МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ

ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

КАФЕДРА АЕРОКОСМІЧНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

ДОПУСТИТИ ДОЗАХИСТУ
Завідувач кафедри

_____ Юрій Мельник

“_____”_____20___р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВР

Тема: **Оптимізація динамічних характеристик лазерного віброметра**

Виконавець: Сліпуха Олег Ігорович
Керівник: к. т.н., доц.,Кривоносенко Олександр Петрович

Нормоконтролер: к. т.н., доц., Дивнич Микола Полікарпович

Київ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра аерокосмічних систем управління

Спеціальність151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Освітньо –професійна програма «Комп'ютеризовані системи управління та автоматика»

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри
_____Юрій МЕЛЬНИК

«_____»_____2023р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Сліпухі Олегу Ігоровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: Оптимізація динамічних характеристик лазерного віброметра

затверджена наказом ректора від«13»квітня2023р.№ 507/ст

2. Термін виконання роботи:з 22.05.2023 по 25.06.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи:

4.Зміст пояснювальної записки: Розгляд методів вимірювання вібрації.Огляд авіаційних віброметрів,лазерна віброметрія, застосування лазерного віброметра при дослідженні авіадвигуна, розробка структурної схеми двокомпонентного лазерного віброметра.

5.Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу:

6. Календарний план-графік

№ ор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про иконанн
1	Розробити деталізований зміст розділів кваліфікаційної роботи	22.05.2023-24.05.2023	Виконано
2	Вступ	25.05.2023	Виконано
3	Аналіз існуючих методів вимірювання вібрації	26.05.2023-28.05.2023	Виконано
4	Аналіз роботи відомих авіаційних віброметрів	29.05.2023-02.06.2023	Виконано
5	Застосування лазерного віброметра при дослідженні авіадвигуна	03.06.2023-06.06.2023	Виконано
6	Розробка структурної схеми двокомпонентного лазерного віброметра	07.06.2023-10.06.2023	Виконано
7	Усунення недоліків	11.06.2023	Виконано
8	Оформлення кваліфікаційної роботи згідно чинних вимог	11.06.2023	Виконано
9	Підготовка презентації та виступу	12.06.2023	Виконано

7. Дата видачі завдання: «19» травня 2023р.

Керівник кваліфікаційної роботи_____Кривоносенко О.П.
(підпис керівника)

Завдання прийняв до виконання_____Сліпуха О.І.
(підпис випускника)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Оптимізація динамічних характеристик лазерного віброметра»: 62 сторінки, 41 рисунків, 1 таблиця, 5 використаних джерел.

ВІБРАЦІЯ, ВИМІРЮВАННЯ, ЛАЗЕР, ШИРОКОСМУГОВИЙ ПІДСИЛЮВАЧ

Об’єкт дослідження – вібрація авіаційного двигуна.

Предмет дослідження – лазерний допплерівський віброметр.

Мета кваліфікаційної роботи – Оптимізація динамічних характеристик лазерного віброметра та удосконалення існуючих методів вимірювання вібрації авіаційних двигунів.

Метод дослідження – робота з науково-технічною літературою.

В кваліфікаційній роботі розглядаються вже існуючі методи вимірювання вібрації: магнітоіндукційний та п’єзоелектричний, результати проведення оцінки технічних вузлів силової установки вертольота; пропонується структурна схема лазерного двоканального вимірювача вібрації, проводиться підбір деяких її компонентів (лазерного діода та фотодіода), розраховується широкосмуговий підсилювач до фотодіода.

Розроблена структурна схема двоканального лазерного віброметра може бути реалізована в реальному житті та здатна проводити високоточне вимірювання віброшвидкості в двох площинах.

ЗМІСТ

ВСТУП……... 6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ВІБРАЦІЇ.. 9
1.1. Параметри, що характеризують вібрацію……... 9
1.2. Класифікація вимірювальних перетворювачів вібрації…… 12
1.3. Інерційний метод вимірювання вібрації …… 15
1.3.1 . Магнітоіндукційні перетворювачі…….. 18
1.3.2. П’єзоелектричні перетворювачі …….. 21
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ РОБОТИ ВІДОМИХ АВІАЦІЙНИХ ВІБРОМЕТРІВ… 24
2.1 Загальний огляд технічних характеристик віброметрів …… 24
2.2. Віброметр типу ИВ-300 ……... 25
2.3. Вимірювач вібрації з ПЕП ……... 27
2.4. Причини виникнення похибок віброметрів ……... 29
2.5. Основи лазерної віброметрії ……... 30
2.6. Лазерний допплерівський віброметр…….. 35
РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ВІБРОМЕТРА ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ АВІАДВИГУНА…….. 38
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ДВОКОМПОНЕНТНОГО ЛАЗЕРНОГО ВІБРОМЕТРА……. 43
4.1.Вибір лазерного діода…… 45
4.2.Вибір фотодіода……. 45
4.3.Розрахунок широкосмугового підсилювача…… 45
ВИСНОВКИ…….. 60
Список використаних джерел……. 62

ВСТУП

Збільшення обсягів авіаційних робіт вимагає вдосконалення авіаційної техніки, створення високоефективних повітряних суден і авіадвигунів. Це веде до використання більш напружених, динамічних режимів роботи двигунів і інших агрегатів повітряних суден. Для забезпечення безпеки польотів, виявлення дефектів на ранніх стадіях їх виникнення, своєчасного вжиття заходів щодо запобігання поломок обладнання та авіаційних подій необхідно знати причини появи тих чи інших дефектів, здійснювати досить точне і достовірне вимірюваання значень фізичних величин, що визначають стан авіаційної техніки.

Істотний вплив на технічний стан авіаційного обладнання, двигуна і повітряного судна в цілому надає вібрація, що виникає при роботі авіадвигуна. При вібрації збільшується навантаження на опори, що обертаються деталі й вузли двигуна, на елементи кріплення двигуна до повітряного судна, що веде до підвищення їх зносу, зниження їх міцності і надійності, до зменшення ресурсу двигуна, руйнування елементів конструкції двигуна або повітряного судна.

Існуючі магнітоіндукційні та п’єзоелектричні віброметри добре вправляються з контролем граничних меж вібрації авіадвигунів під час польоту літального апарату, але не цілком придатні до високоточних вимірювань на етапах конструювання та перед польотних випробуваннях двигунів через доволі значні похибки. Тому актуальною постає проблема вимірювання вібрації під час метрологічних робіт в авіаконструкторських бюро. В даній кваліфікаційній роботі пропонується використовувати в якості вимірювача вібрації лазерний віброметр.

Висока точність визначення фізичних величин, що характеризують різні коливальні процеси поєднується в цьому випадку з високою інформативністю і можливістю автоматизації вимірювань, що дозволить застосовувати лазерні прилади вібраційного контролю в якості засобів високоточної діагностики, відкриє нові можливості для переходу на експлуатацію авіадвигунів по фактичному стану.

Однією з головних переваг лазерних віброметрів в авіації є їхня здатність виявляти дефекти та несправності в літальних апаратах. Вимірювання коливань може допомогти виявити неправильне функціонування рухомих частин, таких як двигуни, лопатки турбін, шасі та інші компоненти. Вчасне виявлення таких проблем може допомогти уникнути серйозних аварій та забезпечити безпеку пасажирів і екіпажу.

Лазерні віброметри можуть вимірювати вібрації різних частин літального апарату, таких як крила, рульові поверхні та хвости. Це дозволяє виявити відхилення від норми та здійснити необхідні коригуючі заходи. Балансування рухомих частин є важливою процедурою для забезпечення

стабільності та ефективності польоту. Лазерні віброметри допомагають виявити дисбаланс та встановити оптимальні параметри балансування.

У авіації важливо відстежувати знос та старіння різних компонентів літального апарату. Лазерні віброметри можуть вимірювати зміни вібраційних характеристик з часом, що дозволяє виявляти поступове погіршення стану матеріалів та компонентів. Це дозволяє проводити своєчасний ремонт та заміну деталей, що забезпечує надійність та довговічність літальних апаратів.

З використанням лазерних віброметрів можна проводити моніторинг роботи рухомих частин літального апарату та прогнозувати залишковий ресурс. Це допомагає оптимізувати планування обслуговування та ремонту, зменшити непланові витрати та мінімізувати час простою літального апарату.

Використання лазерних віброметрів в авіації має велику доцільність та необхідність. Вони дозволяють виявляти дефекти, вимірювати вібрації, проводити балансування та відстежувати знос та старіння різних компонентів. Це сприяє підвищенню безпеки польотів, ефективності та надійності літальних апаратів. З розвитком технологій лазерні віброметри стають все більш точними, чутливими та простими в застосуванні, що робить їх ще більш важливими для авіаційної промисловості.

Також застосовуються і в інших сферах таких як:

- Наука

У наукових дослідженнях лазерні віброметри широко використовуються для вивчення різних фізичних явищ. Вони дозволяють дослідникам вимірювати та аналізувати вібрації різних систем, включаючи структури матеріалів, акустичні хвилі та елементи електроніки.

- Промисловість

Лазерні віброметри знайшли широке застосування в промисловості. Вони дозволяють вимірювати вібрації машин та обладнання для контролю стану та виявлення відхилень від норми. Це допомагає уникнути аварійних ситуацій, зберегти ресурси та покращити ефективність роботи.

- Медицина

У медицині лазерні віброметри використовуються для діагностики та лікування різних захворювань. Вони можуть вимірювати коливання органів та тканин, що допомагає встановити діагноз та контролювати ефективність лікування.

Об’єкт дослідження – вібрація авіаційного двигуна.

Предмет дослідження – лазерний допплерівський віброметр.

Мета і завдання дослідження – Оптимізація динамічних характеристик лазерного віброметра та удосконалення існуючих методів вимірювання вібрації авіаційних двигунів.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі наукові завдання:

Об’єкт дослідження – вібрація авіаційного двигуна.

Предмет дослідження – лазерний допплерівський віброметр.

Метод дослідження – робота з науково-технічною літературою.

Апробація отриманих результатів. Основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях:

- Науково-практична конференція «Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем» м.Київ, 2023р.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ВІБРАЦІЇ

1.1 Параметри, що характеризують вібрацію

Вібрація авіадвигуна являється ознакою дефекту в його роботі. Розвиток дефекту, поява нових дефектів ведуть до збільшення вібрації. Підвищення певного значення вібрації свідчить про появу такого дефекту двигуна, при котрому його робота стає небезпечною, а подальше збільшення вібрації може привести до руйнування двигуна.

Причин виникнення вібрацій авіадвигунів декілька. В залежності від джерел збурення вібрації нормують окремо вібрацію двигуна з частотою першої роторної гармоніки, рівної частоті обертання ротора двигуна, і вібрацію з частотою, котра відрізняється від частоти першої гармоніки.

Причинами виникнення вібрації з частотою першої роторної гармоніки можуть бути:

- масова неврівноваженість роторів двигуна, викликана технологічними особливостями виготовлення деталей і складання двигуна, ушкодженнями деталей двигуна в процесі експлуатації (обрив і погнутість лопаток компресорів і турбін, тріщини дисків, руйнування підшипників і т.д.);
- несоосність послідовно з'єднаних роторів;
- торцеві биття підшипників на цапфах;
- аеродинамічна неврівноваженість робочих ступенів роторів;
- тепловий дисбаланс роторів.

Вібрація з частотою, відмінною від частоти першої роторної гармоніки, може бути викликана наступними факторами:

- окружною нерівномірністю потоку повітря на вході в двигун;
- нерівномірністю процесів в проточній частині двигуна (пульсації, тиск і температура повітря і газу, викликані недосконалістю процесів, а також зносом і пошкодженням поверхонь деталей);
- овальністю бігових доріжок підшипників, кочення опор та інш.

Крім того, вібрація низької частоти виникає при русі літака по злітно-посадковій смузі, посадці, при несприятливих метеорологічних умовах польоту та ін.

Практично вібрація авіадвигуна виникає через одночасної дії декількох джерел збудження, але найбільше значення має вібрація авіадвигуна з частотою першої роторної гармоніки, викликана масовою неврівноваженістю роторів двигунів. Тому в подальшому більш детально буду аналізувати вібрацію, викликану саме цією причиною.

При обертанні рухливих частин – роторів авіадвигуна, як відомо, виникає доцентрове прискорення, а, отже, інерційні сили. При виготовленні рухомих частин двигуна практично неможливо їх повністю збалансувати, тобто домогтися того, щоб центр мас (ЦМ) збігався з віссю обертання А-А',

(рис. 1.1), тому при обертанні з'являється неврівноважена переносна інерційна сила Fц=ma, спрямована від осі обертання по радіусу, що з'єднує ЦМ з віссю обертання, і змінює свій напрямок в просторі з кутовою швидкістю, рівною частоті обертання валу авіадвигуна. Ця сила впливає на рухомі частини двигунів одночасно з силою тяжіння P.

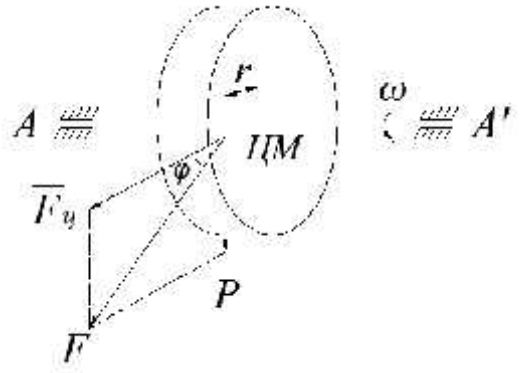

Рис. 1.1 Сили, які виникають при обертанні деталей

Отже, на обертові частини двигуна впливає сила $F = F_ц + P$, значення якої визначається виразом

$$F = \sqrt{p^2 + F_ц^2 + 2PF_ц \cos(\omega t + \varepsilon)}$$

або

$$F = m\sqrt{g^2 + \omega^4 r^2 + 2g\omega^2 r \cos(\omega t + \varepsilon)} \qquad (1)$$

Як видно з формули (1) амплітуда цієї сили залежить від маси m обертових деталей, відстані r від ЦМ до осі обертання, квадрата частоти обертання і змінюється в часі за законом, близькому до закону косинуса-синуса. Фаза сили F, тобто її напрямок в кожен момент часу, залежить від початкової фази , частоти обертання ω та часу t, що пройшов від початку обертання.

Оскільки сила F змінюється за законом, близьким до гармонійного, то серед її складових найбільше значення матимуть перша гармоніка, яка може бути записана у вигляді

$$F_1 = F_{1a} \sin(\omega t + \varepsilon).$$

Надалі буду розглядати тільки вплив сили F_1, що змінюється з частотою ω, рівній частоті обертання рухомих частин двигуна. Під дією сили F_1 обертові деталі отримують вібраційне прискорення $a = \frac{F_1}{m}$, отже, набувають швидкості вібрації і переміщаються – деформуються.

Сила F_1 змінюється за гармонійним законом, тому вібропереміщення деталей може бути описано виразом $s = S_a \sin(\omega t + \varepsilon)$, де S_a – амплітуда вібропереміщення.

Частота віброперeміщення (частота вібрації) відповідає частоті обертання ротора авіадвигуна, отже, частота вібрації турбореактивних і турбовентиляторних двигунів змінюється в певному діапазоні від $\mu_{\min}$ Х$\mu_{мг}$ до $\mu_{\max}$ Х$\mu_{вз}$, де $\mu_{мг}$, $\mu_{вз}$ – частота обертання ротора авіадвигуна в режимах малого газу і злітного відповідно (тяга цих двигунів змінюється за рахунок зміни частоти обертання ротора).

У турбогвинтових двигунах (ТВД) частота обертання ротора двигуна і гвинта постійні, а тяга змінюється за рахунок зміни кроку гвинта, отже, частота вібрації цих двигунів постійна. Однак в ТВД дві масивні частини (ротор двигуна і гвинт) мають різні частоти обертання, і значить, вібрація двигуна відбувається в основному на двох частотах. Незважаючи на те, що гвинт має більш рознесену масу і балансування його проблема, ротор двигуна обертається зі швидкістю, значно більшою вібрації двигуна. Тому в ТВД контролюють вібрацію з частотою, рівній частоті обертання ротора.

Віброперeміщення відбувається, як правило, по просторій кривій, тому при вивченні вібрації розглядають складові віброперeміщення, викликані силами (рис. 1.2), що діють перпендикулярно осі обертання в вертикальному F_y і горизонтальному F_x напрямках (вертикальна і горизонтальна складові), а також складову, викликану силою F_z, яке діє вздовж осі обертання (поздовжня складова віброперeміщення).

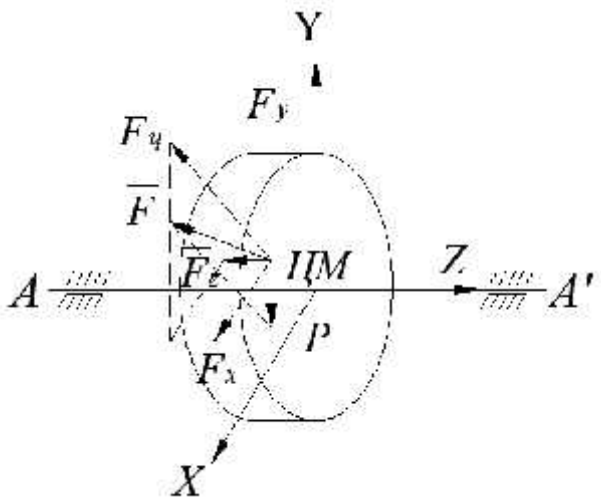

Рис. 1.2 Сили, котрі діють на вісь обертання

Крім віброперeміщення, вібрація характеризується віброшвидкістю

$$V \text{ Х} \overset{\cup}{S} \text{ Х}\mu S_a \ \sin(\mu t \ \Gamma^{\cdot\cdot})$$

і віброприскорення

$$a \text{ Х} \overset{\cup}{V} \text{ Х} \overset{\cup\cup}{S} \text{ ХZ}\mu^2 \ \sin\sin(\mu t \ \Gamma^{\cdot\cdot}) \text{ ХZ}\mu V \ \sin\sin(\mu t \ \Gamma^{\cdot\cdot}).$$

Всі величини, що характеризують вібрацію, мають три складових: подовжню, вертикальну і горизонтальну. Найбільш інформативною

величиною, що характеризує вібрацію, є віброприскорення, так як воно визначає додаткові зусилля на деталі двигуна. На практиці віброприскорення, що діє на двигун, характеризується коефіцієнтом віброперевантажень n, що є відношенням віброприскорення до прискорення вільного падіння.

Для діагностики стану авіадвигунів найбільш часто використовують віброшвидкість, так як вона має прямий функціональний зв’язок з діючими в деталях двигуна навантаженнями.

1.2 Класифікація вимірювальних перетворювачів вібрації

У віброметрії використовують два принципи вимірювання: динамічний і кінематичний.

Динамічний принцип вимірювання реалізується в датчиках інерційної дії. При цьому вимірюються абсолютні значення параметрів вібрації досліджуваних об’єктів.

Кінематичний принцип вимірювання використовується в безконтактних датчиках. При цьому вимірюється зміна в часі координат точок досліджуваних об’єктів щодо вібраційного нерухомої системи координат. Класифікація датчиків абсолютної вібрації по використовуваним для перетворення фізичним принципам приведена на рис. 1.4. Класифікація датчиків відносної вібрації відповідно до використовуваних для перетворення фізичних принципів наведена на рис. 1.5

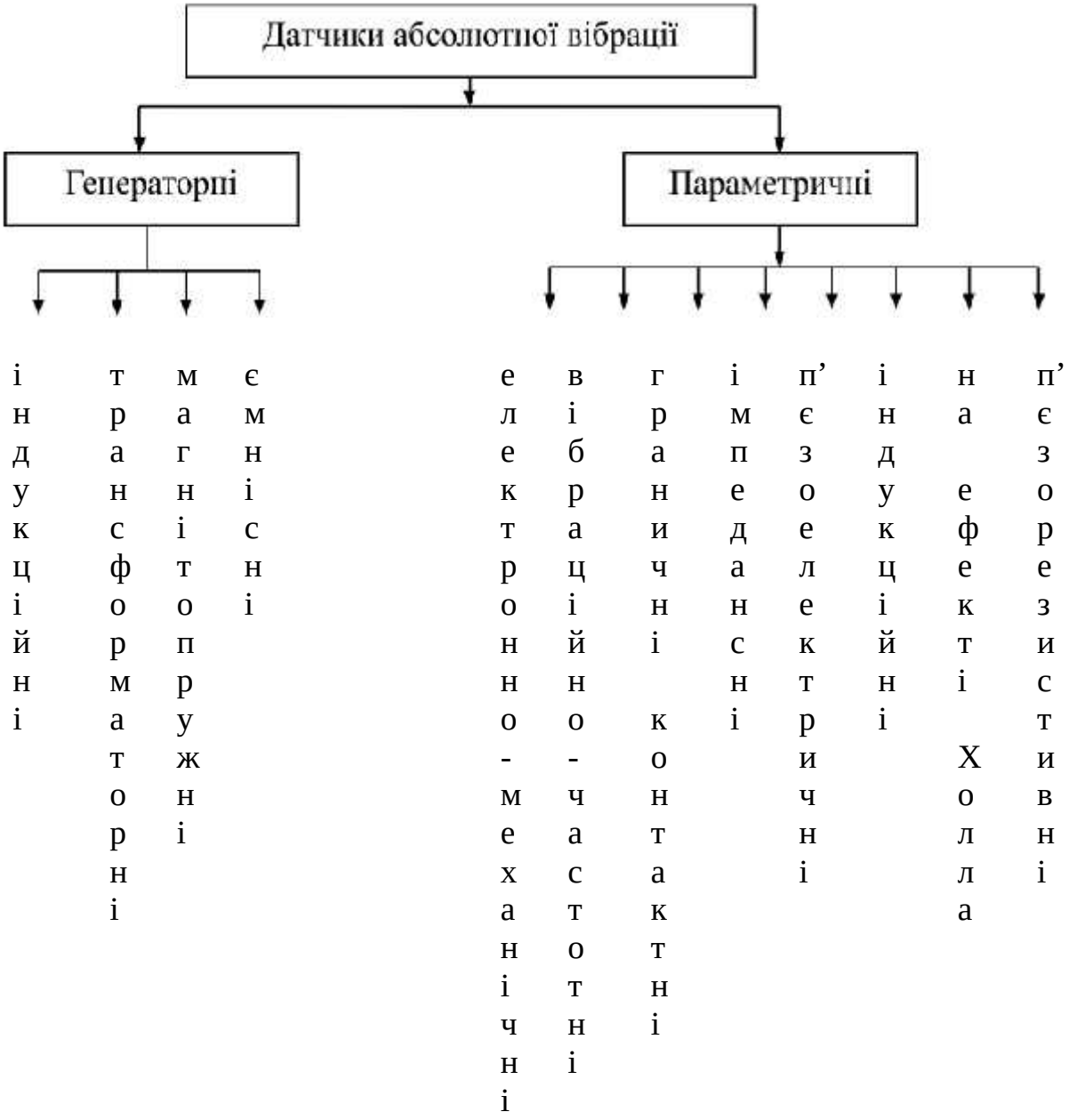

Рис 1.3. Класифікація датчиків абсолютної вібрації по використовуваним для перетворення фізичним принципам.

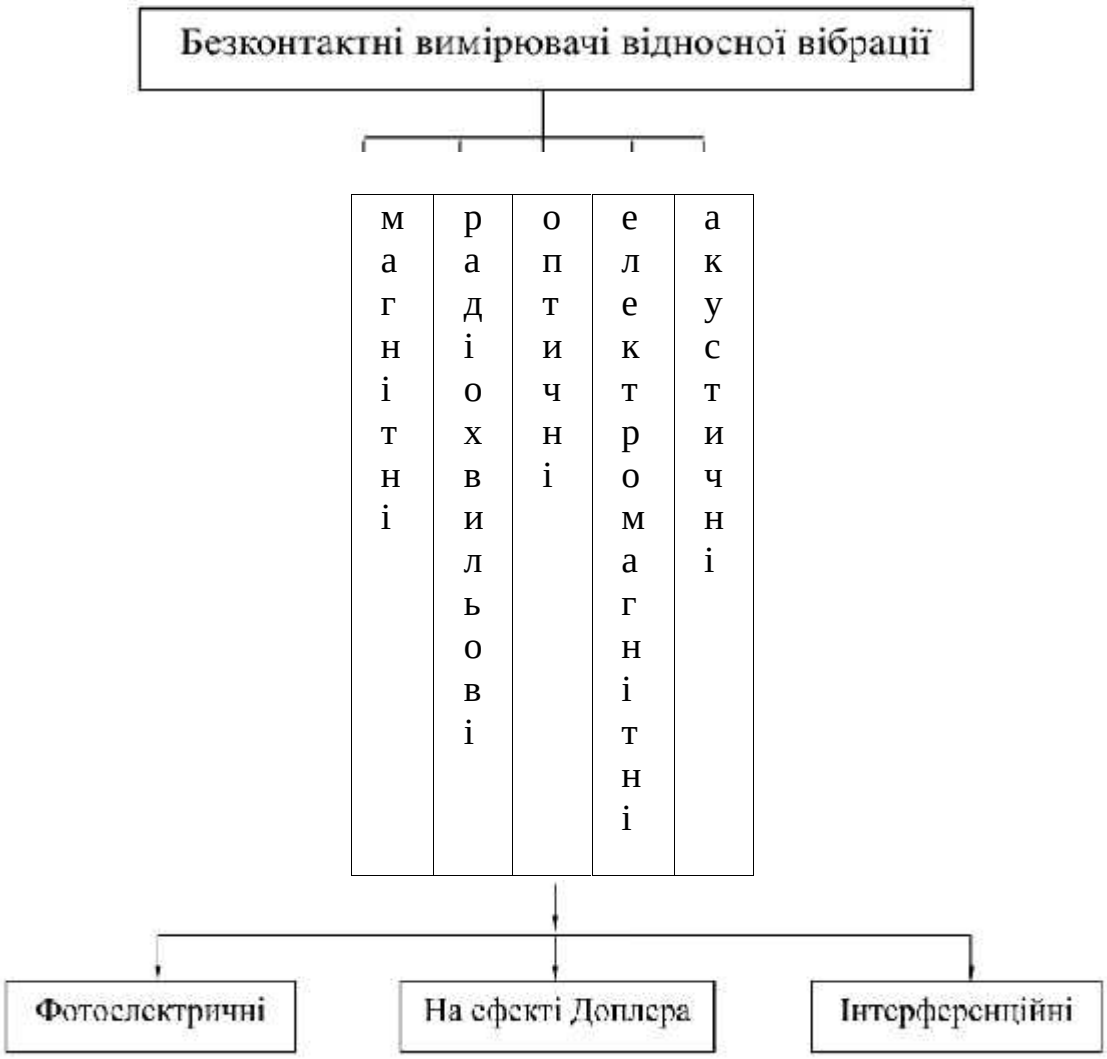

Рис. 1.4. Класифікація датчиків відносної вібрації відповідно до використовуваних для перетворення фізичних принципів.

З рис. 1.4 видно, що перетворювачі абсолютної вібрації в електричний сигнал ділять на два класи: генераторні, що перетворюють енергію механічних коливань в електричну; параметричні, що перетворюють механічні коливання в вимірювання параметрів електричних кіл, наприклад, індуктивності, ємності, активного опору, частоти або зсуву фаз і так далі.

З датчиків абсолютної вібрації найбільшого поширення набули п’єзоелектричні датчики. Їх відрізняють малі габаритні розміри, широкі частотний і динамічний діапазони, незначні коефіцієнти впливу зовнішніх факторів: температури, магнітного і електричного полів, звукового тиску, деформації досліджуваного об’єкта.

Принцип дії п’єзоелектричних датчиків заснований на використанні прямого п’єзоефекту, що полягає в тому, що під дією зовнішньої сили, в тому числі знакозмінної, деякі кристали або п’єзокераміки генерують електричні заряди. Найбільш поширеними п’єзоелектричними матеріалами є кварц, турмалін, ніобат літію, цирконат титаната свинцю, титанат вісмуту, окис цинку і ін.

Одним з основних факторів, що обмежують застосування п’єзоелектричних датчиків, є температура, при якій вони експлуатуються. При перевищенні певної межі температури п’єзоелектричний елемент втрачає частину своєї поляризації і коефіцієнт перетворення датчика знижується. При досягненні точки Кюрі матеріалу п’єзоелемента поляризація повністю зникає і датчик виходить з ладу. В області низьких температур обмеження на застосування п’єзоелектричних датчиків визначаються можливістю розтріскування п’єзоелектричного матеріалу. Слід враховувати, що датчик повинен надавати мінімальний вплив на вібруючий об’єкт. Резонансна частота об’єкта змінюється під впливом маси датчика. Цей ефект описується виразом:

$$f_p \text{ X } f_д \sqrt{\frac{m}{m \Gamma m_д}} \text{ fp=fдmm+mд}$$

де f_p – резонансна частота об’єкта; $f_д$ – резонансна частота об’єкта разом з датчиком; m – маса об’єкта; $m_д$ – маса датчика.

Слід зазначити, що в залежності від співвідношення демпфірування і жорсткості датчики абсолютної вібрації можуть працювати в дорезонансній, резонансної і післярезонансній областях частот. У першому випадку їх вихідний сигнал пропорційний прискоренню. Такі датчики називають акселерометрами. У другому випадку вихідний сигнал пропорційний швидкості, а датчики називають велосіметрами. А датчики, що працюють в післярезонансній області і назваються віброметрами, вихідний сигнал пропорційний переміщенню.

В безконтактних вимірювачах найбільше застосування в вібродіагностиці знайшли оптичні методи і засоби вимірювання параметрів вібрації, які за способом виділення інформації про вимірюваний параметр ділять на амплітудні та частотні. До амплітудних методів вимірювань відносять фотоелектричні (або фотомодуляційні) і інтерференційні методи вимірювання.

Вимірювання параметрів вібрації, засноване на зміні частоти випромінювання, відбитого від об’єкта, проводять вимірювальними пристроями, дія яких заснована на використанні ефекту Доплера.

1.3 Інерційний метод вимірювання вібрації

Вібрацію об’єкта можна визначати, спостерігаючи його положення щодо інших об’єктів, які вважаються нерухомими. Розрізняють абсолютний і інерційних методи вимірювання вібрації в залежності від того, щодо якого об’єкта проводять виміри.

При вимірюванні вібрації абсолютним методом вібропереміщення спостерігають відносно світового простору (зірок). В авіації цей метод застосувати дуже складно, так як переміщення повітряного судна щодо світового простору в багато разів перевищує вібропереміщення.

Інерційних метод вимірювання вібрації авіадвигунів знайшов широке застосування. Цей метод заснований на першому законі Ньютона – властивості тіла зберігати стан спокою, коли на нього не діють сили.

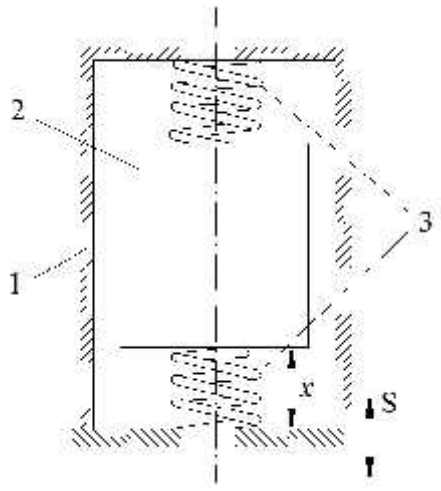

Рис. 1.5 Конструкція вібровимірювального перетворювача

Вібровимірювальний перетворювач (ВВП), який реалізує інерційний метод вимірювання (рис 1.3), складається з корпусу 1 (вібруючого елементу), жорстко з'єднаного з авіадвигунів, і інерційної маси 2 (невібруючого елемента), з'єднаної з корпусом 1 і пружинами 3. Таким чином, при вібрації двигуна буде переміщуватися корпус 1 ВВП, а інерційна маса 2 завдяки своїй інерції буде залишатися відносно нерухомої. Отже, ВВП перетворює вхідний сигнал - вібропереміщення s корпусу 1 (а, значить, і авіадвигуна) щодо світового простору, в вихідний сигнал – переміщення x корпусу ВВП відносно інерційної маси 2 (сейсмомасси).

Рух такої коливальної системи описується виразом

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = -\ddot{S}$$

де $\beta = \frac{\alpha}{2\sqrt{Cm}}$ – коефіцієнт відносного загасання; α – коефіцієнт демпфірування, кг/с; $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$ – власна кругова частота, 1/с; С – жорсткість пружин, Н/м; m – маса невібруючого елемента, кг.

Коефіцієнт передачі такої системи

$$|K| = \frac{x}{S} \text{ або } |K| = \frac{\dot{x}}{\dot{S}} \text{ або } |K| = \frac{\ddot{x}}{\ddot{S}}$$

описується виразом:

$$\dot{K} = \frac{\gamma^2}{1 - \gamma^2 + j2\xi\gamma},$$

де $j = \frac{\mu}{\mu_0}$; $\gamma = \frac{\omega}{\omega_0}$.

Залежність модуля коефіцієнта передачі ВВП від співвідношення частот вимушених (вібраційних) і власних коливань системи називається амплітудно-частотної характеристикою (АЧХ) ВВП і описується виразом

$$K = \frac{\gamma^2}{\sqrt{(1-\gamma^2)^2 + 4\xi^2\gamma^2}}$$

На рис 1.6 показана АЧХ ВВП з різним коефіцієнтом загасання

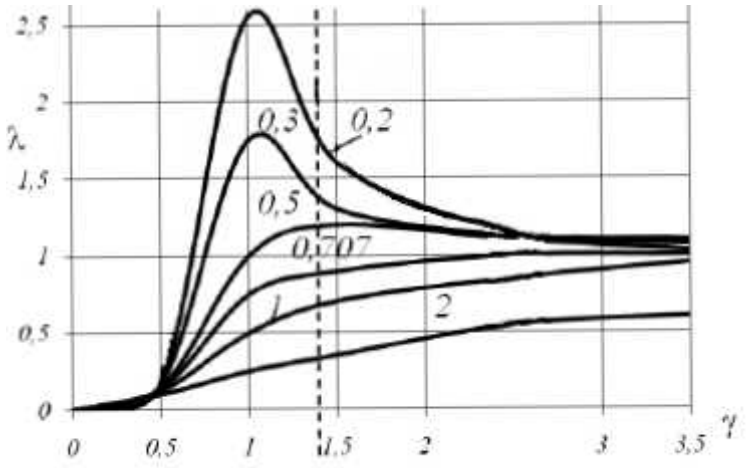

Рис 1.6 АЧХ ВВП з різним коефіцієнтом загасання

З АЧХ ВВП видно, що при $\gamma \gg 1$ модуль коефіцієнта передачі ВВП наближається до одиниці. Отже, при $\gamma \gg 1$ переміщення корпусу ВВП щодо невібріруючого елемента дорівнюватиме вібропереміщенню. Тому вважають, що при $\gamma > 1{,}5$ розглянутий ВВП працює в режимі перетворення віброперемещенія, при $\gamma < 0{,}5$ – перетворення віброприскорення, а при $0{,}5 < \gamma < 1{,}5$ – перетворення віброшвидкості. Для забезпечення $\gamma > 1{,}5$ необхідно застосовувати пружини малої жорсткості, а для $\gamma < 0{,}5$ – великої жорсткості. Виготовлення ВВП з $0{,}5 < \gamma < 1{,}5$ досить важко, тому зазвичай створюють ВВП або з $\gamma < 0{,}5$ або з $\gamma > 1{,}5$.

Для отримання дистанційних віброметрів необхідно переміщення корпусу ВВП щодо невібруючого елемента перетворити в електричний сигнал. Для цього використовують магнітоіндукційні (МІП) і п’єзоелектричні (ПЕП) перетворювачі.

1.3.1. Магнітоіндукційні перетворювачі

Першими повномасштабне застосування отримали датчики вібрації з МІП (рис 1.7). У таких датчиках невібруючий елемент 2 являє собою циліндричний постійний магніт, намагнічений вздовж утворюючої, а індукційна котушка 3 жорстко з'єднується з корпусом. Таким чином, корпус і магніт утворюють ВВП, а магніт і котушка – МІП, на виході якого при вібрації виникає ЕРС (Е).

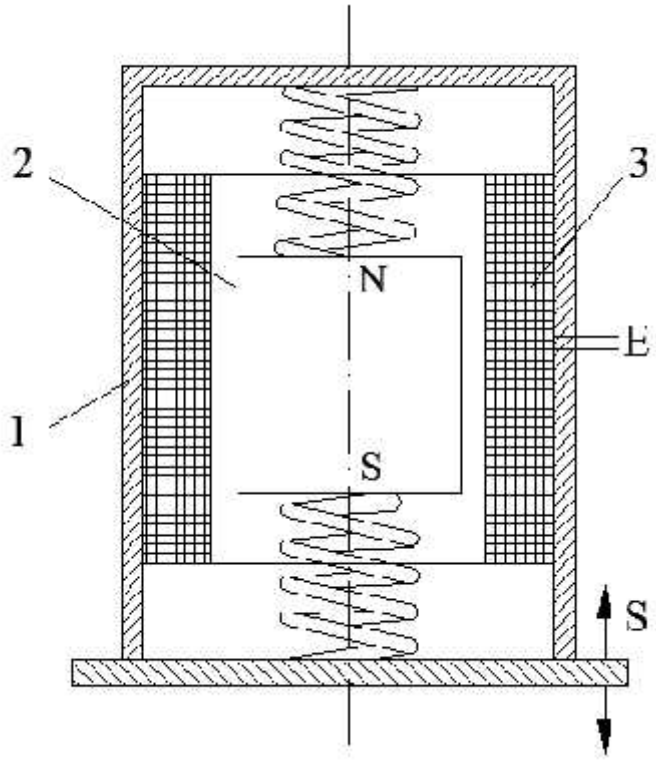

Рис. 1.7 Конструкція датчика вібрації з МІП

Розглянемо більш детально датчик вібрації з МІП. Його структурна схема зображена на рис. 1.8.

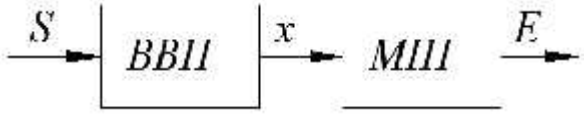

Рис. 1.8 Структурна схема датчика вібрації з МІП

МІП є диференціюючим перетворювачем, і ЕРС на його виході залежить від швидкості взаємного переміщення корпусу датчика з котушкою 3 щодо невібруючого постійного магніту 2, тому в цих датчиках роблять ВВП з $\gamma>1{,}5$, тобто такі, коли x=s. В цьому випадку ЕРС на виході МІП можна знайти за формулою

$$E \text{ XZ} \frac{d \cdot}{dt} \text{XK} \frac{d \cdot}{dt} \text{XK} s,$$

де К – коефіцієнт пропорційності – чутливість датчика, мВ/(*мм* c^{Z1}).

Отже, для отримання інформації про віброшвидкість в віброметрах з МІП необхідно вимірювати ЕРС змінного струму. ЕРС на виході МІП має мале значення, тому її необхідно посилити. Однак при передачі ЕРС від МІП до входу підсилювача на дроти впливають електромагнітні та електростатичні поля, які викликають в проводах інші ЕРС, так звані наведення, які мають частоти відмінні від частоти вібрації. У той же час вібрація двигуна може відбуватися з різними частотами. Тому, щоб посилювати ЕРС тільки необхідної частоти (першої роторної гармоніки), підсилювачі віброметрів швидкості з МІП повинні мати постійний коефіцієнт передачі (підсилення) K_{yc} в усьому діапазоні частот ЕРС (від $f_{\min}$ до $f_{\max}$). АЧХ такого підсилювача (залежність коефіцієнта підсилення K_{yc} від частоти підсилювального сигналу) повинна мати вигляд, близький до показаного на рис. 1.9.

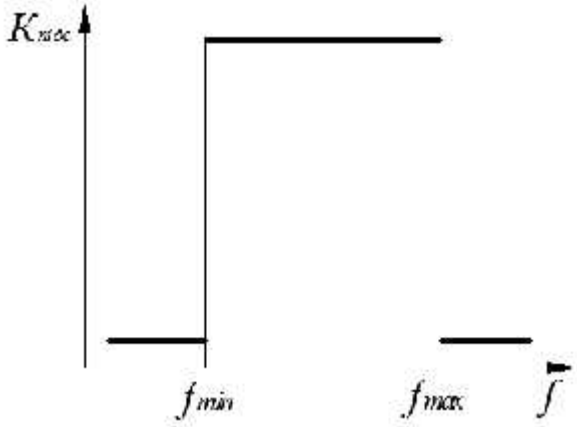

Рис. 1.9 Ідеальний вигляд АЧХ підсилювача віброметра швидкості

Для отримання бажаної АЧХ підсилювача віброметра швидкості, структурна схема якого показана на рис. 1.10, після вхідного каскаду посилення ВК, узгоджувального великий вихідний опір МІП з низьким вхідним опором наступних каскадів, включають послідовно інтегруючу і диференціює RC-ланцюжок, а потім два виборчих каскаду посилення. Інтегруючий ІЛ і диференціюючий ДЛ ланцюжки забезпечують затухання на частотах відповідно $f > f_{\max}$ і $f < f_{\min}$.

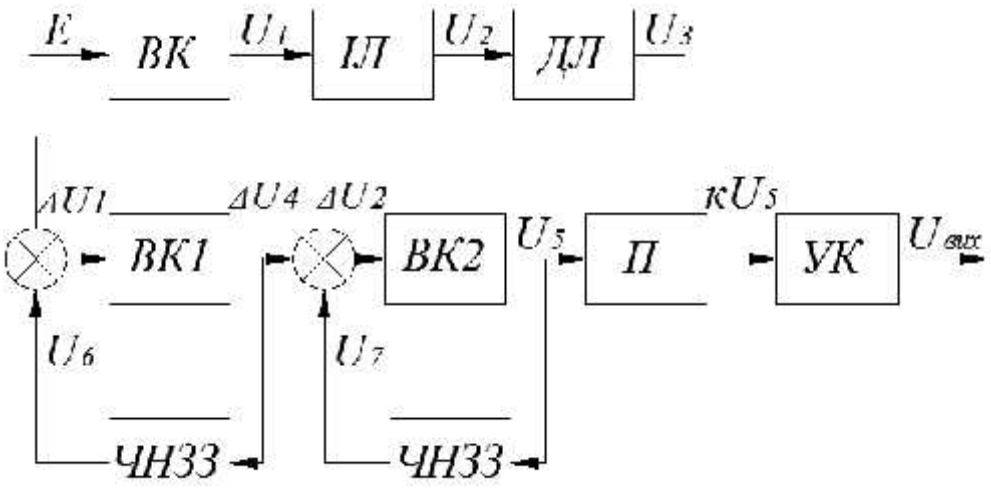

Рис. 1.10 Структурна схема підсилювача віброметра швидкості

Перший виборчий каскад ВК1 за рахунок частотозалежного негативного зворотного зв'язку ЧНЗЗ має АЧХ, показану на рис. 1.11 кривою 2. Він посилює ЕРС з частотами вище $f_{\min}$. Другий виборчий каскад ВК2, має АЧХ, показану кривої 1. Цей каскад підсилює ЕРС з частотами нижче f_{max}. В результаті такого включення RC-ланцюжків і виборчих підсилювачів отримують АЧХ підсилювача (крива 3), близьку до ідеальної (див. рис. 1.9).

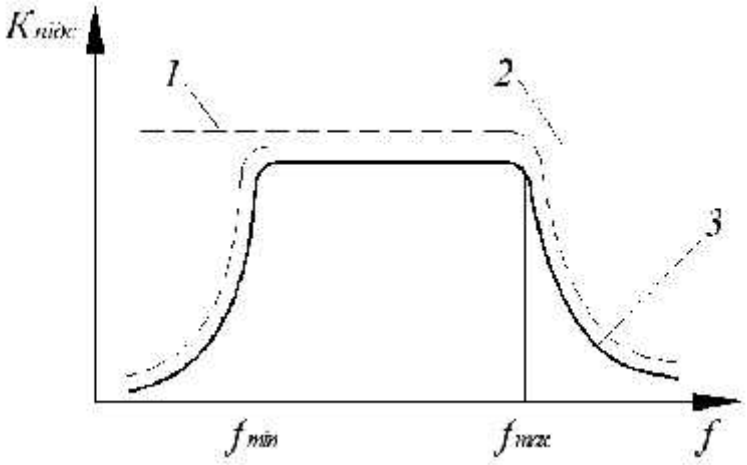

Рис. 1.11 Дійсна АЧХ підсилювача віброметра швидкості

Для отримання необхідного значення коефіцієнта підсилювача після другого виборчого підсилювача підсилюють невиборний каскад підсилення П (рис. 1.10). Вихід цього каскаду з'єднують зі входом узгоджувального каскаду УК, що забезпечує узгодження високого вихідного опору підсилювача з низьким вхідним опором наступних пристроїв. Віброметри швидкості з МІП використовуються на всіх повітряних судах з турбореактивними або турбовентиляторними двигунами.

На повітряних судах з ТВД, у яких частота обертання вала гвинта постійна, виконується умова a=V=s, тобто віброприскорення прямопропорційні віброшвидкості, тому віброметри з МІП можуть бути використані для вимірювання віброприскорення.

Однак підсилювач віброметра прискорення для ТВД повинен посилювати ЕРС тільки однієї частоти і може мати коефіцієнт посилення, відмінний від коефіцієнта посилення віброметра швидкості. З огляду на, що практично в ТВД частота обертання може трохи змінитися і що неможливо створити кілька ТВД з абсолютно однаковою частотою обертання валу гвинта, підсилювач віброметра прискорення з МІП повинен мати смугу пропускання частот, але дуже вузьку: 5-10 Гц.

Для отримання необхідної форми АЧХ підсилювача віброметра прискорення на вході підсилювача встановлюють подвійний Т-подібний RC-фільтр, включений в ланцюг негативного зворотного зв'язку підсилювального П і узгоджувального УК каскадів (рис. 1.12), який налаштований так, що на робочій частоті негативний зв'язок відсутній і коефіцієнт посилення максимальний.

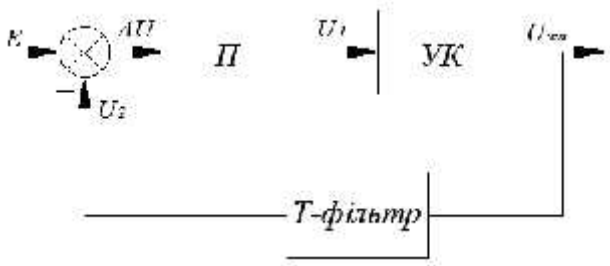

Рис. 1.12 Схема включення Т-фільтра

АЧХ підсилювача віброметра прискорення з МІП показана на рис. 1.13. Для отримання інформації про вібропереміщення інтегрують сигнал з виходу підсилювача віброметра швидкості.

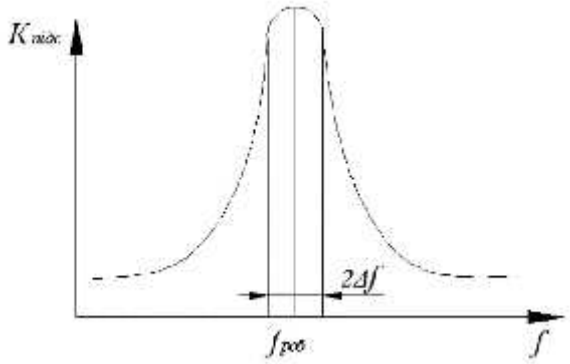

Рис. 1.13 АЧХ підсилювача віброметра прискорення з МІП

1.3.2. П'єзоелектричні перетворювачі

У датчиках вібрації з ПЕП (рис. 1.14) використовується п'єзоелектричний ефект, тобто властивість деяких кристалів утворювати електричні заряди на їх поверхні при механічних деформаціях.

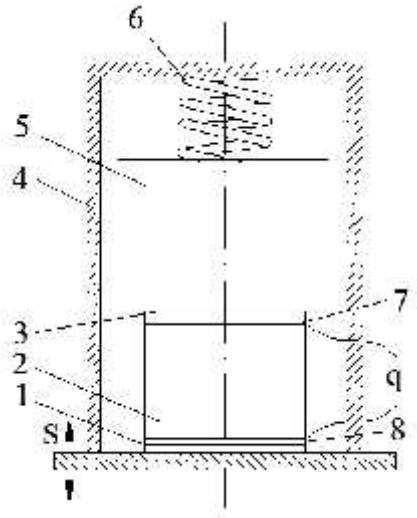

Рис. 1.14 Датчик вібрації з ПЕП

У такому датчику ПЕП 2 через ізолятор1 жорстко кріпиться до корпуса 4 датчика, невібруючий елемент 5 також через ізолятор 3 з'єднується з ПЕП. При вібрації датчика за рахунок інерції невібруючого елемента виникає сила F, що викликає деформацію ПЕП і на електродах 7, 8 утворюється електричний заряд, який визначається співвідношенням

$$q \, \mathrm{X} d_{11} F,,$$

де d_{11} – постійний для даного кристала коефіцієнт, званий п'єзоелектричним модулем, Кл/Н; F – сила, що викликає деформацію, Н.

Сила F, що викликає деформацію п'єзоелектричного елемента, залежить від маси невібріруючого елемента 5 (рис. 1.14) і впливаючого на п'єзоелемент прискорення. Отже, в датчик вібрації з ПЕП ВВП повинен мати власну частоту значно вищу частоти вібрації, щоб виконувалася умова $\gamma<0{,}5$, коли $x \, \mathrm{X}\dot{\mathrm{e}} a..$

У цьому випадку напруга на виході ПЕП

$$U \, \mathrm{X} \frac{q}{C_п \, \Gamma C_л} \, \mathrm{X} \frac{d_{11} m}{C_п \, \Gamma C_л} a,$$

де $C_п, C_л$ – електрична ємність п'єзоелемента і лінії, що з'єднує його з наступними пристроями; m – маса невібруючого елемента, кг.

Для зменшення впливу ємності сполучної лінії Сл в віброметрі з ПЕП необхідно застосовувати підсилювач заряду (ПЗ), який повинен розташовуватися поблизу датчика або безпосередньо в ньому. ПЗ повинен мати нескінченно великий вхідний опір, мізерно малу вхідну ємність і низький вихідний опір У технічних пристроях реалізувати ПЗ, що задовольняє зазначеним вимогам, практично неможливо, тому замість ПЗ в авіаційних віброметрах застосовували підсилювач напруги (ПН), який має великий

вхідний опір (сотні мегаом) , малу вхідну ємність (одиниці-десятки пікофарад) і відносно малий вихідний опір.

З виходу ПН напруга надходить на вхід підсилювача, що має АЧХ, аналогічну АЧХ підсилювача віброметра швидкості з МІП. Структурна схема підсилювача віброметра з ПЕП відрізняється від структурної схеми підсилювача віброметра швидкості тільки тим, що перед вхідним каскадом (ВК) включається ПН.

Для отримання інформації про віброшвидкість та вібропереміщення необхідно проінтегрувати сигнал з виходу підсилювача віброметра один або два рази відповідно.

Вивчивши теоретичні основи вібрації авіадвигунів, можна зробити наступні висновки:

1. Для вимірювання вібрації необхідно мати вібруючий і невібруючий елементи;
2. ВВП в залежності від співвідношення частоти вібрації і власної частоти може працювати в режимі перетворення вібропереміщення, віброшвидкості або віброприскорення;
3. Підсилювачі в віброметрах швидкості з МІП і з ПЕП повинні мати широку смугу пропускання частот, а в віброметр прискорення з МІП – вузьку смугу пропускання частот.

РОЗДІЛ 2
АНАЛІЗ РОБОТИ ВІДОМИХ АВІАЦІЙНИХ ВІБРОМЕТІВ

2.1 Загальний огляд технічних характеристик віброметрів

У таблиці наведено основні технічні характеристики віброметрів, які експлуатувалися в цивільній авіації з датчиками, що мають МІП. Як видно з таблиці, тільки віброметр ИВ-41 (і всі його модифікації), що встановлюється на повітряних судах з ТВД, призначений для вимірювання віброперевантаження (віброприскорення). Решта віброметрів вимірюють віброшвидкість, їх встановлюють на повітряних судуах з ТРД і ТРДД.

Таблиця 2.1 Основні технічні характеристики радянських віброметрів

Тип віброметру	Склад	Кількість	Діапазон вимірів (діапазон частот)	Значення допустимої похибки
ИВ-41	Блок фільтра Датчик МВ-25 Показуючий пристрій	1 2 2	0-6 g(252±2 Гц)	± 10% від виміряного значення
ИВ-200А	Електронний блок БЭ6-2 Датчик МВ-25Д Показуючий пристрій	3 8 1	0-6 g(252±2 Гц	± 15% від виміряного значення
ИВ-300	Електронний блок БЭ-1 Датчик МВ-26В Показуючий пристрій	3 3 1	0-6 g(252±2 Гц	± 15% від виміряного значення

Тип віброметру	Склад	Кількість	Діапазон вимірів (діапазон частот)	Значення допустимої похибки
ИВ-154	Електронний блок БЭ-8 Датчик МВ-28А Показуючий	3 6 1	0-6 g(252±2 Гц	від ± 7,5% до ± 20% в залежності від v та

	пристрій			
ИВ-42М	Електронний блок БЭ-27 Датчик МВ-31	3 6 2	0-6 g(252±2 Гц	± 15% від виміряного значення

2.2 Віброметр типу ИВ-300

Типовим представником віброметрів з МІП є віброметр ИВ-300. Структурна схема ИВ-300 показана на рис. 2.1.

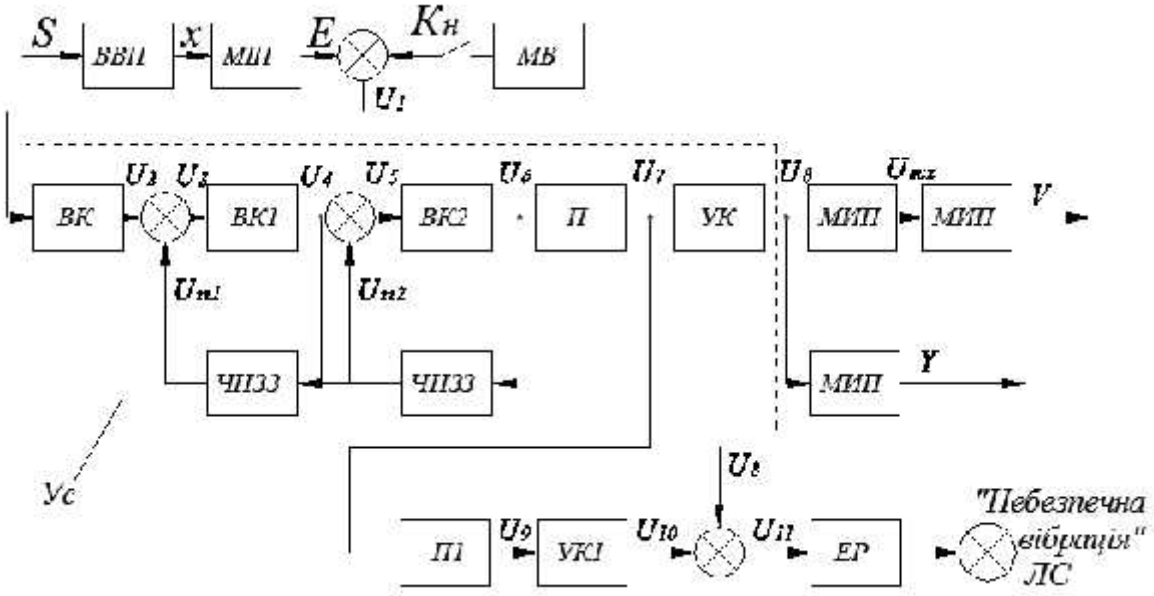

Рис. 2.1 Структурна схема авіаційного віброметру ИВ-300

ЕРС з виходу датчика вібрації надходить на вхід Ус (рос. «підсилювача»), структура якого була розглянута раніше, а АЧХ підсилювача має вигляд, показаний на рис. 1.13. З виходу підсилювача напруга змінного струму перетворюється в напругу постійного струму випрямлячами В1 і В2. З виходу випрямляча В1 напруга надходить на магнітоелектричний мікроамперметр, проградуйований в одиницях віброшвидкості від 0 до 100 мм/с .

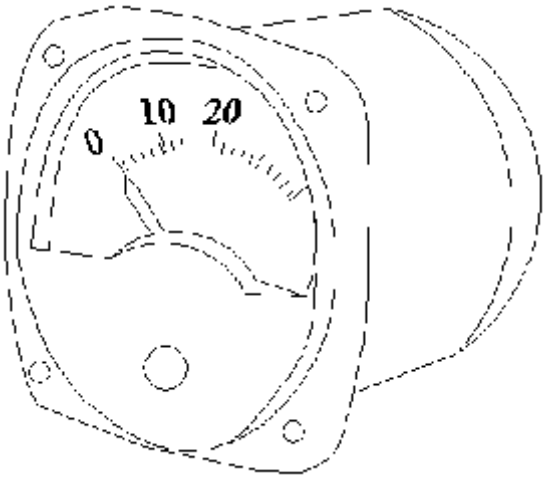

Рис. 2.2 Зовнішній вигляд показуючого прибору в ИВ-300

При установці на повітряне судно декількох датчиків і електронних блоків, показуючий прилад за допомогою галетного перемикача може перемикатися до виходу будь-якого блоку. При установці ручки перемикача в положення АВТОМАТ показуючий прилад буде показувати віброшвидкість, максимальну з усіх виміряних.

З виходу випрямляча В2 напруга постійного струму, пропорційна віброшвидкості, надходить в систему автоматичної реєстрації (САПР) польотної інформації.

Віброметр ИВ-300 має систему сигналізації небезпечної вібрації, що складається з підсилювача П1, узгоджувального каскаду УК1 і електронного реле ЕР. При перевищенні заданого значення напруга $U_з$ на виході УК1 спрацьовує ЕР і включає сигнальну лампу НЕБЕЗПЕЧНА ВІБРАЦІЯ.

Для контролю справності в віброметр ИВ-300 є мультивібратор (МВ), що генерує імпульси з частотою, що відповідає середній частоті смуги пропускання підсилювача. При натисканні кнопки Кн КОНТРОЛЬ відключається датчик вібрації від входу підсилювача і на нього подається напруга від мультивібратора. При всіх справних елементах стрілка приладу повинна переміститися вправо, і спрацювати система сигналізації.

Конструктивно підсилювачі, випрямлячі, електронне реле і мультивібратор об’єднані в одному одноканальному блоці – блоці електронному типу БЕ-1, БЕ-2 або БЕ-3.

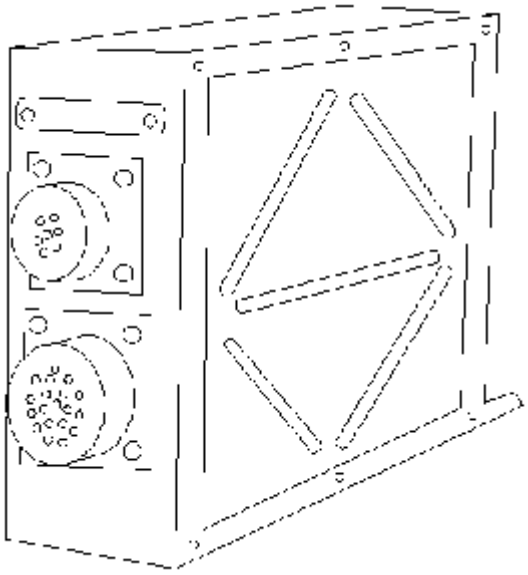

Рис. 2.3 Схематичний вигляд БЭ в ИВ-300

Блоки розрізняються певними елементами і смугою пропускання підсилювача.

2.3. Вимірювач вібрації з ПЕП

Структурна схема одного з таких віброметрів показана на рис. 1.14. Працює віброметр наступним чином. Сигнал з ПЕП датчика надходить в узгоджувальний пристрій (УП) – підсилювач напруги, а потім через вхідний каскад (ВК) електронного блоку надходить на перший виборчий підсилювач (ВП1) з частотозалежним негативним зворотним зв’язком (аналогічний ВП1 в віброметром з МІП).

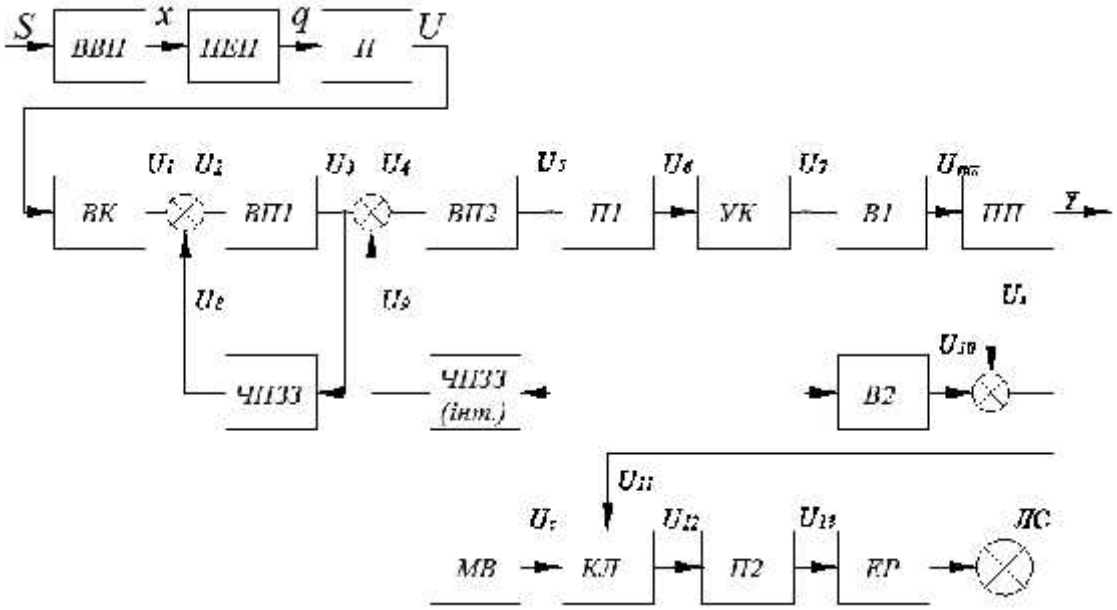

Рис. 2.4 Структурна схема авіаційного віброметра з ПЕП

З виходу ВП1 сигнал надходить на вхід виборчого підсилювача (ВП2) з інтегруючим частотозалежним негативним зворотнім зв'язком ІЧНЗЗ. В результаті такого включення ВП1 і ВП2 забезпечується АЧХ підсилювача, аналогічна підсилювача віброметра швидкості з МІП. Однак завдяки ІЧНЗЗ в ВП2 напруга на виході ВП2 буде пропорційно інтегралу від напруги на виході ПС, тобто

$$U_5 \text{Х}k \int_0^t U dt \text{Х}k \int_0^t \frac{d_{11}F}{C_н \Г C_л} dt \text{Х}k \frac{d_{11}F}{C_н \Г C_л} \int_0^t a dt \text{Х}k \frac{d_{11}F}{C_н \Г C_л}.$$

В результаті цього напруга на виході ВП2 буде пропорційна віброшвидкості. Після посилення в каскаді П напруга проходить через узгоджувальний каскад (УК), випрямляч В1 і надходить на показуючий прилад, такий же як в віброметрі з МІП.

Для сигналізації про перевищення допустимого рівня віброшвидкості: ПЕРЕВИЩЕННЯ НОРМИ віброметр забезпечений пристроєм сигналізації, який працює наступним чином. Напруга з виходу узгоджувального каскаду підсилювача випрямляється випрямлячем В2 і потім порівнюється з заданим значенням напруги постійного струму $U_з$. Якщо напруга на виході випрямляча В2 перевищує $U_з$, відкривається електронний ключ КЛ і напруга змінного струму надходить від мультивібратора МВ на вхід підсилювача Y_c. Посилена напруга викликає спрацьовування електронного реле ЕР і включення сигналізації ПЕРЕВИЩЕННЯ НОРМИ. Якщо необхідно мати сигналізацію про інші рівні вібрації, наприклад, НЕБЕЗПЕЧНА ВІБРАЦІЯ, то до виходу узгоджувального каскаду УК підсилювача паралельно розглянутому пристрою підключають інше з іншим значенням $U_з$.

У комплект такого віброметра можуть входити 2-4 датчика, підсилювачі (по одному на кожен датчик), 1-2 електронні двоканальні блоки, 1 показуючий прилад.

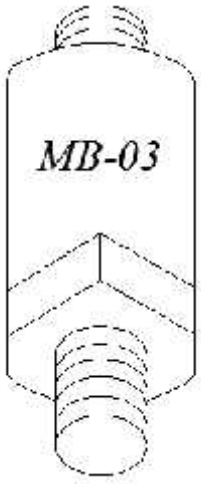

Рис. 2.5 Зовнішній вигляд датчика ПЕП

Віброметр контролює віброшвидкість від 5 до 100 мм/с в діапазоні частот вібрації 190-750 Гц. Нелінійність амплітудної характеристики не більше $\pm 10\%$ від верхньої межі вимірювання, а динамічна похибка не більше $\pm 20\%$ від вимірюваного значення.

Обидва розглянуті віброметри живляться від мережі змінного струму напругою 115 В, частотою 400 Гц. Час готовності віброметрів до роботи не перевищує 3 хвилин.

2.4 Причини виникнення похибок віброметрів

Похибка авіаційних віброметрів, як видно з раніше наведеної табл. 2.1, становить 10-15% від вимірюваного значення. Великі похибки віброметрів з МІП і ПЕП пояснюються тим, що на показання віброметрів впливають багато факторів.

Так при неправильній установці вібродатчика (рис 2.6), коли його вимірювальна вісь, уздовж якої переміщається вібруючий елемент, не збігається з напрямком вібрації, виникає *методична складова похибки*. Це пояснюється тим, що ЕРС (заряд) на виході датчика в цьому випадку буде пропорційна складовій, а не повному значенню віброшвидкості (віброприскорення).

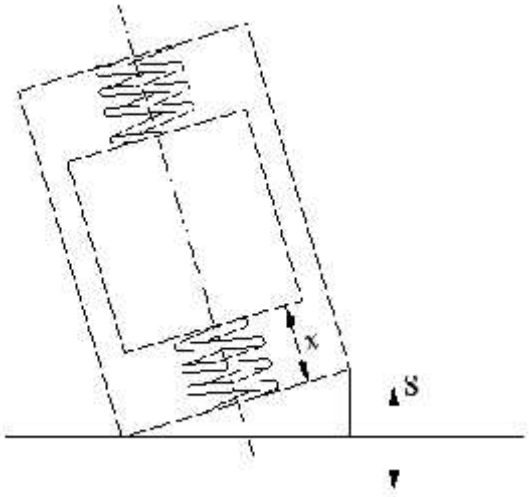

Рис. 2.6 Невірна установка ВВП

Ця ж складова похибки виникає і при неправильному виборі місця установки датчика, коли вимірювальна вісь датчика не збігається з напрямком максимального значення вимірюваної складової величини, що характеризує вібрації.

Методична складова похибки може проявитися при поганому кріпленні корпуса датчика до корпусу двигуна. Для виключення цієї складової необхідно датчик встановлювати відповідно до інструкції по експлуатації віброметра і не застосовувати пружинних шайб при установці гвинтів кріплення датчика.

Методична складова похибки з'являється і при зміні коефіцієнта демпфірування датчика. Для виключення цієї складової похибки необхідно контролювати стан підшипників і рухливих частин датчика, стан проводів, що з'єднують датчик з подальшими блоками.

Інструментальна складова похибки віброметрів з МІП проявляється при зміні чутливості датчика, яка визначається по формулі

$$K \, X \frac{E}{S_a f}$$

де Е – амплітудне значення напруги на виході датчика, мВ; S_a – амплітуда вібропереміщення, мм; f – частота вібрації, Гц.

Чутливість датчика є його паспортною характеристикою і може змінюватися при зміні індукції магніту датчика в процесі експлуатації (старіння) та від зміни його температури.

Старіння п'єзоелемента в датчиках з ПЕП в процесі експлуатації і зміна його температури викликають *інструментальну складову похибки*.

Крім того, *інструментальні складові похибки віброметр*ів обумовлені невідповідністю АЧХ підсилювача необхідній формі (нелінійність в смузі частот, наявність завалів АЧХ); зміною коефіцієнта посилення підсилювача при зміні температури повітря і напруги живлення; зміною властивостей показуючого приладу при зміні його температури.

Значні *похибки віброметрів* пояснюються також недостатнім метрологічним забезпеченням вимірювання вібрації і, зокрема, відсутністю відповідних по точності засобів перевірки віброметрів при випуску їх з виробництва і в процесі експлуатації.

2.5. Основи лазерної віброметрії

В даний час для вимірювання параметрів вібрації щодо масивних об'єктів широко застосовуються контактні методи, засновані на використанні вібродатчиків, що закріплюються безпосередньо на об'єкті.

Для контролю малорозмірних або тонкостінних об'єктів, об'єктів важкодоступних або нагрітих до високих температур, використовуються безконтактні, в основному – оптичні методи.

Будь-який оптичний метод вимірювання параметрів вібрації включає в себе операції:

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

- математична обробка сигналу детектора і уявлення параметрів вібрації в заданих одиницях виміру.

В якості світлочутливого елемента фотодетекторов в даний час найбільш широко використовуються так звані фотоелектричні приймачі оптичного випромінювання: фоторезистори, фотодіоди, фотопомножувачі і більш складні прилади, зроблені на їх основі (фотопотенціометр, диссектор, матриця фотодіодів).

Перераховані елементи чутливі тільки до інтенсивності випромінювання, тому для отримання інформації, що містяться в частоті, фазі або поляризації відбитого від об’єкта (або того, що пройшов через нього) оптичного сигналу, до складу фотодетекторов входять різні інтерференційні або поляризаційні оптичні дискримінатори, лінзи і діафразми.

Як джерела світла найбільш зручні лазери, випромінювання яких крім інтенсивності характеризується ще і високою когерентністю і гострою спрямованістю.

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

З усіх джерел випромінювання оптичного діапазону лазерні джерела характеризуються найбільшим ступенем когерентності і монохроматичності генеруючого ними випромінювання. Крім того, лазери мають наступні позитивні властивості: високу стабільність і відтворюваність частоти випромінювання, малий кут розходження, малу чутливість до зміни температури навколишнього середовища, що особливо важливо при метрологічних дослідженнях. Тому при розробці приладів, призначених для високоточного вимірювання параметрів руху в машинобудуванні, лазерні джерела знайшли широке застосування.

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

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

Рис. 2.7 Класифікація методів лазерної віброметрії

Перш ніж детально розглядати допплерівський метод вимірювання вібрації, дамо визначення деяких основних понять і величин лазерної віброметрії.

Як в інтерференційних, так і в допплерівських методах набув поширення двопроменевий інтерферометр Майкельсона. Розглянемо схему інтерферометра (рис. 3.2) більш детально. Випромінювання лазера 1 надходить на світлоподілювальний кубик 2 і розділяється на дві частини. Отримані промені спрямовуються відповідно на нерухомий відбивач 3 і на переміщувальний разом з вимірюваним об'єктом відбивач 4. Відображені від рухомого 4 і нерухомого 3 дзеркал оптичні промені поєднуються на розділовій поверхні кубика 2 та інтерферирують. В окулярі 5 спостерігається інтерференційна картина. Якщо різниця ходу променів інтерферометра $\Delta_0 = 0; \frac{\lambda}{2}; 2\frac{\lambda}{2}; ...; n\frac{\lambda}{2}$, то інтерференційне поле має максимум освітленості. При різниці ходу $\Delta_0 = \frac{\lambda}{4}; 3\frac{\lambda}{4}; ...; (2n+1)\frac{\lambda}{4}$ промені сходяться в протифазі і інтерференційне поле має мінімум освітленості. Таким чином, можна виміряти величину переміщення дзеркала 4 по числу переходів зміни освітленості, що пройшли через діафрагму 6. Один період відповідає половині довжини хвилі лазерного випромінювання.

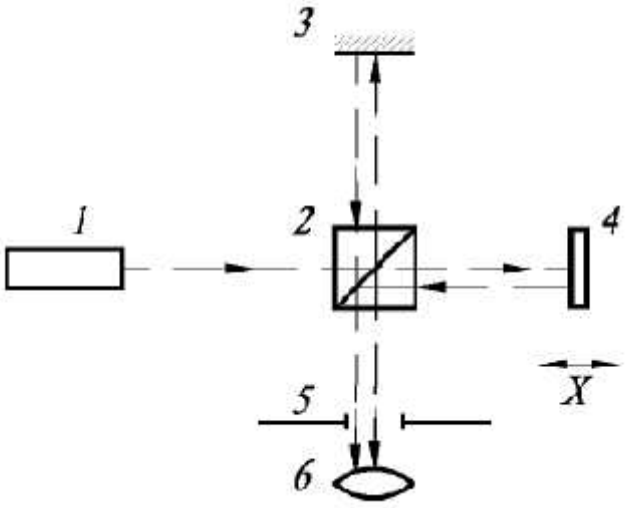

Рис 2.8 Схема інтерферометра Майкельсона: 1 – лазер; 2 – світло розділювальний кубик; 3 – нерухоме дзеркало; 4 – рухоме дзеркало; 5 – окуляр; 6 – діафрагма

Ефект Допплера полягає в зміні частоти електромагнітного випромінювання при відносному русі приймача і джерела випромінювання. Якщо приймач і джерело випромінювання знаходяться в одній системі координат, а випромінювання відбивається від іншої, то при відносному русі цих двох інерційних систем координат має місце дворазовий ефект Допплера. В цьому випадку допплерівська зміна частоти відбитого випромінювання визначається як

$$\mu_{\partial} \text{ X2}\mu\frac{V}{c},$$

де μ – кутова частота випромінювання; V – радіальна складова швидкості руху об’єкта; c – швидкість світла.

Під частотою коливання розуміють частоту вихідного сигналу фотоприймача в лазерній вимірювальній системі при відсутності частотної модуляції (наприклад, допплерівського зсуву частоти). Несуча частота, як правило, визначається різницею між частотою випромінювання μ лазера 1 (рис. 3.3) і частотою $\mu\,\Gamma\vartheta$ випромінювання лазера, зрушеного на величину ϑ за допомогою будь-яких пристроїв зсуву частоти 6 (електрооптичних, ультразвукових і т.д.).

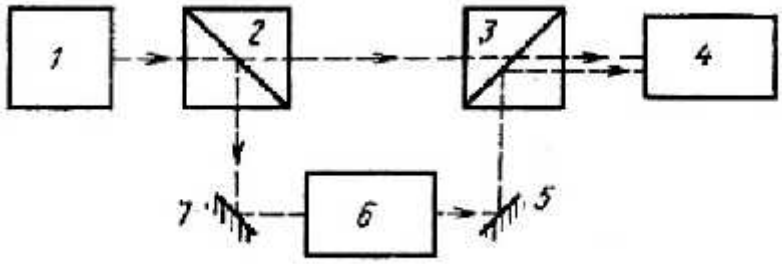

Рис. 2.9 Схема інтерферометру зі зміщенням частоти: 1 – лазер; 2, 3 –світлоподілювальний кубик; 4 – фотоприймач; 5, 7 – дзеркало; 6 – пристрій здвигу частоти

Поєднання в просторі випромінювань з частотами μ і μ Γϑ здійснюють за допомогою світлоподільних елементів 2, 3 і відображаючих дзеркал 5, 7. Вихідний сигнал фотоприймача 4 має вигляд:

$$u(t) \text{ X} U \sin \vartheta t$$

де ϑ X(μ Γϑ) Zμ – несуча частота.

При вібрації об'єкта 4 (рис 3.4), наприклад, гармонійної, доплерівська зміна частоти випромінювання, відбитого від об'єкта вібраційного контролю, визначається виразом:

$$\mu_\partial \text{ X} \frac{2\mu V_0}{c} \cos\cos(\mu_0 t),$$

де ω – кругова частота випромінювання лазера; μ_0 – кругова частота коливань об'єкта вібраційного контролю; V_0 – амплітуда швидкості вібрації об'єкта вимірювання.

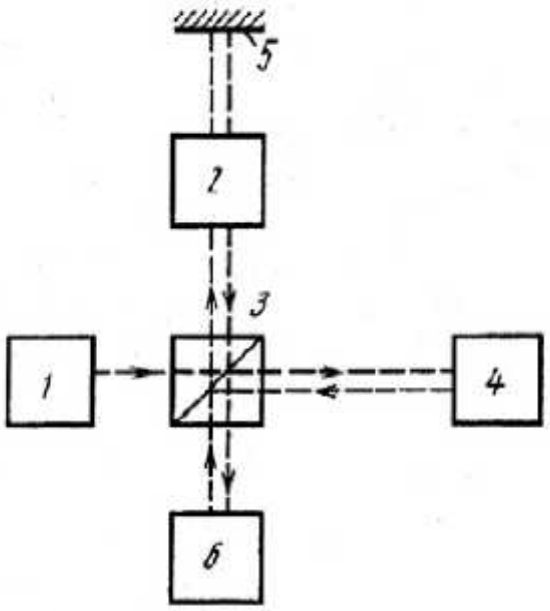

Рис. 2.10 Схема інтерферометра Майкельсона зі здвигом частоти: 1 – лазер; 2 – пристрій здвигу частоти випромінювання лазера; 3 – світлоподілювальний елемент; 4 – об'єкт вібраційного контролю; 5 – нерухоме дзеркало; 6 – фотоприймач.

2.6. Лазерний допплерівський віброметр

Лазерні допплерівські датчики вібрацій найбільш повно реалізують ідею безконтактних вимірювань. Допплерівське зміщення частоти випромінювання, розсіяного на рухомих частинках або поверхнях, відноситься до числа давно відомих і добре вивчених явищ. Однак до впровадження лазерних джерел випромінювання через спектрометричні труднощі можна було вимірювати лише порівняно великі швидкості.

Лазерне випромінювання, володіючи високою монохроматичністю, має і незрівнянно кращі характеристики щодо розходження і інтенсивності пучка, в порівнянні з випромінюванням від інших джерел. Все це дозволяє вимірювати менші поперечні перерізи розсіяння з великим кутовим дозволом. Крім того, висока монохроматичність лазерного випромінювання дозволяє використовувати такі методи обробки світлового сигналу, як гетеродинне детектування і вузькополосна фільтрація.

Допплерівські датчики мають такі переваги:

- визначають можливість отримання високого співвідношення сигнал/шум;
- забезпечують частотне і просторове придушення фону зовнішнього засвічення без застосування оптичних фільтрів;
- дозволяють вимірювати параметри механічних коливань складної форми на значних відстанях від об’єкта вимірювання;
- мають високу перешкодозахищеність;
- допускають здійснення аналізу вихідного сигналу фотоприймача в частотному діапазоні, що перевищує область низькочастотних шумів фотоприймача і лазера.

Основні проблеми застосування допплерівських датчиків, полягають в наявності вимог до світлопровідного середовища між лазером і поверхнею вимірюваного об’єкта, а також до відбивної здатності поверхні об’єкта. Основними стримуючими факторами на шляху широкого застосування допплерівських датчиків є досить глибокі фізико-математичні основи методу, а також складність і висока ціна приладового забезпечення.

Проте області застосування лазерних допплерівських вимірювальних систем (ЛДВС) швидко розширюються. Основні напрямки використання ЛДВС включають:

- вимірювання параметрів руху об’єкта контролю в робочих умовах, коли є значний вплив зовнішніх факторів (температура, тиск, агресивне середовище, тощо);
- вимірювання параметрів механічних коливань деталей і конструкцій в умовах впливу високих динамічних навантажень, що виникають при проведенні вібраційних випробувань;
- вимірювання параметрів механічних коливань при метрологічній атестації вібровимірювальної апаратури;

ЛДВС застосовуються при випробуваннях в літакопобудові, оптичного зв'язку, приладобудуванні, при сейсмічних вимірюваннях, метрологічній атестації вібровимірювальної апаратури, аеродинамічних і медичних дослідженнях і т.д.

Як відомо, принцип дії лазерних вимірювальних систем заснований на визначенні та аналізі параметрів розсіяного об'єктом світла (амплітуда, напрямок поширення, частота, фаза). Допплерівські вимірювальні системи використовують для аналізу руху досліджуваного об'єкта зміни частоти розсіяного випромінювання.

Принципова схема ЛДВС приведена на рис. 2.11.

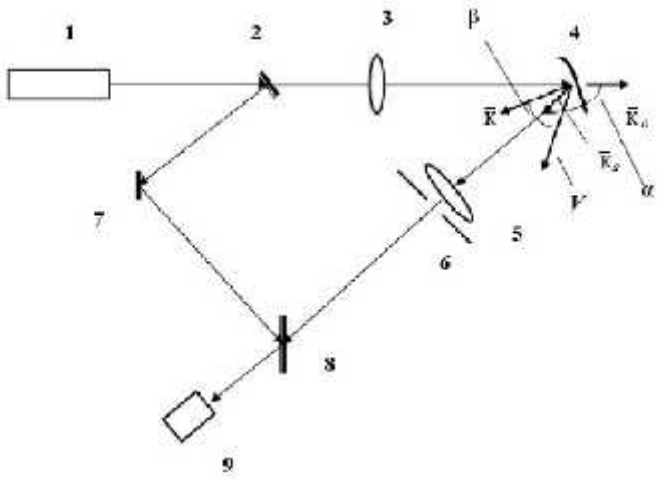

Рис. 2.11 Принципова схема допплерівського вимірювача швидкості руху: 1 – лазер; 2 – світлодільник; 3, 5 – лінза; 4 – поверхня, котра рухається зі шв. V; 6 – апертурна діафрагма; 7 – дзеркало; 8 – напівпрозоре дзеркало; 9 – фотоприймач

Випромінювання лазера 1 з частотою ν_0 і хвильовим вектором $\overline{K_0}$ фокусується лінзою 3 на дифузійній поверхні 4, що рухається зі швидкістю $\overline{V}$, в пляму діаметром d. Розсіяне світло з частотою ν_s і хвильовим вектором $\overline{K_s}$ збирається лінзою 5 з апертурною діафрагмою 6 і фокусується на приймальному майданчику фотоприймача 9. Частина вихідного лазерного випромінювання світлодільником 2 направляється на дзеркало 7 і, відбившись від нього за допомогою напівпрозорого дзеркала 8, змішується зі світлом, розсіяним поверхнею 4.

Практична реалізація оптичної схеми, представленої на рис. 3.5 наштовхується на складнощі, пов'язані з юстировкою оптичних елементів. Для забезпечення нормальної працездатності ЛДВС, зібраної за цією схемою, необхідно щоб після напівпрозорого дзеркала 8 осі поширення опорного і розсіяного пучків були повністю просторово суміщені. Виконати цю вимогу на реальній конструкції ЛДВС вельми складно.

На рис. 3.6 представлена більш проста для реалізації оптична схема ЛДВС, принципи роботи якої ідентичні вищеописаним. Дана схема застосовується в більшості ЛДВС, що випускаються промисловістю.

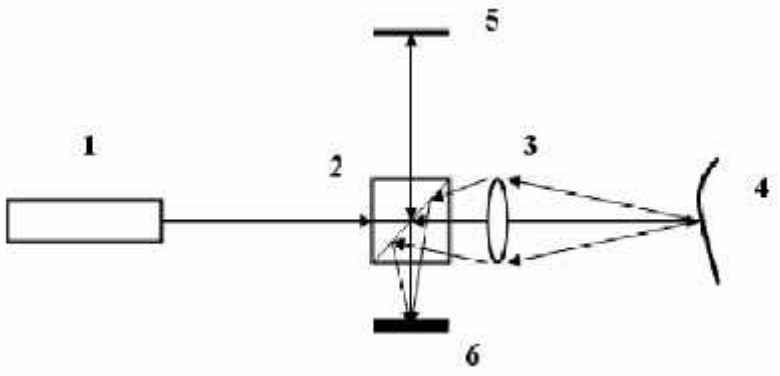

Рис. 2.12 Схема допплерівської вимірювальної системи на основі інтерферометра Майкельсона: 1 – лазер; 2 – призма-куб; 3 – лінза; 4 – рухома поверхня; 5 – нерухоме дзеркало; 6 – фотоприймач

За основу на рис. 2.12 взята схема інтерферометра Майкельсона. Випромінювання лазера 1 за допомогою призми-куба 2 ділиться на два пучка: опорний і вимірювальний. Опорний пучок направляється на нерухоме дзеркало 5. Лінза 3 фокусує вимірювальний пучок на поверхню 4 рухомого об’єкта. Розсіяне поверхнею випромінювання збирається цієї ж лінзою і за допомогою призми-куба 2 поєднується з опорним пучком, який відбивається від дзеркала 5. Лінза 3 фокусує відбите випромінювання на приймальний майданчик фотоприймача 6.

РОЗДІЛ 3
ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ВІБРОМЕТРА ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ АВІАДВИГУНА

Розглянемо вибіркову оцінку технічного стану вузлів силової установки вертольота МІ-8, що обертаються, МТВ в процесі наземного запуску з використанням безконтактного лазерного віброперетворювача.

В якості об’єкту випробувань оцінювався стан наступних вузлів авіадвигуна і головного редуктора :

- центральний привід;
- коробки приводів;
- турбокомпресор;
- вільна турбіна;
- головний редуктор;
- масло агрегат (9 зубів у кожної шестерні);

Вимірювання вібрації і діагностика технічного стану вищезгаданих агрегатів виконувалася на вертольоті МІ - 8 МТВ.

Опис вимірювального тракту і методика проведення вимірювань з використанням лазерного віброметра. Тракт вимірювання вібрації агрегатів двигуна складався з лазерного віброперетворювача типу LV - 2, сполучного кабелю і цифрового аналізатора.

Сигнал від вимірювальної голівки поступає на електронний блок, що має індикатор якості вимірюваного сигналу і далі на цифровий аналізатор.

Аналізатор дозволяв вимірювати діагностичний сигнал в діапазоні частот від 0,5 Гц до 28 кГц. Вимірювальна голівка з об’єктивом лазерного перетворювача закріплена на штативі, який дозволяє направляти лазер під будь яким кутом на об’єкт контролю (рис. 3.1).

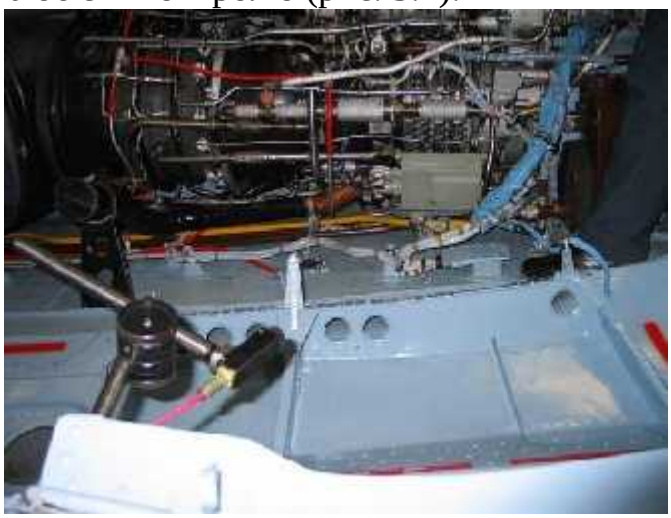

Рис. 3.1 Фото лазера, закріпленого на капоті двигуна

Рис. 3.2 Фото лазера, закріпленого на капоті головного редуктора

Для зручності роботи (у частині фіксації точки вимірювання вібрації на корпусі контрольованого агрегату) до складу оптичної схеми включений лазер підсвічування, довжина хвилі якого 0.63 мкм знаходиться у видимій області спектру. Його промінь повністю поєднаний з променем інфрачервоного лазера.

Голівка лазера спрямовувалася на корпус агрегату, що діагностувався, і, після включення електронного блоку, лазер підсвічування фокусувався на корпусі агрегату.

У обстежуваній силовій установці ресурс лівого двигуна був продовжений, а правий двигун - після капітального ремонту. Тому представлялося цікавим порівняти технічний стан ідентичних вузлів обох двигунів. На рис. 4.3 точки вимірювання 1-3 відносяться до лівого двигуна, а точки виміру 5-7 до правого двигуна. Точка 4 - в районі кріплення нерухомих осей проміжних шестерень планетарного ступеня до корпусу головного редуктора.

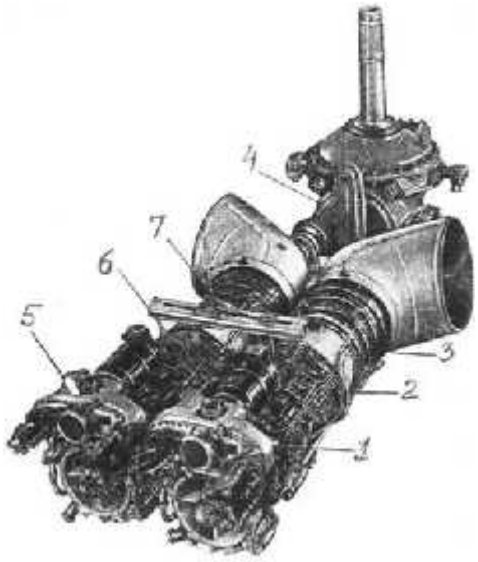

Рис. 3.3 Точки вимірювання вібрації на лівому і правому двигунах силової установки в районі опор турбокомпресора і головного редуктора

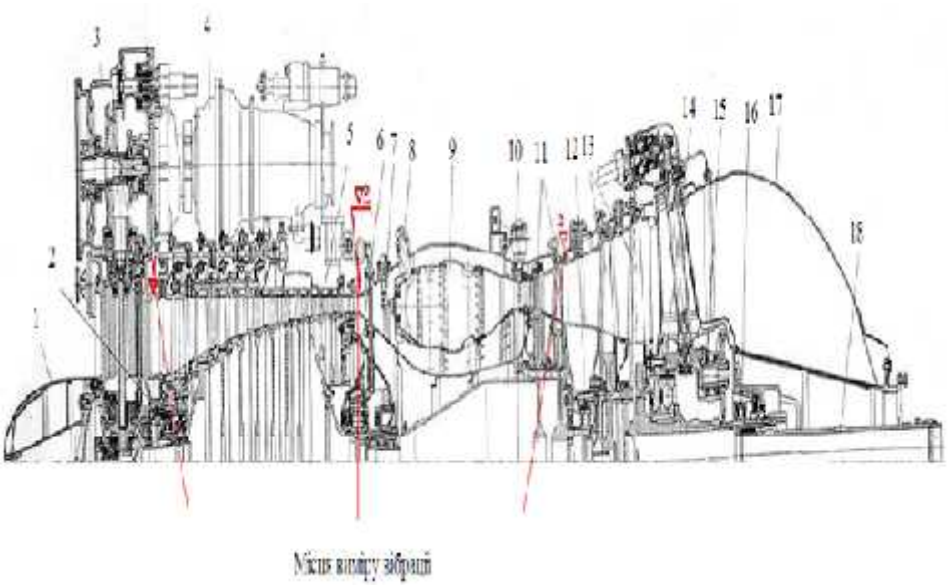

Рис. 3.4 Повздовжній розріз двигуна і більш точне позначення місць вимірювання вібрації в районах передньої опори компресора і центрального приводу

Враховуючи, що лазерна вібродіагностика уперше застосовувалася для обстеження силової установки вертольота при запуску в наземних умовах, ставилися наступні завдання:

- виконати вимірювання вібрації в кожній точці контролю не лише на стаціонарних оборотах режиму малого газу, але і режимах запуску, розгону;
- виходячи з дотримання техніки безпеки відпрацювати наступну методику: лазер за допомогою універсального штатива кріпити до відкритого капота і направляти на точку вимірювання до запуску двигуна. При цьому оператор разом з аналізатором розташовуються усередині салону вертольота. Після закінчення пуску лазер направляти на наступну точку вимірів і запуски двигуна повторювати;
- перевірити можливість діагностування вузлів силової установки при розташуванні лазера на штативі у безпечній зоні поза вертольотом.

Таким чином, послідовно встановлювався і спрямовувався лазер на вищезгадані точки контролю і робилися виміри вібрації.

Перед запуском двигуна включалася вібровимірювальна апаратура, оцінювалася якість сигналу, потім здійснювалося введення сигналу в цифровий аналізатор і запускався двигун. Для оцінки перехідних процесів реєструвалися розгін двигуна, а також стаціонарна ділянка роботи на режимі малого газу тривалістю не менше 30 секунд. Після запису сигналу в пам’ять приладу голівка лазера спрямовувалася на наступну точку і виміри тривали.

На рис. 3.5 показана осцилограма сигналу вібрації в точці 1, з якої видно ділянка стаціонарних оборотів, наявність резонансного посилення вібрації на перехідних режимах в моменти запуску турбокомпресора і вільної

турбіни, а також проходу гармонік оборотних частот через області власних частот коливань двигуна.

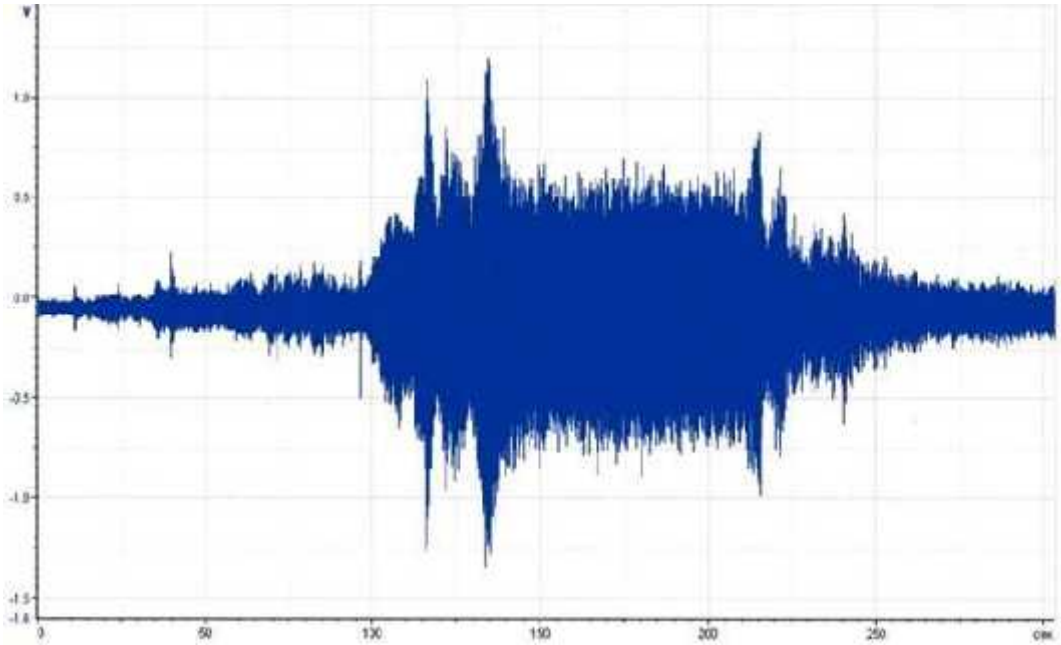

Рис. 3.5 Осцилограма сигналу вібрації в районі першої опори турбокомпресора

Більш наглядну картину дає тривимірний графік зміни амплітуд що становлять вібрації силової установки, виміряних в т.1, на режимах розгону, стаціонарних обертів і вибігання, показаний на рис. 4.6. Тут по горизонтальній осі відкладений час роботи, по вертикальній осі - частота коливань в Гц, а інтенсивність вібрації характеризується зміною кольору від коричнево- червоного (при максимальному рівні вібрації) до світло-зеленого (при мінімальному рівні).

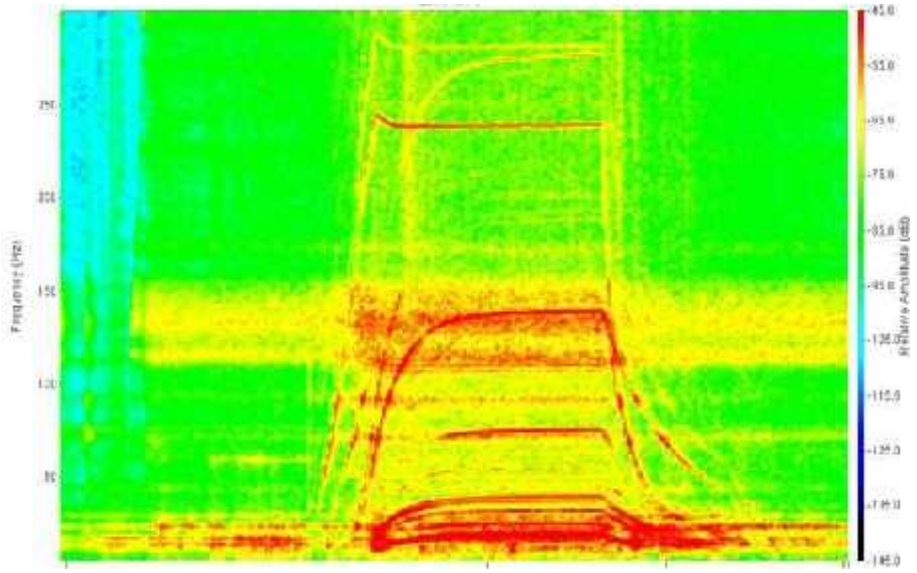

Рис. 3.6 Зміна амплітуд складових рівнів вібрації силової установки в моменти розгону, стаціонарних обертів

Ідентифікація вузлів агрегатів двигуна виконувалася шляхом зіставлення розрахункових частот дії збурюючих сил в роторних системах, зубчастих приводів і насосних агрегатів, визначених по аналізу кінематичних

схем, з дискретними складовими в спектрах виміряних сигналів. На рис. 4.6 приведені вузькосмугові спектри вібрації на стаціонарних обертів. На рис. 3.7 в смузі частот від 0.5 Гц до 300 Гц.

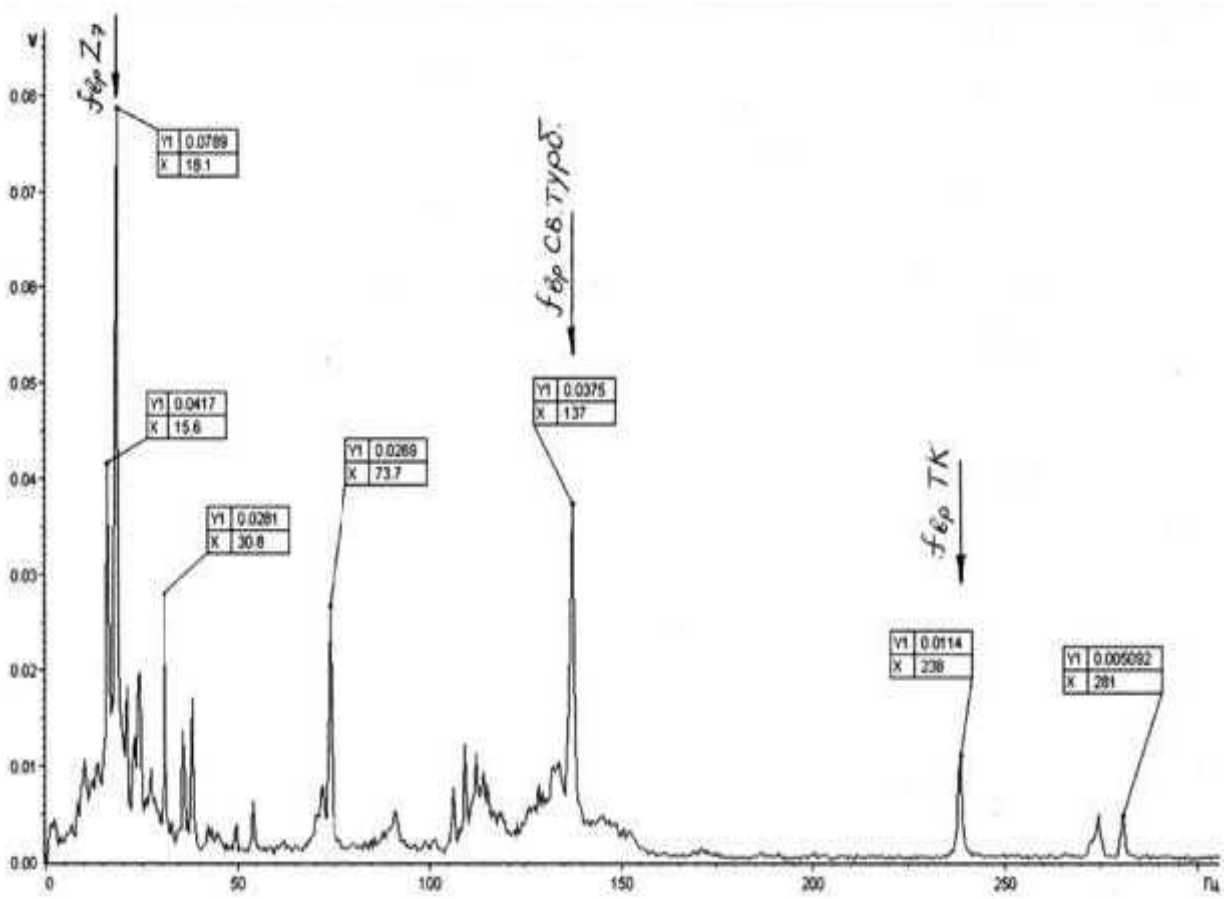

Рис. 3.7 Спектр вібрації турбокомпресора в діапазоні частот 0.5-300Гц.

У спектрі вібрації містяться складові на частотах обертання:

- валу вільної турбіни(137 Гц, СКЗ віброшвидкості -1.5мм/с);

- валу компресора(238Гц, СКЗ віброшвидкості - 0,44 мм/с);

-центральної шестерні планетарного ступеня головного редуктора(18.3 Гц, СКЗ віброшвидкості - 3.16 мм/с) і 4 гармоніки (73.2Гц);

РОЗДІЛ 4
РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ДВОКОМПОНЕНТНОГО ЛАЗЕРНОГО ВІБРОМЕТРА. ВИБІР ТА РОЗРАХУНОК ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ

Даний віброметр складається з двох компонентів - лазерного джерела та оптичного інтерферометра, і має на меті точне вимірювання мікровібрацій в об’єктах.

Перший компонент, лазерне джерело, є ключовою частиною в структурі віброметра. Його функція полягає в генерації променя з високою монохроматичністю та когерентністю. Зазвичай використовуються напівпровідникові лазери з високою стабільністю довжини хвилі. Лазерне випромінювання звичайно проходить через систему лінз та вибірковий засіб, щоб отримати промінь з потрібними характеристиками для наступного етапу.

Другий компонент - оптичний інтерферометр - використовує принцип інтерференції для вимірювання вібрацій. Він складається з двох оптичних шляхів, по яких рухається випромінювання, отримане від лазерного джерела. Ці два шляхи з’єднуються в точці, де відбувається інтерференція променів. Зміщення цієї точки інтерференції, спричинене вібраціями об’єкта, реєструється та обробляється для отримання відповідних даних про вібрації.

Окрім основних компонентів, структурна схема двокомпонентного лазерного віброметра також включає блоки для обробки сигналу та виведення результатів. Обробка сигналу зазвичай включає аналогову та цифрову обробку для фільтрації шуму та витягнення корисної інформації. Результати вимірювання можуть бути відображені на екрані або збережені для подальшого аналізу.

Під час випробувань авіадвигунів пропонується використовувати лазерний віброметр, який побудований за наступною схемою.

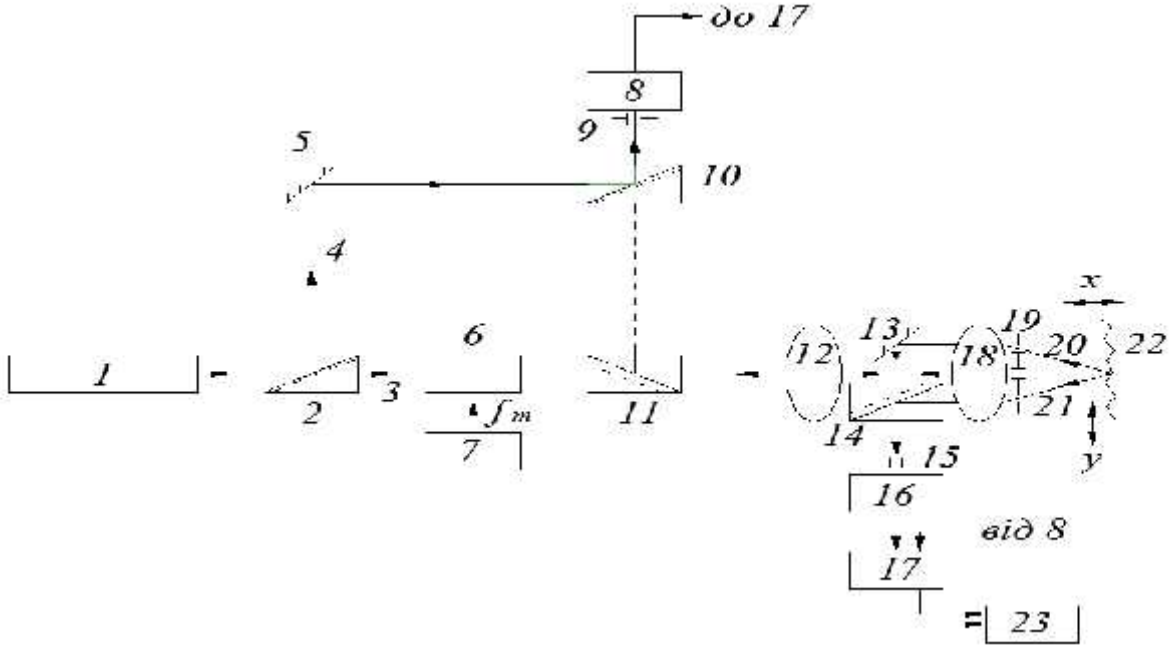

Рис.4.1 Структурна схема лазерного двоканального віброметра

Віброметр, що пропонується працює наступним чином: випромінювання лазера 1 за допомогою розщеплювача поділяється на два промені: 3 та 4. Промінь 4 направляється до дзеркала 5, відбивається від нього та за допомогою розщеплювача 10 направляється на фотоприймач 8, перед яким встановлена фонова діафрагма 9. Промінь 3 проходить пристрій зсуву частоти 6, розщеплювач 11 та об'єктивами 12 та 18 направляється на поверхню об'єкта 22, вібрація якого вимірюється. Відбите від об'єкта випромінювання знову проходить об'єктиви 18 та 12, відбивається від напівпрозорої грані розщеплювача 11, проходить розщеплювач 10 та направляється на фотоприймач 8. Таким чином вимірюється складова V_x віброшвидкості. V_x складова віброшвидкості вимірюється за допомогою схеми лазерного допплерівського вимірювача швидкості з опорним променем. За допомогою діафрагми 19 виділяється 2 розсіяних від поверхні променя: 20 і 21. Промінь 20 проходить об'єктив 18 та відбивається від дзеркала 13. Далі він проходить розщеплювач 14 та направляється на фотоприймач 16, перед яким встановлена фонова діафрагма 15. Розсіяний промінь 21 проходить об'єктив 18 та розщеплювачем 14 направляється на фотоприймач 16. Таким чином відбувається вимірювання складової V_y віброшвидкості. V_y складова віброшвидкості вимірюється за допомогою інверсно-диференціальної схеми ЛДВШ. Сигнали з фотоприймача 8 та 16 проходять двоканальний підсилювач 17 і поступають на вимірювач допплерівської частоти 23. За допомогою вимірювача 23 визначається V_x та V_y складові віброшвидкості.

Розрахуємо допустимі межі частот, на яких може працювати запропонований віброметр. Для складової V_y:

$$F_{\partial y} = \frac{2V}{\lambda_0}\cos\cos(\frac{\gamma}{2})$$

де $V=300$ мм/с – максимальна віброшвидкість досліджуваного об'єкта; $\lambda_0=658$ нм – довжина хвилі лазерного діода, $\gamma\approx3^\circ$ – кут між променями 20 та 21 (див. рис.4.1). Підставивши значення, отримуємо:

$$F_{\partial y} = 42{,}4 кГц .$$

Для складової Vx:

$$F_{\partial x} = \frac{2V}{\lambda_0} = 600 кГц.$$

4.1 Вибір лазерного діода

Користуючись каталогом компанії «Синтек», котра спеціалізується на лазерних системах (веб-сайт: http://sinteclaser.ru/), був вибраний лазерний діод Mitsubishi ML129F27 120 мВт 658 нм.

Для живлення лазерного діода пропонується застосовувати схему рис. 4.2

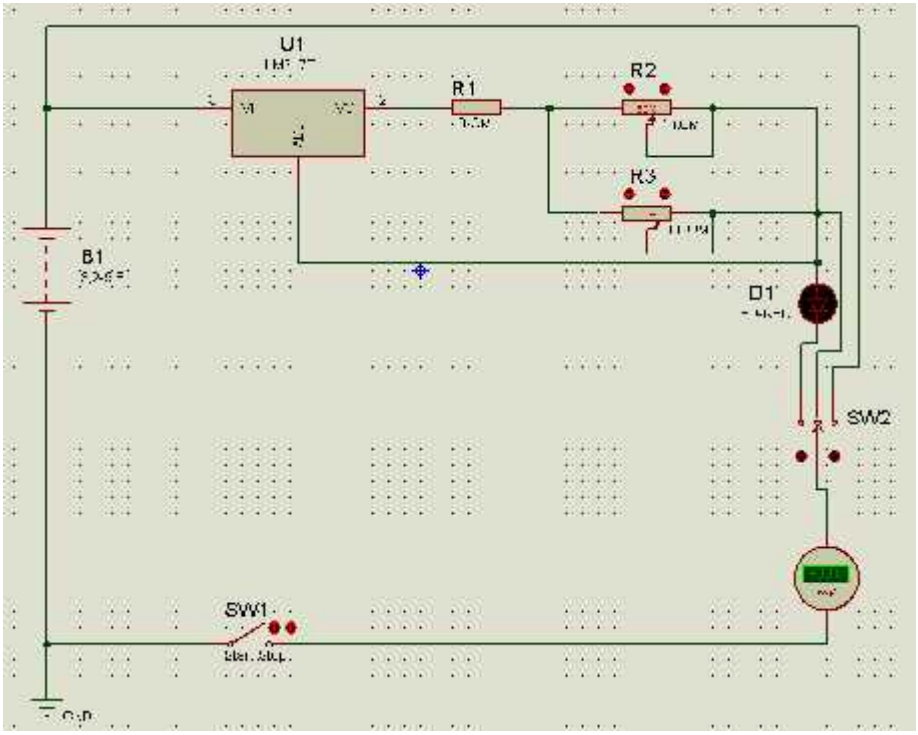

Рис.4.2 Схема живлення лазерного діода

Схема розроблена в програмному середовищі Proteus 8 Professional. На схемі зображено: B1 – джерело живлення 3,2-9 В, U1 – мікросхема LM317T, R1 – резистор 10 Ом; R2-R3 – підлаштовуальні змінні резистори 1 кОм та 100 Ом відповідно; D1 – лазерний діод 120 мВт 658 нм, SW1-SW2 – перемикачі.

4.2 Вибір фотодіода

Головна умова підбору – фотодіод повинен працювати на тій же довжині хвилі, що й лазерний діод. Оскільки лазерний діод працює на довжині хвилі 658 нм, то за допомогою все того ж каталогу компанії «Синтек» був обраний фотодіод Vishay BPW21R, який працює в діапазоні хвиль 420 нм - 675 нм.

4.3 Розрахунок широкосмугового підсилювача

В зв’язку з тим, що сигнал з виходу фотодіода занадто слабкий для подальшого використання в лазерному віброметрі, його потрібно підсилити. Для цього завдання було вирішено використати широкосмуговий підсилювач. Проведемо його розрахунок.

Вихідні дані:

Широкосмуговий підсилювач з наступними параметрами:

- $R_г = 200$ Ом;
- $R_{під} = 60$;
- $R_н = 75$ Ом;
- $f_н = 100$ Гц;
- $f_в = 10$ МГц;
- $M_н = 3$;
- $M_в = 3$;
- $U_{вих} = 3$ В;
- $K_г = 3\%$.

Широкосмугові підсилювачі широко застосовуються в апаратурі радіозв'язку та вимірювальній техніці. Як правило, широкосмугові підсилювачі складаються з декількох каскадів так як в більшості випадків поодинокі каскади не забезпечують необхідне підсилення і задані параметри підсилювачів. Тому підсилювачі, які застосовують в техніці, як правило, багатокаскадні. При аналізі та розрахунку багатокаскадного підсилювача необхідно визначити загальний коефіцієнт посилення підсилювача, розподілити його по каскадах, визначити вимоги до джерел сигналів, вирішити питання введення зворотних зв'язків і т.д. У більшості випадків типовий широкосмуговий підсилювач складається з трьох каскадів: вхідного, проміжного та вихідного. Вхідний каскад здійснює узгодження джерела сигналу з підсилювачем, проміжний виконує основне посилення сигналу, вихідний передає сигнал в навантаження, як правило, низькоомне, здійснюючи, в основному посилення по струму.

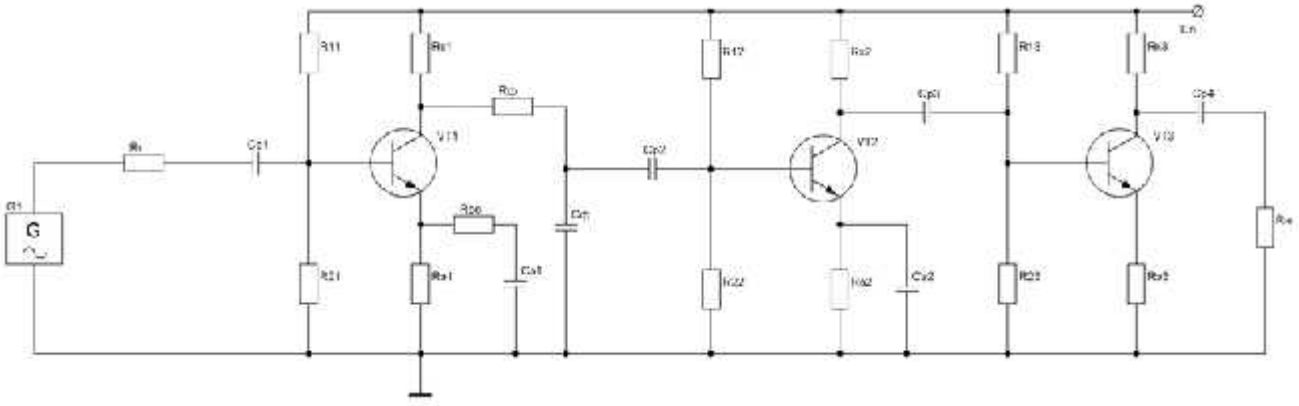

Рис.4.3 Принципова схема широкосмугового підсилювача

Схема широкосмугового підсилювача складається з наступних елементів:

- вхідного каскаду;
- фільтра високої частоти;
- проміжного каскаду;
- вихідного каскаду.

Вхідний каскад необхідний для узгодження генератора, котрий володіє внутрішнім опором з проміжним каскадом. У вхідний каскад введений місцевий НЗЗ по змінному струмі, зміною коефіцієнта якого досягається заданий коефіцієнт посилення всього підсилювача. Сигнал з виходу вхідного каскаду надходить на фільтр верхніх частот, який визначає задану верхню граничну частоту підсилювача, нижня ж гранична частота визначається величинами розділових ємностей.

Після фільтра сигнал надходить на проміжний каскад підсилювача, який з усіх трьох каскадів володіє найбільшим посиленням. Далі посилений сигнал через вихідний каскад передається в навантаження. Вихідний каскад має НЗЗ по струму, що дозволяє істотно зменшити нелінійні спотворення.

Розрахунок вихідного каскаду

Визначення напруги живлення $E_{ж}$

$$E_{ж} \text{ X}2U_{вих} \Gamma U_{КЕнас} \Gamma U_{зап},$$

де $U_{вих}$ – максимальна вихідна напруга, $U_{КЕнас} \approx$ В – падіння напруги на транзисторі в стані насичення, $U_{зап} \approx$ В – запас по напрузі. Беремо $U_{вих}$ $=3$ В, то $E_{ж} = 2\ 3+1+8=15$ В.

Вибір транзистора вихідного каскаду

Для вихідного каскаду транзистор вибирають за наступними параметрами: верхньою граничною частотою f , максимальною величиною струму колектора $I_{к}$, найбільшій допустимій напрузі колектора $U_{КЕдоп}$, максимальній розсіювальній транзистором потужності $P_{доп}$,.

Гранична частота передачі струму бази f ,повинна більш ніж в 5 разів перевищувати задану верхню частоту підсилювача f_B

$$f \geq 5\ f_B.$$

Виходячи з даних $f_B = 10$ Мгц, отже $f \geq$ Мгц .

Максимальний струм колектора вибирається з умови:

$$I_{Кmax} \mid 1{,}5\ \frac{2U_{вих}}{R_{н}}$$

Підставляючи дані отримуємо $I_{Kmax} \mid 240$ мА. Вибираємо $I_{Kmax}=240$ мА; тоді струм I_{K0} вибираємо рівним половині I_{Kmax}, то $I_{K0}=120$ мА.

Напруга живлення підсилювача $E_{ж}$ повинна бути меншою за 0.8 $U_{KEдоп}$.

Максимальна розсіювальна транзистором потужність повинна перевищувати величину $I_{K0}\ U_{KEO}$, де U_{KEO} - падіння напруги при переході колектор-емітер транзистора в робочій точці, визначається по навантажувальній прямій: 7,5 В.

Виберемо транзистор КТ624В. Його параметри:

$$f\ =450 \text{ МГц};\ I_{Kдоп}=1{,}3 \text{ А}>0{,}24 \text{ А};\ U_{KEдоп}=30 \text{ В};$$

$$E_{ж}=15 \text{ В}<0{,}8U_{KEдоп}=24 \text{ В};\ P_{доп}=1{,}5 \text{ Вт}>I_{K0}\ U_{KEO}=0{,}9 \text{ Вт}.$$

Розрахунок резисторів R_K та R_E.

Значення максимальної напруги на колекторі $U_{Kmma}=E_{ж}=15$ В. Величину опору в ланцюзі емітера R_E вибирають, виходячи з умови, що падіння напруги на ньому не перевищувало величину 0,1-0,3 $E_{ж}$.

$$U_{R_E}\ \text{X}0{,}1E_{ж}$$

При $E_{ж}=15$ В, $U_{R_E}=1{,}5$ В.

$$R_E\ \text{X}\frac{U_{R_E}}{I_{E0}} \rceil \frac{U_{R_E}}{I_{K0}} \rceil 12{,}5\,\text{Ом}.$$

Опір в ланцюзі колектора R_K розраховуємо аналогічно, задаючись напругою на ньому:

$$U_{R_K}\ \text{X}E_{ж}\ \text{Z}U_{R_E}\ \text{Z}U_{KE0}\ \text{X}6B.$$

Опір R_K визначається за формулою: $R_K\ \text{X}\frac{U_{R_K}}{I_{K0}}\ \text{X}50\,\text{Ом}$.

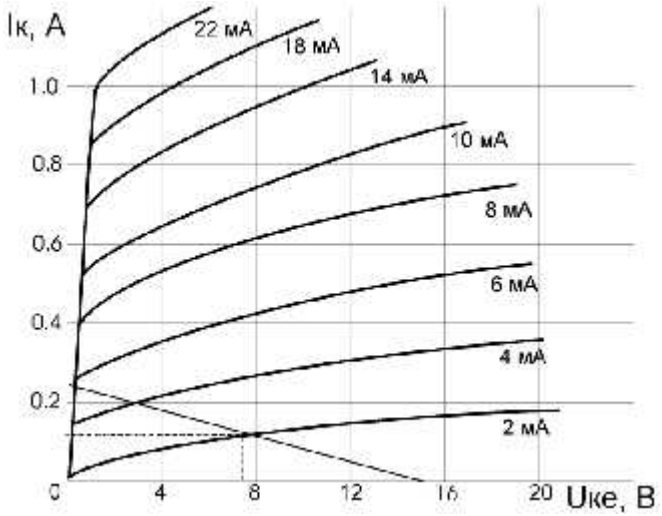

Рис.4.4 Вихідні характеристики і загрузочна пряма вихідного каскаду

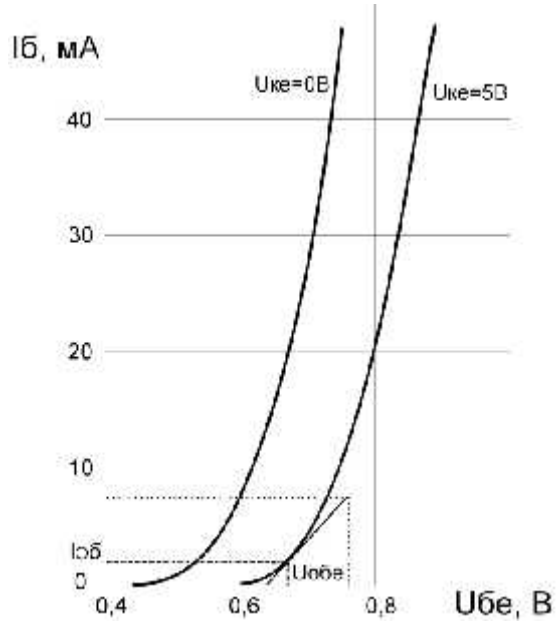

Рис. 4.5 Вхідні характеристики вихідного каскаду

Розрахунок опору навантаження по змінному струмі $R_H \sim$

Опір навантаження по змінному струмі $R_H \sim$ утворено паралельним з'єднанням R_H та R_K і дорівнює:

$$R_H \sim = \frac{R_H \ R_K}{R_H \ R_{K_2}} \text{ Х30 Ом.}$$

Визначення вхідної провідності транзистора:

Визначаємо струм бази в робочій точці (рис. 5.5): $I_{об} = 2$ мА, проводимо дотичну в цій точці на вхідній характеристиці і по дотичній визначаємо вхідну провідність:

$$y_{11} \text{ X} \left| \frac{\zeta I_K}{\zeta U_{БЕ}} \right| U_{КЕ} \text{ X5} B.$$

$$\zeta I_Б \text{ X8} мА; \zeta U_{БЕ} \text{ X0,1} B; y_{11} \text{ X0,08} См$$

Визначення крутизни транзистора:

$$S \text{ X} \left| \frac{\zeta I_K}{\zeta U_{БЕ}} \right| U_{КЕ} \text{ X} const.$$

$$\zeta I_K \text{ X0,1} A; U_{БЕ} \text{ X0,03} B; S \text{ X5} \frac{A}{B}$$

Розрахунок резисторного подільника

За допомогою резисторного подільника задається положення робочої точки. Визначимо $U_{0Б}$:

$$U_{0Б} \text{ X} U_{0E} \text{ Г} U_{0БЕ}$$

По вихідним характеристикам визначаємо $U_{0БЕ} = 0,67$ В, $U_{0E} \text{ X} U_{R_E} \text{ X1,5} B$ і підставляючи ці значення, отримуємо $U_{0Б} = 2,17$ В.

Номінали резисторів розраховуються за формулами:

$$R_1 \text{ X} \frac{E_{ж} \text{ Z} U_{об}}{I_д \text{ Г } I_{ОБ} \text{ Г } I_{КО}}; R_2 \text{ X} \frac{U_{об}}{I_д}; I_д \text{] (5] 10)} I_{ОБ}$$

Не беручи до уваги зворотній струм $I_{КО}$ та вибираючи $I_Д \text{ X5} I_{ОБ}$, розраховуємо номінали резисторів: $R_1 = 1069$ Ом; $R_2 = 217$ Ом.

Розраховунок вхідний опір каскаду по змінному струму:

Його величина визначається як сума паралельно підключених опорів R_1 та R_2 і $(\frac{1}{y_{11} \text{ ¥}_{\sim}})$; де $\text{¥}_{\sim} = 1 + S \times R_Е$ – глибина від'ємного ЗЗ.

$$R_{вх} \text{ X} \frac{1}{\frac{1}{R_1} \text{ Г } \frac{1}{R_2} \text{ Г } \frac{y_{11}}{SR_E}} \text{ X146 Ом.}$$

Визначення коефіцієнт підсилення каскаду:

$$K_U \text{ X} \frac{SR_{H\sim}}{1 \text{ Г } SR_E},$$

$$S = 5 \frac{A}{B}; R_{H\sim} = 30 \text{ Ом}; R_E = 12,5 \text{ Ом}; K_U = 1,36.$$

Розрахунок проміжного каскаду

Напруга живлення $E_{ж}$ рівна напрузі живлення вихідного каскаду й $=15$ В.

Вибір транзистора проміжного каскаду

Для проміжного каскаду транзистор вибирають аналогічно транзистору вихідного каскаду: по верхній граничній частоті f, максимальній величині струму колектора I_K, найбільшій допустимій напрузі колектора $U_{KEдоп}$, максимальній розсіювальній транзистором потужності $P_{доп}$. Різниця лише в величині максимального струму.

Максимальний струм колектора вибирається з умови:

$$I_{K\max} \geq 1{,}5\ \frac{2U_{вих}}{K_{U3}\ R_{вх3}},$$

де $K_{U3}=1{,}36$ – коефіцієнт підсилення вихідного каскаду, $R_{вх3}=146$ Ом – його вхідний опір по змінному струму. Підставивши ці значення, отримаємо: $I_{Kмах} \geq 51$ А. Визначимо $I_{Kмах}=60$ мА, струм I_{K0} вибиремо рівним половині $I_{Kмах}$. Отже, $I_{K0}=0{,}5\times I_{Kмах}=30$ мА.

Напруга живлення підсилювача повинна бути меншою за $0.8U_{KEдоп}$.

Максимальна розсіювальна транзистором потужність повинна перевищувати величину $I_{K0}\ U_{KE0}$, де U_{KE0} – падіння напруги при переході колектор-емітер транзистора в робочій точці, визначається по навантажувальній прямій: 7,5 В.

Для вказаних вимог підходить транзистор КТ385А. Його параметри:

$f=200$ МГц; $I_{Кдоп}=400$ мА>60 мА; $U_{KEдоп}=40$ В;

$E_{ж}=15$ В$<0{,}8U_{KEдоп}=32$ В; $P_{доп}.=0{,}3$ Вт$> I_{K0}\times U_{KE0}=0{,}225$ Вт.

Розрахунок резисторів $R_к$ та R_E.

Значення максимальної напруги на колекторі $U_{Кмах}=E_{ж}=15$ В. Величину опору в ланцюзі емітера R_E вибирають, виходячи з умови, що падіння напруги на ньому не перевищувало величину 0,1-0,3 $E_{ж}$.

$$U_{R_E}=0{,}2\,E_{ж}$$

При $E_{ж}=15$ В, $U_{R_E}=3$ В.

$$R_E\ \text{X}\frac{U_{R_E}}{I_{E0}} \geq \frac{U_{R_E}}{I_{K0}} \geq 100Ом.$$

Опір в ланцюзі колектора $R_к$ розраховуємо аналогічно, задаючись напругою на ньому:

$$U_{R_K}\ \text{X}E_{ж}\ \text{Z}U_{R_E}\ \text{Z}U_{KE0}\ \text{X}4{,}5Ом.$$

Опір $R_к$ визначається за формулою: $R_к = \frac{U_{R_K}}{I_{K0}} = 150$ Ом.

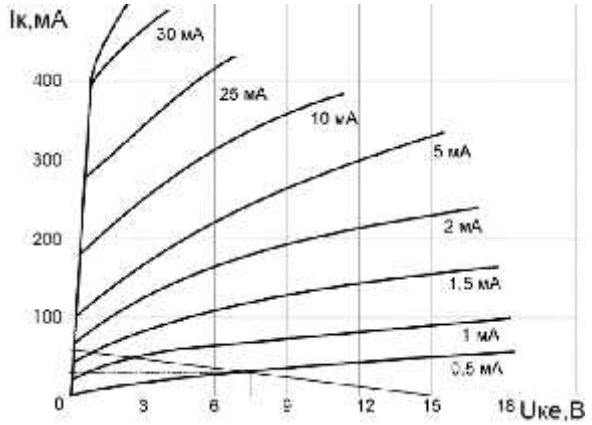

Рис.4.6 Вихідні характеристики і загрузочна пряма проміжного каскаду

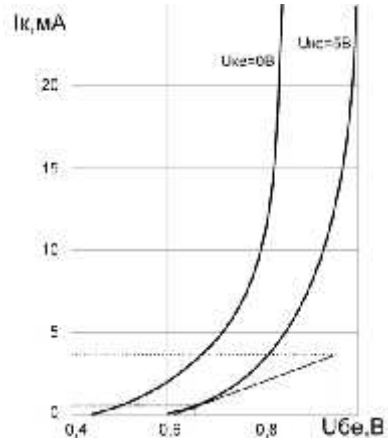

Рис.4.7 Вхідні характеристики проміжного каскаду

Розрахунок опору навантаження по змінному струмі $R_н\sim$

Опір навантаження по змінному струмі $R_н\sim$ утворено паралельним з'єднанням $R_н$ та $R_к$ і дорівнює:

$$R_н\sim = \frac{R_н \; R_K}{R_H \; \Gamma \, R_K}.$$

Підставляючи $R_н = R_{вх3} = 146$ Ом; $R_к = 150$ Ом отримуємо

$$R_н\sim = 74{,}2 \text{ Ом}.$$

Визначення вхідної провідності транзистора:

Визначаємо струм бази в робочій точці : $I_{об} = 0{,}5$ мА, проводимо дотичну в цій точці на вхідній характеристиці і по дотичній визначаємо вхідну провідність:

$$y_{11} \; \text{X} \left| \frac{\zeta I_Б}{\zeta U_{БЕ}} \right| U_{КЕ} \; \text{X5}B.$$

$$\zeta I_Б = 4 \text{ мА}; \; \zeta U_{БЕ} = 0{,}3 \text{ В}; \; y_{11} = 0{,}013 \text{ См}.$$

Визначення крутизни транзистора:

$$S = \left. \frac{\zeta I_K}{\zeta U_{БЕ}} \right| U_{КЕ} = const$$

$$\zeta I_K = 30 \text{ мА};\ \zeta U_{БЕ} = 0{,}05 \text{ В};\ S = 0{,}45 \frac{A}{B}.$$

Розрахунок резисторного подільника

За допомогою резисторного подільника задається положення робочої точки. Визначимо $U_{0Б}$:

$$U_{0Б} = U_{0Е} + U_{0БЕ}$$

По вихідним характеристикам визначаємо $U_{0БЕ} = 0{,}64$ В, $U_{0Е} = U_{R_E} = 3$ В і підставляючи ці значення, отримуємо $U_{0Б} = 3{,}64$ В.

Номінали резисторів розраховуються за формулами:

$$R_1 = \frac{E_ж - U_{об}}{I_Д + I_{ОБ} + I_{КО}};\ R_2 = \frac{U_{об}}{I_Д};\ I_Д \geq (5 \div 10) I_{ОБ}$$

Не беручи до уваги зворотній струм $I_{КО}$ та вибираючи $I_Д = 5 I_{0Б}$, розраховуємо номінали резисторів: $R_1 = 360$ Ом; $R_2 = 1456$ Ом.

Розраховуємо вхідний опір каскаду по змінному струму:

Його величина визначається як сума паралельно підключених опорів R_1 та R_2 і $(\frac{1}{y_{11}})$:

$$R_{вх} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + y_{11}} = 71{,}6 \text{ Ом}.$$

Визначення коефіцієнту підсилення каскаду:

$$K_U = SR_{H\sim},$$

$$S = 0{,}45 \frac{A}{B};\ R_{H\sim} = 74{,}2 \text{ Ом};\ K_U = 33{,}4.$$

Вибір опору фільтра

Виберемо $R_Ф$ так, щоб ослаблення амплітуди сигналу подільником, створеним $R_Ф$ та $R_{вх2}$ було незначним: $R_Ф = 5$ Ом.

Розрахунок вхідного каскаду

1. Напруга живлення $E_ж$ рівна напрузі живлення вихідного каскаду й $= 15$ В.

2. Вибір транзистора проміжного каскаду

Для вхідного каскаду транзистор вибирають аналогічно транзисторам вихідного й проміжного каскаду: по верхній граничній частоті f,

максимальній величині струму колектора I_K, найбільшій допустимій напрузі колектора $U_{KEдоп}$, максимальній розсіювальній транзистором потужності $P_{доп}$. Різниця лише в величині максимального струму.

Максимальний струм колектора вибирається з умови:

$$I_{Kmax} \geq 1{,}5 \frac{2U_{вих}}{K_{U3} K_{U2} R_{H1}},$$

де $K_{U3}=1{,}36$; $K_{U2}=33{,}4$ – коефіцієнти підсилення вихідного та проміжного каскадів. $R_{H1}=R_{вх2}+R_{Ф}=76{,}6$ Ом – сума опорів фільтра та вхідного опору проміжного каскаду по змінному струму. Підставивши ці значення, отримаємо: $I_{Kmax} \geq 3$ А. Визначимо $I_{Kmax}=10$ мА, струм I_{K0} вибиремо рівним половині I_{Kmax}. Отже, $I_{K0}=0{,}5\ I_{Kmax}=5$ мА.

Напруга живлення підсилювача повинна бути меншою за за $0.8U_{KEдоп}$.

Максимальна розсіювальна транзистором потужність повинна перевищувати величину $I_{K0}\ U_{KE0}$, де U_{KE0} – падіння напруги при переході колектор-емітер транзистора в робочій точці, визначається по навантажувальній прямій: 7,5 В.

Для вказаних вимог підходить транзистор КТ315В. Його параметри:

f =250 МГц; $I_{Kдоп}=100$ мА>10 мА; $U_{KEдоп}=40$ В;

$E_{ж}=15$ В<$0{,}8U_{KEдоп}=32$ В; $P_{доп}=0{,}15$ Вт> $I_{K0}\ U_{KE0}=0{,}0375$ Вт.

Розрахунок резисторів R_K та R_E.

Значення максимальної напруги на колекторі $U_{K\max}=E_{ж}=15$ В. Величину опору в ланцюзі емітера R_E вибирають, виходячи з умови, що падіння напруги на ньому не перевищувало величину 0,1-0,3 $E_{ж}$.

$$U_{R_E} \text{ X} 0{,}2E_{ж}$$

При $E_{ж}=15$ В, $U_{R_E}=3$ В.

$$R_E \text{ X} \frac{U_{R_E}}{I_{E0}} \rceil \frac{U_{R_E}}{I_{K0}} \rceil 600Ом.$$

Опір в ланцюзі колектора R_K розраховуємо аналогічно, задаючись напругою на ньому:

$$U_{R_K} \text{ X} E_{ж} \text{ Z} U_{R_E} \text{ Z} U_{KEO}=4{,}5 \text{ В}.$$

Опір R_K визначається за формулою: $R_к=\frac{U_{R_K}}{I_{K0}}=900$ Ом.

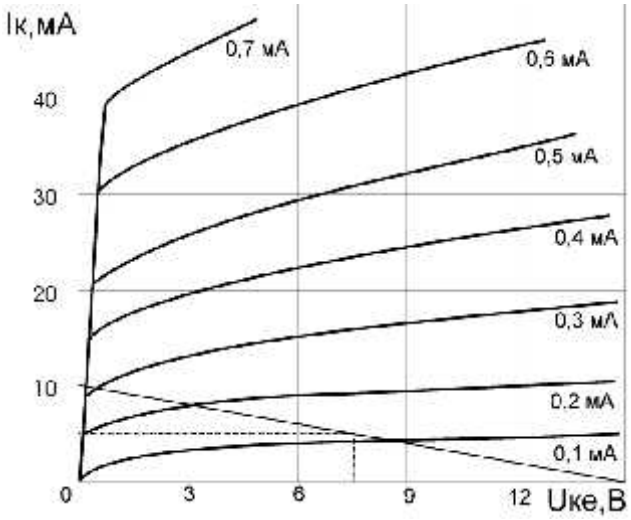

Рис.4.8 Вихідні характеристики і загрузочна пряма вхідного каскаду

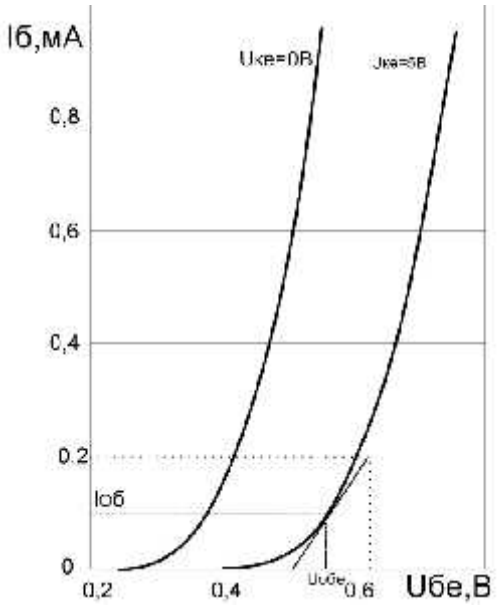

Рис.4.9 Вхідні характеристики вхідного каскаду

Розрахунок опору навантаження по змінному струмі $R_H{\sim}$

Опір навантаження по змінному струмі $R_H{\sim}$ утворено паралельним з'єднанням R_H та R_K і дорівнює:

$$R_H{\sim}=\frac{R_H \; R_K}{R_H \; \Gamma \; R_K}.$$

Підставляючи $R_H = R_{H1} = 76{,}6$ Ом; $R_K = 900$ Ом отримуємо

$$R_H{\sim}=70{,}6 \text{ Ом}.$$

Визначення вхідної провідності транзистора:

Визначаємо струм бази в робочій точці (рис. 5.9): $I_{об}=0{,}12$ мА, проводимо дотичну в цій точці на вхідній характеристиці і по дотичній визначаємо вхідну провідність:

$$y_{11} = \left. \frac{\Delta I_Б}{\Delta U_{БЕ}} \right| U_{КЕ} = 5В.$$

$\Delta I_Б = 0{,}2$ мА; $\Delta U_{БЕ} = 0{,}15$ В; $y_{11} = 0{,}0013$ См.

Визначення крутизни транзистора:

$$S = \left. \frac{\Delta I_К}{\Delta U_{БЕ}} \right| U_{КЕ} = const$$

$$\Delta I_К = 10 \text{ мА}; \ \Delta U_{БЕ} = 0{,}1 \text{ В}; \ S = 0{,}1 \ \frac{A}{В}.$$

Розрахунок резисторного подільника

За допомогою резисторного подільника задається положення робочої точки. Визначимо $U_{0Б}$:

$$U_{0Б} = U_{0Е} + U_{0БЕ}$$

По вихідним характеристикам визначаємо $U_{0БЕ} = 0{,}56$ В, $U_{0Е} = U_{R_Е} = 3В$ і підставляючи ці значення, отримуємо $U_{0Б} = 3{,}56$ В.

Номінали резисторів розраховуються за формулами:

$$R_1 = \frac{E_ж - U_{об}}{I_Д + I_{ОБ} + I_{КО}}; R_2 = \frac{U_{об}}{I_Д}; I_Д \geq (5 \div 10) I_{ОБ}$$

Не беручи до уваги зворотній струм $I_{КО}$ та вибираючи $I_Д = 5 I_{ОБ}$, розраховуємо номінали резисторів: $R_1 = 15888$ Ом; $R_2 = 5933$ Ом.

Розрахунок коефіцієнта глибини НЗЗ для змінного струму та вхідного опору каскаду по змінному струму для отримання потрібного коефіцієнта підсилення пристрою.

Загальний коефіцієнт підсилення підсилювача дорівнює добутку коефіцієнтів підсилення всіх його каскадів:

$$K_U = K_{вх.діл} \ K_{U1} \ K_{U2} \ K_{U3},$$

де $K_{вх.діл} = \frac{R_{вх}}{R_г + R_{вх}}$

Шуканий же коефіцієнт підсилення дорівнює $K_{UT} = 60$. В ланцюг емітера вхідного каскаду ввімкнений ланцюг НЗЗ по змінному струму, при цьому коефіцієнт підсилення буде дорівнювати:

$$K_{U1} = \frac{SR_{Н\sim}}{1 + S \frac{R_{зз} \ R_е}{R_{зз} + R_е}}.$$

При цьому глибина НЗЗ вибирається, виходячи з відношення

$$y_\sim = 1 + S \frac{R_{зз} \ R_е}{R_{зз} + R_е} = \frac{K_{вх.діл} \ SR_{Н\sim} \ K_{U2} \ K_{U3}}{K_{UT}}.$$

Величина вхідного опору каскаду по змінному струму визначається як сумарний опір паралельно підключених опорів R_1 та R_2 і($\frac{1}{y_{11}}$); де ¥ X1ГS R_E – глубина від'ємного ЗЗ.

$$R_{вх} \text{ X} \frac{1}{\frac{1}{R_1} \Gamma \frac{1}{R_2} \Gamma \frac{y_{11}}{1 \Gamma S \frac{R_{зз} \ R_E}{R_{зз} \Gamma R_E}}}.$$

В результаті отримуємо систему рівнянь

$$\frac{K_{UT}}{K_{U2} \ K_{U3}} \text{X} \frac{R_{вх]}}{R_r \Gamma R_{вх]}} \ \frac{SR_{H\sim}}{1 \Gamma S \frac{R_{зз} \ R_E}{R_{зз} \Gamma R_E}} R_{вх]} \text{ X} \frac{1}{\frac{1}{R_1} \Gamma \frac{1}{R_2} \Gamma \frac{y_{11}}{1 \Gamma S \frac{R_{зз} \ R_E}{R_{зз} \Gamma R_E}}},$$

вирішуючи яку, отримуємо $R_{вх]}$ =2077 Ом; $R_{зз}$=45,1 Ом.

Розрахунок емітерних ємностей

Ємність конденсаторів C_{E1} та C_{E2} вибираються більшими виходячи з того, що його опір ланцюга $R_E C_E$ по змінному струму суттєвий тільки на самій низькій частоті повинен:

$$C_{E1} \mid \frac{1}{2® \ f_H \ \frac{R_{E1} \ R_{зз}}{R_{E1} \Gamma R_{зз}}}; C_{E2} \mid \frac{1}{2® \ f_H \ R_{E2}}$$

Підставивши значення, отримуємо $C_{E1} \geq$37 мкФ=50 мкФ; $C_{E2} \geq$15 мкФ=22 мкФ.

Розрахунок фільтра

Фільтр призначений для забезпечення заданої верхньої частоти. При цьому f_B визначається за формулою:

$$f_B = \frac{1}{2®(R_ф \Gamma R_{вих1}) C_ф},$$

де $R_{вих1}$ XR_{K1} $R_ф$=50м, тоді $C_ф$=17,6 пФ.

Проводимо розрахунок $C_ф$ з врахуванням коефіцієнта частотних спотворень на верхній робочій частоті M_B .

Коефіцієнт M_B в даній схемі визначається спотворенням внесених ланцюжком фільтра $R_ф$ $C_ф$:

$$M_B \text{ X} \frac{1}{\sqrt{1 \Gamma \bullet 2® \ f_B \ (R_ф \Gamma R_{вих1}) C_ф}^{\prime 2}}$$

Виражаємо $C_ф$ з врахуванням заданого коефіцієнта частотних спотворень M_B:

$$C_ф \text{ X}\frac{1}{\text{®}\ \ f_B\ \ (R_ф \text{ Γ } R_{вих1})}\ \sqrt{\frac{1}{M_B^2}\text{ Z1}}\ \text{X13,2}nФ.$$

Вибираємо конденсатор К15-5 Н20.

Розрахунок розділюючих ємностей

Розрахунок розділювальних ємностей проводиться з врахуванням заданого коефіцієнта спотворень на нижній робочій частоті:

$$M_H \text{ X}M_{H1}\ \ M_{H2}\ \ M_{H3},$$

$$C_{P_i} \text{ X}\frac{1}{2\text{®}\ \ f_H\ \ (R_{вих} \text{ Γ } R_{вх1})}\ \sqrt{\frac{1}{M_н^2}\text{ Z1}}.$$

Нехай долі частотних спотворень, котрі вносяться на нижній частоті в кожному каскаді, дорівнюють:

$$M_{H_i} \text{ X}M_{н1}\ \ M_{н2}\ \ M_{н3}, \text{ тоді } M_{H_i} \text{ X}\sqrt[3]{M_н}\text{ X0,887}.$$

Формули для розрахунку роздільних ємностей для даної схеми підсилювача набудуть вигляду:

$$C_{P1} \text{ X}\frac{1}{2\text{®}\ \ f_H\ \ (R_r \text{ Γ } R_{вх1})}\ \sqrt{\frac{1}{M_н^2}\text{ Z1}}\ \text{X1,3}мкФ;$$

$$C_{P2} \text{ X}\frac{1}{2\text{®}\ \ f_H\ \ (R_{K1} \text{ Γ } R_{вх2} \text{ Γ } R_ф)}\ \sqrt{\frac{1}{M_н^2}\text{ Z1}}\ \text{X3,1}мкФ;$$

$$C_{P3} \text{ X}\frac{1}{2\text{®}\ \ f_H\ \ (R_{K2} \text{ Γ } R_{вх3})}\ \sqrt{\frac{1}{M_н^2}\text{ Z1}}\ \text{X10,3}мкФ;$$

$$C_{P4} \text{ X}\frac{1}{2\text{®}\ \ f_H\ \ (R_{K3} \text{ Γ } R_{H\rceil})}\ \sqrt{\frac{1}{M_н^2}\text{ Z1}}\ \text{X24,5}мкФ.$$

Оцінка нелінійних спотворень.

Так як вхідний та проміжний каскади працюють в режимі малого сигналу то нелінійні спотворення обумовлені впливом вихідного каскаду. Проведемо оцінку нелінійних спотворень за допомогою метода п’яти ординат.

За допомогою п’яти ординат знаходяться гармонічні складові вхідної ЕРС E_{rm1}, E_{rm2} та E_{rm3}, за якими розраховується коефіцієнт гармонік:

$$K_Г \text{ X}\frac{\sqrt{(E_{ГТ2}{}^2 \text{ Γ } E_{ГТ3}{}^2)}}{E_{ГТ1}}.$$

На загрузочній прямій наносяться точки миттєвих значень струму I_{K1}, I_{K2}, I_{K3}, I_{K4}, I_{K5}, котрі відповідають $I_{K\min}$, ($\frac{(I_{K0} \text{ Z} I_{K\min})}{2}$, $\frac{(I_{K\max} \text{ Z} I_{K0})}{2\ I_{K\max}}$, по вихідним характеристикам знаходяться відповідні їм струми бази $I_{б1}$, $I_{б2}$, $I_{б3}$

, $I_{б4}$, $I_{б5}$, і по вихідним характеристика знаходяться миттєві значення напруги база-емітер $U_{б1}, U_{б2}, U_{б3}, U_{б4}, U_{б5}$. Розраховуємо розмахи ЕРС:

$$E_{ГТ}' = U_{б5} - U_{б3} = R_{К2}(I_{б5} - I_{б3}),$$

$$E_{ГТ}'' = U_{б4} - U_{б3} = R_{К2}(I_{б4} - I_{б3}),$$

$$E_{ГТ}''' = U_{б3} - U_{б2} = R_{К2}(I_{б3} - I_{б2}),$$

$$E_{ГТ}'''' = U_{б3} - U_{б1} = R_{К2}(I_{б3} - I_{б1}).$$

Далі знаходимо амплітуди перших трьох гармонічних складових ЕРС:

$$E_{ГТ1} = 0{,}33\ (E_{ГТ}' + E_{ГТ}'' + E_{ГТ}''' + E_{ГТ}''''),$$

$$E_{ГТ2} = 0{,}25\ (E_{ГТ}' - E_{ГТ}''''),$$

$$E_{ГТ3} = 0{,}17\ (E_{ГТ}' - 2E_{ГТ}'' + 2E_{ГТ}''' + E_{ГТ}'''').$$

Та розраховуємо коефіцієнт гармоніки каскаду:

$$K_Г = \frac{\sqrt{E_{ГТ2}^2 + E_{ГТ3}^2}}{E_{ГТ1}} \cdot \frac{1}{¥},$$

де ¥ - коефіцієнт НЗЗ. Підставивши значення, отримаємо $K_Г = 1{,}43\%$.

ВИСНОВКИ

Під час виконання даної кваліфікаційної роботи були розглянуті теоретичні основи вимірювання вібрації, розібрані методи їх роботи та проведений аналіз похибок. Наявність великої кількості методичних та інструментальних похибок присутня як в п’єзоелектричних, так і в магнітоіндукційних віброметрах. Це зумовлює до розробки нових методів вимірювання вібрації з кращими характеристиками.

Для вирішення цього завдання був вибраний оптичний метод вимірювання вібрації з використанням лазера. З усіх джерел випромінювання оптичного діапазону лазерні джерела характеризуються найбільшим ступенем когерентності і монохроматичності генеруючого ними випромінювання. Крім того, лазери мають наступні позитивні властивості:

- високу стабільність і відтворюваністю частоти випромінювання
- малий кут розходження
- малу чутливість до зміни температури навколишнього середовища, що особливо важливо при метрологічних дослідженнях.

Тому для розробки сучасного приладу вимірювання вібрації авіадвигунів в даній дипломній роботі був вибраний лазер.

Розробивши структурну схему двоканального лазерного вимірювача вібрації, в основі якого був закладений інтерферометр Майкельсона, та детально описавши її принци дії, був виконаний підбір лазерного діоду та фотодіоду. За допомогою каталогу компанії «Синтек», котра спеціалізується на лазерних системах, був вибраний лазерний діод Mitsubishi ML129F27 120 мВт 658 нм та фотодіод Vishay BPW21R.

Для лазерного діода була запропонована принципова схема живлення, котра стабілізує вхідну напругу з 3В9 .

В зв’язку з тим, що сигнал з виходу фотодіода занадто слабкий для подальшого використання в лазерному віброметрі, існує необхідність в його підсиленні. Для цього завдання було вирішено використати широкосмуговий підсилювач. За допомогою математичних обрахунків, був проведений детальний підбір всього широкосмугового підсилювача. Нижче наведені основні елементи, котрі були обрані під час розрахунків:

- транзистор вхідного каскаду: КТ385А
- транзистор проміжного каскаду: КТ315В
- транзистор вихідного каскаду: КТ624В
- фільтр високої частоти: конденсатор К15-5 Н20

Також були розраховані номінали всіх інших елементів (резисторів та конденсаторів), котрі входять в принципову схему, визначений коефіцієнт гармонік: КГ=0,0143.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. О. А. Журавльов та ін. Лазерна віброметрія механічних конструкції: навч. посібник, 2006. – 72 с.

2. Іванов І. О. Вимірювання вібрації двигунів на повітряних суднах: Навчальний посібник / М-во освіти України. - К., 1991/1993. – 32 с.

3. Клочков Б. Н. Хвильові та вібраційні процеси в машинобудуванні. Тез. доп. Всесоюзн, конф. (7-9 вересня 1989 року). Горький: МДУ, 1989, ч. 2, с. 23-24.

4. Застрогін Ю.Ф. Застрогін О.Ю., Кулебякін А.З. Лазерні прилади вібраційного контролю та точного позиціонування. - М: Машинобудування, 1995. – 320 с.

5. Сидоренко М.К. Фізичні основи вібрації двигунів літальних апаратів: Навч. посібник/За ред. А.І. Білоусова. - Куйбишев, 1985. - 68 с.