагностичних параметрів, їхню зміну і можливий вплив один на одного, а також оцінити значимість ознак різних функціональних параметрів АТ. Відомо, що теорія постановки діагнозу досить добре описується загальною теорією зв'язку, що є одним з розділів теорії управління [7].

На службу діагностиці можна поставити математичний і логічний апарати, систему освоєних понять і термінологію. Необхідно лише знайти фізичну інтерпретацію абстрактних формул і шляхи практичного здійснення передбачених ними підходів.

Таким чином, на третьому етапі необхідно підтвердити значимість діагностичних ознак, і з урахуванням цього сформулювати діагноз, а в подальшому, здійснити прогнозування передвідмовних станів. Ця частина роботи пов'язана з найбільшими труднощами, тому що функціональні системи АТ є багатопараметричними, але не всі параметри однаково істотні (інформативні) в тих чи інших конкретних умовах [6,7].

Технічне діагностування – процес визначення технічного стану об'єкта. Воно поділяється на тестове, функціональне та експрес-діагностування.

Періодичне та планове технічне діагностування дозволяє:

- виконувати вхідний контроль агрегатів та запасних вузлів при їх купівлі;

- звести до мінімуму раптові позапланові зупинки технічного обладнання;

- керувати старінням обладнання.

Комплексне діагностування технічного стану обладнання дає можливість вирішувати такі завдання:

- проводити ремонт за фактичним станом;

- збільшити середній час між ремонтами;

- зменшити витрати деталей у процесі експлуатації різного обладнання;

- зменшити обсяг запасних частин;

- скоротити тривалість ремонтів;

- підвищити якість ремонту та усунути вторинні поломки;

- продовжити ресурс працюючого обладнання на суворій науковій основі;

- підвищити безпеку експлуатації енергетичного обладнання;

- зменшити споживання паливно-енергетичних ресурсів.

Тестове технічне діагностування - це діагностування, при якому на об'єкт подаються тестові дії (наприклад, визначення ступеня зношування ізоляції електричних машин зі зміни тангенсу кута діелектричних втрат при подачі напруги на обмотку двигуна від мосту змінного струму).

Функціональне технічне діагностування - це діагностування, при якому вимірюються та аналізуються параметри об'єкта при його функціонуванні за прямим призначенням або у спеціальному режимі, наприклад визначення технічного стану підшипників кочення зі зміни вібрації під час роботи електричних машин.

Експрес-діагностування – це діагностування за обмеженою кількістю параметрів за встановлений час.

Об'єкт технічного діагностування – виріб або його складові частини, що підлягають діагностуванню (контролю).

Технічний стан – це стан, який характеризується у певний час за певних умов довкілля значеннями діагностичних параметрів, встановлених технічною документацією на об'єкт.

Засоби технічного діагностування - апаратура та програми, за допомогою яких здійснюється діагностування (контроль).

Вбудовані засоби технічного діагностування – це засоби діагностування, що є складовою об'єкта (наприклад, газові реле в трансформаторах на напругу 100 кВ).

Зовнішні пристрої технічного діагностування – це діагностичні пристрої, виконані конструктивно окремо від об'єкта (наприклад, система віброконтролю на нафтоперекачувальних насосах).

Система технічного діагностування – сукупність коштів, об'єкта та виконавців, необхідна для проведення діагностування за правилами, встановленими технічною документацією.

Технічний діагноз – результат діагностування.

Прогнозування технічного стану це визначення технічного стану об'єкта із заданою ймовірністю на майбутній інтервал часу, протягом якого збережеться працездатний (непрацездатний) стан об'єкта.

Алгоритм технічного діагностування – сукупність розпоряджень, що визначають послідовність дій при проведенні діагностування.

Діагностична модель – формальний опис об'єкта, необхідне вирішення завдань діагностування. Діагностична модель може бути представлена у вигляді сукупності графіків, таблиць або еталонів у діагностичному просторі.

Існують різні методи технічного діагностування:

Візуально-оптичний метод реалізується за допомогою лупи, ендоскопа, штангенциркуля та інших найпростіших пристроїв. Цим методом користуються, зазвичай, постійно, проводячи зовнішні огляди устаткування під час підготовки до роботи чи процесі технічних оглядів (рис.1.3).



Рисунок 1.3 – Візуально-оптичний метод

Віброакустичний метод реалізується за допомогою різних приладів для виміру вібрації. Вібрація оцінюється за вібропереміщенням, віброшвидкістю або віброприскоренню. Оцінка технічного стану цим методом здійснюється за загальним рівнем вібрації в діапазоні частот $10 \div 1000$ Гц або за частотним аналізом у діапазоні $0 \div 20000$ Гц. (рис.1.4).

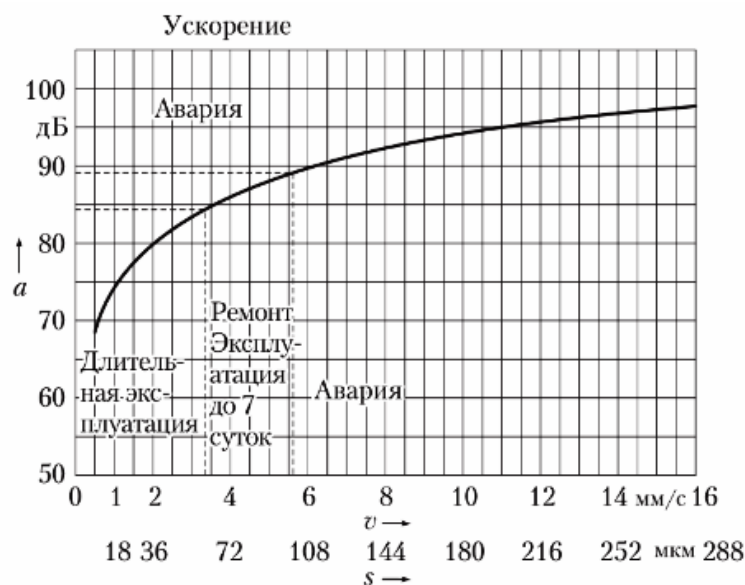


Рисунок 1.4 – Взаємозв'язок параметрів вібрації

Тепловізійний (термографічний) метод реалізується за допомогою пірометрів та тепловізорів. Пірометрами вимірюється температура безконтактним методом кожної конкретної точки, тобто. Для отримання інформації про температурний нуль необхідно цим приладом сканувати об'єкт. Тепловізори дозволяють визначати температурне поле в певній

частині поверхні діагностованого об'єкта, що підвищує ефективність виявлення дефектів, що зароджуються (рис.1.5).



Рисунок 1.5 – Тепловізійний метод діагностування

Метод акустичної емісії заснований на реєстрації високочастотних сигналів у металах та кераміці у разі виникнення мікротріщин. Частота акустичного сигналу змінюється у діапазоні 5 – 600 кГц. Сигнал виникає у момент утворення мікротріщин. Після закінчення розвитку тріщини він зникає. Внаслідок цього при використанні даного методу застосовують різні способи навантаження об'єктів у процесі діагностування.

Магнітний метод використовується для виявлення дефектів: мікротріщин, корозії та обривів сталевих дротів у канатах, концентрації напруги у металоконструкціях. Концентрація напруги виявляється за допомогою спеціальних приладів, в основі яких лежать принципи Баркгаузена і Віллари.

Для виявлення дефектів в ізоляції станційних синхронних генераторів з водневим охолодженням та дефектів у трансформаторах на напругу $3 \div 330$ кВ застосовується хроматографічний аналіз газів. У разі різних дефектів у трансформаторах в маслі виділяються різні гази: метан, ацетилен, водень тощо. Частка цих розчинених у маслі газів надзвичайно мала, але є прилади (хроматографи), з допомогою яких зазначені гази виявляються у

трансформаторному маслі і визначається рівень розвитку тих чи інших дефектів.

Крім того, для технічного діагностування валів електричних машин, корпусів трансформаторів можуть використовуватися такі методи: ультразвуковий, ультразвукова товщинометрія, радіографічний, капілярний (кольоровий), вихрострумний, механічні випробування (твердометрія, розтяг, вигин), рентгенографічна дефектоскопія, металографічний аналіз.

Авіаційний газотурбінний двигун як об'єкт діагностування

Авіаційний двигун є найбільш складним та відповідальним виробом АТ. Відмова двигуна призводить до складної ситуації в польоті, а можливо, і важких наслідків. Тому авіаційному двигуну приділяється особлива увага в технічній діагностиці.

Діагностика авіаційних ГТД базується на загальній теорії технічної діагностики та її розвиток нерозривно пов'язаний з прогресом в авіадвигуні та вдосконаленням системи експлуатації ЛА. За останні роки розвитку авіації значення технічної діагностики авіаційних ГТД значно зросло у зв'язку: з надходженням в експлуатацію більш складних у виготовленні та застосуванні авіаційних ГТД з великими тягоозброєністю та ресурсом, з підвищеними вимогами до надійності; з необхідністю виявлення несправностей на ранній стадії їх розвитку з метою запобігання відмов у польоті; із утрудненням швидко знаходити несправності без застосування спеціальних методів та засобів діагностування; з переходом на прогресивні методи технічного обслуговування та ремонту.

Авіаційний ГТД характеризується наявністю взаємодіючих багатьох складних систем: компресора, камери згоряння, турбіни, паливорегулюючої апаратури, систем змащення, суфлювання, запуску, відбору повітря, управління поворотом лопаток спрямовуючих апаратів і т. д. Тому оцінка технічного стану ГТД та аналізу параметрів цих систем та параметрів, що відображають взаємозв'язок між системами. Досвід експлуатації показує, що для діагностування сучасного ГТД глибиною до вузла необхідно виміряти та

спеціально обробити до 1000 параметрів. Проблеми вибору параметрів для діагностування у тому, що кожному режиму роботи двигуна відповідають свої параметри. Це пояснюється динамікою взаємодії газових потоків у проточній частині двигуна і мас роторів, що обертаються, тепловою інерційністю двигуна. Основні несправні стани авіаційних ГТД. Несправні стани ГТД наводяться на його основні вузли.

Компресор: абразивне та ерозійне зношування лопаток та проточної частини, пошкодження лопаток сторонніми предметами та помпаж компресора, обрив лопаток через появу втомних тріщин.

Камера згоряння: прогар жарової труби та корпусу камери згоряння, деформація та тріщини жарової труби та корпусу камери згоряння через нерівномірний розподіл поля температур.

Газова турбіна: витяжка робочих лопаток турбіни внаслідок дії на них відцентрових сил за умов високої температури; прогорання або перегрів соплових та робочих лопаток через порушення процесу згоряння палива; обрив або руйнування робочих лопаток через перевищення температури газів або неправильну експлуатацію (зупинка двигуна без попереднього охолодження на знижених режимах), підвищену вібрацію ГТД; втомні або термічні тріщини на пері лопаток та їх хвостовиках.

Висновки до розділу 1

У розділі проаналізовані основи технічної діагностики, приведені основні поняття, терміни та визначення. Також наведені основні завдання технічної діагностики, як галузі знань, що охоплює теорію, методи і засоби визначення технічного стану об'єкта, в тому числі і авіаційного газотурбінного двигуна.

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДІАГНОСТУВАННЯ

2.1 Загальний опис двигуна. Історія його створення

Для діагностованого двигуна як прототип прийнятий двигун ТВЗ-117. Вибрано двовальну схему вертолітного ГТД із вільною турбіною (рис.2.1).

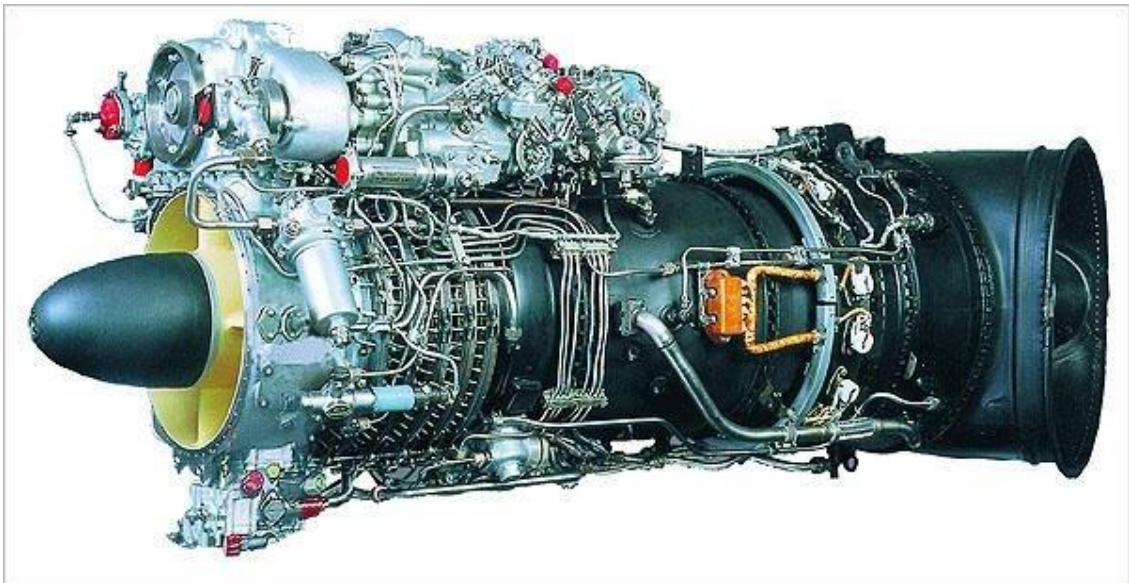


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд турбовального двигуна

Авіадвигун ТВЗ-117 випускається в 15-ти модифікаціях, серед яких: ТВЗ-117 II серії, III серії, М, МТ, КМ, В, ВК, ВКР, ВМ, ВМА, ВМАР, ВМ серії 02, ВМА серії 02. Встановлюється на гелікоптери: Мі-8МТ/Мі-17, Мі-14, Мі-24/Мі-25/Мі-35, Мі-28, Ка-27/Ка-28, Ка-29, Ка-31, Ка-32, Ка-50, Ка-52, Ка-50-2. Серійне виробництво розпочато у 1972 році [11].

Конструкторське бюро-розробник: ФДУП «Завод імені В.Я. Клімова» (м. Санкт-Петербург). Завод-виробник: ВАТ «Мотор-Січ» (м. Запоріжжя) та ФГУП «Завод імені В.Я. Клімова» (м. Санкт-Петербург).

Розробка турбовального двигуна ТВЗ-117 для гелікоптера Мі-24 розпочалася в ОКБ ім. В.Я. Клімова під керівництвом С.П. Ізотова в 1965 році. Вперше в двигунобудуванні СРСР було вирішено застосувати на двигуні титановий ротор компресора, що зварений з окремих дисків електронно-променевим зварюванням, робочі та напрямні лопатки компресора

з титанового сплаву, які отримані методом холодного вальцювання, малогабаритні контактні графітові ущільнення масляних порожнин. Порівняно з ТВ2-117 новий двигун вийшов потужнішим на 30% при менших габаритах та масі. У 1972 році він пройшов державні випробування. Цього ж року розпочалося його серійне виробництво на Запорізькому заводі «Мотор-Січ» [11÷13].

Турбовальний двигун ТВ3-117 призначений для установки на гелікоптери. Він є одним із найкращих двигунів у світі за економічністю у своєму класі, що досягнуто завдяки високим ККД основних вузлів (ККД компресора дорівнює 86%, ККД турбіни компресора – 91%, ККД вільної турбіни – 96%). Величини питомої витрати палива та питомої маси відповідають найкращим світовим стандартам. Двигун має величезні запаси газодинамічної стійкості. У конструкції двигуна застосовані прогресивні технічні рішення: титановий ротор компресора, зварений із окремих дисків електронно-променевим зварюванням; робочі та напрямні лопатки компресора з титанового сплаву, отримані методом холодного вальцювання; контактні графітові ущільнення масляних порожнин; на новітніх модифікаціях застосовується електронно-гідромеханічна система регулювання та управління та ін. Двигун має великий ресурс, має високу надійність, простоту обслуговування, хорошу ремонтпридатність. Найновіші модифікації сертифіковані.

Розробляються досвідчені модифікації для бойових гелікоптерів майбутнього. Деякі модифікації здобули різні державні премії.

ТВ3-117 один із найнадійніших двигунів у світі. За останні роки не було жодної відмови двигуна у польоті.

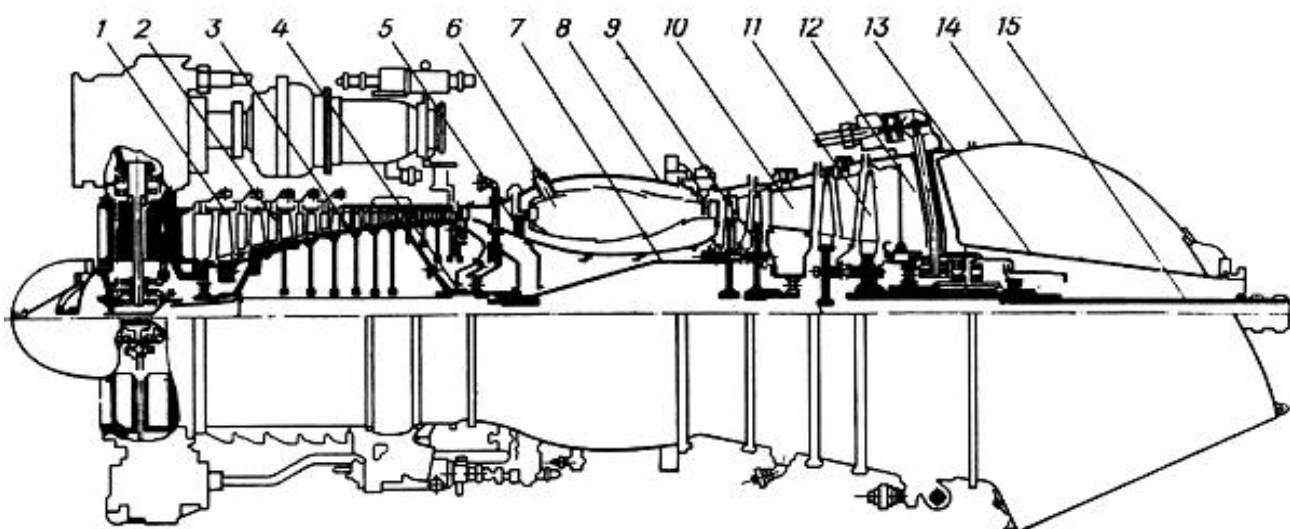
Двигун ТВ3-117 може використовуватися крім вертольотів на різних судах водного транспорту, як привод електрогенераторів і компресорів нафтогазоперекачувальних станцій. У реактивному варіанті (без модуля вільної турбіни) двигун може застосовуватися для сушіння струменем

вихлопних газів приміщень для худоби, будівель, що будуються, здування снігу і льоду на шосейних і залізницях, аеродромах [12].

ТВ3-117 випускається великими серіями у різних модифікаціях. На цей час за наявними даними виготовлено понад 25000 двигунів. Постачався на експорт разом із гелікоптерами до 60 країн світу. У процесі виробництва двигун постійно доопрацьовувався. Внаслідок цього ресурс до першого капремонту вдалося довести до 3000 годин. На окремі модифікації отримано сертифікати типу Індії, Канади, Китаю.

2.2 Опис основних вузлів двигуна

Основними вузлами двигуна є: компресор 1; камера згоряння 8; газові турбіни 9, 11; силовий конус 13; вихідний пристрій 14; вали 7, 15 (рис.2.2).



1 – компресор; 2 – напрямний апарат; 3 – ротор; 4 – опора;
5 – форсунки; 6 – свічка запалювання; 7 – вал; 8 – камера згоряння;
9 – турбіна компресора; 10, 12 – силові стійки; 11 – вільна турбіна; 13 – силовий конус; 14 – вихідний пристрій; 15 – вал вільної турбіни.

Рисунок 2.2 – Схема турбовального двигуна ТВ3-117

Компресор – осьовий, дванадцятиступінчастий, високонапірний, з поворотними лопатками вхідного направляючого апарату (ВНА) та направляючих апаратів (НА) перших чотирьох ступенів, з двома клапанами перепуску повітря через VII ступінь компресора [13].

Поворот лопаток здійснюється автоматично гідромеханізмом паливного насоса-регулятора та нижнім гідромеханізмом з кінцевим вимикачем, залежно від наведеної частоти обертання ротора ТК.

Поворот лопаток покращує запуск двигуна та забезпечує високий ККД та запас газодинамічної стійкості компресора у широкому діапазоні режимів роботи двигуна.

Стійкість роботи компресора в процесі запуску та роботи на знижених режимах забезпечується клапанами перепуску повітря.

Деталі корпусу першої опори і лопатки ВНА при включенні системи протиобліднювальної системи обігриваються гарячим повітрям, що відбирається з камери згоряння.

Камера згоряння – кільцева, із дванадцятьма головками. Усередині камери згоряння змонтований паливний колектор з 12 паливними форсунками.

Вузол газових турбін складається з двох кінематично не пов'язаних між собою турбін: турбіни компресора (ТК) та вільної турбіни (ВТ).

Турбіна компресора – осьова, двоступінчаста, реактивна. Ротор за допомогою спеціального вузла з'єднується з ротором компресора.

Вільна турбіна – також осьова, двоступінчаста, реактивна. Обертальний момент ВТ через ресору головного приводу передається до головного редуктора вертольота.

Для обох газових турбін передбачено систему охолодження соплових лопаток, дисків робочих коліс, хвостовиків робочих лопаток та інших елементів турбін.

Деталі корпусу першої опори і лопатки ВНА при включенні системи протиобліднювальної системи обігриваються гарячим повітрям, що відбирається з камери згоряння.

Вихідний пристрій – нерегульований, що розширюється. Він забезпечує зниження швидкості газового потоку і відведення гарячих газів,

що відпрацювали, під кутом 25° від осі двигуна за межі силової установки вертольота.

Життєдіяльність двигуна на землі та в польоті забезпечують його системи.

Масляна система виконана за відкритою, замкнутою схемою з примусовою циркуляцією масла під тиском. Подача масла з маслобака на змащування і охолодження поверхонь деталей, що труться, здійснюється нагнітаючим насосом маслоагрегату. Відкачування масла, що відпрацювало, проводиться відкачуючими насосами маслоагрегату частково через маслорадіатор і частково безпосередньо в маслобак.

Суфлювання масляних порожнин опор двигуна здійснюється через маслососис відкачування у маслобак, який суфлюється з проточною частиною корпусу дифузора вихідного пристрою [13].

Паливна система та система автоматичного регулювання забезпечують подачу палива в камеру згорання двигуна у суворій відповідності із заданим режимом двигуна, умовами польоту та прийнятою програмою регулювання. При цьому на всіх режимах роботи забезпечується синхронізація потужностей двигунів, а на основних робочих режимах – сталість частоти обертання ротора СТ. У системі передбачені автоматичні обмежувачі максимальної температури газів перед ТК та максимальних частот обертання роторів ТК та СТ, які захищають елементи двигуна від теплових та механічних перевантажень. Паливорегулююча апаратура здійснює також управління елементами механізації компресора.

Пускова система – автономна, автоматична, повітряна. Розкручування ротора ТК у процесі запуску здійснюється повітряним турбостартером СП-78БА, який встановлений на коробці приводів двигуна. Як джерело стисненого повітря для розкручування повітряного турбостартера використовується бортова допоміжна силова установка.

Основними елементами осьового компресора є ротор та статор. Ротор являє собою барабан, що обертається, на якому в кілька рядів закріплені

робочі лопатки. Статор є корпусом з декількома рядами нерухомих лопаток. Один ряд лопаток ротора утворює робоче колесо (РК), а один ряд нерухомих лопаток статора – напрямний апарат (НА). Сукупність РК і наступного його НА називається ступенем осьового компресора.

Ряд нерухомих встановлених лопаток, що розташовані перед першим робочим колесом, називається вхідним напрямним апаратом (ВНА), який є невід'ємною частиною першого ступеня. Усі ступені осьового компресора працюють аналогічно, тому, пояснення принципу роботи компресора загалом досить розглянути принцип роботи одного його ступеня.

Компресор двигуна – дозвуковий, осьовий дванадцятиступінчастий. високонапірний ($\pi_k = 9,45$) з поворотними лопатками ВНА та НА I-й, II-й, III-й та IV-й ступенів та з двома клапанами перепуску повітря через VII-й ступінь компресора в атмосферу. Проточна частина компресора виконана із постійним зовнішнім діаметром. Широке застосування титанових сплавів при виготовленні деталей компресора значно зменшило їх масу при одночасному збереженні міцності. Компресор двигуна складається з наступних основних вузлів: ротора, статора, передньої (першої) та задньої (другої) опор ротора, механізму повороту лопаток, клапанів перепуску повітря та вузла з'єднання ротора компресора з валом ТК.

Ротор компресора – барабанно-дискового типу, двоопорний. Такого типу ротори мають досить високу згинальну жорсткість і міцність, порівняно малою масою і простотою конструкції. Ротор є головним робочим елементом компресора. У процесі роботи двигуна на нього діють: відцентрові сили власних мас та мас робочих лопаток; аеродинамічні сили, що виникають на лопатках робочих коліс; сили тяжіння власної маси; сили інерції, що виникають при еволюціях гелікоптера; крутні моменти; осьові сили; сили від різниці тисків повітря у проточній частині та всередині ротора компресора.

Крім того, на елементи конструкції ротора останніх ступенів, де температури повітря в проточній частині досягають до 350°C впливають і теплові навантаження [12,13].

Робочі лопатки є основними високонавантаженими елементами ротора компресора, саме в лопаткових апаратах робочих коліс відбуваються перетворення механічної енергії, що підводиться від турбіни компресора, в ентальпію і кінетичну енергію повітряного потоку. Лопатки піддаються впливу аеродинамічних та відцентрових сил власних мас, порівняно високих температур та вібрацій. Робочі лопатки виготовляються із прутка титанового сплаву ВТ-8 шляхом прокатки пера лопатки з подальшою механічною обробкою хвостовика. Перо всіх лопаток конструктивно виконано у вигляді вигнутого тонкого симетричного профілю. Для зниження маси, напруги розтягування і навантажень на ротор товщина і хорда профілю по довжині лопатки зменшуються від кореневого перерізу до периферійного. При цьому для отримання найвигідніших кутів атаки по перерізах пера лопатки воно по довжині закручується, при чому чим довша лопатка, тим більший кут закрутки. Перо лопаток виготовляється з великою точністю та з високим класом чистоти поверхні, що підвищує міцність лопаток та ККД компресора.

Хвостовики робочих лопаток I, II та III ступенів виконані у формі «ластівчин хвіст». Вони вставляються в пази ободів дисків із деяким зазором, що дає можливість при роботі двигуна лопаткам самовстановлюватися від дії власних відцентрових сил.

Статор компресора є корпусом, всередині якого встановлені лопатки направляючих апаратів і опори ротора разом з ротором, а зовні – різні агрегати, механізми, пристрої та комунікації систем, що забезпечують життєдіяльність двигуна.

Корпус компресора є одним із основних вузлів силової системи двигуна. За конструктивним виконанням він належить до роз'ємних корпусів, який має тільки поперечні роз'єми. Такі корпуси відрізняються високою технологічністю виготовлення та збирання, рівномірною

жорсткістю по колу, що забезпечує мінімальні радіальні зазори у проточній частині компресора, а значить, підвищує його ККД. У процесі роботи двигуна на елементи конструкції статора діють: аеродинамічні сили, що виникають на лопатках НА; сили тяжіння власних мас та сили, що передані від сусідніх вузлів двигуна; сили інерції та його моменти, що виникають при еволюціях гелікоптера; осьові сили та крутні моменти, що передаються від інших вузлів двигуна; різниця тисків повітря в проточній частині компресора та у навколишньому середовищі. Крім того, окремі елементи корпусу компресора схильні до впливу порівняно високих температур. Тому корпус компресора поряд з великою міцністю повинен мати високу згинальну жорсткість і віброміцність. Це досягається використанням для виготовлення деталей високолегованих сталей та високоміцних титанових сплавів, застосуванням двостінкової конструкції корпусу НА V÷XI-х ступенів, жорстким закладенням лопаток направляючого та вихідного спрямного апаратів у корпусі XII-го ступеня.

Передня (перша) опора ротора компресора

Перша опора ротора компресора є радіально-опорним роликовим підшипником, що сприймає тільки радіальні навантаження від маси ротора і неврівноважених мас. Вона є сполучною ланкою між силовою системою ротора ТК та силовою системою корпусу двигуна. Опора допускає вільне осьове переміщення ротора щодо корпусу, що виникає внаслідок температурних розширень та впливу осьових сил. Вузол першої опори умовно можна розділити на нерухомі (необертові) деталі, встановлені і закріплені в корпусі і деталі, що обертаються, які монтується на передній цапфі диска РК II-го ступеня компресора.

Задня (друга) опора ротора компресора

Друга опора ротора компресора являє собою опорно-упорний кульковий підшипник, що сприймає як радіальні навантаження від маси ротора і неврівноважених мас, так і осьові від осьових складових аеродинамічних сил, що діють на робочі лопатки ротора, а також від різниці

тиску повітря на роторі. Опора високонавантажена. Також як і перша опора вона включає в себе нерухомі деталі та деталі, що обертаються.

Камера згоряння

Камера згоряння – це пристрій, в якому в результаті згоряння палива здійснюється підвищення температури повітря, що надходить до нього. Камера згоряння належить до основних елементів газотурбінного двигуна. Від досконалості організації процесу згоряння у ній залежать потужність і економічність двигуна, його прийомистість, висотність та ряд інших важливих показників. Камера згоряння працює в надзвичайно важких умовах, тому що в процесі роботи двигуна на елементи її конструкції діють високі температури та тиски, інерційні сили, сили маси та моменти, що передаються від інших вузлів двигуна. У зв'язку з цим, до камер згоряння висуваються дуже жорсткі вимоги. Для вертолітних ГТД з малими витратами повітря широко застосовуються прямоточні, кільцеві камери згоряння з подачею палива через робочі форсунки в рідкій фазі (у дрібнорозпиленому вигляді) за потоком повітря. Основними елементами такої камери згоряння є: зовнішній та внутрішній корпуси дифузора, жарова труба, паливний колектор із дванадцятьма робочими форсунками та дві запальні свічки. Такого типу камери згоряння надійні та безвідмовні у роботі, що багато в чому визначає безпеку польотів [13].

Конструкція камери згоряння

Камера згоряння двигуна прямоточна кільцева з дванадцятьма робочими паливними форсунками.

Вона складається з наступних основних елементів: зовнішнього та внутрішнього корпусів дифузора, що утворюють проточну частину камери згоряння; жарової труби; паливного колектора з робочими паливними форсунками та двох запальних свічок.

Зовнішній корпус дифузора зварної конструкції з титанових сплавів і є спеціально спрофільованою обічайкою з привареними до неї фланцями.

Внутрішній корпус дифузора відлитий з алюмінієвого сплаву у вигляді труби з профільованою стінкою в передній частині та розтрубом у задній частині та двох фланців. Переднім фланцем внутрішній корпус дифузора кріпиться до фланця внутрішнього кільця корпусу НА і СА XII-го ступеня компресора, а заднім – до фланця внутрішньої обойми корпусу СА I-го ступеня турбіни компресора.

Внутрішній корпус дифузора своєю передньою профільованою стінкою спільно з передньою частиною обичайки зовнішнього корпусу дифузора утворюють кільцевий дифузор, де осьова швидкість повітряного потоку знижується і на вході в жарову трубу досягає оптимального значення, що сприяє організації більш ефективного спалювання палива в ній.

Дифузор спрофільований згідно із законом постійного поздовжнього градієнта тиску. Профіль дифузора та стан його поверхонь насамперед визначають характер поля швидкостей та тисків перед жаровою трубою, а в кінцевому рахунку впливають на рівномірність полів швидкостей, тисків та температур перед турбіною компресора (ТК).

Для підвищення поперечної жорсткості та стійкості внутрішнього корпусу дифузора всередині до нього приварені точковим зварюванням кільцеві ребра жорсткості (бандажі).

Центрівка внутрішнього корпусу дифузора за відповідними деталями корпусів компресора і ТК здійснюється за допомогою буртиків та розточень, а герметичність забезпечується мастилом площин роз'єму спеціальною мастикою.

Жарова труба є основною частиною камери згоряння. Саме в ній організується процес згоряння паливоповітряної суміші. Вона працює у надзвичайно важких температурних умовах, які залежно від режимів роботи двигуна можуть викликати величезні за величиною термічні напруги у стінках жарової труби. Термічна напруга залежить від нерівномірності нагрівання стінок жарової труби газовим потоком,

нерівномірності його температурного поля, прийнятих конструктивних форм та способів охолодження стінок жарової труби.

Надійність і робота забезпечуються раціональним конструюванням з урахуванням досягнень вітчизняного та зарубіжного двигунобудування та подальшим доведенням на спеціальних стендах або безпосередньо на двигунах.

Жарова труба кільцевого типу і являє собою зварний вузол, який виготовлений з листової жароміцної сталі ХН38ВТВД товщиною 0,8...1,0 мм. Вона складається із зовнішнього та внутрішнього обтічників, дванадцяти головок із завихрювачами та зовнішньої і внутрішньої секцій змішувача, зовнішньої та внутрішньої опорних секцій. Зовнішній обтічник виконаний штампуванням з утвореними попереду горловинами під головки внутрішнього обтічника. На зовнішній поверхні проти головок приварено дев'ять бобишок з отворами, куди встановлюються підвіски жарової труби, та виконано два отвори під свічки запалювання. На зовнішній та внутрішній стінках зовнішнього обтічника виконані отвори для проходу повітря у зону горіння. Між головками та внутрішнім обтічником утворені щілини для проходу охолодженого повітря. У головках виконані отвори для проходу повітря у зону горіння [13].

Завихрювач являє собою пристрій, який забезпечує закрутку та турбулізацію повітря на вході в жарову трубу, знижуючи осьову швидкість повітряного потоку в зоні горіння і створюючи найкращі умови перемішування палива з повітрям, нагрівання, випаровування та займання суміші шляхом утворення зон зворотних струмів.

Він складається з лопаток, які відштамповані з листового матеріалу та приварені до зовнішнього кільця та внутрішньої втулки. У втулці завихрювача встановлено два кільця: плаваюче та стопорне. Рухливість плаваючого кільця в радіальному напрямку дозволяє жаровій трубі вільно деформуватися в цьому напрямку при її нагріванні. На внутрішній поверхні плаваюче кільце має поздовжні пази для проходу повітря на обдування

робочої форсунки та видалення з неї нагару. Для цієї ж мети на задньому торці втулки завихрювача виконано два ряди отворів. З'єднання зовнішнього обтічника із зовнішньою та внутрішньою секціями змішувача здійснюється точковим зварюванням внахлестку через гофровані кільця. Повітря, що проходить через щілини в гофрованих кільцях, на виході всередині жарової труби змішується в єдину кільцеву повітряну плівку зі зниженою температурою, яка ізолює порожнину жарової труби від її стінок, та забезпечує її нормальну роботу.

Газова турбіна є лопатковою машиною, в якій відбувається відбір енергії від стисненого і нагрітого газу і перетворення її в механічну енергію обертання ротора. Газова турбіна є одним із високонавантажених вузлів двигуна. Елементи її конструкції піддаються впливу високих температур, які змінюються у досить широких межах залежно від режимів роботи двигуна та від нерівномірності температурних полів. Там діють значні газові сили, зумовлені великими перепадами тисків у ступені турбіни. На лопатки та диски робочого колеса діють відцентрові сили, величина яких досягає величезних значень. Крім того, елементи конструкцій газових турбін зазнають значних вібраційних навантажень, а поверхні деталей, розташованих у проточній частині, схильні до окислення і газової корозії.

Двигун має дві кінематично не пов'язані між собою турбіни: турбіну компресора та вільну турбіну. Кожна з них є осьовою, реактивною, двоступінчастою турбіною.

Основними елементами осьової газової турбіни є ротор та статор.

Ротор – це частина турбіни, що обертається, та складається з робочих лопаток, диска, валу і підшипника. Ряд робочих лопаток, які закріплені на диску, що обертається, утворюють робоче колесо.

Статор – це нерухома частина турбіни, що включає соплові лопатки, зовнішній та внутрішній ободи та корпус опори. Ряд нерухомих соплових лопаток, закріплених (або встановлених) у зовнішньому та внутрішньому ободі статора утворюють сопловий апарат (СА).

Сукупність СА та наступного за ним РК називається ступенем турбіни. За принципом дії осьові газові турбіни можуть бути активними та реактивними. В активній газовій турбіні весь наявний теплоперепад спрацьовує в СА, а в реактивній – наявний теплоперепад спрацьовує як в СА, так і в РК. Розподіл теплоперепадів, що спрацьовується в ступені турбіни, між РК та СА оцінюється ступенем реактивності ступеня турбіни.

Конструкція турбіни компресора

Турбіна компресора забезпечує привід ротора компресора та агрегатів. Вона складається з ротора, СА I-го та II-го ступенів, опори ротора.

Деталі турбіни компресора схильні до впливу високих температур потоку газу та великих механічних навантажень. Найбільш теплонапруженими є соплові та робочі лопатки турбіни, а також диски РК. Тривалий вплив механічних навантажень (відцентрових та аеродинамічних сил) в умовах високої температури викликає пластичні деформації металу при напругах, значно менших меж текучості. З іншого боку, в цих умовах метал руйнується при напрузі, значно меншій межі міцності, причому зі збільшенням часу прикладання навантаження руйнівна напруга зменшується.

Таким чином, при високій температурі міцність металу залежить не тільки від величини механічних навантажень, а й від тривалості їхнього впливу. Поряд із цим надійність і міцність деталей турбіни більшою мірою залежать від числа циклів навантаження та теплосмін, що пов'язані із запусками, зупинками та змінами режимів роботи двигуна. Це робить завдання забезпечення високої надійності турбіни особливо складним. Ось чому більшість деталей турбіни компресора виконано зі спеціальних жароміцних сталей та сплавів. Полегшення умов роботи та підвищення працездатності турбіни сприяє охолодженню більшості її деталей повітрям.

Ротор турбіни компресора

Ротор ТК встановлений на двох опорах. Передньою його опорою служить задня цапфа ротора компресора, на якій змонтований радіально-

упорний кульковий підшипник другої опори двигуна; задньою опорою – радіально-опорний роликпідшипник третьої опори двигуна, яка розташована за ротором ТК.

Таке розташування опор робить ротор ТК жорсткішим і дозволяє зменшити зазори між гребінцями зовнішніх полиць робочих лопаток і металокерамічними ущільнювачами обойм соплових апаратів ТК, що, зрештою, підвищує ККД турбіни компресора.

Робочі лопатки турбіни відносяться до найвідповідальніших деталей двигуна. У їх міжлопаткових каналах відбувається перетворення кінетичної енергії та ентальпії газового потоку на механічну енергію обертання ротора ТК. Вони працюють в умовах дуже високих температур і тисків, відчувають великі відцентрові, вібраційні та температурні напруження. Враховуючи надзвичайно важкі умови роботи лопаток та їх роль у двигуні, до конструктивних форм лопаток, способу їх кріплення у дисках, матеріалах та технології виготовлення пред'являються особливо жорсткі вимоги.

Робочі лопатки виготовляються прецизійним литтям із жароміцного металу ЖС-6К. Вони мають перо (профільну частину) зовнішню та внутрішню полиці та хвостовик типу «ялинка» з подовженою ніжкою. Перо в кожному перерізі вздовж лопатки має свій певний профіль. Перо має закрутку вздовж лопатки, що забезпечує плавне обтікання лопаток та радіальну рівновагу газового потоку вздовж лопатки. Перо лопатки плавно переходить у полиці. Зовнішні та внутрішні полиці після установки лопаток у диск РК утворюють зовнішню та внутрішню стінки, що обмежують проточну частину турбіни. Внутрішня полиця лопатки плавно переходить у хвостовик із подовженою ніжкою. На хвостовику виконані дві пари зубів замку типу «ялинка» та виступ, що обмежує осьове переміщення лопатки в диску РК. Зовнішні полиці стикуються між собою за допомогою зигзагоподібних вирізів із зазорами по колу і натягом в осьовому напрямку, утворюючи кільцевий бандаж, що підвищує вібростійкість вінця. На зовнішній поверхні бандажних полиць виконані

гребінці, які з металокерамічними покриттями обойм соплових апаратів утворюють лабіринтні ущільнення проточної частини турбіни за зовнішнім контуром, що сприяє підвищенню ККД турбіни.

Кріплення робочих лопаток в дисках РК аналогічно і здійснюється: в радіальному та окружному напрямках за допомогою замків типу «ялинка», що мають по дві пари зубів; в осьовому напрямку – обмежувальними виступами хвостовиків лопаток і передні дефлектори, що обертаються.

Диски робочих коліс служать для розміщення на них робочих лопаток і передачі на вал ТК крутного моменту і осьових сил, що створюються в лопаткових апаратах під час роботи двигуна.

Диск навантажується великими зусиллями, що розтягують, від відцентрових сил мас самого диска і розміщених на ньому робочих лопаток і згинальними моментами від різниці тисків газу перед РК і за ним. У диску також виникають динамічні напруги, викликані коливаннями, і значні температурні напруги, зумовлені нерівномірністю його нагрівання по радіусу.

Диски РК виготовлені з високолегованого жароміцного сплаву ХН73МВТЮВС із подальшою механічною обробкою.

Диск РК I-го ступеня ТК має обід, полотно та маточину. На обід рівномірно по колу під деяким кутом до осі виконані пази типу «ялинка» для монтажу робочих лопаток. Обід плавно перетворюється на тонке полотно. На полотні з обох боків виконано по два циліндричні пояси з торцевими радіальними шліцами для з'єднання диска з валом та з диском РК II-го ступеня [12,13].

На передніх циліндричних поясах виконані наскрізні радіальні отвори для проходу охолоджуючого повітря. Між циліндричними поясами просвердлено дванадцять отворів під стяжні болти. На зовнішні циліндричні пояси встановлюються і центруються по їх зовнішнім поверхням і торцевим розточуванням полотна: спереду – передній дефлектор, що обертається, і ззаду – задній обертовий дефлектор.

Статор турбіни компресора

Сопловий апарат I-го ступеня ТК служить для розгону газового потоку та підведення його під певним кутом до робочих лопаток. Соплові лопатки виконані з жароміцного сплаву ЖС-6К методом прецизійного лиття. Вони мають у кожному перерізі свій профіль, хорди, що збільшуються, від кореня до периферії та закрутки, що забезпечує радіальну рівновагу газового потоку в сопловому апараті (СА). Соплові лопатки – порожні, охолодні. Вони встановлюються у профільовані гнізда зовнішньої та внутрішньої обойми з деяким зазором, що забезпечує свободу їх температурних деформацій. У торці соплових лопаток встановлюються перехідні втулки, які фіксують лопатки і через які проходить повітря, що охолоджує [13].

Зовнішня обойма 7-го СА I-го ступеня ТК виготовлена з жароміцного сплаву та призначена для монтажу соплових лопаток та обмеження проточної частини турбіни за зовнішнім контуром. Вона є кільцем із зовнішнім корончатим фланцем. У стінці зовнішньої обойми виконані шістдесят три профільовані прорізи для монтажу соплових лопаток та чотирнадцять отворів для проходу датчиків термопар. Отвори та розташовані проти них профільовані прорізи з'єднані між собою температурними швами, що виключають мимовільне утворення тріщин на цих ділянках.

Задня опора ротора турбіни компресора (третя опора двигуна)

Третя опора двигуна є роликовим підшипником, що сприймає тільки радіальні навантаження від маси ротора і невривноважених мас. Вона розміщується в корпусі СА I-го ступеня СТ і складається з обертових і нерухомих деталей. Деталі, що обертаються, монтуються на цапфу диска РК II-го ступеня ТК.

Охолодження турбіни компресора

У двигунах-прототипах ТВЗ-117 всіх модифікацій для охолодження деталей газових турбін передбачені повітряні системи. Система охолодження газової турбіни служить для зниження робочих температур гарячих деталей турбіни з метою збільшення запасів міцності і надійності їх роботи.

Необхідний рівень робочих температур гарячих деталей турбін забезпечується шляхом надійної ізоляції цих деталей від прямого впливу на них гарячих газів і відбору частини тепла від цих деталей менш нагрітим повітрям, що надходить для їх охолодження.

Для охолодження деталей ТК використовується вторинне повітря із камери згоряння двигуна. Охолоджуються деталі ротора і статора.

Конструкція вільної турбіни

Вільна турбіна (ВТ) – осьова двоступінчаста реактивна. Вона служить для створення потужності, необхідної для приводу несучого і рульового гвинтів і агрегатів. ВТ складається з ротора, соплових апаратів I-го та II-го ступенів, передньої (четвертої) і задньої (п'ятої) опор. Умови роботи та конструкція багатьох деталей ВТ аналогічні умовам роботи та конструкції відповідних деталей ТК. Деталі ВТ, як і деталі ТК, працюють в умовах високих температур та тисків та в агресивному середовищі газового потоку.

Однак температура і тиск газового потоку в ВТ значно нижчі за їх значення в ТК, що, безумовно, полегшує умови роботи соплових та робочих лопаток, дисків РК та інших деталей ВТ. Крім того використання для охолодження деталей турбіни повітря з-за VII-го ступеня компресора, тобто, повітря, що має нижчу температуру в порівнянні зі змішувальним повітрям, сприяє помітному зниженню температури деталей, що охолоджуються, а значить і температурних напруг в них. Зменшення теплоперепаду, що спрацьовується у вільній турбіні, дозволило зменшити окружну швидкість та частоту обертання ротора. Це призвело до значного зменшення напруги, що виникає у робочих лопатках та в дисках РК від дії відцентрових сил. Таким чином, деталі турбіни працюють у полегшених умовах, що сприяє підвищенню запасів міцності та надійності їхньої роботи [13].

Ротор вільної турбіни

Ротор ВТ двоопорний, консольний із заднім розташуванням опор. Недоліком консольного кріплення ротора є менша жорсткість, що вимагає збільшення абсолютних зазорів між торцями робочих лопаток і корпусом.

Однак, збільшення абсолютного зазору не погіршує ККД вільної турбіни, так як ККД залежить від відносного зазору, який є відношенням абсолютного зазору до довжини лопатки (в мм).

Крім того, розташування обох підшипників опор вільної турбіни в зоні нижчих температур покращує умови роботи підшипників та інших деталей опор, спрощує підведення та відведення масла, не вимагає додаткового охолодження опор повітрям.

Робочі лопатки конструктивно виконані аналогічно до робочих лопаток ТК і відрізняються тільки геометричними розмірами. Вони виготовляються штампуванням із жароміцного сплаву на нікелевій основі. Кріплення робочих лопаток у дисках робочих коліс здійснюється за допомогою двозубого з'єднання типу "ялинка". Від осьових переміщень робочі лопатки фіксуються розрізними кільцями, які вводяться в кільцеві канавки обода дисків, хвостовиків і внутрішніх полиць робочих лопаток. Стопорні кільця, своєю чергою, фіксуються вставками зі штифтами. Зовнішні та внутрішні полиці, після встановлення лопаток у диски РК, утворюють зовнішню та внутрішню стінки проточної частини ВТ. Зовнішні полиці стикаються між собою за допомогою зигзагоподібних вирізів із зазорами по колу та з натягом в осьовому напрямку.

При роботі двигуна внаслідок розвороту пера лопаток під дією відцентрових сил між зовнішніми полицями робочих лопаток з'являється натяг в осьовому напрямку. При цьому зовнішні полиці утворюють кільцевий бандаж, що підвищує вібростійкість лопаткового вінця.

Статор вільної турбіни

Статор ВТ складається: з соплового апарату I-го ступеня, соплового апарату II-го ступеня та корпусу дифузора вихідного пристрою.

Корпус – зварної конструкції з титанового сплаву ВТ-20 і являє собою обичайку з двома фланцями. Переднім фланцем він кріпиться до корпусу ТК, а до його заднього фланця кріпиться корпус СА II-го ступеня ВТ. В окружному напрямі обидва фіксуються штифтами.

Опори ротора вільної турбіни

Ротор ВТ встановлений на двох опорах. Передньою опорою ротора є опорно-упорний кульковий підшипник, а задньою – опорний роликпідшипник.

Передня опора ротора ВТ (четверта опора двигуна), будучи сполучним елементом між ротором і статором, сприймає як радіальні навантаження від маси ротора і неврівноважених мас, так і осьові, що створюються на роторі ВТ при її роботі. Четверта опора фіксує ротор ВТ щодо корпусів у осьовому напрямку. Опора встановлюється в порожнині внутрішньої силової втулки корпусу дифузора вихідного пристрою і складається з нерухомих деталей, прикріплених до фланця цієї втулки [13].

Вихідний пристрій

Вихідний пристрій призначений для відведення газів, що відпрацювали в турбінах, за межі силової установки з мінімальними гідравлічними втратами. Він виконаний у вигляді дозвукового дифузора, що розширюється, де швидкість потоку газу знижується зі $C_T = 154$ м/с до $C_{ВП} = 52$ м/с, а тиск відповідно зростає. При цьому газовий потік відводиться убік на 25° від осі двигуна так, щоб унеможливити попадання гарячих газів на елементи конструкції вертольота [14].

Вихідний пристрій (ВП) складається з корпусу дифузора, вихлопного патрубка та сполучного хомута.

Корпус дифузора ВП зварної конструкції з титанового сплаву і має зовнішню обичайку та внутрішню силову втулку, які з'єднані між собою шістьма порожніми стійками.

Охолодження деталей вихідного пристрою

Охолодження деталей вихідного пристрою здійснюється двома шляхами: охолодним повітрям з-за VII-го ступеня компресора, що надходить з корпусу СА II-го ступеня ВТ і повітрям з навколишнього середовища.

Висновки до розділу 2

В якості висновків слід віднести наступне:

1. На основі аналізу особливостей конструкції та експлуатації експлуатованих двигунів як об'єкт діагностування обраний турбовальний газотурбінний двигун.
2. Представлено функціональну схему двигуна, його основні характеристики, переваги, історію створення двигуна.
3. Наведено докладний опис конструкції основних вузлів двигуна

РОЗДІЛ 3

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

3.1 Моніторинг наявної потужності газотурбінного двигуна

В умовах швидкого старіння парку авіаційної техніки України одним із шляхів підвищення економічності й надійності її експлуатації при обмеженості фінансових ресурсів та інвестицій є перехід від традиційної системи експлуатації на нову ресурсозберігаючу та більш економічну експлуатацію за «фактичним станом» [14÷16].

Можливість такого переходу, в першу чергу, спирається на ефективні методи діагностування та удосконалення контролю технічного стану газотурбінних двигунів для визначення діагностичних характеристик і параметрів їх фактичного функціонально-технічного стану за даними штатних засобів вимірів.

При вирішенні цієї проблеми чільне місце займає питання підвищення ефективності процесу розпізнавання поточного технічного стану (ТС) газотурбінних двигунів та прогнозування перспектив зміни у часі параметрів, що характеризують цей стан. Використання методів моніторингу ТС техніки дозволяє максимально використовувати ресурсні можливості техніки та мінімізувати експлуатаційні витрати [14,15]. При цьому є можливість сформулювати керуючі впливи на ГТД з метою недосягнення перевищення значень характеристик двигуна за встановлені межі.

Одним із істотних таких резервів зв'язаний, на нашу думку, з контролем потужності вільної (силової) турбіни (ВТ) газотурбінного двигуна.

Значення потужності, яку має силова турбіна (вільна турбіна) на стандартних контрольних режимах роботи двигуна, є дуже важливими показниками поточного стану ГТД, які показують стан всіх елементів проточної частини (ПЧ) та інтегральну зміну їхніх характеристик, що безпосередньо і визначає фактичний ТС і потужність ГТД. На прикладі виміру та контролю вказаних критеріїв можливо удосконалити контроль

технічного стану ГТД та збільшити ефективність управління в умовах експлуатації [15,16].

Вирішення завдання контролю потужності ВТ ГТД може бути засновано на основі виміру частоти обертання її ротора або крутного моменту, що ним розвинутий, або групи показників потоку робочого тіла в проточній частині газотурбінного двигуна.

Перший підхід пов'язаний із труднощами створення достатньо точної і надійної системи вимірювання крутного моменту, яка була б ще і доступною за вартістю та мала прийнятні габаритно-масові характеристики. На даний час є два типи систем вимірювання крутного моменту:

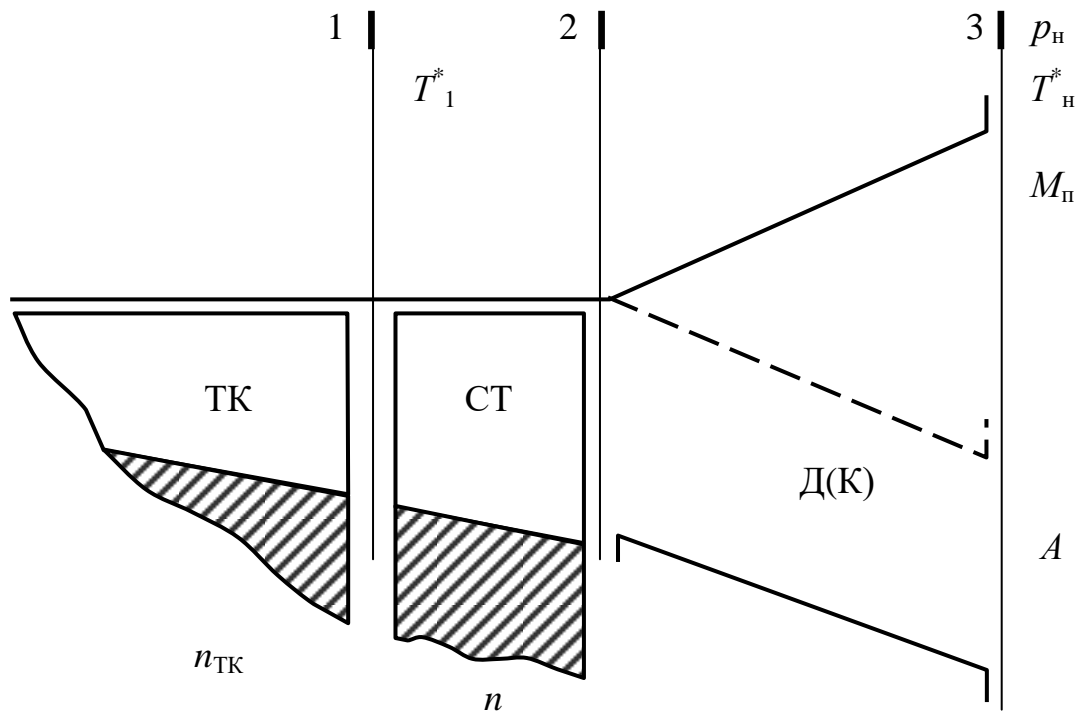
- засновані на зважуванні корпусу переборів редуктора або нерухомого зубчастого колеса його планетарної передачі;
- засновані на визначенні величини пружної деформації спеціальної ділянки вала.

До першого типу відносяться такі системи, що встановлені на деяких турбогвинтових двигунах, а саме гідромеханічні вимірювачі крутного моменту (ВКМ). Вони мають декілька недоліків: складність, обмежена придатність, а також малі метрологічні показники. Другий тип систем застосовується практично тільки в лабораторній практиці, тому що не забезпечує достатню надійність вимірювань, а також прийнятну точність.

Більш прийнятним для використання є підхід до контролю потужності ВТ, а ще й в умовах експлуатації ГТД, в основі якого покладено вимірювання частоти обертання ротора n та групи показників потоку робочого тіла в ПЧ газотурбінного двигуна [16].

Для реалізації вище зазначеного підходу необхідно, на наш погляд, ввести припущення про незмінність під час експлуатації двигуна характеристики власне вільної турбіни і включити до переліку вимірюваних параметрів потоку ще два параметри: температуру гальмування T_1^* і тиск P_1 в контрольному поперечному перерізі l ПЧ, що розташований попереду вільної турбіни. Порядок визначення потужності вільної турбіни на основі

вимірних значень n , T_1^* , P_1 також може бути заснований при розрахунку одновимірного потоку в ПЧ двигуна в околиці ВТ (рис.3.1) з урахуванням її характеристики, а також характеристики вихідного пристрою.



Д (К) – діфузор (конфузор) вихідного пристрою; А – атмосфера;
 СТ – силова (вільна) турбіна; 1 – контрольний поперечний переріз проточної частини двигуна перед силовою турбіною; 2 – поперечний переріз ПЧ за СТ;
 3 – поперечний переріз на зрізі сопла

Рисунок 3.1 – Схема проточної частини газотурбінного двигуна в околиці вільної турбіни

Запропоновано наступну процедуру контролю потужності двигуна:

1. Визначається контрольний режим роботи двигуна за формулою:

$$n_{TKnp} = n_{TK} \sqrt{T_{MCA} / T_H^*} \approx n_{TKnp}^0,$$

де n_{TK} – частота обертання ротора турбіни компресору;

T_H^* – температура гальмування атмосферного повітря;

T_{MCA} – температура міжнародної стандартної атмосфери (МСА) на рівні моря;

n_{TKnp}^0 – відповідне розглянутому контрольному режиму наведене значення n_{TK} , а також, при необхідності, іншим незалежним критеріальним режимним параметрам, за якими відстежуються, наприклад, значення відборів від двигуна механічної енергії на привод агрегатів.

2. Визначаються параметри n , T_1^* , P_1 , P_H (тиск атмосферного повітря).

3. Розраховуються величини за формулами:

$$n_{np} = n \sqrt{T_{MCA} / T_1^*},$$

$$T_{1np}^* = T_1^* T_{MCA} / T_H^*,$$

$$P_{1np} = P_1 P_{MCA} / P_H,$$

де P_{MCA} – тиск МСА на рівні моря.

4. Розраховується приведена потужність силової турбіни на даному контрольному режимі роботи двигуна за формулою:

$$N_{np} = B \sqrt{T_{1np}^*}$$

де B – величина, яка залежить від значень P_{1np} і n_{np} за номограмою, що отримана на основі результатів розрахунку одномірної течії в ПЧ двигуна в околиці вільної турбіни.

5. Визначається шукана потужність силової турбіни на стандартному контрольному режимі роботи двигуна:

$$N^0 = N_{np} \frac{P_H^0}{P_{MCA}^0} \sqrt{\frac{T_H^{*0}}{T_{MCA}^0}},$$

де P_H^0 , и T_H^{*0} – значення P_H та T_H^* , які відповідні стандартному контрольному режиму:

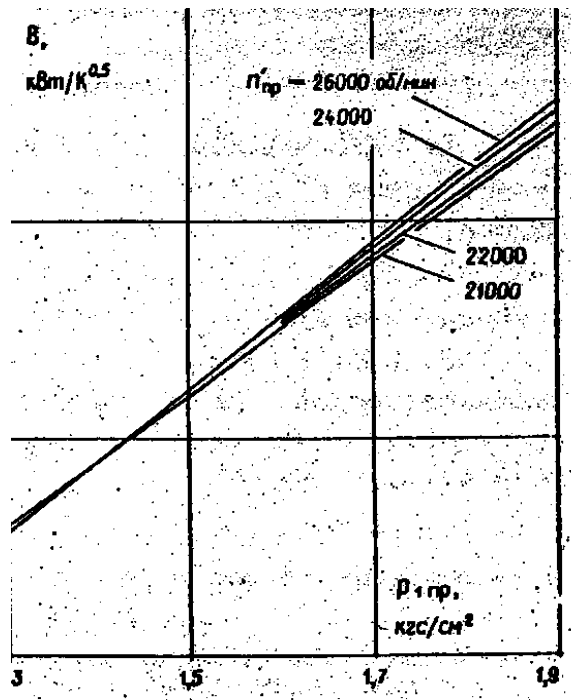


Рисунок 3.2 – Номограма залежності $B(P_{1гр}, n_{гр})$ для двигуна з силовою турбіною

Залежність $B(P_{1гр}, n_{гр})$, що наведена у даній процедурі, є універсальною в тому сенсі, тому що забезпечує контроль потужності вільної турбіни ГТД на кожному з його стандартних контрольних режимів.

Була отримана така залежність для середньостатистичного турбовального двигуна, що має осьову двоступінчасту ВТ і дифузорний вихідний пристрій. Вона представлена на рис.3.2 і базується на результатах розрахунку одновимірного потоку продуктів згоряння авіаційного гасу як досконалого газу в проточній частині ВТ і вихідного пристрою двигуна.

Розрахунок проходив з використанням табличної характеристики силової турбіни, що задана, у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} G\sqrt{T_1^*} / P_1^* &= f_1(\pi^*, n_{гр}) \\ \eta^* &= f_2(\pi^*, n_{гр}) \end{aligned} \right\}$$

де G – витрата робочого тіла;

P_1^* – тиск гальмування в перерізі l ;

$$\pi^* = P_1^* / P_2;$$

де P_2 – тиск в перерізі 2;

$$\eta^* = (T_1^* - T_2^*) / (T_1^* - T_{2uz}^*);$$

T_2^* – температура гальмування в перерізі при ізоентропійному розширенні в СТ.

Закручування потоку за ВТ не бралось до уваги. Рівень втрат тиску гальмування у вихідному пристрої знаходився за формулою:

$$P_2^* - P_3^* = 4\lambda_3^2 (P_3^* - P_H),$$

де λ_3 – приведена швидкість в перерізі 3.

Під час використання даного методу контролю потужності вільної турбіни двигуна можна вести облік похибки, яка пов'язана з неточністю встановлення контрольного режиму роботи в момент вимірювань. Також, слід зазначити, що вимірювання може відбуватися з урахуванням індивідуальних властивостей кожного екземпляру двигуна, що діагностується, з використанням залежності, яка отримана на основі характеристики силової турбіни, що в свою чергу, ідентифікована за даними спеціальних випробувань [14÷17].

В основі запропонованого методу контролю лежить вимірювання величин T_1^* та P_1 , яке можна проводити на двигуні, що експлуатується, з високою точністю за допомогою простих і надійних засобів. Оскільки нерівномірність поля тиску в перерізі двигуна перед вільною турбіною мала, тоді параметр допустимо вимірювати за допомогою, наприклад, дренавання його корпусу в декількох точках і осереднення сигналів, що будуть отримані. Поле температури гальмування в перерізі перед ВТ може мати істотну нерівномірність, тому в якості аналога параметра T_1^* можна рекомендувати використання деяким чином осереднених сигналів декількох введених в потік і розосереджених по перерізу в окружному напрямку термопар або гребінок термопар з протоками [16,17].

Даний метод придатний, на нашу думку, для реалізації не тільки на двигунах, що проектуються, але і на деяких двигунах в експлуатації, після проведення їх незначної доробки.

3.2 Вимірювання крутного моменту

Важливим питанням у машинобудуванні та транспорті, і зокрема у авіації, є вимір і реєстрація крутного моменту на валах, що обертаються. Серед різних способів визначення крутного моменту особливий інтерес представляє тензометричний метод.

Сутність методу полягає в тому, що на досліджувану деталь (карданний, приводний вал, тощо) прикріплюються спеціальні чутливі елементи – тензорезистори. При обертанні вал скручується під дією навантажувального моменту, який пропорційно змінює опір тензорезисторів, що в підсумку і реєструється за електричним сигналом на виході з датчика крутного моменту. Найважливіша перевага методу – можливість наклепки тензодатчиків практично на будь-який вал без додаткового його доопрацювання. Існують два типи струмознімних засобів, які використовуються для передачі сигналу з вала, що обертається: контактні і безконтактні. Контактні пристрої мають низьку надійність і перешкодозахищеність, безконтактні пристрої таких недоліків не мають.

Для більш ефективного метрологічного контролю параметрів обертання валів необхідно постійно і наполегливо підвищувати ефективність обчислювально-керуючих систем в цілому. Одним з головних параметрів, що потребують постійного контролю, є крутний момент (КМ), за допомогою якого оцінюються основні показники (потужність двигунів, коефіцієнт корисної дії (ККД), динаміка навантажувальних характеристик і т.п.) [17÷19].

Існує велика кількість різноманітних методів та засобів для визначення КМ, які характеризуються різним ступенем складності, метрологічними показниками, областю застосування і т. п. За існуючої вимоги постійного підвищення якості вимірювання КМ необхідно покращувати точнісні характеристики датчиків КМ і вимірювальних перетворювачів, які входять до їх складу, треба підвищувати завадостійкість (зокрема, постійно вирішувати проблеми електромагнітної сумісності), прагнути зменшити масові та габаритні показники, при цьому вимога надійності при роботі в

несприятливих умовах повинна бути найважливішою. Виконання перелічених вимог при існуючих методах вимірювання пов'язано з великими витратами і веде до значного ускладнення конструкції датчиків КМ.

Сучасний етап розвитку датчиків КМ ґрунтується на використанні нових (для даної області вимірювань) методів, що мають значний потенціал. Особливе місце серед них займають методи, засновані на застосуванні елементів оптоволоконної техніки, що дозволяє помітно підвищити метрологічні характеристики датчиків КМ, підвищити їх завадостійкість, розширити область застосування, знизити вимоги, пов'язані з умовами експлуатації, спростити конструкцію і зменшити витрати, пов'язані з їх виготовленням.

Не менш важливе місце займає використання цифрових методів для вимірювання крутного моменту. Враховуючи те, що в даний час великого поширення набули інтегровані системи збору та обробки інформації, які об'єднують всі датчики обчислювально-керуючого комплексу в єдину вимірювальну мережу на основі високопродуктивних мікропроцесорів, цифрові методи вимірювання КМ є найбільш переважними.

Таким чином, застосування комплексного рішення, яке засноване на синтезі датчиків КМ, що використовують оптоволоконні і цифрові методи вимірювань може помітно підвищити метрологічні, експлуатаційні та інші характеристики датчиків КМ [18].

Основна відмінність засобів вимірювання крутного моменту (ЗВКМ), що базуються на торсіометричному методі вимірювання полягає в способі передачі інформації про КМ з обертового вала, а саме, інформації про кут скручування вала.

Існуючі методи вимірювання поділяються на дві групи: аналогові і цифрові. Аналогові методи – це використання аналогового перетворення кута скручування в електромагнітні коливання всіляких розмірів довжин хвиль. До цифрових методів відносяться такі, що використані на вибудовуванні кодових перетворювачів кута (КПК). КПК представляють собою просторові

аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), які конвертують вимірюване переміщення у цифровий код. Існують паралельні та послідовні коди. Переважно зустрічаються КПК з растровими дисками, які надають можливість отримати послідовний код, де кількість імпульсів в якому відповідає величині переміщення растрового диска.

Оскільки практично всі засоби передачі інформації про КМ є безконтактними, діапазон робочих частот обертання валу, що характерний для них, не має істотної відмінності.

Виняток становлять контактні КПК, у яких максимальна частота обертання обмежена внаслідок того, що зчитує «щітка», що контактує з металізованою поверхнею растрового диска.

Найменшою похибкою вимірювання володіють аналогові фотоелектричні засоби і цифрові КПК, що обумовлено методологією їх побудови. Близькою до них похибкою володіють магнітоіндукційні і ємнісні засоби, однак вони, як і всі інші засоби, що використовують електричні сигнали мають низьку електромагнітну силу (ЕМС). За цим параметром значну перевагу також мають методи, що використовують оптичні сигнали для вимірювання і передачі інформації про крутний момент.

Складність застосування оптичних методів полягає в необхідності постійної підтримки чистоти оптичних елементів через високу чутливість апаратної частини, що реалізують їх ЗВКМ, до забруднення [16,18]. Однак, інші засоби передачі інформації про КМ ще більш складні в експлуатації. Наприклад, магнітопружні методи вимагають закріплення на поверхні вала чутливих елементів за допомогою спеціальних клеїв, в зв'язку з чим їх заміна надмірно складна. Чутливість магнітопружних датчиків сильно залежить від величини повітряних зазорів між валом і котушкою. Крім того, на результат впливає і внутрішня неоднорідність вала, викликана місцевими внутрішніми напруженнями, різною кристалографічною орієнтацією та ін.

Нелінійність ряду засобів передачі інформації про КМ з обертового валу різко виражена і визначається нелінійністю характеристик чутливих

елементів. На відміну від всіх інших КПК дозволяють позбутися нелінійності, яка в цьому випадку залежить лише від параметрів пружного валу. Великим плюсом КПК є те, що його вихідний сигнал представлений безпосередньо в цифровому вигляді, що не вимагає подальшого перетворення. Крім того, використання в растровому диску різних спеціалізованих кодів (код Грея та ін.) дозволяє значно зменшити ймовірність помилки і вчасно зафіксувати її. До недоліків КПК слід віднести те, що вони мають великий діаметр растрового диска, тому їх установка і експлуатація на багатьох агрегатах важко реалізована [18,19].

Поняття «крутного моменту»

В принципі, вимірювання крутного моменту – це простий механічний процес. У широкому сенсі він має на увазі вимірювання «сили», яка витрачена для обертання (спроби обертання) чого-небудь. Коли сила або «крутний момент» прикладені до валу, вал скручується (незначно). Таке скручування призводить до «розтягування» матеріалу вала в напрямку 45 градусів від осі вала між точками, які віддаляються один від одного при скручуванні. Матеріал валу також піддається «стисненню» в протилежному напрямку на 45 градусів.

Пристрої вимірювання крутного моменту використовують деформацію валу і зміну його характеристик для розрахунку крутного моменту. Це вимірювання проводиться тензOMETричними датчиками, які встановлені на валу і визначають деформацію валу, викликану крутним моментом або «силою». Існує кілька способів вимірювання скручування вала. Використання тензOMETричних датчиків визнано одним з найнадійніших методів, якщо ви володієте необхідними знаннями і навичками для роботи з такими датчиками.

Датчик крутного моменту являє собою пристрій для вимірювання / реєстрації крутного моменту на обертових частинах різних систем. Датчики крутного моменту дозволяють вимірювати як статичний, так і динамічний момент. Основою датчика моменту є тензодатчик (тензOMETричний міст) на

обертів до валу або осі. Знімання сигналу і живлення тензомосту може здійснюватися контактним і безконтактним (телеметричним) методом [18].

Визначення тензометричного датчика

Тензометричний датчик – це невеликий електричний елемент нанесений на струмонепровідний шар. Структура елемента побудована таким чином, що коли датчик розтягується (або стискається) в одному напрямку (уздовж робочої осі датчика), опір елемента збільшується (або зменшується) відповідно до розтягування. Розтягування, що перпендикулярне осі тензометричного датчика не має великого впливу на опір елемента. Датчик прикріплюється до валу таким чином, щоб його вісь збігалася з напрямком розтягування матеріалу при впливі крутного моменту. В результаті тензометричний датчик теж розтягується, викликаючи підвищення опору елемента.

У торсіометрі використовується тензометричний датчик, що складається з чотирьох резистивних елементів, що встановлюються на вал. Два елементи встановлюються у напрямку розтягування. Решта два – у напрямку стиснення. Чотири резистивних елементи підключені в конфігурації моста Уїтстона. Ця конфігурація підходить для вимірювання невеликих вимірювань опору в тензометричних датчиках. При збільшенні і зменшенні опору, на виході змінюється напруга пропорційно напрузі збудження і змінюється опір між протилежними елементами. Зміна загального опору також може бути викликана зміною температури.

Вимірювання крутного моменту

Визначення крутного моменту відбувається в різних сферах та для різних потреб, в тому числі, при відстеженні та контролі, керівництві потужністю і підвищення економічності.

Вільям Томсон, який пізніше став лордом Кельвіном (його ім'ям названа температурна шкала), відкрив у 1856 році залежність між розтягуванням провідника і його електричним опором (рис.3.3).

$$\Delta L/L \sim \Delta R/R,$$

де ΔL – відносне подовження провідника;

ΔR – відносна зміна опору

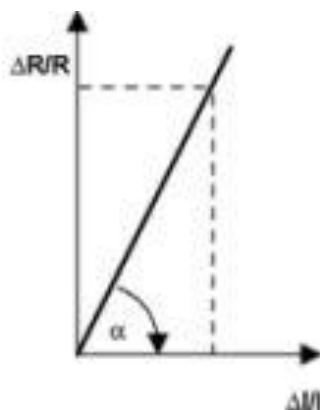


Рисунок 3.3 – Лінійна залежність опору від подовження провідника

Перша модель вільно наклеюваного тензорезистора відбулася у 1938 році, коли професором Руге був розроблений перший тензорезистор. Вже три роки пізніше з'явилися перші індустріально виготовлені дротяні тензорезистори, які дуже швидко знайшли практичне застосування. Справжнім проривом для промислово вироблених тензодатчиків стали плівкові тензорезистори, які у 1952 році опинилися на ринку. Вони витравлювалися на покритій провідним матеріалом плівці. Таким способом тензорезистори виготовляються і сьогодні. Ще в тому ж році, плівкові тензорезистори були запропоновані для вимірювань крутного моменту. Таким чином були виготовлені перші тензодатчики крутного моменту, що не обертаються. Ці датчики допомогли вирішити багато завдань в розробках і випробуваннях за допомогою вимірювання крутного моменту реакції. Але більш важливим і частим застосуванням датчиків крутного моменту є вимірювання на обертовому валу. Тут розробки тривали ще кілька років, щоб запропонувати на ринку готові до застосування тензометричні датчики крутного моменту [18,19].

При навантаженні вала аксіальним крутним моментом відбувається його скручування на кут пропорційний крутному моменту. Цей кут може бути виміряний за допомогою кутової вимірювальної системи. Для живлення датчика використовувалися несучі частоти в кілька сотень кГц. Таким чином,

вдалося зменшити габарити котушок індуктивності системи. Амплітуда змінного вимірювального сигналу була пропорційна куту скручування вимірювального валу датчика крутного моменту і мала ту ж частоту, що і напруга живлення.

Для живлення розташованої на обертовому валу вимірювальної системи і для передачі модульованого за амплітудою вимірювального сигналу застосовувалися транслятори, що побудовані за принципом обертового трансформатора. Одна обмотка трансформатора закріплена на статорі, друга розташована концентрично першій на роторі.

Передача напруги живлення і вихідної напруги через контактні кільця вимагає певної обережності. Контактні кільця повинні бути ізольовані від валу і один від одного. Вже найменші помилки в ізоляції можуть призвести до значних вимірювальних помилок. Сила натискання ковзного контакту повинна бути обрана так, щоб з одного боку опір контакту було можливо малим, надійність контакту щодо відривання внаслідок струсів і ексцентричності контактних кілець повинна була бути досить високою і з іншого боку не повинно було бути допущено виникнення надмірного нагріву і зносу контактних пар. Особливі складнощі виникають при високих швидкостях обертання. Деякі датчики забезпечені підйомними пристроями для щіток, які опускаються тільки для вимірювань. Недоліком даної технології є те, що контактні кільця і вугільні щітки з часом зношуються і вимагають заміни [18,19].

Для створення датчика зі стабільною передачею сигналу, що не вимагає технічного обслуговування, була розроблена технологія, що забезпечує безконтактну передачу вимірювального сигналу з тензорезисторного мосту. Завдяки живленню моста змінною напругою, на його виході виходить амплітудно-модульована змінна напруга, яка пропорційна крутному моменту. Як необхідна для живлення

тензометричного мосту змінна напруга, так і вимірювальний сигнал можуть передаватися завдяки трансформаторній передачі. (рис.3.4).

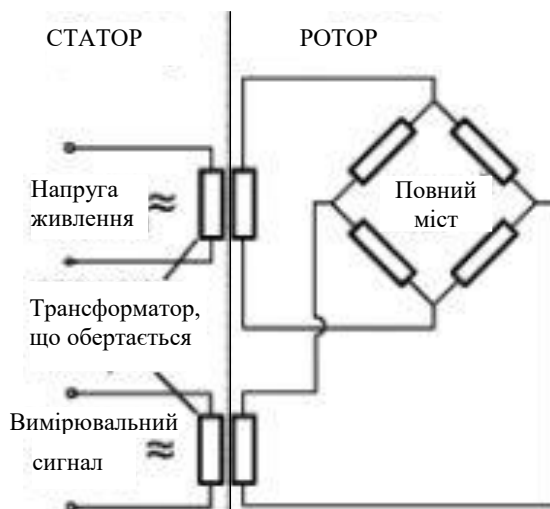


Рисунок 3.4 – Безконтактна передача вимірювального сигналу з тензорезисторного мосту

Внаслідок розмірам, що невблаганно зменшуються в електронній техніці, можливо встановити на обертовий вал вимірювальний підсилювач. Він служить для живлення тензорезисторного мосту і далі формує вимірювальний сигнал. Один з трансляторів необхідний для живлення датчика, другий – для частотно-модульованої передачі сигналу вимірювання. [19].

Зараз існують датчики для вимірювання крутного моменту з компенсацією температурних коливань, а також з компенсацією дрейфу сигналу. Значні плюси тензометричних виробів полягають в тому, що перешкоди компенсуються прямо у місці вимірювання. Залежність модуля пружності матеріалів, що використовуються, від температури становить, наприклад, у сталі близько 3% на 100К температурних коливань. Оскільки значення перешкоди знаходиться безпосередньо у коефіцієнті чутливості датчика, тоді треба застосовувати його компенсацію. Така компенсація для датчиків, які використовують кутовимірювальну систему, і здійснюється вона у підсилювачі. Внаслідок цього, вплив температури обов'язково враховувати. Для вимірювання крутного моменту у таких датчиків

необхідний достатньо немалий кут скручування, і це є однією з їхніх проблем. У результаті отримуємо такі м'які торсіонні конструкції, що здійснюють вимірювання тільки повільних процесів. Оскільки постійний розвиток електроніки призводить до зменшення її розмірів, а також безупинне поліпшення передачі вимірювального сигналу, призводять до доповнення поставок виробів для вимірювання крутного моменту інтегрованими підсилювачами [16,18,19].

У датчиків крутного моменту ранніх випусків є, як зазвичай, вихідний сигнал в аналоговому вигляді. Тому неможливо виключити перешкоди, що надходять від сусідніх силових вузлів і приводів, особливо при довгій підводці і високій динаміці. Щоб уникнути цього, зазвичай, збільшували рівень сигналу датчика. Як правило, прийняті діапазони сигналу ± 5 В і ± 10 В. Однак, для більшості застосувань перешкодостійкість маленька. Розв'язання цієї проблеми лежить в цифровій сенсорній електроніці. Схема її принципової механічної конструкції наведена на рис.3.5.

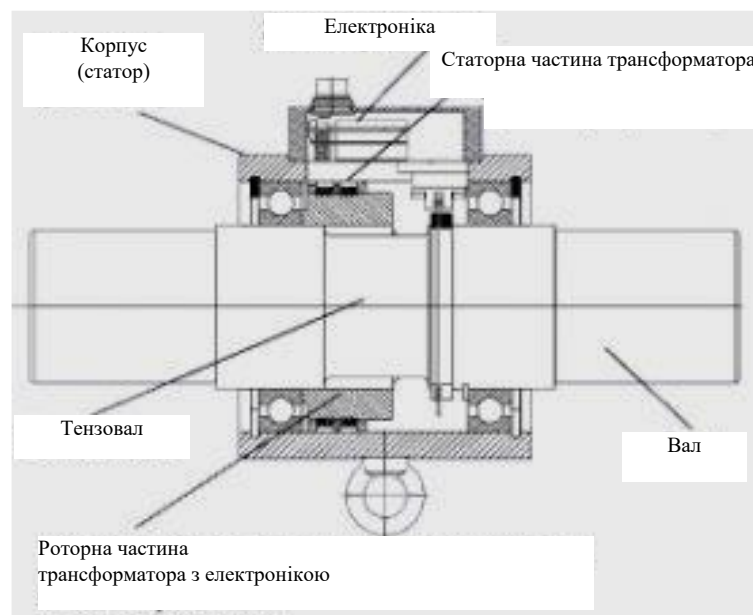


Рисунок 3.5 – Схема принципової механічної конструкції з використанням цифрової сенсорної електроніки

На валу знаходиться звужене по діаметру місце, де наклеєний тензометричний міст. На валу так само знаходяться частина трансформаторного транслятору і електроніка, що обертаються. У корпусі

знаходиться стаціонарна частина транслятору і інша електроніка. Для підключення датчика на корпусі знаходиться штекер.

Інтегрована електроніка як в статорі, так і в роторі містить мікропроцесор зі супутньою пам'яттю. Вимірювальний сигнал генерується на роторі за допомогою тензорезисторів, тут же посилюється і оцифровується. Цифровий сигнал потрапляє в процесор, який готує його до передачі на статор у формі послідовного сигналу з контрольною сумою. У статорі сигнал даних готується і на закінчення формується в процесорі для послідовного інтерфейсу RS 485 (рис.3.6).

Завдяки застосуванню процесорів такі дані як серійний номер, калібрувальні значення, вимірювальний діапазон, дата калібрування та інші можуть бути збережені як на роторі, так і на статорі, і при необхідності можуть бути лічені. Живлення датчика відбувається через контрольоване процесором джерело, яке може підключити калібрувальний контроль для перевірки датчика. Завдяки оцифровуванню вимірювального сигналу безпосередньо на місці, його зняттю і збереженню, а так само зчитуванню даних датчика, забезпечується дуже висока експлуатаційна надійність вимірювального пристрою (рис.3.6) [18,19].

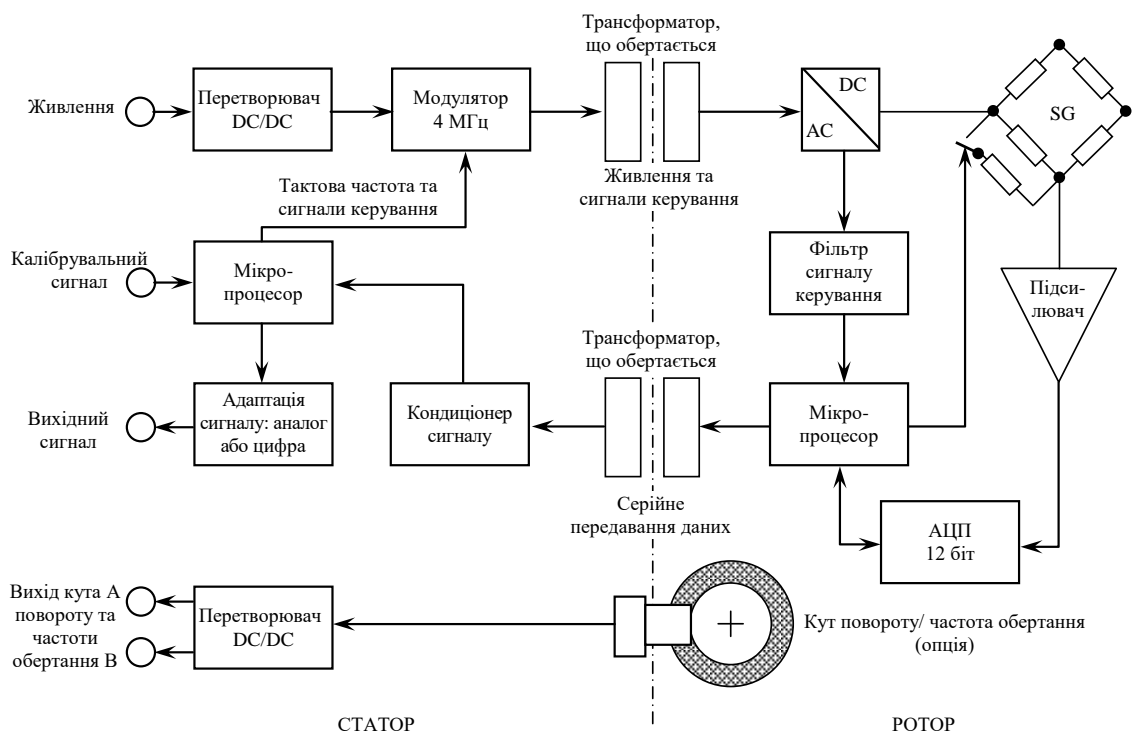


Рисунок 3.6 – Блок-схема цифрової передачі вимірювального сигналу з інтегрованими мікропроцесорами

Тензометрична техніка буде в майбутньому основною несучою силою датчиків крутного моменту. Завдяки розмірам, що постійно зменшуються, і електроніці, яка стабільно поліпшується, можливо конструювати датчики все більш високого коефіцієнта жорсткості, що веде до покращення динаміці вимірювань. Це досягається тим, що при тій же точності вимірювань вимірювальний сигнал стає все менше, завдяки високій електричній стабільності вимірювального підсилювача.

З іншого боку, покращена обробка вимірювального сигналу може бути застосована для збільшення точності вимірювального пристрою. Майбутнє належить також «розумним» датчикам зі збереженням вимірювально-технічних даних, завдяки чому вимірювання стають все більш надійними і дані для контролю якості можуть зчитуватися безпосередньо з датчика.

Існує кілька основних завдань, які можуть стояти перед виробництвами в сфері вимірювання крутного моменту:

- Висока точність визначення крутного моменту.
- Випробування крутного моменту в швидкісних і високошвидкісних приводах.
- Моніторинг крутного моменту в цілодобовому режимі 365 днів на рік з мінімальним обслуговуванням в польових або виробничих умовах експлуатації.
- Впровадження вимірювального вузла у вже існуючі установки і приводи.
- Впровадження вимірювального вузла в мінімальні установчі габарити.

Висока точність датчиків крутного моменту є на даний момент стандартною вимогою підприємств, що займаються проектуванням, випробуванням і моніторингом сучасних приводів і установок, використовуваних в наукомістких виробництвах. А останнім часом підвищується попит на датчики, що працюють при швидкостях обертання до 60000 об/хв і вище. Індуктивні датчики моменту володіють унікальною в своєму роді технологією вимірювань крутного моменту, що дозволяє забезпечувати не тільки високу точність вимірювань, але і дозволяє

виробляти спеціальні високошвидкісні версії з частотами до 60000 об/хв., також датчики володіють високими експлуатаційними властивостями (рис.3.7) [19].

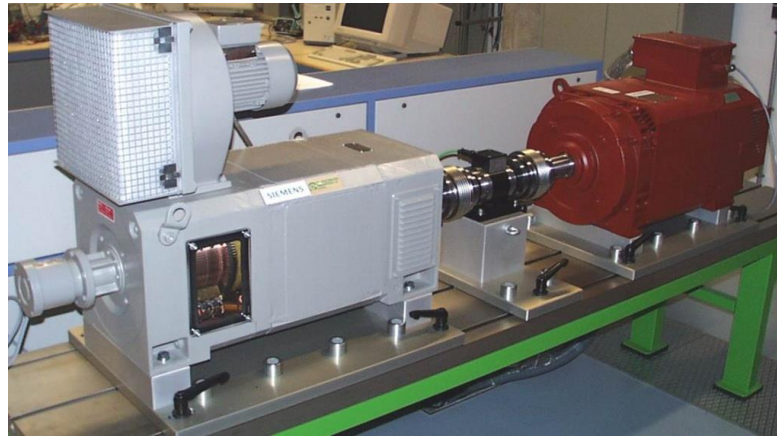


Рисунок 3.7 – Індуктивні високошвидкісні датчики

Не менш поширеним завданням є використання реактивних датчиків вимірювання крутного моменту при моніторингу, де постійний контроль крутного моменту є необхідністю. Вирішити задачу вимірювання крутного моменту, що передається валом з приводу на робочий орган особливо без врізки вимірювальних пристроїв у вал намагаються багато спеціалістів. Для квазістаціонарних умов, коли момент і кутова швидкість змінюються в часі повільно (навіть при високих номінальних значеннях), завдання вирішують так звані реактивні датчики, але і тут не все так просто. Реактивний датчик крутного моменту працює на відновленні закону збереження моменту кількості руху, так само як реактивний датчик сили працює на підставі закону збереження кількості руху. Якщо привод прикладає до виконавчого органу крутне зусилля, скажімо, за годинниковою стрілкою, то виконавчий орган відповідає приводу протидіючим, гальмуючим зусиллям проти годинникової стрілки. Якщо розглядати ці процеси, відволікаючись від нестационарних, перехідних або коливальних явищ, то середнє за часом значення крутного моменту на валу цілком можна виміряти за допомогою такого реактивного датчика, що вимірює реактивний крутний момент, переданий назад приводу [19].

Найчастіше привод при цьому встановлюють на спеціальній платформі, один кінець якої прикріплений до столу (фундаменту) випробувального стенду, діючої промислової установки або двигуна шарніром, а інший спирається на тензометричний датчик сили. Згідно із законом збереження моменту кількості руху привод, передаючи момент робочому органу, у відповідь отримує протидіючий момент від робочого органу, рівний переданому за величиною і протилежний у напрямку. І в разі стаціонарних (квазі) процесів (аж ніяк не статичних) такий підхід вирішує більшість практичних завдань. Щоб уникнути спотворення динамічних характеристик силового агрегату в умовах швидкостей, що швидко змінюються, тензодатчики можна розміщувати на стаціонарному вузлі приводу, що дозволяє нейтралізувати його інерційність. Новизна полягає в тому, що тензорезистори розташовуються не під краєм платформи, а безпосередньо в корпусі двигуна змінного струму. Реактивний момент, що передається від навантаження приводу електромагнітним полем, діє в першу чергу на ребра сердечника двигуна, та згинає їх. Роблячи вимір розтягнення або стиснення матеріалу на бічних поверхнях ребер, можливо зрозуміти та оцінити значення цього моменту з відсутнім впливом на результуючий показник моменту інерції двигуна.

Застосування реактивних датчиків визначення крутного моменту ділиться на дві основні групи:

– Енергетичні, нафтовидобувні і установки, до яких існують аналогічні високі потреби за точністю з найменшими зупинками на обслуговування та застосуванням в суворих умовах. Для цих установок добре підходять фланцеві датчики типу TF, тому що в них відсутні частини, що зношуються, та вони використовують безконтактне зчитування даних (рис.3.8);

– Виробничі підприємства, важке машинобудування та обладнання, де здійснюється контроль стабільності роботи при заданих межах, але використати класичні датчики моменту не має можливості з конструктивних причин. Більш відповідним є використання телеметричних систем, що монтується на вал. При цьому, важливою перевагою є можливість

трансформувати будь-який обертовий вузол у датчик крутного моменту (рис.3.9) [19].



Рисунок 3.8 – Фланцеві датчики з безконтактним зніманням даних



Рисунок 3.9 – Застосування телеметричних систем, що монтуються на вал

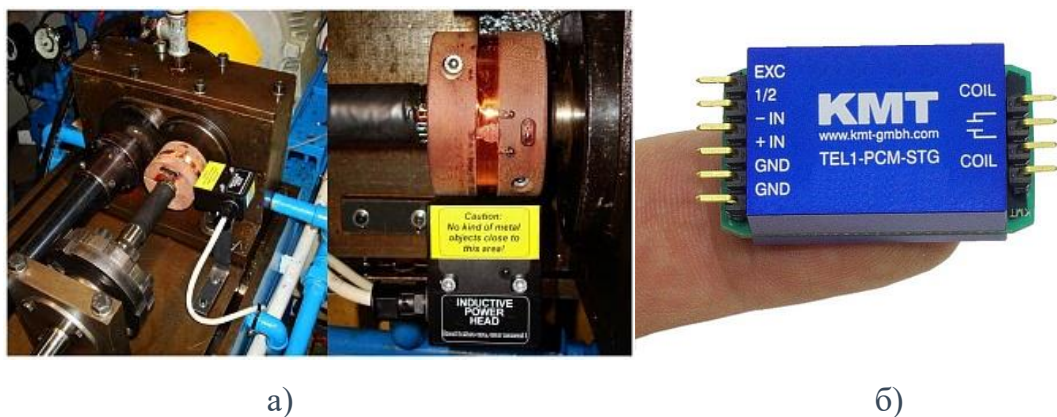


Рисунок 3.10 – Телеметрична система TEL1-PCM-IND

Наприклад, одноканальна 12-бітна телеметрична система TEL1-PCM-IND компанії «Промтекс» (рис.3.10а,б) реалізує бездротову передачу сигналів з обертових валів. Компактний, легкий, міцний енкодер розміром 35x18x12мм. і вагою 13г. легко встановлюється безпосередньо на вал за допомогою спеціальної армованої стрічки та має наступні характеристики: підключення аналогових датчиків будь-якого типу: тензометричні (≥ 350 Ом) з повно-і півмостовою конфігурацією, термопари, термоопір, вольтові – ± 10 в, струмові – $0(4) \div 20$ мА, потенціометричні; АЦП і ЦАП 12 біт; смуга пропускання сигналу – 0..1200 Гц; інтерфейс для передачі даних в цифровому вигляді; передача даних індуктивним способом до 35 мм.; безперебійне індуктивне живлення від 220В для тривалих вимірювань; міцні і вологозахищені корпуси для роботи в жорстких польових і промислових умовах; температура експлуатації: $-10 \div +80^{\circ}\text{C}$.

Телеметричні системи одноканальної схеми дають можливість швидко, легко і точно надавати бездротовий збір даних в робочих ситуаціях з будь-яких датчиків на обертових об'єктах. Живлення і передача сигналів відбувається за індуктивним або радіоканалом з вала на стаціонарний вузол без будь-яких щіток і проводів [18,19].

Останньою, але не менш поширеною групою завдань є натурне випробування вузлів і установок в автомобільній, транспортній, залізничній і військово-промисловій галузі, де з яких-небудь причин не може бути передбачено використання готових датчиків моменту. На сьогодні найбільш універсальним і пружним рішенням також є застосування всіляких телеметричних систем.

3.3 Аналіз і основи лазерної віброметрії

Отримання випереджаючого науково-технічного заділу в забезпечення розвитку двигунів літальних апаратів неможливе без тонкого фізичного експерименту, який направлений на детальне дослідження того або іншого

процесу або явища, без експериментальних перевірок нових теоретичних моделей, де іноді потрібні виміри «екзотичних» параметрів і широкі вимірювальні можливості і, нарешті, без випробувань нових зразків техніки, вимірів, що супроводжуються новими видами, і більш високими вимогами до вимірювальної процедури. Для вирішення цих задач потрібна розробка нових, нестандартних експериментальних методів і засобів, вдосконалення і адаптація під поставлені завдання методів і засобів, розроблених раніше, використання в експерименті найсучаснішої вимірювальної і обчислювальної техніки. Підвищуються вимоги до точності, ширини діапазону, інформативності вимірів. Необхідно додати, що усі ці виміри проводяться, як правило, в складних умовах (у високотемпературних, високошвидкісних, високо турбулентних потоках, на деталях, що обертаються, у нестационарних умовах) [20].

Вказаним вимогам більшою мірою відповідає новий клас контрольно-вимірювальних систем, ґрунтований на застосуванні джерел когерентного випромінювання, – лазерів. Лазер – унікальне джерело випромінювання, що має вдале поєднання таких властивостей, як монохроматичність випромінювання, мала кутова розходимість, когерентність і велика спектральна щільність енергії випромінювання.

Завдяки цим властивостям лазер виявився здатним забезпечити безконтактність і дистанційність вимірів, збільшити роздільну здатність існуючих методів виміру, підвищити їх продуктивність і точність. Швидкий розвиток зазнають методи і засоби лазерної віброметрії конструкцій. Висока точність визначення фізичних величин, що характеризують різні коливальні процеси поєднується тут з високою інформативністю і можливістю автоматизації вимірів, що дозволяє застосовувати лазерні прилади вібраційного контролю в якості засобів діагностики, відкриває нові можливості для переходу на експлуатацію енергетичних установок за фактичним станом. Безконтактні методи віброметрії ґрунтовані на порівнянні параметрів, що підлягають контролю, з довжиною хвилі випромінювання

лазера. Ці методи є найбільш точними в порівнянні з іншими методами виміру. За допомогою лазерних приладів можуть бути виміряні амплітуди коливань від доль ангстрема до декількох метрів в практично необмеженому частотному діапазоні [20÷22].

Одним з найважливіших завдань на сучасному етапі є розробка нової лазерної вимірювальної техніки і впровадження в різних галузях машинобудування приладів, що вже зарекомендували себе. Особливо велика потреба в лазерних віброметрах в метрологічній практиці, оскільки вони є зразковими. Проте практична реалізація лазерних віброметрів стикається з певними труднощами, які значною мірою обумовлені тим, що для свідомого використання лазерних вимірювальних приладів потрібно поєднання досить високого рівня знань в таких різномірних галузях науки і техніки, як когерентна оптика, лазерна техніка, механіка, прикладна математика.

Вібрація є періодичним коливанням точок поверхні об'єкту і характеризується амплітудою, частотою, фазою і напрямом переміщення. Нині для виміру параметрів вібрації відносно масивних об'єктів широко застосовуються контактні методи, які ґрунтовані на використанні вібродатчиків, що закріплюються безпосередньо на об'єкті. Для контролю малорозмірних або тонкостінних об'єктів, об'єктів важкодоступних або нагрітих до високих температур, використовуються безконтактні, в основному, оптичні методи. Будь-який оптичний метод виміру параметрів вібрації включає операції [20,21]:

- освітлення об'єкту;
- перетворення параметрів вібрації об'єкту в параметри оптичного випромінювання, що характеризується зміною в часі за заданим законом амплітуди, частоти, фази або поляризації електромагнітної хвилі (модуляція світла);
- детектування відбитого від об'єкту випромінювання за відповідним параметром;

– математична обробка сигналу детектора і представлення параметрів вібрації в заданих одиницях виміру.

В якості світлочутливого елемента фотодетекторів нині найширше використовуються так звані фотоелектричні приймачі оптичного випромінювання: фото резистори, фотодіоди, фото помножувачі і складніші прилади, зроблені на їх основі (фотопотенціометр, диссектор, матриця фотодіодів). Перераховані елементи чутливі тільки до інтенсивності випромінювання, тому для витягання інформації, поміщеної в частоту, фазу або поляризацію відбитого від об'єкту (чи що пройшов крізь нього) оптичного сигналу, до складу фотодетекторів входять різні інтерференційні або поляризаційні оптичні дискримінатори, лінзи і діафрагми.

В якості джерел світла найбільш зручні лазери, випромінювання яких окрім інтенсивності характеризується ще і високою когерентністю і гострою спрямованістю.

Для математичної обробки сигналу фотодетектора, зручного і оперативного представлення результатів, як правило, використовуються персональні ЕОМ з відповідним апаратним і програмним забезпеченням.

3.3.1 Методи лазерної віброметрії

З середини 60-х років минулого століття лазерні технології почали ставати невід'ємною частиною наукових та технологічних процесів, поступово знаходячи нові сфери застосування. Ефект Доплера, що використовується в декодерах лазерного випромінювання, спочатку застосовувався для вимірювання швидкості потоку рідин, а потім його застосування значно розширилося, аж до вимірювання вібрації деталей і виробів під час їх експлуатації та випробувань у лабораторних умовах на вібраційному обладнанні. Так виникла лазерна (доплерівська) віброметрія. Ефект Доплера полягає в тому, що світло (хвильове випромінювання), відображене від об'єкта, що рухається, змінює свою частоту пропорційно швидкості об'єкта. Враховуючи, що лазерний промінь є монохроматичним випромінюванням (на одній певній або на декількох певних довжинах хвиль),

ми можемо дуже точно виміряти доплерівську зміну його частоти при відображенні від об'єкта, що коливається, і тим самим дуже точно виміряти швидкість такого об'єкта. Більше того, доплерівське зміщення практично лінійно залежить від швидкості освітлюваного (опромінюваного) об'єкта.

Особливий інтерес представляє вимірювання доплерівського зміщення у віброметрії, що дозволяє проводити вимірювання у будь-якій видимій точці без додавання масового (інерційного) навантаження, адже наклеєний на виріб датчик-акселерометр додає масу та змінює вібраційні характеристики об'єкта. Крім того, не завжди і не скрізь можна встановити акселерометр, особливо на гарячих або легких виробах, не кажучи вже про спотворення даних через початкову в'язкість клейового шару або необхідність свердлити об'єкт під установку шпильки. Тому лазерна віброметрія відрізняється від традиційної величезними діапазонами вимірів, високою точністю та достовірністю. Ще одна перевага лазерної віброметрії пов'язана з простотою реалізації вимірювання в безлічі точок об'єкта за рахунок перенаправлення (розгорнення) лазерного променя. Тому скануючий лазерний віброметр дозволяє побудувати безконтактним методом повну віброграму виробу при реальному навантаженні під час експлуатації або в лабораторії для виявлення слабких місць або резонуючих місць в конструкції, щоб поліпшити вібраційні та акустичні характеристики випробуваного виробу [21,23].

З усіх джерел випромінювання оптичного діапазону лазерні джерела характеризуються найбільшою мірою когерентності і монохроматичності генерованого ними випромінювання.

Крім того, лазери мають наступні позитивні властивості: високу стабільність і відтворюваність частоти випромінювання, малий кут розходження, малу чутливість до зміни температури довкілля, що особливо важливо при метрологічних дослідженнях.

Тому при розробці приладів, призначених для прецизійного виміру параметрів руху в машинобудуванні, лазерні джерела знайшли широке застосування.

Методи перетворення параметрів вібрації в електричний сигнал можна класифікувати за способом виділення інформації про параметри руху (фотоелектричні, інтерференційні, доплерівські) і за способом прийому інформації про параметри руху (одночастотні, двочастотні і т.п.).

Основні методи лазерної віброметрії, що отримали реальне втілення в приладах, приведені на рис. 3.11.

Фотоелектричні методи перетворення ґрунтовані на вимірі зміни інтенсивності лазерного випромінювання, інтерференційні – на використанні явища інтерференції в оптичному діапазоні, доплерівські – на зміні частоти випромінювання лазера, відбитого від об'єкту вібраційного контролю.

Як у інтерференційних, так і в доплерівських методах отримав поширення двопроменевий інтерферометр Майкельсона (рис.3.12).

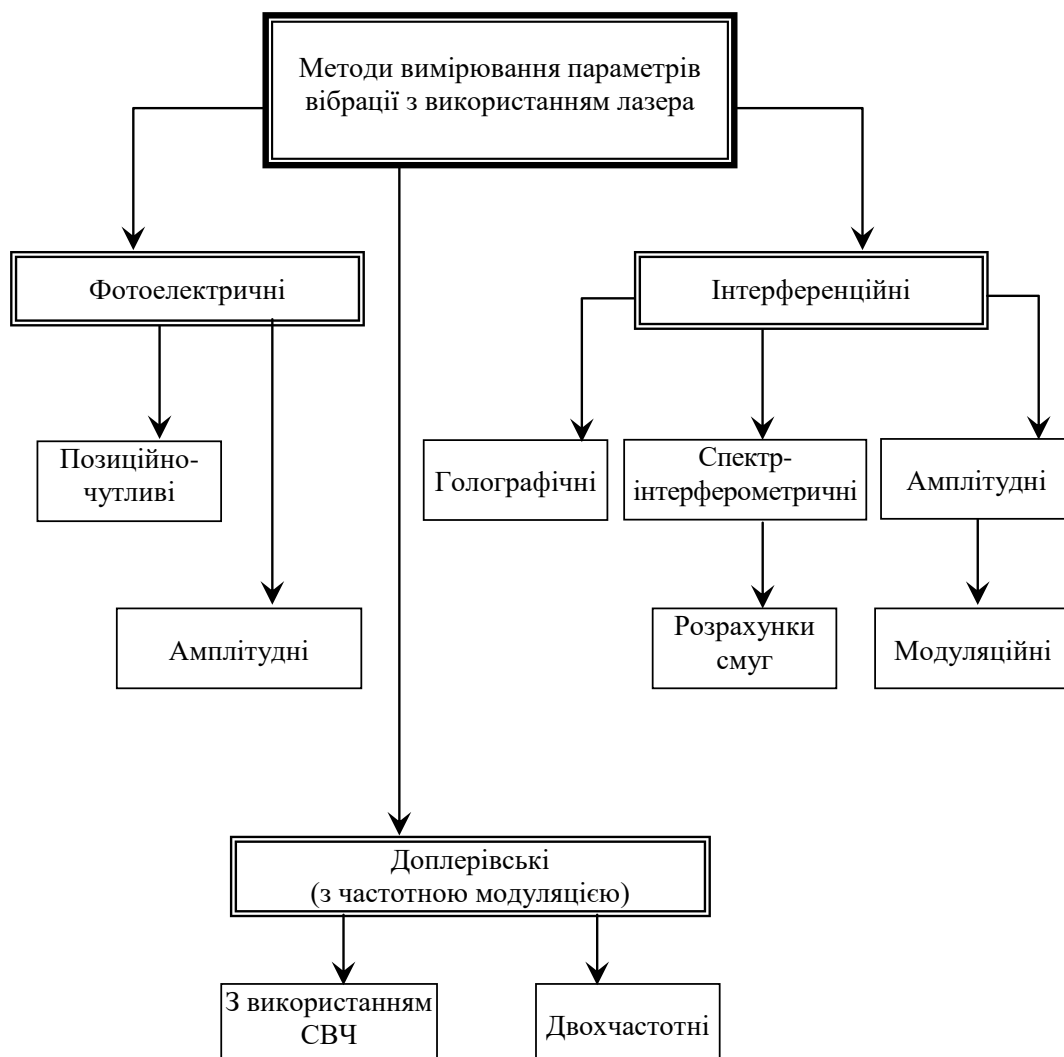


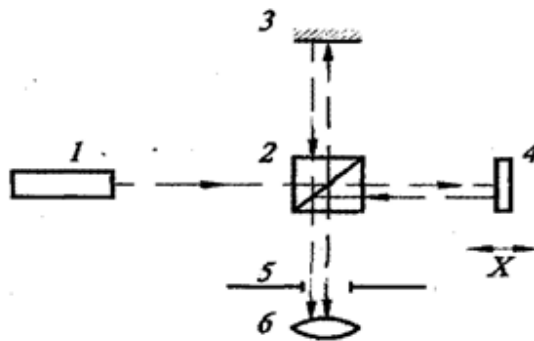
Рисунок 3.11 – Класифікація методів лазерної віброметрії

В окулярі 5 спостерігається інтерференційна картина. Якщо різниця ходу променів інтерферометра $\delta_0=0; \pm\lambda/2; \pm2\lambda/2$, то інтерференційне поле має максимум освітленості. При різниці ходу променів $\delta_0= \pm\lambda/4; \pm3\lambda/4$, то промені сходяться в проти фазі і інтерференційне поле має мінімум освітленості.

Таким чином, можна виміряти значення переміщення дзеркала 4 по числу переходів зміни освітленості, що пройшли через діафрагму 6. Один перехід відповідає половині довжини хвилі лазерного випромінювання.

Випромінювання лазера 1 поступає на світло ділительний кубик 2 і розділяється на дві частини. Отримані промені направляються відповідно на нерухомий відбивач 3 і на відбивач, що переміщається разом з вимірюваним об'єктом 4.

Відбиті від рухливого 4 і нерухомого 3 дзеркал оптичні промені поєднуються на розділювальній площині кубика 2 і інтерферують (рис.3.12).



1 – лазер; 2 – світло ділительний кубик; 3 – нерухоме дзеркало;

4 – рухливе дзеркало 5– окуляр; 6 – діафрагма

Рисунок 3.12 – Схема інтерферометра Майкельсона

В теперішній час найшвидше розвиваються лазерні віброметри (рис.3.13÷3.14), що базуються на ефекті Допплера. Вони мають наступні переваги:

– визначають можливість отримання високого співвідношення сигнал/шум;

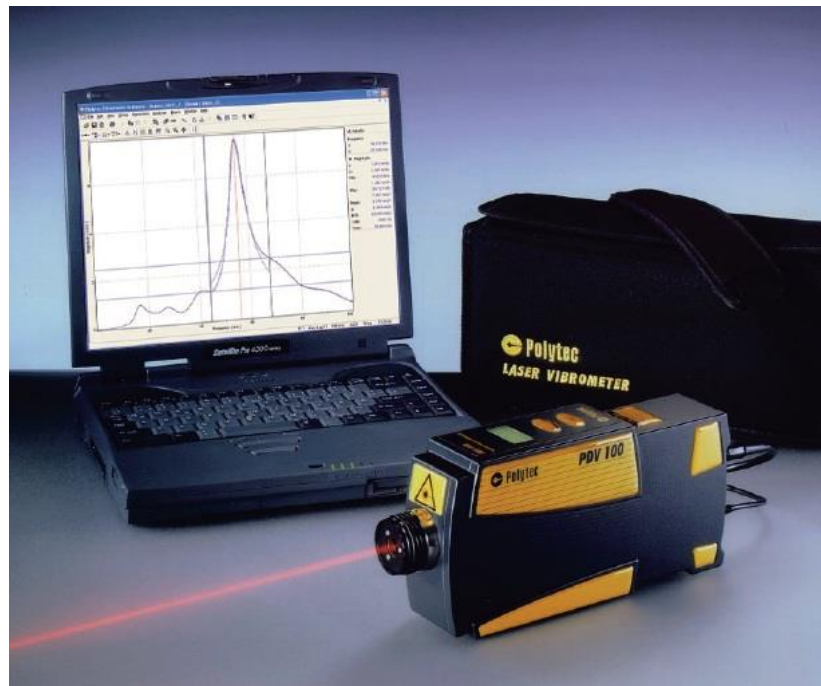


Рисунок 3.13 – Лазерний вібрometr фірми «Polytec»

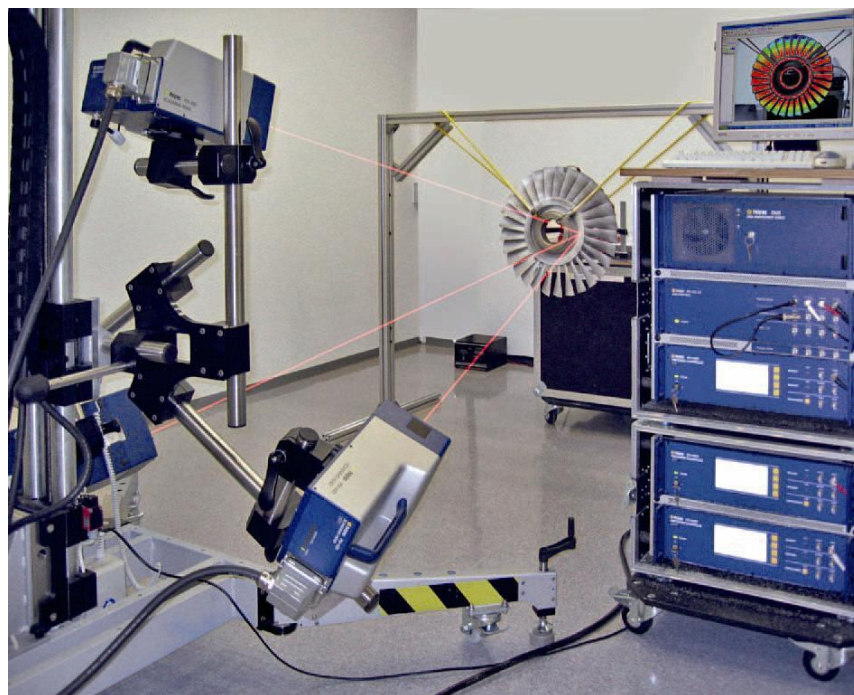


Рисунок 3.14 – Застосування лазерного вібрometr

- забезпечують частотне і просторове пригнічення фону зовнішнього засвічення без застосування оптичних фільтрів;
- дозволяють вимірювати параметри механічних коливань складної форми на значних відстанях від об'єкту виміру;
- мають високу заводо захищеність;

– допускають здійснення аналізу вихідного сигналу фотоприймача в частотному діапазоні, що перевищує область низькочастотних шумів фотоприймача і лазера.

Приклад лазерного віброметра

В якості прикладу розглянемо скануючий віброметр PSV-400. Скануючий віброметр PSV-400 (рис.3.15) має сучасне програмне та апаратне забезпечення. У нього входять компактна сенсорна головка з інтегрованим скануючим модулем, контролер віброметра і система збору і управління даними. Потужний програмний пакет управляє сканерами, обробкою даних і візуалізацією результатів вимірювання [25].



Рисунок 3.15 – Скануючий віброметр PSV-400

PSV-400 має просте і інтуїтивно зрозуміле управління, особливо в порівнянні з традиційними методами вимірювань декількома датчиками, коли потрібен час на підготовку об'єкта випробувань і сенсорів. Для налаштування випробування-необхідно визначити геометрію і точки сканування. Віброметр автоматично проходить променем всі точки сітки сканування, вимірює відгук, підтверджує правильність вимірювання перевіркою співвідношення сигнал-шум. Коли сканування завершиться, необхідно вибрати необхідні частоти і візуалізувати форми коливань в 2D і 3D режимах (рис.3.16) [25].

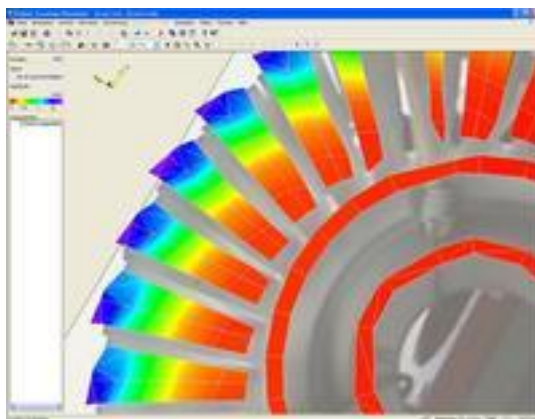


Рисунок 3.16 – Візуалізація процесу віброметрії

Це є надзвичайно ефективним інструментом в розумінні особливостей вібрації конструкції.

Чудовий вимірювальний прилад для збору тривимірних даних про вібрацію як простих, так і складних конструкцій:

- одночасне вимірювання трьома сенсорними головками з високим просторовим дозволом.
- інтуїтивно-доступна 3D анімація результатів вимірювання з поділом компонентів вектора в площині і поза нею
- інтерфейс обміну даними з програмним забезпеченням кінцево-елементного і модального аналізу.

PSV-400-3D заснований на відомій технології PSV(Polytec Scanning Vibrometer). З використанням трьох незалежних сенсорних головок і контролерів в кожній точці сканування. Віброшвидкість вимірюється одночасно за трьома напрямками. Три сенсори централізовано управляються програмним забезпеченням PSV [25].

При типовому вимірі виконуються наступні кроки:

- Розташування сенсорних головок перед об'єктом дослідження;
- Налаштування глобальної системи координат;
- Призначення точок на об'єкті;
- Налаштування параметрів для аналогового і цифрового збору реєстрованих значень;
- Запуск сканування;

➤ Аналіз та експорт даних.

Трикомпонентний віброметр Polytec одночасно вимірює всі три лінійні компоненти швидкості в точці коливання конструкції.

Малий вимірюваний об'єм дозволяє безконтактно виконувати тривимірні вимірювання вібрації навіть дрібних конструкцій.

Аналоговий вихід компонент V_x , V_y і V_z в реальному часі з частотами вібрації понад 250 кГц.

Також одними з лідерів у напрямках лазерної віброметрії можна вважати німецьку компанію OptoMET та японську Shinken. Японське підприємство засноване у січні 1975 року і з того часу займається багатоосьовим енергозберігаючим обладнанням для електродинамічного вібраційного тестування, причому патент на багатоосьовий шейкер було отримано ще у 1988 році. Німецька OptoMET із Дармштадта більше націлена на лазерну віброметрію та застосування цифрових методів обробки сигналів за рахунок використання в одному приладі цифрової обробки сигналів UltraDSP разом із високочутливим аналоговим виміром. Компанія OptoMET однією з перших випустила лазерні віброметри SWIR (Short Wavelength Infrared – короткохвильові інфрачервоні).

Лазерні віброметри OptoMET забезпечують стабільний вимір на темних/шорстких поверхнях (рис.3.17) у діапазоні частот до 24МГц і більше, вимірюють віброшвидкість об'єктів до 50м/с, прискорення – до 78 Mg та вібропереміщення – до $\pm 2,5$ м. Такий лазерний доплерівський віброметр має відстані вимірювання (установча відстань) від 0 мм і більш ніж до 300 м. У вимірювальній головці спільно застосовуються лазер для вимірювань (1550 нм.) та лазер для наведення з видимим променем (510...530 нм.) [28].



Рисунок 3.17 – Лазерний віброметр компанії OptoMET

Фокусування в автоматичному, дистанційному (управлінні з ПК) та ручному режимах. Виходи: аналоговий BNC та цифровий Ethernet. Віброметр Optomet FIBER комплектується програмним забезпеченням (ПЗ) OptoGUI для збору даних, аналізу та дистанційного контролю.

ПЗ дозволяє проводити розрахунки швидкого перетворення Фур'є (ШФП) безпосередньо в процесі вимірювання. Відображаються дані в області частот (спектри) і лінії ШФП (аж до 8 млн). Ведеться автоматична ідентифікація піків сигналу в частотному діапазоні. Можна задавати межі ШФП певними часовими діапазонами даних. Реалізовано тригер сигналу для запуску вимірювання сигналу швидкості, переміщення або прискорення. [28].

В якості скануючого лазерного віброметра можна рекомендувати серію Optomet Scan, яка дозволяє автоматично проводити випробування всього виробу за один сеанс, безконтактно та без впливу на виріб самим віброметром.

Скануюча віброметрія дозволяє легко розрахувати локальний резонанс і характер коливань всіх елементів конструкції виробу. Кут сканування – 50×40 градусів з роздільною здатністю $<0,002^0$. Щільність точок сканування – до 512×512 . Здійснює захоплення зображення CCD-камерою та відображення поля вібрації в реальному часі.

Вібрацію вимірюють за трьома параметрами: віброприскорення, віброшвидкість та вібропереміщення.

Віброприскорення

Віброприскорення характеризує стан внутрішніх деталей обладнання, що спричиняють вібрації. Наприклад, по віброприскоренню можна зробити висновки про стан ротора турбіни чи підшипників. Віброприскорення вимірюється мм/сек².

Віброшвидкість

Віброшвидкість – швидкість переміщення контрольної точки вздовж осі виміру. За цим параметром судять вплив вібрації на опори устаткування. Віброшвидкість вимірюється в мм/сек.

Вібропереміщення

Вібропереміщення визначає межі усунення контрольної точки через вібрацію. Вимірюється в мікрометрах або міліметрах, показує відстань між піками усунення контрольної точки.

Отримані за допомогою віброметра або віброаналізатора показники віброприскорення, віброшвидкості та вібропереміщення порівнюються з табличними значеннями. За відхиленням показників від норми спеціаліст визначає стан обладнання.

Вимірювання проводяться у трьох напрямках: поперечному, осьовому та вертикальному. Перевищення норми вібрації у поперечному напрямку свідчить про дисбаланс устаткування. Перевищення норми в осьовому напрямку свідчить про розцентрування обладнання. Підвищена вертикальна вібрація говорить про вихід із ладу опор або фундаменту.

Сучасні цифрові віброметри можуть вимірювати віброприскорення та вібропереміщення.

Віброметри оснащуються п'єзоелектричними датчиками, які під час виміру прикріплюються до обладнання. Для вимірювання вібрації фахівець вибирає режим віброшвидкості, віброприскорення або вібропереміщення, включає прилад та зберігає отримані дані у пам'яті або записує журнал вимірів.

Також віброметри підтримують режим високочастотного виміру вібрації. Він дозволяє будувати висновки про стан підшипників устаткування.

Сучасні віброметри можуть визначати додаткові параметри. Наприклад, Fluke 805 вимірює температуру підшипників (рис.3.18).

Що таке віброаналізатор?

Віброаналізатор – складніший вимірювальний прилад порівняно з віброметром. Аналізатор виконує всі функції віброметра, тобто вимірює віброшвидкість, вібропереміщення та віброприскорення.



Рисунок 3.18 – Віброметр Fluke 805

На відміну від віброметра віброаналізатор дозволяє відстежувати вібрацію в динаміці. Прилад відображає на екрані або зберігає графіки зміни вібрації. Тобто, за допомогою віброметра можна виміряти вібрацію в конкретний момент часу, а за допомогою аналізатора можна оцінити зміну цього параметра [26,27].

Віброаналізатори бувають одно-, дво- та багатоканальними. Чим більше каналів, тим складніші виміри виконує прилад.

Одноканальні віброаналізатори зазвичай використовують для діагностики та балансування обладнання. Це найдешевший тип аналізаторів.

Двоканальний аналізатор – універсальне рішення для фахівців, які ремонтують обладнання та займаються пусконаладжувальними роботами.

Багатоканальні віброаналізатори використовують у лабораторіях та конструкторських бюро. Це складні та дорогі прилади, які потрібні розробникам обладнання та вченим.

Такі пристрої вимірюють кілька сигналів вібрації одночасно. Це дуже корисно для діагностики складних дефектів. Багатоканальні аналізатори мають кілька датчиків, за якими тягнуться кілька дротів. Тому вони не такі зручні, як одноканальні. Однією рукою з ними вже не попрацюєш. І ціна одразу набагато зростає.

Зате багатоканальні прилади мають більший екран, більше можливостей для обробки сигналів.

Багатоканальні прилади можуть бути зібрані в одному корпусі або на базі переносного комп'ютера (окремо блок підключення датчиків і окремо комп'ютер ноутбук).

Багатоканальні прилади мають окремий канал для підключення відмітника фази. Це дозволяє проводити балансування на місці та вимірювати сигнали, прив'язані до фази обертання агрегату.

У таких приладів багато інших режимів вимірювання, але використовуються вони тільки в дуже складних випадках. Наприклад, режим Розгін-Вибіг дозволяє простежити зміну вібрації при розгоні та зупинці агрегату. Будується графік залежності амплітуди та фази вібрації від частоти обертання, що дозволяє визначити резонансні частоти агрегату [26,27].

Значення вібрації, виміряні за деякий час (наприклад, через 1 місяць) дозволяють будувати прогноз розвитку вібрації та планувати терміни наступних ремонтів. Це дає значну економію грошей порівняно з плановими ремонтами.

Переносний віброаналізатор ОНІКС дозволяє контролювати поточний стан агрегатів, виконувати в автоматизованому режимі глибоку діагностику і балансування у власних підшипниках, а також визначати власні частоти конструкцій (рис.3.19). ОНІКС може бути використаний як як аналізатор вібрації, так і як збирач даних в режимі колектора (робота за маршрутом).

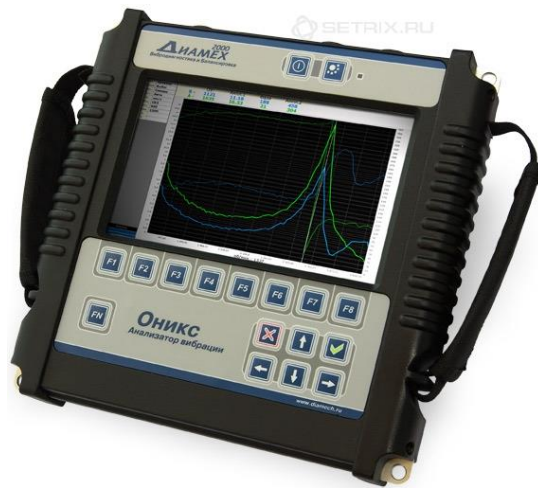


Рисунок 3.19 – Віброаналізатор ОНІКС

У вимірнику вібрації Онікс реалізовано максимальний набір вимірів для одноканального та двоканального аналізу, а також ряд дослідницьких функцій, що дозволяють суттєво підвищити інформативність та достовірність діагностики. Використання універсальних вимірювальних входів забезпечує можливість підключення вібраційних датчиків різних типів, що значно розширює можливості приладу [28].

Максимальна функціональність

Крім стандартних типів вимірів (загальний рівень, амплітуда/фаза, спектр, спектр огибающей, тимчасової сигнал та інших.), у віброаналізаторі ОНІКС реалізовано низку спеціальних дослідницьких функцій, вкладених у підвищення достовірності діагностики, – вимір дампа тимчасового сигналу (до кількох годин), кепстральний аналіз, а також новий метод оцінки нестационарних процесів – вайвлет-аналіз, що набирає все більшої популярності серед діагностів-дослідників.

Завдяки можливості проведення синхронних вимірювань різних параметрів вібрації одночасно за двома каналами, у віброаналізаторі були реалізовані такі вкрай інформативні при діагностиці види вимірів як орбіти та взаємні спектри, а також розроблено алгоритм розрахунку взаємної фази, що дозволяє виявляти ряд дефектів роторного обладнання без використання тахометричного датчика.

Практично необмежений обсяг пам'яті приладу дозволив закласти на етапі розробки можливість створення нових типів вимірів, дослідницьких функцій і навіть діагностичних методик, які можуть застосовуватись фахівцями при поглибленій діагностиці обладнання як під час проведення вимірювань, так і під час наступного аналізу.

Модульний принцип побудови

Великий обсяг пам'яті не накладає жодних обмежень на допустимий максимальний розмір вбудованого програмного забезпечення. Тому в міру розвитку платформи віброаналізатор ОНКС може доповнюватися новими функціями, програмними модулями та методиками діагностики.

Призначення аналізатора Атлант-32

Багатоканальний синхронний 32-канальний реєстратор-аналізатор вібросигналів **Атлант-32** є сучасним приладом, призначеним для вирішення найскладніших завдань у вібраційній діагностиці стану обладнання. За допомогою віброаналізатора **Атлант-32** (рис 3.20) можна обвішати датчиками весь турбогенератор [26]. Основу віброаналізатора *Атлант* складає переносний комп'ютер типу «ноутбук», у якому поєднано функції реєстрації сигналів, обробки, зберігання. Функції первинної обробки вібросигналів, фільтрації та синхронного цифрового перетворення реалізуються у зовнішньому блоці. До цього блоку підключаються вібродатчики та відмітник фази, що використовується при балансуванні. Застосування комп'ютера обробки сигналів знімає майже всі обмеження, властиві звичайним переносним приладам віброконтролю. Це – мала кількість вхідних каналів, низька швидкодія, обмежений обсяг пам'яті. Можливість проведення безперервної реєстрації сигналів протягом десятків секунд або хвилин дозволяє використовувати такі прилади для реєстрації перехідних процесів в обладнанні, контролю вібраційних процесів в тихохідних механізмах і т.д. [26,27].



Рисунок 3.20 – Віброаналізатор Атлант-32

Технічні параметри віброаналізатора Атлант-32 наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики аналізатора Атлант-32

Параметр	Значення
Кількість каналів реєстрації аналогових сигналів	32
Частота опитування каналів під час реєстрації сигналів, Гц	5÷20000
Частотний діапазон вібродатчиків, що поставляються, Гц	5÷5000
Тривалість тимчасових вибірок сигналів	0,01сек÷30 хв.
Частотна роздільна здатність одержуваних спектрів, ліній	100÷3200
Час роботи від внутрішніх джерел живлення, год.	2,5÷4,0
Вага приладу в упаковці без датчиків, кг.	10

До складу пристрою Атлант входить набір програм вібраційної діагностики. За допомогою програмного забезпечення Атлант можна аналізувати тимчасові форми та спектри вібросигналів, вейвлет-перетворення сигналів. Велику користь при діагностиці можуть принести програмні засоби просторової візуалізації багатовимірних коливань [26,27].

Для зручності роботи до складу ПЗ включені вже готові вібродіагностичні системи:

- Автоматизована система діагностики технічного стану та пошуку дефектів обладнання, що обертається, за спектрами вібросигналів;

- Мова написання діагностичних правил, за допомогою якого користувач може використовувати всі свої діагностичні напрацювання;
- Система ранньої діагностики дефектів стану та монтажу підшипників кочення за спектрами вібраційного вібросигналу;

Проведення балансування та заспокоєння роторів у власних підшипниках – до 14 площин корекції та 42 точок контролю.

Висновок

Якщо потрібно вимірювання вібрації для визначення справності обладнання, тоді затребувані недорогі віброметри. Якщо окрім діагностики обладнання необхідно ремонт та налагодження, тоді підійде віброаналізатор. Для балансування обладнання достатньо одноканального аналізатора, а для точної діагностики та ремонту потрібні багатоканальні віброаналізатори.

3.4 Методика вимірювань з використанням лазерного віброметра, проведення випробувань та аналіз результатів вимірювань вібрації

Метою розробки методики та проведення випробувань є оцінка можливості оперативного виявлення дефектів зносу, які зароджуються або вже розвиваються, вузлів турбовальних двигунів, зокрема двигуна ТВЗ-117 та його модифікацій, і головного редуктора типу ВР-14 при наземних запусках з використанням безконтактного лазерного віброперетворювача.

3.4.1 Опис вимірювального пристрою та методика вимірювань з використанням лазерного віброметра

Пристрій вимірювання вібрації агрегатів двигуна складався з лазерного віброперетворювача типу 1 LV-2, сполучного кабелю 2 і цифрового аналізатора 3 (рис.3.21).

Принцип дії лазерного віброперетворювача полягає у додаванні відображеного від об'єкта оптичного сигналу, що несе інформацію про коливальну швидкість об'єкта, з випромінюваним гетеродинним оптичним сигналом.

Основні параметри перетворювача:

– частотний діапазон – від 2 Гц до 30 кГц,

- діапазон вимірюваних віброшвидкостей до 400 мм/сек;
- динамічний діапазон – не менше 70 дБ;
- відстань до об'єкта від 0,5 до 5 метрів;
- чутливість – 25мВ/(мм/с).

Сигнал від вимірювальної головки надходить на електронний блок, що має індикатор якості сигналу, що вимірюється, і далі на цифровий аналізатор. Аналізатор дозволяє вимірювати діагностичний сигнал у діапазоні частот від 0,5Гц до 28кГц. Вимірювальна головка з об'єктивом лазерного перетворювача закріплена на штативі, що дозволяє спрямовувати лазер під будь-яким кутом на об'єкт контролю (рис.3.22 – 3.23).

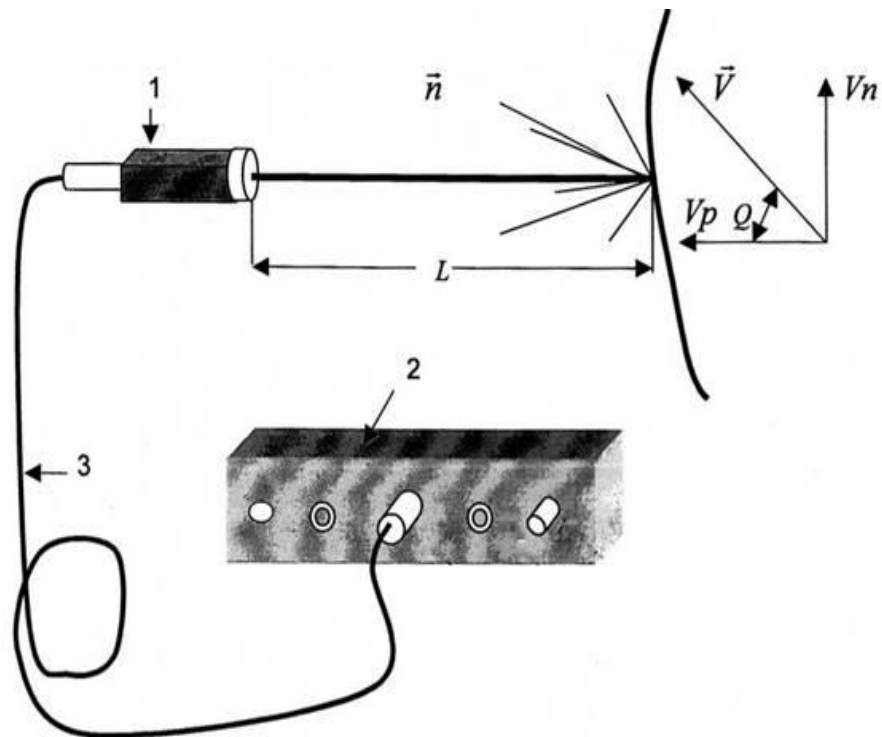


Рисунок 3.21 – Пристрій вимірювання вібрації

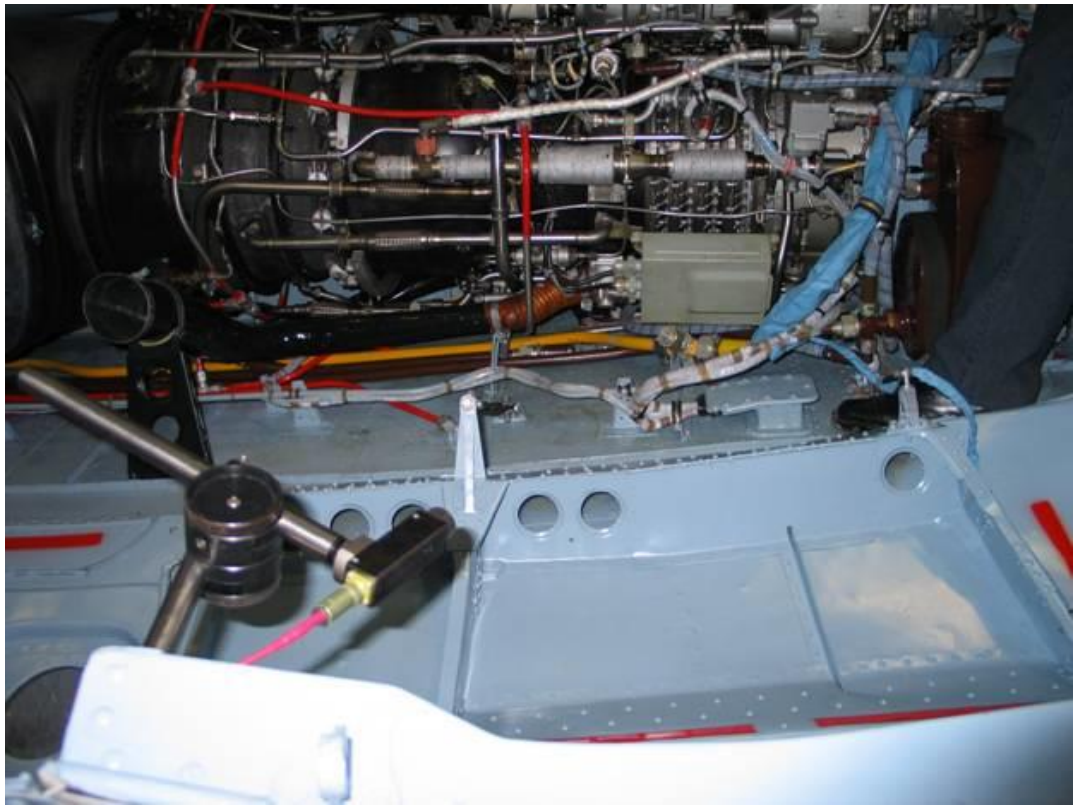


Рисунок 3.22 – Фото лазера, закріпленого на ступку капота двигуна ТВ3-117

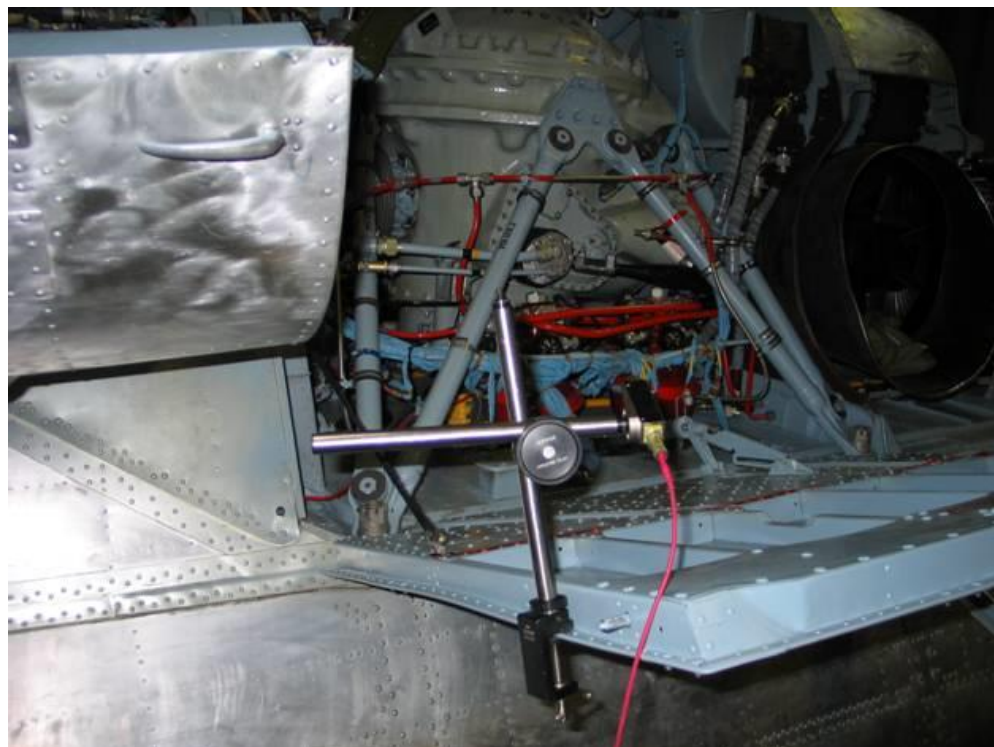


Рисунок 3.23 – Фото лазера, закріпленого на ступку капота головного редуктора.

Для зручності роботи (у частині фіксації точки виміру вібрації на корпусі контрольованого агрегату) до складу оптичної схеми включений лазер підсвічування, довжина хвилі якого $0,63 \text{ мкм}$. знаходиться у

видимій області спектра. Його промінь повністю поєднаний із променем інфрачервоного лазера.

Головка лазера прямує на корпус агрегату, що діагностується і, після включення електронного блоку, лазер підсвічування фокусується на корпусі агрегату.

На рис.3.24 точки виміру 1÷3 відносяться до лівого двигуна, а точки виміру 5÷7 до правого двигуна. Точка 4 – у районі кріплення нерухомих осей проміжних шестерень планетарного ступеня до корпусу головного редуктора. Цікаво зробити порівняння технічного стану ідентичних вузлів обох двигунів [23,24].

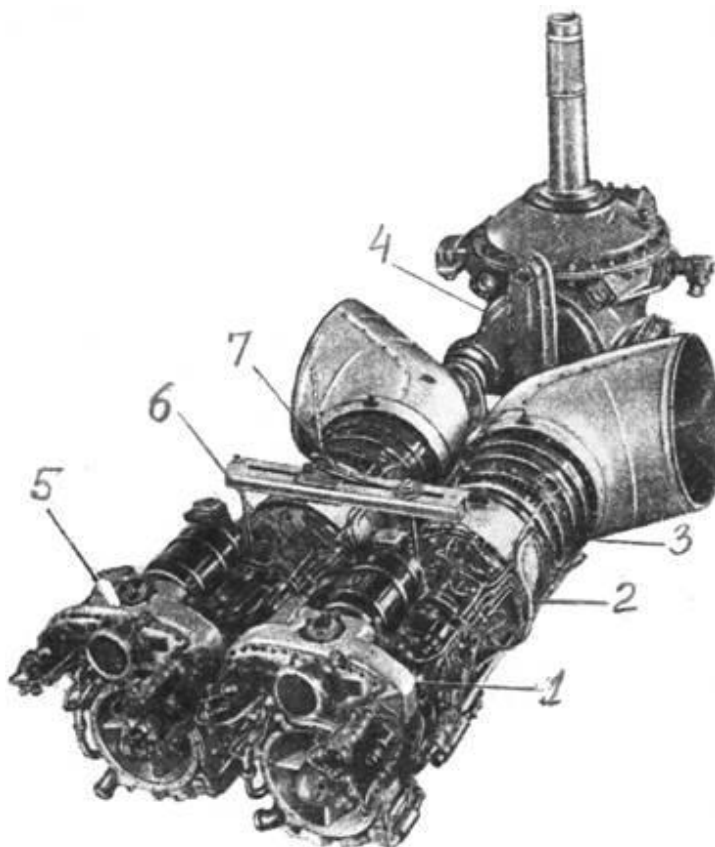


Рисунок 3.24 – Точки вимірювання вібрації на лівому та правому двигунах силової установки в районі опор турбокомпресора та головного редуктора

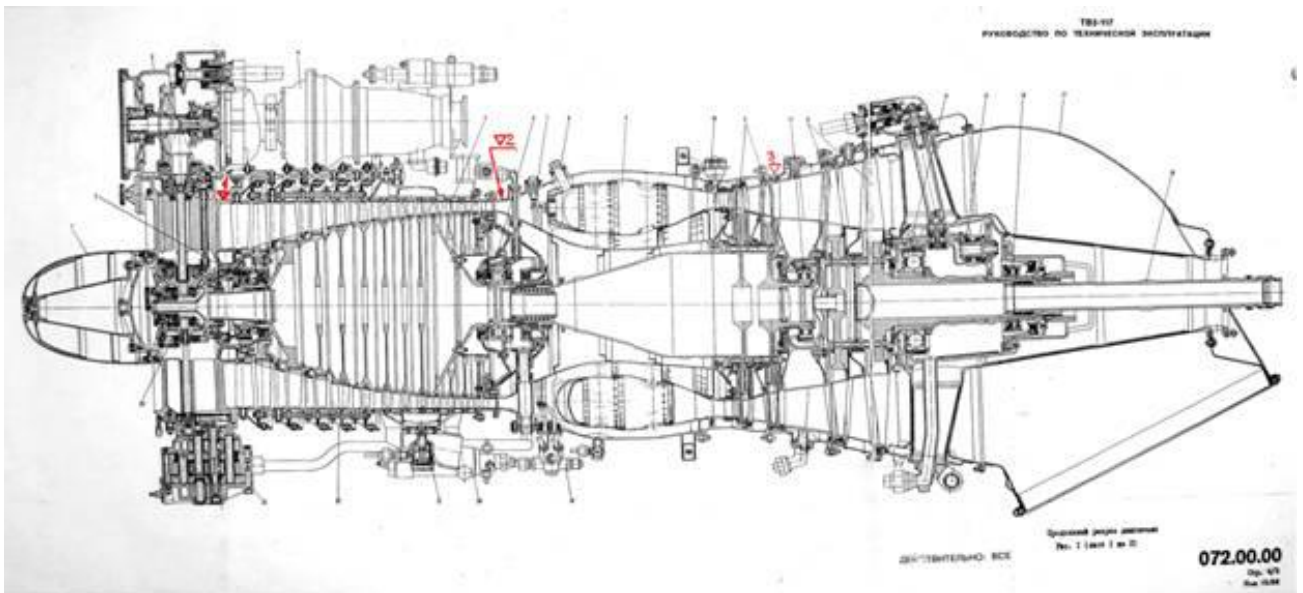


Рисунок 3.25 – Поздовжній розріз двигуна із зазначенням місць вимірювання вібрації

На рис.3.25 показаний поздовжній розріз двигуна і більш точно позначення місць вимірювання вібрації в районах передньої опори компресора та центрального приводу, а також близько 2-ї та 3-ї опори.

3.5.2 Послідовність проведення випробувань та аналіз результатів вимірювань вібрації

Для лазерної вібродіагностики при обстеженні силової установки вертольота під час запуску в наземних умовах ставилися такі задачі:

- ✓ Виконати вимірювання вібрації в кожній точці контролю не тільки на стаціонарних оборотах режиму малого газу, але і режимах запуску, розгону та вибігу;
- ✓ Виходячи з дотримання техніки безпеки відпрацювати наступну методику: лазер за допомогою універсального штатива кріпити до зафіксованої стулки відкритого капота і направляти на точку вимірювання до запуску двигуна. При цьому оператор разом із аналізатором розташовуються усередині салону гелікоптера. Після закінчення пуску лазер прямує на наступну точку вимірювань та запуски двигуна повторюються;
- ✓ Перевірити можливість діагностування вузлів силової установки при розміщенні лазера на штативі у безпечній зоні поза гелікоптера.

Таким чином, послідовно встановлюється і спрямовується лазер на вищевказані точки контролю та вимірюються вібрації.

Перед запуском двигуна включається вібровимірювальна апаратура, оцінюється якість сигналу, потім здійснюється введення сигналу цифровий аналізатор і запускається двигун. Для оцінки перехідних процесів реєструється розгін двигуна, а також стаціонарна ділянка роботи на режимі малого газу тривалістю не менше ніж 30 секунд. Після запису сигналу в пам'ять приладу головка лазера спрямовується на наступну точку та вимірювання продовжуються [23,24].

На рис.3.26 показана осцилограма сигналу вібрації в точці 1, з якої видно ділянку стаціонарних оборотів, наявність резонансного посилення вібрації на перехідних режимах в моменти запуску турбокомпресора та вільної турбіни, а також проходу гармонік оборотних частот через області власних частот коливань двигуна.

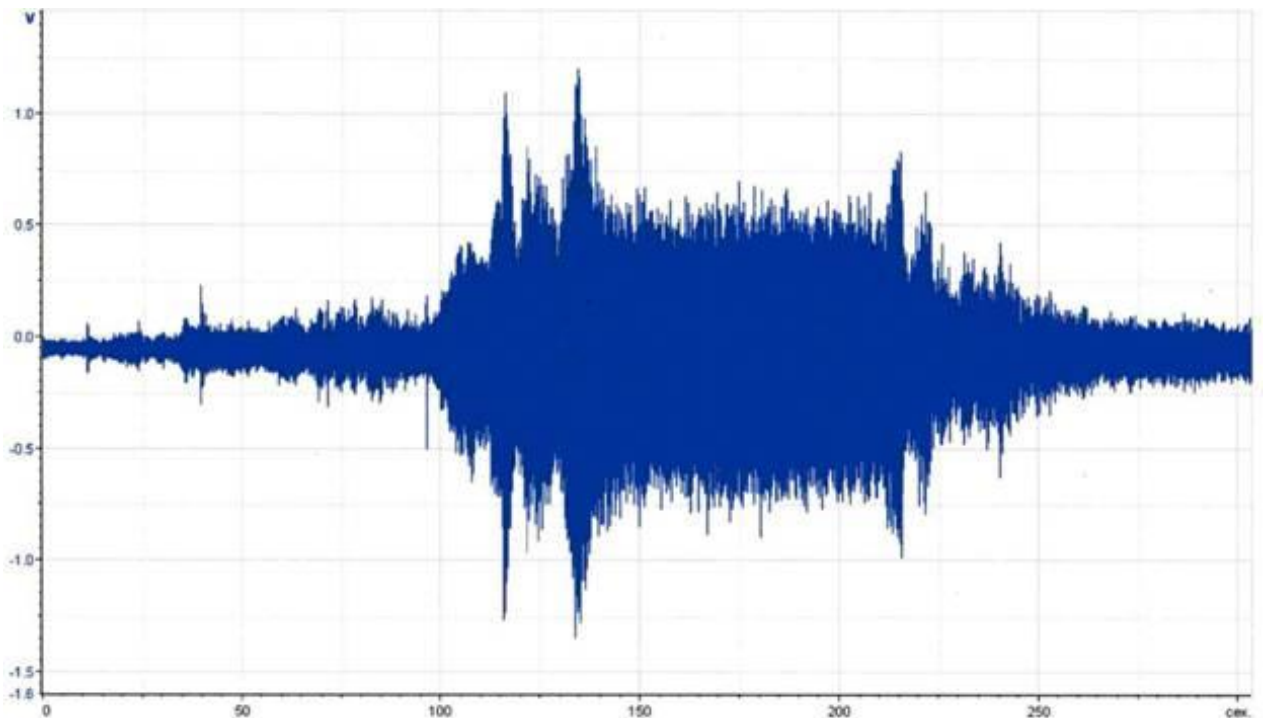


Рисунок 3.26 – Осцилограма сигналу вібрації в районі першої опори турбокомпресора

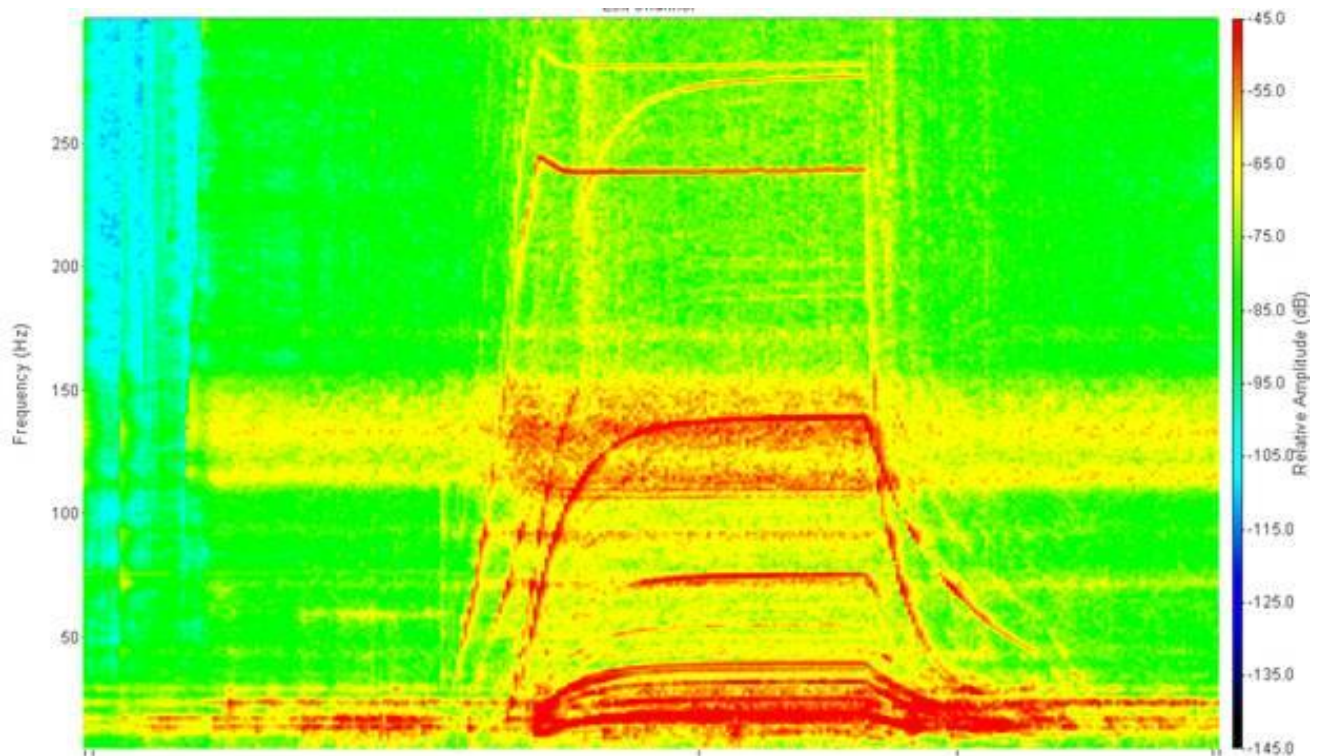


Рисунок 3.27 – Зміна амплітуд складових рівнів вібрації силової установки в моменти розгону, стаціонарних оборотів та вибігу

Наочнішу картину дає тривимірний графік зміни амплітуд складових вібрації силової установки, вимірюваних у т.1, на режимах розгону, стаціонарних оборотів і вибігу, що показаний на рис. 3.27. Тут по горизонтальній осі відкладено час роботи, по вертикальній осі – частота коливань у Гц, а інтенсивність вібрації характеризується зміною кольору від коричнево-червоного (при максимальному рівні вібрації) до світло-зеленого (при мінімальному рівні).

Ідентифікація вузлів агрегатів двигуна виконується шляхом зіставлення розрахункових частот дії збурювальних сил у роторних системах, зубчастих приводах та насосних агрегатах, визначених за аналізом кінематичних схем, з дискретними складовими у спектрах вимірюваних сигналів. На рис.3.28÷3.29 наведено вузькосмугові спектри вібрації т.1 на стаціонарних оборотах. На рис.3.28 у смузі частот від 0,5Гц до 300 Гц, та на рис. 3.29 у сфері високих частот.

У спектрі вібрації містяться складові на частотах обертання:

- валу вільної турбіни (137Гц, СКЗ віброшвидкості –1,5 мм/с);
- валу компресора (238Гц, СКЗ віброшвидкості – 0,44 мм/с);

➤ центральної шестерні планетарного ступеня головного редуктора (18,3Гц, СКЗ віброшвидкості –3,16 мм/с) та 4-ї гармоніки (73,2Гц).

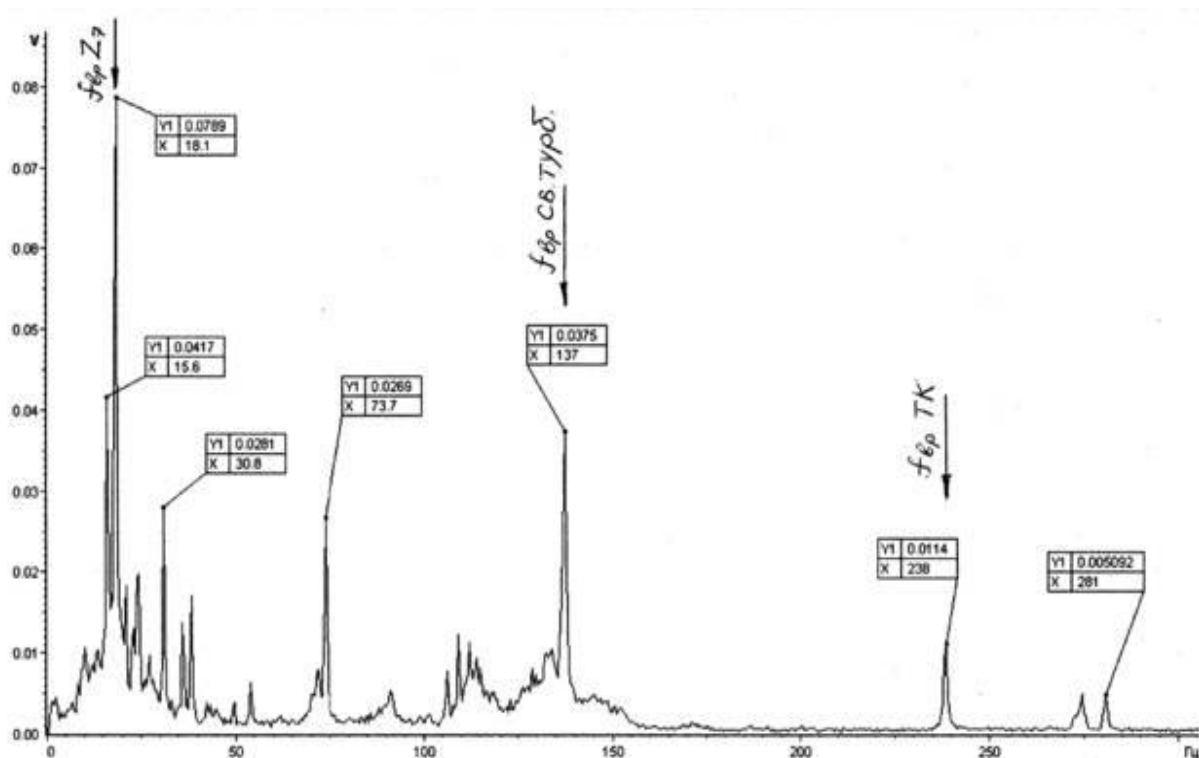


Рисунок 3.28 – Спектр вібрації турбокомпресора у діапазоні частот 0,5 ÷ 300Гц (т.1)

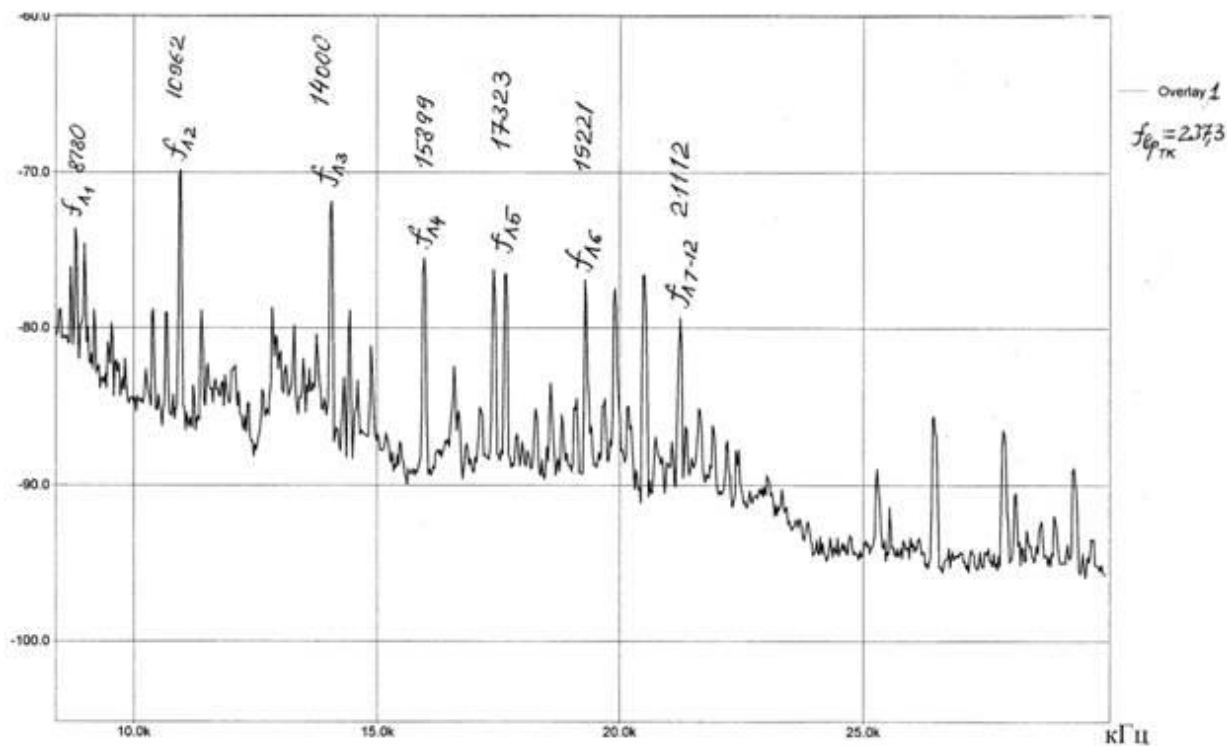


Рисунок 3.29 – Високочастотний спектр вібрації у т.1

Висновки до розділу 3

У розділі зроблені такі заходи

- Розглянутий посередній метод моніторингу наявної потужності ГТД з використанням його вільної турбіни як давача потужності;
- Запропонований прямий метод моніторингу наявної потужності ГТД за допомогою безконтактного вимірювача крутного моменту;
- Зроблений аналіз типів датчиків, що використовуються для вимірювання крутного моменту;
- Проведений аналіз основ і методів лазерної віброметрії, приведені типи існуючих віброметрів та віброаналізаторів;
- Пропонована методика вимірювань рівня вібрації на двигуні з використанням лазерного віброметра, проведення випробувань та розглянутий короткий аналіз результатів вимірювань вібрації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проаналізовані підходи комплексного діагностування конструктивних елементів ГТД, наведено основи технічного діагностування. Також наведені основні завдання технічної діагностики, що дозволяють своєчасно виявити несправності та дефекти для ефективного та безперебійного функціонування газотурбінних двигунів, а також для прогнозування залишкового ресурсу ГТД.

Також у роботі наведені загальні відомості газотурбінного турбовального двигуна ТВЗ-117, як обраного в якості об'єкта діагностування. Вказано, за рахунок чого досягаються високі ефективні показники двигуна. Зроблений короткий опис конструкції газотурбінного двигуна.

Проведений аналіз існуючих методів, способів та приладів контролю технічного стану газотурбінних двигунів та їх удосконалення, розглянутий метод моніторингу наявної потужності газотурбінного двигуна, запропоновано метод вимірювання крутного моменту ГТД, зроблений аналіз типів датчиків, що використовуються для вимірювання крутного моменту, аналіз основ і методів лазерної віброметрії, приведені типи існуючих віброметрів та віброаналізаторів, пропонована методика вимірювань рівня вібрації на двигуні з використанням лазерного віброметра, проведення випробувань та розглянутий аналіз результатів вимірювань вібрації.

Розглянуто питання стосовно охорони навколишнього середовища та охорони праці. Проведено аналіз екологічної небезпеки, що викликані двигуном та визначено відвернений еколого-економічний збиток, що завданий довкіллю. Визначено шляхи, що підвищують екологічну безпеку ГТД.

Проаналізовані небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що виникають при експлуатації ГТД, організаційні, конструктивно-технологічні заходи по зменшенню рівня дії небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Розглянута пожежна та вибухова безпека при технічному обслуговуванні ГТД. Перелічені основні вимоги з дотримання правил з охорони праці при експлуатації ГТД.

