МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій
Кафедра аерокосмічних систем управління

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
_____ Ю.В. Мельник

«___» _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)
ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ
“МАГІСТР”

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології»

Тема: «Лазерний віброметр автоматизованої системи випробувань авіадвигунів»

Виконавець: студент групи СУ-213М, Панченко Богдан Олександрович

Керівник: кандидат техн. наук, доцент, Дивнич Микола Полікарпович

Консультант з «Охорони праці»: _____ _____
(підпис) (П.І.Б)

Консультант з «Охорони навколишнього середовища»: _____ _____
(підпис) (П.І.Б)

Нормоконтролер: _____ _____
(підпис) (П.І.Б)

Київ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра аерокосмічних систем управління

Спеціальність: 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Ю.В. Мельник

«___» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Панченка Богдана Олександровича

1. Тема кваліфікаційної роботи «Лазерний віброметр автоматизованої системи випробувань авіадвигунів» затверджена наказом ректора від «15» вересня 2023 р. №1810/ст.

2. Термін виконання роботи: з 2 жовтня 2023 року по 15 грудня 2023 року

3. Вихідні дані роботи: вимірювання двух складових вектора швидкості вібрації, діапазон вимірювання: 0-200 мм/с, діапазон частот вібрацій: 10-300 Гц, похибка вимірювання 10%.

4. Зміст пояснювальної записки: аналітичний огляд літературних джерел та статей з тематики кваліфікаційної роботи, види випробувань авіаційних двигунів, випробувальні стенди та обладнання, датчики автоматизованих систем випробування авіадвигунів та принципи побудови автоматизованої системи випробувань авіадвигунів.

5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу: презентація, таблиці, рисунки, графіки, рисунки з презентації: класифікація випробувань ГТД, випробувальний стенд, обслуговування двигуна на випробувальному стенді, схематичне зображення розташування датчиків.

6. Календарний план-графік:

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Написання 1-го та 2-го розділів	5.10.23-15.10.23	
2	Написання 3-го розділу	15.10.23-30.10.23	
3	Формування 4-го розділу	01.11.23-16.11.23	
4	Написання розділів з охорони праці та охорони навколишнього середовища	17.11.23-30.11.23	
5	Дооформлення та захист кваліфікаційної роботи		

7. Консультанти з окремих розділів кваліфікаційної роботи

Назва розділу роботи	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці			
Охорона навколишнього середовища			

8. Дата видачі завдання: "____"_____2023 р.

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

Завдання прийняв до виконання: _____ _____
(підпис студента) (П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «Лазерний віброметр автоматизованої системи випробувань авіадвигунів»: 114с., 46 рис., 11 літературних джерел.

Актуальність роботи: випробування авіаційних двигунів відіграє вельми важливу роль у забезпеченні якості та безпеки авіапольотів. Цей процес є надзвичайно важливим, оскільки його недетальне проведення може призвести до серйозної загрози для життя сотень людей.

Об’єкт дослідження: процес функціонування лазерного вимірюваннння двох складових вектора швидкості вібрації.

Мета роботи: розробка лазерного допплерівського вимірювача двох складових вектора швидкості вібрації.

Предмет дослідження: лазерний допплерівський вимірювач двох складових вектора швидкості вібрації.

Методи дослідження: структурно-функціональний метод, метод моделювання на ЕОМ електронних схем, робота з науково-технічною літературою.

Досліджений процес функціонування лазерного вимірюваннння двох складових вектора швидкості вібрації.

Описаний принцип роботи лазерного допплерівського вимірювача двох складових вектора швидкості вібрації.

Розглянутий метод моделювання на ЕОМ електронних схем необхідний для фільтрації високочастотних завад у допплерівському сигналі віброметра.

Ключові слова: ЛАЗЕР, ВИМІРЮВАННЯ, ШВИДКІСТЬ, ВІБРАЦІЯ, МОДЕЛЮВАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП

Тема "Лазерний віброметр автоматизованої системи випробувань авіадвигунів" є дуже актуальною, оскільки вона пов’язана з розвитком авіаційної техніки та безпеки польотів. Розглянемо кілька аспектів, які підкреслюють актуальність цієї теми:

Ефективність та надійність авіадвигунів:

- тестування авіадвигунів є критично важливим для забезпечення їхньої ефективності та надійності в різних умовах експлуатації.

- лазерні віброметри дозволяють вимірювати коливання структур та компонентів авіадвигунів з високою точністю, що є ключовим для визначення їхньої працездатності.

Автоматизація тестування:

- автоматизація процесу випробувань забезпечує швидке та ефективне визначення параметрів авіадвигунів.

- системи, які використовують лазерні віброметри, можуть працювати в режимі реального часу, що дозволяє швидше виявляти потенційні проблеми та забезпечувати швидкі корективи.

Безпека та довговічність:

- забезпечення безпеки польотів є однією з найважливіших задач авіаційної промисловості.

- вчасне виявлення відхилень в роботі авіадвигуна, яке може забезпечити лазерний віброметр, дозволяє запобігти аварійним ситуаціям та забезпечує довговічність обладнання.

Відповідність стандартам та регулюванням:

- системи випробувань повинні відповідати строгим стандартам та регулюванням, які встановлені в авіаційній галузі.

- розвиток нових технологій, що дозволяють відповідати цим вимогам, є важливим напрямком досліджень та розробок.

Отже, тема "Лазерний віброметр автоматизованої системи випробувань авіадвигунів" відображає важливість використання сучасних технологій для підвищення ефективності та безпеки авіаційних систем.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

- ОТД - Основні технічні дані;
- ДВ – Державні випробування;
- ГТД – Газотурбінний двигун;
- ЧЕ – Чутливий елемент;
- ТУ – Технічні умови;
- ТО – Термоперетворювач опору;
- ЛА – Літальний апарат;
- РЭ – Настанова з експлуатації;
- ТЗ – технічне завдання;
- КТБ – Конструкторсько-технологічне бюро;
- ПС – Паспорт;
- ПЗ – Представник замовника;
- НІЦ – Науково-інженерний центр;
- ГДС – Газодинамічна стійкість;
- ЛДВШ – Лазерний допплерівський вимірювач швидкості.

РОЗДІЛ 1 ВИДИ ВИПРОБУВАНЬ АВІАДВИГУНІВ. ОГЛЯД ОБЛАДНАННЯ ТА СТЕНДІВ ПРИЗНАЧЕНИХ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ.

1.1 Види випробувань авіадвигунів.

Кожен авіаційний двигун, пройшовши етапи проектування, конструювання та виготовлення, піддається випробуванню. Єдина можливість переконатися у надійній роботі та у забезпеченні тих параметрів, які були закладені під час проектування, - це провести випробування двигуна.

Таким чином, випробування - це експериментальне визначення) і контроль кількісних і якісних характеристик властивостей об'єкта випробувань, як результат впливу на нього під час моделювання чи функціювання.

Результати випробувань залежать від умов – сукупності впливаючих факторів та режимів функціонування об'єкта при випробуваннях.

Випробування авіаційного двигуна має три цілі:

1. Перевірку відповідності основних технічних даних двигуна (ОТД) параметрів, заданих у технічних умовах (ТУ), паспорті (ПС) та настанови з експлуатації (НА).

2. Визначення ресурсу, перевірку працездатності та надійності руху.

3. Визначення фактичного стану робочого процесу та напруг у конструкції двигуна.

Авіаційний ГТД на різних етапах життєвого циклу (розробки, виробництва, експлуатації) піддається великій кількості випробувань.

Випробування можна класифікувати за різними ознаками:

- призначення;
- місцю проведення;
- за рівнем проведення;
- за видом зовнішніх впливів;

- типу виробництва та іншим;

- за результатами впливу.

Залежно від характеру експериментів, що проводяться, умовно відзначаються:

- науково-дослідні випробування (науково-дослідний експеримент);

- випробування окремих вузлів створюваного двигуна;

- державні та сертифікаційні випробування двигуна;

- Випробування серійних двигунів.

Умовність поділу підкреслюється тим, що різні випробування можуть мати загальні рішення з підготовки, проведення, використання обладнання, техніці вимірювань.

1.1.1 Випробування дослідних ГТД.

Основна задача - доведення робочого процесу та конструкції двигуна. Доводка – внесення змін до конструкції двигуна, для вирішення основної задачі — забезпечення його проектних показників.

Перші екземпляри нового двигуна за основними показниками ефективності та міцності зазвичай значно відрізняються від відповідних проектних величин, записаних у технічних умовах. Вийти на заявлені величини за параметрами в усіх умовах експлуатації та за ресурсом вдається тільки після ретельного експериментального відпрацювання.

Доведення двигуна - це тривалий процес. Так, якщо доведення ЛА триває 4-5 років, то доведення двигуна триває 6-7 років. Завжди стоїть завдання скоротити цей термін.[5]

У процесі доведення вирішуються питання, пов’язані головним чином з газодинамічними та міцнісними факторами. У процесі газодинамічного доведення вирішується також безліч додаткових завдань:

- відпрацювання запуску двигуна;

- забезпечення виходу елементів двигуна при їх спільній роботі на розрахункові або оптимальні режими, що може включати в себе коригування площі соплових апаратів турбіни, сопла, змішувача двоконтурного ГТД та ін;

- відпрацювання взаємодії елементів і систем при змінних режимах - дроселювання, включення та вимкнення форсажу;

- визначення фактичних запасів газодинамічної стійкості;

- уточнення обраних законів управління та обмеження режимів.

Ефективність всіх заходів, що вводяться з поліпшення параметрів двигуна визначається, в першу чергу, контролем його дросельної стендової характеристики. Ряд довершувальних робіт вимагають проведення випробувань дослідного двигуна на висотних стендах, де імітуються умови роботи двигуна у висотно-швидкісних умовах.

Доводка міцності, метою якої є забезпечення надійної роботи двигуна протягом встановленого ресурсу, включає наступні випробування:

- визначення рівня змінної напруги в лопатках, дисках, валах компресора та турбіни; перевірка відсутності автоколивань лопаток компрессора (вентилятора);

- термометрування деталей гарячої частини з метою перевірки можливості роботи за необхідної температури газу;

- визначення осьових сил у підшипниках, визначення їх температурного стану;

Визначення рівня вібрацій на корпусі двигуна та на встановлених агрегатах;

- тензометрування трубопроводів зовнішньої обв’язки двигуна;

- ресурсні випробування.

Для того щоб двигун міг бути пред’явлений для проходження державних випробувань (ДВ) і сертифікований, він має успішно пройти ряд спеціальних випробувань.

Після реалізації та експериментальної перевірки доводочних заходів визначається остаточне компонування двигуна, що задовольняє основним показникам ТЗ замовника.

Кінцева мета доведення — провести із задовільною оцінкою чистові випробування на повний ресурс, а також ряд додаткових спеціальних випробувань для того, щоб мати можливість пред’явити дослідний двигун на державні випробування.

Після закінчення доводочних випробувань, коли двигун пройде всі експериментальні перевірки (чистові доводочні випробування), його представляють на державні (міжвідомчі) випробування.

Доводка сучасних ГТД забирає багато сил та коштів. Залежно від складності розроблюваного двигуна та потужності дослідно-конструкторського бюро (ДКБ) на доведення зазвичай йде до 10 років. За цей час виготовляють для доведення від 20 до 35 дослідних екземплярів авіаційних ГТД, кожен з яких коштує в 3-5 разів дорожче серійного зразка (причому 2/3 з них в процесі доведення руйнуються). А характерна ціна 1-го серійного сучасного ГТД залежно від його розміру становить 0,5-1 млн дол. і більше.[5]

Статистикою встановлено, що для завершення доведення ГТД та пред’явлення його на ДВ потрібно напрацювати на всіх дослідних екземплярах від 5-7 до 25 тис. газових годин при стендових випробуваннях і трохи менше при льотних.

1.1.2 Сертифікаційні та державні випробування

До початку льотної експлуатації дослідні двигуни цивільної авіації проходять сертифікацію, основною складовою якої є сертифікаційні випробування. Двигуни військової авіації проходять державні стендові випробування.

Сертифікація - встановлення відповідності двигуна вимогам норм льотної придатності.

Для оцінки виконання правил сертифікації, сертифікаційних робіт, технічною документацією формуються робочі органи.

Сертифікаційні випробування включають кілька груп випробувань:

Калібрувальні випробування дозволяють визначити тягові (потужні) характеристики двигуна у стандартних атмосферних умовах (САУ).

Вібраційні випробування призначені для визначення вібраційних характеристик дисків і валів роторів, робочих та статорних лопаток вентилятора, компресора та турбіни, корпусів та трубопроводів.

Довготривалі 150-годинні випробування передбачають напрацювання на найбільш напружених режимах, відтворення циклічних навантажень, моделювання несприятливих умов роботи.[5]

Експлуатаційні випробування перевіряють роботу двигуна за всіх умов експлуатації.

У програми сертифікаційних випробувань входять також експериментальне визначення характеристик компресора, камери згорання, перевірка міцності корпусів та ін.

Для сертифікації необхідно провести комплекс спеціальних випробувань (випробування з перевірки локалізації лопаток усередині двигуна при обривах, з перевірки роботи двигуна при попаданні сторонніх предметів, при підвищеній температурі газу, в умовах авторотації і т.п).[2]

Державні випробування двигунів військового призначення проводить державна комісія, створювана з представників Замовника та Виконавця.

У завдання державних випробувань входять:

1. Встановлення відповідності параметрів двигуна параметрам, заданим ним у ТЗ.

2. Перевірка двигуна за 150-годинною програмою випробувань.

3. Оцінка рівня впровадження на двигуні уніфікованих та стандартизованих виробів та конструкцій.

4. Оцінка експлуатаційної досконалості двигуна, контролепридатності, ремонтопридатності, обслуговуваності.

5. Встановлення зразка двигуна для серійного виробництва.

Двигун, призначений для державних випробувань, пред’являється комісії в розібраному вигляді після проходження чистових доводочних випробувань. Складання проводиться під наглядом представників комісії.

Тривалі випробування авіаційного ГТД вважаються незадовільними, якщо під час випробувань або при розбиранні після успішно пройденого випробування виявляють деталі які вийшли з ладу, поломка чи пошкодження яких у експлуатації небезпечні чи недопустимі. При цьому тривалі випробування починають знову з самого початку не залежно від того, на якій годині сталася поломка.

Заключним етапом випробувань дослідного ГТД є ДВ, які зазвичай повторюють 150-годинну програму чистових тривалих випробувань. У разі задовільної оцінки вся документація щодо нового ГТД, що передається в серійне виробництво, звіряється за екземпляром, що пройшов ДВ.

За результатами державного випробування комісією складається акт, який після затвердження є основою для серійного виробництва та приймання двигунів замовником. В акті Державної комісії приводяться також переліки зазначених недоліків, які повинні бути усунені розробником у намічені терміни. Двигун, що проходив державні випробування, зберігається як еталон, прийнятий замовником, а основні дані та характеристики, встановлені при випробуваннях, використовуються для складання ТУ на приймання серійних двигунів.

Випробування серійних ГТД

Тут завдання випробувань інше — всебічна перевірка якості серійної продукції яку випускає завод-виробник. Ці випробування регламентуються для кожного двигуна спеціальними ТУ, розробленими відповідними КТБ.

Короткочасні випробування. Кожен двигун, виготовлений на серійному заводі, проходить короткочасні стендові випробування. Ці випробування серійних ГТД прийнято розділяти на пред’явницькі та приймально-здавальні, а також кваліфікаційні.

1. Пред’явницькі випробування проходять усі двигуни, випущені серійно на заводі, а також ремонт, що пройшли після вироблення міжремонтного ресурсу

Призначення пред’явницьких випробувань полягає в обкатці деталей двигуна, у перевірці якості збирання, якості роботи агрегатів двигуна та оцінки відповідності параметрів двигуна заданим в ТУ.

Роботу двигуна перевіряють на всіх експлуатаційних режимах, причому проводиться відповідне налагодження агрегатів. Приймання пред'явницького випробування здійснює відділ технічного контролю (ВТК) підприємства, що виготовляє двигуни.

Результати пред'явницьких випробувань вважаються позитивними, а двигун — пройшов випробування, якщо він був випробуваний у повному обсязі, постановленому програмою і відповідає всім вимогам цієї програми.

У разі виявлення будь-якого дефекту двигуна, що перешкоджає проведенню випробувань, або при відхиленні основних параметрів від норм, обумовлених для пред'явницьких випробувань, пред'явницьке випробування анулюється.

Після пред'явницьких випробувань двигун відправляють на розбирання для огляду та контролю стану його деталей. На огляді присутні працівники ВТК спільно з ПЗ. Двигун, що пройшов пред'явницьке випробування, піддається повному розбиранню та дефектації по чинній нормативній документації документації.

Після дефектації розібраного двигуна ВТК заводу-виробника складають відомість дефектації з висновками з виявлених недоліків.[5]

Заміна забракованих деталей, вузлів (складальних одиниць) та агрегатів проводиться відповідно до інструкції із заміни деталей, складальних одиниць, агрегатів при усуненні дефектів після пред'явницьких випробувань.

Зношування, наклепи, припали та інші зміни у стані деталей та збиральних одиниць після пред'явницьких випробувань повинні відповідати нормам пошкодженості та контрольним зразкам, встановленим для даного типу двигуна. Виявлені дефекти (дозволені) усувають, після чого двигун знову збирають і відправляють на примально-здавальні (контрольні) випробування.

Метою приймально-здавальних (контрольних) випробувань двигуна є:

перевірка відповідності технічним умовам якості повторного (після пред'явницьких випробувань) складання двигуна;

проведення припрацювання деталей та агрегатів, що комплектують в двигун;

налагодження та перевірка регулювання двигуна та перевірка відповідності параметрів та характеристик заданим ТУ;

приймання двигуна ПЗ за актом здачі.

Приймально-здавальні (контрольні) випробування складаються з двох етапів. На першому етапі приймально-здавальних (контрольних) випробувань роботу двигуна повторно перевіряють на всіх експлуатаційних режимах і остаточно налагоджують регулятори, перевіряють дані після регулювання на відповідність ТУ, після чого двигун і його характеристика на всіх режимах пред’являються замовнику. На другому етапі випробування повторюють у присутності ПЗ. Якщо двигун не бракується, оформляється акт здачі двигуна представнику замовника.

Двигун консервують і відправляють для упаковки та відправки замовнику. Таким чином, на відміну від пред’явницьких, приймально-здавальні вирпобування проводять у присутності як представника ВТК, так і ПЗ.[2]

Після приймально-здавальних випробувань проводяться внутрішня консервація двигуна та інші роботи, передбачені технічною документацією.

Для двигунів, що знаходяться в серійному виробництві, допускається проведення спільних (пред’явницьких та приймально-здавальних) випробувань.

Скорочення обсягів та трудомісткості пред’явницьких та приймально-здавальних випробувань без зниження їх інформативності та якості проводиться в наступних напрямках:

- більш повне використання можливостей автоматизованих інформаційно-вимірювальних систем стендів, удосконалення їх програмного забезпечення та методик обробки результатів випробувань, що дозволяє отримувати необхідну інформацію при меншій кількості режимів в програмі випробувань;

- виконання контрольних операцій під час випробувань, з мінімальним числом режимів, що використовуються тільки для контролю, у тому числі і спільного проведення першого та другого етапів приймальних випробувань;

- комплексування операцій та вдосконалення методик та їх виконання, у тому числі проведення їх на режимах з меншою витратою палива, виключення повторів із програми випробувань;

- поступове зменшення кількості двигунів, що проходять спеціальні випробування, включені до програми приймально-здавальних випробувань (перевірка ГДС, припрацювання приводів агрегатів повітряного судна під завантаженням, перевірка границь запуску та ін.), аж до повного припинення таких спеціальних випробувань;

- скорочення обсягу розбирання двигунів після пред'явницьких випробувань за рахунок переходу на часткове (повузлове, модульне) розбирання;

- перехід на одноразове складання та проведення приймально-здавальних випробувань при одночасному суміщенні окремих видів перевірок, що проводяться при пред'явницьких випробуваннях.

Перехід на одноразове складання та суміщені пред'явницькі та приймально-здавальні випробування можливий за таких умов:

- відсутності на двигунах несправностей при експлуатації, які можуть бути виявлені тільки при розбиранні та дефектації після пред'явницьких випробуваннях;

- стабільному виробництві та ремонті двигунів;

- відсутність при пред'явницьких і приймально-здавальних випробуваннях несправностей, які не можуть бути виявлені та усунені без розбирання двигуна або його вузлів (складальних одиниць);

- контролепридатності двигуна та наявності методів і засобів для контроля та діагностики технічного стану двигуна без його розбирання;

- наявності переліку та характеристик діагностичних ознак, отриманних у процесі доводки та підтверджених експлуатацією, що дозволяють оцінювати стан двигуна;

- наявності позитивного досвіду роботи з випуску двигунів з повузлового (модульною) розбиранням після пред'явницьких випробувань;

- застосування, у разі потреби, попередньої обкатки окремих вузлів, модулів та агрегатів до встановлення їх на двигун;

- наявності позитивного досвіду використання одноразового складання при доводкі модифікованих двигунів на етапі дослідно-конструкторської роботи.

Зменшення кількості двигунів, що проходять спеціальні випробування в серійному виробництві, можливо за таких умов:

- стабільному виробництві та ремонті двигунів;

- позитивні результати проведених раніше спеціальних випробувань;

- відсутності в експлуатації та при стендових випробуваннях відмов та дефектів, пов’язаних з характеристиками, що перевіряються спеціальними випробуваннями.

Для контролю виробництва двигунів одноразового складання повинно передбачатись контрольне розбирання після випробування двигуна від партії, об’єм якої визначається розробником і виробником спільно з ПЗ.[2]

1.1.3 Кваліфікаційні випробування.

Метою кваліфікаційних випробувань є:

- перевірка відповідності двигунів вимогам конструкторської документації;

- оцінка проведених заходів щодо усунення недоліків, виявлених на Державних випробуваннях;

- перевірка розробленого технологічного процесу, що забезпечує стабільність якості продукції;

- визначення готовності виробництва до випуску двигунів у заданому обсязі.

Кваліфікаційні випробування у всіх типів двигунів проводяться для настановної серії певної кількості виготовлених двигунів у процесі освоєння їхнього виробництва. Двигун для кваліфікаційних випробувань обирає ПЗ у присутності працівників ВТК з 2-5 двигунів, прийнятих за результатами приймально-здавальних випробувань.

Якщо двигун пройшов кваліфікаційні випробування, то якість партії двигунів, для якої проводилися випробування (настановної серії), а також можливість подальшого виготовлення та приймання двигунів за тією ж технологічною документацією, за якою виготовили випробуваний двигун, вважаються підтвердженими.

Кваліфікаційні випробування вважають незадовільними за наступних умов:

- невідповідності основних параметрів двигуна ТУ;

- вихід з ладу двигуна в ході випробувань;

- відмова агрегатів та комплектуючих, які можуть визвати аварійну ситуацію;

- виявлення під час огляду та дефектації деталей двигуна, агрегатів та інших покупних комплектуючих виробів;

- дефектів аварійного характеру, що впливають на льотну придатність, або дефектів, які можуть призвести до дострокового розбирання двигуна.

У цьому випадку виробник і КТБ-розробника спільно з ПЗ розробляють та здійснюють заходи щодо усунення недоліків та попередження їх появи при серійному виробництві двигунів.[5]

1.1.5 Періодичні випробування. Загальне напрацювання двигуна в процесі пред’явницьких і приймальних випробувань зазвичай не перевищує 4..5 год. Такого напрацювання недостатньо для перевірки надійності роботи ГТД згідно гарантованого терміну роботи.

Тому для повноцінної перевірки якості серійного виробництва ГТД проводяться періодичні випробування на вибіркових двигунах, що визначаються ПЗ.

Кількість періодичних випробувань залежно від обсягу річного випуску має становити: при річному випуску менше 50 двигунів даного типу - одне періодичне випробування у два роки; при річному випуску від 50 до 150 двигунів - одне періодичне випробування в рік; при річному випуску понад 150 двигунів - до двох періодичних випробувань на рік, якщо періодичні випробування не скасовані спеціальним рішенням комісії.

Ця група випробувань поділяється на три види:

- заводські періодичні випробування з перевірки ресурсу та даних (комісійі, квартальні або піврічні). Періодичні випробування проводяться в обсязі та послідовності, встановлених програмою випробувань.

Типові випробування проходять за аналогічною програмою, проте їхня мета інша — перевірка допустимості змін, які були введені серійним заводом за минулий період. Необхідність конструктивних і технологічних змін виникає у зв'язку зі збільшенням ресурсу, підвищенням надійності, а також при вдосконаленні та здешевленні виробництва на серійному заводі. Це одне з основних завдань серійного виробництва - знизити його трудомісткість та вартість. Технологічні зміни обов'язково узгоджуються з розробником та замовником.

Спеціальні (наприклад, висотно-швидкісні) випробування. У них перевіряють відповідність висотних даних серійного двигуна стендової контрольної цифри. Ці випробування проводять у термобарокамері або аеродинамічній трубі. До спеціальних випробувань також відносяться випробування з перевірки газодинамічної стійкості, з наддувом та підігрівом повітря на вході та ряд інших.

Періодичні випробування для двигунів, що мають ресурс не більше 600 год. проводяться за програмою еквівалентно-циклічних випробувань. При цьому кількість циклів, напрацювання в циклах, на режимах вище максимального, а також кількість запусків повинні відповідати встановленому ресурсу під час роботи за типовим польотним циклом. Програмою випробувань встановлюється величина мінімального сумарного напрацювання за періодичне випробування. Для двигунів, які мають ресурс більше 600 год, періодичні випробування проводяться за програмою еквівалентно-циклічних випробувань. При цьому напрацювання в циклах, на режимах вище максимально-тривалого, змінних, а також кількість запусків мають відповідати встановленому ресурсу, але не більше ніж за 1200 год роботи з типового польотного циклу. Програмою випробувань

встановлюється величина мінімального сумарного напрацювання за періодичне випробування.[5]

Для підтвердження ресурсу під час експлуатації за технічним станом одне з періодичних випробувань проводиться на встановлений ресурс з урахуванням експлуатації за технічним станом.

При стабільному виробництві двигунів, відповідності їх нормам безвідмовності, починаючи з 3-го року випуску, такі випробування за погодженням розробником, виробником та ПЗ можуть не проводитися.

Двигун для проведення періодичних випробувань вибирається з числа 2-5 двигунів, виготовлених у контрольованому календарному періоді (або з контрольованої кількості), що пройшли приймальні випробування.

Перерви між етапами мають визначатися часом, необхідним для проведення огляду двигуна, виконання регламентних робіт і робіт з обладнання стенду. У разі невідповідності основних даних двигуна заданим у ТУ (пов’язаних із забрудненням газоповітряного тракту двигуна) допускається за погодженням з ПЗ промивання газоповітряного тракту двигуна відповідно до інструкції розробника з подальшою перевіркою параметрів двигуна.

Періодичні випробування вважають незадовільними у випадках:

- невідповідності основних параметрів (технічних характеристик) двигуна зазначеними в ТУ;

- невідповідності норм параметрів за дросельною характеристикою після випробувань;

- виходу з ладу двигуна до закінчення випробувань;

- відмова агрегатів та комплектуючих виробів двигуна, які можуть бути передумовою аварійної ситуації;

- виявлення дефектів аварійного характеру (що впливають на льотну придатність) при огляді та дефектації деталей двигуна, агрегатів та інших покупних комплектуючих виробів або дефектів, які можуть призвести до достроковому зняттю двигуна в експлуатації.

При незадовільних результатах періодичних випробувань виробник спільно з розробником і ПЗ при зобов’язані:

- провести дослідження причин виявлених дефектів;

- розробити ефективні заходи, що забезпечують усунення виявлених дефектів;

- провести перевірку ефективності проведених випробувань;

- провести повторні періодичні випробування.

При незадовільних результатах періодичних випробувань усі прийняті та невідвантажені двигуни повертаються виробнику на доопрацювання (заміну), а всі прийняті та відвантажені двигуни за контрольований календарний період, у яких можуть бути дефекти, виявлені при періодичних випробуваннях, повинні бути доопрацьовані або замінені на придатні у порядку, визначеному спільним рішенням. Повторні випробування проводяться у повному обсязі періодичних випробувань на доопрацьованих або нововиготовлених двигунах після виконання заходів щодо усунення дефектів. При цьому разом з повідомленням про пред’явлення двигуна мають бути надані матеріали, що підтверджують усунення дефектів, виявлених при періодичних випробуваннях, та вжиття заходів щодо їх усунення.[2]

1.2 Огляд обладнання та стендів, що застосовуються

Експериментальне дослідження авіаційних ГТД проводять у випробувальних цехах, у випробувальних станціях та у випробувальних лабораторіях заводів та НІЦ.

Для випробувань ГТД та його систем на заводах-виробниках двигунів створюються випробувальні станції, оснащені спеціальними стендами. У склад випробувальної станції (рис.1.1) входять стенди, що містять у своєму складі: бокси, в яких встановлюються об’єкти випробування та обладнання, необхідне для проведення випробувань, що примикають до боксів допоміжні технологічні приміщення, де розміщені частина вимірювального обладнання, кабіна управління, системи забезпечення паливом, маслом, стисненим повітрям,

електроенергією та деякі інші. Основною виробничою одиницею випробувальної станції є випробувальний стенд.

Критеріями у формуванні випробувальної бази підприємства (випробуваної станції) як єдиного інструменту для забезпечення контролю якості виконаної розробки та розрахунків, виготовленої продукції, для проведення досліджень на підтвердження або спростування ідеї, забезпечення проведення пошукових досліджень, з метою пізнання або формування науково-технічного допрацювання, є: достатність, виходячи з програми виробництва або розробок, досконаліть та діапазон можливостей, універсальність та систематичність використання, в тому числі і в прогнозованій перспективі (закриті стенди, відкритий стенд, термобарокамери, кліматичні стенди, лабораторії, стенди напівнатурного моделювання, розгінні стенди та ін.).

Типовий випробувальний стенд [2] (рис.1.1) зазвичай складається з випробовувального боксу, кабіни спостереження та допоміжного технологічного приміщення. У випробувальному боксі на верстаті розміщується випробуваний двигун 1. Вузли кріплення ГТД на верстаті ті ж, що і на ЛА. Якщо випробовується двигун прямої реакції, верстат являє собою силовимірювальний пристрій. Станина такого пристрою 3 нерухомо зміцнюється на потужному фундаменті 4, який монтується на вібропоглинаючій підставі 5. Фундамент верстата відокремлений від фундаменту будівлі боксу повітряним зазором, що разом із вібропоглинаючою основою дозволяє практично виключити вібраційні навантаження на конструкцію будівлі. До станини на гнучких сталевих стрічках 6 підвішується рухома платформа 7, на якій власне встановлюється двигун. Під дією сили тяги двигун разом з рухомою плаформою прагне переміститися у напрямі дії тяги. При цьому сила тяги сприймається силовимірювальним датчиком 2.

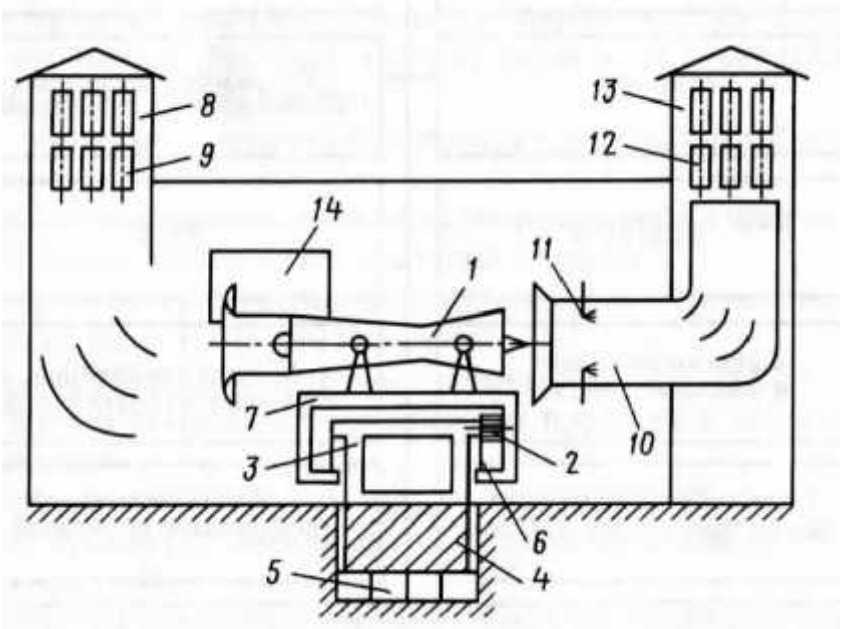


Рис.1.1 Схема випробувального стенду

Робоче тіло двигуна - повітря - потрапляє в бокс через вхідну шахту шумоізоляції. Відпрацьовані гази через ежекторну вихлопну трубу 10, де розміщуються форсунки подачі води 11 для охолодження газового потоку, далі через вихлопну шахту гази 13 видаляються в атмосферу.

При випробуванні ГТД на силовимірювальний верстат додатково монтують пристрій для вимірювання крутного моменту (гідрогальмо, електричне гальмо і т.п.).

У ряді випадків ГТД, а також двигуни з вільною турбіною випробовують на жорстких верстатах, обладнаних різними гальмами без прямого вимірювання тяги.

Глушники аеродинамічного шуму є найчастіше спеціальними лабіринтами або камерами, утворені щитами, пластинами або циліндрами (9, 12) з перфорованого заліза, які заповнюються шумоізоляційними матеріалами типу скловати.

Застосовують такі компонування боксів: горизонтальну (рис.1.2 а), Г-подібну (рис.1.2, б і в) та П-подібну (рис.1.2, г). Кожна з цих схем має свої перевагами та недоліками.

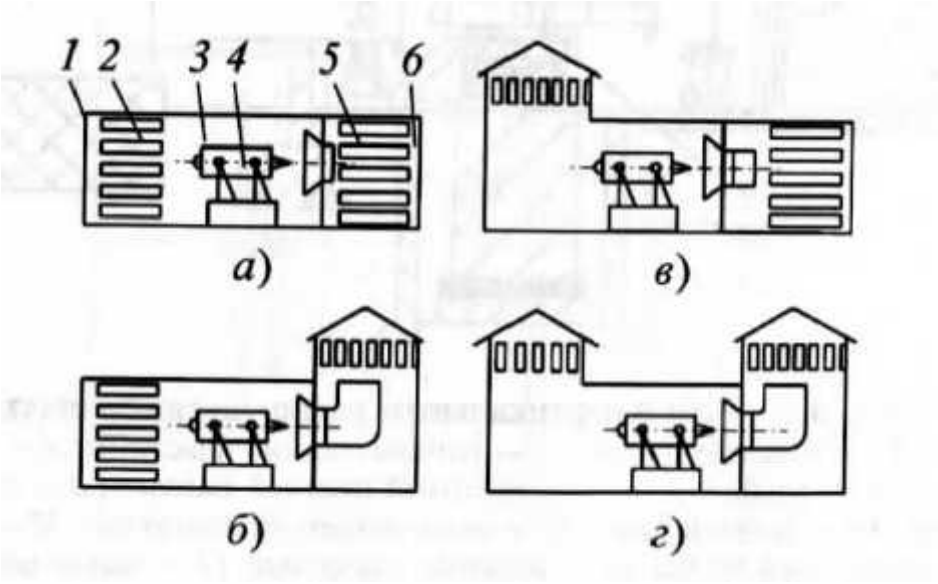


Рис.1.2 Види оформлення входу та виходу випробувальних стендів:
1 – вхідна частина; 2 – елементи шумоізоляції на вході; 3 – центральна частина; 4 – ГТД що випробовується; 5 – елементи шумоізоляції на виході; 6 – вихлопна частина.

РОЗДІЛ 2 ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТА ДАТЧИКИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ АВТОМАТИЗОВАНИХ ВИПРОБУВАНЬ АВІАДВИГУНІВ. ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ ВИПРОБУВАНЬ.

2.1 Вимірювальні перетворювачі та датчики, що використовуються при автоматизованих випробувань авіадвигунів.

Автоматизовані випробування авіадвигунів є важливою частиною процесу розробки та виготовлення авіаційних двигунів. У цих випробуваннях використовуються різноманітні вимірювальні перетворювачі та датчики, які грають критичну роль у зборі даних та аналізі продуктивності двигунів. Розглянемо основні види датчиків які застосовуються:

Датчики тиску: Датчики тиску встановлюються в різних точках двигуна для вимірювання тиску в повітряному та рідинному потоці. Ця інформація допомагає визначити ефективність спалювання пального і стан компресора двигуна.

Датчики температури: Датчики температури контролюють температуру в різних частинах двигуна. Вони допомагають виявляти перегріви та забезпечують оптимальну температуру для роботи двигуна.

Датчики обертань (тахометри): Ці датчики вимірюють обертання ротора і валів двигуна. Інформація, зібрана цими датчиками, важлива для оцінки швидкості та ступеня зносу рухомих частин двигуна.

Датчики вібрацій: Датчики вібрацій використовуються для вимірювання вібрацій та коливань в різних точках двигуна. Вони допомагають виявляти можливі дефекти та невирішені проблеми в роботі двигуна.

Датчики викидів: Датчики викидів допомагають вимірювати та аналізувати викиди шкідливих речовин від двигуна. Це важливо для дотримання норм екологічних стандартів.

Датчики швидкості потоку повітря (зонди): Вони встановлюються на вході та виході з двигуна для вимірювання швидкості потоку повітря. Ця інформація допомагає визначити ефективність системи подачі повітря в двигун.

Датчики зносу та стану матеріалів: Для оцінки зносу та стану матеріалів у внутрішніх деталях двигуна використовуються датчики, які здатні виявляти зміни в механічних властивостях.

Ці вимірювальні перетворювачі та датчики роблять важливу роботу, забезпечуючи інженерам необхідну інформацію для аналізу та вдосконалення авіадвигунів. Вони роблять випробування більш точними та надійними, а це в свою чергу сприяє покращенню безпеки та ефективності авіаційних двигунів.

2.1.1 Датчики тиску.

Датчики тиску в авіаційних системах призначені для вимірювання двох видів тиску – статичного $P_{ст}$ і повного $P_{п}$. Вони перетворюють ці тиски на електричні сигнали, які потім використовуються для визначення параметрів руху повітряного судна. Датчики тиску є важливими компонентами для систем керування та навігації.

Параметри руху повітряного судна, такі як швидкість та висота, можуть бути однозначно визначені за допомогою статичного і повного тиску. Тобто, знання цих тисків дозволяє системі керування точно визначити, де знаходиться повітряне судно та як воно рухається.

Датчики тиску відіграють критичну роль у забезпеченні надійності та точності авіаційних систем. Технічні характеристики цих датчиків, такі як точність вимірювання, діапазони вимірювань, надійність та довговічність, є важливими для забезпечення безпеки польотів. Крім того, їх габарити та якість

вихідної інформації впливають на загальну ефективність систем управління та навігації.

Для кращого розуміння та аналізу датчиків можна використовувати спрощену схему, що складається з трьох блоків. Ця схема дозволяє розглядати датчики як частину більшої системи, розгортати їх функції та аналізувати їх роботу окремо.

Перший блок це вхідний сигнал, який представляє собою виміряні дані тиску. Другий блок відповідає за обробку цих даних, включаючи їх калібрування та конвертацію в величини, зрозумілі для системи. Третій блок генерує вихідний сигнал, який може бути використаний для подальшого аналізу або управління.

Ця трьохблокова схема спрощує аналіз та розуміння роботи датчиків, розділяючи їх функції на окремі етапи. Такий підхід допомагає вдосконалити датчики, поліпшити їх точність та забезпечити надійність вимірювань.

Рис.2.1 Структурна схема датчику тиску:

P – тиск що вимірюється; 1 – первинний перетворювач; 2 – вторинний перетворювач; 3-блок обробки сигналів; X – переміщення; U – електричний сигнал.

У світовій авіаційній індустрії існує кілька різних типів датчиків тиску, які використовуються для різних цілей. Ці датчики можна розділити на кілька груп в залежності від їхнього принципу роботи та типу використаного первинного перетворювача, який перетворює тиск в вимірювану величину:

Потенціометричні датчики тиску: Вони використовують потенціометр (електричний резистор) як первинний перетворювач. Зміна тиску впливає на опір потенціометра, що дозволяє вимірювати тиск.

Індуктивні датчики тиску: Ці датчики використовують принцип індукції для вимірювання тиску. Зміна тиску впливає на індуктивність датчика, і це дозволяє вимірювати тиск.

Ємкісні датчики тиску: Вони базуються на зміні ємності датчика при зміні тиску. Збільшення або зменшення тиску змінює ємність, що використовується для вимірювань.

Вібраційно-частотні датчики тиску: Ці датчики використовують коливання або зміни частоти як величини, пов’язані з тиском. Зміна тиску впливає на характеристики коливань, що вимірюються.

Компенсаційні датчики тиску: Вони використовують принцип компенсації, де тиск порівнюється з певною відомою величиною, такою як атмосферний тиск. Зміна тиску порівнюється з цим відомим значенням для вимірювань.

Всі ці датчики мають спільний елемент - первинний перетворювач, який перетворює зміни тиску в електричні сигнали або інші вимірювані величини. Цей первинний перетворювач може бути різними формами, такими як плоска пружна мембрана (рис.2.2), мембранна коробка або сильфон (рис.2.3). Він грає ключову роль у вимірюваннях тиску та надає можливість отримувати корисну інформацію для авіаційних систем.

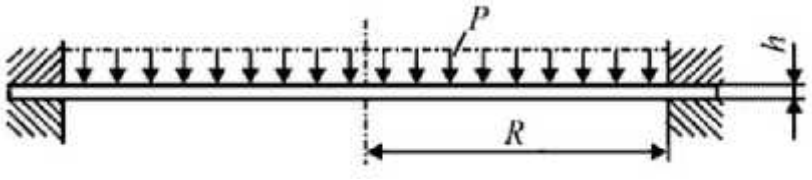


Рис.2.2 Плоска пружна мембрана: R- радіус; h –товщина.

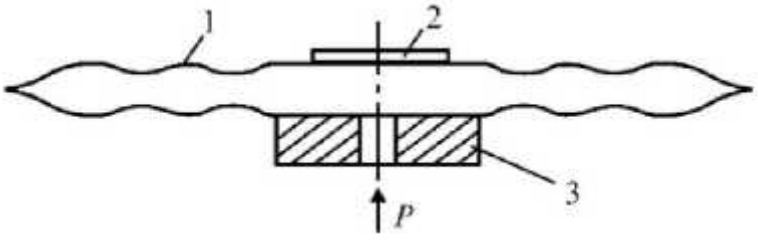


Рис.2.3 Мембранна коробка: 1 – пружна частина коробки; 2 – верхня частина мембранної коробки; 3 – нижня частина мембранної коробки.

У будь-якому датчику тиску найважливішою частиною є його чутливий елемент. Цей елемент має дві основні характеристики:

Залежність переміщення від тиску $X = f(P)$: Ця характеристика показує, як змінюється положення чутливого елемента відносно тиску. Іншими словами, вона вказує, наскільки змінюється положення елемента при зміні тиску.

Залежність сили від тиску $F = f(P)$: Ця характеристика показує, як сила, яку використовують для вимірювань, змінюється в залежності від тиску. Вона вказує на те, як змінюється сила, яка застосовується до чутливого елемента, при зміні тиску.

На (Рис.2.4) показані тягові характеристики позиційного чутливого елемента відповідно до першого рівняння. Що стосується залежності сили від тиску, то її можна виразити через ефективну площу сильфона.

Важливо відзначити, що кожен пружний чутливий елемент повинен працювати в межах закону Гука, коли сила пружності пропорційна зміні переміщення матеріалу. Це забезпечує стабільні та передбачувані вимірювання тиску.

З похибками пружних чутливих елементів пов’язані такі аспекти:

Пружна післядія: Ця похибка виникає через затримку в реакції чутливого елемента на зміни тиску. Зазвичай, чим більше чутливий елемент має масу або інерцію, тим більше може бути затримка в реакції. Для зменшення цієї похибки важливо використовувати легкі та маломасові матеріали для чутливих елементів.

Гістерезис: Гістерезис виникає через внутрішні властивості матеріалу чутливого елемента, які змінюються залежно від напрямку зміни тиску. Ця похибка може бути зменшена шляхом використання спеціальних матеріалів та конструкцій, що мінімізують гістерезис.

Температурна похибка: Температурні зміни можуть впливати на внутрішні властивості матеріалу чутливого елемента та виводити його з робочого

діапазону. Ця похибка вимагає використання термокомпенсації та термостабільних матеріалів для чутливих елементів.

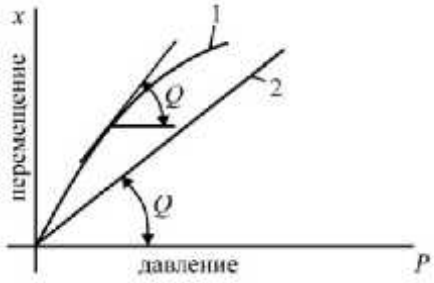


Рис.2.4 – Характеристика пружного перетворювача тиску. 1 – нелінійна; 2 – лінійна; Q – кут нахилу.

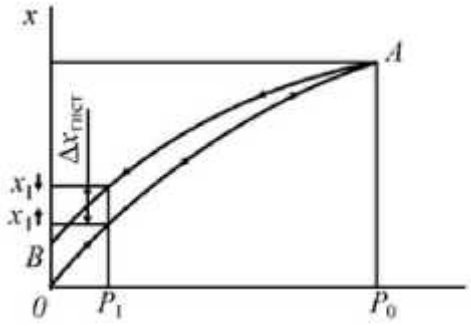


Рис.2.5 – Петля Гістерезиса

Температурна похибка чутливого елемента (ЧЕ) виникає через зміну жорсткості матеріалу, з якого виготовлений ЧЕ, при зміні температури. Якщо матеріал має великий температурний коефіцієнт, то температурна похибка буде більшою.

У випадку металевих ЧЕ, які часто використовуються для створення датчиків тиску, основними матеріалами є бронза (наприклад, берилієва БрБ2-2,5) та нержавіюча сталь (наприклад, 1Х18Н9Т). Ці матеріали використовуються для створення чутливих елементів манометричного і анероїдного типів, які ґрунтуються на пружній деформації матеріалу під впливом різниці тиску (що призводить до переміщення) або на виникненні концентрованої сили внаслідок різниці тиску (як це відбувається в сильфоні).

2.1.2 Датчики температури

Вимірювання температури в ГТД вимагає використання спеціальних термометрів, які можуть працювати в умовах високих температур та агресивних середовищ. Найбільш поширеними типами термометрів є термоперетворювачі опору і термопари.

Термоперетворювачі опору (ТО) - це пристрої, які змінюють свій електричний опір під впливом зміни температури. Вони використовуються для перетворення температурних змін у відповідні зміни електричного опору провідника.

Рис.2.6 – Схема підключення засобу вимірювання до кінців термопари.

Існують два основних типи ТО:

Металеві ТО, де чутливий елемент виготовлений із металічного провідника, такого як платина, мідь або нікель. Платинові ТО (ТОП) є найточнішими і можуть працювати в широкому діапазоні температур, включаючи дуже низькі і дуже високі значення. Мідні (ТОМ) і нікелеві (ТОН) ТО використовуються в обмеженому температурному діапазоні через їхню властивість окислюватися при високих температурах.

Напівпровідникові ТО, які використовують напівпровідникові матеріали і відзначаються високою чутливістю до температури. Їхня характеристика не лінійна і залежить від температури. Такі ТО використовуються для вимірювань в обмежених діапазонах температур і в точках з високою точністю.

Для подальшого розуміння вибору та застосування термометрів в авіадвигунах, давайте детальніше розглянемо металеві ТО та напівпровідникові ТО:

Металеві ТО:

- платинові ТО (ТОП): Платина є одним з найкращих матеріалів для виготовлення чутливих елементів ТО. Вона дуже стійка до окислення і зберігає стабільну електричну опірність протягом тривалого часу. Тому платинові ТОП працюють надзвичайно точно в широкому діапазоні температур, включаючи низькі та високі значення.

- Мідні ТО (ТОМ): Мідь також має високу ступінь чистоти, що дозволяє отримати дуже точний опір. Проте мідь схильна до окислення при високих температурах, тому ТОМ використовують в обмеженому температурному діапазоні.

- Нікелеві ТО (ТОН): Нікель володіє високим температурним коефіцієнтом опору і практично лінійною залежністю від температури в діапазоні до 400 °С. Проте його сильна окиснюваність обмежує використання ТОН для вимірювань високих температур.

Напівпровідникові ТО (термістори):

Термістори мають вищу чутливість до температури, але їхні характеристики не лінійні. Це означає, що залежність опору від температури відмінна від лінійної і потребує додаткової корекції для точних вимірювань.

Термістори часто використовуються для вимірювань в обмежених температурних межах і вимагають певної обережності при їхньому застосуванні через їхню високу нелінійність та нестабільність в часі.

Усі ці ТО мають свої переваги і обмеження, тому вибір конкретного типу залежить від вимог до точності та діапазону вимірювань температури. Термометри з металевими ТО зазвичай використовуються для вимірювань у великому діапазоні температур, включаючи екстремальні значення, тоді як термістори можуть бути корисними для вимірювань в обмеженому температурному діапазоні з високою чутливістю.

2.1.3 Датчики обертань (тахометри)

Під час випробування ГТД важно виміряти його обертові частоти, оскільки це визначає режим роботи двигуна і допомагає оцінити його термодинамічні характеристики. Для цього використовуються різні датчики частоти обертання, зазвичай електричні, які можна поділити на кілька типів: оптичні, індукційні, імпульсні та генераторні.

Оптичний (фотоелектричний) метод: У цьому методі використовується диск з отворами або прорізами, який розміщений на валу. При обертанні валу світловий промінь від джерела світла проходить через отвори і потрапляє на фотоелемент. При кожному обертанні диска фотоелемент генерує імпульси, частота яких пропорційна швидкості обертання валу. Кількість отворів на диску впливає на частоту імпульсів.

Для оптичного (фотоелектричного) методу вимірювання частоти обертання використовується наступна формула:

$$n = \frac{N * 60}{kt},$$

де:

N – число імпульсів за інтервал часу t;

k - кількість отворів або прорізів на диску.

Ця формула дозволяє розрахувати обертову частоту валу за допомогою виміряної частоти імпульсів та кількості отворів або прорізів на диску.

Індукційний метод: В цьому методі використовується диск, виготовлений з магнітного матеріалу, і вимірювальна котушка з магнітним сердечником. На торці диска робляться прорізи або виступи. Під час обертання диска змінюється магнітне поле, що індукує електричний струм у вимірювальній котушці. Частота цього струму також пропорційна частоті обертання валу та кількості прорізів або виступів на диску. [2]

Основні компоненти індукційного датчика частоти обертання включають:

- Диск з магнітними прорізами або виступами: Цей диск прикріплений до вала або об’єкта, який обертається. Прорізи або виступи розташовані рівномірно по об’ємному куту і створюють змінюючеся магнітне поле під час обертання;

- Індукційна котушка: Індукційна котушка розміщена поруч з диском і має магнітний сердечник. Зміна магнітного поля через котушку призводить до індукції електричного струму в котушці;

- Вимірювальний пристрій: Електричний струм, який індукується в індукційній котушці, подається на вимірювальний пристрій, який перетворює імпульси струму на частоту обертання.

Робочий принцип індукційного методу наступний:

Під час обертання диска з магнітними прорізами або виступами змінюється магнітне поле біля індукційної котушки. Ця зміна магнітного поля індукує електричний струм в котушці. Частота індукованого струму відповідає частоті обертання диска та, отже, об’єкта, який обертається.

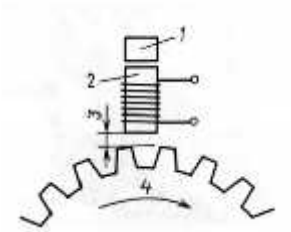


Рис.2.7 – Принцип дії індукційного датчика: 1 – постійний магніт; 2 – серцевина; 3 – повітряний зазор; 4 – шестерня.

Формула для розрахунку частоти обертання (N) за допомогою індукційного методу базується на числі імпульсів (n), що генеруються індукційною котушкою, та часі (t), протягом якого проводиться вимірювання:

$$N = \frac{n}{t},$$

де:

N - частота обертання (в обертах за одиницю часу, зазвичай в секунду);

n - кількість імпульсів, згенерованих індукційною котушкою під час обертання диска або об’єкта;

t - час, протягом якого вимірюється кількість імпульсів.

Ця формула дозволяє обчислити частоту обертання на основі кількості імпульсів та тривалості вимірювання.[2]

Індукційний метод вимірювання частоти обертання має такі переваги:

- Висока стійкість і надійність, оскільки він не вимагає фізичного контакту між елементами датчика і об’єктом обертання;

- Можливість вимірювати високі обертові частоти;

- Можливість вимірювати частоту обертання в умовах пилу, бруду та агресивних середовищ.

Завдяки цим перевагам індукційний метод широко використовується для вимірювання частоти обертання в різних промислових застосуваннях, включаючи випробування двигунів та машинобудування.

Обидва ці методи дозволяють виміряти частоту обертання двигуна, і вибір методу залежить від конкретних вимог і умов випробувань.

2.1.4 Датчики вібрацій

В віброметрії використовують два основних принципи для вимірювань: динамічний і кінематичний. Динамічний принцип вимірювання використовується в датчиках інерційної дії, які призначені для вимірювання абсолютних значень параметрів вібрації на об’єктах дослідження.

У випадку динамічного принципу вимірювання, датчики сприймають абсолютні значення вібраційних параметрів об’єкта. Вони вимірюють напрямленість та інтенсивність вібрацій, не враховуючи початкового положення точки відліку.

Кінематичний принцип вимірювання використовується в безконтактних датчиках. Тут вимірюються зміни координат точок на об’єктах у часі відносно статичної системи координат, яка залишається нерухомою під час вібрацій. Цей принцип дозволяє вимірювати зміни відносних позицій точок об’єкта під час коливань.

Класифікація датчиків абсолютної вібрації базується на фізичних принципах, які використовуються для перетворення вимірюваних параметрів. З іншого боку, датчики відносної вібрації класифікуються в залежності від тих фізичних принципів, які вони використовують для вимірювань.

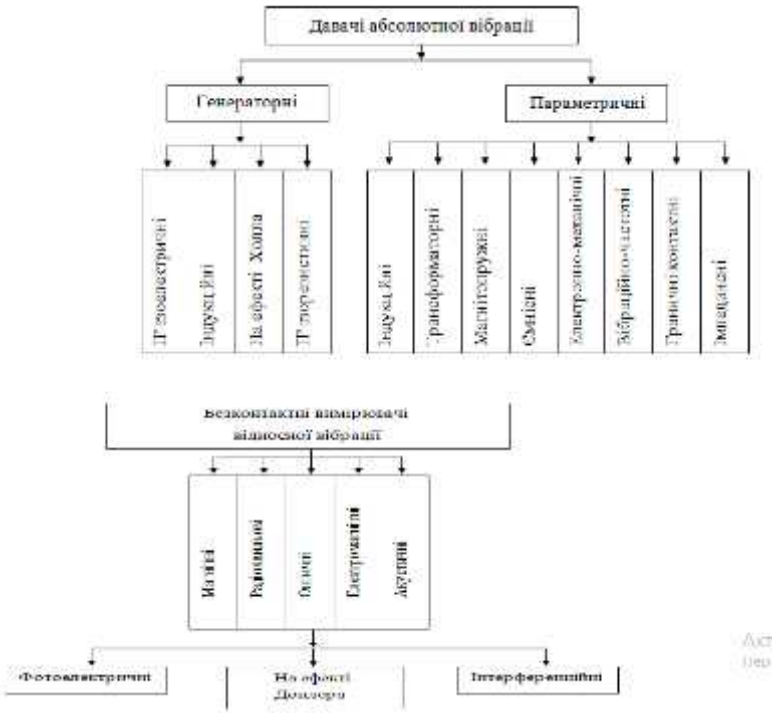


Рис.2.8 - класифікація датчиків відносної вібрації в залежності від фізичних принципів, які вони використовують для вимірювань.

З Рис.2.8 видно, що існує два класи перетворювачів, які перетворюють абсолютну вібрацію в електричні сигнали.

Генератори, які перетворюють енергію механічних коливань в електричну енергію, та параметричні, які перетворюють енергію механічних коливань в електричну енергію.

Генератори, які перетворюють енергію механічних коливань в електричну енергію та параметричні, які перетворюють механічні коливання в електричну енергію.

Механічні коливання перетворюються в параметри електричного кола,наприклад, індуктивність, ємність, імпеданс, частота і фазовий зсув.

П’єзоелектричні датчики вібрації є найпоширенішим типом датчиків абсолютної вібрації.

П’єзоелектричні датчики вібрації. П’єзоелектричні датчики вібрації характеризуються малими розмірами, широким частотним діапазоном, динамічним діапазоном і низькими коефіцієнтами впливу зовнішніх факторів (магнітних полів, електричних полів, акустичних полів, звукових хвиль і т.д.).

Характеризуються низькими коефіцієнтами впливу зовнішніх факторів (магнітних полів, електричних полів, звукового тиску, деформації об’єкта вимірювання тощо).

Принцип дії п’єзоелектричних датчиків заснований на використанні зовнішніх сил. Кристали та п’єзоелектрична кераміка генерують електричний заряд. Найпоширенішим п’єзоелектричним матеріалом є кварц, турмалін, ніобат літію, титанат свинцю, цирконат, титанат вісмуту, оксид цинку тощо.

Один з основних факторів, що обмежують використання п’єзоелектричних датчиків, є робоча температура. При перевищенні певних температурних меж п’єзоелемент втрачає частину своєї робочої температури. Ефективність перетворення датчика знижується. При досягненні точки Кюрі п’єзоелектричного матеріалу поляризація повністю зникає, датчик виходить з ладу.

Обмеження у використанні п’єзоелектричних датчиків залежать від наступного: ймовірність розтріскування п’єзоелектричного матеріалу повинна бути зведена до мінімуму, щоб мінімізувати вплив на вібруючий об’єкт.

Резонансна частота п’єзоелектричних датчиків змінюється під впливом маси датчика.

Оптичні датчики найчастіше використовуються в безконтактних вимірювальних приладах.

Вібрація поділяється на амплітудну і частотну. До методів вимірювання амплітуди відносяться фотоелектричні (або модуляція світла) та інтерферометричні методи.[3]

2.1.5 Датчики витрати палива.

Датчики вимірювання витрати палива відіграють важливу роль у випробуваннях газотурбінних двигунів, де точність вимірювань є вирішальною.

Витрата палива - це кількість рідини або газу, яка проходить через поперечний переріз потоку за одиницю часу. Вимірювання можуть використовувати об’ємну одиницю (кубічні метри на секунду) або масову одиницю (кілограми на секунду).

Важливість вимірювань витрати полягає в тому, що вона є ключовою для оцінки характеристик двигуна. Під час випробувань газотурбінного двигуна вимірюють миттєву витрату палива, яка представляє собою значення витрати в конкретний момент часу. Це важливо для аналізу різних режимів роботи двигуна, таких як запуск, прийомистість і регулювання газу.

Крім миттєвих вимірювань, також використовують середню витрату палива, яка є усередненою величиною витрати протягом певного періоду часу. Це корисно при визначенні загальних характеристик двигуна.

Існують різні типи вимірювальних пристроїв для вимірювання витрати рідини та газу, такі як турбінні витратоміри, електромагнітні витратоміри, ультразвукові витратоміри і інерційні витратоміри. Турбінні витратоміри вважаються одними з найточніших для вимірювання витрати рідини. Вони використовують турбінку, яка обертається під дією протікання рідини та передає цей оберт на вимірювальний пристрій.

Крім турбінних витратомірів, також використовують методи вимірювання, засновані на перепаді тиску на спеціальних пристроях, які звужують потік. Цей метод полягає в тому, що, завдяки звуженню потоку, частина потенційної енергії перетворюється на кінетичну, що підвищує середню швидкість потоку та знижує статичний тиск. Різниця статичного тиску перед і після звуження може використовуватися для визначення витрати рідини або газу.

Ці методи вимірювання витрати палива мають високу точність і широкий діапазон вимірювань, і вони широко використовуються в стендових випробуваннях газотурбінних двигунів.

Турбінні витратоміри (Рис.2.9) складаються з турбіни 3, індуктивної котушки 4 та реєструючого приладу 1. Турбіна 3 може бути осьовою або тангенціальною лопатевою турбінкою і розташована в потоці рідини або газу.

Під дією протікання рідини (газу), турбінка обертається, а індуктивна котушка 4 генерує сигнал, який залежить від швидкості обертання турбінки. Цей сигнал подається на реєструючий прилад 1, який перетворює його на витрату рідини або газу. Турбінні витратоміри відзначаються високою точністю вимірювань, а під час індивідуального налаштування можуть досягати ще вищої точності.

Датчики вимірювання витрати палива використовуються на стендах для газотурбінних двигунів для вимірювання витрати газу, що подається до двигуна, та для контролю та аналізу його робочих характеристик. Точність вимірювань важлива для забезпечення надійних тестів і оцінки роботи двигуна.

Отже, вимірювання витрати палива - це ключовий аспект в стендових випробуваннях газотурбінних двигунів, і для цього використовуються різні типи вимірювальних пристроїв, зокрема турбінні витратоміри, які є високоточними та широко використовуються завдяки своїм перевагам у стендових умовах.

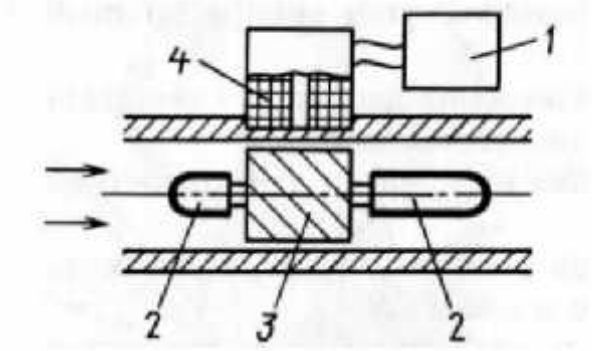


Рис.2.9 – Принципова схема турбінного витратоміра. 1- реєструючий прилад; 2 – підшипники; 3 – турбіна; 4 – індуктивна котушка.

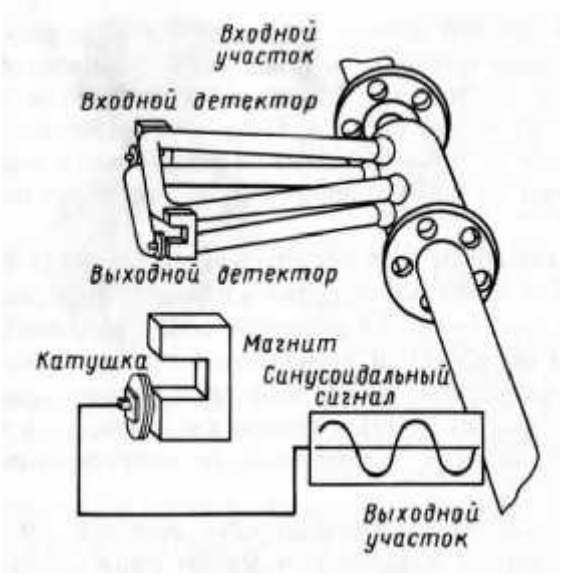


Рис.2.10 – Конструкція кисневого витратоміра

На рис.2.10 наведена схема, що пояснює принцип дії та конструкцію витратоміра. Чутливим елементом витратоміра є дві трубки. По ним рухається потік рідини, який поділяється в трубках на дві рівні частини. Біля трубок встановлені котушки, які змушують ці рубки коливаються у протилежному напрямку.

За відсутності витрати на детекторах (див. рис.2.10) формуються синусоїдальні сигнали з однаковою фазою. При русі вимірюваного середовища через витратомірні трубки, що коливаються виникає ефект Коріоліса — виникає коріолісове прискорення, а отже, коріолісова сила. Ця сила спрямована проти руху трубки приданого їй котушкою.

В результаті впливу коріолісової сили на трубки вони згинаються під дією коріолісової сили, в результаті на детекторах (вхідному та вихідному) з’являється зсув фаз. Величина вигину, величина зсуву фаз прямопропорційна масовій витраті рідини. Підраховується інтервал часу, що дорівнює руху фаз сигналів детекторів. Інтервал зсуву між сигналами вхідного та вихідного детекторів прямо пропорційний масовій витраті.

Прикладом коріолісового витратоміра може бути витратомір Метран-60 (Рис.2.11), який застосовується для вимірювання масової витрати рідин та газів.

Основні наведені похибки вимірювань масової витрати становлять для рідин до 0,2 %; для газів до 0,5%.

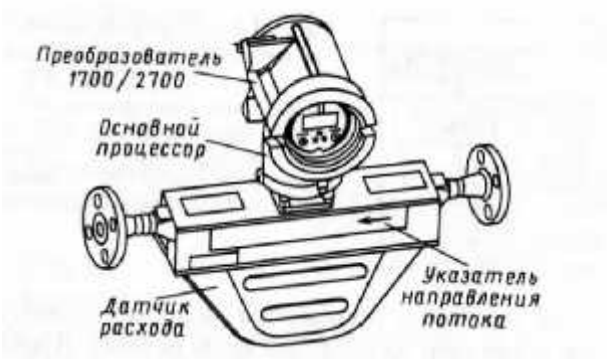


Рис.2.11 – Конструкція витратоміра Метран-360

Витратомір Метран-360 складається з:

- датчика витрати;
- вимірювального мікропроцесорного перетворювача;
- основного процесора;
- фланців для приєднання до магістралі.

Вихідний сигнал — аналоговий струмовий (4...20 мА), пропорційний масовій витраті. Нижнє та верхнє значення струму відповідають мінімальному та максимальному значенням вимірюваного параметра. Є можливість виводити інформацію у вигляді частотно-імпульсного сигналу та у цифровому вигляді.

Коріолісові витратоміри при стендових випробуваннях газотурбінних двигунів застосовуються для вимірювань витрати газу, масел у газотурбінних двигунах авіаційного застосування та газового палива в газотурбінних двигунах наземного застосування.

2.1.6 Датчики швидкості потоку повітря (зонди)

Замість безпосереднього встановлення датчика в точці вимірювання пульсацій тиску в елементах проточної частини газотурбінного двигуна, використовуються спеціальні пристрої, які називають зондами. Ці зонди складаються із конструкції, яка включає в себе сам датчик і вузький трубопровідний канал. Цей канал дозволяє з’єднати датчик із точкою

вимірювання, при цьому датчик знаходиться поза межами оболонки газотурбінного двигуна.

Основна перевага використання таких зондів полягає в тому, що вони дозволяють вимірювати пульсації тиску в труднодоступних місцях, де встановлення безпосередньо датчика може бути неможливим. Крім того, вони допомагають уникнути розбирання двигуна для установки або зняття датчика, що важливо для збереження надійності та тривалості служби двигуна.

Зонди мають додаткові компенсуючі елементи та корпус, які допомагають забезпечити стабільність та надійність вимірювань пульсацій тиску навіть в умовах високих температур та тиску.

Важливо відзначити, що вимірювання пульсацій тиску має велике значення при оцінці газодинамічної стійкості компресора та вивченні процесів горіння в камері згоряння газотурбінного двигуна. Особливо це стає актуальним при вдосконаленні камер згоряння з точки зору екологічних показників, що вимагає роботи двигуна на режимах, близьких до межі стійкого горіння. В таких умовах можуть виникати резонансні явища, які призводять до значного зростання пульсаційного тиску.

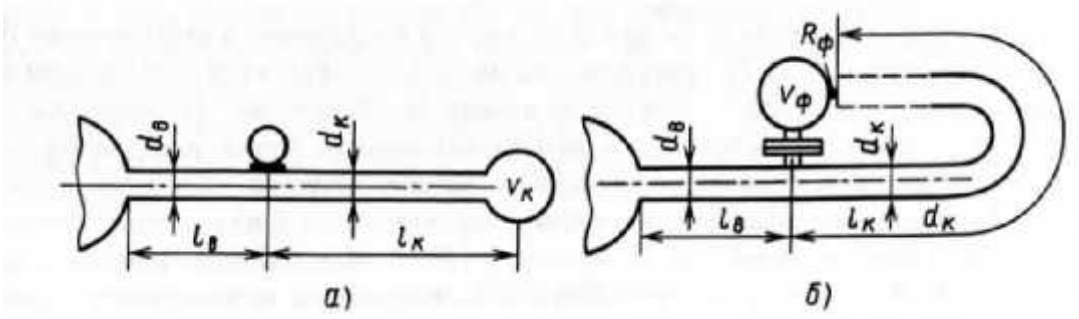


Рис.2.12 - Схеми зондів пульсацій тиску: а) - схема зонда з датчиком абсолютного тиску; б) - схема зонда з датчиком дифференніального тиску; dв, lв - довжина і діаметр хвилеводу: dK, 1K – довжина та діаметр коригуючого трубопроводу; Vк, Vф - компенсуючий об’єм; Rф - демпферний елемент (дросель)

Для створення хвилеводів використовують трубопроводи з вузьким перетином, і їх довжина визначається як відстань від місця вимірювання до

датчика. При цьому важливо уникати зайвої довжини хвилеводу, оскільки це може призвести до втрат від затухання коливань.

Щодо діаметра хвилеводу, він вибирається на основі розрахунків і практичних експериментів в межах 2-6 мм. Коригуючий трубопровід використовується для налаштування амплітудно-частотної характеристики зонда в робочому діапазоні частот.

З вищевказаного випливає, що вимірювання пульсацій тиску має вирішальне значення для забезпечення безпеки та надійності роботи газотурбінних двигунів. Зонди із спеціальними датчиками, які використовуються в цих вимірюваннях, допомагають зберегти стабільність та продуктивність двигунів під час роботи в складних умовах, та служать важливим інструментом для налагодження та вдосконалення авіаційних двигунів.

2.1.7 Датчики зносу та стану матеріалів.

Датчики зносу та стану матеріалів грають важливу роль у випробуваннях авіаційних двигунів, допомагаючи визначити, наскільки добре витримується матеріал, який використовується у компонентах двигуна. Ось декілька ключових аспектів, пов’язаних із зазначеними датчиками:

Вимірювання зносу матеріалів: Датчики зносу дозволяють визначити, наскільки змінюється стан матеріалів компонентів двигуна під час експлуатації. Вони можуть вимірювати такі параметри, як втрата товщини матеріалу, мікротріщини або втрата маси. Це інформація допомагає визначити строк служби та надійність деталей двигуна.

Моніторинг температур та тиску: Вимірювання температури та тиску важливо для контролю стану матеріалів. Високі температури можуть спричиняти термічний знос матеріалів, тоді як зміни в тиску можуть впливати на міцність та структуру матеріалу.

Контроль структури та деформацій: Датчики можуть вимірювати структуру матеріалів, виявляти зміни у структурі внаслідок термічного чи

механічного впливу. Вони також можуть визначати деформації матеріалів, що виникають під час роботи двигуна.

Моніторинг акустичних характеристик: Деякі датчики призначені для вимірювання акустичних характеристик, таких як шум або вібрація, які можуть бути показниками стану матеріалу.

Можливість передбачення поломок: Один із ключових аспектів датчиків зносу та стану матеріалів - це їх здатність передбачити можливі поломки або втрату ефективності деталей двигуна. Це дозволяє вчасно планувати обслуговування та запобігати аваріям.

Загалом, датчики зносу та стану матеріалів є важливою частиною випробувань авіаційних двигунів, які допомагають підтримувати їхню безпеку та надійність.

2.2 Обробка експериментальних даних випробувань.

Специфіка визначення термогазодинамічного стану ГТД та оцінки основних технічних даних в умовах автоматизованої системи виконання полягає в тому, що основні рутинні операції з обробки даних них повинні виконуватися без участі людини, але бажано використовувати ті методи та підходи, які дозволяють досліднику при застосуванні відпрацьованих традиційних способів обробки та аналізу експериментальної інформації отримувати найбільш достовірні результати.

Для підвищення ефективності випробувань ГТД результати термогазодинамічного аналізу мають бути отримані в стислий термін. Тому автоматизована система термогазодинамічного аналізу передбачає виконання основних операцій у реальному масштабі часу та в темпі випробування.

При експериментальному визначенні дросельних характеристик двигуна під роботами, що виконуються в реальному масштабі часу, розуміються дії, які виконуються в період між вимірюваннями параметрів у двох сусідніх

експериментальних точках (3...5 хв). Під роботами, що виконуються в темпі випробування, розуміються дії, що виконуються в період часу між запуском та вимкненням двигуна.

2.2.1 Контроль якості вимірів.

Для аналізу та інтерпретації результатів випробувань ВМД велике значення має якість отриманої експериментальної інформації. Тому на всіх етапах збору та обробки експериментальних даних при автоматизованих випробуваннях здійснюється контроль якості вимірювані з метою виявлення грубих помилок та усунення їх впливу на кінцевий результат. Розглянемо особливості застосування деяких видів контролю якості вимірювання параметрів ГТД.

При вимірі параметрів двигуна на кожному режимі роботи здійснюється багаторазове (до 10...20 разів) перевіряння всіх вимірювальних каналів, В результаті по кожному вимірювальному каналу в ЕОМ надходить n= 10...20 значень цифрового коду X (Рис.2.13).

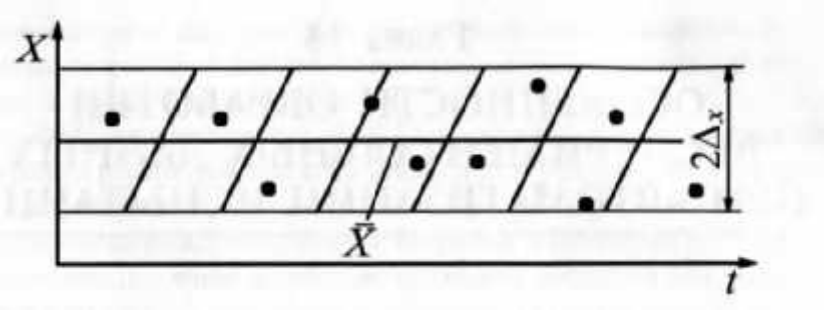


Рис.2.13 – Значення цифрового коду X в різний час t при багаторазовій перевірці вимірювального каналу на незмінному режимі роботи двигуна: ● – результати вимірів.

За зареєстрованими в ЕОМ значеннями цифрових кодів Xi обчислюються середні значення:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}$$

та дисперсія:

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i-1}^{n}(X_i - \bar{X})^2}{n-1}$$

Вибирається інтервал Δ_x, в який з заданою довірчою вірогідністю p повинні потрапляти значення цифрового коду

$$\Delta_x = \tau S_x,$$

де $\tau = \varphi(1 - \frac{a}{2}, f)$- статистичний критерій для фільтрації грубих помилок;

$a = 1 - p$ – рівень значимості; $f = n - 1$ – число степенів свободи.

Значення цифрового коду X_i, що не задовольняє умові

$$|\bar{X} - X_i| \leq \Delta_x ,$$

визнаються такими, що мають грубі помилки та відкидаються. Обчислюється нове середнє значення цифрового коду $\bar{X}$. Іноді в якості довірчого інтервалу Δ_x, використовують деяку постійну, апріорно задану величину.

Таким чином здійснюється відбраковування викидів цифрового коду, визваних будь-якими випадковими причинами (електричними перешкодами, збоями в роботі апаратури тощо). Однак грубі помилки у визначенні параметрів можуть бути пов’язані і з виходом з ладу датчиків, приладів, інших елементів вимірювальних каналів. Очевидно, що такі грубі помилки виявити описаним вище способом неможливо.

Тому на наступному етапі контролю якості вимірювань здійснюється перевірка влучення отриманого значення цифрового коду $\bar{X}$ в область допустимих значень. Як область допустимих значень цифрового коду $\bar{X}$ приймається діапазон цифрових кодів, отриманих під час градуювання даного вимірювального каналу (Рис.2.14), що проводиться перед проведенням випробувань двигуна.

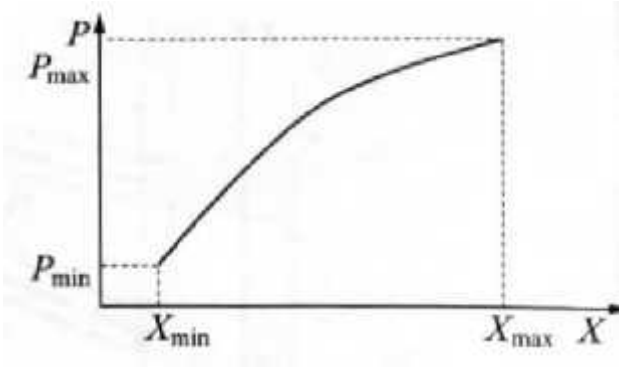


Рис.2.14 – Градуювальна характеристика вимірювального каналу: P_{min}, P_{max} — нижні та верхні границі зміни еталонного значення параметра при градуюванні

Значення цифрового коду $\bar{X}$ визнають помилковою, якщо воно не задовольняє умову:

$$X_{min} < \bar{X} < X_{max},$$

Якщо значення $\bar{X}$ попадає в область допустимих значень, то за допомогою формули апроксимуючої градуювальної характеристики відповідного вимірюваного каналу визначається оцінка фізичної величини параметру:

$$\hat{P} = a_0 + a_1\bar{X} + \cdots + a_m\bar{X}^m,$$

де $a_i, i = \overline{0,m}$ – коефіцієнти градуювальної характеристики вимірюваного каналу. ДАТИ ОСЬ ЦЮ ФОРМУЛУ В ПРЕЗЕНТАЦІЇ

Вимірювання температури і тиску в проточній частині двигуна здійснюється, як правило, у кількох точках кожного характерного перерізу, що також використовується для контролю якості вимірів. Пояснимо це на прикладі вимірювання тиску в перерізі проточної частини за допомогою радіального гребінця приймачів тиску (рис.2.15).

За результатами вимірів p_i^* кожним приймачем обчислюється середнє значення тиску загальмованого потоку $\bar{p}^*$.

Перевіряється умова:

$$|\bar{p}^* - p_i^*| \le \Delta p^*,$$

де Δp^* - допуск на можливі відмінності окремих вимірювань від середнього значення.

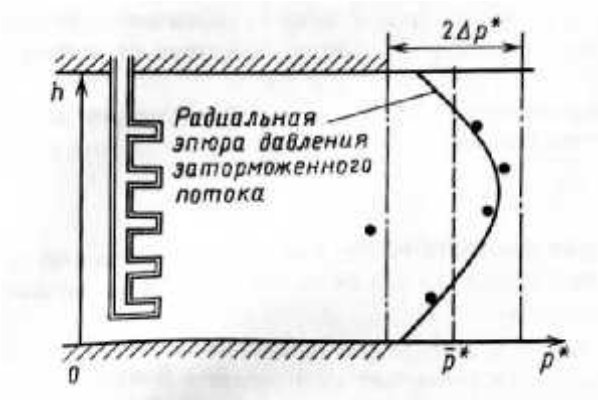


Рис.2.15 – Схема зміни тиску загальмованого потоку в проточній частині двигуна радіального гребінця: ● – результати вимірів.

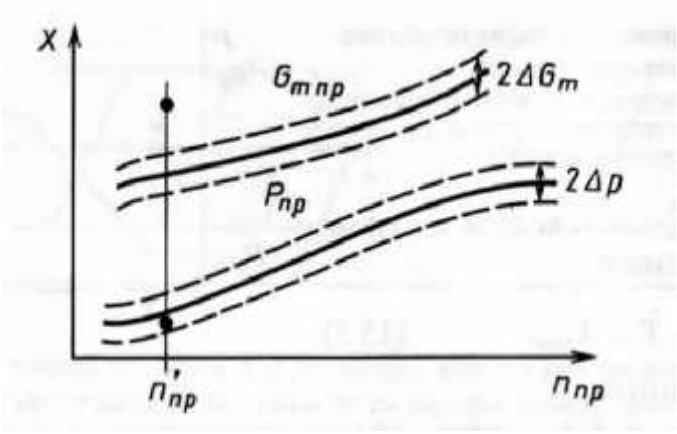


Рис.2.16 – Контроль якості вимірів параметрів з використанням апріорних дросельних характеристик двигуна: ● – результати визначення параметрів в даного двигуна.

Величина допуску Δp^* призначається, виходячи з апріорних уявлень про можливу нерівномірність поля тиску в даному перерізі, які можуть бути засновані на досвіді попередніх експериментальних досліджень двигуна.

Невиконання цієї умови для будь-якогоp_i^* є ознакою наявності грубої помилки, викликаної, наприклад, засміченням відповідного приймача тиску.

Наступний спосіб контролю якості вимірювань параметрів заснований на порівнянні наведених до САУ вимірюваних параметрів на даному режимі роботи двигуна, з апріорними уявленнями про дросельну характеристику даного двигуна (рис.2.16).

В якості апріорної дросельної характеристики може бути використана характеристика, отримана на попередніх випробуваннях двигуна, або розрахуноква характеристика, скоригована виходячи з відомих особливостей даного екземпляра двигуна. На основі оцінки ступеня адекватності апріорної дросельної характеристики, наявних похибок експериментального визначення параметрів двигуна призначається величина допуску на можливу відмінність параметрів даного двигуна від апріорних характеритик. На (Рис.2.16) це величини ΔG_m та Δp.

Після визначення наведених значень параметрів двигуна на цьому режимі перевіряється умова:

$$\left|P_{\text{пар пр}} - P_{\text{пр}}\right| \leq \Delta p$$

Якщо це умова будь-якого параметра, як, наприклад, для $G_{m\,\text{пр}}$ пр (див. Рис.2.16), не виконується, то це значення параметра визнається вирахуваним із грубою помилкою.

Основна проблема, що виникає при такому способі контролю якості вимірювань, пов’язані з обгрунтованим призначенням допусків Δp. Рішення цієї проблеми значно спрощується, якщо випробуванню піддається серійний двигун та відомі статистичні дані про результати випробувань інших двигунів цієї серії. У цьому випадку межі на допустимі значення параметрів двигуна визначаються на основі обробки наявних статистичних даних про розкид дросельних характеристик двигунів даної серії. Розкид дросельних характеристик двигунів одної серії (Рис.2.17) пояснюється розсіюванням параметрів, що характеризують роботу вузлів двигуна, що спостерігаються через те, що виготовлення деталей та

складання вузлів здійснюється з певними допусками, а також похибкою вимірювання параметрів під час випробування.

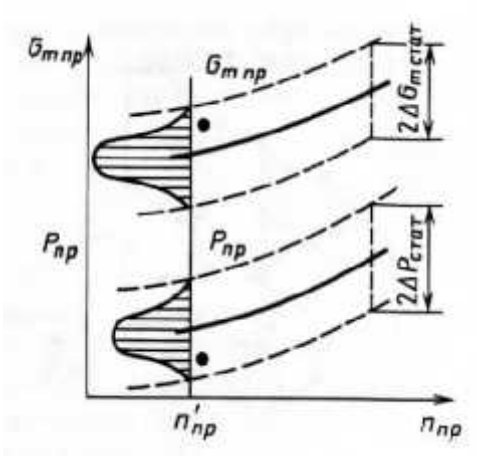


Рис.2.17 – Поле дросельних характеристик серійних двигунів:

- - - - - - середньостатистичні характеристики; ● – результати визначення параметрів в даного двигуна

Розсіювання характеристик окремих неналагоджених двигунів підпорядковується закону розподілу, близького до нормального. При контролі якості експериментального визначення параметрів у даного двигуна на режимі, що характеризується частотою обертання ротора $n_{пр}$, спочатку визначаються середньостатистичні значення параметрів двигунів всієї серії на даному режимі:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i}{n},$$

де n - кількість дросельних характеристик, наявних у статистиці.

Потім обчислюється дисперсія значень параметрів двигунів даної серії на цьому режимі:

$$S_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (P_i - \bar{P})^2}{n-1}$$

Розраховується довірчий інтервал:

$$\Delta p_{стат} = t S_p \sqrt{1 + \frac{1}{n}},$$

Де $t = \varphi(1 - \frac{a}{2}, f)$ - квантиль розподілу Стьюдента, відповідний довірчій

ймовірності $P = 1 - a$ і числу ступенів свободи $f = n - 1$.

Перевіряється умова: ОСЬ ЦЮ ФОРМУЛУ ДАТИ

$$|\bar{P} - P_i| \leq \Delta p_{\text{стат}}.$$

Якщо для будь-якого значення параметра ця умова не виконується, то він визнається вирахуваним із грубою помилкою. Такий спосіб контролю якості вимірювань дозволяє виявляти грубі помилки вимірювань, які перевищують 5..6%.

Величину довірчого інтервалу, яку застосовують для пошуку грубих помилок визначення поділу значень параметрів можна зменшити, якщо використовувати для цих цілей закономірності змін параметрів у межах розкиду. Ці закономірності можуть бути представлені кореляційними зв'язками між різними параметрами двигунів даної серії на постійному режимі. Приклад двовимірних кореляційних зв'язків між значеннями тяги $P_{\text{пр}}$ і витрати палива

$G_{m\,\text{пр}}$, На режимі $n'_{\text{пр}} = const$ приведений на (Рис.2.18).

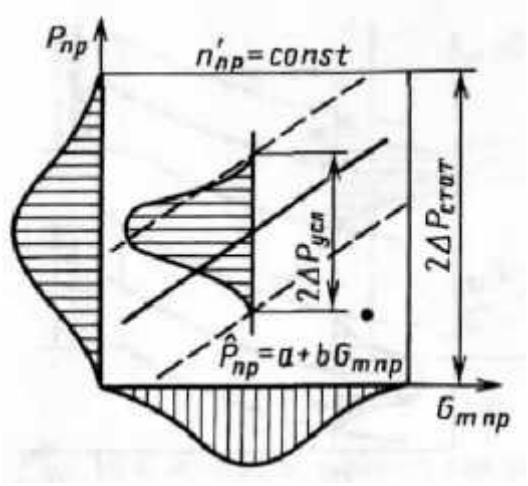


Рис.2.18 – Кореляційний зв'язок $P_{\text{пр}}$ з $G_{m\,\text{пр}}$ для двигунів даної серії при $n'_{\text{пр}} = const$:

● – експериментальна точка для двигуна, який вивчається.

Залежність оцінки найбільш ймовірного значення параметра функції $\hat{P}_{\text{пр}}$ від параметра аргументу $G_{m\,\text{пр}}$, визначається рівнянням регресії:

$$\hat{P}_{\text{пр}} = a + bG_{m\,\text{пр}},$$

де a та b - коефіцієнти рівняння регресії.

Ступінь тісного кореляційного зв'язку оцінюється величиною коефіцієнта парної кореляції r:

$$0 \le |r| \le 1,$$

а можлива відмінність дійсних значень параметра-функції $P_{\text{пр}}$ у даного двигуна від оцінки $\hat{P}_{\text{пр}}$, визначеної за рівнянням регресії при відомому значенню $G_{m\,\text{пр}}$ характеризується величиною умовного довірчого інтервалу, який може змінюватись у діапазоні:

$$0 \le \Delta P_{\text{усл}} \le \Delta P_{\text{стат}},$$

Величини коефіцієнта кореляції r умовного довірчого інтервалу $\Delta P_{\text{усл}}$ пов'язані між собою співвідношенням:

$$\Delta P_{\text{усл}} = \Delta P_{\text{стат}}\sqrt{1 - r^2}.$$

Величини коефіцієнтів кореляції r і регресії a та b розраховуються методами математичної статистики за наявними результатами випробувань двигунів цієї серії.

Коефіцієнти парної кореляції між різними параметрами ГТД у межах розкиду набувають значення: r = 0,3 ... 0,9.

Для контролю якості вимірювання параметрів з використанням закономірностей їх розкиду здійснюється порівняння підозрілої експериментальної величини будь-якого параметра (у нашому випадку $P_{\text{пр}}$) з

його оцінкою за іншим параметром, що вимірюється (у нашому випадку по $G_{m\,\text{пр}}$), отриманої за допомогою відповідного рівняння регресії.

Якщо при цьому не виконується умова:

$$|\hat{\hat{P}}_{\text{пр}} - P_{\text{пр}}| \le \Delta P_{\text{усл}},$$

то значення параметра визнається певним із грубою помилкою. Даний спосіб контролю якості вимірювання дозволяє виявити помилки вимірювання параметрів, які не можна визначити попереднім способом, заснованим на перевірці влучення знову отриманих експериментальних точок у поле розкидання показників двигуна цієї серії (див. рис.2.18).

Чутливість методу можна підвищити, якщо для пошуку аномальних вимірів використовувати не двовимірні, а багатовимірні кореляційні зв'язки, описувані рівняннями регресії виду:

$$\hat{\hat{P}}_{\text{пр}} = a + \Delta G_{m\,\text{пр}} + cT^{*}_{m\,\text{пр}} + \cdots,$$

які дозволяють отримати оцінку величин будь-якого параметра за значеннями всіх інших вимірюваних параметрів двигуна. Такий спосіб контролю вимагає застосування складнішого алгоритму, оскільки відмінність оцінки $\hat{\hat{P}}_{\text{пр}}$ від експериментально визначеної величини $P_{\text{пр}}$, що перевищує величину $\Delta P_{\text{усл}}$, може бути викликано грубою помилкою визначення не тільки параметра-функції, а й будь-якого з параметрів-аргументів. Однак він дозволяє знизити поріг виявлених грубих помилок вимірювання до величини 3...4 %.

Всі описані способи контролю якості вимірювань застосовуються в реальному масштабі часу.

РОЗДІЛ 3 ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИПРОБУВАНЬ АВІАДВИГУНІВ

Головним спрямуванням для поліпшення процесу випробувань газотурбінних двигунів є їх автоматизація. Ця автоматизація допомагає скоротити час, який витрачається на проведення випробувань, спрощує процес обробки результатів і забезпечує більш точну та надійну інформацію, отриману в результаті випробувань. У кінцевому підсумку це сприяє скороченню строків розробки двигунів, зменшенню витрат на їх розробку і виробництво, а також підвищенню якості та надійності самих двигунів.

У цьому розділі розглядаються основні принципи, на яких базується автоматизація різних етапів випробувань, і розглядається система, яка відповідає за цей процес.

3.1 Типові операції при випробуваннях ГТД

Під час випробувань газотурбінних двигунів існують кілька стандартних операцій, які повторюються у різних видів випробувань:

Підготовчо-заключні операції: Ці операції включають в себе підготовку до випробувань та завершення їх. Наприклад, це може включати в себе запуск і вимкнення двигуна, підключення всіх необхідних систем та обладнання.

Випробування за заданою програмою: Ця операція включає в себе проведення самого випробування за певною програмою або розкладом. Випробування можуть проводитися при різних режимах та обсягах навантаження в залежності від цілей випробувань.

Налагодження параметрів двигуна: Під час випробувань параметри двигуна можуть бути налаштовані для дотримання технічних норм і вимог.

Обробка результатів і аналіз: По завершенню випробувань проводиться обробка отриманих даних та їх аналіз для оцінки роботи двигуна. Це допомагає визначити ефективність та надійність двигуна, а також виявити будь-які проблеми або аномалії, що виникають під час випробувань.

Рис.3.1 – Блок-схема технологічного процесу проведення випробування ГТД.

Постійний контроль стану двигунів під час їх експлуатації забезпечується за допомогою систем реєстрації параметрів на літальних апаратах (БСРП) і систем контролю та управління на наземних випробувальних станціях (БСКУ). Такі системи дозволяють постійно відстежувати стан двигунів та вчасно виявляти можливі проблеми.

Міра автоматизації окремих операцій випробувань залежить від типу випробувань та їх частоти. Автоматизація може бути більшою для регулярних і частих випробувань, де вона допомагає заощадити час і ресурси.

Таблиця 1 Частка трудомісткості різних видів випробувань у відсотках від загальної трудомісткості.

Види випробувань	Підготовчі, заключні операції	Збір та опрацювання інформації	Вторинна обробка інформації	Реалізація прийняття інформації
Дослідні:				
агрегатів і елементів	2…5	40…60	5…10	20…30
доводка	5…10	30…50	20…30	10…20
Доводочні:				
доводка агрегатів	5…10	30…60	10…20	20…30
доводка вузлів	10…15	30…40	10…20	20…30
доводка двигуна	10…30	20…30	20…30	20…30
Заводські:				
короткочасні	30…40	20…40	10…20	10…20
тривалі	2…15	50…70	30…40	3…5

Кожна із приведених операцій в табл.1 може бути автоматизована. Доцільність та глибина автоматизації тої чи іншої операції залежить від виду випробувань і частоти його проведення.[2]

3.1.1 Підготовчо-заключні операції

Підготовка і завершення процедур випробувань газотурбінних двигунів, відомі як підготовчо-заключні операції (ПЗО), є кроками, які включають наступні етапи:

Підготовка стенду до випробування: включає в себе підготовку тестового стенду або обладнання для проведення випробувань.

Розконсервування двигуна та його монтаж на стенді: Зазвичай, двигун попередньо консервується для збереження його стану, і потребує розконсервування перед випробуванням. Далі двигун монтується на тестовому стенді.

Підключення паливної та інших систем: Паливна система і інші необхідні системи, які живлять двигун, підключаються до нього. Це включає в себе паливопостачання, системи управління та вимірювання.

Демонтаж двигуна і консервація: Після закінчення випробувань двигун демонтується та може піддаватися консервації для подальшого зберігання або ремонту.

Однак важливо зауважити, що ці операції зазвичай потребують значної кількості часу і ручної роботи. Існують заходи для автоматизації ПЗО, які дозволяють значно скоротити час, який витрачається на них.

Один з підходів - це використання "залу підготовки", де проводиться зовнішній огляд та розконсервування двигуна. Спеціальні рами, відомі як "підмоторні рами," використовуються для монтажу двигуна в цьому залі. На цих рамах розміщуються первинні перетворювачі та інше обладнання, і всі комунікації двигуна виводяться на щиток рами.

Для закріплення або зняття двигуна з "підмоторної рами" в боксі зазвичай потрібно близько однієї години. Отже, операції, пов’язані з підготовкою і завершенням випробувань, займають дві години робочого часу на випробувальному стенді. Таким чином, завдяки цим змінам, непродуктивне очікування на стенді скорочується приблизно на 10 годин.

Автоматизація підготовчо-заключних операцій особливо корисна для серійного виробництва газотурбінних двигунів. У цьому випадку велика частина часу передбачається на підготовку і завершення випробувань - приблизно 30-40% загального часу, витраченого на тестування. На підприємстві може проводитися значна кількість таких випробувань протягом року. Тому автоматизація цих операцій в серійному виробництві дозволяє суттєво знизити час очікування на стенді, підвищити ефективність та зменшити витрати матеріальних ресурсів.

3.1.2 Випробування за заданою програмою

Випробування за певною програмою включають такі дії:

Реєстрація параметрів: Ця операція є однією з найважливіших під час випробування авіаційних двигунів. Зазвичай під час випробувань досвідних двигунів реєструються значення багатьох параметрів, які можуть сягати 2000-3000. Без автоматизації цього процесу практично неможливо надійно зареєструвати всі ці дані. Однак завдання вирішується за допомогою автоматизованих систем вимірювання та реєстрації параметрів.

Управління режимами: Під час випробувань може бути необхідно змінювати режими роботи двигуна. Ця операція включає в себе встановлення різних режимів роботи та контроль за їх виконанням.

Таблиця 2 Об’єм вимірюваних параметрів в залежності від виду випробувань

Вимірюваний параметр	Види випробувань і кількість вимірюваних параметрів		
	Заводські	Доводочні	Дослідні
Вимірювана тяга	1	1	1
Крутний момент	1	1	1
Розхід палива	2	2	2
Частота обертання	До 3	До 3	До 3
Тиск повітря (газів)	До 50	До 150	До 800
Температура повітря (газів)	До 50	До 200	До 1000
Температура робочих рідин	До 5	До 10	До 20
Температура корпусів	–	До 200	До 200
Пульсація тиску	–	До 6	До 15
Віброшвидкість (віброприскорення)	До 3	До 10	До 15
Статична і динамічна деформації	–	До 100	До 200

В табл.2 приведений об’єм вимірюваних параметрів в залежності від виду випробувань. Збір даних і управління процесом проведення випробування виконується зазвичай автоматично або напівавтоматично під керуванням оператора або інженера. В процесі випробування інженер слідкує не тільки за значеннями параметрів на табло, за аварійною сигналізацією, також по мірі можливості за станом матеріальної частини, що знаходиться в боксі стенда. Такий контроль виконується по екрану монітора.[2]

Реальна кількість реєстрованих параметрів може змінюватися і залежить від типу випробувань. В серійних випробуваннях кількість параметрів може бути менше, ніж під час дослідних випробувань.

Системи, що базуються на потужних комп’ютерах і працюють у режимі розділення функцій, надають фізичні та розрахункові значення параметрів у формі таблиць і графіків.

Після завершення серійних випробувань складається протокол, в якому фіксуються результати.

Використання автоматизованих систем вимірювання та реєстрації параметрів дозволяє значно скоротити час випробувань, навіть з частковою автоматизацією процесу реєстрації параметрів.

3.1.3 Управління режимами роботи двигуна

Однією з найбільш відповідальних та часто повторюваних операцій під час випробувань газотурбінних двигунів (ГТД) є установка двигуна на певний режим роботи. Під час випробувань серійних та ресурсних двигунів цю операцію може повторювати понад 150 разів, і у випробуваннях з імітацією роботи на літаку цей процес може становити більше 5000 циклів. У цей час відбуваються різні зміни режимів, такі як увімкнення та вимкнення систем, зміна завантаження та використання реверсу та системи протиобмерзання.

Зазвичай управління режимами здійснюється вручну оператором за допомогою важеля управління двигуном. Під час цього процесу контроль здійснюється візуально за допомогою стрілочних приладів. Час, необхідний для ручного встановлення режиму, може сягати 40 секунд і залежить від кваліфікації оператора.

Але існують недоліки у використанні ручного управління режимами:

- це трудомістка робота;
- це забирає багато часу на установку потрібного режиму;
- існують похибки в установці і підтримці необхідного режиму.

Для автоматизації управління режимами роботи двигуна на випробувальному стенді необхідно встановити виконавчий механізм, який відповідає за керування режимами. Також потрібно встановити блок автоматики, який контролюватиме виконавчий механізм, і розробити спеціальні алгоритми для керування роботою двигуна в автоматичному режимі.

3.1.4 Налагодження параметрів двигуна

Настройка параметрів газотурбінного двигуна є однією з ключових операцій під час передвипробувальних і акцептових випробувань. Ця операція необхідна для досягнення встановлених технічними нормами або умовами значень параметрів двигуна.

Настройка виконується шляхом цільової зміни положення регулюючих елементів, розташованих на двигуні, таких як регулюючі гвинти насос-регулятора, лопатки регульованих напрямних апаратів компресора, стулки регульованого сопла та інше. Наприклад, на двовальних газотурбінних двигунах є понад десять регулюючих елементів, а на трьохвальних - навіть більше двох десятків.

Під час ручного переміщення цих регулюючих елементів проводиться послідовне налаштування параметрів двигуна, таких як оберти, тиск, витрати пального, температура і т. д. Практично це означає, що потрібно проводити послідовні корекції. Однак під час ручного регулювання регулюючих елементів робота двигуна зупиняється, що призводить до зупинок та запусків двигуна і виводу його на необхідні режими.

Кількість операцій під час переміщення регульованих елементів та якість налаштування параметрів залежать від кваліфікації оператора. Часто вимагаються багатоциклові корекції, що призводить до багаторазових зупинок і запусків двигуна та виводу його на задані режими. Це призводить до таких недоліків ручного налаштування параметрів газотурбінного двигуна:

- велика трудомісткість;
- збільшення тривалості циклу випробувань;
- відсутність гарантованої якості налаштування параметрів.

Для автоматизації процесу налаштування газотурбінного двигуна потрібно виконати наступні завдання:

Використання віддалених пристроїв регулювання, які можуть управляти роботою двигуна на відстані (при цьому сам конструкція двигуна має бути придатною для встановлення таких пристроїв).

Використання спеціальних математичних методів для визначення оптимальних переміщень регулюючих елементів з урахуванням їх впливу на всі параметри газотурбінного двигуна.

Автоматизація налаштування газотурбінного двигуна під час випробувань дозволить виконувати корекції регулюючих елементів без зупинки роботи двигуна, зменшити кількість налаштувань і досягти оптимальних значень всіх параметрів двигуна одночасно.

3.1.5 Обробка результатів випробувань та їх аналіз

При аналізі результатів випробувань ГТД виконуються наступні операції:

- обчислення фізичних параметрів двигуна;

- розрахунок середніх значень параметрів;

- перетворення параметрів для використання в системах автоматичного управління;

- створення графіків і діаграм, що описують характеристики двигуна;

- визначення параметрів двигуна та його компонентів, які не можна безпосередньо виміряти;

- статистичний аналіз отриманих результатів.

Результати цих розрахунків можуть бути неоднозначними і вимагають взаємозв’язку між різними параметрами двигуна та його компонентами. Ця операція відома як термодинамічний аналіз результатів випробувань ГТД.

Термодинамічний аналіз ГТД важливий для:

- визначення найкращого напрямку розвитку конструкції двигуна на основі отриманих даних;

- оцінки ефективності змін в конструкції двигуна;

- підвищення налаштованості параметрів досліджуваного двигуна;

- контролю за технічним станом вже в експлуатації двигунів.

Для проведення статистичного аналізу результатів випробувань широко використовується часткова автоматизація з використанням комп’ютерів, яка

дозволяє значно зменшити час на обробку даних і скоротити складність обчислень з гарантованою точністю.

За допомогою цієї автоматизації стає можливим використання найсучасніших математичних методів обробки даних вимірювань. Найбільш оптимальним рішенням є повна автоматизація обробки результатів випробувань за допомогою електронних обчислювальних машин.

Під час проведення експерименту на стенді з автоматизованим стендом встановлюються різні завдання, які поділяються на кілька етапів.

Перед випробуванням проводять такі дії:

Планування експерименту, включаючи вибір параметрів, які мають бути вимірювані, визначення їх кількості та місця, де вони будуть вимірюватися.

Метрологічна атестація вимірювальних каналів, що означає визначення градуювальних залежностей для вимірювальних приладів і визначення похибок вимірювань.

Під час проведення випробування виконуються наступні завдання:

- обробка початкових даних з експерименту;

- виявлення серйозних помилок, відхилень і викидів в вимірюваних параметрах;

- представлення інформації для оператора в зручній формі, такі як екранні відображення, друкування на принтері та інші методи;

- розрахунок і виконання оптимальних налаштувань для регулювання роботи двигуна;

- створення протоколу випробування для фіксації результатів.

Завдання, що вирішуються під час самого експерименту, називаються "експрес-аналізом".

Після завершення випробування виконуються такі дії:

- відновлення характеристик двигуна на основі зібраних даних;

- визначення невимірювальних параметрів двигуна і його компонентів;

- збір статистичних даних про проведені випробування;

- підготовка необхідної документації, такої як текстові описи, таблиці і графіки.

Загалом автоматизація обробки результатів випробувань допомагає покращити швидкість та точність обробки даних і зробити їх надійними.

3.2 Основи побудови АСВ ГТД

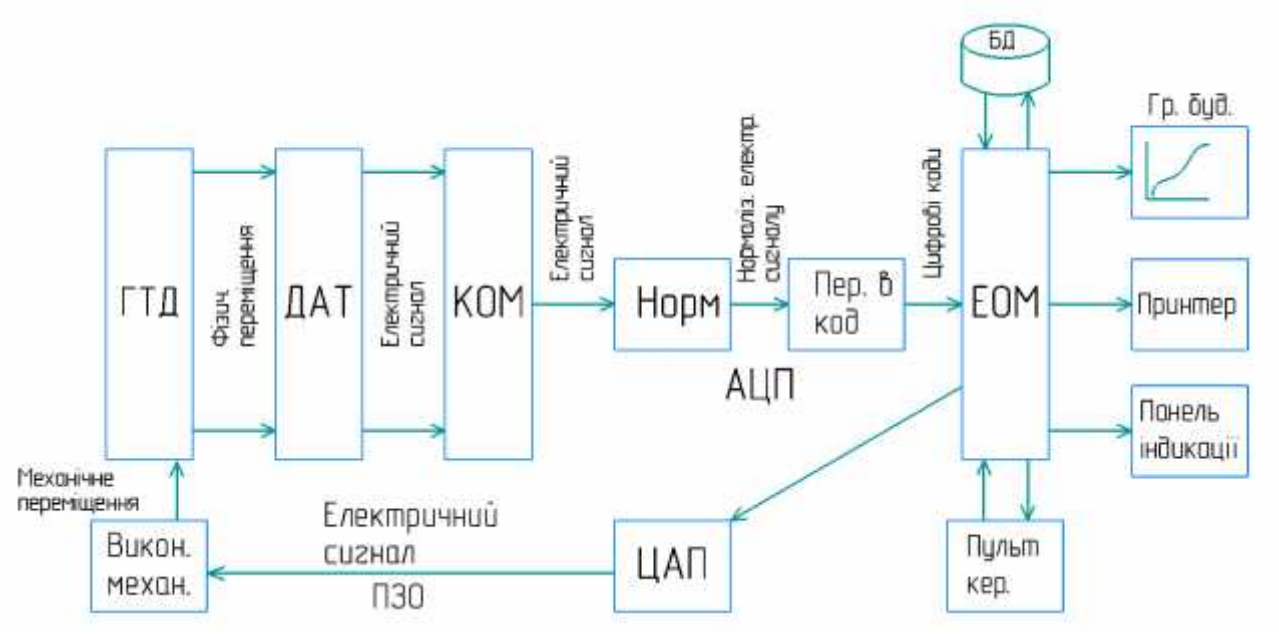


Рис.3.2 – Структурна схема АСВ ГТД

Автоматизована стендова установка для газотурбінних двигунів (АСВ ГТД) - це складна система, призначена для випробування і дослідження газотурбінних двигунів. Основні аспекти побудови і функціонування АСВ ГТД включають наступне:

Стендова система: Центральною частиною є випробувальний стенд, на якому розміщується газотурбінний двигун. Стенд повинен бути здатен симулювати різні умови, які двигун може зазнати під час роботи, включаючи різні режими навантаження, температурні умови і швидкості обертання.

Вимірювальна система: АСВ ГТД має велику кількість датчиків і приладів, які вимірюють різні параметри двигуна, такі як тиск, температура, обертання і багато інших. Ці дані збираються і використовуються для аналізу та керування експериментом.

Автоматизація і керування: Система автоматизації контролює всі аспекти випробування, включаючи регулювання навантаження і контроль режимів роботи двигуна. Оператори можуть встановлювати параметри випробувань і спостерігати за результатами через інтерфейс користувача.

Система вимірювань та збору даних: Датчики та прилади збирають дані про роботу двигуна під час випробувань. Ці дані обробляються та аналізуються для оцінки продуктивності та надійності двигуна.

Системи безпеки: З міркувань безпеки, АСВ ГТД оснащена системами виявлення і автоматичної реакції на аварійні ситуації. Якщо щось йде не так під час випробувань, система може автоматично призупинити або зупинити експеримент для захисту обладнання та персоналу.

Обробка і аналіз даних: Отримані під час випробувань дані піддаються обробці та аналізу. Це дозволяє отримати інформацію про продуктивність двигуна, виявити аномалії і зробити висновки щодо якості та надійності двигуна.

Додаткові можливості: Деякі АСВ ГТД можуть бути додатково оснащені системами для виконання спеціалізованих експериментів, таких як імітація роботи двигуна в різних кліматичних умовах або на великій висоті.

Автоматизовані стенди для газотурбінних двигунів грають важливу роль в розробці та тестуванні цих технічних систем, допомагаючи забезпечити їх високу продуктивність, ефективність та надійність.

3.2.1 Основні завдання випробувань, які вирішуються автоматизованою системою

Автоматизація випробувань авіаційних двигунів може бути поділена на два основних типи: часткову та комплексну.

Часткова автоматизація охоплює окремі фрагменти випробувань, такі як реєстрація параметрів і обробка результатів. Це означає, що лише деякі етапи випробувань стають автоматизованими, а інші залишаються під контролем оператора.

З іншого боку, комплексна автоматизація охоплює усі аспекти випробувань, включаючи керування роботою двигуна та всіма системами стенду. Тут кожен етап випробувань пов’язаний з автоматизацією, починаючи від планування випробувань і закінчуючи обробкою результатів та зберіганням даних в базі.

Завдання, які вирішуються через автоматизацію випробувань авіаційних двигунів, включають оптимальне планування, вимірювання та реєстрацію параметрів, безперервний контроль безпеки, оперативну обробку даних у режимі реального часу з подальшою подачею результатів, управління роботою двигуна та систем стенду, повну обробку результатів і підготовку документації, а також зберігання всієї необхідної інформації у базі даних. Такий підхід до автоматизації випробувань дозволяє підвищити продуктивність та точність процесу, зменшити трудомісткість та забезпечити безпеку проведення випробувань.

3.2.2 Основні вимоги до АСВ ГТД

При розробці автоматизованих систем випробувань авіаційних двигунів необхідно враховувати важливі вимоги, які визначають характеристики цих систем.

Однією з ключових вимог є досягнення високої точності вимірювання параметрів. Допустимі похибки вимірювань основних параметрів, при яких ми можемо впевнено вірити у результати, повинні бути дуже низькими, на рівні від 0,2% до 0,5%. Щоб забезпечити таку точність, необхідно виконати декілька дій. Спочатку, кожен вимірювальний канал повинен бути градуюваний перед початком кожного випробування. Далі, потрібно одночасно вимірювати всі параметри та проводити багатократні опитування датчиків. Наприклад, протягом кожного циклу вимірювань, який триває дуже короткий час (не більше 0,1 с), кожен датчик повинен бути опитаний не менше ніж 10 разів. Після цього можуть виконуватися відбраковування результатів, видаляючи можливі викиди, і

обчислення середніх значень на основі залишилися результатів. Такий підхід допомагає забезпечити високу точність вимірювань в авіаційних випробуваннях.

При створенні автоматизованих систем для випробувань авіаційних двигунів важливо враховувати ряд обов’язкових вимог, які формують основні характеристики таких систем.

Висока точність вимірювань: Необхідно забезпечити надзвичайно точне вимірювання параметрів. Допустимі похибки вимірювань основних параметрів повинні бути дуже маленькими, приблизно в діапазоні від 0,2% до 0,5%. Це досягається завдяки градуюванню вимірювальних каналів перед кожним тестом, одночасному вимірюванню всіх параметрів, багатократному вимірюванню датчиків і обробці результатів для видалення викидів.

Збереження інформації під час аварійних ситуацій: Важливо мати можливість збереження даних під час аварійних ситуацій. Це може включати в себе паралельний запис всієї інформації під час тестування, вибірковий запис у випадках потенційних аварій і використання циклічного запису на магнітний носій (де дані записуються на замкнену стрічку і перезаписуються, якщо аварійної ситуації не відбувається).

Управління двигуном та системами: Система повинна забезпечувати можливість управління роботою двигуна, його режимами та зупинкою відповідно до заданої програми.

Математичні методи обробки даних: Використовуються високопродуктивні математичні методи для обробки експериментальних даних, що дозволяє збільшити інформативність тестувань і підвищити точність результатів.

Діалогова взаємодія з оператором: Система має забезпечувати можливість активної взаємодії оператора з нею, дозволяючи оператору вчасно реагувати на інформацію.

Подання результатів: Важливо представляти результати випробувань в наочному форматі, такому як тексти, таблиці і графіки.

Застосування стандартних технічних засобів: Система повинна використовувати стандартні засоби вимірювань, які пройшли необхідні метрологічні атестації.

Можливість розширення: Система має бути модульною, щоб мати можливість розширення без значних змін у загальній структурі і програмному забезпеченні.

Висока надійність: Вимагається, щоб система була надійною з погляду часу безвідмовної роботи, зазвичай, не менше 24 годин.

Компактність і низька вартість: Важливо, щоб система була компактною та витратами на її створення і обслуговування були прийнятними.

3.2.3 Пристрої зв’язку з об’єктом (ПЗО)

ПЗО (перетворювачі сигналів та обчислювальні пристрої) є ключовими компонентами в автоматизованих системах для випробувань авіаційних двигунів. Їх головна роль полягає в управлінні обміном інформацією між датчиками, системами керування та комп’ютером.

ПЗО здатне перетворювати електричні сигнали, які надходять від датчиків, на цифровий код, і навпаки - перетворювати цифровий код в електричні сигнали. Сучасні ПЗО базуються на конструктивних елементах, які виконують конкретні завдання у цьому процесі.

Залежно від особливостей автоматизованої системи випробувань (АСВ), ПЗО (перетворювачі сигналів та обчислювальні пристрої) можуть містити різні функціональні блоки. Серед них:

Комутатори: використовуються для послідовного підключення датчиків до системи вимірювань.

Нормалізатори: служать для стандартизації електричних сигналів і забезпечення необхідного рівня.

Формувачі: використовуються для створення електричних сигналів необхідної форми.

АЦП (аналого-цифровий перетворювач): призначені для перетворення аналогових сигналів в цифровий код.

ЦАП (цифро-аналоговий перетворювач): використовуються для перетворення цифрового коду в аналогові електричні сигнали.

Таймери: включають електронні годинники для фіксації часових інтервалів та управління ПЗО.

Генератори: використовуються для створення сигналів із заданою частотою.

Лічильники: призначені для підрахунку кількості електричних імпульсів.

Перетворювачі живлення: служать для отримання необхідної напруги живлення.

Минулі моделі ПЗО використовували окремі плати або блоки для кожної з цих функцій. Проте, сучасні ПЗО будуються на основі складних модульних конструкцій, які об’єднують у собі декілька функціональних блоків, включаючи комутатори, АЦП, підсилювачі, нормалізатори і навіть мікропроцесори. Такі модульні пристрої призначені для виконання конкретних функцій, таких як обробка сигналів від термопар, термометрів опору, частотних датчиків або інших датчиків з різними характеристиками входів та виходів. При виборі таких модулів слід приділяти увагу їх метрологічним характеристикам (точність вимірювань), надійності та можливостям здійснення ремонту.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ЛАЗЕРНОГО ВІБРОМЕТРА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИПРОБУВАНЬ АВІАДВИГУНІВ.

4.1. Принцип дії однокомпонентних лазерних вимірювачів на основі ефекту Допплера.

Принцип дії лазерного вимірювача заснований на застосуванні ефекту Допплера. Відомо, що суть ефекту Допплера полягає в тому, що при русі джерела або приймача хвиль (електромагнітних, акустичних) спостерігається зміна частоти приймаючих коливань.

Якщо джерело монохроматичного (тобто певної частоти) випромінювання рухається зі швидкістю $\bar{v}$ відносно нерухомого приймача, то реєстрована приймачем частота випромінювання внаслідок ефекту Допплера змінюється на величину

$$\Delta fg = \frac{f_0\left(\frac{v}{c_0}\cos\theta - \sqrt{1-\frac{v^2}{c_0^2}+1}\right)}{1+\frac{v}{c_0}cos\theta}, \qquad (4.1)$$

де Δfg - допплерівський зсув частоти;

f_0 - частота випромінювання, що випускається джерелом хвиль;

C_0 - швидкість світла у вакуумі;

$\boldsymbol{\theta}$ - кут між прямою, яка зв'язує джерело і приймач, і вектором швидкості джерела.

Відношенням $v^2/c_0^2 \ll 1$ можна нехтувати, тому формула (4.1) записується у вигляді:

$$\Delta fg = \frac{f_0}{\frac{c_0}{v\cos\beta}+1}$$

У лазерного вимірювача рухомим джерелом електромагнітних хвиль є мікрочастоти, розсіюючі випромінювання лазера. Розсіяне мікрочастотне лазерне випромінювання містить допплерівський зсув, пропорційний швидкості, з якою рухається частота. Тому фактично лазерні вимірювачі вимірюють швидкість присутніх в потоці мікрочастот, які можуть відставати. Проте, як показали дослідження, частоти діаметром 0,5-3 мкм досить точно йдуть за потоком.

Розглянемо випадок, коли на частоту, що рухається зі швидкістю $\bar{v}$, падає плоска електромагнітна хвиля оптичного діапазону, що характеризується хвилевим вектором K_0 (рис.4.1). Хвилевий вектор є характеристикою плоскої, електромагнітної хвилі і рівний:

$$\bar{K} = \frac{2\pi}{\lambda}\bar{n}$$

де λ - довжина хвилі; $\bar{n}$ - одиничний вектор, що вказує напрям поширення хвилі.

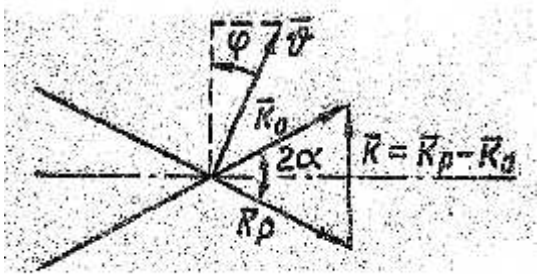


Рис.4.1. Геометрія променів в схемі лазерного вимірювача з опорним променем

Частота розсіює випромінювання, що падає на неї, на всі боки, але слід виділити тільки розсіяну над кутом 2λ хвилю з хвилевим вектором $\overline{K_p}$. Якщо приймач розсіяного випромінювання переміщається разом з мікрочастотою, то це буде рівносильно тій ситуації, коли джерело випромінювання переміщається. Частота випромінювання, що реєструється в цьому випадку приймачем:

$$f_1 = f_0 - 2\pi\bar{v}\overline{K_0} \qquad (4.2)$$

Проте в реальній ситуації приймач оптичного випромінювання нерухомий, отже, частота випромінювання, зареєстрована приймачем:

$$f_2 = f_1 + 2\pi\bar{v}\overline{K_p} \qquad (4.3)$$

Підставивши рівняння (4.2) у формулу (4.3), отримаємо:

$$f_2 = f_0 + \bar{v}(\overline{K_p} - \overline{K_0})$$

Таким чином, розсіяна мікрочастотою хвиля містить допплерівський зсув частоти, рівний скалярному добутку вектора швидкості мікрочастоти на різницю хвилевих векторів розсіяної $\overline{K_p}$ і падаючою $\overline{K_0}$ хвиль:

$$\Delta fg = f_2 - f_0 = \bar{v}(\overline{K_p} - \overline{K_0}) = \bar{v}\overline{K}$$

Якщо виміряти допплерівськкй зсув частоти, то можна отримати інформацію про проекцію швидкості потоку на різницевий хвилевий вектор $\overline{K}$:

$$v = fg\,\frac{\lambda_0}{2sin\alpha cos\varphi}$$

де, φ - кут між векторами $\bar{v}$ і $\overline{K}$;

λ_0 - довжина хвилі випромінювання джерела звичайно це лазер; 2α - кут, під який приймається розсіяна хвиля.

4.2 Основні оптичні схеми лазерних вимірювачів.

Оскільки частота електромагнітних коливань в оптичному діапазоні дуже висока (порядку 10^{14}Гц), то є певні складнощі у вимірі допплерівського зсуву частоти. Відомо два методи визначення Δfg.

Перший метод заснований на вимірі допплерівського зсуву частоти за допомогою оптичних спектральних приладів. Відомо, що частота розсіяного рухомою мікрочастотою випромінювання відрізняється від частоти випромінювання лазера на Δfg, отже, розсіяне випромінювання має іншу довжину хвилі. Оптичні спектральні прилади дозволяють виміряти, на яке значення змінилася внаслідок ефекту Допплера довжина хвилі розсіяного випромінювання. Істотним недоліком цього методу є те, що він може застосовуватися лише для вимірювання великих швидкостей, це пояснюється тим, що чутливість спектральних приладів дозволяє реєструвати зміну довжини

хвилі на величину Δλ, рівну не менше 1,5 $*10^{-4}$ мкм. Тому при довжині хвилі лазера λ_0=0,6328 мкм і 2α = 30° нижня межа діапазону вимірювання швидкості складе 15 м/с.

Другий метод виділення Δfg називається фотозсувом оптичного випромінювання. При цьому методі на приймач прямують дві електромагнітні хвилі:

- розсіяна, яка містить допплерівський зсув частоти;

- опорна, від джерела когерентного випромінювання (частина випромінювання лазера).

При складанні розсіяної і опорної хвиль на поверхні фотоприймача утворюється інтерференційна картина, яка при різних частотах хвиль змінюється в часі.

Фотострум, що виникає на виході фотоприймача:

$$[-j(w_0 - w_p)t]$$

$$I(t) = I_p + I_0 + 2ReI_{op}$$

$$w_0 - w_p = w_g$$

$$w_g = 2\pi fg$$

де I_p, I_0 - постійні складові фотоструму, що викликаються розсіяною і опорною хвилями; $I_{op} = \sqrt{I_0 I_p}$ - амплітуда змінної складової фотоструму; w_0, w_p - відповідно частота опорної і розсіяної хвилі.

Таким чином, виділення допплерівського зсуву частоти методом фотозсуву з'являється за рахунок того, що на фотоприймач прямують електромагнітні хвилі, що мають зсув частот, рівний Δfg.

Існують три основні різновиди побудови оптичної схеми лазерного вимірювача, що формують змішувані на фотоприймачі промені.

Перший лазерний вимірювач, який розроблений в 1964 році, був побудований по схемі з опорним променем. У цій схемі на фотоприймач прямують два промені - один розсіяний частотами, а другий є частиною

випромінювання лазера (опорний промінь). Геометрія променів в схемі з опорним променем показана на рис.4.1.

Приклад побудови лазерного вимірювача з опорним променем показаний на рис.4.2

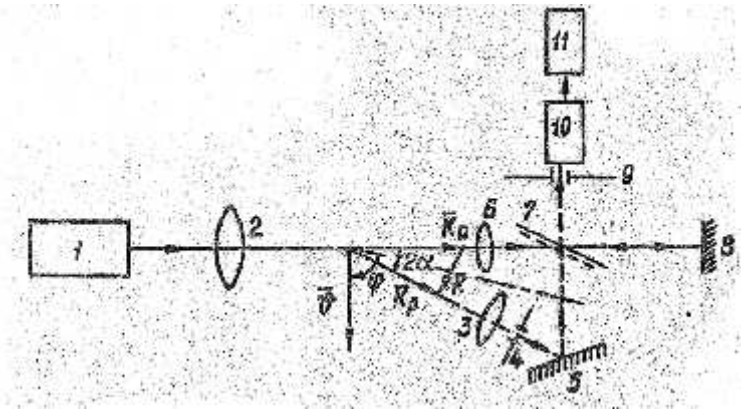


Рис.4.2. Побудова лазерного вимірювача з опорним променем.

В цьому лазерному вимірювачі випромінювання лазера 1 об’єктивом 2 прямує в досліджувану область потоку. Розсіянний під кутом 2α промінь збирається об’єктивом 3, обмежується діафрагмою 4, відбивається від дзеркала 5, проходить через пластинку з відображаючим покриттям 7 і потрапляє на фотоприймач 10. Для зменшення впливу фонових засвічень від сторонніх джерел перед фотоприймачем встановлюється діафрагма 9. Опорний промінь проходить об’єктив 6, відбивається від дзеркала 8 і від відображаючого покриття пластини 7 також прямує на фотоприймач. Електричний сигнал з виходу фотоприймача поступає на вимірювач допплерівської частоти 11. В даному лазерному вимірювачі вимірюється проекція вектора швидкості на різницевий хвилевий вектор розсіяного і опорного променя.

Основним недоліком схеми з опорним променем є те, що в ній розсіяне випромінювання повинне збиратися в малому апертурному куті. Відомо, що допплерівський зсув частоти в розсіяному промені залежить від кута α. Якщо розсіяне випромінювання збиратиметься у великому апертурному куті, то вихідний сигнал фотоприймача міститиме спектр частот. Тому в лазерному вимірювачі (рис.4.2) встановлена ампертурна діафрагма 4. Для забезпечення необхідної точності в потік штучно вводяться спеціальні частоти, розміром

порядку 1мкм. Інтенсивність розсіяного на таких малих частотах випромінювання незначна, тому в схемах лазерного вимірювача з опорним променем для здобуття на виході фотоприймача, прийнятного для подальшої обробки сигналу, необхідно використовувати потужні лазери. Крім того, схема з опорним променем складна в налаштуванні і дуже чутлива до дії вібрацій.

Найбільш широкого поширення набула диференціальна схема побудови лазерного вимірювача. У ній в досліджуване середовище направлено два лазерні помені. Геометрія променів, відповідна диференціальній схемі, показана на рис.4.3.

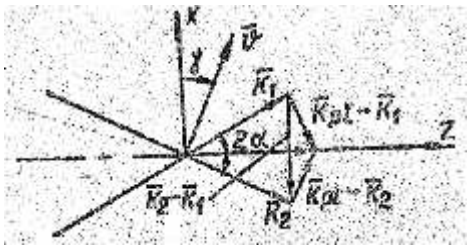


Рис.4.3. Геометрія зондуючих і розсіяних променів в диференціальній схемі лазерного вимірювача

Допплерівські зсуви частоти від першого і другого зондуючих променів при прийомі розсіяного випромінювання в i -м напрямі рівні:

$$f_{g_1 i} = \frac{1}{2\pi}\bar{v}(\overline{K_{pi}} - \overline{K_1}) \qquad f_{g_2 i} = \frac{1}{2\pi}\bar{v}(\overline{K_{pi}} - \overline{K_2})$$

Таким чином, в диференціальній схемі лазерного вимірювача в кожному напрямі поширюються дві розсіяні хвилі, що відрізняються один від одного амплітудами, фазами і станами поляризації. Ці хвилі оптично змішуються на фотоприймачі, електричний сигнал з виходу якого має складову різницевої частоти:

$$\Delta f g_i = f_{g_1 i} - f_{g_2 i} = \frac{1}{2\pi}\bar{v}(\overline{K_2} - \overline{K_1}) \qquad (4.4)$$

Допплерівський зсув частоти пропорційний проекції вектора швидкості розсіюючої частоти на вектор, рівний різниці хвилевих векторів падаючих світлових променів.

Характерною особливістю диференціальної схеми є те, що допплерівський зсув частоти вихідного сигналу фотоприймача не залежить від напряму прийому

розсіяного випромінювання і розміру приймальної апертури. Це пояснюється тим, що різницева допплерівська частота двох розсіяних хвиль визначається значенням швидкості частоти, геометрією зондуючих променів і однакова для будь-якого довільно вибраного напряму прийому.

Однокомпонентна диференціальна схема лазерного вимірювача показана на рис.4.4. Вона складається з лазера 1, оптичного розчеплювача 2, передавального і приймального об’єктивів 3 і 6, діафрагм 5 і 7, фотоприймача 8 і вимірювача допплерівської частоти 9. Випромінювання лазера діляться оптичним розчеплювачем на два промені і прямує передавальним об’єктивом в досліджувану область потоку 4. Розсіяне випромінювання в межах апертурної діафрагми збирається приймальним об’єктивом на поверхні фотоприймача, вихідний сигнал якого містить допплерівський зсув частоти:

$$fg = \frac{2v}{\lambda} sin\alpha cos\varphi$$

$$w_g = \frac{2\pi}{\lambda} sin\alpha v_x$$

де

$$v = vcos\varphi$$

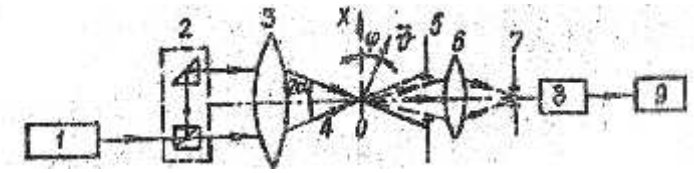


Рис.4.4. Однокомпонентна диференціальна схема лазерного вимірювача.

Якщо у диференціальній схемі лазер і фотоприймач поміняти місцями, то виходить інверсно-диференціальна схема лазерного вимірювача (рис.4.5). У лазерного вимірювача такого типу випромінювання лазера 1 об’єктивом 2 фокусується в досліджувану область потоку 3. За допомогою діафрагми 4 і об’єктиву 5 формуються два розсіяні промені, які оптичним змішувачем 6 прямують на фотоприймач 8, перед яким встановлена діафрагма 7. Геометрія променів для цієї схеми показана на рис.4.6. Розсіяні промені містять допплерівський зсув частоти:

$$f_{g_1}=\frac{1}{2\pi}\bar{v}(\overline{K_0}-\overline{K_{p_1}})$$

$$f_{g_2}=\frac{1}{2\pi}\bar{v}(\overline{K_0}-\overline{K_{p_2}})$$

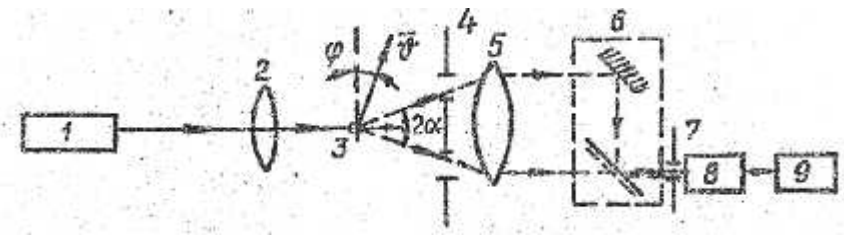


Рис.4.5. Інверсно-диференціальна схема лазерного вимірювача

На виході фотоприймача сигнали мають різницю частоти:

$$\Delta f g = f_{g_1} - f_{g_2} = \frac{1}{2\pi}\bar{v}(\overline{K_{p_2}} - \overline{K_{p_1}})$$

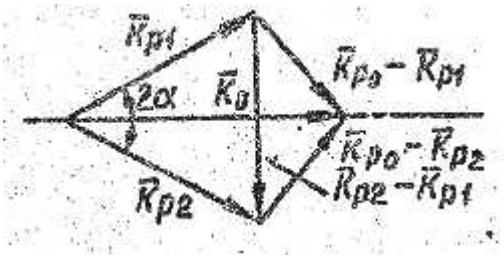


Рис.4.6. Геометрія променів в інверсно-диференціальному лазерному вимірювачі.

Цей зсув частоти визначається геометрією розсіяних променів, тому також, як і в схемі з опорним променем, розсіяне випромінювання повинне збиратися в малому апертурному куті. Цим пояснюється мала потужність корисного сигналу і, отже, низька перешкодостійкість лазерного вимірювача цього типу і обмеженість його вживання.

4.3 Розробка функціональної схеми лазерного віброметра двох складових вектора швидкості вібрації.

Використання лазерних віброметрів стає невід’ємною частиною еволюції випробувальних підходів, забезпечуючи високоточний контроль вібраційних параметрів. Дослідимо нові можливості та технічні інновації, що розширять горизонти автоматизованих систем випробувань та сприятимуть подальшому розвитку авіаційної техніки.

Наразі відомий такий лазерний віброметр принцип дії якого заснований на застосуванні лазерного допплерівського вимірювача швидкості

диференціального типу. Такий віброметр вимірює складову віброшвидкості, що перпендикулярна бісектрисі кута між лазерними променями.

Також відомий лазерний віброметр, що включає в себе лазерний допплерівський вимірювач швидкості з опорним променем та лазерний допплерівський вимірювач швидкості диференціального типу.

Такий віброметр побудований на основі лазерного допплерівського вимірювача швидкості (ЛДВШ) з опорним променем та ЛДВШ диференціального типу.

Він може вимірювати як складову швидкості що лежіть у площині, яка утворена двома лазерними променями диференціального ЛДВШ так і складову швидкості, що направлена вздовж опорного лазерного променя.

Але такий віброметр не може вимірювати складову швидкості вібрації, що перпендикулярна площині, яка утворена двома лазерними променями диференціального ЛДВШ.

Такий віброметр побудований на основі лазерного допплерівського вимірювача швидкості (ЛДВШ) з опорним променем та ЛДВШ диференціального типу.

Пропонується лазерний допплерівський віброметр, призначений для вимірювання двох складових швидкості вібрації у тому числі складової, що перпендикулярна площині, яка утворена двома лазерними променями диференціального ЛДВШ.

Такий віброметр побудований на основі ЛДВШ з опорним променем та ЛДВШ інверсно-диференціального типу.

На рис.4.7 представлена та частина віброметра, яка призначена для вимірювання складової швидкості вібрації V_x в напрямку осі Ox.

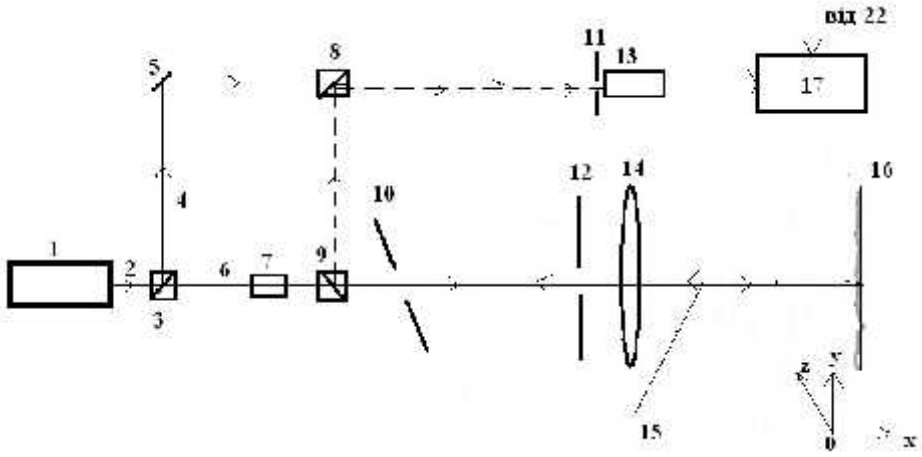


Рис.4.7. Схема віброметра в режимі вимірювання V_x складової швидкості вібрації.

Ця частина приладу побудована на основі ЛДВШ з опорним променем та працює наступним чином.

Випромінювання лазера 1 (або лазерного діоду) 2 світло подільним елементом 3 поділяється на два промені 4 та 6.

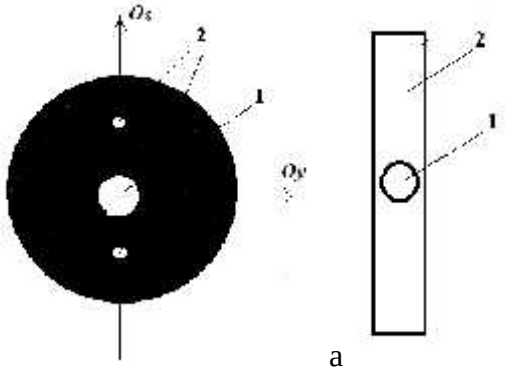
Промінь 4 відбивається від дзеркала 5, проходить, світло подільний елемент 8 та попадає на фотоприймач 13, перед яким встановлена діафрагма 11.

За світло подільним елементом 3 по напрямку розповсюдження лазерного променя 6 встановлений пристрій зсуву частоти лазерного променя 7.

Далі на шляху променя 6 послідовно встановлені світло подільний елемент 9, дзеркало 10, діафрагма 12 та об’єктив 14.

Діафрагма 12 має три отвори (рис.4.8 а). Площина, в якій розташована діафрагма 12 перпендикулярна осі променя 6. Центр першого отвору 1 співпадає з віссю лазерного променя 6.

Отвори, що позначені цифрою 2, розташовані на відстанях, симетричних відносно осі лазерного променя 6, а їх центри знаходяться в площині, що перпендикулярна площині, яка утворена променями 4 і 6.



а б

Рис.4.8. Форма діафрагми 12 (а) та дзеркала 10 (б).

Дифузне розсіяне випромінювання 15 від об'єкту досліджень 16 збирається об'єктивом 14 в межах центрального отвору діафрагми 12 (рис.4.8 а) та послідовно відбивається від світло подільних елементів 9 та 8 і потрапляє на фотоприймач 13.

В результаті оптичного гетеродинирування розсіяного випромінювання 15 та опорного лазерного променя 4 на виході фотоприймача 13 утворюється сигнал, частота якого пропорційна складової швидкості вібрації у напрямку осі Ox:

$$\Omega_x = \Omega_m + \frac{2V_x}{\text{а}}, \qquad (1.4)$$

де: Ω_m - частота модуляції пристрою зсуву частоти 7; V_x - швидкість вібрації об'єкту в напрямку осі Ox; λ - довжина хвилі променя лазера.

Проведемо розрахунок сигналу частота якого пропорційна складової швидкості вібрації у напрямку осі Ox маючи наступні вихідні дані:

Ω_m – 10 кГц;

V_x – 200 мм/с;

λ – 0,6328 мкм.

Підставимо вихідні дані в формулу (1.4) та проведемо розрахунок:

$$\Omega_x = \Omega_m + \frac{2V_x}{\lambda} = 10\ \text{кГц} + \frac{2 * 200\ \text{мм/с}}{0{,}6328\ \text{мкм}} = 643\ \text{кГц}$$

Вихід фотоприймача 13 підключений до пристрою вимірювання частоти допплерівського сигналу 17.

Сигнал з виходу фотоприймача 13 поступає на вимірювач допплерівської частоти 17 за допомогою якого визначається значення V_x складової швидкості вібрації.

Схема приладу в режимі вимірювання Oz складової швидкості вібрації пробудована на основі ЛДВШ інверсно-диференціального типу та представлена на рис.4.9.

Вимірювання V_z складової швидкості вібрації відбувається наступним чином.

За допомогою діафрагми 12, що має отвори 2, (див. рис.4.8 а) з розсіяного об’єктом 16 випромінювання виділяються два диффузно розсіяних променя 18.

Промені 18 розташовані у площині, що перпендикулярна площині, яка утворена променями 4 і 6.

Далі за допомогою дзеркала 10, що має отвір 1 (рис.4.8 б), центр якого лежіть на осі променя 6 та покриття 2, що відбиває випромінювання на довжині хвилі λ, промені 18 направляються до об’єктива 20. Оптична вісь 19 об’єктива 20 перпендикулярна площині, яка утворена променями 4 та 6.

Об’єктивом 20, перед яким встановлена діафрагма 21 направляються на фотоприймач 22.

В результаті оптичного гетеродинирування розсіяних променів 18, які мають різні частоти, на виході фотоприймача 22 утворюється сигнал, що пропорційний складової швидкості вібрації у напрямку осі Oz - V_z :

$$\Omega_y=\Omega_m+\frac{2|\bar{V}|}{a}\sin(\frac{}{2}), \qquad (2.4)$$

де: – кут між розсіяними променями 18.

Проведемо розрахунок частоти сигналу, що пропорційний складової швидкості вібрації у напрямку осі Oz - V_z маючи наступні вихідні дані:

Ω_y – 10 кГц;

$|\bar{V}|$ – 200 мм/с;

λ – 0,6328 мкм;

$\beta - 5^{\circ}$.

Підставимо вихідні дані в формулу (2.4) та проведемо розрахунок:

$$\Omega_y = \Omega_m + \frac{2|\bar{V}|}{\lambda}\sin(\frac{\beta}{2}) = 10\ кГц + \frac{2 * 200\ мм/с}{0{,}6328\ мкм} * \sin(\frac{5}{2}) = 10{,}24\ кГц.$$

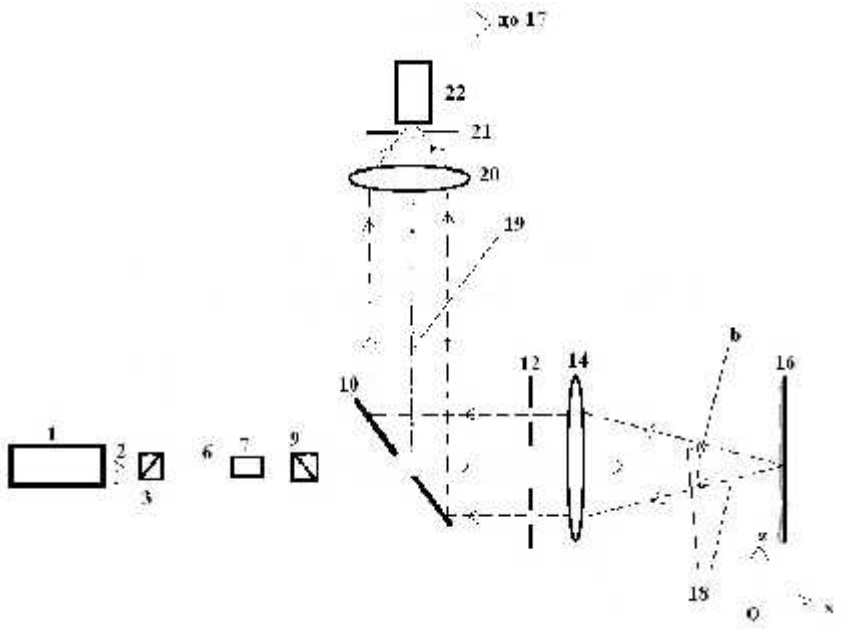


Рис.4.9. Схема віброметра в режимі вимірювання V_z складової швидкості вібрації

Вихід фотоприймача 22 підключений до пристрою вимірювання частоти допплерівського сигналу 17, за допомогою якого визначається значення V_z складової швидкості вібрації.

Розглядаючи високу точність та функціональність лазерного віброметра, можна побачити його широкий потенціал застосування в різноманітних галузях, включаючи випробування авіадвигунів, автомобільних двигунів та вібраційний аналіз енергетичного устаткування.

Його застосування в системах випробувань авіадвигунів покликане покращити ефективність та безпеку польотів, забезпечуючи точний моніторинг вібрацій і виявлення потенційних проблем у ранніх стадіях розробки та експлуатації.

Цей інноваційний підхід до вимірювань може визначати не лише дві складові швидкості вібрації, але й ті, що перпендикулярні площині, що розширює можливості в дослідженнях та тестуваннях технічних систем.

Практичне використання цього пристрою стає важливим кроком у напрямку поліпшення якості, надійності та ефективності технічних рішень в сучасній інженерії та науково-дослідних роботах.

4.4 Обробка лазерного силналу допплерівського віброметра.

Важливою частиною лазерного вимірювача є електронна система виділення і обробки допплерівського сигналу. Основним завданням цієї апаратури є виділення з найменшими втратами корисної інформації про швидкість, що міститься в частоті коливань доплеровського сигналу.

Розрізняють одночастковий і багаточастинковий режими роботи лазерного вимірювача. Форма сигналу пояснюється характером гауса розподілу інтенсивності в поперечному перетині лазерного пучка. Сигнал є сумою високочастотної складової U_g і низькочастотної компоненти U_0.

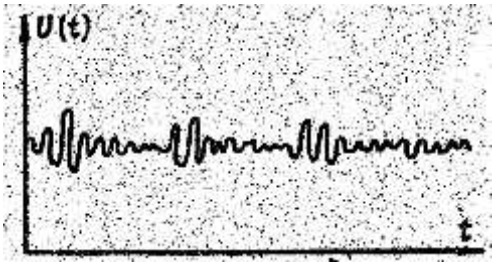


Рис.4.8. Сигнал на виході фотоприймача в разі багаточастинкового режиму роботи лазерного вимірювача.

В одночастковому режимі лазерний вимірювач працює при вимірі швидкості газових потоків. Коли вимірюється швидкість забруднених рідких потоків, то у вимірювальному об’ємі лазерного вимірювача одночасно можуть знаходитися декілька часток. В цьому випадку на виході фотоприймача спостерігається безперервний сигнал (рис.4.8).

Точний вимір частоти цих сигналів досить складне завдання. Тому залежно від умов роботи лазерного вимірювача можуть застосовуватися наступні основні методи обробки доплерівського сигналу:

- спектральний або кореляційний аналіз за допомогою якого вимірюється середнє значення швидкості і її дисперсія;

- стежачі системи, які відстежують миттєву частоту або фазу доплерівського сигналу і формують на своєму виході сигнал, пропорційний миттєвому значенню швидкості;

- рахунково-імпульсні системи - системи, засновані на виділенні і підрахунку числа періодів допплерівського сигналу, що укладаються у відомий проміжок часу.

Історично першим способом обробки доплерівського сигналу, був спектральний аналіз. Спектр сигналу лазерного вимірювача в одночастковому режимі має вигляд показаний на рис.4.9. Він містить низькочастотну компоненту шириною:

$$\Delta f_H = \frac{v\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right)}{\pi d_n}$$

де υ - швидкість частоти; γ - кут між тим, що зондує пучками; dn - діаметр вимірювального об’єму лазерного вимірювача; а також доплерівську складову шириною:

$$\Delta f g = \frac{2v\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right)}{\pi d_n}$$

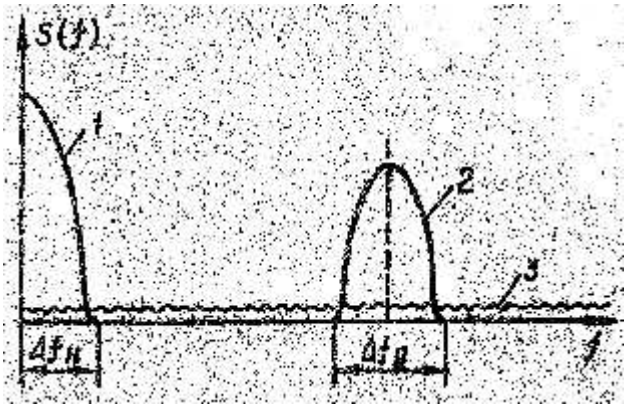


Рис.4.9. Спектр доплерівського сигналу ЛДВШ, що працює в одночастковому режимі: 1 - низькочастотна компонента;2 –доплерівськая складова; 3 - білий шум

Як видно з цих формул, із зростанням вимірюваної швидкості зростає ширина спектру доплерівського сигналу Система вимірювання доплерівської частоти, що використовує спектральний аналіз, складається із спектроаналізатора 1, генератора стандартних сигналів 2 і частотоміра 3

(рис.4.10). На один вхід спектроаналізатора подається досліджуваний сигнал, а на другий вхід синусоїдальний сигнал від генератора, частота котрого відома. Оператор поєднує частоту відомого сигналу з максимумом спектру доплерівського сигналу. Одночасно сигнал з виходу генератора подається на вхід частотоміра, за допомогою якого визначають значення доплерівської частоти.

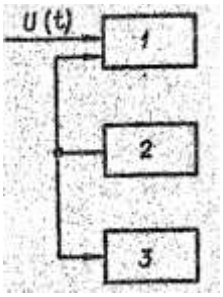


Рис.4.10. Структура схеми обробки, в якій використовується спектральний аналіз

Цей метод має свої переваги й недоліки. Він може застосовуватися в широкому діапазоні частот від 1 кГц до 100 МГц і при низькому відношенні сигнал/шум. Основним недоліком є мала швидкодія і невисока точність. Електронні системи виділення і обробки доплерівського сигналу, побудовані на основі наступних систем, бувають двох типів: з автопідстроюванням частоти і фазовим автопідстроюванням. Вони застосовуються у тому випадку, коли лазерний вимірювач працює в багаточастковому режимі і сигнал на виході фотоприймача безперервний. Розглянемо систему з автопідстроюванням частоти, структурна схема якої показана на рис.4.11. На вхід змішувача 1 поступає доплерівський сигнал у вигляді послідовності радіоімпульсів форми гауса з частотою заповнення f_g. В змішувач поступає також безперервний сигнал з частотою f_r - від керованого генератора 7. Сигнал різницевої частоти $f_r - f_g$ виділяється підсилювачем проміжної частоти (ППЧ) 2. Смуга пропускаючи ППЧ погоджена з шириною спектру сигналу лазерного вимірювача. Потім відфільтрований сигнал проходить обмежувач - ключ 3 (тригер Шмідта) і частотний дискримінатор 4. Центральна частота частотного дискримінатора f_0 збігається з центром смуги пропускання ППЧ.

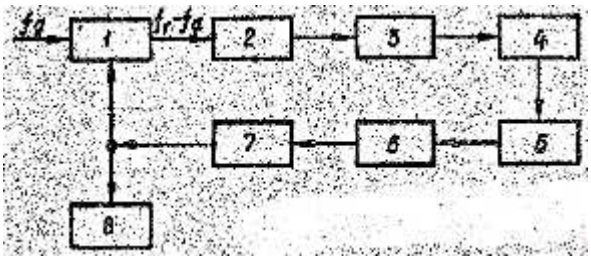


Рис.4.11. Електронна система вимірювання доплерівської частоти з автопідстроюванням частоти

Якщо різниця $f_r - f_g$ рівна f_0, то напруга на виході частотного дискримінатора дорівнює нулю і система налагоджена. При зміні частоти до f_{g_1} на виході ППЧ з'явиться напруга з частотою $f_0' = f_r - f_{g_1}$ яке відрізнятиметься від частоти попереднього налаштування ланцюга зворотного зв'язку: $f_0 - f_0' = f_{g_1} - f_g$. В результаті цього частотний дискримінатор вироблятиме напругу, пропорційну $f_0 - f_0'$. Це напруга розузгодження поступає на вхід інтегратора 5, вихідна напруга якого подається на. підсилювач 6. Посилена напруга є керуючою для генератора 7. Частота керованого генератора 7, що відрізняється від частоти доплерівського сигналу на центральну частоту частотного дискримінатора f_0, вимірюється електроно - рахунковим частотоміром 8.

Ця система ефективно працює лише у разі, коли доплерівський сигнал безперервний. Тригер Шмідта 3 виконує. роль ключа, який відключає систему у випадку, якщо сигнал на виході системи відсутній.

Стежачі системи найбільш личать для досліджень рідких і газових потоків з високою концентрацією розсіюючих часток. На відміну від аналізатора спектру вони не можуть працювати при низькому відношенні сигнал/шум.

Найбільш поширеними є схеми, в яких реалізований метод дискретного вимірювання частоти доплерівського сигналу. Цей метод використовується при одночастковому режимі лазерного вимірювача і дозволяє при відносно простій технічній реалізації добитися досить високої точності.

Відомо два способи дискретного вимірювання частоти доплерівського сигналу.

Перший спосіб заснований на вимірі тривалості τ_g, відомого числа періодів доплерівського сигналу n_1. При цьому доплерівська частота знаходиться таким чином:

$$\Delta fg = \frac{n_1}{\tau_g}$$

де n_1 - відоме ціле число періодів; τ_g - тривалість вибраного числа періодів.

Схеми другого типу містячи лічильник перетину доплерівським сигналом заданого рівня і таймер, що визначає тривалість частини доплерівського сигналу.

Другий спосіб передбачає підрахунок числа періодів доплерівського сигналу n_2, які укладаються у відомий інтервал часу τ_n:

$$\Delta fg = \frac{n_2}{\tau_n}$$

При технічній реалізації цих способів є і деякі особливості. Перш за все в цих системах за допомогою смугового фільтру виділяється лише високочастотна доплерівська складова. Проте повністю відфільтрувати шуми дробів не удається, тому присутність шуму приводить до погрішності у вимірі доплерівської частоти.

При підрахунку числа періодів доплерівського сигналу за відомий час шуми можуть давати відліки, які помилково можна інтерпретувати як період доплерівської частоти (рис.4.12). Крім того, під впливом шумів тривалість вибраного числа періодів доплерівського сигналу змінюється від сигналу до сигналу.

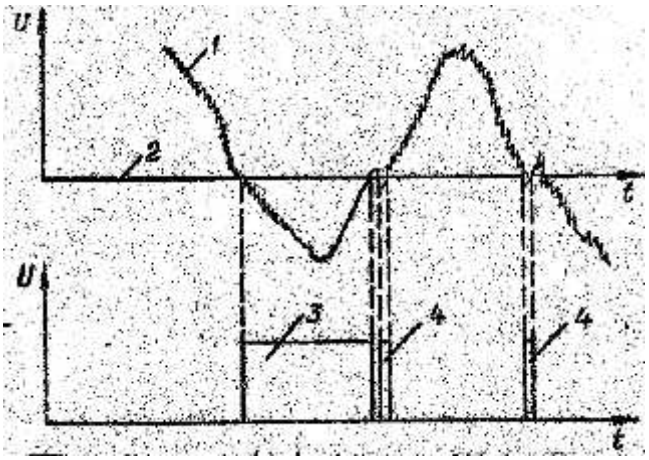


Рис.4.12. Помилкові "нулі" в доплерівському сигналі:
1- доплерівський сигнал, що супроводжується шумами дробів;
2- нульовий рівень порогу спрацьовування лічильника числа періодів доплерівського сигналу; 3 - імпульс на виході лічильника від доплерівського сигналу; 4 - помилкові імпульси лічильника числа періодів доплерівського сигналу, викликані шумами.

Для зменшення впливу шумів високочастотна складова сигналу в цих схемах поступає на вхід амплітудного селектора з фіксованим рівнем порогу. Селектор пропускає на вхід вимірюючої системи лише. центральну частину сигналу, амплітуда якої вища за рівень порогу.

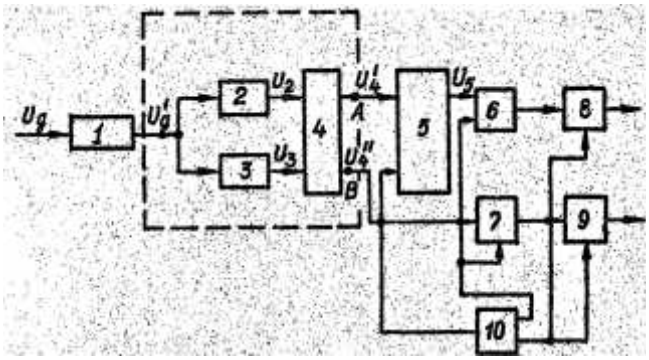


Рис.4.13. Структурна схема електронної системи дискретного вимірювання частоти сигналу ЛДВШ:
1 - автоматично керований фільтр; 2,3 - порогові формувачі пачок імпульсів; 4 - блок логічної обробки; 5 - блок формування мірного інтервалу; 6 - вимірник тимчасових інтервалів; 7 - лічильник імпульсів; 8,9 - ключі; 10 - блок установки

Один з можливих варіантів побудови системи дискретного вимірювання частоти показаний на рис.4.13. Вона працює таким чином. Сигнал з фотоприймача поступає на автоматично керований фільтр 1, який забезпечує автоматичне стеження за доплерівською частотою і виділення високочастотній

складовій сигналу. Відфільтрований від низькочастотної складової і частини шумів сигнал U'_g поступає на двоканальний пороговий формувач пачок і імпульсів 2 і 3. Цей формувач має різні пороги спрацьовування, причому $U_{n_2} > U_{n_1}$. На виходах формувача з сигналу U'_g виробляються пачки імпульсів з різною кількістю імпульсів (рис.4.14). Блок логічної обробки 4 формує на виході в короткі імпульси, співпадаючі із задніми фронтами імпульсів укороченої пачки. На виході А виробляються такі ж короткі імпульси, відповідні імпульсам довгої пачки, але лише ті, які не збігаються за часом з імпульсами в короткій пачці. Блок формування мірного інтервалу формує з імпульсів обох пачок мірний інтервал. Сигнали "Старт" і "Стоп" з блоку формування мірного інтервалу поступають на вимірювач тимчасових інтервалів 6. Крім того, сигнал з виходу В блоку логічної обробки поступає на лічильник імпульсів 7 і на блок установки 10.

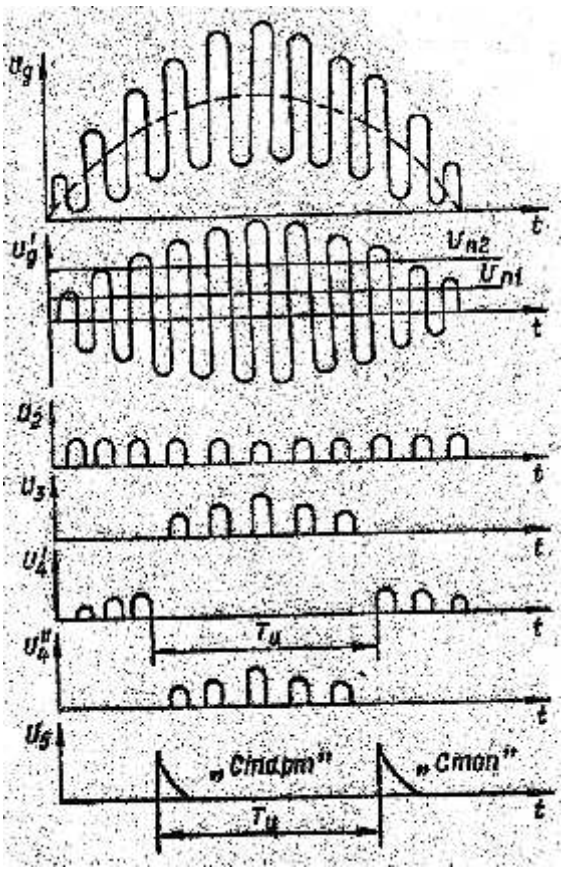


Рис.4.14. Тимчасова діаграма сигналів в системі дискретного вимірювання доплеровськой частоти: U_g - доплеровський сигнал на виході фотоприймача; U'_g - змінна

складова сигналу; U_2 і U_3 - сигнали на виході порогових формувачів пачок і імпульсів; U_4' і U_4'' - сигнали на виходах формувачів пачок імпульсів; U_5 - сигнал на виході блоку формування мірного інтервалу.

Блок установки здійснює контроль числа імпульсів n в укороченій пачці. Якщо $n_{min} \leq n \leq n_{max}$, то ключі 8 і 9 знаходяться у відкритому стані і результат вимірювання з лічильника імпульсів 7 і вимірника тимчасових інтервалів 6 видається на зовнішні реєструючі пристрої. При $n < n_{min}$ або $n \geq n_{max}$ ключі 8 і 9 закриті, внаслідок чого після закінчення вимірювання лічильник імпульсів і вимірник тимчасових інтервалів встановлюються в.вихідний стан, а результат вимірювання не реєструється. Результат вимірювання знаходиться як відношення числа імпульсів n до тривалості мірного інтервалу τ_n.

Порогові рівні формувачів 2 і 3 встановлюються залежно від максимального рівня шумів.

4.5 Фільтрація високочастотних завад допплерівського сигналу лазерного віброметра.

4.5.1 Основні положення про фільтри.

При обробці акустичних сигналів одним з основних методів є фільтрація, яка полягає в зміні частотного складу сигналу з метою пригнічення небажаних складових (шумів) та підсилення корисних сигнальних компонентів. Особливо важливою ця процедура є в системах діагностики, які зазвичай працюють в умовах великої кількості завад.

У процесі фільтрації використовуються спеціальні пристрої, відомі як електричні фільтри, які здатні модифікувати частотний спектр сигналу. Ці фільтри можуть розглядатися як чотириполюсники, де на їх вхід підводиться напруга $\dot{U}_1$, а з вихідних затискачів відбирається напруга $\dot{U}_2$ (див. рис.4.15).

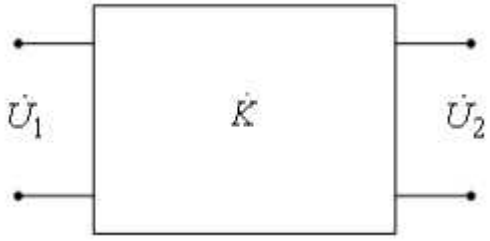


Рис.4.15. – Схема фільтра чотирьохполюсника.

Основна мета фільтрації - видалення або зменшення шумів, що можуть виникнути під час передачі акустичних сигналів, та збереження важливої інформації. Це досягається за допомогою налаштування параметрів електричних фільтрів, які впливають на різні частоти сигналу.

Фільтри класифікуються за їхньою здатністю пропускати сигнали в різних діапазонах частот. Фільтри нижніх частот (ФНЧ) пропускають сигнали з низькими частотами, фільтри верхніх частот (ФВЧ) – сигнали з високими частотами. Смугопропускні фільтри (СФ) пропускають сигнали у визначеному діапазоні частот, тоді як смугозагороджувальні фільтри, режекторні (РФ) блокують сигнали в цьому діапазоні. Крім того, існують комбіновані фільтри, які поєднують властивості різних типів.

Основні характеристики фільтрів:

- комплексна частотна характеристика $\dot{K} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$ – відношення комплексних амплітуд вихідної напруги фільтра до вхідної;

- амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) $K(f)$ – модуль комплексної частотної характеристики фільтра $\dot{K}$. На рис.4.16 зображено графіки АЧХ ідеальних ФНЧ а) та ФВЧ б);

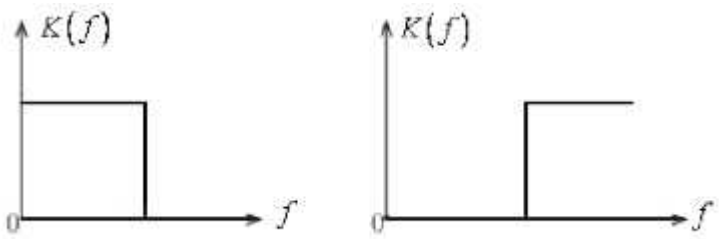


Рис.4.16. – графіки АЧХ ідеальних: а) ФНЧ; б) ФВЧ.

- нормована АЧХ $M(f)$ – АЧХ, розділена на своє максимальне значення: $M(f) = \frac{K(f)}{K_{max}}$.

Амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) реальних фільтрів (позначені суцільною лінією на рис.4.17) відрізняються від ідеальних фільтрів (позначених штриховою лінією на тому ж рис.4.17), які, на жаль, не можна фізично реалізувати. Отже, у практиці реальні фільтри в тій чи іншій мірі намагаються наблизитися до ідеальних амплітудно-частотних характеристик.

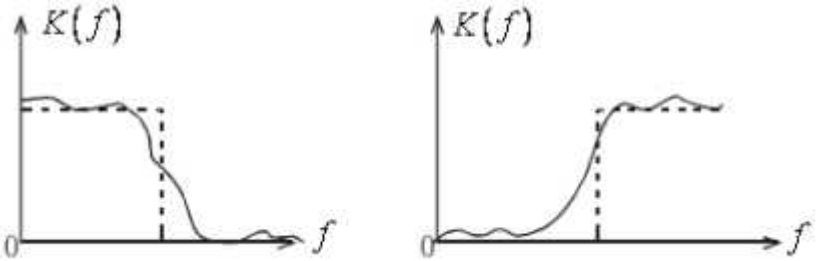


Рис.4.17. – АЧХ реальних фільтрів: а) ФНЧ; б) ФВЧ.

При апроксимації АЧХ ідеального фільтра існують різні алгоритми, що мають свої особливості. Це призвело до розробки різних типів фільтрів, кожен з яких має свої унікальні властивості.

Фільтри Баттерворта вирізняються тим, що мають максимально плоску амплітудно-частотну характеристику, що означає стабільний і плавний перехід між областями пропускання та непропускання. Фільтри Чебишова є інверсні рівнохвильовими, з пульсаціями амплітуди в областях пропускання і непропускання відповідно. Фільтри Золотарьова (Чебишова–Кауера) є еліптичними фільтрами, які мають різкі переходи між частотами і надзвичайно високу ефективність в областях пропускання та непропускання. Фільтри Бесселя характеризуються лінійною фазо-частотною характеристикою, що зберігає форму вхідного сигналу.

Характеристикою, що використовується при проектуванні фільтрів, є згасання $A(f) = 20\lg\frac{1}{M(f)}$.

За своїм змістом згасання протилежне до АЧХ. Основними параметрами, на основі яких відбувається розрахунок фільтрів є (рис.4.18):

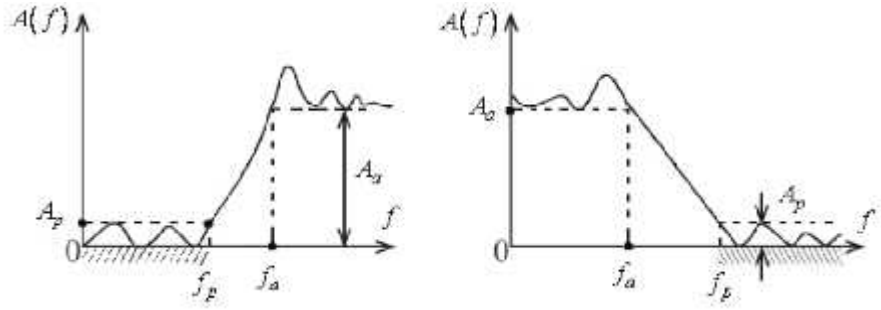


Рис.4.18. – а) ФНЧ; б) ФВЧ.

f_p– гранична частота смуги пропускання;

f_a – гранична частота смуги непропускання;

A_p – максимально допустиме згасання в смузі пропускання;

A_a – мінімально допустиме згасання в смузі непропускання.

Пасивні фільтри складаються з електричних схем, що включають пасивні компоненти, такі як резистори, конденсатори, котушки індуктивності та трансформатори. Незважаючи на їхню простоту, у пасивних фільтрів є свої обмеження. Один з основних недоліків - невеликий вхідний опір і великий вихідний опір, і у випадку використання котушок індуктивності можуть виникнути проблеми з габаритами. На рис.4.19 показані схеми найпростіших пасивних фільтрів першого порядку.

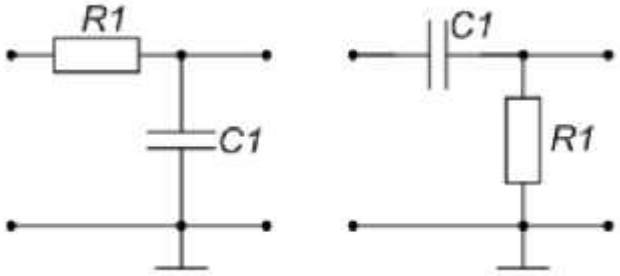


Рис.4.19. – найпростіші пасивні фільтри першого порядку: а) ФНЧ; б) ФВЧ.

4.5.2 Розрахунок фільтра Баттерворта.

Фільтри Баттерворта характеризуються максимально плоскою апроксимацією АЧХ ідеального фільтра. У них відсутні пульсації в смугах пропускання та непропускання. АЧХ $K(f)$ фільтрів обох частотних вибірностей співпадає з нормованою АЧХ $K(f) = M(f)$.

Згасання дорівнює $A(f) = 20lg\frac{1}{M(f)} = 20lg\frac{1}{K(f)}$.

Запишемо основні формули для розрахунку характеристик фільтра в залежності від частотної вибірності фільтра.

Для ФНЧ формули мають вигляд:

- мінімальний порядок фільтра: $n \geq \frac{lg\frac{\sqrt{10^{0,1A_a}-1}}{\varepsilon}}{lg\frac{f_a}{f_p}}$.

де ε – коефіцієнт нерівномірності (виступає як масштабний множник по осі частот);

- нормована АЧХ (рис.4.20): $M(f) = \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon^2(\frac{f}{f_p})^{2n}}}$.

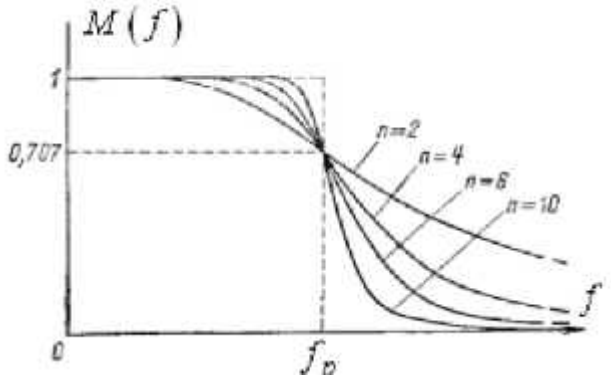


Рис.4.20. – Нормована АЧХ

При значенні нерівномірності ε=1 максимально допустиме згасання в смузі пропускання дорівнює A_p =3дБ.

Для ФВЧ формули мають вигляд:

- мінімальний порядок фільтра: $n \geq \frac{lg\frac{\sqrt{10^{0.1A_a}-1}}{\varepsilon}}{lg\frac{f_p}{f_a}}$;

- нормована АЧХ: $M(f) = \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon^2(\frac{f_p}{f})^{2n}}}$.

Було розраховано фільтр Баттерворта, і було проведено моделювання його електричної схеми. Результати цього моделювання були візуалізовані у вигляді графіків (див. рис.4.21-4.23). Ці графіки демонструють роботу фільтра та його здатність до пригнічення чи підсилення сигналів у визначеному діапазоні частот. Аналіз цих результатів дозволяє зрозуміти ефективність та характеристики фільтрації, які були досягнуті за допомогою фільтра Баттерворта.

Фільтрація високочастотних завад у допплерівському сигналі віброметра:

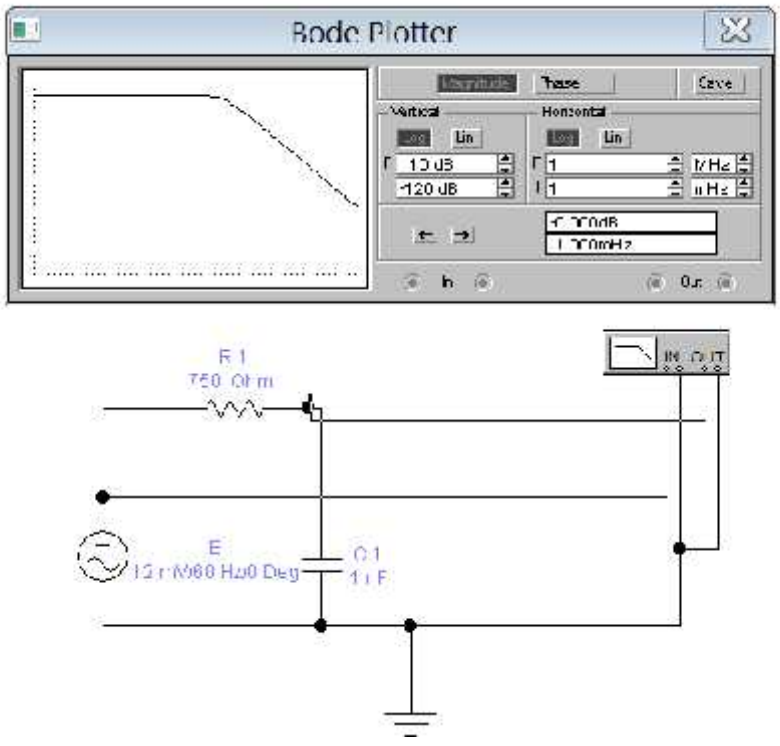


Рис.4.21. – Моделювання АЧХ фільтру низьких частот побудованого на основі R C ланцюга

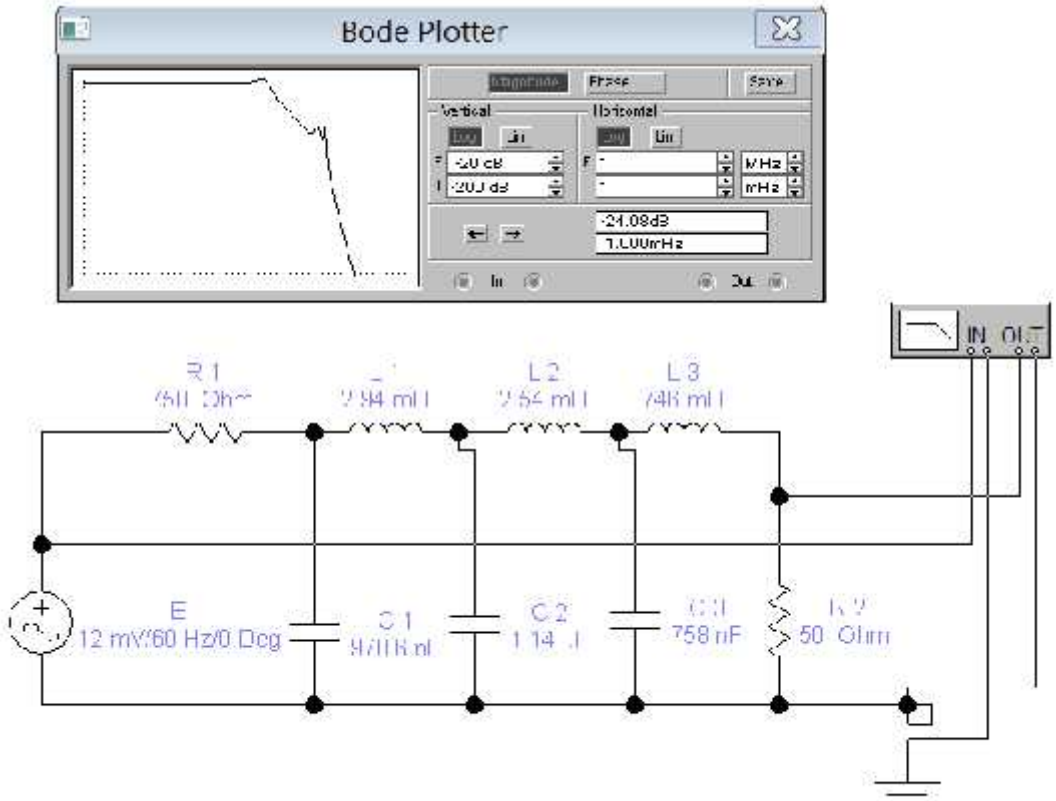
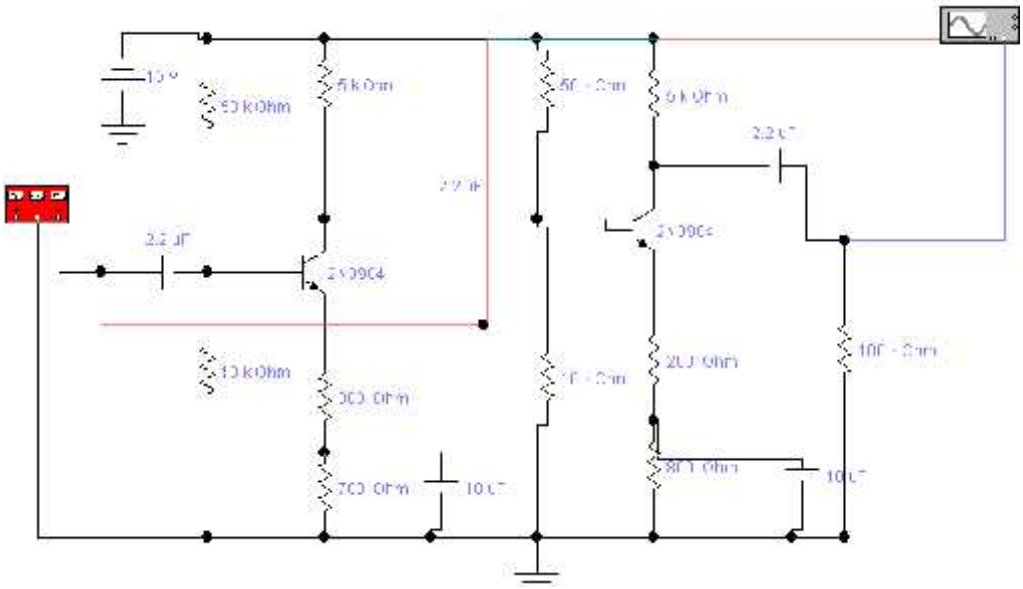


Рис.4.22. – Моделювання АЧХ фільтру низьких частот Баттерворта.



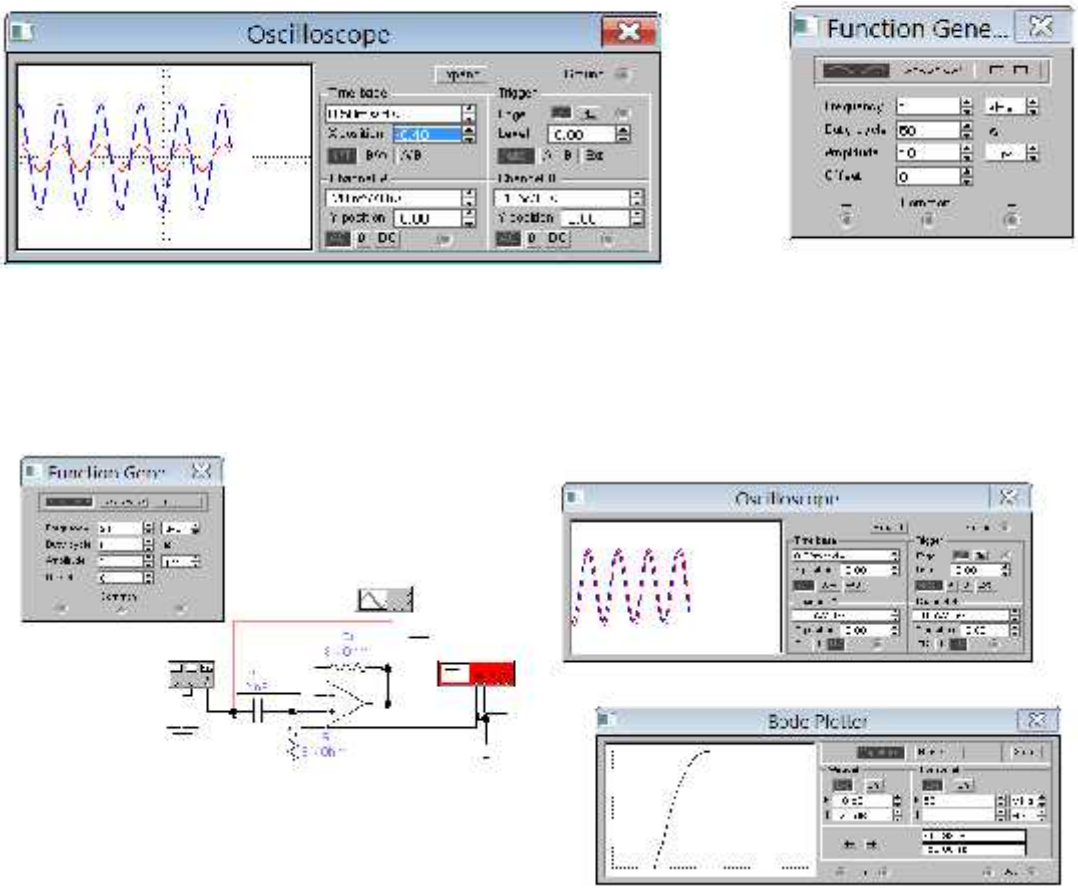


Рис.4.23. – Двокаскадний підсилювач із загальним емітером, виходом та загальним колектором.

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Однією з найбільш важливих сфер, які вимагають постійного удосконалення та забезпечення високого рівня безпеки, є технічна сфера, пов’язана з випробуванням авіадвигунів. Зростання технологій у цьому секторі вимагає впровадження новітніх методів вимірювань, зокрема, використання лазерного віброметра в автоматизованих системах випробувань. Однак, разом із впровадженням нових технологій, наростає і потреба у розробці ефективних заходів з охорони праці для фахівців, що працюють з даним обладнанням.

Обрана тема "Лазерний віброметр автоматизованої системи випробувань авіадвигунів" виправдовується високим рівнем відповідальності та технічної складності випробувальних робіт, пов’язаних з авіаційними двигунами. Для ефективної розробки та впровадження цієї технології необхідно не лише забезпечити високоточні вимірювання, але й врахувати аспекти безпеки праці та умови праці для спеціалістів, які здійснюють монтаж, експлуатацію та обслуговування обладнання.

Обраною посадою для аналізу умов праці є інженер, який відповідає за належне функціонування автоматизованої системи випробувань та приймає безпосередню участь у впровадженні лазерного віброметра. У зв’язку з цим, важливо розглянути робоче місце даного фахівця, а також приміщення, де відбуваються випробування, з метою визначення можливих ризиків та необхідних заходів з охорони праці для забезпечення безпеки та здоров’я працівників.

5.1 Загальні вимоги безпеки при роботі з лазерними установками

Загальні вимоги безпеки при роботі з лазерними установками визначаються нормативами, такими як ДСТУ EN 208:2017. Техніка безпеки визначається як система заходів, які мають запобігти впливу небезпечних виробничих факторів на працюючих. З свого боку, виробнича санітарія становить систему заходів, які запобігають або зменшують вплив шкідливих виробничих факторів.

Правила техніки безпеки включають вимоги технічного характеру, спрямовані на захист працюючих від впливу предметів і засобів праці, а також забезпечення безпечної роботи машин, устаткування та обладнання. Виробнича санітарія й гігієна праці визначають улаштування приміщень і робочих місць відповідно до фізіології й гігієни праці, а також установлюють безпечні межі змісту шкідливих речовин в повітрі виробничих приміщень.

Правила та норми техніки безпеки й виробничої санітарії повинні дотримуватися як при проектуванні, так і при експлуатації промислових об’єктів та устаткування. Вимоги щодо забезпечення безпечних і здоровіших умов праці є обов’язковими для адміністрації, робітників та службовців.

Основні правила безпеки при роботі з лазерними установками включають обмеження доступу осіб до 18 років, проходження медичного огляду, інструктаж на робочому місці та наявність допуску до роботи для осіб, що працюють з лазером. Працюючим рекомендується дотримуватися внутрішніх правил, тримати установку в належному стані та представляти її на огляд комісії з ОП та ТБ перед початком експлуатації.

5.2 Небезпечні й шкідливі виробничі фактори

Використання лазерних технологій призводить до утворення небезпечних і шкідливих факторів, які можуть впливати на персонал, що працює з лазерними установками або перебуває в одному приміщенні з ними. З цієї причини важливо вживати відповідні заходи для забезпечення безпеки працівників, що стає серйозною проблемою в галузі охорони праці.

Згідно зі стандартами СанПиН 5804-91 і ДСТУ 3941-2000, лазерні установки класифікуються за ступенем небезпеки випромінювання на чотири класи. При цьому враховують просторовий розподіл та тривалість впливу пучка лазерного випромінювання. Вплив на біологічні об’єкти залежить від потужності випромінювання, часу опромінення, довжини хвилі та інших параметрів.

Під час експлуатації лазерного технологічного комплексу персонал може стикатися з низкою небезпечних і шкідливих факторів, таких як монохроматичне когерентне випромінювання, паразитне випромінювання, електричні поля, турбулентність атмосфери, висока напруга, радіоліз повітря та інші. Ці фактори можуть впливати на здоров’я працівників і вимагають відповідних заходів безпеки.

Серед супутніх факторів можуть бути утворення плазми, висока напруга на зарядних пристроях, радіоліз повітря при високих потужностях випромінювання, випаровування матеріалу підкладки та наплавочного матеріалу, а також звукові коливання високої інтенсивності. Всі ці аспекти потребують уважного контролю та впровадження заходів для забезпечення безпеки роботи з лазерними установками.

5.3 Освітлення

При роботі на лазерній установці важливо мати достатнє освітлення у приміщенні. Згідно з вимогами для 3 розряду зорових робіт, освітленість повинна бути не менше 200 люксів. Щоб досягти цього рівня освітленості, приміщення, де розташована лазерна установка, освітлюється люмінесцентними лампами низького тиску, конкретно лампами з діаметром 30 мм згідно з ДБН В 2.5-28-2006. Для досягнення необхідного рівня освітленості, потрібно встановити 10 таких ламп. Стіни в приміщенні фарбуються світлою фарбою, що сприяє створенню рівномірного освітлення та розподілу яскравості в полі зору. Це важливо для комфортної та безпечної роботи з лазерною установкою, де правильне освітлення грає ключову роль в забезпеченні якості та безпеки робочого процесу.

При дослідженні штучного освітлення треба аналогічно природному освітленні порівняти фактичне значення з нормованим.

Нормоване значення освітлення для адміністративно-управлінських приміщень при загальній освітленості по ДБН В.2.5-28-2006 при використанні люмінінсцентних ламп $E_н$= 400 люкс.

Значення фактичного освітлення $E_ф$ може розрахуватися за допомогою методу коефіцієнта використання світлового потоку по формулі:

$$E_ф = \frac{F_л \eta_в N n}{S K_з Z},$$

де $F_л$ – світловий потік лампи, лм (для люмінісцентних ламп потужністю 40Вт – $F_л$ = 3120лм); $\eta_в$ – коефіцієнт використання світлового потоку ($\eta_в$ = 0,4…0,6=0,5); N=4 – кількість світильників, вт; n=3 – кількість ламп у світильнику, вт; S=30$м^2$ – площа приміщення, $м^2$; $K_з$ – коефіцієнт су, $K_з = 1{,}5 \ldots 2$; $K_з = 1{,}5\, Z = 1{,}1$ – коефіцієнт нерівномірності освітлення.

$$E_ф = \frac{3120 * 0{,}5 * 4 * 3}{30 * 1{,}5 * 1{,}1} = 378(\text{люкс}).$$

Допустиме відхилення фактичного освітлення від нормативного є +20%...-10%.

Схема розміщення світильників у приміщені наведена на рис.5.1.

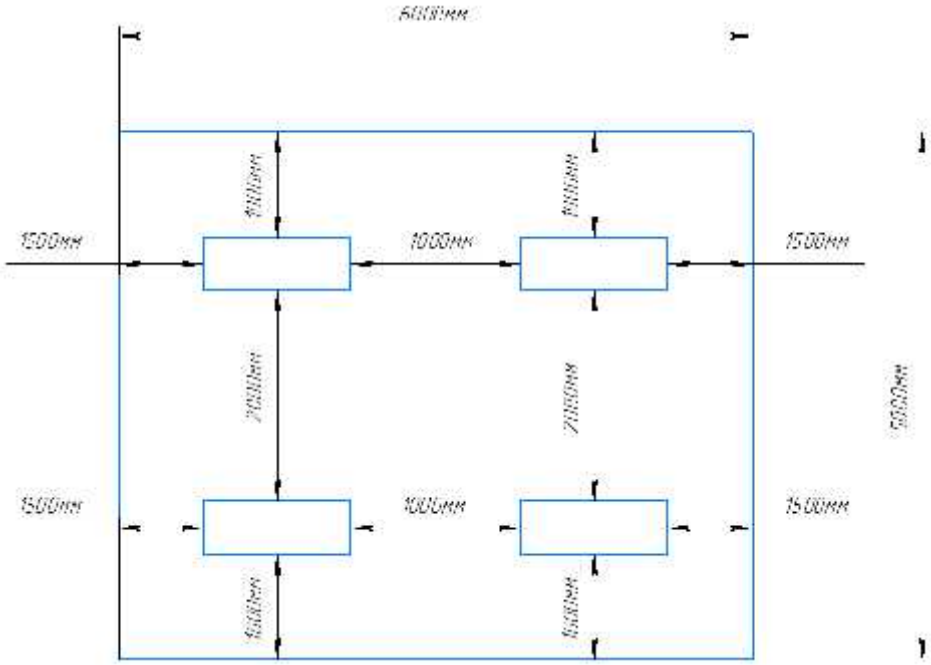


Рис.5.1. – Схема розміщення світильників.

5.4 Електробезпека

Згідно з "Правилами улаштування електроустановок" усі електричні ланцюги живлення повинні мати ізоляцію, яка витримує стресову напругу протягом 1 хвилини без пробою поверхневого покриття. Опір ізоляції повинен бути не менше 1 кОм. Металеві неструмоведучі частини, які можуть бути під напругою, з’єднані з елементами захисного заземлення, і біля болта заземлення розташований знак заземлення. Всі струмоведучі частини установки закриті захисними кожухами.

В корпусі пульта керування повинні бути встановлені розрядні опори для ефективного розряду залишкових зарядів з накопичувальних конденсаторів при відкритті захисних кожухів, цей процес не повинен тривати більше 10 секунд.

В робочому режимі електробезпечність повинна забезпечуватись за допомогою комбінацій захисту (відключення та занулення), використання діелектричних рукавичок та гумових ковриків, пристроями, які унеможливлюють ураження людей напругою, і використання малих напруг (зазвичай до 36 В).

5.5 Захист персоналу від дії лазерного випромінювання

Випромінювання від лазерної установки може бути небезпечним для очей при прямому опроміненні, відбитті від дзеркал або різко розсіяному випромінюванні на відстані 10 см. Така ситуація вимагає заходів з захисту персоналу, які можна поділити на колективні та індивідуальні.

Колективні засоби захисту включають в себе захисні екрани або кожухи, що блокують потрапляння випромінювання на робочі місця. Екрани повинні поглиблювати основну довжину хвилі і залишатися прозорими для інших частин спектра. Додаткові заходи включають розміщення пульта керування в окремому приміщенні з системою спостереження, екранування світла ламп та систем блокувань і сигналізації в межах лазерної області зони.

Щодо індивідуальних засобів захисту, до них відносяться окуляри, щитки, маски, технологічні халати та рукавички. Їх використовують лише тоді, коли колективні заходи не забезпечують безпеки виконання робіт на лазері. Технологічні халати зроблені з матеріалів із яскравими кольорами, а захист очей забезпечується використанням окулярів із спеціальними світлофільтрами, які поглинають значну частину світлової енергії.

Світлофільтри для окулярів можуть бути виготовлені з поглинаючого скла або пластмаси, які ефективно поглиблюють до 90% світлової енергії. Також використовуються комбіновані світлофільтри, що містять дзеркала для відбивання та поглинаючі матеріали.

Окрім цього, існують колективні заходи, такі як розміщення пристроїв керування лазером у відокремленому приміщенні з системою спостереження, екранування світла ламп та фарбування внутрішніх поверхонь приміщень матовими кольорами для максимального розсіювання світла на довжині хвилі випромінювання. Зону лазерної області зазвичай обгороджують і маркують знаками, забороняючи доступ стороннім особам.

Важливо також враховувати, що індивідуальні засоби захисту повинні бути включені в комплексні заходи забезпечення безпечних умов праці лише тоді, коли інші колективні заходи виявляються недостатніми для гарантування безпеки під час робіт з лазером.

5.6 Протипожежні заходи

Можливі причини виникнення пожеж включають в себе використання відкритого вогню в неприпустимих місцях, постійну роботу установки та несправне обладнання. Приміщення, де працюють лазерні установки, відносяться до категорії "В" з погляду пожежної безпеки.

Заходи щодо запобігання пожеж поділяються на організаційні, технічні та експлуатаційні. Організаційні заходи включають правильну експлуатацію установки та проведення інструктажів з протипожежної безпеки для персоналу. Технічні заходи передбачають розміщення пожежних повідомлень у небезпечних місцях та встановлення сигналізаційних систем.

Експлуатаційні заходи включають встановлення засобів пожежогасіння, таких як пісок, вода, азбестові полотна та вуглекислотні вогнегасники. Також передбачається наявність евакуаційних виходів та відповідних розмірів дверей і коридорів для забезпечення безпечної евакуації.

5.7 Заходи щодо забезпечення лазерної безпеки

Лазерний технологічний комплекс розташований в спеціально обладнаному приміщенні, і доступ до нього мають лише особи, які працюють на цій установці. Внутрішні стіни приміщення мають мати матову поверхню з коефіцієнтом відбиття менше 0,4. Це важливо для того, щоб уникнути неправильного відбиття лазерного випромінювання. Щоб забезпечити належну освітленість, важливе різноманіття природного і штучного світла.

Для запобігання опромінення працівників та забезпечення відповідної безпеки встановлено загальнообмінну вентиляцію для зниження рівня шкідливих газів, парів і пилу в повітрі.

Безпека під час роботи з лазерними установками забезпечується використанням захисних елементів та обладнання, таких як захисні екрани, витяжна камера і спеціальні захисні заслінки. Заборонено робити орієнтацію променю на вікна та двері, які пропускають лазерне випромінювання, а також розміщувати дзеркально-відбивні предмети в зоні дії лазерного променю.

Для забезпечення безпеки, персонал, який працює з лазерними установками, повинен пройти інструктаж, навчання безпечним заходам та методам роботи. Також встановлено попереджувальні знаки і сигналізацію, а доступ для сторонніх осіб обмежений.

Для забезпечення додаткової безпеки в конструкції установки повинна бути передбачена спеціальна захисна заслінка, яка захищає робітників від прямого опромінювання технологічного лазера під час налаштування оптичної системи та ремонту при включеному випромінюванні. Лінзи, призми та дзеркала повинні бути обладнані екранами, які гасять відбиті випромінювання.

Персонал, який має доступ до роботи з лазерними установками, повинен володіти інструкціями з техніки безпеки та експлуатації, а також бути обізнаним зі схемою зони лазерної небезпеки. У виробничому приміщенні повинні бути розміщені відповідні попереджувальні знаки та інструкції з техніки безпеки.

Заборонено розміщувати предмети з дзеркальним відбиттям у зоні дії лазерного променю.

Процедури безпеки передбачають не лише технічні заходи, але і організаційні. Наприклад, правильна експлуатація установки, регулярний протипожежний інструктаж для працівників та службовців, а також встановлення системи попередження в разі виникнення небезпеки.

РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

У цьому розділі розглядаються проблеми, пов’язані з виробництвом лазерів та їх комплектуючих, які можуть негативно впливати на навколишнє середовище, а також надаються рекомендації щодо їх вирішення. Основні аспекти охорони навколишнього середовища у цьому контексті включають використання небезпечних матеріалів, управління відходами, атмосферні викиди, стічні води, використання енергії та зміни технологічних процесів.

Небезпечні матеріали та відходи, які виникають під час виробництва лазерів, включають різні хімічні речовини та відходи, такі як відпрацьована вода, розчинники, шлаки, епоксидні матеріали і інше. Для боротьби з цими проблемами, можна впроваджувати технологічні модифікації, які включають в себе вдосконалення процесів, використання більш безпечних матеріалів, відновлення та повторне використання ресурсів, а також контроль за викидами та відходами.

Важливо також враховувати аспекти безпеки і охорони праці, забезпечуючи правильне зберігання та управління небезпечними матеріалами. Використання спеціальних заходів, таких як подвійні трубопроводи для уникнення витоків та використання піддонів для збору відходів, є ключовими аспектами для запобігання негативному впливу на довкілля.

Загальною метою є впровадження екологічно відповідних практик у виробництві лазерів, зменшення негативного впливу на природу та створення безпечних умов для працівників та оточуючого середовища.

6.1 Загальні відомості про охорону навколишнього середовища.

Закон України "Про охорону навколишнього природного середовища" визначає основи організації заходів з охорони природи для добробуту сучасного суспільства та майбутніх поколінь. Одним із головних завдань цього закону є регулювання відносин у сфері охорони та використання природних ресурсів, забезпечення екологічної безпеки та уникнення негативного впливу господарської та інших видів діяльності на природне середовище.

Важливим аспектом закону є підтримання різноманітних природних ресурсів, ландшафтів та унікальних місць, пов’язаних з історичною та культурною спадщиною України. Сучасне вивчення впливу науково-технічного прогресу на біосферу визначається як одна з ключових проблем.

Заходи збереження навколишнього середовища включають зменшення та обмеження викидів в атмосферу та гідросферу, особливо сміття та газів. Також важливими є створення та підтримання природних комплексів, заповідників, національних парків та лісів.

6.2 Характерні для галузі види несприятливого впливу і боротьба з ними.

Однією з ключових проблем у виробництві лазерних приладів та комплектуючих є вплив на навколишнє середовище. Це охоплює кілька аспектів, таких як використання небезпечних матеріалів, управління відходами, атмосферні викиди, стічні води, споживання енергії та зміни технологічних процесів.

6.2.1 Використання небезпечних матеріалів та управління відходами.

Більшість технологічних процесів у виробництві лазерів на виході отримують небезпечні або потенційно небезпечні відходи. У рамках дослідження та розробки лазерного віброметра для автоматизованої системи випробувань авіадвигунів, особлива увага приділяється аспектам використання небезпечних матеріалів та управління відходами, щоб забезпечити ефективну і екологічно безпечну виробничу практику.

У процесі створення лазерного віброметра головним джерелом небезпечних відходів може бути використання різноманітних хімічних реактивів і матеріалів. Наприклад, використання епоксидних матеріалів для фіксації складних деталей вимагає врахування можливого виникнення небезпечних речовин під час їхньої обробки та утилізації.

Деіонізована вода, використана у випробувальних процесах, також може стати джерелом забруднення водойм та ґрунту через вміст різноманітних хімічних речовин. Важливо визначити оптимальні технології відновлення та очищення відпрацьованих розчинів для подальшого їхнього використання виробничим процесом.

Одним із способів зниження негативного впливу на довкілля є пошук альтернативних реактивів і матеріалів, які б менше шкодили природі під час виробничого процесу. Також важливо розробити методи інтенсифікації контролю за викидами, щоб забезпечити відповідність нормам екологічної безпеки та попереджувати можливі ризики забруднення.

Загалом, ефективне управління використанням та обробкою небезпечних матеріалів, а також вдосконалення систем утилізації відходів є ключовими аспектами, які слід враховувати в контексті виробництва лазерних віброметрів для авіадвигунів.

6.2.2 Атмосферні викиди та зміни технологічних процесів.

Проблеми, пов’язані з атмосферними викидами, можна вирішити шляхом модифікації технологічних процесів. У контексті виробництва лазерних віброметрів для автоматизованої системи випробувань авіадвигунів, атмосферні викиди можуть виникати під час різних етапів виробничого процесу. Наприклад, використання лазерної технології може призводити до утворення газових викидів, що містять різноманітні хімічні сполуки, такі як оксиди металів чи інші продукти лазерного опромінення.

З метою розв’язання проблем атмосферних викидів у виробництві лазерних віброметрів, можна розглядати модифікації технологічних процесів. Важливо

впроваджувати автоматизовані системи контролю за газовими викидами, які дозволять точно регулювати та моніторити кількість викидів у реальному часі.

Додатково, заміна шкідливих речовин, таких як оксиди металів, менш токсичними альтернативами може виявитися корисною стратегією. Це може включати в себе дослідження та впровадження нових матеріалів, які під час виробництва лазерних компонентів не генерують шкідливих викидів або роблять це в менших кількостях.

Крім того, ефективні методи обробки викидів перед їхнім викиданням в атмосферу можуть бути важливим елементом стратегії зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Це може включати в себе фільтрацію, очищення та інші технології для зменшення концентрації шкідливих речовин у викидах.

Загалом, вирішення проблем атмосферних викидів у виробництві лазерних віброметрів вимагає комплексного підходу, що включає в себе технічні інновації та стратегії зменшення використання шкідливих речовин.

6.2.3 Стічні води та використання енергії.

У виробництві лазерних віброметрів для автоматизованої системи випробувань авіадвигунів, проблеми стічних вод та використання енергії можуть виникати внаслідок використання різних матеріалів та технологій. Наприклад, під час виробництва лазерних компонентів може виникати використання розчинників та інших хімічних реактивів, що потребують води для обробки та очищення. Це може призводити до утворення стічних вод з певним вмістом забруднюючих речовин.

Для вирішення проблем стічних вод важливо розглядати оптимізацію водокористування, використання технологій очищення стічних вод та повторного використання водних ресурсів виробництва. Наприклад, встановлення систем фільтрації та очищення стічних вод може значно зменшити вміст забруднюючих речовин перед їх викиданням у водойму або каналізаційну систему.

Одночасно, щодо використання енергії, можна розглядати перехід до енергоефективних технологій у виробничому процесі. Впровадження новітніх технологій лазерної обробки та управління енергією може значно зменшити споживання електроенергії та викиди в атмосферу.

Застосування відновлювальних джерел енергії, таких як сонячні батареї чи вітрові генератори, може стати ефективним кроком у зменшенні впливу виробництва на довкілля. Також важливо впроваджувати системи енергозбереження та моніторингу споживання електроенергії для оптимізації використання ресурсів.

Узагальнюючи, для досягнення сталого виробництва лазерних віброметрів, необхідно активно працювати над оптимізацією водокористування, обробкою стічних вод, використанням енергоефективних технологій та переходом до відновлювальних джерел енергії.

6.2.4 Зміни загальних технологічних процесів.

Рекомендації включають удосконалення технологій, заміну обладнання, впровадження автоматизованих систем та заміну шкідливих матеріалів менш небезпечними. Важливо також здійснювати постійний моніторинг та аудит технологічних процесів з орієнтацією на зменшення екологічного впливу.

6.2.5 Застосування нових технологій.

Важливим кроком є впровадження передових технологій, спрямованих на зменшення викидів та поліпшення ефективності виробничих процесів. Це може включати в себе впровадження технологій очищення газів, ефективніших методів очищення стічних вод та використання обладнання з найвищою енергоефективністю.

6.2.6 Обов’язкове дотримання стандартів та нормативів.

Підприємствам рекомендується суворо дотримуватися екологічних стандартів та нормативів, що дозволить контролювати та обмежувати вплив на навколишнє середовище. Регулярна перевірка та вдосконалення систем екологічного контролю допоможе уникнути порушень та покращить ефективність впроваджених заходів.

6.2.7 Навчання та залучення персоналу.

Організації повинні забезпечити навчання персоналу з питань охорони навколишнього середовища та встановлення стандартів збереження екології на робочих місцях. Залучення персоналу до вирішення екологічних проблем сприятиме підвищенню свідомості та відповідальності кожного працівника.

6.2.8 Впровадження внутрішнього екологічного аудиту.

Внутрішній екологічний аудит представляє собою систематичний та структурований процес оцінки екологічної діяльності підприємства з метою виявлення його впливу на довкілля та можливих областей вдосконалення. Цей аудит спрямований на внутрішні практики компанії, визначає відповідність законодавству, стандартам і внутрішнім екологічним цілям.

Сутність екологічного аудиту:

Екологічний аудит є інструментом для внутрішнього контролю, спрямованим на оцінку впливу виробничої діяльності на довкілля та ефективність заходів щодо його зменшення. Аудит включає в себе оцінку використання ресурсів, управління відходами, енергоефективності та інших аспектів, які можуть впливати на екологічну стійкість підприємства.

Процес проведення аудиту:

1) Планування: Розробка детального плану аудиту, включаючи визначення областей, що підлягають аудиту, вибір методів оцінки та формування аудиторського звіту.

2) Збір інформації: Збір та аналіз даних про виробничі процеси, використання ресурсів, відходи та інші аспекти, які можуть впливати на екологічну діяльність.

3) Оцінка відповідності: Визначення, наскільки діяльність підприємства відповідає екологічним стандартам, законодавству та внутрішнім політикам.

4) Виявлення ризиків та можливостей: Аналіз ідентифікованих проблем, визначення ризиків для довкілля та пошук можливостей для впровадження позитивних змін.

5) Розробка рекомендацій: Формування конкретних рекомендацій щодо покращення екологічних показників підприємства.

Значення впровадження екологічного аудиту в контексті лазерних віброметрів:

Для виробництва лазерних віброметрів, екологічний аудит може допомогти ідентифікувати вплив виробничих процесів на довкілля, визначити оптимальні методи утилізації відходів та впровадження енергоефективних рішень. Аудит дозволить систематично впроваджувати нові стандарти екологічної безпеки, роблячи її діяльність більш сталою та відповідальною.

6.2.9 Співпраця з екологічними організаціями та громадськістю.

Залучення до співпраці з екологічними організаціями та активною участю у громадських ініціативах може сприяти розумінню та врахуванню потреб громадськості у вирішенні екологічних питань.

Всі ці заходи разом сприятимуть створенню ефективної впроваджуваної системи охорони навколишнього середовища на підприємствах, спрямованої на збереження природи та забезпечення стабільного розвитку.

Висновки та запропоновані заходи:

Ефективне використання ресурсів: Запропоновано оптимізацію використання матеріалів та впровадження технологій відновлення та повторного використання.

Контроль атмосферних викидів: Розглянуто впровадження автоматизованих систем та нових технологій для мінімізації викидів та сприяння чистому повітрю.

Оптимізація водокористування та енергоефективність: Встановлено необхідність оптимізації водокористування, обробки стічних вод, переходу до енергоефективних технологій та використання відновлювальних джерел енергії.

Інноваційні технології: Пропонується впровадження передових технологій та постійна адаптація до нових екологічно безпечних рішень.

Дотримання стандартів та нормативів: Закріплено необхідність обов’язкового дотримання екологічних стандартів та нормативів для забезпечення відповідності законодавству.

Навчання та залучення персоналу: Запропоновано систематичне навчання персоналу з питань екології та використання їхнього досвіду для вдосконалення процесів.

Впровадження внутрішнього екологічного аудиту: Рекомендовано створення системи внутрішнього екологічного аудиту для постійного вдосконалення та контролю.

Співпраця з екологічними організаціями та громадськістю: Заохочено активну співпрацю з екологічними організаціями та залучення громадськості для створення позитивного екологічного впливу та підтримки у сфері охорони навколишнього середовища.

ВИСНОВОК

В процесі виконання кваліфікаційної роботи в першому розділі було розглянуті види випробування авіаційних двигунів, обладнання та стенди для проведення випробувань авіаційних двигунів. В другому розділі були розглянуті вимірювальні перетворювачі та датчики, що використовуються при автоматизованих випробувань авіадвигунів також було детально описано про обробку експериментальних даних випробувань. В третьому розділі було детально описано про особливості побудови автоматизованої системи випробувань авіадвигунів. В четвертому розділі детально досліджений процес функціонування лазерного вимірюваннння двох складових вектора швидкості вібрації. Описаний принцип роботи лазерного допплерівського вимірювача двох складових вектора швидкості вібрації. Розглянутий метод моделювання на ЕОМ електронних схем необхідний для фільтрації високочастотних завад у допплерівському сигналі віброметра.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дорошко С. М. Контроль та діагностування технічного стану газотурбінних двигунів по вібраційним параметрам/С. М. Дорошко. - М.: Транспорт, 1984. - 128 с.

2. Григор’єв, В. А. Випробування авіаційних двигунів: підручник для вузів. За заг. ред. В. А. Григор’єва та А. С. Гішварова: Машинобудування, 2009. -504с.

3. Іванов І. О. Вимірювання вібрації двигунів на повітряних суднах: Навчальний посібник / І. О. Іванов - К.: КИІГА, 1991. - 32 с.

4. Клочков Б. Н. Хвильові та вібраційні процеси машинобудування: Тез. доп. Всесоюзні. конф. / ІПФ АН СРСР. Горький, 1989. ч. 2, С. 7-106.

5. Клюєв В. Б. прилади та системи для вимірювання вібрації шуму та удару: довідник / За ред. В. Б. Клюєва. - М.: Машинобудування, 1978. - Т. 1. - 448 с.: т. 2. - 500 с.

6. Крушевський Ю. В., Гаврілов Д. В. Основи радіоелектроніки частина 2. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 164 с.

7. ДБН В.2.5-28-2006. Бібліографічний запис. Природне і штучне освітлення.

8. СанПиН 5804-91. Бібліографічний запис. Санітарні норми та правила влаштування та експлуатації лазерів.

9. ДСТУ EN 208:2017 Засоби індивідуального захисту очей. Засоби захисту очей для регулювальних робіт з лазерами і лазерними системами (засоби захисту очей від лазерів, що регулюють) (EN 208:2009, IDT)

10. ДСТУ 3941-2000 Лазерна безпека. Терміни та визначення.

11. Схемотехніка: Розрахунок активних фільтрів нижніх та верхніх частот [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка», освітньої програми «Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В.С. Берегун, О.В. Гармаш – Електронні текстові дані (1 файл: 374 кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 30 с.