

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Сандлер Альберт Кирилович

УДК 681.518.5:681.586.5

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІАГНОСТУВАННЯ
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СУДНОВИХ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК НА
ОСНОВІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Спеціальність 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту
05 – технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших
авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ А. К. Сандлер

Науковий керівник Онищенко Олег Анатолійович,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Сандлер А. К. Метод підвищення ефективності діагностування технічного стану суднових газотурбінних установок на основі волоконно-оптичних технологій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту. Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, 2021.

Тема дослідження базується на запиті практики про необхідність розробки й впровадження нових засобів діагностування та прогнозування технічного стану підшипникових вузлів суднових газотурбінних установок (СГТУ), які забезпечують зниження аварійності за рахунок підвищення вірогідності діагностичної інформації.

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача наукового обґрунтування, розробки й дослідження засобу діагностики та прогнозування технічного стану підшипників СГТУ. Пропонований засіб забезпечує підвищення якості процесів діагностування підшипників СГТУ за рахунок використання принципів часткової інваріантності до зовнішніх неконтрольованих впливів вимірювань, яка досягається шляхом синтезу процесів перетворення світла, конструкції, комбінації матеріалів і способу одержання діагностичної інформації. При вирішенні головного завдання діагностики та прогнозування технічного стану підшипників СГТУ проведено аналіз основних ознак їх деструкції, можливостей основних методів контролю вібрації елементів підшипникових вузлів СГТУ та визначення найбільш інформативних методів.

Для визначення вимірювального перетворювача, що найбільшою мірою відповідає сформульованим задачам діагностування СГТУ, проведено порівняльний аналіз впливу експлуатаційних факторів на характеристики волоконно-оптичних діагностичних пристроїв контролю вібрації.

Проведено аналіз результатів впливу експлуатаційних дестабілізуючих факторів (ДФ) на характеристики діагностичних пристроїв контролю вібрації відомих типів, дозволив визначити і локалізувати коло досліджень у межах використання волоконно-оптичних датчиків амплітудної модуляції.

Для обґрунтування і визначення раціональної структури волоконно-оптичних діагностичних пристроїв контролю вібрації, оцінені можливості методів корегування погрішностей вимірювань волоконно-оптичного акселерометра (ВОА): конструктивно-технологічний, статистичної обробки результатів багатовимірних вимірювань контрольованої величини, зменшення некорельованих складових погрішностей, багатоканальності, структурної або часової надмірності, допоміжних вимірів, ітераційний, зразкових мір. Доведено, що компенсацію некорельованої складової погрішності ВОА необхідно виконувати на основі використання методів інваріантних перетворень, заснованих на принципі багатоканальності.

Обрані методи, припущення і математичний апарат дослідження. Обґрунтовано застосування хвильового аналізу процесів у чутливому елементі (ЧЕ) ВОА, який являє собою концентричну багатосарову структуру, на основі рівнянь Максвелла та методу рівних об'ємів.

Відповідно до методології структурного синтезу систем обрані і синтезовані метрологічна і структурна моделі ВОА. На основі положень теорії погрішностей запропонована для використання та удосконалена маятникова схема досліджуваного ВОА.

На підґрунті модифікованої теорії зв'язаних мод у тунельно-зв'язаних оптичних волокнах (ОВ), а також положеннях теорії пружності, сформована математична модель (ММ) перетворення світлового випромінювання у ВОА, призначених для функціонування у складі діагностичних систем СГТУ.

Виконано оптимізацію матеріалів за критерієм забезпечення необхідної та достатньої власної частоти та визначення параметрів ЧЕ ВОА. Запропоновано

застосування волокна з депресованою серцевиною та коаксіальними первинною та вторинною серцевинами у якості первинного ЧЕ. З метою дослідження ВОА маятникової схеми, впливу зміни параметрів на характеристики ВОА, здійснено моделювання процесів в його елементах.

Одержав подальшого розвитку метод визначення конструктивних параметрів ВОА.

У ході експериментальних досліджень характеристик спеціально сконструйованого макетного зразка ВОА виконана перевірка вірогідності гіпотез і адекватності фізичним процесам його математичної моделі, а також підтверджена доцільність і ефективність запропонованих схемотехнічних рішень, що додатково підтверджується патентами України.

Визначено, що за рахунок впровадження нового засобу превентивного діагностування та прогнозування технічного стану підшипників, можливо досягти збільшення міжремонтного періоду судових ГТУ та зменшення експлуатаційних витрат на 8 ... 10 ам. дол. на 1 кВт·г генерованої потужності за рік роботи зі середньостатистичним навантаженням.

Застосування запропонованої методики розрахунків на практиці створює передумови для розробки волоконно-оптичних вимірювальних перетворювачів широкого цільового призначення.

Ключові слова: суднова газотурбінна установка, діагностування, технічний стан, ефективність, підшипник, акселерометр, аналіз, волоконно-оптичний, чутливий елемент.

SUMMARY

Sandler A.K. Method of improving the efficiency of diagnosis of the technical condition of ship's gas turbines plants based on fiber-optical technologists. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences in specialty 05.22.20 – operation and repair of means of transport. State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, 2021.

The research is based on the practice request regarding the necessity of development and implementation of new technical state diagnostic and forecasting means. The new method will ensure the increase of the diagnostic information probability and reduction of the accidents on ship's gas-turbine plants (SGTP) bearing units.

The relevant scientific and technical task of scientific substantiation, development and research of the diagnostic and prediction means of bearings technical condition has solved in the thesis work. A tool provides high efficient use and reliability of the SGTP. This is achieved due to the invariance of external uncontrolled influences. The invariance is guaranteed through the synthesis and optimization of design parameters, combination of materials and diagnostic information obtaining methods. When addressing the major issue the main signs of destruction and possibilities of the main methods of vibration of elements of SGTP bearing knots control was analyzed to determine the most informative ones.

In order to determine the measuring transformer, most corresponding to the problems of diagnosing SGTP, a comparative analysis of the operational factors impact on the characteristics of fiber optic vibration control devices was conducted.

Analysis of the results of the operational destabilizing factors (DF) influence on the known converter's characteristics allowed to determine and localize the research field within the fiber-optical amplitude modulation sensors.

An estimation of features of the error correction methods (ECM) as: structural and technological, statistical processing of multiple measurements results of controlled magnitude, reduction of uncorrelated components of errors, multichannel, structural or temporary redundancy, auxiliary measurements, iterative, exemplary measures are executed. To justify and determine the rational structural model It is determined that the compensation of the uncorrelated component of the converter's errors is most rational

to perform on the basis of methods of invariant transformations, based on the principle of multichannel.

Methods, assumptions and mathematical research apparatus are selected. The application of the wave analysis of processes in a sensitive element (SE) of the fiber-optic accelerometer (FOA) based on the Maxwell equations and the equal volumes method is substantiated. FOA is a concentric multi-layered structure.

Due to structural synthesis of system's methodology, metrological and structural model of FOA are selected and synthesized. On the basis of the theory of errors the pendulum scheme of the accelerometer is proposed.

A mathematical model of the light radiation transformation in a FOA on the basis of the modified bound mode theory in the tunnel-connected optical fibers (OF), as well as elasticity theory was formed.

Optimization of materials according to the criterion of providing the necessary and sufficient natural frequency and determining the parameters of the SE FOA was made. An application as a SE fiber with depressed core and coaxial primary and secondary cores is proposed. Processes in fiber accelerometer elements of a pendulum scheme are modelled in order to study the influence of parameters change on its characteristics. The method of calculating the structural parameters of fiber accelerometer is formed. In the experimental study the FOA's characteristics the probability of hypothesis and adequacy of mathematical model were verified. The expediency of proposed and patented circuitry solutions was confirmed. It is determined that due to application of the FOA proposed scheme the probability increasing of diagnostic information and decreasing of bearing units of ship GTP accidents are possible. Thus, high efficiency of use and reliability of SGTP can be achieved.

Application of the proposed method of calculations in practice creates prerequisite for establishing the fiber-optic measuring converters of a wide range of purposes.

Key words: ship`s gas turbine plants, diagnostics, technical condition, efficiency, bearing, accelerometer, analysis, fiber-optic, sensitive element.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**LIST OF PUBLICATIONS OF THE APPLICANT****Праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації****Works, in which the main scientific results of the dissertation are published**

1. Сандлер, А. К. Пьезооптические устройства как средство повышения достоверности диагностической информации / В. В. Никольский, **А. К. Сандлер** // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. – 2003. – № 2 (12). – С. 49-53.
2. Сандлер, А. К. Разработка пьезооптического акселерометра для диагностирования энергоустановок / **А. К. Сандлер**, В. В. Никольский // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2004. – № 14. – С. 329-338.
3. Сандлер, А. К. Моделирование процессов в волоконно-оптическом акселерометре / **А. К. Сандлер** // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. – 2004. – № 2 (14). – С. 68-73.
4. Сандлер, А. К. Оптимизация процесса модуляции в волоконно-оптических акселерометрах / **А. К. Сандлер**, В. В. Никольский // Автоматизация судовых технических средств. – 2004. – Вып. 9. – С. 73-81.
5. Сандлер, А. К. Волоконно-оптический датчик контроля вибрации ГТУ / **А. К. Сандлер** // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2007. – Спецвипуск. – С. 236-238.
6. Сандлер, А. К. Структурная модель инвариантного волоконного акселерометра / **А. К. Сандлер**, И. В. Логишев, А. А. Сандлер // Судовые энергетические установки. – 2011. – Вып. 25. – С. 87-93.
7. Сандлер, А. К. Схемотехнічне рішення комбінованого датчика клімат-контролю / **А. К. Сандлер**, Ю. М. Цюпко, О. А. Сандлер, К. Ю. Цюпко // Автоматизация судовых технических средств. – 2014. – Вып. 19. – С. 69-73.

8. Сандлер, А. К. Моделирование акселерометра маятникового типа / **А. К. Сандлер** // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2019. – №1. – Черкаси: ЧДТУ. – С. 75-81.

9. Сандлер, А. К. Применение волоконно-оптических датчиков в системах автоматического диагностирования судовых газотурбинных установок / **А. К. Сандлер**, А. Ю. Карпилов // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2019. – Т. 11. – №. 2. – С. 46-52.

10. Сандлер, А. К. Оптимізація конструктивних параметрів волоконного акселерометру / **А. К. Сандлер** // Slovak international scientific journal. – 2020. – № 42. –VOL.1. – P. 25-31.

11. Патент України на винахід № 108519, МПК (2015.01) G02B 6/00 G01N 19/10 G01K 5/10. Волоконно-оптичний датчик клімат-контролю для вимірювання вологості і температури / **А. К. Сандлер**, Ю. М. Цюпко, О. А. Сандлер, К. Ю. Цюпко; заявники та володарі патенту Сандлер, А. К., Цюпко, Ю.М., Сандлер, О. А., Цюпко, К. Ю –№ а201306835; – заявл. 31.05.2013; опубл. 12.05.2015, бюл. № 9. – 3 с.

12. Патент України на винахід № 122818, МПК (2006): G01M 11/00, G01M 1/02 (2006.01). Волоконно-оптичний акселерометр для спеціальних умов експлуатації / **А. К. Сандлер**; заявник та володар патенту Сандлер, А. К. – а201810909; – заявл. 05.11.2018; опубл. 06.01.2021, бюл. № 1. – 3 с.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

Proceedings certifying approbation of the materials of the dissertation

13. Сандлер, А. К. Разработка волоконно-оптических акселерометров для систем технического диагностирования / **А. К. Сандлер** // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасне судноплавство і морська освіта". – 2004. – С. 79-82.

14. Сандлер, А. К. Волоконно-оптический акселерометр для контроля высокочастотной вибрации судовых газотурбинных установок / **А. К. Сандлер** //

Автоматика-2008: XV Міжнародна конференція з автоматичного управління. – 2008. – С. 504-506.

15. Сандлер, А. К. Метрологическая модель волоконного преобразователя вибраций / **А. К. Сандлер**, И. В. Логишев, А. А. Сандлер // Энергетика судна: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – 2010. – С. 87-89.

16. Сандлер, А. К., Инвариантный волоконный акселерометр / А. К. Сандлер, И. В. Логишев, А. А. Сандлер // Энергетика судна: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – 2011. – С. 277-279.

17. Сандлер, А. К. Волоконно-оптический акселерометр для диагностирования судовых газовых турбин / **А. К. Сандлер** // Автоматика-2012: XIX Міжнародна конференція з автоматичного управління. – 2012. – С. 336.

18. Сандлер, А. К. Повышение надежности чувствительных элементов волоконных акселерометров / **А. К. Сандлер** // Науково-практична конференція "Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки". – 2012. – С. 42-44.

19. Сандлер, А. К. Разработка волоконно-оптических устройств для систем контроля и управления СЭУ / **А. К. Сандлер**, И. В. Логишев // Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – 2012. – С. 19-22.

20. Сандлер, А. К. Контроль положения валов судовых механизмов волоконно-оптическими устройствами / **А. К. Сандлер**, И. В. Логишев // Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – 2013. – С. 110-113.

21. Сандлер, А. К. Выбор рационального способа модуляции в волоконном акселерометре / **А. К. Сандлер**, И. В. Логишев // Энергетика судна: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – 2014. – С. 131-133.

22. Сандлер, А. К. Разработка волоконного акселерометра для контроля высокочастотной вибрации судовых механизмов / **А. К. Сандлер**, И. В. Логишев //

Річковий та морський флот: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – 2017. – Т.2. – С. 14-17.

23. Сандлер, А. К. Чувствительный элемент волоконно-оптического акселерометра на основе сапфирового стекла / **А. К. Сандлер** // IX Міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика": матеріали конференції. – 2019. – С. 27-33.

Наукові праці які додатково відображають наукові результати дисертації
Scientific works that additionally reflect the scientific results of the dissertation

24. Патент України на корисну модель № 62437, МПК (2011) G01M 11/00. Інваріантний волоконний акселерометр / **А. К. Сандлер**, О. А. Сандлер; заявники та володарі патенту Сандлер, А. К., Сандлер, О. А. – № u201101149; – заявл. 02.02.2011; опубл. 26.10.2011, бюл. № 18. – 3 с.

25. Патент України на корисну модель № 71295А, МПК 7 G01M 11/00. П'єзооптичний акселерометр / В. В. Нікольський, **А. К. Сандлер**; заявники та володарі патенту Нікольський, В. В., Сандлер, А. К. – № 20031211820; – заявл. 18.12.2003; опубл. 15.11.2004, бюл. № 11. – 2 с.

26. Патент України на корисну модель № 16068, МПК (2006) G01M 11/00. Волоконно-оптичний віброакселерометр / **А. К. Сандлер**; заявник та володар патенту Сандлер, А. К. – № u200601725; – заявл. 02.02.2011; опубл. 17.07.2006, бюл. № 7. – 3 с.

27. Патент України на корисну модель № 110051, МПК (2016.01) G02B 6/00 G01M 11/00. Повнообертовий волоконно-оптичний з'єднувач / **А. К. Сандлер**; заявник та володар патенту Сандлер, А. К. – № u201602359; – заявл. 11.03.2016; опубл. 26.09.2016, бюл. № 18. – 3 с.

АБРЕВІАТУРИ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

- ВМ – випромінювальні моди;
- ВОА – волоконно-оптичний акселерометр;
- ВОВП – волоконно-оптичний вимірювальний перетворювач;
- ГТД – газотурбінний двигун;
- ГТУ – газотурбінна установка;
- ДПЗ – двопромінезаломлення;
- ДФ – дестабілізуючий фактор;
- ДВ – джерело випромінювання;
- ДМП – демультіплексор;
- ЗТЗМ – звичайна теорія зв'язаних мод;
- ІМ – інерційна маса;
- ІВС – інформаційно-вимірювальна система;
- КВП і А – контрольні-вимірювальні прилади і автоматизація;
- ЛД – лазерний діод;
- МТЗМ – модифікована теорія зв'язаних мод;
- ОВ – оптичне волокно;
- ОТВ – оптичне тунелювання випромінювання;
- ОК – оптичний канал;
- ОСФ – оптичний спектральний фільтр;
- ПМ – паразитні моди;
- ПАР – поверхнево-активна речовина;
- ПХМ – порушені хвилеводні моди;
- ППЗ – профіль показника заломлення;
- СВД – світловипромінюючий діод;
- СТД – система технічного діагностування;
- СЕУ – суднова енергетична установка;
- ТО і Р – технічне обслуговування і ремонт;

$\Phi В$ – фізична величина;

$\Phi П$ – фотоприймач;

$ЧЕ$ – чутливий елемент;

A – амплітуда вхідного прискорення, мкм;

C – коефіцієнт зв'язку, m^{-1} ;

c_1 – кутова жорсткість пружного елемента;

C_4 – фотопружна постійна;

J – момент інерції;

J_0 – функція Бесселя першого роду;

K_0 – модифікована функція Бесселя другого роду;

k – хвильове число;

k_1 – коефіцієнт демпфірування;

L – довжина $ЧЕ$, м;

m – маса, кг;

n_{co}, n_{cl} – показники заломлення серцевини та оболонки;

P_R – потужність оптичного випромінювання, мкВт;

T_1 – стала часу;

U, W – скалярні параметри моди;

V – нормована частота;

α – кут крутіння, градус;

β – постійна поширення, m^{-1} ;

Δ – параметр висоти профілю;

ρ – радіус серцевини, мкм;

ξ – ступінь заспокоєння;

λ – довжина хвилі випромінювання, мкм;

ω – кругова частота, $1/s$.

ЗМІСТ

АБРЕВІАТУРИ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ.....	11
ВСТУП.....	15
1 СТАН ПРЕДМЕТУ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЗАВДАННЯ, ЩО РОЗВ`ЯЗУЄТЬСЯ	22
1.1 Аналіз досвіду експлуатації суднових газотурбінних установок.	-
1.2 Дослідження закономірностей зміни технічного стану підшипників кочення суднових газотурбінних установок.....	27
1.2.1 Причини та види ушкоджень підшипників кочення.....	-
1.2.2 Віброакустична ідентифікація дефектів підшипників кочення.....	32
1.3 Аналіз методів віброакустичної діагностики.....	37
1.3.1 Метод "ударних імпульсів".....	-
1.3.2 Метод контролю по спектру, що обгинає, високочастотної вібрації.....	39
1.3.3 Метод прямого спектру.....	42
1.4 Загальна методика дисертаційного дослідження.....	45
1.4.1 Вибір теми наукового дослідження.....	-
1.4.2 Обґрунтування мети й завдань дисертаційного дослідження.....	47
1.4.3 Системний підхід до розробки технологічної карти дослідження.....	48
1.5 Висновки до розділу 1.....	49
2 АНАЛІЗ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЗАСОБІВ ДІАГНОСТУ- ВАННЯ СУДНОВИХ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК.....	52
2.1 Потенційні можливості волоконно-оптичних вимірювальних перетворювачів фізичних величин.....	-
2.2 Аналіз відомих схемотехнічних рішень волоконно-оптичних акселе- рометрів для інформаційно-вимірювальних систем ГТУ.....	55
2.2.1 ВОА фазової модуляції.....	-

	14
2.2.2	ВОА з модуляцією поляризації світлового випромінювання..... 64
2.2.3	ВОА амплітудної модуляції..... 66
2.3	Обґрунтування методу автоматичної корекції погрішностей волоконно-оптичних акселерометрів..... 76
2.4	Висновки до розділу 2..... 84
3	СИНТЕЗ МОДЕЛІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПІДШИПНИКІВ ГТУ..... 85
3.1	Методи, припущення й математичний апарат дослідження -
3.2	Розробка структурної та метрологічної моделей інваріантного вимірального перетворювача вібрації..... 89
3.3	Побудова узагальненої математичної моделі інваріантного волоконно-оптичного акселерометра..... 96
3.4	Моделювання процесів в елементах волоконного акселерометра маятникової схеми..... 106
3.5	Методика визначення конструктивних параметрів волоконного акселерометра 120
3.6	Висновки до розділу 3..... 122
4	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ..... 123
4.1	Склад та призначення експериментальної установки для дослідження характеристик макетного зразка..... -
4.2	Апаратурно-методичне забезпечення експериментальних досліджень..... 124
4.3	Результати експериментальних досліджень..... 129
4.4	Висновки до розділу 4..... 133
	ВИСНОВКИ..... 135
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 137
	ДОДАТКИ..... 152

ВСТУП

Актуальність теми. Гідродинамічні та кліматичні умови експлуатації пульсивного комплексу та вплив агресивного морського середовища суттєво знижують ресурс суднових газотурбінних установок (СГТУ). Виникаючі динамічні термомеханічні навантаження значно погіршують режими мащення і ініціюють прогресуючі незворотні дефекти підшипникових вузлів СГТУ. Несвоєчасне виявлення та усунення дефектів і різноманітних деструкційних процесів у підшипниках роторів СГТУ приводять до виходу суден з працездатного стану. З метою запобігання катастроф суден і для безпеки судноплавства, рішення щодо проведення технічного обслуговування, виду та періодичності ремонту, інших планово-попереджувальних і експлуатаційних процедур, для СГТУ приймаються на підставі діагностичної інформації про реальний технічний стан її елементів.

Сучасна концепція "експлуатації до передвідмовного стану" ґрунтується на різних методах прогнозування технічного стану, зокрема – ідентифікації дефектів та пошкоджень на початковій стадії їх розвитку. Практичне використання цієї концепції вимагає впровадження новітніх, більш ефективних, зручних у застосуванні, автоматизованих засобів та пристроїв технічної діагностики і прогнозування технічного стану СГТУ і значно ускладнює процедури діагностування. Тенденції розвитку сучасних методів експлуатації показують, що саме використання надійних, верифікованих, нечутливих до збурень діагностичних засобів і пристроїв, які органічно вбудовуються у суднові мікропроцесорні вимірювальні системи і мережі, забезпечують високу експлуатаційну ефективність та надійність функціонування СГТУ.

Існуючі засоби і пристрої діагностики технічного стану СГТУ функціонують в умовах дестабілізуючих факторів – концентрованого впливу потужних електромагнітних і термічних полів, під дією вібрацій, впливу потужного локального суднового енергетичного встаткування. Саме ці збурення не дозволяють

забезпечити ефективну, відповідну сучасним експлуатаційним вимогам, діагностику і прогнозування технічного стану підшипників СГТУ за головною діагностичною ознакою – вібраціями у найбільш інформативному високочастотному діапазоні.

Аналіз відомих рішень доводить, що для сучасної технічної експлуатації і ремонту СГТУ затребувані нові засоби діагностування та прогнозування технічного стану їх підшипникових вузлів, а саме – нечутливі до більшості експлуатаційних дестабілізуючих факторів (ДФ) пристрої волоконної оптики. Теоретичні передумови синтезу таких нових засобів і пристроїв діагностування, як волоконно-оптичні акселерометри (ВОА), наведені у працях таких вчених, як Л. М. Андрушко, В. І. Бусурін, В. І. Богом'я, Р. А. Варбанець, М. М. Бутусов, В. М. Гречишников, Ю. В. Гуляєв, Є. М. Діанов, О. В. Бондаренко, Б. А. Красюк, Ю. Р. Носов, А. Г. Шереметьєв, *A. Snyder, T. Okosi, E. Udd* і інших.

У той же час, у цих працях не визначені методи побудови, принципи і особливості синтезу засобів діагностики та прогнозування технічного стану технічних систем, що експлуатуються під дією концентрованого впливу ДФ (наприклад, температура підшипників СГТУ у нормальних режимах близька до 300 °С, а пікова температура сягає більше 430 °С), не розглядаються конструктивно-технологічні особливості побудови і синтезу таких засобів, не дається оцінка змінювання їх характеристик у складних умовах експлуатації.

Саме тому, наукове завдання створення засобів діагностики, що функціонують у складних експлуатаційних умовах і пристосовані для безперервного, тривалого і достовірного контролю стану підшипників СГТУ під дією концентрованого впливу ДФ, є актуальним і затребуваним судновласниками, розв'язок і практичне використання якого суттєво підвищує рівень безпеки судноплавства.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до положень Транспортної стратегії України на період до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 року, № 430-р),

Стратегії сталого розвитку "Україна - 2020" (Указ Президента України від 12.01.2015 р., № 5), а також у рамках планів науково-дослідних робіт за держбюджетними темами Національного університету "Одеська морська академія" (НУ "ОМА"): ДР № 0104U002961 "Г'єзооптичні перетворювачі фізичних величин" і ДР № 0115U003577 "Автоматизація технологічних і адміністративних процесів на транспорті", де здобувач був співвиконавцем окремих етапів досліджень.

Мета і завдання дослідження - зниження аварійності, забезпечення високої ефективності використання та надійності роботи СГТУ, що досягається впровадженням сучасних засобів діагностування та прогнозування технічного стану, які забезпечують підвищення вірогідності процесів діагностування підшипникових вузлів СГТУ за рахунок використання принципів часткової інваріантності до зовнішніх неконтрольованих впливів на вимірювання.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних завдань.

1. Аналіз основних ознак деструкції підшипникових вузлів СГТУ та можливостей існуючих методів контролю вібрації окремих елементів цих вузлів.

2. Визначення завадостійких до впливу експлуатаційних факторів засобів діагностики та прогнозування технічного стану підшипників СГТУ з подальшою оцінкою можливостей корекції вимірювальних погрішностей.

3. Синтез математичної моделі оцінювання впливу зміни параметрів на метрологічні характеристики завадостійких волоконних акселерометрів маятникового типу, призначених для діагностики та прогнозування технічного стану підшипникових вузлів СГТУ.

4. Експериментальні дослідження характеристик запропонованих засобів і пристроїв діагностики з верифікацією математичних моделей процесів перетворення інформаційних діагностичних сигналів.

Об'єктом дослідження є процеси формування й перетворення діагностичного сигналу у засобі діагностики та прогнозування технічного стану підшипникових вузлів у складних умовах експлуатації СГТУ.

Предметом дослідження є волоконно-оптичні засоби діагностування та прогнозування технічного стану підшипникових вузлів СГТУ, що функціонують у складних умовах експлуатації.

Методи дослідження. Теоретична частина роботи виконана з використанням: *а)* системного аналізу й дослідження операцій – при визначенні структурних зв'язків між елементами вимірювального засобу діагностики й декомпозиції об'єкта дослідження; *б)* теорії оптичних хвилеводів – при розрахунках коефіцієнтів оптичного зв'язку серцевин оптичного волокна (ОВ) чутливого елемента (ЧЕ); *в)* методів аналітичного дослідження процесів взаємодії полів хвилеводних елементів – при дослідженні процесів перетворення світлового випромінювання у ЧЕ під впливом деформацій; *г)* теорії погрішності – при оцінюванні складових погрішностей елементів ВОА; *д)* математичного й комп'ютерного моделювання – при отриманні наближеної оцінки функціонування оптомеханічної системи ВОА.

У ході експериментальних досліджень використовувалося серійне, сертифіковане і атестоване, технологічне і вимірювальне встаткування.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному.

1. Вперше запропоновані теоретичні основи побудови засобу діагностування процесів експлуатації СГТУ, який, **за рахунок** обґрунтування і визначення конструкції та застосування матеріалів з особливими властивостями, **відрізняється** інваріантністю до зовнішніх неконтрольованих впливів на діагностичні процеси, **що дозволяє** здійснювати безперервний моніторинг високочастотних вібрацій, превентивне діагностування та прогнозування технічного стану підшипникових вузлів СГТУ, підвищити якість їх експлуатації, технічного обслуговування та ремонту.

2. Отримав подальший розвиток метод синтезу волоконно-оптичного засобу діагностування процесів експлуатації СГТУ, який побудовано на основі теоретичного обґрунтування маятникової схеми діагностування та **відрізняється**

від відомих рішень оптимізацією сполучення конструктивних параметрів і комбінацією матеріалів, **що дозволяє** практично реалізувати запропонований спосіб одержання діагностичної інформації про стан підшипникових вузлів СГТУ **за рахунок** застосування волоконно-оптичних технологій.

3. Удосконалено математичну модель волоконно-оптичного засобу діагностування процесів експлуатації СГТУ, яка **відрізняється** застосуванням модифікованої теорії зв'язаних мод, **що дозволяє** визначати, уточнювати та змінювати параметри засобу діагностики **за рахунок** обліку властивостей реальних матеріалів, технології виробництва та особливостей експлуатації СГТУ.

Практичне значення отриманих результатів визначається підвищенням ефективності використання та надійності СГТУ за рахунок збільшення міжремонтного періоду та зменшенням експлуатаційних витрат на 8 ... 10 ам. дол. на 1 кВт·г генерованої потужності за рік роботи зі середньостатистичним навантаженням, що досягається шляхом впровадження нового засобу превентивного діагностування та прогнозування технічного стану підшипникових вузлів СГТУ.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені у навчальний процес НУ "ОМА" у рамках викладання навчальної дисципліни "Метрологія, технологічні вимірювання та прилади". Також, матеріали дисертаційного дослідження використані у планових держбюджетних наукових дослідженнях НУ "ОМА" (ДР № 0104U002961 "П'єзооптичні перетворювачі фізичних величин" і ДР № 0115U003577 "Автоматизація технологічних і адміністративних процесів на транспорті"), у виробничій діяльності ПАТ "Одескабель" (акт від 03 березня 1993 р.) та компанії "*Belra Impex inc.*" (акт від 27 лютого 2020 р.).

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота виконана автором самостійно. Без співавторів проведений інформаційний пошук і виконаний аналіз основних підходів розв'язування проблеми підвищення вірогідності діагностування підшипникових вузлів суднових ГТУ, методологічне обґрунтування дисертаційного дослідження, розроблено і запропоновано спосіб формування й

перетворення діагностичного сигналу у ВОА на основі багат шарового хвиле-воду з депресованою серцевиною в спеціальних умовах, розроблена структурна й метрологічна моделі волоконного перетворювача вібрації, створена математи-чна модель ВОА, що дозволяє синтезувати вимірювальні пристрої зі стабільними в умовах комплексного впливу ДФ метрологічними характеристиками, запропо-нована методика розрахунків параметрів інваріантного до ДФ ВОА.

У публікаціях зі співавторами, здобувачеві належать особисті результати: [1, 21] – обґрунтування методів дослідження й математичний опис процесів модуляції випромінювання у ВОА; [2] – схемотехнічне рішення п'єзооптичного пе-ретворювача; [4] – верифікація результатів електронного моделювання; [6] – по-становка задачі, склад та аналіз структурної моделі волоконного перетворювача; [7] – склад та режими роботи комбінованого датчика клімат-контролю; [9] – по-становка задачі та рекомендації щодо захисту волоконно-оптичних перетворюва-чів для діагностування СГТУ; [11, 24-27] – формула винаходу та опис режимів роботи; [15] – постановка задачі, склад та аналіз метрологічної моделі волокон-ного перетворювача; [16] – розробка схемотехнічного рішення засобу діагносту-вання стану підшипників СГТУ; [19] – обґрунтовано застосування волоконно-оптичних пристроїв для моніторингу об'єктів суднових енергетичних установок, їх схемотехнічні рішення; [20] – обґрунтування режимів роботи інваріантних до ДФ волоконно-оптичних пристроїв контролю положення валів суднових механі-змів; [22] – обґрунтування доцільності застосування волоконно-оптичних при-строїв для вимірювання коливальних процесів у високочастотному діапазоні, експериментальні дослідження.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної ро-боти доповідалися на: наукових і науково-методичних конференціях професор-сько-викладацького складу НУ "ОМА" у 1991-2020 р. р.; науково-технічній кон-ференції "Датчики, прилади й системи" (м. Гурзуф, 2007 р.); Міжнародній

науково-технічної конференції "Автоматика - 2008" (м. Одеса, 2008 р.), "Автоматика - 2012" (м. Київ, 2012 р.); Міжнародній науково-методичній конференції "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика" (м. Одеса, 2018-2019 р. р.).

Публікації. Основні наукові результати дисертації опубліковані у 27 наукових працях, з яких: 9 – у наукових фахових виданнях України, що входять до переліку наукових видань, які рекомендовані МОН України для публікацій результатів дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук; 1 – у періодичному науковому виданні держави, яка входить до складу ЄС; 2 – патенти України на винахід. Наукові праці які засвідчують апробацію матеріалів дисертації опубліковані у 11 збірниках матеріалів наукових конференцій державного і міжнародного рівня. Додатково відображають наукові результати дисертації 4 патенти України на корисну модель.

Обсяг і структура роботи. Дисертація складається з переліку умовних скорочень, анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг роботи становлять 158 сторінок, де крім основного тексту міститься 41 рисунок і 4 таблиці. Список використаних джерел містить 139 найменувань.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРЕДМЕТУ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЗАВДАННЯ, ЩО РОЗВ'ЯЗУЄТЬСЯ

1.1 Аналіз досвіду експлуатації морських газотурбінних установок

Транспортна стратегія України на період до 2030 року, Стратегія сталого розвитку "Україна - 2020" та міжнародні нормативні акти, передбачають перегляд і обґрунтування різних аспектів теорії й практики суднобудування з урахуванням положень по забезпеченню безпеки судноплавства, необхідного рівня технічної експлуатації й економічності суднових енергетичних установок (СЕУ). У той же час, тенденції сучасного суднобудування характеризуються багаторазовим збільшенням енергооснащеності, оснащенням високотехнологічними засобами керування й зменшенням чисельності обслуговуючого персоналу. У цілому процеси, що відбуваються, приводять до насичення судів енергоємним устаткуванням та підвищенню інтенсивності використання суднових технічних засобів [3, 6, 52, 91].

Детальний і багатофакторний аналіз відмов і аварій технічних засобів суден і кораблів, показує, що на пропульсивний комплекс доводиться до 70%, на допоміжні механізми – порядку 22%, а на електрогенератори та їх приводи – до 8% відмов.

У пропульсивному комплексі особливе місце належить газотурбінними двигунами (ГТД). Аналіз суднобудівних програм провідних морських держав дозволяє простежити динаміку оснащення суден енергетичними установками того або іншого типу (рис. 1.1).

СГТУ знайшли широке застосування завдяки ряду істотних властивостей та переваг:

– компактність і висока питома потужність, широкий діапазон потужності

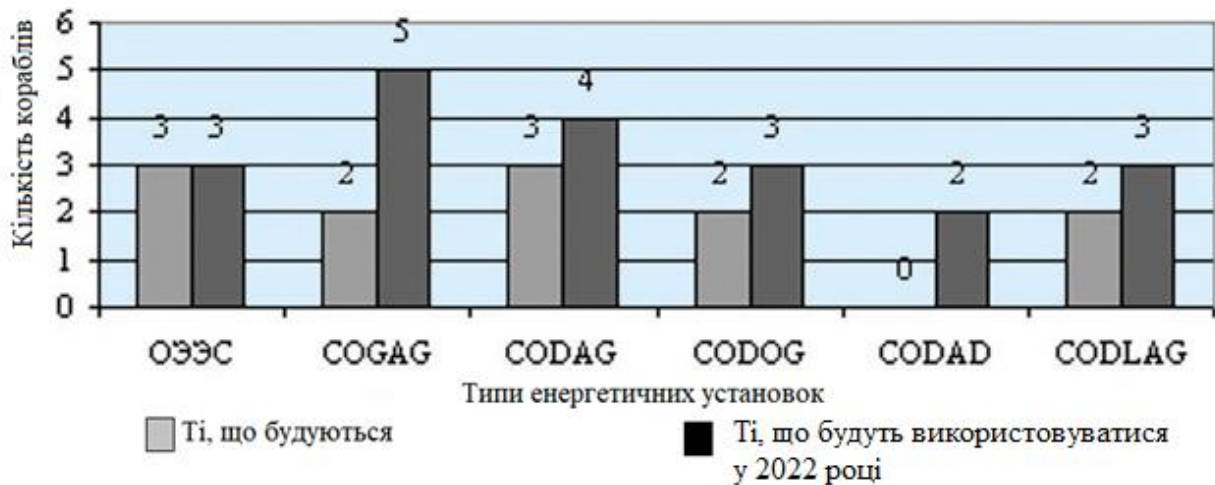


Рисунок 1.1 – Типи СЕУ з газовими турбінами суден подвійного призначення, які до 2022 року будуть введені у експлуатацію: ОЭЭС – об'єднані електроенергетичні системи; *CODAG* – комбіновані дизель-газотурбінні енергетичні установки; *COGAG* – комбіновані газотурбінні енергетичні установки з механічною передачею потужності на гребний вал; *CODLAG* – комбінована дизель-газотурбінна гребна електрична установка; *CODAD* – комбіновані дизельні енергетичні установки [125]

газотурбінних двигунів (5 ... 20 МВт) і можливість компонування їх в агрегати з декількох двигунів;

- висока маневреність (запуск і вихід на повну потужність за 2 ... 3 хвилини), і висока пристосованість до автоматизації й управління;
- відносно невелике число допоміжних механізмів і систем;
- можливість швидкої агрегатної заміни при аварійному ушкодженні або вичерпанні призначеного ресурсу [88].

У той же час, експлуатація СГТУ сполучена з рядом особливостей, властивих тільки цьому типу енергетичних установок.

Висока вартість СГТУ, в порівнянні з іншими елементами СЕУ, вимагає забезпечення більших ресурсів, що досягається впровадженням оптимальної стратегії експлуатації установки до передвідмовного стану його елементів.

Газовим турбінам властива вкрай висока теплова й силова напруженість елементів їх конструкції. Термомеханічні навантаження перебувають на рівні припустимої межі міцності. У першу чергу це ставиться до елементів СГТУ, підданим найбільш інтенсивному впливу експлуатаційних навантажень і відповідних руйнуючих процесів. Перебільшення навантажень за межі номінальних викликає деструкцію елементів установки. У сполученні з відсутністю у СГТУ резервованих деталей і вузлів, руйнація будь-якого основного елемента приводить до втрати працездатності установки в загалі.

Особливості конструкції та експлуатаційних режимів вимагають здійснення контролю основних робочих параметрів СГТУ з надвисокою точністю та вірогідністю. Швидкість плину робочих процесів обумовлює доцільність обробки масивів даних за контрольованими діагностичними параметрами та прийняття експлуатаційних рішень у реальному масштабі часу. Контроль СГТУ з малими інтервалами, часом яких не відбуваються будь-яких значних змін діагностичних параметрів, вимагає застосування методів прогнозування технічного стану елементів установки. Тільки завдяки впровадженню цих методів можлива найбільш достовірна оцінка запасу часу безпечної експлуатації СГТУ.

Концепція експлуатації СГТУ до передвідмовного стану ґрунтується, у першу чергу, на застосуванні методів, що забезпечують прогнозування технічного стану з дефектами та пошкодженнями, що виявлені на початковій стадії розвитку. Це значним чином ускладнює процес діагностування, а також вимагає впровадження новітніх засобів діагностики та прогнозування технічного стану, що забезпечить високу ефективність використання СГТУ та надійність роботи [113].

Аналіз статистичних даних експлуатації показує, що до основних елементів, технічний стан яких лімітує експлуатаційну надійність СГТУ, слід віднести, у першу чергу, підшипники (табл. 1.1) [19, 70, 88]. Довготривалість та безвідмовність підшипників, в першу чергу, залежить від режиму роботи. Під впливом

експлуатаційних чинників в підшипниках активуються трибомеханічні та реологічні процеси.

Таблиця 1.1 – Статистика ушкоджень елементів СГТУ

Ушкоджений вузол, система	Частка ушкоджень, %
Статистика ушкоджень основних деталей СГТУ	
Робочі лопатки й диски турбіни	16,1
Напрямні лопатки турбіни	4,4
Робочі лопатки компресора	3,9
Напрямні лопатки компресора	1,46
Лопатки ЦБН	5,85
Камера згоряння	1,46
Підшипники	20,5
Масильні насоси	12,2
Масилопроводи	12,67
Фільтруючі елементи	5,36
АВОМ і секції охолодження	4,4
Ущільнення	11,7
Статистика ушкодженні контрольно-вимірювальних приладів СГТУ	
З'єднання із приладами й ізоляція	72,3
Несправність приладів	20,4
Некоректна робота системи	7,3
Причини неполадок при роботі ГТУ	
Дефекти устаткування	58,24
Дефекти обслуговування й експлуатації	41,76

Ці процеси сприяють розсіюванню підведеної механічної енергії як по вузлах, що викликають нутацію ротора та зношування, так й по захисним – в реалізації яких закладено резерви підвищення роботоспроможності систем утримання та стабілізації роторів турбоустановок [53].

Ушкодження підшипників посідає перше місце по частоті виходу з ладу після деталей, що працюють при високих температурах. Несправність підшипників у СГТУ супроводжується підвищенням вібрації й (або) температури. Руйнація підшипників сполучена з ремонтно-відбудовчими роботами на термін до 20 ... 30 робочих днів. Надійність, термін використання підшипників багато в чому

залежать від умов експлуатації, навантаження СГТУ, параметрів робочих процесів і навколишнього середовища, кількості робочих циклів, якості палива й мастильних матеріалів, а також від якісних показників ремонту елементів і всієї установки в цілому.

У разі ушкоджень підшипників, заміни СГТУ на нові агрегати стримуються високою вартістю, як устаткування, так і монтажних робіт. Ця обставина змушує здійснювати комплекс заходів щодо модернізації СГТУ, що сприяє продовженню строку експлуатації установки, корекції основних показників і росту коефіцієнта технічного використання. При цьому необхідно відзначити, що в ряді випадків зміна конструкції турбомашини (модернізація) через деякий час експлуатації викликає дефекти, при яких подальша робота установки стає неможливою. Проблеми аварійних зупинок модернізованих СГТУ відбуваються через проектні недоробки, які не врахували при проектуванні конструкції, й при розрахунках на номінальному режимі роботи установки. Модернізовані установки вимагають до себе більшої уваги, частого контролю параметрів робочого тіла, вібраційного стану підшипників, забруднення системи змащування.

Реалізація підвищеного контролю, у свою чергу, вимагає впровадження інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), які зможуть виконувати обробку даних по контрольованих параметрах і прийняття діагностичних рішень у реальному масштабі часу, тобто за малі інтервали, протягом яких не відбувається значних змін параметрів СГТУ. В основу таких ІВС повинні бути закладена мета планово-попереджувального ремонту (попередження передчасного зношування деталей, вузлів і механізмів і утримання їх у працездатному стані, а так само безаварійна й безперебійна робота турбоагрегату й принципи систематичного збору й аналізу експлуатаційних даних по відмовах СГТУ. Тільки завдяки використанню ІВС такого типу можливо добитися своєчасної зупинки СГТУ й успішного проведення ремонтно-відновлювальних заходів або повної заміни (якщо даний вузол не підлягає ремонту). Це дозволить продовжити період безперервної експлуатації елементів і всієї установки в цілому, а також скоротить ремонтні

витрати й час простою завдяки більш короткому терміну відбудовних робіт у відмінності від повного виготовлення запасних частин [19].

1.2 Дослідження закономірностей зміни технічного стану підшипників кочення суднових газотурбінних установок

1.2.1 Причини й види ушкоджень підшипників кочення

Причини деструкції й їх вага в загальному числі відмов підшипників представлені на рис. 1.2 [3, 6, 19, 30, 70, 91].

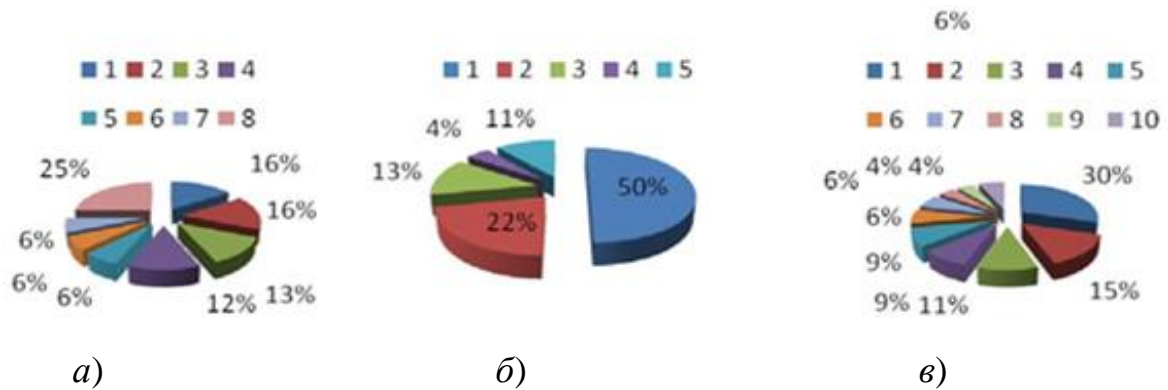


Рисунок 1.2 – Ушкодження підшипників ГТУ: *а* – розподіл ушкоджень опорних підшипників (1 – підплавлення бабіту; 2 – викрашування бабіту; 3 – відшарування бабіту; 4 – натяг бабіту; 5 – натири на бабіті; 6 – місцеві виробітки в бабіті; 7 – сліди влучення сторонніх предметів; 8 – інше); *б* – ознаки, спостережувані при ушкодженні опорних підшипників (1 – зміна вібростану; 2 – підвищення температури бабіту вкладишів; 3 – втрати мастила; 4 – дим з підшипника; 5 – інше); *в* – розподіл причин ушкоджень опорних підшипників (1 – погіршення змащування; 2 – розцентровка опор і роторів; 3 – порушення нормального вібростану; 4 – неякісне заливання й ушкодження бабіту; 5 – стиснуте переміщення підшипника; 6 – низька якість змащування; 7 – влучення стороннього предмета; 8 – якість складання й роботи муфт; 9 – відхилення величини натягу; 10 – інше) [30]

Складні умови експлуатація підшипників обумовлені рівною мірою як надвисокими навантаженнями й кутовими швидкостями, так й граничними температурними режимами, які викликають порушення режимів змащення.

Гранична температура для підшипників кочення ГТУ перебуває в діапазоні 500 ... 525 К. Температура мастила на зливі з окремих опор ГТУ становить 370 ... 420 К при температурі на вході 290 ... 320 К (рис. 1.3) [48].

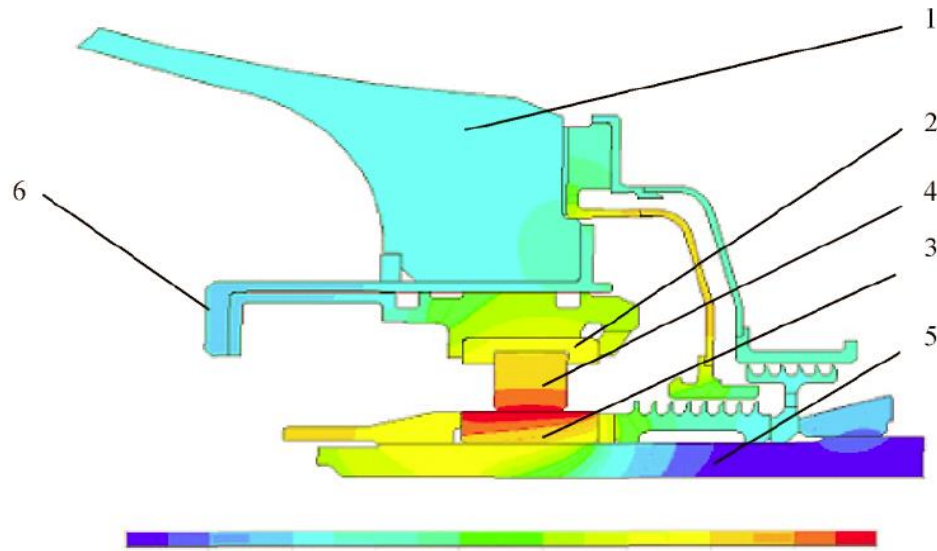


Рисунок 1.3 – Результати моделювання теплового стану опори підшипника компресора високого тиску ГТУ: 1 – корпус опори; 2 – зовнішнє кільце підшипника; 3 – внутрішнє кільце підшипника; 4 – ролики; 5 – вал; 6 – опора

А після зупинки, через припинення подачі мастила, а також зовнішнього обдуву корпусу підшипника СГТУ повітрям, температура підшипника зростає ще вище [44, 54, 55].

У таких умовах надійність і працездатність підшипників протягом заданого ресурсу забезпечується тільки за умови збереження рівня температури їх деталей, а так само мастильних матеріалів у межах припустимих значень.

Останні визначаються як властивостями матеріалів елементів підшипників так і характеристиками застосовуваних мастильних матеріалів (рис. 1.4).

Погіршення властивостей мастильних матеріалів під впливом високих температур і якості поверхонь елементів підшипника визначає характер і динаміку протікання процесів, що виникають у контактах Герца. Шорсткість поверхні,

дефекти, створені частками зношування, забруднення доріжок кочення кілець підшипника, генерують ріст напруги і втоми.

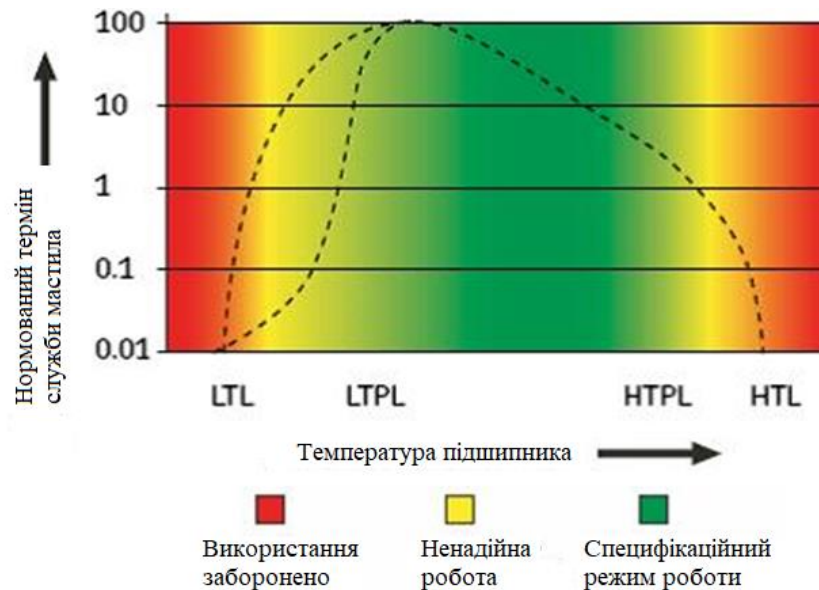


Рисунок 1.4 – Залежність терміну служби змащення від температури підшипника СГТУ: *LTL* - нижня температурна межа: найнижча температура, при якій пластичне змащення дозволить запустити підшипник без утруднення; *LTPL* - нижня межа робочих температур: нижче цієї межі надходження змащувального матеріалу на контактні поверхні тіл кочення й доріжок кочення може бути недостатнім; *HTPL* - верхня межа робочих температур - вище цієї межі змащення окислюється, тому неможливо точно визначити її ресурс; *HTL* - верхня температурна межа: При перевищенні цієї межі змащення втрачає свою структуру [84]

Шар змащення, сформований біля дефектів, і взаємозалежні локальні поверхневі напруги стимулюють механізми зародження тріщин.

Таким чином, мастильна плівка зі зменшеною, в результаті термічного впливу товщиною або зниженими властивостями, активує розвиток флуктуації тиску, приводячи до більших напруг у зонах нерівностей і більшої втоми мікроконтактів доріжки кочення.

Крім генерації дефектів, викликані порушенням режимів змащення, відомий ще один механізм деструкції матеріалу елементів підшипників. Він полягає у тому, що мастильні мінеральні мастила знижують межу витривалості циклічно металу, що деформується, на 7 ... 19 % [38].

При цьому зменшення опору утоми сталей в поверхнево-активних середовищах пояснюється зниженням поверхневої енергії твердого тіла на межі розділу фаз при адсорбції поверхнево-активних речовин (ПАР) і проявом адсорбційно-розклинюючого ефекту усередині мікротріщин утоми.

Чим вище температура мастила, тем у більшій мірі воно знижує опір утоми сталі. Згадане явище пояснюється активацією необоротних хемосорбційних процесів, тобто корозійною утомою, незважаючи на те, що в цьому випадку крива утоми має наочно визначено межу витривалості.

Причини зниження опору утоми сталі звичайно пояснюється спільною адсорбційною й корозійною дією ПАР. При випробуваннях на утому в таких мастилах корозійний процес протікає безупинно, і права гілка кривої утоми має яскраво виражений нахил до осі абсцис і зниження опору утоми сталі може бути досить значним.

У тих випадках, коли сталь зазнає циклічних навантажень, відбувається локальне руйнування окисної плівки й утворюються свіжі поверхні, яким притаманна винятково висока швидкість анодного розчинення. Цим пояснюється те, що навіть самий слабкий корозійний вплив мастила впливає на зниження опору утоми на відміну від вакууму. Чим більше періодичні напруги розтягання й чим агресивніше середовище, тим інтенсивніше відбувається руйнування металу у верхній тріщині, швидше її ріст і значніше зниження опору утоми. У цьому випадку, при механічному розкритті тріщин, у них локалізуються продукти корозії [38, 109]. У процесі порушення умов змащування зовнішні ознаки ушкодження деталей підшипників кочення завжди залишають характерні сліди.

Зношування схоплюванням першого роду спостерігається при терті ковзання. Характеризується виникненням адгезійного зв'язку між деталями.

Умови виникнення: тиск, що перевищує межу текучості на майданчиках фактичних контактів; відсутність змащення або захисної плівки окислів між тертовими деталями; низька температура нагрівання поверхневих шарів (до 373 К).

Виникає на початковій стадії провертання внутрішнього кільця підшипника на валу. На контактній поверхні деталі з менш міцного матеріалу утворюються хаотично розташовані виривання, а на деталі з більш міцного матеріалу – налипання. Налипні частки високої твердості сприяють розвитку вторинних процесів місцевої пластичної деформації й мікрорізанню поверхонь тертя. Розриви металевих зв'язків приводять до збільшення площі фактичних контактів і зменшенню тиску на поверхню тертя.

Окисне зношування розвивається зі швидкостями відносного руху деталей 1,5 ... 7 м/с. При граничному змащенні інтервал швидкостей збільшується до 20 м/с. Механізм руйнування – утворення і руйнування твердих плівок окислів, що виникають на поверхнях контактуючих деталей.

Зношування схоплюванням першого роду виникає при великому тиску й швидкості відносного руху понад 4 м/с. Сполучення двох умов пояснює великі втрати на тертя, високий градієнт і інтенсивне зростання температури в поверхневих шарах контактуючих деталей (до 1800 К). Температура ушкодженої поверхні 800 ... 1700 К помітно знижує механічні властивості матеріалу деталі. Проявляється у вигляді заїдань, що часто передують повному руйнуванню.

Вісповидне викрашування – найбільш характерний вид зношування - для деталей підшипників кочення, що проявляється через 5 ... 7 років роботи. Характеризується ушкодженнями контактуючих поверхонь деталей, що ініціюють зародження тріщин усередині деталей підшипника. Їхній розвиток приводить до розриву контактної поверхні, що принципово змінює характер взаємодії деталей.

Абразивне зношування розвивається за умови наявності на поверхнях тертя абразивних часток, що деформують мікрооб'єми поверхневих шарів і викликають процеси мікрорізання. Швидкість зношування залежить від розмірів, форми, кількості, властивостей абразиву й матеріалу деталей, від відносної швидкості й тисках на контактуючих поверхнях.

Корозійне зношування буває двох видів – суцільне і місцеве. Суцільна корозія покриває рівним шаром і змінює шорсткість поверхні деталей, не утворюючи окремих осередків. Місцева корозія спостерігається у вигляді плям, глибина яких може бути від незначного крапкового поглиблення до виразки.

Ушкодження сепаратора виникають через проблему змащування й деформації зовнішніх кілець. Це приводить до виникнення нерівномірних сил по тілах кочення й впливу руйнуючих сил на сепаратор.

Більшість розглянутих ушкоджень елементів підшипників, не піддаються математичному опису, мають високу швидкість розвитку до критичного стану, складні для виявлення по непрямим ознаках.

Особливістю конструкції СГТУ, що суттєво обмежують можливості діагностування та прогнозування технічного стану, є неможливість установки вимірювальних перетворювачів коливальних процесів безпосередньо на зовнішнє кільце підшипника. Вимірювальні перетворювачі фіксують на досить податливих зовнішніх силових елементах корпусу. Як наслідок, спостерігається перекручування сигналів від підшипникових вузлів завдяки множини резонансів та переходів "зазор-натяг" [107]. В існуючих реаліях ефективного діагностування підшипників можливий тільки безперервному контролю протягом тривалого періоду часу. Найбільш ефективним є метод технічного обслуговування й ремонту СГТУ, заснований на використанні вібродіагностичної інформації.

1.2.2 Віброакустична ідентифікація дефектів підшипників кочення

Практичні завдання вібродіагностичного контролю підшипників СГТУ на всіх етапах життєвого циклу вирішуються такими основними способами. Основою першого є алгоритми фіксації дефектів по динаміці температури

підшипника. Другий – базується на виявленні в мастильних матеріалах продуктів зношування. Третій – це контроль віброакустичних сигналів, генерованих елементами підшипника. Контроль і аналіз віброакустичних сигналів дозволяє найбільше повно й детально виконувати виявлення й ідентифікацію дефектів елементів підшипників на ранній стадії їх виникнення [67].

Спектр і форма сигналу вібрації містять інформацію про характерні дефекти підшипників кочення. Ця інформація має специфічні особливості залежно від виду дефекту.

Важливим моментом є те, що коливання, пов'язані з дефектом підшипника кочення мають багато меншу амплітуду, чим коливання, зв'язані з багатьма іншими ушкодженнями, такими як дисбаланс, неспіввісність або дефекти зубчастої передачі [130].

З [10, 11, 12, 25, 73, 111, 127], де детально досліджені процеси виявлення й аналізу віброакустичної інформації про технічний стан підшипників, відомо наступне.

Загальний перелік дефектів підшипника кочення, що впливають на його ресурс, можна розділити на такі групи.

Перша – дефекти, що впливають на низькочастотну вібрацію підшипника. Має місце переважний ріст вібрації на перших двох-трьох гармоніках частоти перекочування тіл кочення по зовнішньому кільцю, двох-чотирьох гармоніках частоти обертання тіл кочення й набагато рідше двох-трьох гармоніках частоти перекочування тіл кочення по внутрішньому кільцю. Останній дефект із першої групи через одночасне навантаження ротором декількох тіл кочення частіше приводить до появи коливальних сил на перших гармоніках частоти обертання ротора.

В місцях найбільшого відхилення форми поверхні кочення від номінальної, поверхня кочення має підвищену шорсткість, і при прокатуванні по неї тіл кочення змінюється сила тертя, а отже, з'являється модуляція високочастотної

випадкової вібрації підшипника тими ж частотами, на яких росте низькочастотна вібрація при плавній зміні форми поверхонь, кочення. Глибина модуляції сил тертя залежить не тільки від співвідношення шорсткостей поверхонь кочення в різних точках, але й від деяких параметрів мастильного шару, наприклад, товщини й в'язкості.

Друга – дефекти, що виникають або при виготовленні підшипника, або при прискореному зношуванні окремих тіл кочення. Дефект супроводжується зростанням вібрації машини на частоті обертання сепаратора підшипника, іноді на її другій і частково третій гармоніках, а також модуляції сил тертя й високочастотної випадкової вібрації підшипника цими ж частотами.

Третя – дефекти поверхонь тертя ковзання в підшипниках. Їхній безпосередній вплив на вібрацію підшипника позначається лише на високих частотах, при зачіпанні сепаратора за нерухливі елементи підшипника, а захисних кілець – за обертові елементи. Як правило, це зачіпання не носить строго періодичного характеру, тому змінює тільки дві основні характеристики високочастотної вібрації – її енергію (середньоквадратичне значення) і закон розподілу миттєвих значень вібрації. Непрямий вплив цих дефектів на вібрацію підшипника може полягати в такий же спосіб, що й у влучення продуктів зношування в змащення й відповідній зміні характеристик високочастотної вібрації підшипника.

Четверта – дефекти монтажу підшипників. Перекоси поверхонь кочення можуть привести до багаторазового перевищення навантажень на підшипники із прискоренням процесів старіння й зношування навантажених ділянок поверхонь кочення. Перекоси лише незначно змінюють низькочастотну вібрацію машини, причому нерідко у бік її зменшення. Найбільші зміни у бік зростання вібрації припадають на середні частоти через наявність на будь-якій поверхні кочення незначних нерівностей, які суттєво збільшують вібрацію підшипника при зменшенні товщини мастильного шару через збільшення навантаження або погіршенні якості змащування. Загальним правилом для ідентифікації перекосів є

переважне зростання парних гармонік підшипникової вібрації. При цьому розглядаються гармоніки високої кратності, звичайно вище десяти. Так, при перекосах зовнішнього кільця – це парні гармоніки, кратні подвоєній частоті перекочування тіл кочення по зовнішньому кільцю. При перекосах внутрішнього – парні гармоніки частоти обертання й достатньо часто частоти перекочування тіл кочення по внутрішньому кільцю. Крім зростання підшипникової вібрації на середніх частотах, збільшення навантаження на поверхні кочення через зниження товщини шару мастила й наявних нерівностей приводить до модуляції сил тертя й випадкової вібрації підшипниковими частотами. Основною відмінністю такої модуляції є, з одного боку, можливе збільшення числа гармонік, у спектрі вібрації, що обгинає, з іншого боку, переважне зростання парних гармонік. При сильних перевантаженнях поверхонь кочення можливі імпульсні розриви мастильного шару на нерівностях поверхонь кочення, у тому числі періодичні, і поява ультразвукової вібрації імпульсно ударного походження.

П'ята – дефекти, які можуть з'явитися як при монтажі, так і при експлуатації встаткування. Низькочастотна підшипникова вібрація машини при таких дефектах може не тільки не рости, але й знижуватися, а основні зміни пов'язані зі зростанням підшипникових гармонік вібрації високої кратності й модуляцією високочастотної вібрації підшипниковими частотами. Через кінцеву точність виготовлення поверхонь кочення осьові й радіальні статичні перевантаження підшипників проявляються так само, як і перекіс внутрішнього кільця, і лише в деяких випадках переважна модуляція випадкової вібрації має місце на третій гармоніці, частоти, обертання валу. Обертіві навантаження також є причиною модуляції випадкової вібрації декількома гармоніками частоти обертання валу, але основною є перша гармоніка з наступним падінням величини кратних гармонік.

Шоста – дефекти проковзування підшипників у посадкових місцях. Проковзування починається в імпульсних режимах роботи машини, коли завдання його виявлення вирішується найбільше складно. Зміни вібрації при проковзуванні

полягають насамперед у нестабільності частот підшипникових складових стосовно частоти обертання ротора. Якщо проковзування відбувається й у стабільних режимах, то нестабільність підшипникових частот виявляється по розширенню підшипникових складових вібрації по частотній координаті. У момент проковзування зовнішнього (нерухливого) кільця в посадковому місці відбувається збільшення, у тому числі й імпульсне, сил тертя й високочастотної вібрації підшипника. Особливістю поведінки внутрішнього кільця підшипника з ослабленою посадкою є те, що при статичному радіальному навантаженні на підшипник один-два рази за оберт валу вісь валу імпульсно зрушується у внутрішньому кільці підшипника, створюючи ударне навантаження на підшипник і модулюючи його високочастотну випадкову вібрацію.

Сьома – раковини, відколи й тріщини на поверхнях кочення. Виділити тріщини в поверхнях кочення в окрему групу дефектів за їхнім впливом на вібрацію підшипникових вузлів або машини в цілому практично неможливо, хоча в деяких машинах вдається по вібраційних ознаках розділити тріщини й раковини на внутрішніх кільцях і тілах кочення. Вплив дефектів цієї групи на вібрацію полягає в появі періодичних ударів, які і є джерелом імпульсної вібрації. Якщо при ударі розривається мастильна плівка, пружні зіткнення поверхонь кочення збуджують і ультразвукову вібрацію до частот більш 100 кГц. Розвинені дефекти незадовго до відмови підшипників можуть стати джерелом сильної вібрації всієї машини на гармоніках підшипникової вібрації низької кратності. При дефектах зовнішнього кільця удари йдуть із частотою перекочування тіл кочення по зовнішньому кільцю, при дефектах внутрішнього кільця – із частотою перекочування тіл кочення по внутрішньому кільцю, при дефектах тіл кочення – з подвійною частотою обертання тіл кочення. Статичне навантаження на підшипник приводить до модуляції сили удару по обертовій поверхні кочення, зокрема, при дефектах внутрішнього кільця – частотою його обертання, при дефектах тіл кочення – частотою обертання сепаратора. Обертове навантаження змінює частоти модуляції

сили ударів, причому ці частоти можуть сильно залежати від особливостей навантаження. Ознаки періодичної модуляції ударів – бічні складові в основних гармоніках підшипникових складових у спектрах вібрації і вібрації, що обгинає.

Восьма – вплив дефектів змащування на вібрацію полягає в тому, що, зниження товщини й в'язкості мастильного шару збільшує підшипникову вібрацію на середніх і високих частотах. Розриви мастильної плівки приводять до ударів тіл кочення про поверхню кілець. Удари тіл кочення по нерухливому кільцю підшипника виявляються по його ультразвуковій вібрації.

Таким чином, вид дефекту підшипника може бути повністю ідентифікований у низько-, середньо- або високочастотній області за характерними віброакустичними сигналами.

1.3 Аналіз методів контролю підшипників кочення

1.3.1 Метод "ударних імпульсів"

Дефекти, що зароджуються, підшипників кочення СГТУ з високою вірогідністю виявляються лише по високочастотній вібрації підшипників, властивості якої суттєво змінюються під дією навіть незначних коливальних сил. У міру зростання дефектів і коливальних сил змінюється спочатку середньочастотна вібрація підшипникових вузлів, а потім і низькочастотна вібрація машини в цілому. Як наслідок, системи вихідного контролю підшипників створюються з розрахунку виявлення, насамперед, середніх дефектів виготовлення й контролю середньочастотної вібрації підшипника, а системи аварійного захисту орієнтуються на виявлення сильних дефектів і контролюють низькочастотну вібрацію машини в цілому. Що стосується систем глибокої діагностики підшипників, то вони в обов'язковому порядку використовують методи аналізу високочастотної вібрації, а,

при необхідності, контролюють і весь спектр частот вібрації підшипникових вузлів.

Серед різних методів контролю стану підшипників кочення за високочастотною вібрацією можна виділити три основних, що різняться за фізичною основою. Перший містить у собі контроль потужності високочастотної вібрації підшипника, другий – аналіз форми високочастотної вібрації, порушеної короткими ударними імпульсами, а третій – спектральний аналіз флуктуацій потужності високочастотної вібрації.

Найпростіша методика періодичного контролю стану підшипників кочення ґрунтується на методі "ударних імпульсів" [13]. Аналіз форми сигналу високочастотної вібрації, порушеної ударним імпульсом, показує, що він досить нетривалий у часі, а найважливішим показником є відношення пікового значення до середньоквадратичного значення високочастотної вібрації (величина пікфактора) (рис. 1.5).

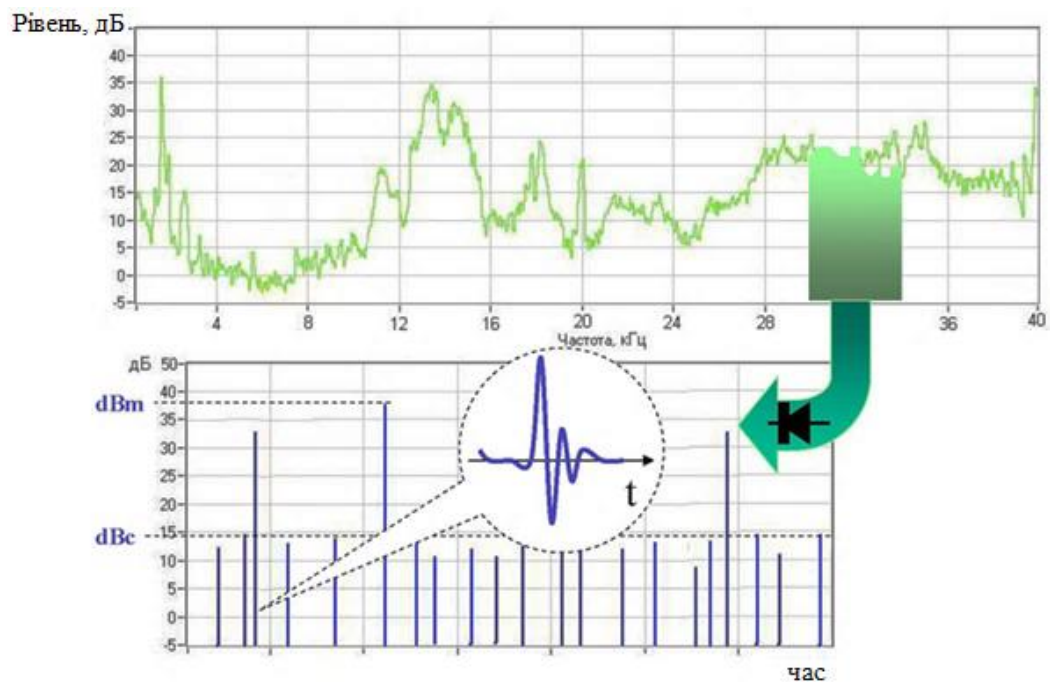


Рисунок 1.5 – Обробка високочастотних сигналів вібрації, генерованих частими неперіодичними ударними імпульсами при великій кількості дефектів на поверхні кочення, за методом ударних імпульсів [26]

Переваги методу ударних імпульсів визначаються, насамперед, відсутністю вимог до періодичності проходження ударних імпульсів. Це дозволяє виявляти, з одного боку дефекти змащення, що зароджуються, при яких розриви мастильної плівки відбуваються не дуже часто й нерегулярно, а, з іншого боку, механічні дефекти підшипника на нестабільних частотах обертання, причому за короткий час, обумовлений 2 ... 3 обертами ротора.

Головним недоліком є те, що не всі дефекти підшипника кочення, що зароджуються, приводять до появи ударних імпульсів, і досить часто дефектний підшипник виявляється лише незадовго до відмови, коли в ньому розвивається ланцюжок зв'язаних дефектів, один або трохи з яких стають джерелом ударних імпульсів. Ще один недолік - відсутність інформації про вид дефекту, без якої практично неможливо давати довгостроковий прогноз стану.

Крім цього контроль стану підшипника методом ударних імпульсів повинен доповнюватися контролем потужності високочастотної вібрації, щоб не пропустити тієї стадії розвитку дефектів, коли кількість ударних імпульсів в одиницю часу різко зростає.

1.3.2 Метод контролю по спектру високочастотної вібрації, що обгинає

Більші можливості має метод контролю стану підшипників кочення по спектру випадкової високочастотної вібрації, що обгинає, порушеної силами тертя в плівці мастила підшипника, а також ударними імпульсами при її розривах. Найбільш достовірну інформацію метод дає в тому випадку, якщо аналізувати модуляцію не широкосмугового сигналу, одержуваного від акселерометра, а попередньо здійснити смугову фільтрацію вібросигналу в діапазоні приблизно 6 ... 10 кГц і аналізувати модуляцію цього сигналу. Для цього відфільтрований сигнал

детектується, тобто виділяється сигнал, що модулює, або "що обгинає", який подається на вузькосмуговий спектроаналізатор. У результаті виділяється контрольований спектр, що обгинає (рис. 1.6) [26].

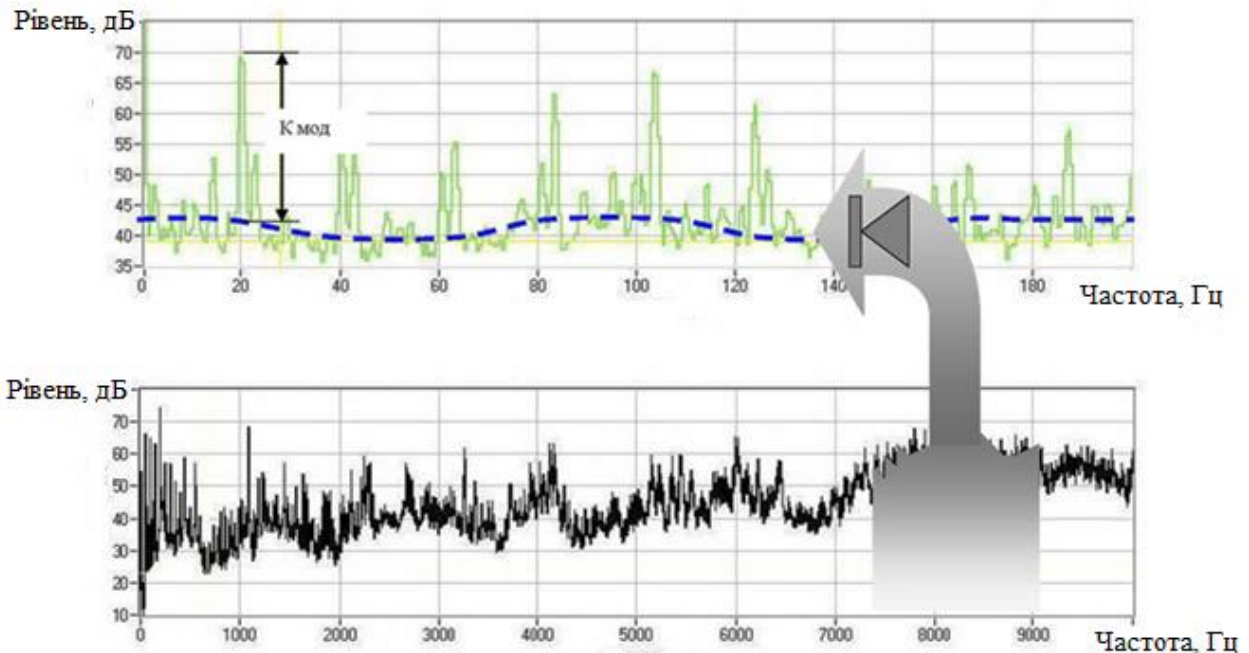


Рисунок 1.6 – Обробка сигналу за методом спектру, що обгинає

Слід зазначити, що в цей час існує два різних методи вібраційної діагностики, що одержали однакову назву (метод спектру, що обгинає) через однакову послідовність операцій перетворення, застосовуваних до різних, а саме періодичним і випадковим компонентам сигналу.

Але якщо перший метод, застосовуваний для розподілу близьких по частоті гармонійних складових, використовується усе рідше, то другий метод, застосовуваний для дослідження коливань потужності випадкових складових, став одним з основних у вібраційній діагностиці обертового встаткування.

Слід зазначити, що далеко не завжди в спектрі вібрації підшипникового вузла можна виділити смугу частот, у якій відсутні гармонійні складові. Тоді перед формуванням спектру, що обгинає, доводиться розділяти сигнал на випадкові й періодичні компоненти із застосуванням досить складних алгоритмів цифрової

обробки сигналу. Незважаючи на певну складність виміру спектру, що обгинає, випадкової високочастотної вібрації у порівнянні з вимірюваннями за методом "ударних імпульсів", реалізація всіх можливостей методу спектру, що обгинає, дозволяє вирішувати багато важливих завдань діагностики підшипників кочення роторних машин. Крім того, методу притаманні такі переваги:

- використовуються результати вимірювання вібрації в більш низькій області частот, чим метод ударних імпульсів і, як наслідок, точка контролю вібрації може бути трохи віддалена від нерухливого кільця підшипника й вибирається, наприклад, на корпусі підшипникового вузла;

- спектральний аналіз спектру, що обгинає, дозволяє виявляти в підшипнику кочення дефекти, що зароджуються, не тільки поверхонь кочення, але й ковзання, зокрема сепаратора. Виявлення й ідентифікація усіх дефектів є основою довгострокового прогнозу стану підшипника й переходу з інтервалів між вимірами порядку декількох днів на інтервали до декількох (3 ... 6) місяців;

- є можливість діагностувати низькообертові підшипники, у яких навіть при нормальній роботі виникають ударні імпульси. Діагностика в цьому випадку можлива тому, що в дефектних підшипниках періодично змінюється щільність ударних імпульсів, а, отже, і потужність високочастотної вібрації;

- ті дефекти, які приводять до розриву мастильної плівки й появі ударних імпульсів, можуть виявлятися ще до того, як величина дефекту буде достатня для розриву мастильної плівки й виникнення ударних імпульсів.

У метода є також ряд недоліків. Перший полягає в тому, що на етапі зародження, з високою вірогідністю виявляються всі дефекти підшипника кочення, крім одного – дефекту змащення, тому що досить часто на початковому етапі розвитку дефектів змащення розриви мастильної плівки можуть бути нерегулярними, а спектральний аналіз, що обгинає нечутливий до неперіодичних змін потужності високочастотної вібрації.

Другим недоліком може вважатися різна чутливість методу до дефектів нерухливого кільця підшипника, тіл кочення, сепаратора й рухливого кільця, тому що на шляху поширення високочастотної вібрації залежно від виду дефекту або немає ні однієї перехідної поверхні із шаром змащення, або така поверхня одна (для дефектів тіл кочення), або дві (для дефектів обертового кільця й сепаратора). Як наслідок, пороги небезпечних дефектів для різних груп дефектів будуть різнитися, і залежати, зокрема, від швидкості руху тіл кочення по доріжках кочення.

1.3.3 Метод прямого спектру

Вібраційні сигнали можливо аналізувати не тільки з позиції співвідношення амплітудних і енергетичних характеристик, але й з погляду періодичності появи амплітудних сплесків. Саме на цьому й базується метод прямого спектра (рис. 1.7) [26].

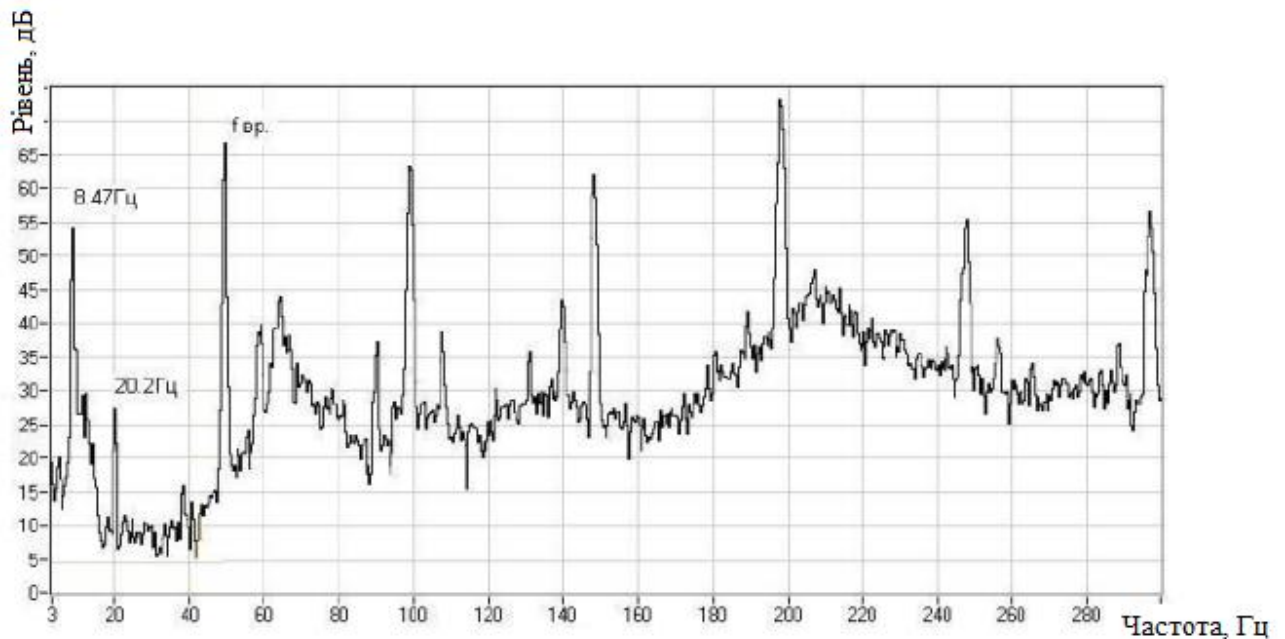


Рисунок 1.7 – Прямий спектр вібраційного сигналу

Вібраційний сигнал аналізується вузькосмуговим спектроаналізатором і по частотному складу спектра можна ідентифікувати виникнення й розвиток дефектів підшипника.

Амплітудні сплески у вібросигналі впливають не хаотично, а із цілком визначеною періодичністю або частотою. Причому дефекту на кожному з елементів підшипника відповідають свої частоти, які однозначно прораховуються залежно від кінематики підшипника й швидкості його обертання. Наявність тієї або іншої дискретної складової в спектрі сигналу говорить про виникнення відповідного дефекту підшипника, а амплітуда цієї складової – про глибину дефекту.

Це досить спрощений підхід, оскільки багато дефектів у спектрі проявляються у вигляді не однієї частотної складової, а декількох.

До основних переваг методу належать:

- досить висока перешкодозахищеність (малоймовірна наявність у механізмі джерел, що створюють вібрації на тих же точно частотах, що й дефекти підшипника);

- інформативність методу суттєво вище, чим методу ударних імпульсів. Можливість одержати диференційовану оцінку стану підшипника окремо по кожному його кінематичному вузлу, оскільки вони генерують різні частотні ряди в спектрі. До факторів, що обмежують можливості методу, можна віднести:

- високу вартість встаткування;
- малу чутливість до слабких дефектів, що зароджуються.

Підсумкове порівняння можливостей усіх методів наведено в таблиці 1.2 [26].

Порівняльна оцінка методів показала, що найбільшими можливостями по виявленню в підшипнику дефектів на ранній стадії розвитку має метод аналізу спектра високочастотної вібрації, що обгинає.

Специфіка високочастотної віброакустичної діагностики дефектів, що зароджуються, полягає в тому, що складові коливального процесу підшипникового

вузла в початковій стадії деградації, що містять інформацію про виникнення ушкодження, мають занадто слабку енергетику.

Таблиця 1.2 – Порівняльні характеристики методів за п'ятибальною шкалою

Параметр	Прямий спектр	Спектр, що обгинає	Ударні імпульси
Діагностика дефектів, що зароджуються	1	4	4
Діагностика розвинених дефектів	3	5	5
Оцінка стану за результатами однократного виміру	2	5	4
Оцінка стану при спостереженні за змінною вібропараметру в часі	4	5	5
Поділ стану підшипника за кінематикою й змащенням	-	4	4
Ідентифікація змін кінематики підшипника з конкретними джерелами	3	4	3
Перешкодозахищеність	2	5	4
Вартість	4	4	4

Великий рівень перешкод і порівняно малі зміни корисного сигналу визначають складність і специфіку пошуку інформативних діагностичних ознак, чутливих до дефекту, що розвивається, і інваріантних до ДФ. У виняткових випадках, коли вимірювальний перетворювач безпосередньо контактує з вузлом, що діагностується, збільшення рівня високочастотного віброакустичного сигналу свідчить про появу дефекту. Експлуатація в таких умовах існуючих ТЗД викликає ефект "прикордонної зони" – падіння вірогідності інформації при роботі вимірювальних перетворювачів і ліній зв'язку поблизу верхньої межі фізичних і метрологічних параметрів [113]. Виникаючі проблеми не дозволяють ефективно вирішувати завдання глибокої діагностики й довгострокового прогнозу технічного стану СГТУ, що виключає можливість своєчасної підготовки до технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) [95].

У ситуації, що склалася, зроблено висновок, що удосконалення діагностування технічного стану судових газотурбінних установок можливо на основі

впровадження рішень, які добре зарекомендували себе в атомній енергетиці, а саме переходу до широкого застосування високоточної вимірювальної техніки на основі волоконно-оптичних технологій.

1.4 Загальна методика дисертаційного дослідження

1.4.1 Вибір і обґрунтування теми наукового дослідження

Вибір напрямку наукового дослідження заснований на проведеному аналізі й експертній оцінці технічно реалізованих варіантів розв'язування задачі діагностування й прогнозування технічного стану підшипникових вузлів СГТУ за такими критеріями як: актуальність, наукова новизна, техніко-економічна доцільність, відповідність паспорту спеціальності, а також основним напрямкам наукової спеціальності.

За результатами виконаного аналізу й експертних оцінок найбільш оптимальним і доцільним слід прийняти варіант удосконалювання засобів діагностування на основі простих, надійних і універсальних схемотехнічних рішень волоконно-оптичних вимірювальних перетворювачів.

На основі вибраного напрямку наукового дослідження, і на підставі аналізу результатів інформаційного пошуку, виконаного в першому розділі, була визначена тема наукового дослідження – розробка волоконно-оптичного акселерометра для діагностування стану підшипників СГТУ.

Основним обґрунтуванням вибору теми досліджень також є наступне:

– СГТУ широко використовуються на різних типах суден і кораблів як в якості головних і допоміжних двигунів, так і в якості газотурбокомпресорів;

– відсутність резервованих елементів у системі "ротатор - підшипники" і високі кутові швидкості обертання ротора СГТУ суттєво впливають на ефективність технічної використання установок і безпеку судноплавства в цілому;

– порушення режимів змащення, зміна властивостей мастильних матеріалів під впливом експлуатаційних факторів, приводить до зародження дефектів в елементах підшипникових вузлів установок;

– несвоєчасне діагностування дефектів, що зароджуються й розвиваються з великою швидкістю, і прогнозування часу безпечної експлуатації може привести до техногенних катастроф з людськими й матеріальними втратами;

– існуючі засоби технічного діагностування обмежують можливість одержання достовірної інформації про стан підшипникових вузлів СГТУ в експлуатації, при безперервному контролі високочастотної вібрації протягом тривалого періоду часу.

Важливість проведення досліджень, пов'язаних з питаннями підвищення експлуатації транспортних об'єктів, підтверджується програмою Транспортної стратегії України на період до 2030 р., (розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 року, № 430-р), Стратегії сталого розвитку "Україна - 2020" (Указ Президента України від 12.01.2015 року, № 5).

Актуальність теми дослідження базується на запиті практики про необхідність розробки й впровадження нових засобів діагностування й прогнозування технічного стану, які забезпечать підвищення вірогідності діагностичної інформації й зниження аварійності підшипникових вузлів СГТУ.

Наукова спрямованість досліджень відповідає паспорту спеціальності; профілю досліджень, проведених кафедрою теорії автоматичного управління й обчислювальної техніки Національного університету "Одеська морська академія"; основним напрямком спеціальності 05.22.20 – експлуатація й ремонт засобів транспорту.

Наукові дослідження виконувалися відповідно до тематики держбюджетних науково-дослідних робіт Національного університету "Одеська морська академія" по темах ДР № 0104U002961 "Г'єзооптичні перетворювачі фізичних величин" і ДР № 0115U003577 "Автоматизація технологічних і адміністративних процесів на транспорті", де здобувач був співвиконавцем окремих етапів досліджень.

1.4.2 Обґрунтування мети й задач дисертаційного дослідження

З урахуванням теми дисертаційного дослідження, була сформульована **мета і завдання дослідження**, які полягають у зниженні аварійності, забезпеченні високої ефективності використання та надійності роботи СГТУ, що досягається впровадженням сучасних засобів діагностування та прогнозування технічного стану, які забезпечують підвищення вірогідності процесів діагностування підшипникових вузлів СГТУ за рахунок використання принципів часткової інваріантності до зовнішніх неконтрольованих впливів на вимірювання.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних завдань.

1. Аналіз основних ознак деструкції підшипникових вузлів СГТУ та можливостей існуючих методів контролю вібрації окремих елементів цих вузлів.
2. Визначення завадостійких до впливу експлуатаційних факторів засобів діагностики та прогнозування технічного стану підшипників СГТУ з подальшою оцінкою можливостей корекції вимірювальних погрішностей.
3. Синтез математичної моделі оцінювання впливу зміни параметрів на метрологічні характеристики завадостійких волоконних акселерометрів маятникового типу, призначених для діагностики та прогнозування технічного стану підшипникових вузлів СГТУ.

4. Експериментальні дослідження характеристик запропонованих засобів і пристроїв діагностики з верифікацією математичних моделей процесів перетворення інформаційних діагностичних сигналів.

1.4.3 Системний підхід до розробки технологічної карти наукового дослідження

Системний аналіз і системний підхід до розв'язування наукового завдання дозволяє оцінити всі фактори, що сприяють досягненню поставленої мети, і визначити оптимальні способи їх досягнення [5]. Визначення "система" належить до філософської категорії наукового пізнання, а комплекс допоміжних завдань, розв'язуваних у будь-якому дисертаційному дослідженні, переводить це поняття в категорію складних систем. При розв'язуванні науково-прикладних завдань розглядаються складні системи, що складаються із великої кількості окремих елементів, які перебувають між собою у взаємозв'язку й взаємодії.

Для формалізації взаємозв'язків елементів і етапів у дисертаційного дослідження був розроблений замкнений системний цикл наукового дослідження, що візуалізований у вигляді технологічної карти дослідження.

Тема дисертаційної роботи сформована на основі "запиту практики" про необхідність розробки й впровадження нових засобів діагностування й прогнозування технічного стану, які забезпечать зниження аварійності підшипників суднових ГТУ.

Тезою розв'язку наукового завдання є науковий прогноз про те, що удосконалення діагностики та прогнозування технічного стану підшипників ГТУ може бути досягнуте шляхом створення ВОА, що забезпечують інваріантність до зовнішніх неконтрольованих впливів за рахунок синтезу й оптимізації конструктивних параметрів, комбінації матеріалів і способу перетворення світлового потоку

в сигнал, що генерує керуючий вплив на систему моніторингу вібрації підшипників суднових ГТУ.

Практичне значення отриманих результатів визначається тим, що впровадження нового засобу превентивного діагностування та прогнозування технічного стану підшипникових вузлів дозволить досягти підвищення ефективності використання та надійності СГТУ за рахунок зниження аварійності на 6 ... 11 %, збільшення міжремонтного періоду та зменшення експлуатаційних витрат на 8 ... 10 ам. дол. на 1 кВт-г генерованої потужності за рік роботи зі середньостатистичним навантаженням. Результати досліджень є універсальними і можуть бути розширеними для застосування у інших діагностичних засобах водного транспорту.

Основні експериментальні дослідження, виконані в роботі, проводилися в лабораторних і виробничих умовах.

У дисертаційному дослідженні висунуте й підтвержене наукове положення: підвищення вірогідності діагностичної інформації про процеси зародження дефектів підшипників ГТУ можливо за рахунок контролю високочастотної вібрації підшипникових вузлів волоконно-оптичним пристроєм, інваріантним до експлуатаційних дестабілізуючих факторів.

1.5 Висновки до розділу 1

1. У результаті вибору теми дисертаційного дослідження з ознак актуальності, наукової новизни, практичної значимості, відповідності паспортам спеціальностей і основним напрямкам спеціальності 05.22.20 – експлуатація й ремонт засобів транспорту:

– функціонування засобів транспорту в різних умовах експлуатації, виробничо-технічна база для забезпечення їх технічної готовності. Методи профілактичного обслуговування засобів транспорту, розробка засобів діагностування й прогнозування їх технічного стану;

– дослідження способів і технологічних процесів експлуатації, технічного обслуговування та ремонту транспортних засобів, відновлення їх деталей, розроблення методів і технічних засобів механізації, автоматизації та комп'ютеризації процесів експлуатації, технічного обслуговування та ремонту, удосконалення організації, методів підвищення зносостійкості та ресурсу деталей, вузлів, агрегатів засобів транспорту в технологіях ремонту;

– дослідження ефективності функціонування ергатичних систем управління засобами транспорту, розроблення заходів, засобів і методів поліпшення якості експлуатації, технічного обслуговування та ремонту засобів транспорту.

– дослідження, розробка й прогнозування методів удосконалювання тактико-технічних і експлуатаційних характеристик засобів транспорту, обґрунтування експлуатаційних вимог до їхньої ремонтпридатності й технічному обслуговуванню, підвищення ефективності контролю технічного стану транспортної техніки, впровадження методів і засобів діагностування й прогнозування технічного стану засобів транспорту, що забезпечують високу ефективність їх використання й надійність роботи.

2. Об'єктом дослідження є процеси формування й перетворення діагностичного сигналу у засобі діагностики та прогнозування технічного стану підшипників суднових ГТУ при складних умовах експлуатації.

3. Предметом дослідження є характеристики волоконно-оптичного засобів діагностування та прогнозування технічного стану підшипників СГТУ, що функціонують в складних умовах експлуатації.

4. **Мета і завдання дослідження** полягає у зниженні аварійності, забезпеченні високої ефективності використання та надійності роботи СГТУ, що

досягається впровадженням сучасних засобів діагностування та прогнозування технічного стану, які забезпечують підвищення вірогідності процесів діагностування підшипникових вузлів СГТУ за рахунок використання принципів часткової інваріантності до зовнішніх неконтрольованих впливів на вимірювання.

5. Розв'язок головного завдання дисертаційного дослідження виконаний на основі синтезу результатів допоміжних завдань.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЗАСОБІВ ДІАГНОСТУВАННЯ СУДНОВИХ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

2.1 Потенційні можливості волоконно-оптичних вимірювальних перетворювачів фізичних величин

Удосконалювання систем автоматизованого управління й контролю СЕУ визначається технічними досягненнями в області вимірювальної техніки. Це обумовлено екстремальними умовами навколишнього й контрольованого середовищ при експлуатації СГТУ, у яких один або сукупність зовнішніх ДФ (температура, електромагнітне поле, корозійно-агресивне середовище, тиск, механічні коливання) близькі до гранично можливих значень (рис. 2.1) [9].

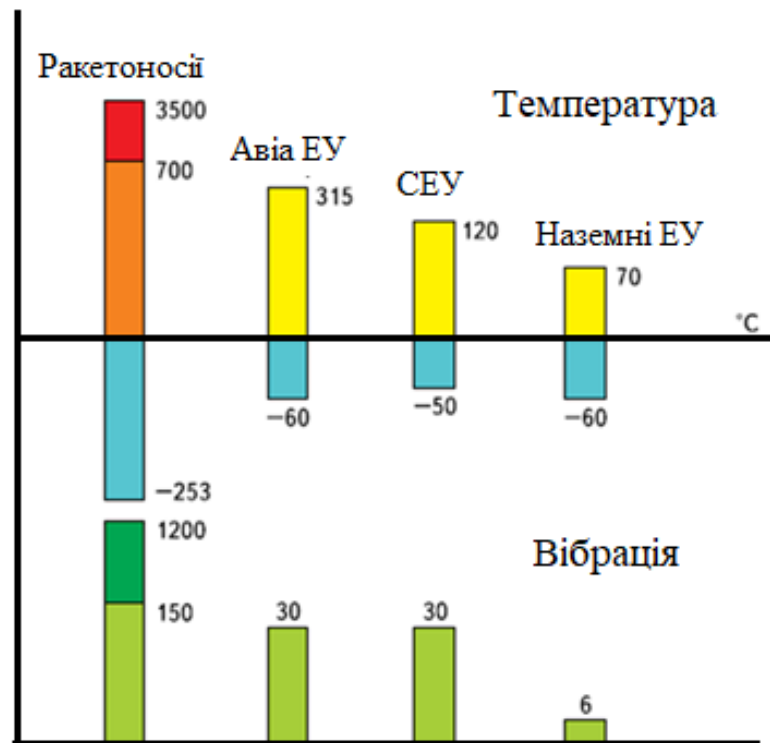


Рисунок 2.1 – Вплив ДФ (температури й вібрації) при експлуатації енергоустановок

Більша частина існуючих у цей час компонентів систем діагностування та прогнозування технічного стану підшипників припускає експлуатацію при максимальній робочій температурі порядку 470 К через обмеження, що накладаються властивостями традиційних матеріалів.

Для подолання певного стримування в удосконалюванні вимірювальної техніки сформувався напрямок розвитку вимірювальних перетворювачів на основі використання оптичного випромінювання для реєстрації фізичних впливів [22, 46, 57, 110, 121].

Використання унікальних властивостей оптичних матеріалів є ефективним рішенням для створення волоконно-оптичних вимірювальних перетворювачів (ВОВП) і ліній зв'язку ІВС. Технологічний прорив у виробництві спеціального оптичного скла дозволив йому багато в чому перевершити властивості відомих матеріалів (рис. 2.2) [20].

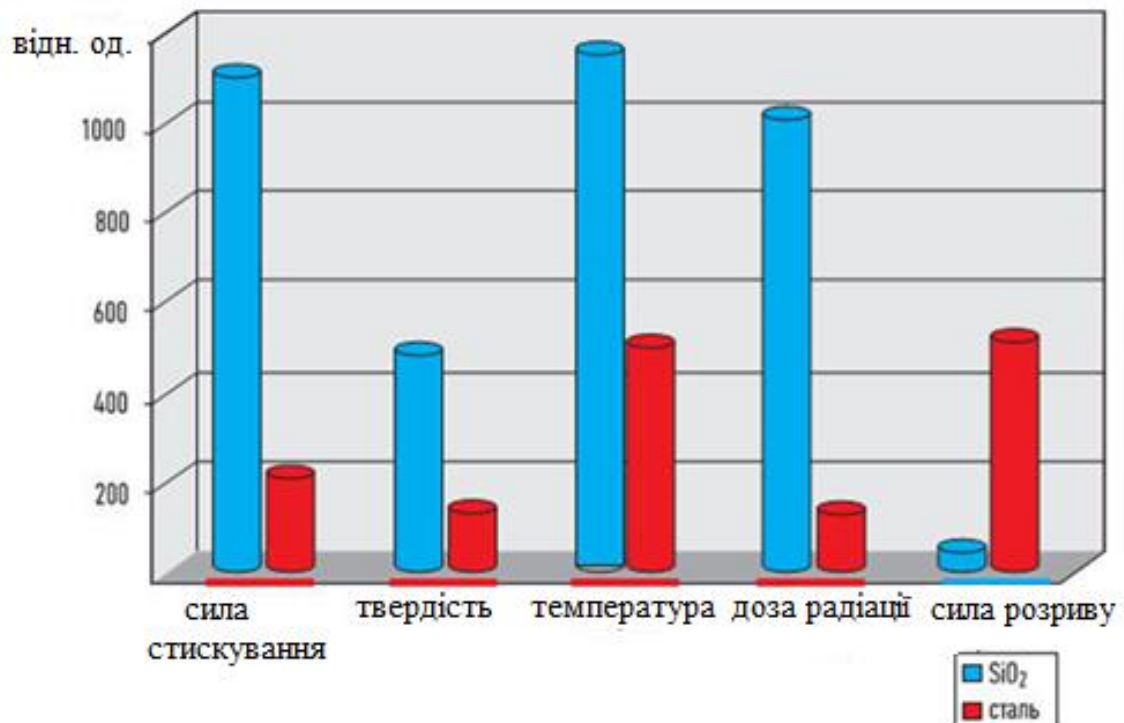


Рисунок 2.2 – Порівняння властивостей кварцового скла й неіржавіючої сталі, як матеріалу для створення вимірювачів

З позицій метрологічних можливостей ВОВП не тільки зрівнялися із традиційними вимірювальними засобами, але й багато в чому їх перевершили (табл. 2.1) [72].

Таблиця 2.1 – Межі вимірів різних фізичних величин традиційними та ВОВП

Фізична величина	Одиниця виміру	Межа виміру традиційними датчиками	Досягнуті межі вимірів ВОВП	Межа виміру ВОВП
Деформація	М	10^{-4}	10^{-12}	10^{-14}
Тиск	Па	$7 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	10^{-6}
Температура	°С	10^{-4}	10^{-6}	10^{-8}
Обертання	рад·с ⁻¹	10^{-4}	10^{-4}	10^{-8}
Прискорення	м/с ²	10^{-6}	10^{-4}	10^{-8}

ВОВП потенційно нечутливі до зовнішніх електромагнітних полів, відрізняються малими ваго-габаритними характеристиками, простими схемотехнічними рішеннями, високою надійністю, стійкістю до експлуатаційних факторів, хімічною інертністю, мають повну оптичну гальванічну розв'язку з електронною апаратурою. Перетворювачі цього класу мають високу механічну міцність, високу швидкодією, тривалий термін служби. Відомі зразки ВОВП, що успішно функціонують при температурі до 1170 К [90].

Істотна перевага ВОВП перед вимірювальними пристроями традиційних типів обумовлена вільним сполученням з волоконно-оптичними лініями передачі інформації й можливістю організації розподілених вимірювальних систем зі значним числом сенсорів і єдиним оптичним каналом (ОК). Організація волоконних ІВС, з можливістю мультиплексування оптичних сигналів, дозволяє розв'язати завдання зменшення маси й номенклатури суднових вимірювальних засобів і кабельних мереж.

Крім того, вартість основних волоконно-оптичних компонентів швидко знижується, а якість і надійність зростають [117]. Прогнозується, що до 2025 року, за рахунок зниження собівартості виробництва, з'явиться можливість більш

широкого використання волоконно-оптичних пристроїв у процесах управління моніторингу стану систем і встаткування складного енергетичного обладнання (рис. 2.3) [72].



Рисунок 2.3 – Співвідношення попиту та пропозиції на ВОП: 1 – переміщення; 2 – швидкість; 3 – прискорення; 4 – деформація; 5 – координати; 6 – частота обертання; 7 – крутний момент; 8 – дрейф ТЗП; 9 – рівень; 10 – витрата; 11 – тиск; 12 – сила; 13 – температура; 14 – наявність полум'я; 15 – газовий склад; 16 – напруженість магнітного поля

2.2 Аналіз відомих схемотехнічних рішень волоконно-оптичних акселерометрів для інформаційно-вимірювальних систем ГТУ

2.2.1 Волоконно-оптичні акселерометри на основі інтерферометрів

Волоконно-оптичні акселерометри (ВОА), як один з видів ВОП, фазової модуляції створюються за однією з наступних найпоширеніших схем (рис. 2.4): гомодинного й гетеродинного інтерферометра Маху - Цендера; міжмодових інтерферометрів Фабрі-Перо й Майкельсона; інтерферометра Саньяка із двонаправленим оптичним зв'язком.

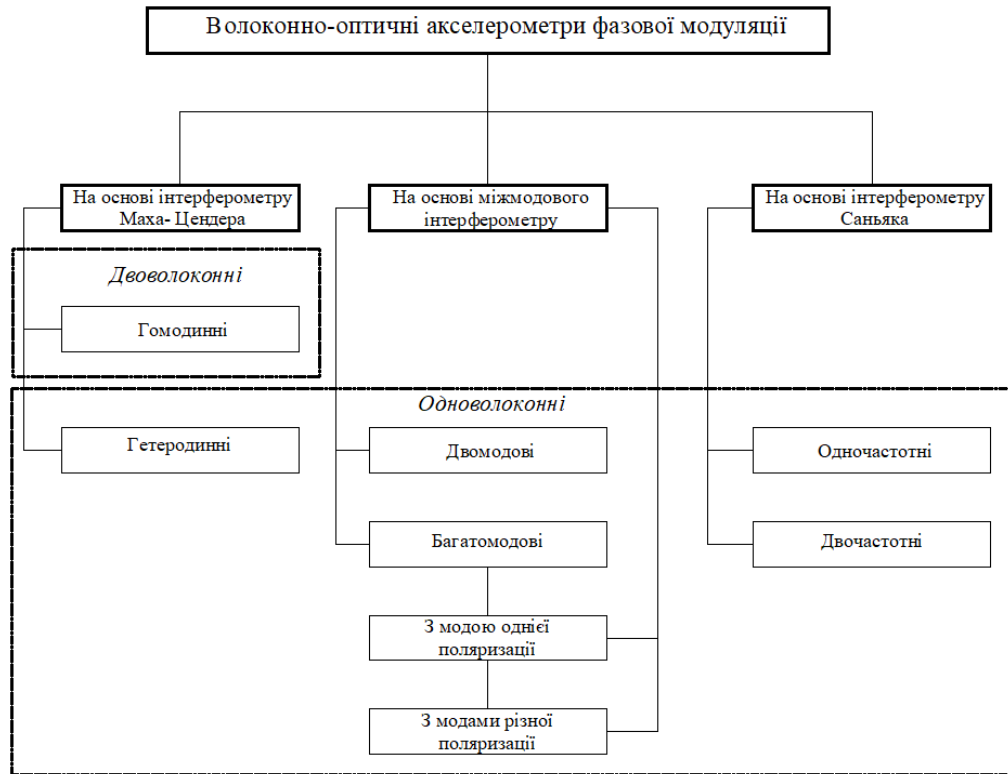


Рисунок 2.4 – Види та типи ВОА фазової модуляції

У фазових ВОА звичайно реалізується диференціальна схема обробки сигналу: випромінювання розділяється дільником на два потоки, один з яких направляєється в оптичне волокно (ОВ), локалізоване в зоні виміру. Інший потік випромінювання пропускається через опорне ОВ. Зрушення фаз досягається позовжніми деформаціями вимірювального ОВ (рис. 2.5). Вихідна потужність оптичного випромінювання, як результат інтерференції променів вимірювального й опорного каналів, має вигляд "піднятого косинуса" [28]. Вигляд "піднятого косинуса" варіюється залежно від різниці довжин оптичних шляхів між вимірювальним і опорним променями. У якості робочої точки інтерферометра визначається відповідна точка A на лінійній ділянці. Це виконується за рахунок створення додаткового зрушення фаз $\pi/2$ між модами випромінювання, які інтерферують. Фізично додаткове зрушення фаз реалізується в модуляторі.

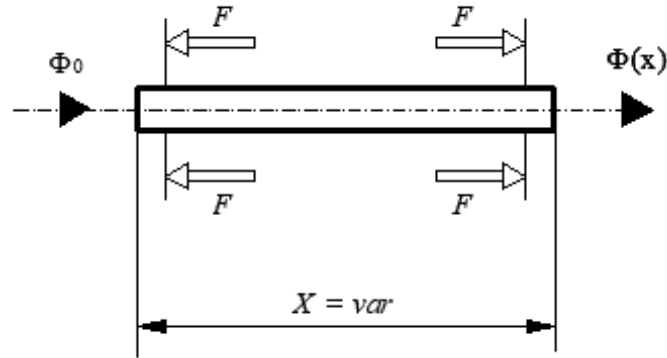


Рисунок 2.5 – Узагальнені схеми ВОА фазової модуляції

Контрольована величина генерує додаткове зрушення фази $\Delta\varphi$ між променями, що інтерферують, який впливає на інтенсивність результуючого сигналу. Інтенсивність останнього описується залежністю

$$Y(t) = A(t) + V(t)\cos(\Delta\varphi),$$

де $A(t)$, $V(t)$ – випадкові процеси інтерференційного процесу.

Таким чином, додаткове зрушення фази $\Delta\varphi$ функціонально залежить від контрольованої фізичної величини.

Фазові ВОА, залежно від форми взаємодії контрольованої величини й ДФ з каналами інтерферометра, підрозділяються на два типи. До першого типу ставляться системи, у яких здійснений принцип "симетрії" вимірювального й опорного каналів щодо факторів, що впливають, і неконтрольованих складових функцій перетворення й "асиметрії" щодо інформативних вимірюваних величин. Відповідно в структурі перетворювачів присутні два канали, "симетричні" щодо впливу ДФ і "асиметричних" щодо інформативної вимірюваної величини. Реалізуються перетворювачі даного типу, в основному, на одноволоконних структурах [63, 131].

Вплив температури для різних типів, ОБ, видів модуляції, схем реєстрації сигналу є найбільш загальним паразитним впливом. В умовах впливу температурного ДФ сумарний інтерференційний сигнал, що реєструється фотоприймачем, залежить від різниці оптичних шляхів, які долаються світловим потоком у

вимірювальному й опорному плечах інтерферометра. Фотострум приймача

$$I_{\phi n} = P_{\text{ex}} \tau S_{\phi n} [1 + \cos(\Delta\phi)] [a_0 + a_1 \Delta t + a_2 \Delta t^2],$$

де P_{ex} – потужність випромінювання лазера, Вт; τ – коефіцієнт пропускання оптичного каналу, обумовлений геометрією й властивостями оптичного каналу; $S_{\phi n}$ – коефіцієнт чутливості фотоприймача, А/Вт; $\Delta\phi$ – різниця фаз у плечах інтерферометра; a_0 – коефіцієнт зсуву нуля; a_1 – коефіцієнт температурного дрейфу нуля; a_2 – коефіцієнт температурного дрейфу чутливості; $\Delta t = t - t_0$ – відхилення значення температури від значення $t - t_0$, визначеного в якості точки відліку; F – контрольована фізична величина.

Тому при визначенні можливих величин чутливості зміни характеристик випромінювання в ОВ до зовнішнього впливу доводиться враховувати також, сигнал, що реально реєструється на вході модулятора, може містити в собі додаткові перешкоди, у тому числі й модуляційного характеру [134].

Зростання температури навколишнього середовища ініціює зміну геометричної довжини L (поздовжня деформація) і зміну діаметра (поперечна деформація) ОВ. Це пояснюється ефектом фотопружності, який знаходить своє відбиття в збільшенні величини показника заломлення n і пов'язаної з ним величини постійної поширення хвилі β . Зміни $\Delta\beta$ обумовлені різницею показників заломлення серцевини й оболонки ОВ Δn , а також поточним радіусом серцевини ρ . У загальному випадку залежність величини збільшення фази інформаційного сигналу при змінах температури представляється як [85]

$$\Delta\phi \frac{L_T n}{c} \left[\{1 - 0,5n^2 [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]\} \alpha_L + \frac{\partial n}{n \partial T} \right] \Delta T,$$

де p_{11}, p_{12} – коефіцієнти Поккельса; ν – коефіцієнт Пуассона; $\frac{\partial n}{\partial T}$ – температурний коефіцієнт зміни показника заломлення ОВ; L_T – довжина ділянки ОВ, що перебуває у високотемпературних умовах; α_L – результуючий коефіцієнт лінійного

теплого розширення ОВ; n – показник заломлення ОВ, пов'язаний з постійної поширення співвідношенням $n = \beta/k_0$, де k_0 – хвильове число.

Оцінку температурного впливу на роботу фазових ВОА можна виконати на основі загальноприйнятих даних $\partial a/\partial T$ і $\partial n/\partial T$: $\partial a/\partial T = 3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$; $\partial n/\partial T = -6,1 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$. Основні величини температурних змін матеріалу ОВ представлено в таблиці 2.2 [137].

Таблиця 2.2 – Температурні зміни у матеріалах *AgCl/AgBr*

$T, ^\circ\text{C}$	0	50	100	150	200	250
$\Delta n(T)$	0	$-3,05 \cdot 10^{-3}$	$-6,1 \cdot 10^{-3}$	$-9,15 \cdot 10^{-3}$	-0,0122	-0,0153
n_l	2,1106	2,1076	2,1045	2,10145	2,0984	2,09535
$\Delta \rho(T)$	0	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$
$\rho(T), \text{мкм}$	30,00	30,045	30,09	30,135	30,180	30,225

З останнього рядка таблиці 2.2 видно, що збільшення діаметра при температурах до $T = 200^\circ\text{C}$ становлять малу величину (0,7 %), так що для одномодового режиму поширення таке збільшення радіуса серцевини не вносить помітних змін. Напроти, зміни $\Delta n(T)$ впливають на характеристики моди. Результати розрахунків сталої поширення β при нагріванні для волокна *AgClBr* приводяться на рис. 2.6 [137]. Ефект змін ϵ , в основному, наслідком значного зменшення показника заломлення $n_l = 2,1106 \dots 2,09535$ при зростанні температури в діапазоні $T = 0 \dots 250^\circ\text{C}$.

На рис. 2.7 представлено зрушення величин сталої поширення з температурою фундаментальної моди $\Delta \beta_{10} = 0,00904 \text{ мкм}^{-1}$, що менше, чим ті ж зміни для вищих мод, наприклад $\Delta \beta_{11} = 0,00924 \text{ мкм}^{-1}$ при температурах $0 \dots 250^\circ\text{C}$ [137].

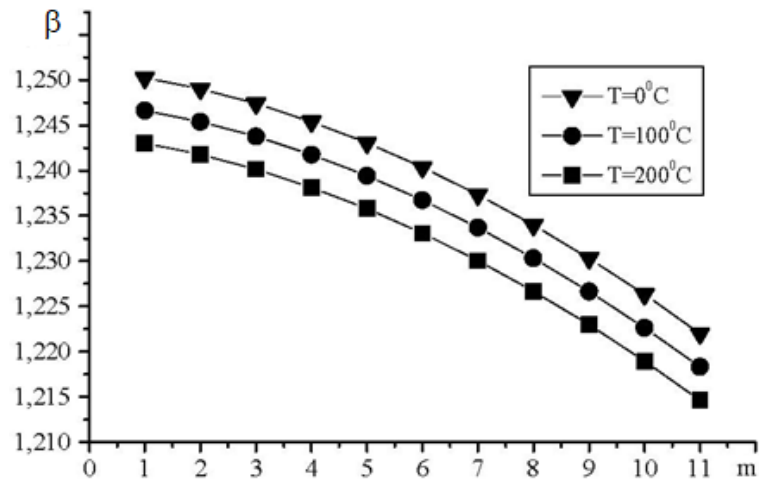


Рисунок 2.6 – Постійні поширення β мод ОВ $AgClBr$ з параметрами: $2a = 100$ мкм, $n_1 - n_2 = 0,05$; для холодного стану волокна ($T = 0$), і нагрітого на 100 і 200°C

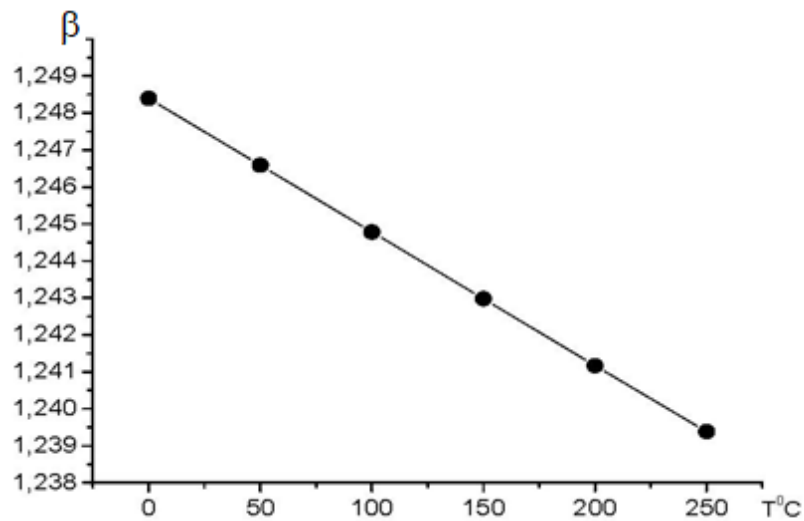


Рисунок 2.7 – Температурне зрушення сталої поширення $\beta_{01}(T)$, мкм $^{-1}$, для одномодового $AgClBr$ волокна

Використання даних [137] при розрахунках показує, що в одноволоконних ВОА величина термочутливості може досягати $d(\Delta\beta)/L\Delta T = 0,85 \dots 0,95$ рад/м·К [42]. Наведені дані дійсні для фазових ВОА, які використовуються без додаткових заходів по компенсації впливу ДФ.

З викладеного вище очевидно, що на різницю фаз між променями інтерферометра істотно впливає не тільки зрушення фаз φ_s .

Для фазових ВОА істотний внесок вносить повільно мінлива перешкодна температурна дрейфова складова φ_d , що характеризує вплив ДФ: $\Delta\varphi = \varphi_d + \varphi_s$ [43].

Процеси, що відбуваються, викликають зсув робочої точки з лінійної ділянки. Теоретично, для забезпечення стабілізації положення робочої точки інтерферометричного ВОА, можливо за рахунок регулювання розбалансу плечей інтерферометра.

Але, з оглядом на низьку швидкодію використовуваних п'єзоелектричних елементів регулювання, завдання забезпечення стабілізації з необхідними параметрами практично не може бути реалізовано. Крім механічної стабілізації робочої точки фотоприймача відомі інші підходи до розв'язування проблеми.

Відомий підхід полягає у досягненні компенсації дрейфової складової φ_d за рахунок зміни схеми інтерферометра. У цьому випадку положення робочої точки інтерферометра повністю визначається корисним впливом. Відповідно, робоча точка може бути стабілізована на лінійній ділянці шляхом уведення в схему інтерферометра петлі негативного зворотного зв'язку. У повному обсязі "взаємна конфігурація" використовується в схемі кільцевого волоконно-оптичного інтерферометра. Однак, уведення петлі негативному зворотного зв'язку відрізняється складністю й не гарантує нівелювання дрейфової складової в достатньому ступені. Крім того, стабілізація робочої точки з використанням петлі негативному зворотного зв'язку приводить до того, що сигналом помилки для зворотного зв'язку будуть обидві складові: φ_d і φ_s . Фактично, зсув робочої точки не можна буде розглядати як корисний сигнал. У таких умовах застосовується підхід, що припускає добування корисного інформаційного сигналу ВОА у цих умовах.

Відомі два методи обробки результуючого сигналу ВОА без стабілізації робочої точки інтерферометра: метод світлового гомодинування й гетеродинування. Метод оптичного гомодинування передбачає рівність частот двох мод

випромінювання, що інтерферують, й одержання вихідного сигналу, інтенсивність якого визначається як

$$I = I_1 + I_2 + \gamma 2(I_1 I_2)^{0.5} \cos \varphi_s,$$

де I – інтенсивність вихідного сигналу; I_1, I_2 – інтенсивності двох променів, що інтерферують; φ_s – різниця фаз між променями; γ – ступінь когерентності інтерференції.

На практиці, в умовах концентрованого впливу ДФ, добитися виконання рівності частот двох мод випромінювання, що інтерферують, без додаткових конструкційних заходів дуже складно. Що в значній мірі обмежує можливості даного методу.

Використання іншого методу передбачає розміщення в одному з оптичних каналів частотного зсувача й установку між модами випромінювання частотної різниці $\Delta\omega$. Тоді електричний фазово-модульований сигнал на фотоприймачі можна оцінити як

$$I = I_1 + I_2 + \gamma \cdot 2(I_1 I_2)^{0.5} \cos (\Delta\omega t + \varphi_s),$$

Таким чином, пилоподібний сигнал, що модулює, створює інтерферометричний відгук, який під зовнішнім впливом зміщається на різницю фаз, внесену цим впливом (φ_s).

Формально, використання такої модуляції дозволяє запобігти проблемі локалізації робочої точки інтерферометра, тому що вхідний вплив зсуває по фазі косинусоїдальний інтерферометричний відгук. Таким чином, зрушення фази оцінюється за період косинусоїдальної функції, а не в одній точці. Тим самим осереднюється вплив дрейфової складової φ_d .

Найбільше часто, у якості зсувача частоти використовуються акустооптичний модулятор або фазовий модулятор на основі п'єзокристалів або п'єзокераміки [42]. Обом типам модуляторів властиві істотні недоліки. Основними недоліками є:

– залежність затримки τ залежить від температури практично по квадратичному закону [114];

– "температурний удар" – флуктуації частоти, що виникли під дією температури й завдяки нелінійності коефіцієнтів твердості, пружним напруженням у тілі модулятора.

Поряд з перерахованими, до істотних недоліків можна віднести зменшення реалізованої глибини модуляції зі зростанням частоти модуляції, що накладає обмеження на використання пристроїв у високошвидкісних схемах.

До другого типу, залежно від форми взаємодії контрольованої величини й ДФ з каналами інтерферометра, належать системи, у яких здійснений принцип "асиметрії" вимірювального й опорного каналів щодо, факторів, що впливають, і неконтрольованих складових функцій перетворення й "асиметрії" щодо інформативних вимірюваних величин. Відповідно в структурі перетворювачів присутні два канали, "асиметричні" щодо дії факторів, що впливають, і "асиметричних" щодо інформативної вимірюваної величини. Реалізуються перетворювачі даного типу на основі двоволоконних структур [63].

Фазова чутливість до впливу температури на одиницю довжини ОВ визначається чутливістю до зміни довжини L і показника заломлення n [42]

$$\frac{1}{L} \frac{d(\Delta\varphi)}{dT} = \frac{k_0}{L} \left[L \frac{\Delta n}{n} \frac{dn}{dT} + \Delta n \frac{dL}{dT} + L \frac{\Delta n T_c}{T_c - T_{пл}} \right],$$

де T_c – температура навколишнього середовища; $T_{пл}$ – температура плавлення матеріалу оболонки.

Використання даних [137] при розрахунках показує, що у двоволоконних ВОА для ОВ із внутрішнім напруженням і $\Delta n = 2 \cdot 10^{-4}$ може бути досягнута термочутливість $d(\Delta\beta_s)/L\Delta T = 2,5$ рад/м·К, а для ОВ з анізотропією, створеною еліптичністю жили з $\Delta n = 8,5 \cdot 10^{-4}$, $d(\Delta\beta_s)/L\Delta T = 3,5 \cdot 10^{-3}$ рад/м·К [42].

2.2.2 Волоконно-оптичні перетворювачі з модуляцією поляризації світлового випромінювання

Поляриметричні перетворювачі належать до класу інтерферометричних, у яких вихідний сигнал вихідний сигнал залежить від стану поляризації світла (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 – Види та типи поляризаційних ВОА

У поляризаційно-обертальних перетворювачах використовуються спеціальні оптично активні матеріали, у яких спостерігається або виникає індукований зовнішнім впливом поворот еліпсоїда поляризації без зміни форми еліпса.

Волоконний поляриметричний перетворювач еквівалентний до двоплечевого інтерферометру Маху-Цендера. Принцип дії інтерферометра й поляриметричного перетворювача трохи різняться: в інтерферометрі вихідний сигнал визначається різницею ходу випромінювання в його плечах, а в поляриметричному - не стільки за рахунок різниці ходу, скільки за рахунок зміни двопромінезаломлення (ДПЗ) ОВ. Для забезпечення номінальних характеристик поляризаційно-обертального перетворювача необхідна підтримка поляризації введеного в передавальний ОВ випромінювання [132]. Із цією метою, перетворювачі створюються на основі спеціальних еліптичних ОВ.

Температурна залежність ДПЗ ОВ визначається як сума ефектів, що викликає флуктуації механічних напруг і геометрії хвилеводу

$$\frac{\partial B}{\partial T} = \frac{\partial (B_g + B_s)}{\partial T} = \frac{\partial B_s}{\partial T} - \frac{B_s(T_0)}{T_s - T_0},$$

де B_g – ДПЗ обумовлене геометрією ОВ; B_s – ДПЗ, ініційоване термопружними напругами; T_0 – температура навколишнього середовища; T_s – температура розм'якшення матеріалу ОВ, при якій відсутні напруги [92].

Геометричний ефект містить у собі як зміну геометричних параметрів серцевини ОВ при зміні температури, так і зміну коефіцієнтів заломлення матеріалів оболонки й серцевини й обумовлену ними зміна хвилеводного режиму.

Температурний коефіцієнт розширення серцевини у всіх еліптичних ОВ має порядок $\alpha = 10^{-6}$ 1/К. Таким чином, відносна зміна розмірів серцевини ОВ у діапазоні зміни температури від $T_s = 1183 \dots 293$ К складе величину порядку 10^{-3} , а відносна зміна ДПЗ при такій зміні геометрії складе величину порядку 10^{-5} , яка може бути неврахована в порівнянні з іншими ефектами.

Зміна коефіцієнта заломлення плавленого кварцу з температурою становить величину $9,7 \cdot 10^{-6}$ 1/К. Відносна зміна ДПЗ при зміні температури до 373 К для ОВ з еліптичною серцевиною становить близько 2 ... 4 %.

Фактор термостворених напруг – основний механізм ДПЗ в еліптичних волокнах. Температурний внесок нестабільності ДПЗ за рахунок механічних напруг становить близько 10 ... 12 % у діапазоні до 373 К, та теж зменшує ДПЗ ОВ. У підсумку, сумарний коефіцієнт відносної нестабільності такого волокна може досягати 16 %. При зовнішньому механічному впливі в ОВ виникає додаткове наведене двопрімінезаломлення. Це явище в загальному випадку векторно складається з наявним ДПЗ і в результаті виходить волокно з іншими поляризаційними характеристиками [92].

Третім фактором, що значно підвищує термочутливість поляризаційних ВОА, є необхідність установки поляризаторів і аналізаторів. Ці елементи, як

правило, повинні розташовуватися у місці одержання первинної інформації. Це пов'язано з можливою деполяризацією випромінювання або додатковим ДПЗ, яке можуть створити комунікаційні ОВ. Розташування поляризаторів, які створені на основі органічних плівок, у зоні концентрованого впливу вимірюваної й неконтрольованих величин суттєво обмежує область застосування поляризаційних ВОА (верхня межа робочих температур до 323 ... 333 К). Використання схрещених поляризатора й аналізатора, розташованих послідовно по світловому променю, викликає значні втрати в оптичній системі й зменшує потужність, що реєструється фотоприймачем, приблизно на два порядки. З урахуванням малої потужності джерел випромінювання, це приводить до зменшення динамічного діапазону поляризаційних ВОА.

2.2.3 Волоконно-оптичні перетворювачі амплітудної модуляції

Класифікація амплітудних ВОА на основі поняття "оптичний канал" дозволяє значною мірою уніфікувати й стандартизувати схеми перетворювачів та розподілити на три класи (рис. 2.9).

У ВОА першого класу (з відкритим ОК) зміни вимірюваної фізичної величини (ФВ) обумовлюють зміни умов поширення світла в розриві ОК у зоні вимірювань. До них ставляться перетворювачі прохідного, відбивного, атенюаторного, нефелометричного типів і перетворювачі з порушенням умови повного внутрішнього відбиття (ПВВ).

У ВОА другого класу зміни (із закритим ОК) ФВ обумовлює зміну умов поширення світла в ОК у зоні вимірювань. У цьому випадку зміни геометричних або фізичних параметрів волокна під дією вимірюваної ФВ ведуть до зміни інтенсивності випромінювання у ОВ. До них належать перетворювачі згинального, мікрозгинального, рефрактометричних й поглинаючого типів.

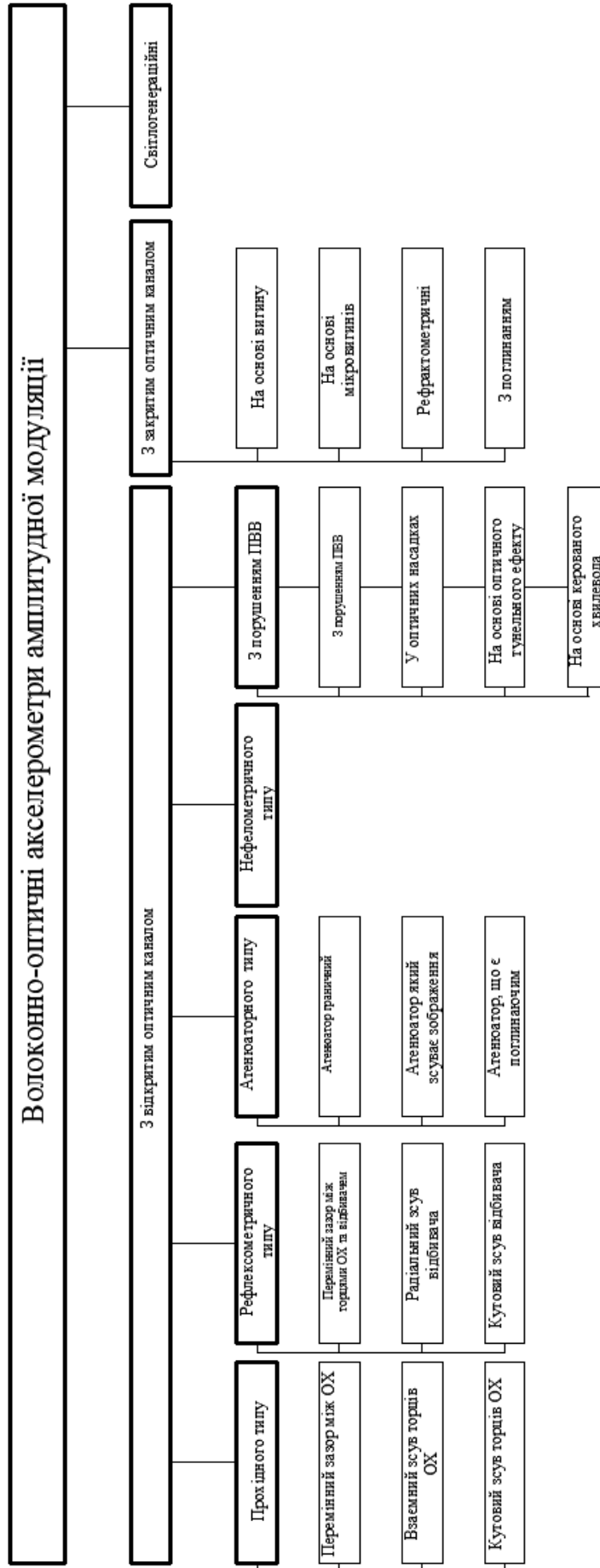


Рис. 2.9. Види та типи волоконно-оптичних акселерометрів амплитудної модуляції

У ВОА третього класу зміни вимірюваної ФВ обумовлюють зміни параметрів випромінювання світлогенераційних речовин, розташованих у зоні вимірювань. Ці перетворювачі належать до класу "без зовнішнього джерела випромінювання (ДВ)" [72]. Як видно (рис. 2.10, а, б) деструктивному впливу в процесі експлуатації піддаються відкриті торцеві поверхні й поверхні волокна, що контактують із деформуючими елементами перетворювача.

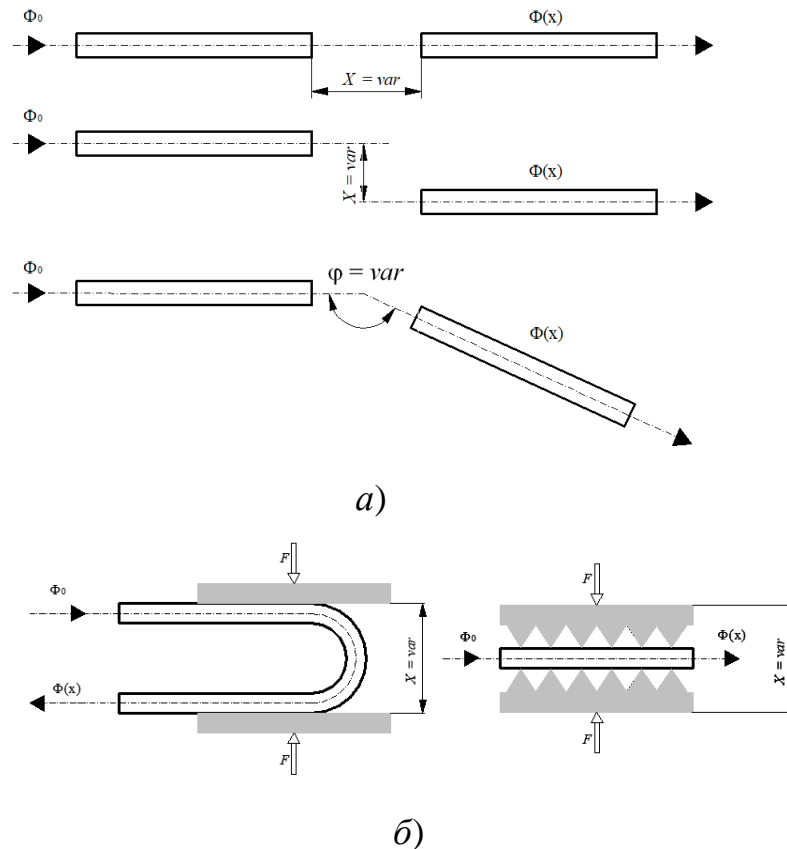


Рисунок 2.10 – Узагальнені схеми ВОА амплітудної модуляції зі:
а) – відкритим ОК; б) – закритим ОК

До факторів, що сприяють деструкції ОВ належать вплив вологи, кислотного й лужного середовища, механічні впливи на поверхню (рис. 2.11). Відомо [50, 60, 61], що якість торцевих поверхонь ОВ впливає на параметри й характеристики випромінювання у ВОА. Крім механічних ушкоджень поверхонь, що приводять до появи подряпин і шорсткості поверхні, існують і інші механізми утворення неоднорідностей. Це, зокрема, забруднення поверхонь,

проникнення й конденсація вологи на поверхні ОВ при різких перепадах температури, руйнування поверхонь під механічним впливом.

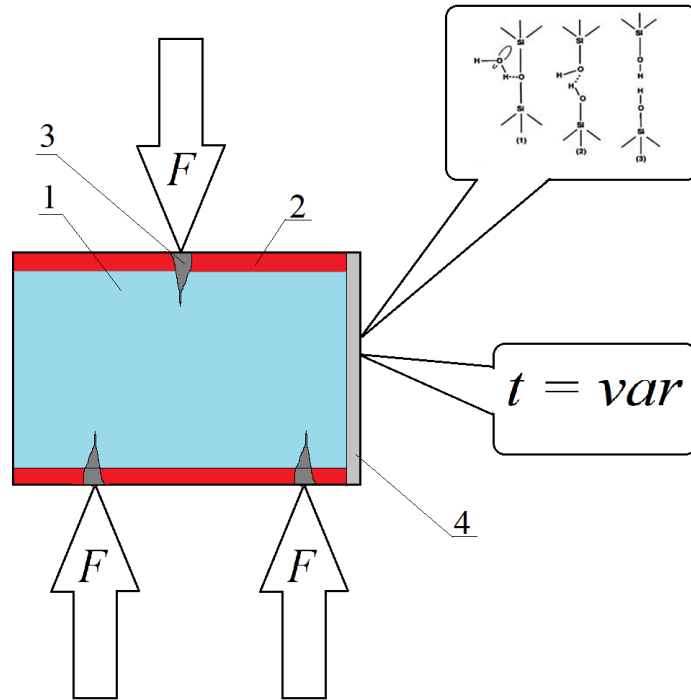


Рисунок 2.11 – Фактори, що впливають на параметри ОВ

Процес руйнування скляних матеріалів під дією вологи й в умовах високих температур викликаний стимульованим гідролізом. При цьому молекула води в кілька етапів вбудовується в напружений зв'язок $Si-O-Si$ і обриває її, замикаючи нові зв'язки воднем. Цей процес відбувається в поверхневому шарі скла.

Для відкритих поверхонь скла містковий зв'язок між іонами кремнію порушується, і утворюються два по-різному заряджені нестабільні “радикали”. Ці “радикали” демонструють більшу реакційну здатність до молекул середовища, у якому вони перебувають, особливо H_2O . Це означає, що в обох випадках атом кремнію з'єднується із групою OH , утворюючи угруповання $Si-OH$ - силанол. Силанольні групи хімічно реакційноспроможні: іон водню H відносно легко пересувається й може замінитися іншими з'єднаннями. На поверхні скла можуть таким способом з'являтися інші оксиди й при відомих умовах цілі шари. Потім

адсорбуються молекули води, утворюється стан рівноваги з водяними парами навколишньої атмосфери. Хімічно зв'язаний шар води має товщину 10^{-10} см і називається “постійний гідратований поверхневий шар”.

Механізми водної (гідролітичної) і кислотної корозії дуже подібні: в обох випадках відбувається вплив на катіони – модифікатори, особливо на реакційно-спроможні лужні іони.

Якщо гідролітична й кислотна корозія у звичайному склі незначна, то лужні розчини сильно роз'їдають майже всі стекла, розчиняючи навіть їх сітку. Інтенсивність корозії експоненціально збільшується з концентрацією лугу й з температурою.

По завершенню реакції з лугами, що перебувають на поверхні, взаємодія переноситься в шари, що розташовані нижче, долаючи перешкоду силікатних ґрат, а, отже, подальший процес є дифузійним. Цей процес відбувається тем інтенсивніше, чим більша кількість лугів містить скло й вище температура навколишнього середовища.

Шар, що утворювався в процесі реакцій, при цьому поступово товщає. Відповідно збільшуються пористість і площа поверхні. Така поверхня здатна адсорбувати воду й фізичним шляхом у результаті дії капілярних сил, причому вилужені поверхневі шари розбухають, утворюючи шар гелю кремнекислоти товщиною до 100 ... 200 нм. При подальшому росту товщини й пористості вилуженого шару вилуговування може переходити в глибинні шари, що викличе поступове руйнування ОВ.

При наявності дуже малої кількості води хід реакцій значною мірою змінюється. Вихідна гідролітична взаємодія із чистою водою переходить у лужну, яка підсилюється з ростом температури. При переході на лужний вплив розривається кремнеземистий каркас, і на поверхні скла утворюється зруйнований шар [61].

Очевидно, що утворювання постійних деструктурованих поверхневих шарів ініціює зміну шорсткості торцевих оптичних поверхонь. Дослідження в [50]

цього процесу показало, що підвищення ступеня шорсткості поверхні вхідного торця ОВ приводить до зміни ефективності введення й модового складу випромінювання (рис. 2.12) [136].

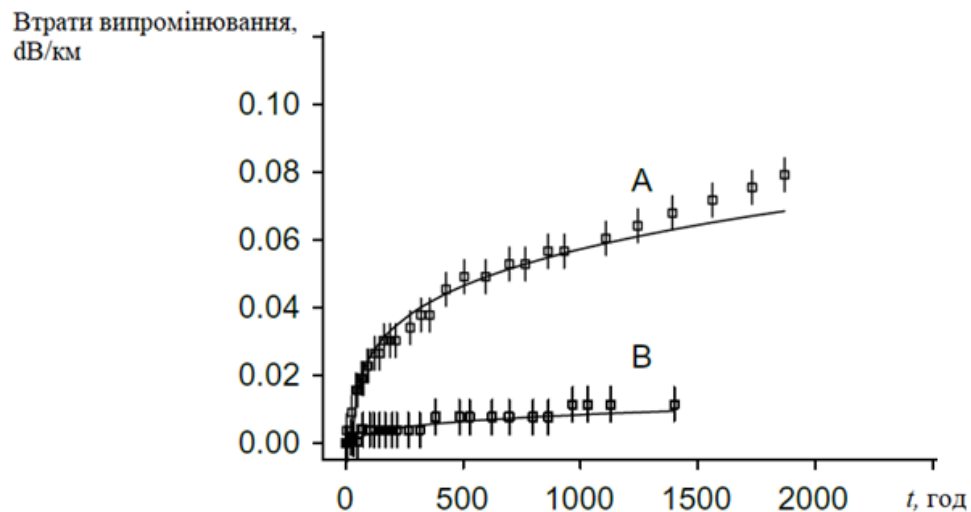


Рисунок 2.12 – Вплив луги на втрати в результаті водневого старіння для ОВ з лужним забрудненням: А – 1,35 ppm $Na+Li$; В – $< 0,3$ ppm

Очевидно, що утворення сталих деструктурованих поверхневих шарів ініціює зміну шорсткості оптичних торцевих поверхонь. З [51] відомо, що підвищення ступеня шорсткості поверхні вхідного торця ОВ приводить до зміни ефективності введення й модового складу випромінювання.

Результати експериментальних досліджень і розрахунків еквівалентного апертурного вводу й ефективності вводу для різних типів ОВ з різним ступенем шорсткості торця на довжині хвилі 0,63 мкм наведені на рис. 2.13 [51].

Таким чином, при розсіюванні світла на деструктурованих шарах, що утворилися на торці ОВ, порушення хвильоводних мод відбувається в більш широкому інтервалі кутів падіння плоскої електромагнітної хвилі. Відбувається дифузійне розсіювання на вхідному торці ОВ, у кутову апертуру надходить розсіяне випромінювання при кутах уведення $\gamma > \gamma_c$.

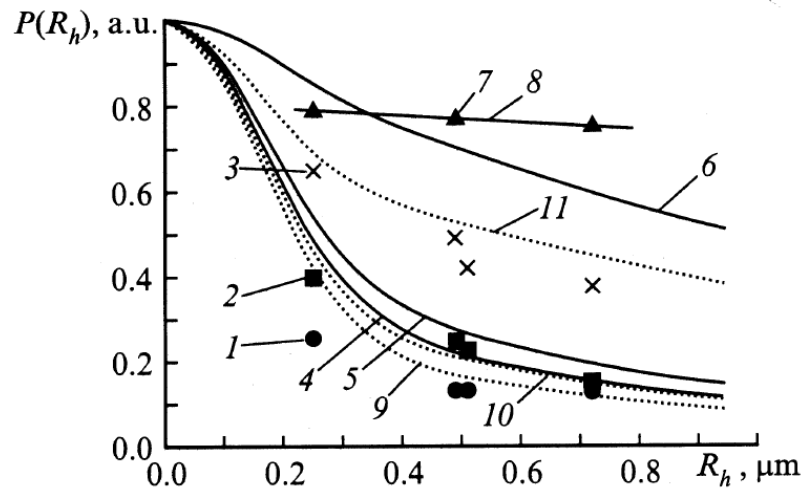


Рисунок 2.13 – Залежність ефективності вводу, як функції середньоквадратичної висоти шорсткості Rh для різних ОВ: 1-3 – експеримент; 4-6 – розрахунки; 7 – коефіцієнт ks (експеримент); 8 – лінійна апроксимація ks ; 9-11 – розрахунки з використанням (10); 1, 4, 9 – ОВ зі східчастим профілем показника заломлення (ППЗ), радіусом серцевини $a = 100$ мкм апертурним кутом за рівнем $1/e$, $\gamma_c = 4.34^\circ$; 2, 5, 10 – градієнтне ОВ 50/125, $a = 25$ мкм, $\gamma = 5^\circ$; 3, 6, 11 – "кварц-полімер", $a = 100$ мкм, $\gamma = 12,4^\circ$

Таким чином, характеристика вводу ОВ з деструктурованим шаром на торці еквівалентна до аналогічної характеристики ОВ з торцем, що не має розсіювання, але має більший апертурний кут γ^* та меншу ефективність.

При взаємодії бічної поверхні волокна з елементами-деформерами вимірювального перетворювача, в умовах впливу ДФ, процес деструкції ОВ протікає у два етапи.

На першому етапі зміна контрольованої фізичної величини ініціює контакт деформерів і бічної поверхні ОВ. Взаємодія відбувається не по всій поверхні, а по меншій поверхні контакту, обумовленої мікроскопічними нерівностями поверхні обох елементів.

Для спектра вектору інтенсивності світла I_θ осі, що поширюється в напрямку осі z , локальні мікроскопічні неоднорідності поверхні хвилеводу еквівалентні просторовим флуктуаціям (n ефективного показника заломлення $n(r)$ щодо його середнього рівня n_{cp}). Шорсткості поверхні ОВ генерують розподілений по

деформованій ділянці ОВ зв'язок між спектром порушуваних хвильоводних мод (ПХМ) і постійний і багаторазовий енергетичний обмін між компонентами вектору вхідного сигналу $y(z, t)$ (рис. 2.14) [59].

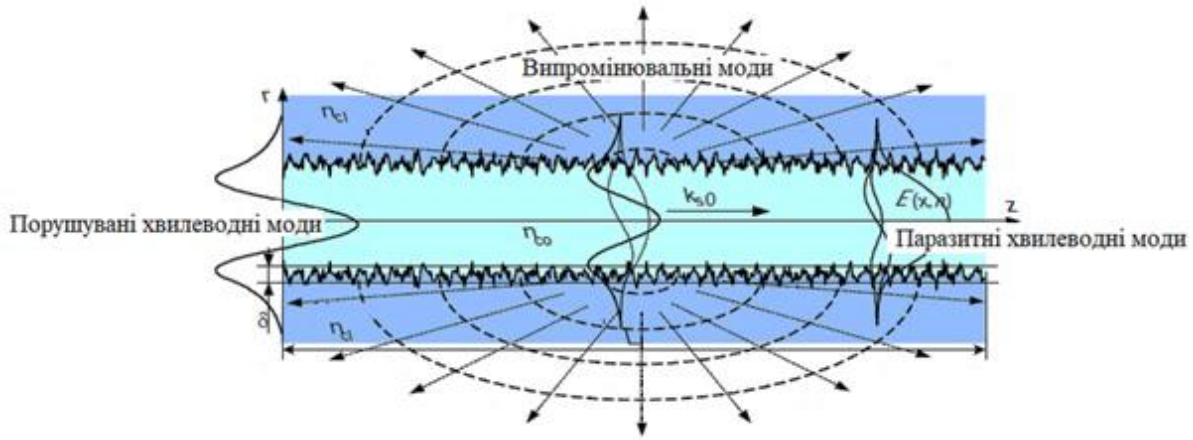


Рисунок 2.14 – Трансформація спектру мод у ОВ на шорсткуватій поверхні

Оцінка впливу на $y(z, t)$ флуктуацій оптичних неоднорідностей поверхні ОВ виконана в [59]. Енергетичний обмін між ПХМ, випромінювальними модами (ВМ) і паразитними модами (ПМ), при наявності шорсткості поверхні ОВ, викликає ріст радіаційних втрат випромінювання.

Установлено, що величина коефіцієнта радіаційних втрат, з урахуванням дискретного характеру енергетичного спектра шорсткості може бути оцінена як

$$\alpha_m = \sum_i \int_0^{\pi} \alpha_i (\vartheta^* \beta^*) \frac{\partial K_0(\vartheta^*)}{\partial \vartheta} \alpha + \sum_i \int_{\frac{\pi}{2}-\Theta}^{\frac{\pi}{2}+\Theta} \alpha_i (\vartheta^* \beta^*) \frac{\partial K_0(\vartheta^*)}{\partial \vartheta} i,$$

де K_0 – складова енергетичного спектра $G(K)$, що задовольняє умові синхронізації; ϑ^* , β^* – кути ковзання ВМ і ПХМ щодо нормалі до ОВ; i – індекс підсумовування по гармоніках дискретного енергетичного спектра шорсткості; Θ – критичний кут уведення світлового випромінювання у хвильвід.

У підсумку світло, уведенне до ОВ, у процесі поширення перетерплює розсіювання на шорсткості поверхні й випромінюється в навколишнє середовище.

На рис. 2.15 а, б наведені розподіли інтенсивності розсіювання випромінювання для двох ОБ з поверхнями, що мають різну шорсткість [76].

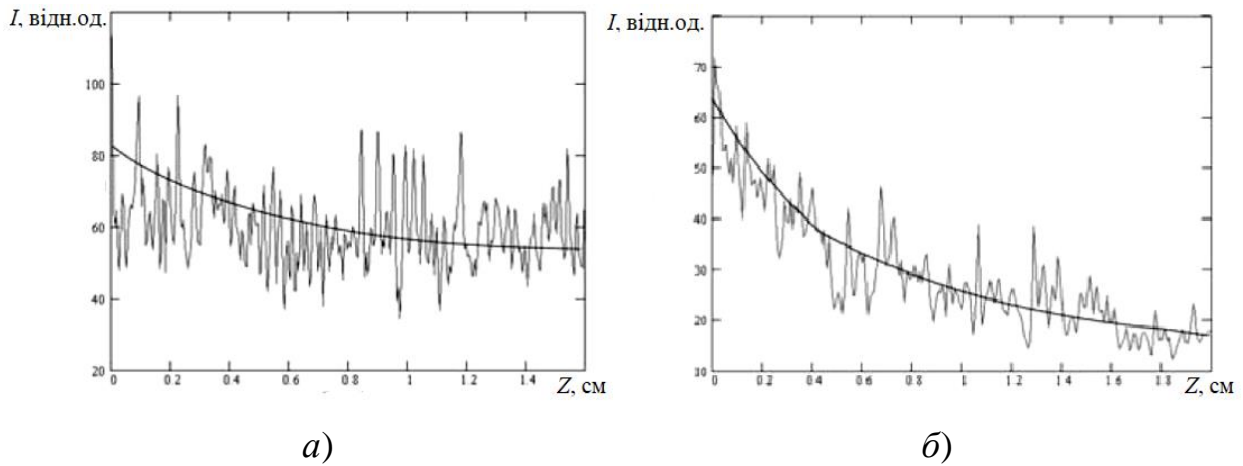


Рисунок 2.15 – Розподіл інтенсивності треку уздовж напрямку поширення хвилі (z): а – коефіцієнт загасання $\alpha \approx 0,3 \text{ см}^{-1}$; б – $\alpha \approx 0,6 \text{ см}^{-1}$

Тим самим, створюються умови для паразитної модуляції інформаційного сигналу й погіршенні метрологічних характеристик вимірювального перетворювача [99]. На другому етапі, у місцях локальних контактів на поверхні ОБ утворюються мікротріщини, що визначають механічну міцність матеріалу ОБ.

У вершинах цих тріщин і перебувають напружені зв'язки $Si-O-Si$. Волога з навколишнього середовища проникає крізь полімерну оболонку й, при наявності напруженого зв'язку, ініціює процес зростання тріщини у вигляді термомеханічного стимульованого гідролізу, тривалість якого визначається як

$$\tau = \tau_0 C^{-\alpha} \exp((U - K\sigma) / RT),$$

де: τ – тривалість процесу руйнування; τ_0 – період атомних коливань (10^{-13} с); α – порядок реакції гідролізу; K – константа, що характеризує дефектність зразка; C – відносна вологість; U – енергія активації гідролітичного розриву зв'язку Si-O; R – газова постійна; T – температура; σ – напруга.

Після логарифмування попереднього рівняння та з урахуванням рівності порядку реакції гідролізу одиниці

$$\ln \tau = \ln \tau_0 - \ln P_{H_2O} + \ln P_{H_2O}^0 + ((U - K\sigma) / RT),$$

де P_{H_2O} – тиск водяної пари, $P^o_{H_2O}$ – тиск насиченої водяної пари, що залежить від температури.

З останнього рівняння випливає, що при P_{H_2O} , що дорівнює 0, $ln\tau$ дорівнює нескінченності, що не відповідає дійсності. Тому очевидно, що існує граничний рівень P_{H_2O} , подальше зниження якого не приводить до підвищення міцності волокна. При цьому механогідролітичний процес руйнування ОВ трансформується в термофлуктуаційний. Характер зміни міцності ОВ під впливом механогідролітичного й термофлуктуаційного процесів руйнування представлений на рис. 2.16 [106].

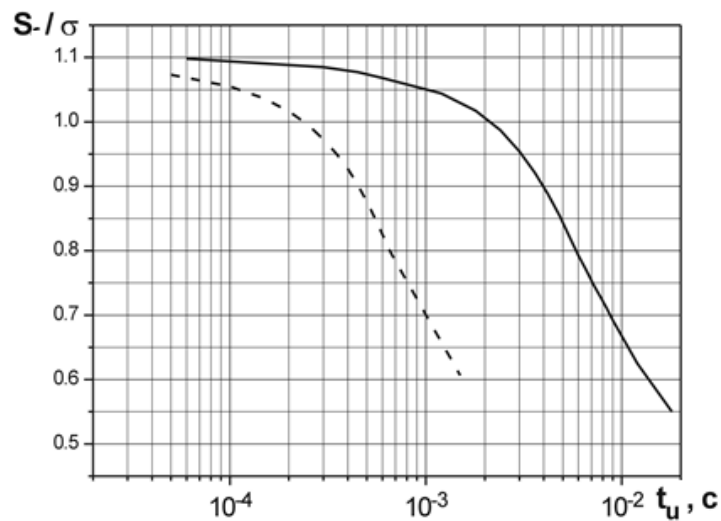


Рисунок 2.16 – Результати розрахунків мінімальної інертної міцності σ після контрольного тесту від часу розвантаження при обліку впливу областей обмеженого дифузії й термофлуктуаційного збільшення тріщини для ОВ з подряпинами або вплавленими частками у захисному полімерному покритті (суцільна лінія), а також для індетованих ОВ без покриття (пунктирна лінія)

У той же час ВОА з відкритим ОК мають ряд інших недоліків: вони мають низьку чутливість перетворення, неоптимізовану конструкцію внаслідок труднощів математичного опису моделі, низьку стійкість оптичної системи до змін конструктивних параметрів, що суттєво знижує метрологічні характеристики ІВС [58].

На основі аналізу процесів руйнації скляних матеріалів під впливом фізико-

механічних факторів зроблено такі висновки: найменшою мірою під вплив підпадають перетворювачі з закритим ОК; при деформації ЧЕ слід уникати впливу на його бічну сторону; існує необхідність застосування методів автокорекції впливу ДФ на характеристики ВОА.

2.3 Обґрунтування методу автокорекції впливу дестабілізуючих факторів на характеристики ВОА

Специфічність умов експлуатації, що впливають на характеристики ВОА, залежить від характеристик контрольованої величини, кліматичних факторів навколишнього середовища, впливу електромагнітних і вібраційних полів компактно розташованого встаткування СЕУ, параметрів живильних мереж, а також режиму здійснення вимірів. Для компенсації погрішностей вимірювань, що ініціюються ДФ, застосовується ряд методів.

Найбільше широко використовуваним методом, ефективним для зменшення погрішностей вимірювальних перетворювачів є конструктивно-технологічний метод, що базується на виявленні джерел найбільш вагомих погрішностей і максимальному зниженні їх впливу.

Основні прийоми конструктивно-технологічного методу полягають у термостатуванні, застосуванні прецизійних деталей і елементів, матеріалів зі стабільними характеристиками. Можливості методу обмежені, пов'язані з апаратною надмірністю й високою собівартістю вимірювальних перетворювачів.

Наступний метод підвищення точності – метод статистичної обробки результатів багаторазових вимірювань контрольованої величини x . Припускає використання перетворювачів з тимчасовим поділом каналів і багаторазовими вимірюваннями. За допомогою ВОА, у результаті n вимірів контрольованої

величини x одержують ряд значень y_1, y_2, \dots, y_n вихідної величини. Отримані значення являють собою суму номінального значення контрольованої величини $y = f_n(x, a_{1k}, \dots, a_{kn})$ (тут a_{1n}, \dots, a_{kn} параметри функції перетворення ВОА) і погрішності перетворювачі Δ_j :

$$y_1 = y + \Delta_1;$$

$$y_2 = y + \Delta_2;$$

.....

$$y_k = y + \Delta_k.$$

Оброблені методами математичної статистики результати осереднюють. Приймають, що погрішність середнього y $k^{0,5}$ раз менше погрішності окремого виміру, якщо n - загальне число вимірів. Застосування даного методу може бути доцільним тільки при виконанні ряду умов:

- контрольована величина повинна залишатися незмінною в процесі n спостережень;

- випадкова складова погрішності ВОА повинна бути переважною, тому що у випадку переваги систематичної складової, багаторазові вимірювання несуттєво будуть позначатися на точності вимірювань;

- часовий інтервал, що розділяє окремі вимірювання, повинен перевищувати інтервал кореляції випадкової функції, що описує погрішність перетворювача. Тобто повинна бути реалізована практична незалежність результатів вимірювань. Чим більше інтервал між окремими вимірюваннями й чим більше цих вимірювань, тем "стійкіше" значення середнього. Якщо інтервали між спостереженнями більше інтервалу кореляції T , тобто коефіцієнт кореляції для значення T близький до 0, то можна вважати значення погрішностей незалежними. Таким чином, погрішність усередненого результату вимірювань можна вважати в $k^{0,5}$ раз менше погрішності окремого вимірювання, тільки якщо інтервал між повторними вимірюваннями забезпечує практичну незалежність значень погрішності (що реалізується, якщо коефіцієнт кореляції близький до нуля) [63].

Однак перша й третя умови на практиці не часто виконуються спільно, тому що вимірювана величина не залишається незмінною протягом декількох вимірювань, відокремлених один від іншого інтервалом кореляції.

Наступний метод зменшення некорельованих складових погрішностей ВОА заснований на статистичній обробці результатів багатоканальних вимірювань. Виміри контрольованої величини проводяться за допомогою k ідентичних паралельних каналів.

Виключення динамічної погрішності Δ_{din} досягається за рахунок зрівнювання часу, необхідного для k вимірів із часом одного вимірювання. Однак на результати методу впливає погрішність, ініційована неідентичністю каналів вимірювання.

З викладеного випливає, що методи статистичної обробки результатів багаторазових і багатоканальних вимірювань є ефективними й доцільними лише в області зниження некорельованих погрішностей перетворювачів.

Для компенсації постійних систематичних погрішностей застосовують такі методи як методи введення виправлень, заміщення й компенсації погрішностей за знаком. У СТД ГТУ, до основного компоненту у загальній погрішності вимірювань належать тимчасові систематичні погрішності, генеровані впливом експлуатаційних контрольованих і неконтрольованих ДФ. Величини ДФ не відомі в достатньому обсязі і тому систематичні погрішності, що залежать від них, змінні та проявляють себе як випадкові функції часу. Відмінність змінних систематичних погрішностей від випадкових погрішностей полягає в тому, що вони являють собою нестационарні випадкові функції, що повільно змінюються за часом. Компенсація змінних систематичних погрішностей досить складна й вимагає додаткових заходів.

Якщо розглядати ВОА як динамічні системи, то принцип інваріантності цілком може бути застосований до даного типу пристроїв. Існує певна структурна ознака реалізуємості умови інваріантності. Необхідна вимога до структури

системи сформулюється як принцип двоканальності: у динамічній системі повинно бути, щонайменше, два канали впливу збурювання на координату, інваріантність якої від цього збурювання повинна бути забезпечена. Дійсно, усунути вплив збурювання, вплив якого передається по одному каналу, можна лише шляхом розриву цього каналу. У цьому випадку порушується сама динамічна система. Якщо ж вплив збурювання передається по двом каналам – по двом ланцюжкам елементів, то не виключена можливість підібрати елементи так, щоб ці ланцюжки передавали вплив з однаковою інтенсивністю, але з різними знаками. Тоді сумарний вплив буде дорівнює нулю й координата на виході ланцюжків буде незалежна від збурювання. Аналогічний результат можна одержати й при впливі збурювання на координату системи більш ніж по двом каналам [63].

Обґрунтованість принципу двоканальності підтверджена математично.

Згідно з умовою інваріантності повинне виконуватися наступна тотожність

$$wf(S) = 0, \quad (2.1)$$

де $wf(S)$ – передатна функція системи щодо збурювання $f = f(t)$. Для того щоб (2.1) виконувалося, потрібно, щоб $wf(S)$ була не менш як сума двох передатних функцій

$$w_f(S) = \sum_{i=1}^v w_i(S), \quad w \geq 2.$$

Функція $wf(S)$ повинна являти собою передатну функцію паралельного з'єднання двох вимірювальних каналів. Принцип двоканальності попереджає пошуки спроби повної реалізації умови інваріантності, якщо в системі є лише один канал впливу збурювання. Крім того, принцип двоканальності служить відправною точкою при синтезі інваріантних систем: існування тільки одного каналу впливу збурювання свідчить про необхідність створення другого каналу [69, 82].

Невиконання умови інваріантності (2.1) або відсутність як мінімум двох каналів впливу збурювання вказують на неможливість реалізації абсолютно

Виконання умов (2.7) зводиться до наступного: у ВОА необхідно створити канал, що компенсує, використовуваний для досягнення умови абсолютної інваріантності (2.5).

Якщо передатна функція такого каналу, що компенсує, може бути представлена у вигляді раціонального дробу

$$X = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n}, \quad (2.8)$$

тоді визначення умов інваріантності полягає в перевірці умови $m \leq n$, де m і n – показники ступеня поліномів у чисельнику й знаменнику передатної функції (2.8).

Можливість схемотехнічного рішення каналів, що забезпечують інваріантність, визначається виглядом передатних функцій, що характеризують ці канали.

Для фізичної реалізації принципу багатоканальності застосовують ВОА, у яких:

- вимірювана величина й збурювання впливають на входи обох каналів;
- вимірювана величина впливає лише на один канал, а другий служить тільки для передачі збурювання.

Поряд з методами багатоканальності, відомі методи зменшення змінних систематичних погрішностей, що базуються на введенні до ВОА структурної або тимчасової надмірності. Суть методу полягає у введенні в структуру перетворювача додаткових коригувальних каналів або виконанні додаткових вимірювань. Останнє допускається у випадку використання одного вимірювального каналу й обробці вихідного сигналу по спеціальному алгоритму, що підвищує точність і стабільність вимірювань [63].

Використання негативного зворотного зв'язку, як коригуючого каналу перетворювача, дозволяє зменшити як мультиплікативну погрішність, так і погрішність нелінійності. У той же час перетворювачам, створеним на базі вищезгаданого методу, властивий ряд недоліків, а саме (збільшення глибини зворотному

зв'язку приводить до погіршення якості перехідних процесів і зниженню запасу стійкості. Що в підсумку відбивається на зміні динамічних властивостей замкненої системи ВОА.

Метод допоміжних вимірів використовується для компенсації легко визначених ДФ при відомому виді залежності погрішностей від факторів, що впливають. Основний недолік методу, що обмежує його застосування, полягає у тому, що потрібно стільки каналів вимірювань, скільки зовнішніх факторів передбачається скорегувати, а також те, що для компенсації впливу кожного ДФ потрібно окремий додатковий засіб вимірювань [87].

Ітераційний метод корекції погрішностей заснований на багаторазовому уточненні результату, з одержанням кожного наступного результату з попереднього. Остаточний результат вимірювань визначається шляхом послідовних наближень [18, 116].

Перевагою ітераційних методів є можливість коригування загальної погрішності ВОА поза причин, що її викликали. Недолік, що обмежує можливості методу полягає в необхідності використання високоточного зворотного перетворювача. У свою чергу, досягнення максимально можливої точності стримують наступні фактори: погрішності цифро-аналогового перетворювача, вхідного перемикача, випадкові погрішності й нестабільність характеристики вимірювального тракту, що коригується. Крім того, проведення декількох циклів корекції одного вимірювання знижують швидкодію вимірювальних пристроїв у цілому.

Методи зразкових мір полягають у визначенні реальних значень параметрів функцій перетворення ВОА шляхом циклічного й поетапного відключення від входу перетворювача контрольованої величини й підключення зразкових мір. Використання методу дозволяє, незалежно від причин виникнення, компенсувати, деякою мірою, адитивну, мультиплікативну й погрішність нелінійності перетворювача. Обмежує можливості методу необхідність циклічного почергового підключення вимірюваної величини й зразкових мір, використання великого

набору адекватних ДФ зразкових мір при істотній нелінійності функції перетворення перетворювача. Метод дозволяє зменшити систематичні погрішності, на випадкові погрішності можуть збільшитися [126].

2.4 Висновки до розділу 2

1. Проведена оцінка стабільності характеристик ВОА в умовах впливу ДФ показав доцільність акцентування наукових досліджень у напрямку розробки простих, надійних і універсальних зі схемотехнічних рішень волоконно-оптичних перетворювачів, принцип дії яких заснований на модуляції величини інтенсивності світлового випромінювання під дією вимірюваної величини.

2. Більшість ВОА амплітудної модуляції забезпечують найбільш просте мультиплексування сигналів в ІВС, не вимагають когерентних ДВ й можуть бути виготовлені з відносно дешевих волоконно-оптичних компонентів.

3. Виконаний аналіз використовуваних методів підвищення точності й стабільності ВОА показав, що компенсація некорельованої складової погрішності перетворювачів найбільше раціонально виконувати на основі методів інваріантних перетворень, заснованих на принципі багатоканальності.

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ МОДЕЛІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПІ- ДШИПНИКІВ ГТУ

3.1 Методи, припущення й математичний апарат дослідження

Найбільш поширений у виробництві волоконно-оптичних компонентів метод осадження з газової фази полягає у формуванні стрижневої заготовки шляхом подачі усередину опорної кварцової трубки струменя хлорованого кварцу й кисню. У результаті високотемпературної хімічної реакції на внутрішній поверхні трубки шарами осаджується кварц. Шар кварцу надалі служить серцевиною волокна, а трубка виконує роль оболонки. Подальше переохолодження скляної маси, що перебуває в газовій фазі й розплаві, ініціює формування концентричних граничних структур [1, 49, 118].

З оглядом на механізм та технологію створення ОВ прийняте припущення, що структура ОВ, що сформувалося, складається з однорідної серцевини радіусом ρ з матеріалу з показником заломлення n_{co} , і концентричної оболонки з матеріалу з показником заломлення $n_{cl} < n_{co}$. На межі розділу середовищ параметр відносної діелектричної проникності ϵ змінюється стрибком. У структурі світлові промені поширюються по зигзагоподібній траєкторії уздовж ОВ зі східчастим ППЗ за рахунок повного внутрішнього відбиття на межі розділу серцевина-оболонка. Така модель поширення світлового випромінювання є відносно приблизною. Оцінка процесів в ОВ у рамках променевої моделі дає задовільні результати в тих випадках, коли радіус серцевини ρ перебільшує довжину хвилі випромінювання λ . Для випадку, коли $\lambda \approx \rho$, променеве наближення вже не дає потрібної точності й необхідно використовувати електромагнітний аналіз, заснований на рівняннях Максвелла. Ступінь застосовності променевої моделі для аналізу

процесів у конкретному ОВ оцінюється за допомогою хвильового параметра V [108]. На відміну від геометричного, хвильовий аналіз ОВ на основі рівнянь Максвелла, дає можливість розглядати процеси поширення світла не тільки тоді, коли розміри системи, що формує світловий пучок, набагато більше довжини хвилі, але й при будь-якому співвідношенні між ними.

Рівняння Максвелла в диференціальній формі слушні для лінійних середовищ, параметр ϵ яких або не залежить від координат, або є безперервною функцією координат [2, 49, 108].

Для повного визначення поля такої структури в рівняннях Максвелла задаються граничні умови (співвідношення, що визначають зв'язок між значеннями векторів електромагнітного поля в контактуючих середовищах у поверхні розділу).

Шукані граничні умови виходять із рівнянь Максвелла шляхом інтегрування їх за об'ємом, що обирається на межі розділу середовищ. У результаті всіх перетворень отримується характеристичне рівняння

$$U \frac{J_1(UR)}{J_0(U)} = W \frac{K_1(WR)}{K_0(W)},$$

де J_0 – функція Бесселя першого роду; K_0 – модифікована функція Бесселя другого роду; U і W – скалярні параметри моди для серцевини й оболонки пов'язані з параметрами ОВ співвідношеннями $V^2 = U^2 + W^2$; $V = k \rho (n^2_{-3} - n^2_{cl})^{1/2}$.

Постійна поширення моди β пов'язана з U співвідношенням

$$\beta \frac{V}{\rho \sqrt{2\Delta}} \left(1 - 2\Delta \frac{U^2}{V^2}\right)^{0,5}.$$

Друге припущення обумовлене характером збурювання параметрів під дією контрольованої величини. До найпоширеніших впливів на ОВ, що генеруються механічними коливаннями можна віднести: симетричне навколо осі радіальне стискування, вигин, крутіння, спіральне укладання, плоске здавлювання, розтягання.

В [108] наведені наступні види збурювання параметрів ОВ, що виникають у результаті зовнішнього впливу.

Однорідні зміни профілю показника заломлення еквівалентні зміні показника заломлення на постійну величину в деякій області поперечного перерізу. У цій області профіль показника заломлення збуреного ОВ має вигляд

$$n(x, y) = n_0(x, y) + \Delta n,$$

де Δn - постійна величина.

Тоді

$$\beta = \bar{\beta} + k \bar{\eta}_p \Delta n,$$

де $\bar{\eta}_p$ - частина повної потужності необуреної моди, що протікає через поперечний переріз A області збурювання, тобто

$$\bar{\eta}_p = \int_{A_p} \bar{\psi}^2 dA / \int_{A_\infty} \bar{\psi}^2 dA, \quad (3.1)$$

де $\bar{\psi}$ - відомі розв'язки скалярного рівняння збуреного ОВ.

З (3.1) випливає, що чим більше частина потужності моди в області збурювання, тим більше відмінність між β і $\bar{\beta}$. Щоб одержати кількісну оцінку, необхідно в (3.1) підставити вираження для $\bar{\psi}$.

Однорідні зміни показників заломлення серцевини й оболонки. Якщо в ОВ показник заломлення серцевини всюди відрізняється від показника заломлення незбуреного ОВ на Δn_{co} , тоді в (3.1) можна покласти $\bar{\eta}_p = \bar{\eta}$, $\Delta n = \Delta n_{co}$, де $\bar{\eta}$ - частка потужності моди, що поширюється по серцевині. Частка потужності в оболонці рівна $1 - \bar{\eta}$, тому якщо показник заломлення оболонки відрізняється на Δn_{cl} від відповідного параметра незбуреного ОВ, то постійна поширення в обуреному ОВ визначається співвідношенням

$$\beta = \bar{\beta} + k [\bar{\eta} \Delta n_{co} + (1 - \bar{\eta}) \Delta n_{cl}],$$

де $k = \pi/\lambda$ і λ – довжина хвилі у вакуумі. У цьому випадку постійна поширення не залежить ні від форми поперечного перерізу ні від профілю показника заломлення.

Тришарове ОВ. Якщо в незбуреному ОВ, із серцевиною радіусом ρ , ППЗ $n(r)$ і оболонкою з однорідним показником заломлення n_{cl} , є присутнім третя область із показником заломлення $n_0 \approx n_{cl}$, тоді, через малість $\Delta n = n_0 - n_{cl}$, збурювання є слабким і постійна поширення моди згідно (3.1) визначається як

$$\beta = \bar{\beta} + k \bar{\eta}_p (n_0 - n_{cl}),$$

де $\bar{\eta}_p$ – частина потужності моди, що поширюється в області $r > \rho$.

Збурювання у вигляді тонкої проміжної оболонки являє собою тонке концентричну область товщиною $\Delta\rho$ і з показником заломлення n_0 .

Оскільки $\Delta n = n_0 - n_{cl}$, то з (3.1) випливає, що для основних мод східчастого ОВ

$$\beta = \bar{\beta} + 2(n_0 - n_{cl})k \frac{\Delta\rho}{\rho} \left[\frac{UK_0W}{K_1W} \right]^2,$$

де K_1 – модифікована функція Бесселя другого роду.

Третє припущення обумовлене тим, що як розподіл потужності основної моди по поперечному перерізу одномодових ОВ зі ступеневим законом зміни ППЗ у серцевині, так і максимальне значення хвилеводного параметра V в основному залежать від "об'єму" профілю показника заломлення, пропорційного до інтегралу від розподілу показника заломлення по поперечному перерізу серцевини. Це дає підставу розглядати збурений ОВ з позицій методу показника заломлення рівного об'єму.

Четверте припущення пов'язано з визначенням ОВ у вигляді концентричної багат шарової східчастої структури. У цьому випадку доцільно повне поле ОВ оцінювати як суперпозицію незбурених полів кожного шарі хвилеводу [14, 66, 97, 108].

П'яте припущення пов'язане з використанням дискретної розрахункової схеми для концентричної шаруватої структури ОВ. У такій структурі напруга в межах кожного шару вважається постійною [40, 41, 75, 86, 122]. Кожному шару властиві свої механічні характеристики. Матеріал ОВ покладається абсолютно пружним, деформації такими, що не приводять до руйнування ОВ. Припущення дозволяє використовувати при розрахунках деформацій ОВ моделі класичної механіки суцільних середовищ, що підкоряються закону Гука для анізотропного тіла [16, 47].

3.2 Розробка структурної й метрологічної моделей інваріантного вимірювального перетворювача вібрації

Функціонування ВОА повинне здійснюватися відповідно до вимог, пропонує до засобів неруйнуючого контролю, і, відповідно до [33]. Однак використання ВОА ускладнюється необхідністю забезпечення достатньої завадостійкості й інваріантності до ДФ, створення необхідних і достатніх умов для забезпечення безперервних вимірів протягом тривалого періоду часу.

З метою створення оптимального схемотехнічного рішення ВОА потрібно розглянути й обґрунтувати варіанти структурної й метрологічної моделей перетворювача.

На основі аналізу потенційних можливостей ВОА амплітудної модуляції й методів корекції погрішностей волоконних вимірювальних перетворювачів застосовано наступний алгоритм синтезу структурної моделі (рис. 3.1) [8].

Модель складена відповідно до методології структурного синтезу систем як безліч завдань розвитку ВОА:

$$Task^3 = \{Task_i^3\}, i = 1, 2, 3, 4, 5,$$

де $Task_1^3$ – облік вимог до функціональної структури ВОА;

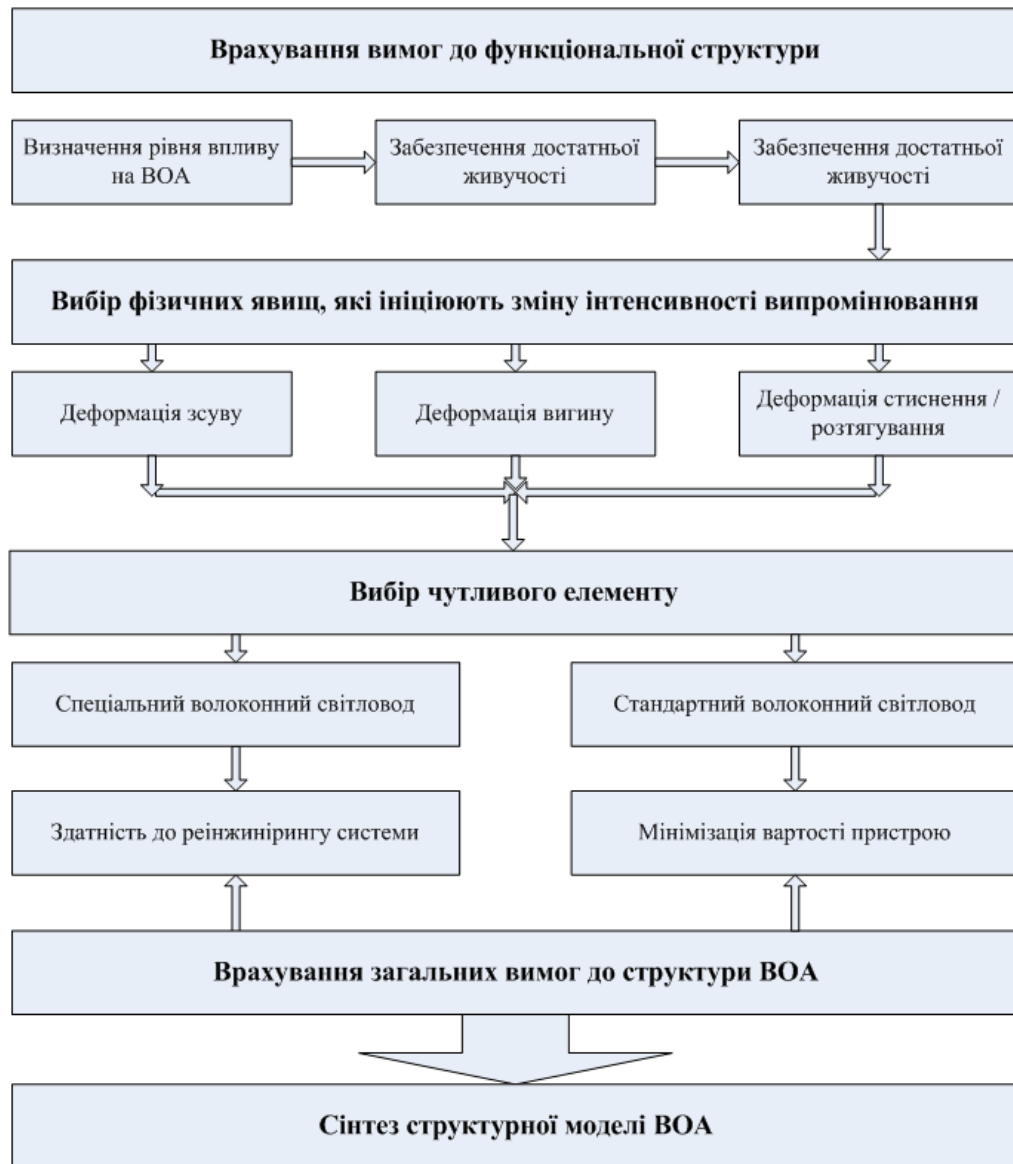


Рисунок 3.1 – Алгоритм синтезу структурної моделі ВОА

$Task_2^3$ – вибір фізичних явищ, які ініціюють зміну інтенсивності випромінювання; $Task_3^3$ – вибір чутливого елемента; $Task_4^3$ – облік загальних вимог до структури ВОА; $Task_5^3$ – побудова структурної моделі ВОА квазілінійного типу [17].

Функціональна структура амплітудного ВОА припускає обов'язкову наявність джерела випромінювання (ДВ) ОВ, що підводить випромінювання (ПОВ),

чутливого елемента (ЧЕ), оптичний волокна, що відводить випромінювання (ООВ) і фотоприймача (ФП). ЧЕ являє собою ланку, у якій відбувається перетворення фізичного впливу F_{ex} у зміну параметрів оптичного випромінювання [22].

Якщо розглядати отримані моделі ОВ, зі зміненням при деформації ППЗ, як шарувату структуру, то можливо наступне припущення. Взаємний зв'язок процесів, що відбуваються в шаруватих структурах серцевини й оболонки, дозволяє будь-яку довільну деформацію межі розділу середовищ апроксимувати послідовністю малих стрибків.

У межі при нескінченно великій кількості стрибків і нульовій висоті кожного стрибка, послідовністю стрибків можна замінити будь-яку довільну функцію. Перетворення моди багатьма стрибками є суперпозицією полів, що створюються кожним індивідуальним стрибком. Така модель досить проста, зручна й може бути застосовна до будь-якого типу поля, у тому числі й до більш складних полів круглого ОВ. Такій уяві ОВ найбільшою мірою, відповідає волокно, піддане деформації крутіння, при якій спостерігається практично лінійна залежність між змінами ППЗ і величиною деформацій зсуву (рис. 3.2) [97].

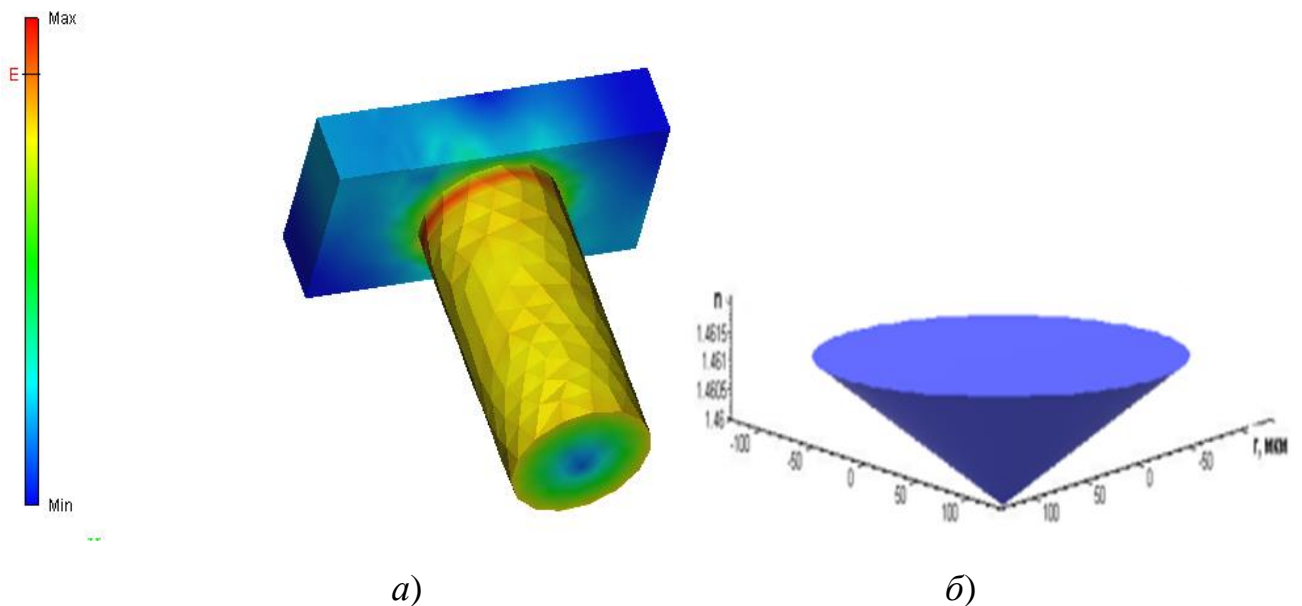


Рисунок 3.2 – Зміна ППЗ при крутінні ОВ: *а* – моделювання; *б* – розрахунок
У такому ОВ відсутній вплив деформерів на бічну поверхню й існує

можливість створення ЧЕ із закритим ОК, а саме волокно можна розглядати в рамках теорії зв'язаних мод як набір тунельно-зв'язаних ОВ. У цьому випадку завдання узгодження хвилеводних структур розглядається як порушення поля прийомної антени деяким заданим полем випромінюючої антени [97]. ЧЕ й ОВ зв'язку найбільше доцільно виготовляти з легованих високотемпературних волокон [90].

Як показано у розділі 2, двоканальне керування інформаційним сигналом дозволяє в значній мірі компенсувати вплив на точність вимірів неконтрольованих ДФ. Для цього найчастіше застосовують ВОА, засновані на диференціальній структурній моделі [33]. Дана модель, у результаті досліджень і адаптації до експлуатації в умовах концентрованого впливу ДФ при діагностуванні ГТУ, одержала подальший розвиток (рис. 3.3) [78, 79, 94, 95, 103].

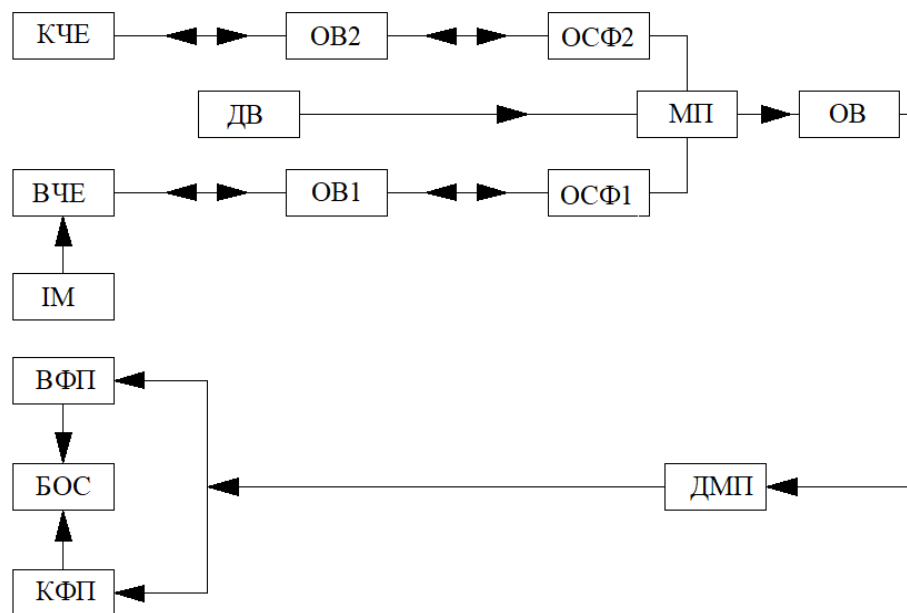


Рисунок 3.3 – Структурна модель інваріантного ВОА: ДВ – джерело випромінювання; МП – мультиплексор; ОВ1, ОВ2 – оптичне волокно, яке підводить/відводить випромінювання у вимірювальному й контрольному каналах; ВЧЕ – вимірювальний чутливий елемент; ІМ - інерційна маса; КЧЕ – контрольний чутливий елемент; ДМП – демultipлексор; ВФП/КФП – вимірювальний/контрольний фотоприймач; ОСФ - оптичний спектральний фільтр; БОС – блок обробки сигналу; ОВ – оптичне волокно, яке відводить випромінювання до ФП

Найбільш істотними енерго-інформаційними перетвореннями, що протікають у ВОА, є:

- генерація світлового потоку ДВ із чутливістю $S_{ДВ}$;
- передача випромінювання по ОВ, що підводять/відводять випромінювання, ефективність якої оцінюється коефіцієнтами передачі оптичного $K_{ОВ}$;
- просторова модуляція оптичних сигналів у вимірювальному каналі із ЧЕ із чутливістю $S_{ЧЕ}$;
- просторова модуляція оптичних сигналів у контрольному каналі із ЧЕ із чутливістю $S_{К}$;
- перетворення в МП/ДМП із чутливістю $S_{МП/ДМП}$;
- перетворення в оптичному спектральному фільтрі із чутливістю $S_{ОСФ}$;
- фотоелектричне перетворення на фотоприймачі (ФП) із чутливістю $S_{ВФП}$ і $S_{КФП}$;
- перетворення в пристрої віднімання сигналів з коефіцієнтом перетворення $K_{ВУ}$.

Показники зазначених перетворень, так само як і результати вимірювання, залежать від впливу зовнішніх ДФ, погрішності виготовлення окремих структурних елементів і вузлів і ДФ, що виникають у самому акселерометрі. Для оцінки ступеня впливу ДФ на кожний елемент ВОА розроблена метрологічна модель вимірювального перетворювача (рис. 3.4), де прийняті наступні позначення [103]:

Δ_1 – погрішність юстировки ДВ відносно ОВ;

$\Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5$ – погрішність через неточність початкової установки ОВ відносно ЧЕ;

Δ_6, Δ_7 – погрішності через неточність початкової установки ОВ відносно МП/ДМП;

Δ_8, Δ_9 – погрішності через неточність початкової установки ОВ відносно ОСФ;

$\delta S_{ДВ}$ – погрішність, обумовлена зміною потужності й діаграми випромінювання ДВ при зміні температури навколишнього середовища, напруги живлення;

$\delta K_{ОВ1}$, $\delta K_{ОВ2}$ – погрішності, обумовлені зміною світлопропускання ОВ1, ОВ2 відповідно, при деформаціях волокна й впливі ДФ;

$\delta \eta(\lambda)$ – погрішність спектрального узгодження ДВ й ФП при зміні температури навколишнього середовища;

$\delta S_{ФП}$ – погрішність від зміни інтегральної струмової чутливості ФП при зміні температури навколишнього середовища, напруги живлення;

$\delta S_{ВУ}$ – погрішність коефіцієнта перетворення при зміні температури навколишнього середовища, напруги живлення.

Відповідно до метрологічної моделі датчика, при впливі F , реальні функції перетворення будуть визначені для вимірювального каналу як

$$\begin{aligned}
 I_B = & S_{ЧЕ}(1+\delta S_{ЧЕ})S_{ДВ}(1 + \delta S_{ДВ}) [(\Delta_1+K_{ОВ1})(1+\delta K_{ОВ1})] \times \\
 & \times [(\Delta_7 + \Delta_2 + \Delta_4 + \Delta_{ЧЕ1} + K_{ОВ1})(1+\delta K_{ОВ1})][(\Delta_8 + \Delta_{16}K_{ОВ1}) \times \\
 & \times (1+\delta K_{ОВ1})][(1+\delta \eta(\lambda))] [(\Delta_{10} + \Delta_{12} + S_{ВФП})(1+\delta S_{ВФП})] \times \\
 & \times S_{МП}(1+\delta S_{МП})[(\Delta_{14} + \Delta_{15} + K_{ОВ1})(1+\delta K_{ОВ1})] \times \\
 & \times S_{ДМП}(1+\delta S_{ДМП}) [(\Delta_{14} + \Delta_{15} + K_{ОВ1})(1+ \delta K_{ОВ1})]F, \quad (3.2, a)
 \end{aligned}$$

для контрольного каналу як

$$\begin{aligned}
 I_K = & S_{ЧЕ}(1+\delta S_{ЧЕ})S_{ДВ}(1 + \delta S_{ДВ}) [(\Delta_1+K_{ОВ2})(1+\delta K_{ОВ2})] \times \\
 & \times [(\Delta_7 + \Delta_3 + \Delta_5 + \Delta_{ЧЕ2} + K_{ОВ1})(1+\delta K_{ОВ2})][(\Delta_9 + \Delta_{17} K_{ОВ2}) \times \\
 & \times (1+\delta K_{ОВ2})][(1+\delta \eta(\lambda))] [(\Delta_{11} + \Delta_{13} + S_{КФП})(1+\delta S_{КФП})] \times \\
 & \times S_{МП}(1+\delta S_{МП}) [(\Delta_{11} + \Delta_{13} + K_{ОВ2})(1+\delta K_{ОВ2})] \times \\
 & \times S_{ДМП}(1+\delta S_{ДМП}) \times [(\Delta_{11} + \Delta_{13} + K_{ОВ2})(1+ \delta K_{ОВ2})]F. \quad (3.2, б)
 \end{aligned}$$

3.3 Побудова узагальненої математичної моделі інваріантного волоконно-оптичного акселерометра

У ВОА безпосередньо або після попереднього перетворення контрольована величина впливає на параметри оптичного середовища, або ОК по якому поширюється оптичне випромінювання (рис. 3.5) [22, 23].

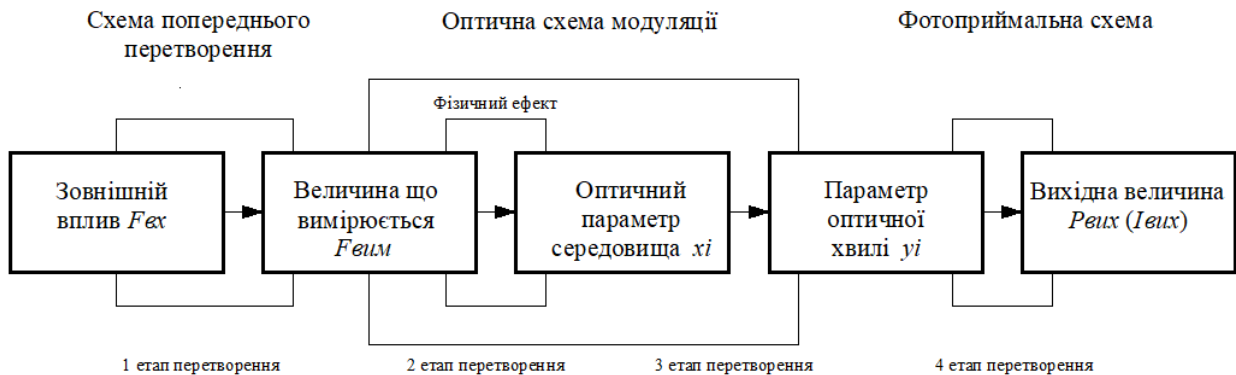


Рисунок 3.5 – Загальна структура перетворення у ВОА

У загальному випадку функція перетворення оптичного ВОА являє собою залежність струму фотоприймача перетворювача від зовнішнього впливу

$$I_{фп} = P_{дв}(I_{дв}) f_{фп} (y_i[x_i(F_{вим}(F_{vx}))]) S_{фп} K_{п}, \quad (3.3)$$

де $I_{фп}$ – струм фотоприймача, мкА; $P_{дв}(I_{дв})$ – потужність створюваного джерелом оптичного випромінювання, Вт; y_i – параметр минаючого через перетворювач оптичного випромінювання; x_i – оптичний параметр середовища, індукований контрольованою фізичною величиною $f_{фп}$ – функція фотоприймального перетворення; $S_{фп}$ – інтегральна чутливість фотоприймача, мкА/Вт; $K_{п}$ – коефіцієнт втрат потужності оптичного випромінювання.

Для амплітудних ВОД функція перетворення може бути представлена як

$$I_{фп} = F_3(F_2[F_1(a)]), \quad (3.4)$$

де F_1 – функція механічного перетворення. Описує залежність зміни показників матеріалу ЧЕ під впливом деформації, яка створюється вимірюваною величиною;

F_2 – функція перетворення оптичної модуляції. Описує зміну інтенсивності оптичного випромінювання, що пройшло ЧЕ залежно від його деформації;

F_3 – функція електричного перетворення. Описує зміну електричного вихідного сигналу залежно від зміни контрольованого параметру.

Вибір оптимальної функції механічного перетворення визначається конструктивною схемою сейсмічного приладу, у якому параметри коливальних процесів перетворюються в механічні величини.

Існуючим сейсмічним перетворювачам різних конструктивних схем, властиві частотні погрішності, обумовлені режимом роботи коливальної ланки і такі, що визначають робочий діапазон. Оскільки конструктивними заходами значного зниження цих погрішностей досягти не вдається, у сейсмічних перетворювачах активно застосовується ряд способів корекції частотних погрішностей, згрупованих по двом напрямкам – пасивні й активні.

Пасивна параметрична корекція, заснована на використанні ланцюгів або підсилювачів, що мають в ідеальному випадку частотну характеристику, задану функцією зворотної функції вузла, що корегується. Істотним недоліком використання методу є втрата енергії, пропорційна частотному діапазону приладу. Крім того застосування коригувальних ланцюгів вимагає обов'язкової наявності відповідних підсилювачів.

Активна корекція частотних погрішностей заснована на активному впливі на ланку, що є джерелом погрішності. Оцінка потенціалу активної корекції показує, що при розширенні частотного діапазону звичайних сейсмічних перетворювачів як у низько- так і у високочастотний діапазон, параметри приладу можуть бути змінені тільки за рахунок електричного регулювання. Це виключає досягнення принципового виграшу в чутливості. Уведення електромеханічного зворотного зв'язку при розширенні частотного діапазону сейсмічних перетворювачів викликає втрату чутливості, аналогічну втраті, що виникає зміні механічних параметрів приладу або через застосування послідовної параметричної корекції.

Це пояснюється жорстким взаємозв'язком параметрів класичної системи інерційного приладу – чутливості й частоти вільних коливань, обумовлених масою інерційного елемента й піддатливістю пружної ланки. Тому застосування активної корекції найбільше ефективно в системах, у яких цей взаємозв'язок виключається.

Типовим представником таких систем є маятниковий дисбалансний акселерометр, схема якого використана автором для розробки інваріантного ВОА (рис. 3.6) [79, 94, 95, 96, 99, 100, 101].

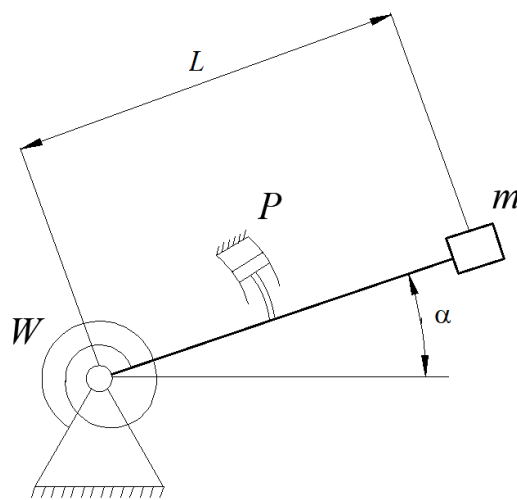


Рисунок 3.6 – Схема маятникового акселерометра

Механічна частина цього перетворювача являє собою маятник, який має щодо осі обертання момент інерції J . На закінченні важеля маятника закріплена неврівноважена маса. Для втримання системи в горизонтальному положенні до її складу введений пружний елемент із питомим моментом W . У розробленому автором схемотехнічному рішенні роль пружного елемента відіграє вимірювальне оптичне волокно з ексцентриковою масою. Ця схема обумовлена торцевим з'єднанням волокна й ексцентрика що виключає вплив інерційної маси на бічну поверхню ОВ і використанням закритого ОК.

При коливанні основи системи у вертикальному напрямку, рух важеля щодо корпусу оцінюється так, ніби воно генерувалося силою інерції

неврівноваженої маси ma'' . Тоді використання маятничого підвісу інерційної маси дозволяє зменшити зону нечутливості. В умовах постійного лінійного прискорення, що збігається з вимірювальною віссю системи, рівноважному положенню маятника при відхиленні від нейтралі відповідає кут α . При досягненні кута α , момент інерційної сили врівноважується моментом пружного елемента, а рівняння моментів приймає вигляд

$$J\alpha'' + P\alpha' + W\alpha = ma'' l \cos\alpha, \quad (3.5)$$

де J – момент інерції щодо осі; P – коефіцієнт заспокоєння; m – маса маятника; L – відстань від осі обертання до центру ваги маятника; α – кут повороту; a – вібропереміщення; W – питомий момент.

Тоді, при малих α можна прийняти, що $\cos\alpha = 1$. При цьому умові кут відхилення α , що встановився (пропорційний лінійному прискоренню a''). При цих умовах рівняння моментів перетвориться до вигляду [74, 120]

$$Jx'' + Px' + Wx = ma'' l^2. \quad (3.6)$$

Це рівняння збігається з рівнянням класичної коливальної системи з тією різницею, що коефіцієнти при x' і a'' виявилися різними. Якщо залишити в лівій частині тільки перший член, тоді функція механічного перетворення

$$F_1 = \frac{ml^2}{J} F. \quad (3.7)$$

Функція зміни показника заломлення матеріалу ЧЕ залежно від його деформації визначається як

$$F_1 = n_{xz}^c = C_4 = \frac{Z(A_k \cos\omega_k t + B_k \sin\omega_k t) E_c r_c}{2L(1 + \nu_c)},$$

$$F_1 = n_{xz}^{об} = C_4 = \frac{Z(A_k \cos\omega_k t + B_k \sin\omega_k t) E_{об} r_{об}}{2L(1 + \nu_{об})}, \quad (3.8)$$

де C_4 – фотопружна постійна; E_c , $E_{об}$ – модулі пружності серцевини й оболонки; ν_c , $\nu_{об}$ – коефіцієнти Пуассона серцевини й оболонки; r_c , $r_{об}$ – поточні радіуси серцевини й оболонки; L – довжина ОБ; $\omega_k = k\pi b/L$, $k = 0, 1, 2, \dots, m$ – частоти

власних форм коливань; $ZC_1 \cos \frac{\omega z}{b} + C_2 \sin \frac{\omega z}{b}$ – функція від z , що описує форму власних коливань.

Коефіцієнти A_k і B_k визначаються як [122]

$$A_k = \frac{2}{L} \int_0^L \varphi(z) \cos \frac{k\pi z}{L} dz, \quad B_k = \frac{2}{k\pi b} \int_0^L \psi(z) \cos \frac{k\pi z}{L} dz, \quad b \left(\frac{M}{\rho J \frac{\partial \alpha}{\partial t}} \right)^{0.5}.$$

Взаємний зв'язок процесів, що відбуваються в шаруватих структурах серцевини й оболонки, дозволяє будь-яку довільну деформацію границі розділу середовищ апроксимувати послідовністю малих стрибків. У межі при нескінченно великій кількості стрибків і нульовій висоті кожного стрибка, послідовністю стрибків можна замінити будь-яку довільну функцію. Перетворення моди багатьма стрибками є суперпозицією полів, породжуваних кожним індивідуальним стрибком. Така модель досить проста, зручна й може бути застосовна до будь-якого типу поля, у тому числі й до більш складних полів круглого оптичного волокна. Апроксимація ОВ шаруватою східчастою структурою дозволяє скласти й використовувати дискретну розрахункову схему. Відповідно такої схеми, завдання узгодження двох хвилеводних структур розглядається як порушення прийомної антени деяким заданим полем випромінюючої антени. У межах кожного шару ефективний обсяг профілю визначається як обсяг тіла, отриманого обертанням кривої профілю навколо осі ОВ. Апроксимація деформованого ОВ коаксіальною структурою дозволяє розглядати процеси трансформації оптичного випромінювання в рамках теорії зв'язаних мод, а сам ОВ як набір тунельно-зв'язаних хвилеводів, у яких оптичне тунелювання випромінювання (ОТВ).

Велика різноманітність суперечливих підходів, формулювань і апроксимацій при розгляді звичайної теорії зв'язаних мод (ЗТЗМ) і модифікованою теорією зв'язаних мод (МТЗМ) у тунельно-зв'язаних ОВ робить практично неможливою завдання узгодження результатів, отриманих різними авторами, з метою отримання єдиного фізичного погляду на різноманітні міжмодові взаємодії в сучасній хвилеводній оптиці.

Протиріччя й спірні результати, отриманих різними авторами в рамках ЗТЗМ можна пояснити різними теоретичними підходами, методами дослідження й використаними наближеннями.

Деякі автори (Снайдер і Лав, Харді й Стрейфер, Когельник і інші) застосовують рівняння Максвелла як вихідні диференціальні рівняння першого порядку для отримання рівнянь зв'язаних мод. Інші автори (Маркузе, Ярив і Юх) використовують для цієї ж мети рівняння другого порядку типу рівняння Гельмгольца, отримані з рівнянь Максвелла. Другий підхід вимагає так званої параболічної апроксимації, для того, щоб забрати другі похідні шуканих амплітуд по z , які просто не з'являються при першому підході [14, 66, 108, 135].

Згідно [66] якщо хвилеводи розташовані поблизу друг від друга, то повне поле можна наближено представити у вигляді суперпозиції незбурених полів кожного хвилеводу. Оптичний перехресний зв'язок буде полягає в інтерференції між полями мод, відповідним до скалярних рішень ψ_+ і ψ_- . ОВ, у цьому процесі, розглядається як складний хвилевід [108].

Фундаментальні розв'язки ψ_+ і ψ_- скалярного хвильового рівняння визначаються симетрією поперечного перерізу хвилеводу й можуть бути приблизно записані у вигляді

$$\psi_+ = \bar{\psi}_1 + \bar{\psi}_2; \quad \psi_- = \bar{\psi}_1 - \bar{\psi}_2, \quad (3.9)$$

де $\bar{\psi}_1$ і $\bar{\psi}_2$ – фундаментальні рішення окремого хвилеводу.

Постійні поширення, відповідні до рішень ψ_+ і ψ_- , позначаються β_+ і β_- , а під β будемо розуміти загальну постійну поширення для рішень $\bar{\psi}_1$ і $\bar{\psi}_2$. У випадку ізольованих хвилеводів $\beta_+ = \beta_- = \beta$. При досить великій відстані між каналами можна вважати $\beta = \beta_{\pm}$, $\psi = \psi_{\pm}$, $\bar{n} = n_{co}$, $\bar{\psi} = \bar{\psi}_1$. Тоді, з обліком слабонаправляючого хвилеводу, одержимо

$$\beta_+ = \beta + k[(n - n_{co}) \psi_1 \psi_+ da / \psi_1 \psi_+ da],$$

де n – показник заломлення складного хвилеводу; n_{co} – показник заломлення

серцевини хвилеводу; A_∞ – нескінченний поперечний переріз; $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число; λ – довжина хвилі у вакуумі.

Отриманий вираз, при підстановці в (3.9), значно спрощується. Це пов'язане з експоненціально малою величиною $\bar{\psi}_2$ у серцевині необуреного хвилеводу, у знаменнику інтегралом від $\bar{\psi}_1 \bar{\psi}_2$ можна зневажити в порівнянні з інтегралом від $\bar{\psi}_1^2$. По-друге, основний внесок в інтеграл у чисельнику вносить член $\bar{\psi}_1 \bar{\psi}_2$, тому що різниця $n - \bar{n}_{co}$ відмінна від нуля лише поза серцевиною хвилеводу.

На основі класичного підходу хвильової оптики виконується подальше перетворення $\beta_\pm = \bar{\beta} \pm C$, де C – коефіцієнт зв'язку, що визначає ступінь зв'язку мод випромінювання або відстань, на якій відбувається заданий обмін потужністю між ними. Розраховується як інтеграл перекриття складових електричних полів зв'язаних мод

$$C = k \left[\int_{A_\infty} (n - \bar{n}_{co}) \bar{\psi}_1 \bar{\psi}_2 da \right] / \int_{A_\infty} \bar{\psi}_1^2 dA. \quad (3.10)$$

При постійній довжині вимірювального волокна в ЧЕ коефіцієнт зв'язку є основним варіативним параметром, що впливають на перетворення оптичної потужності.

В (3.10) інтеграл що у знаменнику пропорційний параметру нормування N , а саме вираження збігається з аналогічними формулами, отриманими на основі ЗТЗМ за умови рівності величин діелектричної проникності всіх шарів коаксіальної структури $\epsilon_1 \approx \epsilon_2 \approx \epsilon_3 \approx \epsilon_4$ [22, 66].

Підстановка виразів для $\bar{\psi}_1$, $\bar{\psi}_2$, N в (3.8) і перехід до циліндричних координат, перетворює (3.8) до вигляду

$$C = (0,5\Delta)^{0,5} U^2 K_0(W) ((\pi \rho^3 V K_{12}(W) J_0(U))^{-1} \times \\ \times \int_0^{2\pi} \int_0^\rho r_2 K_0(W r_1 \rho^{-1}) J_0(V r_2 / \rho) dr_2 d\phi_2, \quad (3.11)$$

де Δ – параметр висоти профілю; ρ – радіус серцевини (стрижень); $W = \rho(\beta^2 - k^2 n_{cl}^2)^{0.5}$ – параметр моди в серцевині (коаксіальна трубка); $U = \rho(k^2 n_{co}^2 - \beta^2)^{0.5}$ – параметр моди в серцевині; K_0, K_1, J_0 – функції Бесселя.

Нехай $m = 0$; $a = W\rho^{-1}$, зробимо підстановку у вираження для модифікованих функцій Бесселя [108], тоді

$$K_0(Wr_1/\rho) = \sum_{\rho=-\infty}^{\infty} (-1)^\rho K_\rho(Wd/\rho) I_\rho(Wr_2/\rho) \cos(\rho\varphi_2). \quad (3.12)$$

З (3.12) з урахуванням, що $m = 0$; $a = W\rho^{-1}$, одержуємо

$$K_0(Wr_1/\rho) = \int_0^\rho \int_0^{2\pi} r_2 K_0(Wr_1/\rho) J_0(Ur_2/\rho) dr_2 d\varphi_2 = \quad (3.13)$$

$$= \int_0^\rho r_2 J_0(Ur_2\rho^{-1}) \left[\int_0^{2\pi} \sum_{\rho=-\infty}^{\infty} (-1)^\rho K_\rho(Wd/\rho) I_\rho(Wr_2/\rho) \cos(\rho\varphi_2) d\varphi_2 \right] dr_2 =$$

$$= \int_0^\rho r_2 J_0(Ur_2\rho^{-1}) \cdot \left[\int_0^{2\pi} (-1)^0 K_0(Wd/\rho) I_0(Wr_2\rho^{-1}) d\varphi_2 \right] dr_2 =$$

$$= 2\pi K_0(Wd\rho^{-1}) \cdot \int_0^\rho r_2 J_0(Ur_2/\rho) I_0(Wr_2\rho^{-1}) dr_2 \quad (3.14)$$

Обчислимо окремо інтеграл в останньому рівнянні. Якщо прийmemo $a = U\rho^{-1}$, $b = W\rho^{-1}$, $z = r_2$, тоді

$$\begin{aligned} & \int_0^\rho r_2 J_0(Ur_2\rho^{-1}) I_0(Wr_2\rho^{-1}) = \\ & = r_2 ((U\rho^{-1})^2 + (W/\rho)^2)^{-1} \{ (W\rho^{-1}) J_0(U\rho r_{2-1}) I_1(W\rho r_{2-1}) + \\ & \quad + (U\rho^{-1}) J_1(U\rho/r_2) I_0(W\rho/r_2) \} |_0^\rho \end{aligned} \quad (3.15)$$

підставляючи в (3.15) замість r_2 числа ρ і 0 одержуємо

$$\begin{aligned} & \int_0^\rho r_2 J_0(Ur_2/\rho) I_0(Wr_2\rho^{-1}) dr_2 = \\ & = \rho^3 (U^2 + W^2)^{-1} \cdot \{ W\rho^{-1} J_0(U) I_1(W) + \rho^{-1} U J_1(U) I_0(W) \} = \end{aligned}$$

$$= \rho^3(U^2+W^2)^{-1} \cdot \{WJ_0(U)I_1(W) + UJ_1(U)I_0(W)\} \quad (3.16)$$

з таблиці 14.3 [108] і (3.148) за допомогою характеристичного рівняння

$$\frac{UJ_1(U)}{J_0(U)} = \frac{WK_1(W)}{K_0(W)},$$

$$U^2 + W^2 = V^2,$$

маємо

$$UJ_1(U) = \frac{WJ_0(U)}{K_0(W)} K_1(W),$$

Тоді

$$K_0\left(\frac{Wr_1}{\rho}\right) = \sum_{\rho=-\infty}^{\infty} (-1)^\rho K_\rho\left(\frac{Wd}{\rho}\right) I_\rho\left(\frac{Wr_2}{\rho}\right) \cos(\rho\varphi_2),$$

$$\begin{aligned} \text{а} \quad & \rho^2 V^{-2} \{WJ_0(U)I_1(W) + WJ_0(U)K_1(W)I_0(W) (K_0(W)^{-1})\} = \\ & = \rho^2 WJ_0(U) (V^2 K_0(W))^{-1} \cdot \{I_1(W)K_0(W) + K_1(W)I_0(W)\}. \end{aligned} \quad (3.17)$$

с обліком рекурентного співвідношення

$K_0(z)I_1(z) + K_1(z)I_0(z) = 1z^{-1}$, одержуємо перетворення (3.17) до вигляду

$$\left(\frac{\rho^2 W I_0(U)}{V^2 K_0(W) W}\right) = \frac{\rho^2 I_0(U)}{V^2 K_0(W)}. \quad (3.18)$$

Тепер

$$\int_0^\rho \int_0^{2\pi} r_2 K_0(Wr_1 \rho^{-1}) J_0(Ur_2 \rho^{-1}) d\varphi_2 r_2 = 2\pi K_0(Wd\rho^{-1}) \rho^2 J_0(U) \cdot (V^2 K_0(W)^{-1}). \quad (3.19)$$

Повернемося до (3.11)

$$\begin{aligned} C &= (\pi\rho^{-3} (\Delta\lambda^{-1})^{0.5} (U^2 K_0(W) 2\pi\rho^2 K_0(Wd\rho^{-1}) J_0(U) ((VK_1(W)J_0(U)V^2 K_0(W))^{-1} = \\ &= 2\Delta^{0.5} \rho^{-1} U^2 K_0(Wd\rho^{-1}) \cdot ((V^2 K_0(W))^{-1} \end{aligned} \quad (3.20)$$

З $K_\nu(z) \approx (\pi/2z)^{0.5} e^z \{1 + (4\nu^2 - 8z - 1)\}$ з урахуванням підстановки

$\nu = 0, z = (Wd\rho^{-1})$ одержуємо

$$\begin{aligned} K_0(Wd\rho^{-1}) &\approx (\pi\rho(2Wd-1))^{0.5} \times \exp\{Wd\rho^{-1}\} [1 - (\rho(8Wd-1))] \approx \\ &\approx (\pi\rho(2Wd-1))^{0.5} \exp\{Wd\rho^{-1}\}, \end{aligned} \quad (3.21)$$

тоді

$$C = (2\Delta)^{0.5} U^2 K_0(Wd/\rho) / (\rho V^3 K_{12}(W)) =$$

$$= (\Delta\pi(\rho Wd)^{-1})^{0.5} U^2 \exp\{-Wd\rho^{-1}\} \cdot (V^3 K_{12}(W)^{-1}). \quad (3.22)$$

Вираження (3.22) описує залежність величини коефіцієнта зв'язку від геометричних параметрів коаксіальної структури стрижень-трубка в статичному режимі.

З обліком (3.7 і 3.8) одержимо вираження, що описує залежність величини коефіцієнта від геометричних параметрів коаксіальної структури стрижень-трубка в режимі деформації

$$C = \sqrt{\frac{\pi\Delta}{(\beta^2 - k^2 n_{xzcl}^2) d \rho^2}} \cdot \frac{\rho \sqrt{\sqrt{(k^2 n_{xzco}^2 - \beta^2)^2}}}{(k\rho(n_{xzco}^2 - n_{xzcl}^2))^2} \cdot \frac{\exp(-\left(\sqrt{(\beta^2 - k^2 n_{xzcl}^2)} d\right))}{K_1^2(\rho \sqrt{(\beta^2 - k^2 n_{xzcl}^2)} d)}, \quad (3.23)$$

де β – різниця постійних поширення у серцевині й оболонці ОВ; n_{xzco} , n_{xzcl} – показники заломлення складових ЧЕ при крученні; K_1 – функція Бесселя

Тоді, для потужності в стрижневій структурі буде визначатися як

$$F_2 = P_R(z) = \left[1 - \frac{\sin^2 C L \sqrt{1 + [((\beta_R + \beta_{\text{э}} + \beta_{\text{н}}) - (\beta_T + \beta_{\text{э}} + \beta_{\text{н}}))/2C]^2}}{1 + [((\beta_R + \beta_{\text{э}} + \beta_{\text{н}}) - (\beta_T + \beta_{\text{э}} + \beta_{\text{н}}))/2C]^2} \right] P_0, \quad (3.24)$$

де P_0 – сумарна потужність, уведена в коаксіальну структуру; β_R – стала поширення у першій серцевині; β_T – постійна поширення у другій серцевині; $\beta_{\text{э}}$ – збільшення постійної поширення через еліптичність коаксіальної структури; $\beta_{\text{н}}$ – збільшення постійної поширення через збурювання, що порушують циркулярну симетрію коаксіальної структури; L – довжина ЧЕ [97].

Тоді, з урахуванням (3.3) функція перетворення може бути представлена як

$$I_{\text{фп}} = F_3 = P_R f_{\text{фп}} (y_i[x_i(F_{\text{вим}}(F_{\text{вх}}))]) S_{\text{фп}} K_{\text{п}}.$$

3.4 Моделювання процесів в елементах волоконного акселерометра маятникової схеми

Алгоритм моделювання базується на забезпеченні параметрів ВОА маятничкової схеми для реалізації заданого діапазону вимірювання з високою чутливістю (рис. 3.6) [22, 23]. За основну модель такого ВОА прийнята модель маятничкового акселерометра [79].

Згідно [8, 9] ВОА повинен забезпечувати здійснення неруйнуючого контролю високочастотної вібрації у смузі частот до 20 кГц [33, 35]. Визначено, що ВОА повинен забезпечувати неруйнуючий контроль високочастотних вібрацій у смузі частот до 20 кГц. Визначено, що у ВОА для контролю високочастотних вібраційних процесів, повинна бути як можна більш висока резонансна частота, а пружний ЧЕ повинен мати значну жорсткість [56, 71, 74].

Загальною вимогою до розглянутих оптичних матеріалів, що відрізняються по ряду оптичних і механічних властивостей, є забезпечення експлуатації в екстремальних умовах і підвищеною довговічністю. У якості можливого матеріалу для створення пружного ЧЕ розглянуті такі оптичні матеріали як: кварцове скло, скла крон, флінт, ситал, а також штучний сапфір [4, 15, 31, 34, 36, 68, 119, 133].

Орієнтовні конструктивні та фізико-механічні параметри елементів коливальної системи обиралися такими, що дорівнюють аналогічним параметрам вимірювальних перетворювачів відомих типів [24].

Для оцінки частотних властивостей волоконний маятниковий акселерометр розглядався як ідеалізована коливальна ланка, з одним ступнем свободи сейсмічної маси, яка докладно розглянуті в [62, 120].

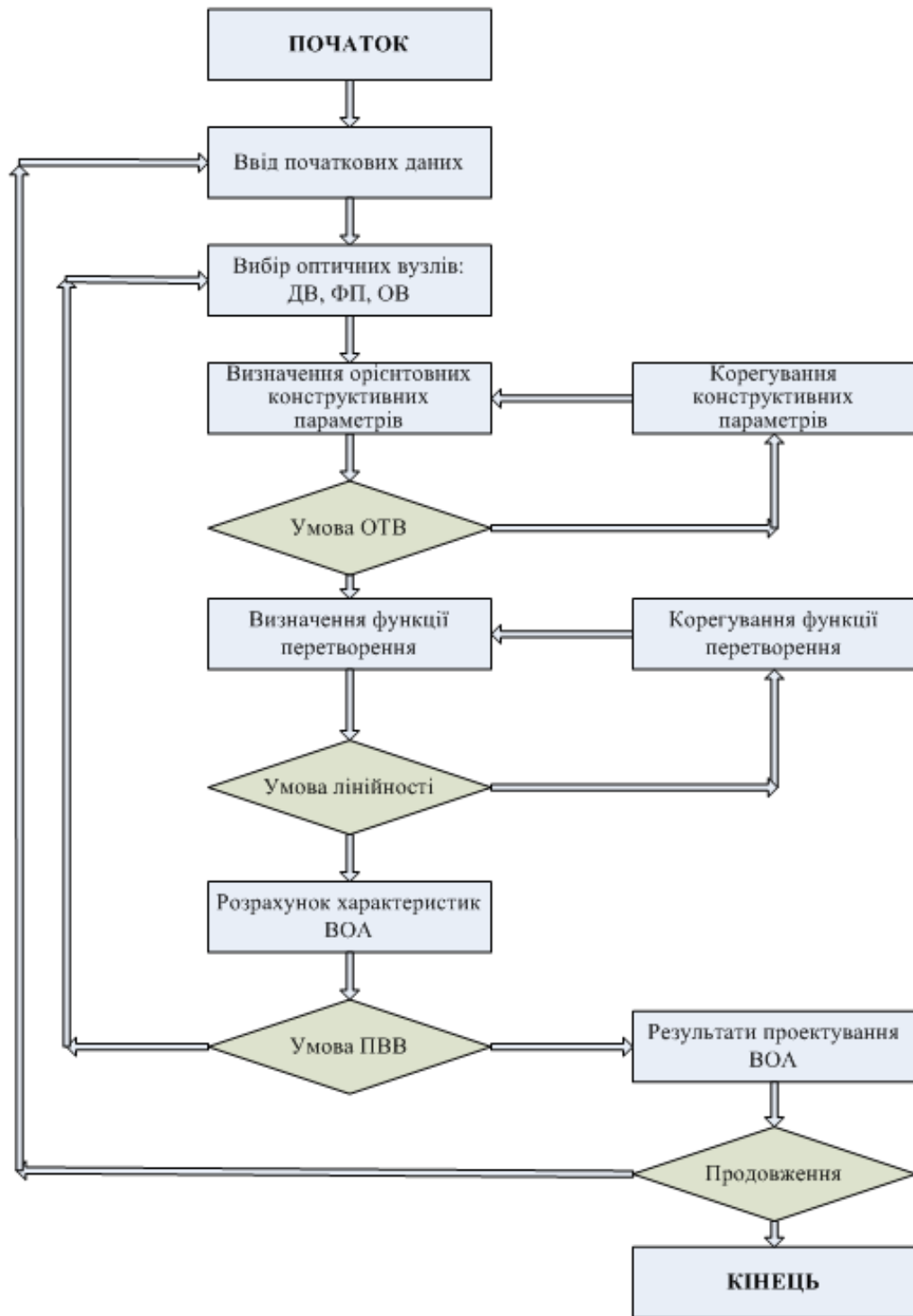


Рисунок 3.6 – Алгоритм моделювання волоконного акселерометра

Результати розрахунків для групи стекол представлені на рис. 3.7.

Аналіз залежності частоти механічної системи ВОА від типу матеріалу чутливого пружного елемента (рис. 3.7) показав наступне.

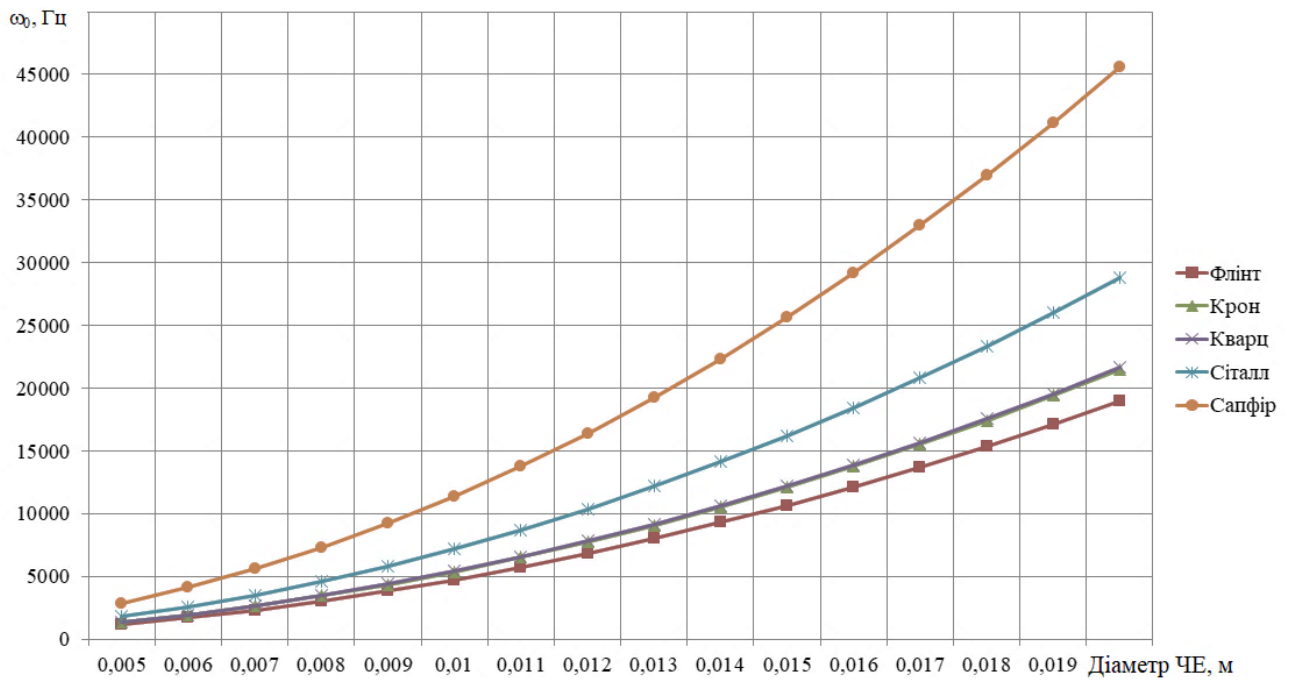


Рисунок 3.7 – Залежність власної частоти механічної системи ВОА від типу матеріалу чутливого пружного елемента

У якості матеріалу, що забезпечує необхідні механічні характеристики коливальної системи для контролю високочастотної вібрації при знаходженні у припустимому діапазоні геометричних розмірів, найбільше раціонально використовувати стекла на основі штучного сапфіру. Сапфіровий ЧЕ дозволить підвищити чутливість, стабільність, практично не мати механічного гістерезису [93].

Для досягнення прийнятних параметрів механічної коливальної системи діаметр, ЧЕ, виконаного із сапфірового скла, повинен перебувати в діапазоні 0,0135 ... 0,0145 м.

Результати більш детальних досліджень, щодо обрання найбільш раціональних параметрів коливальної системи ВОА наведені на рис. 3.8 – 3.10. Аналіз отриманих залежностей показав, що при діаметрі ЧЕ 0,014 м його довжина має бути 0,005 м, вага інерційної маси 0,0001 кг, а довжина маятника 0,0025 м [138].

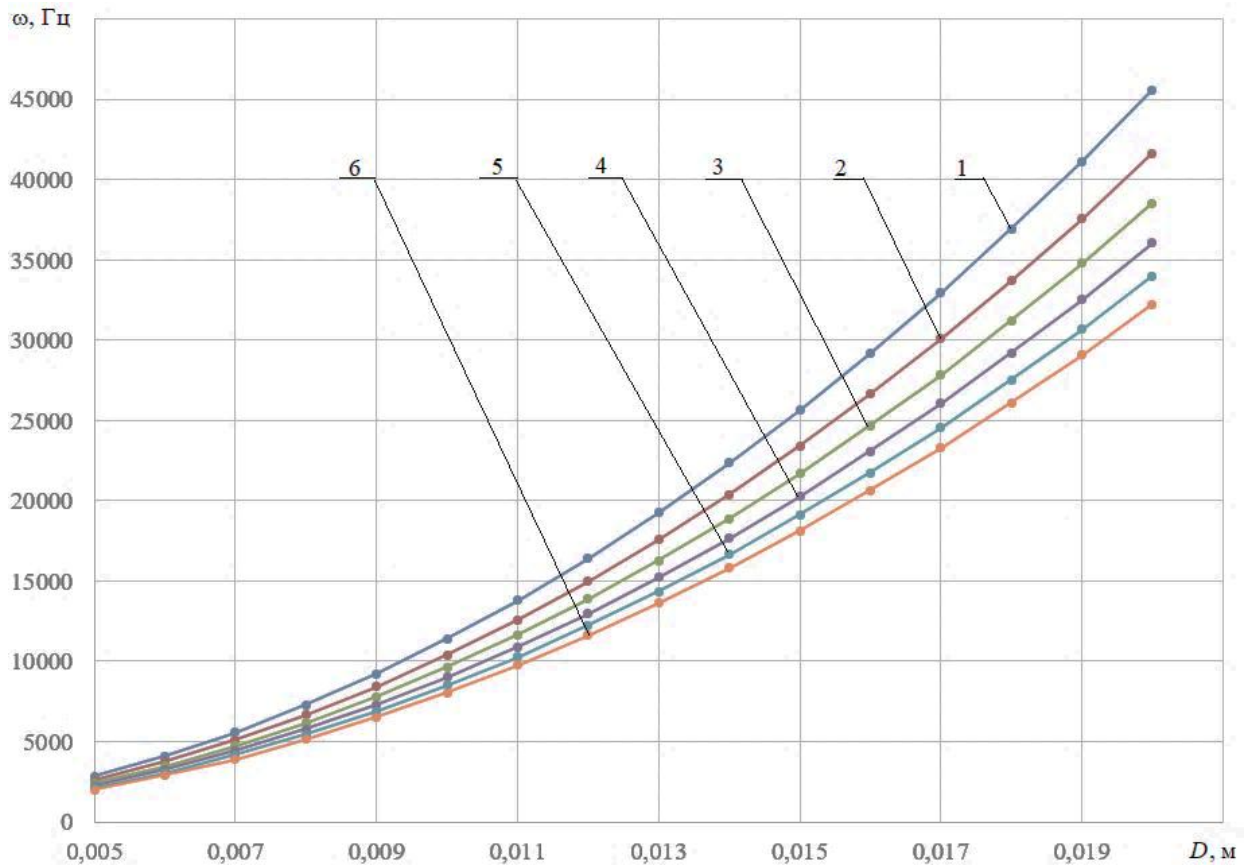


Рисунок 3.8 – Залежність величини власної частоти коливань від діаметру D ЧЕ при різних величинах $L_{\text{ЧЕ}}$: 1 – 0,005; 2 – 0,006; 3 – 0,007; 4 – 0,008; 5 – 0,009; 6 – 0,01

Однак, у хвилеводах такого діаметру можливий тільки багатомодовий режим, який сполучений з явищем та наслідками міжмодової дисперсії. Міжмодова дисперсія значно обмежує інформаційну пропускну здатність усього вимірювального тракту й змушує використовувати низькоефективні світловипромінюючі діоди (СВД) як джерела випромінювання. Для виключення негативного впливу дисперсії у ОВ ЧЕ повинна поширюватися тільки одна мода, тобто хвилеводний параметр $V < 2,405$. Це може бути досягнуте збільшенням робочої довжини хвилі, зменшенням діаметра серцевини або зміною різниці показників заломлення (ПЗ) між серцевиною й оболонкою [29].

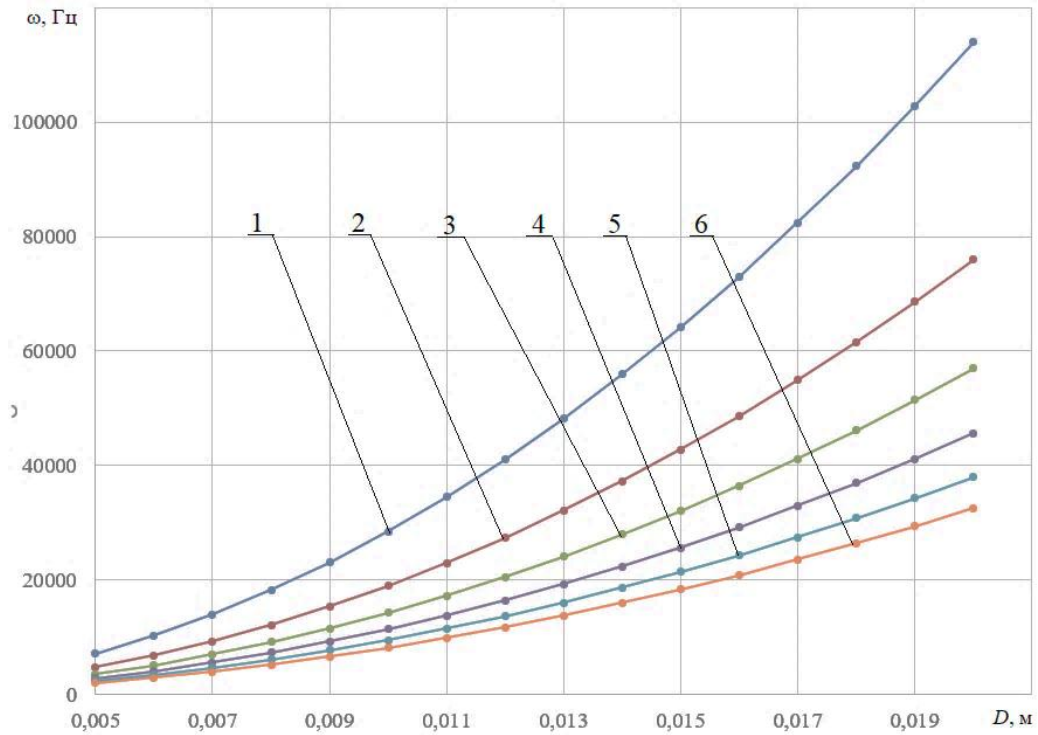


Рисунок 3.9 – Залежність величини власної частоти коливань від діаметру D ЧЕ при різних величинах $l_{ЧЕ}$: 1 – 0,001; 2 – 0,0015; 3 – 0,002; 4 – 0,0025; 5 – 0,003; 6 – 0,0035

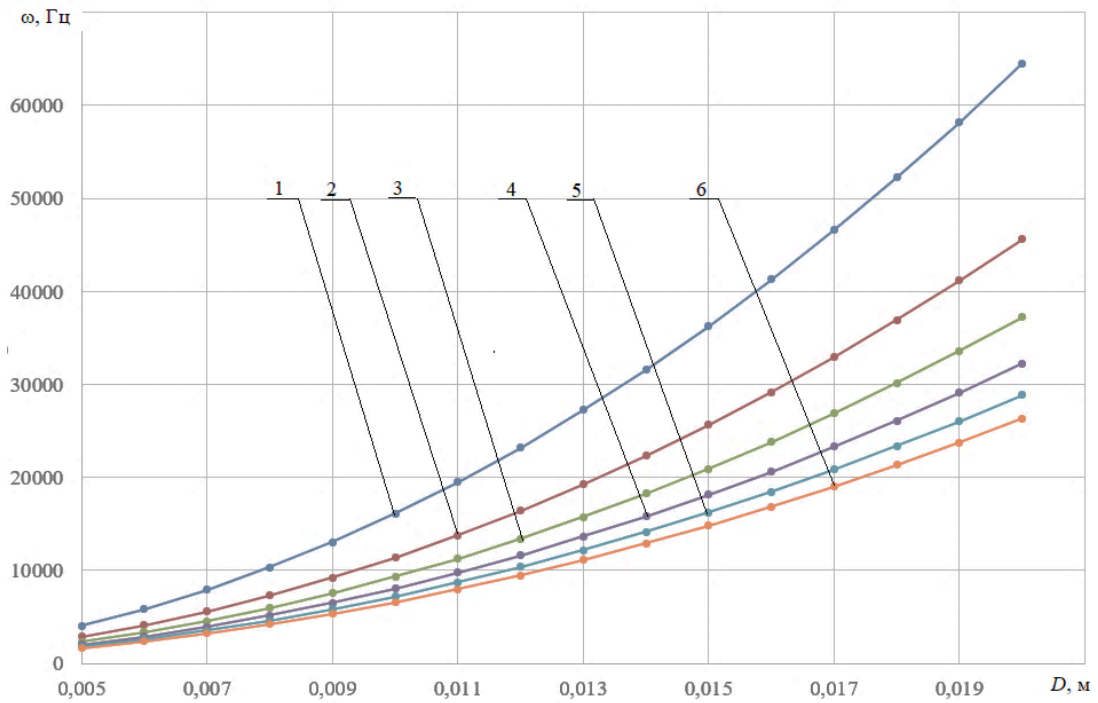


Рисунок 3.10 – Залежність величини власної частоти коливань від діаметру D ЧЕ при різних величинах $m_{ЧЕ}$: 1 – 0,00005; 2 – 0,0001; 3 – 0,00015; 4 – 0,0002; 5 – 0,00025; 6 – 0,0003

Зниження ПЗ серцевини дозволяє зменшити кількість симетричних хвиль, що поширюються в ОВ, із чотирьох (ОВ зі східчастим ППЗ, рис. 3.11, *a*) до двох (ППЗ ОВ відповідає рис. 3.11, *б*).

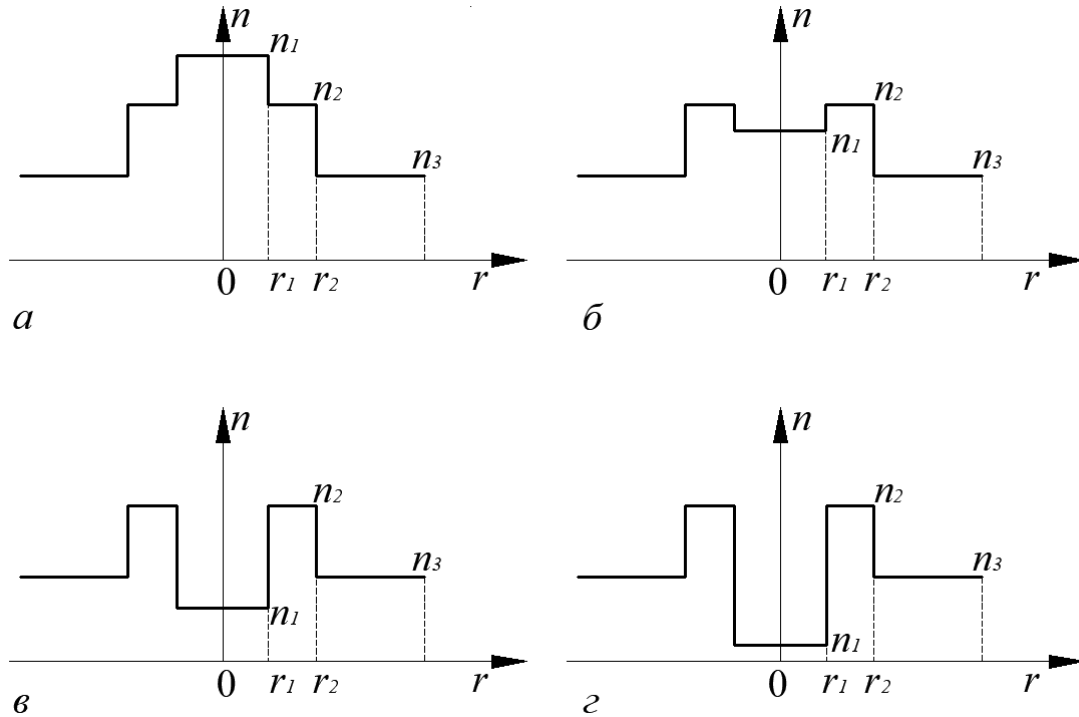


Рисунок 3.11 – Профілі показника заломлення східчастого ОВ: *a* – стандартний; *б, в* – з депресованою серцевиною; *г* – з повітряним капіляром у серцевині

Подальше зменшення показника заломлення серцевини (рис. 3.11, *в*) і перехід до волокна з повітряним капіляром у серцевині (рис. 3.8, *г*) не змінює картину якісно.

У випадку ППЗ, що відповідає рис. 3.11, *в-г*, на критичних частотах відбувається витікання хвиль оболонки в зовнішню область, тому що порушується умова повного внутрішнього відбиття на другій границі ("оболонка - навколишнє середовище"). Перехід в зовнішнє середовище починається раніше, чим у внутрішню область.

У випадку, коли профіль ОВ відповідає рис. 3.11, *б*, умова повного внутрішнього відбиття на границі "серцевина - оболонка" порушується раніше, чим на

границі "оболонка - навколишнє середовище". Таким чином, починається перехід хвиль у серцевину ОВ [89].

Аналіз ППЗ (рис. 3.11, в-г) методом профілів рівного об'єму, показав, що він може бути апроксимований ППЗ, наведеним на рис. 3.12.

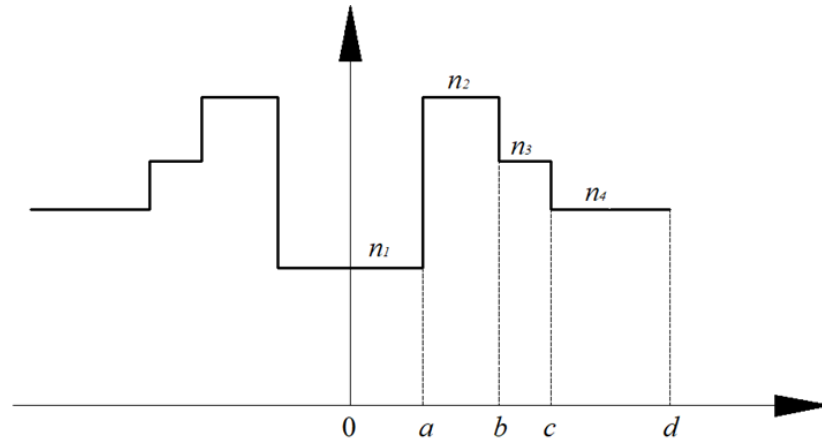


Рисунок 3.12 – Профіль показника заломлення ОВ із двома трубчастими областями

У такому профілі конструктивна серцевина має знижений показник заломлення n_1 (область 0 - a), робоча серцевина - n_2 (область a - b), вторинна серцевина - n_3 (область b - c), а оболонка n_4 (область c - d). Діаметри трубчастих серцевин визначаються умовою одномодовості при $n_6 - n_m = 0,002$

$$n \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n_6^2 - n_m^2} (d_6 - d_m), \quad (3.25)$$

де n_6, n_m – показники заломлення областей з більшим і меншим ПЗ;

d_6, d_m – діаметри трубчастих областей.

Домінуючим параметром в (3.25) є довжина хвилі використовуваного випромінювання, яка визначає як показники заломлення, так і товщину трубчастих областей. Величина довжини хвилі визначається типом джерела й приймача випромінювання й режимом передачі даних по комунікативним ОВ.

Збудження одномодового ЧЕ ВОА вимагає джерела випромінювання, що забезпечує одержання високої потужності з малої площі. Ідеальними для цієї мети виявляються напівпровідникові лазерні діоди (ЛД). Використання СВД для введення в одномодове ОВ сполучене з низькою ефективністю некогерентного джерела випромінювання.

ІВС, в основному, побудовані на основі стандартних типів ОВ і комутаційних елементів. Це й обумовлює ряд специфічних вимог до джерел випромінювання. Робочі довжини хвиль ЛД визначаються відповідно до відомих вікон прозорості – 1310 ± 20 нм і 1550 ± 20 нм. Використання ЛД повинне бути забезпечене стабілізацією потужності, довжини хвилі, ширини смуги випромінювання, оскільки зміни значень усіх цих величин безпосередньо впливають на вірогідність інформаційного сигналу про контрольовану величину [123].

Найбільшою мірою комплексу вимог відповідають ЛД класу *FP* [123].

Джерело випромінювання, повинно мати сумісність по спектральних характеристиках з більшими коефіцієнтами ефективного використання з малими оптичними втратами не тільки із ЧЕ й ОВ, але й з фотоприймачем.

При інших рівних характеристиках широко розповсюджених кремнієвих і *InGaAs* фотодіодів, найбільш доцільним є використання фотодіодів типу *InGaAs*, які мають більший рівень чутливості відгуку залежно від довжини хвилі у діапазоні 1,3 ... 1,55 мкм [123].

Вибір джерел і приймачів випромінювання дозволив локалізувати робочі довжини хвиль на рівні 1,3 мкм і 1,55 мкм. Сапфірові стекла "прозорі" на обох довжинах хвиль. У теж час, з (3.1) впливає, що довжина хвилі впливає на товщину хвилеводної трубки *H*. З товщиною трубки зв'язані не тільки питання передачі випромінювання й механічної міцності ЧЕ, але й технологічні аспекти відтворення профілю хвилеводу (рис. 3.12).

Результати розрахунків величини $H_{\text{ЧЕ}}$ за (3.3) наведені на рис. 3.13.

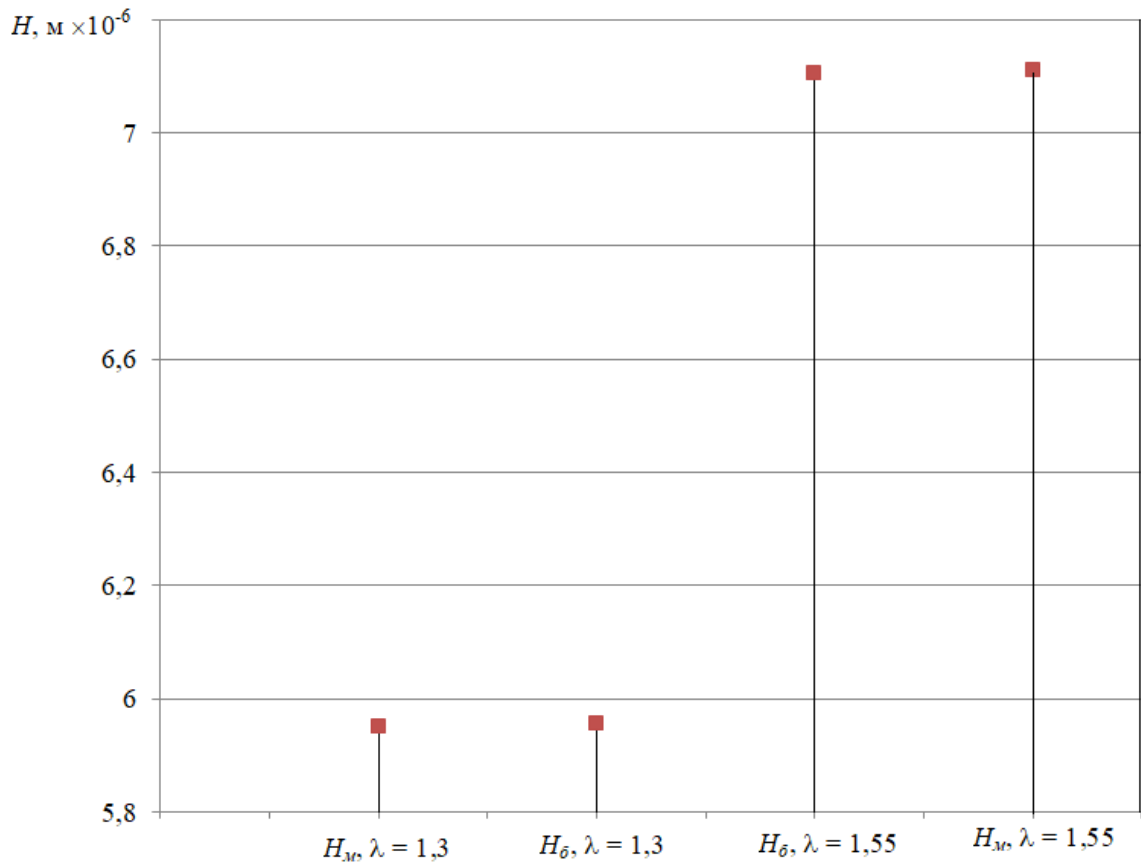


Рисунок 3.13 – Величина товщини хвильоводних елементів $H_{\text{ЧЕ}}$ із сапфірового скла при використанні випромінювання з довжиною хвилі 1,3 і 1,55 мкм

При використанні довжини хвилі випромінювання 1,55 мкм товщини хвильоводних трубок можливо значно збільшити в порівнянні з аналогічними параметрами для довжини хвилі 1,3 мкм.

У (3.24) для визначення потужності на виході з коаксіальної структури застосовано ряд постійних поширення, а саме: β_ε – збільшення постійної поширення через еліптичність коаксіальної структури; β_n – збільшення постійної поширення через збурювання, що порушують циркулярну симетрію коаксіальної структури [97].

У слабонаправляючих ОВ для напрямних мод можливо вважати

$$\beta_{(T,R)} = kn_{co} = kn_{cl} = \frac{2\pi n_{co}}{\lambda},$$

де n_{cl} – показник заломлення зовнішнього шару ОВ; n_{co} – показник заломлення

внутрішнього шару ОВ; k – хвильове число; λ – довжина хвилі випромінювання.

Збільшення постійної поширення через еліптичність коаксіальної структури обумовлено відхиленнями від ідеального перетину ОВ у вигляді кола у процесі витягування волокна крізь фільтри [49].

У [27, 105, 128] досліджений зв'язок між нерівномірністю отворів фільтри, викликаних допустимими відхиленнями в точності виготовлення або зносом фільтри, і нерівномірністю діаметрів ОВ, що виготовляються. Встановлено, що реальну криволінійну форму перетину ОВ, що є наслідком деформації геометрії фільтри в процесі виготовлення і / або експлуатації, можливо замінити таким усередненим поняттям як овальність, де одна з осей еліпсу дорівнює діаметру ОВ. В такому ОВ еліптичність поперечного перетину мала, області збурення дуже тонкі і поля в них можна апроксимувати полем круглого ОВ на кордоні серцевини з оболонкою. Якщо площі серцевин круглого і еліптичного ОВ з малим ексцентриситетом рівні, то рівні і їх постійні поширення основних мод. Умова рівності площ еквівалентна вимозі рівності об'ємів профілів. Згідно з ним, в рамках гауссового наближення, за однакових об'ємів профілю постійні поширення основної моди круглого і еліптичного ОВ довільним профілем показника заломлення рівні [108].

Рекомендацією Міжнародної спілки електротехніки МСЕ-Т G.654 допускається величина овальності або некруглої для одномодових структур не більше 2%. Таким чином, можливо визначити збільшення сталої поширення через еліптичність коаксіальної структури, де одна з осей еліпсу дорівнює діаметру ОВ

$$\Delta\beta_e = \frac{R2\pi n_{co}}{\rho\lambda} - \frac{2\pi n_{co}}{\lambda},$$

де R – велика піввісь еліпсу; ρ – мала піввісь еліпсу та радіус кола ідеального ОВ.

Середня поздовжня нерівномірність волокон по товщині складає зазвичай близько 5% і виникає з тих же причин, що й овальність ОВ. Тоді збільшення постійної поширення через збурювання, що порушують циркулярну симетрію

коаксіальної структури (рис. 3.12) можливо визначити як

$$\Delta\beta_n = \frac{1,052\pi n_{co}}{\lambda} - \frac{2\pi n_{co}}{\lambda},$$

За умови визначення усіх складових, що входять до складу (3.23) та (3.24) можливо отримати графічне уявлення щодо тренду зміни коефіцієнту зв'язку (рис. 3.15).

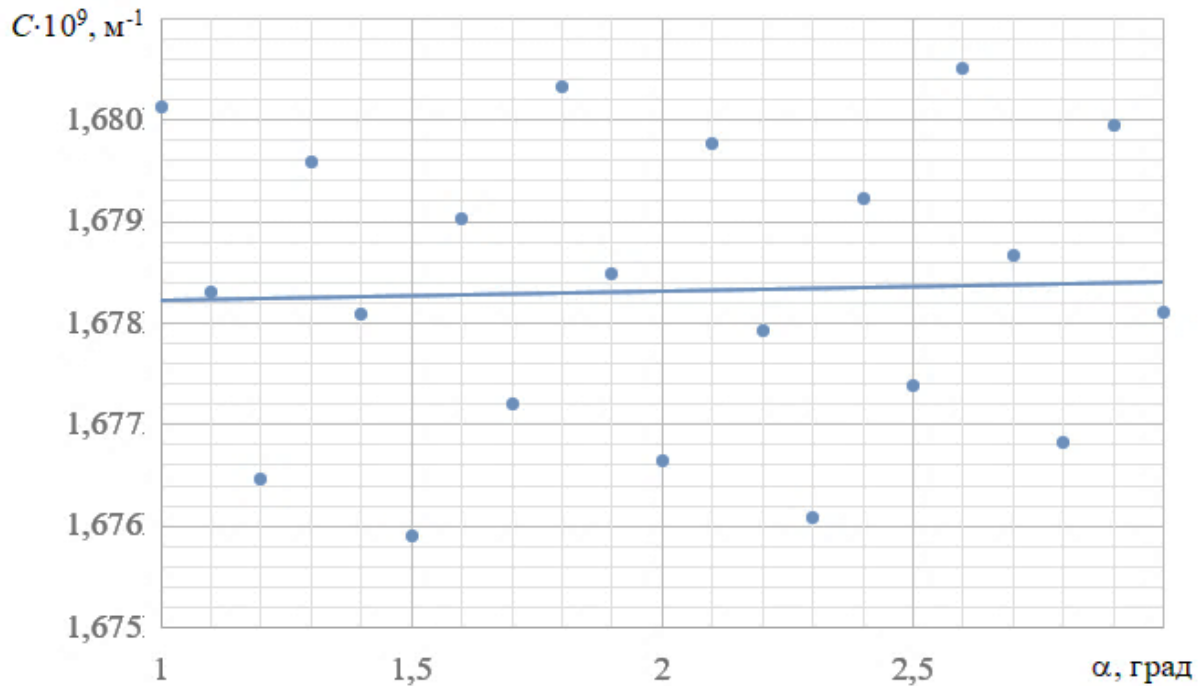


Рисунок 3.14 – Залежність коефіцієнту зв'язку між вторинними серцевинами ЧЕ від величини кута крутіння для ОВ з сапфіру

Досліджуваний акселерометр являє собою композицію двох систем: механічної, яка здійснює перетворення руху інерційної маси в кутову неузгодженість між корпусом і вертикальною площиною відліку перетинів ЧЕ й оптичної, у якій реалізується перетворення механічних характеристик ЧЕ в системі "корпус – маятник" у зміну інформативного параметра (амплітуди світлового випромінювання) вихідного сигналу.

Для аналізу динамічних характеристик акселерометру необхідно дослідити його підсистеми. Відомо, що динамічні характеристики акселерометра маятничкової схеми визначаються тільки характеристиками механічної підсистеми [120].

Статичні характеристики механічної підсистеми акселерометру визначають величину втрат оптичної потужності в ЧЕ від кута крутіння (3.24). Для ЧЕ діаметром 0,014 м та довжиною 0,005 м отримані такі залежності (рис. 3.15).

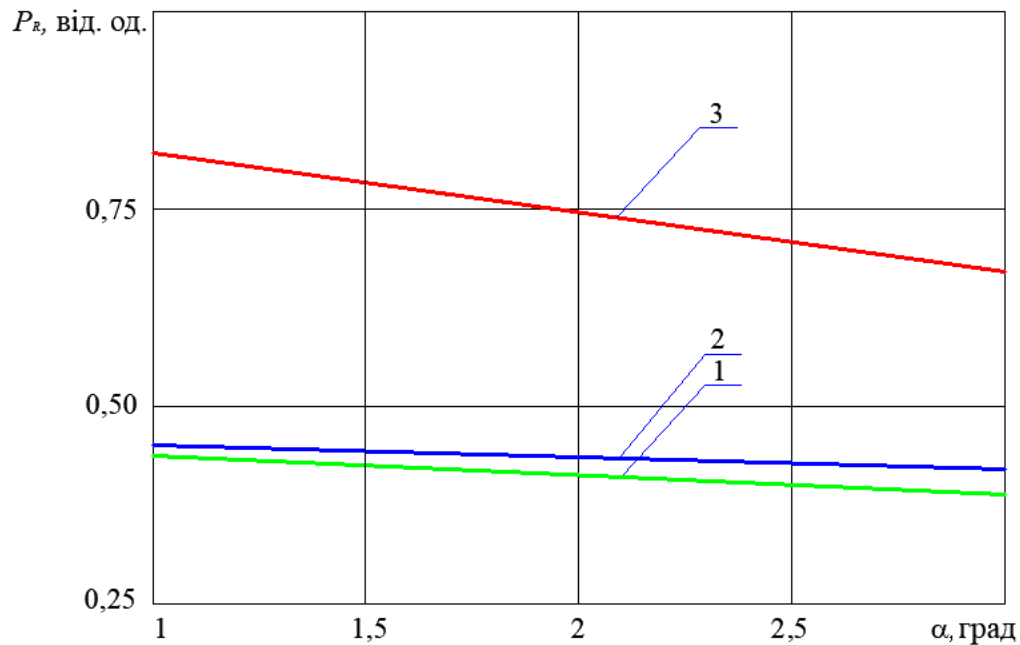


Рисунок 3.15 – Залежність величини вихідної оптичної потужності від величини кута крутіння для скла: 1 – органічного; 2 – кварцового; 3 – сапфірового

Для аналізу динамічних характеристик, що характеризують якість перетворення акселерометром гармонічних коливань об'єкту контролю розглянута амплітудно-частотна (АЧХ) характеристика.

Рівняння руху системи переміщення маятничкового акселерометра може бути записаний у вигляді [120]

$$T_I^2 h + 2\xi T_I h' + h = T_I^2 x''$$

де $T_1 = \frac{1}{\omega_0}$ – постійна часу; $\xi = \frac{k_1}{2\sqrt{mC_1}}$ – ступінь заспокоєння; h – відносне переміщення; m – маса; k_1 – коефіцієнт демпфірування; c_1 – кутова жорсткість пружного елемента.

Тоді передатна функція може бути визначена як

$$W(s) = \frac{T_1^2}{T_1^2 s^2 + 2\xi T_1 s + 1}. \quad (3.26)$$

Тоді власна частота маятнікового акселерометра для вимірювання лінійних прискорень має форму

$$\omega_0 = \sqrt{\left(\frac{c_1}{J}\right)},$$

де c_1 – кутова жорсткість ЧЕ; J – момент інерції рухливої системи маятника.

Для вимушених коливань акселерометра слід обмежитись оцінкою лише синусоїдального закону зміни вхідної величини

$$x'' = A \sin \omega t,$$

де A – амплітуда вхідного прискорення; x'' – вхідна величина; ω – кругова частота.

Сталі коливання вихідної величини h , що визначаються підстановкою $s = j\omega$ у (3.26), визначаються як

$$h = B \sin(\omega t - \varphi),$$

де B – амплітуда коливань виховного сигналу.

$$B = \frac{AT_1^2}{\sqrt{4\xi^2 T_1^2 \omega^2 + (1 - T_1^2 \omega^2)^2}}.$$

Тоді амплітудно-частотна характеристика (рис. 3.16) може бути визначена як

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{4\xi^2 T_1^2 \omega^2 + (1 - T_1^2 \omega^2)^2}}. \quad (3.27)$$

Для визначення оптимального значення коефіцієнту заспокоєння механічної підсистеми розрахована величина безрозмірної динамічної помилки.

Аналіз залежності (рис. 3.17), показує, що обрано таке значення коефіцієнту заспокоєння, при якому мінімум функції після її першого переходу через нуль відповідає нижньої межі припустимої помилки (крива 1). Кривій 1 відповідає мінімальний час перехідного процесу властивий припустимій помилці.

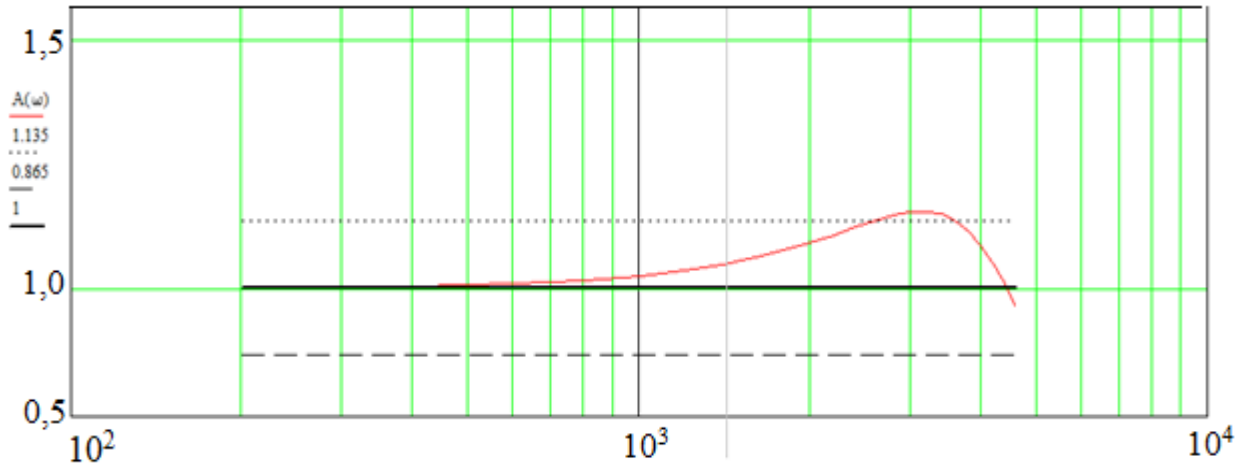


Рисунок 3.16 – Амплітудно-частотна характеристика ВОА маятникового типу

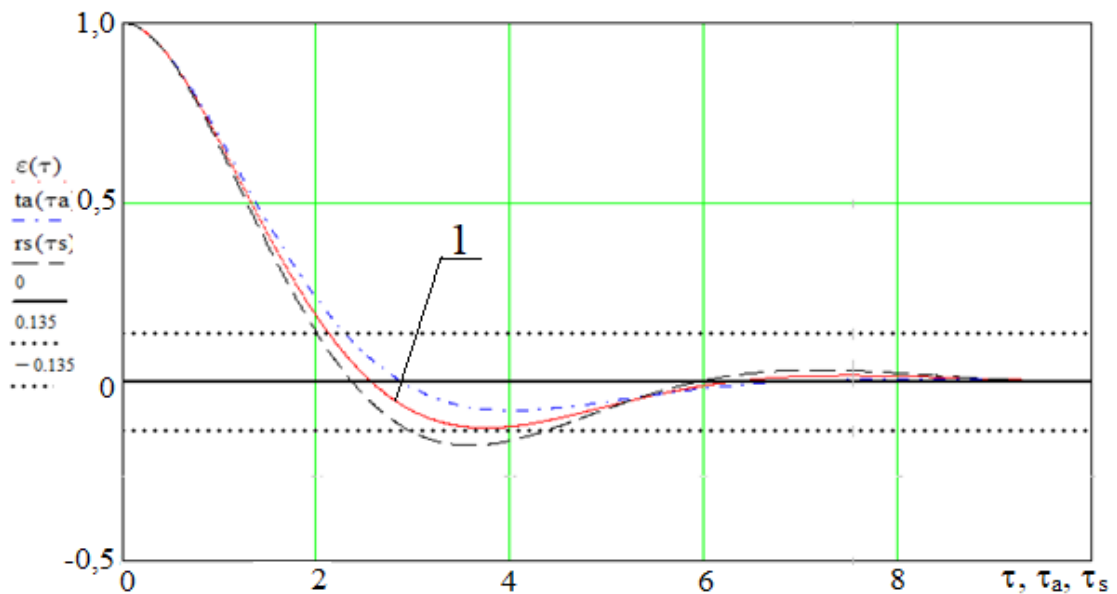


Рисунок 3.17 – Залежність безрозмірної динамічної помилки акселерометра від його параметрів

3.5 Методика визначення конструктивних параметрів волоконного акселерометра

На підґрунті аналізу таких чинників, як діапазон контрольованих частот вібрації, умов установки та експлуатації, визначаються початкові данні для проектування ВОА маятникової схеми. До таких даних відносяться орієнтовні геометричні розміри та банк склоподібних матеріалів для створення елементів акселерометра. Розміри елементів акселерометра повинні задовольняти декільком умовам:

– габаритні розміри повинні забезпечити вільну установку ВОА на штатні місця, передбачені виробником на контрольованому об'єкті для засобів контролю та сполучення з лініями зв'язку;

– ЧЕ з обраними розмірами повинен володіти відповідними фізико-механічними властивостями для забезпечення перетворення коливальних процесів у зміну інтенсивності оптичного випромінювання у заданому частотному діапазоні та достатньою стабільністю цих властивостей під впливом неконтрольованих ДФ;

– геометричні розміри та оптичні параметри ЧЕ повинні забезпечувати одномодовий режим роботи хвилеводних коаксіальних серцевин та умови рівності постійних поширення мод серцевин.

Для обрання матеріалу для виготовлення ЧЕ доцільно застосовувати матеріали, що перебувають у виробництві з урахуванням вимог до пружних елементів сейсмічних перетворювачів вібрації [74].

Для визначення оптичних параметрів:

1. Обираються показники заломлення первинної та вторинної серцевин n_{co} та n_{cl} з умов забезпечення режиму слабонаправляючого ОВ ($n_{co} - n_{cl} = 0,002$).

2. При фіксованому розмірі діаметру ЧЕ визначаються геометричні розміри коаксіальної структури, тобто величин первинної та вторинної серцевин, за умови забезпечення одномодового режиму у ЧЕ

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} (d_6 - d_m) \sqrt{(n_{cl}^2 - n_{co}^2)} = 2,405.$$

3. Оцінюється величина коаксіальних серцевин за умови використання різних довжин хвиль випромінювання, яке проходить крізь ЧЕ. Доцільним є вибір тієї довжини хвилі, при якій забезпечується максимальний розмір товщин серцевин. Ця умова пов'язана з необхідністю забезпечення характеристик міцності та технологічними особливостями формування шарів серцевин у ЧЕ.

4. Коригується визначена довжина $L_{ЧЕ}$. Для ефективного здійснення тунелювання оптичної потужності між серцевинами довжина $L_{ЧЕ}$ повинна дорівнювати непарній кількості довжин биття $L_6 - L_{ЧЕ} = (2n+1) L_6$.

5. З урахуванням отриманих значень попередньо конкретизується марка обраного типу склоподібного матеріалу.

6. Визначаються відповідні до обраного типу матеріалу особливості виробництва та припустимі відхилення геометрії ЧЕ (β_3 та β_n).

7. За умови обрання робочої довжини хвилі виконується визначення типу ДВ, ОСФ, МП/ДМП, ОВ та ФП. Визначаються коефіцієнти впливу властиві цим елементам на характеристики акселерометра та визначаються припустимі відхилення конструктивних параметрів.

8. За (3.23, 3.24) визначається залежність коефіцієнту зв'язку та величини оптичної потужності, що остається у первинній серцевині від зовнішнього впливу (кута крутіння).

9. За (3.2 а, б) оцінюється процес зміни інтенсивності оптичного випромінювання у ВОА під впливом контрольованої величини та здійснюються необхідні коригування параметрів.

3.6 Висновки до розділу 3

1. Проведено аналіз впливу зміни параметрів на характеристики ВОА, який відрізняється тим, що застосована маятникова схема перетворювача з ЧЕ на основі багат шарового оптичного хвилеводу з депресованою серцевиною, що дозволяє обрати найбільш оптимальне сполучення конструктивних параметрів та комбінації матеріалів для реалізації запропонованого способу одержання діагностичної інформації.

2. Синтезована математична модель ВОА, яка полягає у тому, що для опису процесів у багат шаровому оптичному ЧЕ з депресованою серцевиною при деформації крутіння застосовано положення теорії оптичного тунелювання випромінювання, що дозволяє визначати параметри вимірювального пристрою з урахуванням властивостей матеріалів та особливостей технології виробництва.

3. Одержала розвиток метрологічна й структурна моделі ВОА маятникового типу, який відрізняється тим, що до складу вимірювального та контрольного каналів залученні оптичні спектральні фільтри у поєднанні з мультиплексором / демультиплексором.

4. Одержала розвиток методика розрахунків конструктивних параметрів ВОА, що урахує застосування ОВ з депресованою серцевиною та може застосовуватися для створення широкого спектру волоконних вимірювальних перетворювачів.

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Склад та призначення експериментальної установки для дослідження характеристик макетного зразка

Для підтвердження висунутих положень, створення фізичної моделі пристрою контролю технічного стану підшипників роторів СГТУ, перевірки вірогідності гіпотез і адекватності математичних моделей, вирішуються такі науково-технічні завдання:

- комплектація стендів для дослідження характеристик інформаційних сигналів, сформованих ВОА;
- розробка фізичної моделі ВОА;
- аналіз впливу конструктивних параметрів перетворювача на метрологічні характеристики;
- експериментальне дослідження характеристик фізичної моделі й зіставлення експериментальних результатів і даних досліджень, отриманих розрахунковим шляхом [124].

Схемотехнічне рішення фізичної моделі акселерометра надано на рис 4.1 *a* [77-79]. Змонтована модель акселерометра в корпусі стандартного тензометричного датчика тиску (рис. 4.1, *б*).

Модель, максимально наближену до реального вимірювального перетворювача, найбільше раціонально виготовляти методом внутрішнього парофазного модифікованого хімічного осадження. З оглядом на складності виготовлення зазначеним методом одиничного зразка – фізичні моделі були виготовлені з сапфірового, органічного та кварцового скла. Основа 6, світловоди 2 та 3 виготовлені як єдине ціле. В основі зафіксований опорний світловод 1. Вторинна серцевина на моделях ЧЕ імітована шаром лаку/оптичного бальзаму. Діаметр світловодів 2 та 3 складав $0,014 \pm 0,005$ м, довжина від основи – $0,005 \pm 0,001$ м.

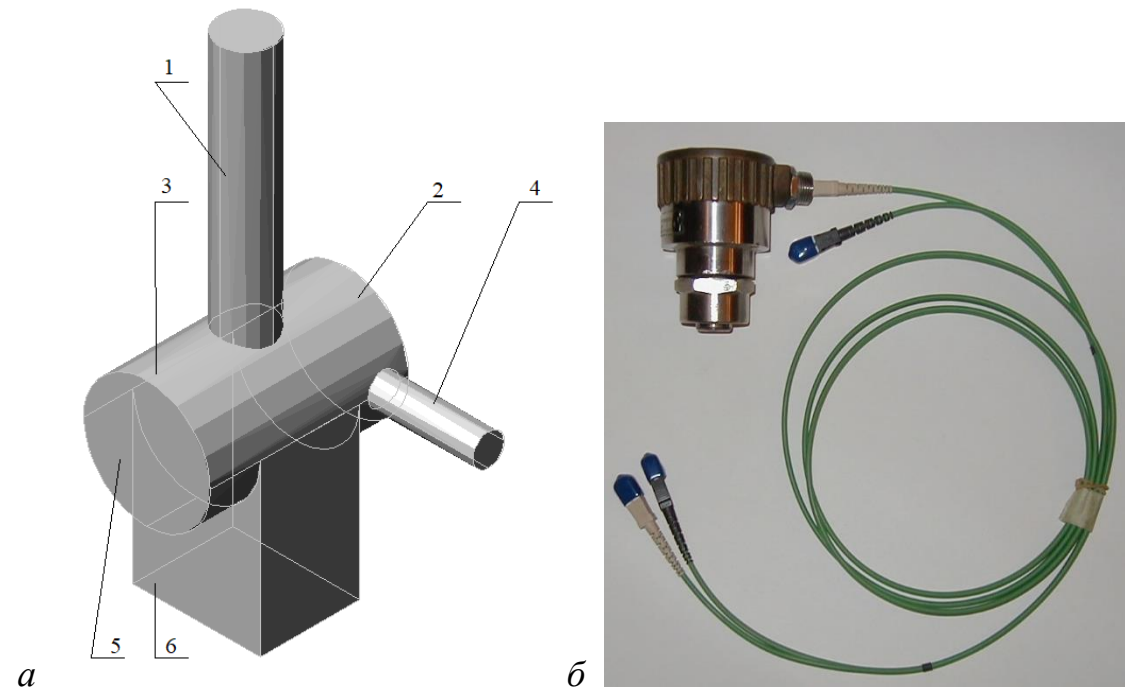


Рисунок 4.1 – Модель маятникового волоконного акселерометра: *а* – устрій: 1 – опорний світловод; 2 – вимірювальний світловод; 3 – компенсуючий світловод; 4 – інерційна маса; 5 – відбиваючий шар; 6 – основа; *б* – зовнішній вигляд [139]

4.2 Апаратурно-методичне забезпечення експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження полягали в оцінюванні як статичних, так і динамічних характеристики макетного зразка.

Для здійснення експериментальних досліджень був використаний комплекс, що складається з встаткування, що серійно випускається, і супроводжуючого програмного забезпечення, та такого, що використовується в центральній заводській лабораторії ПАТ "Одескабель".

Стенд для визначення статичної характеристики складається з механічної частини й волоконно-оптичної (рис. 4.2.) [49]. Основу останньої становить рефлектометр *Wavetek*, що представляє собою двомодульну платформу.

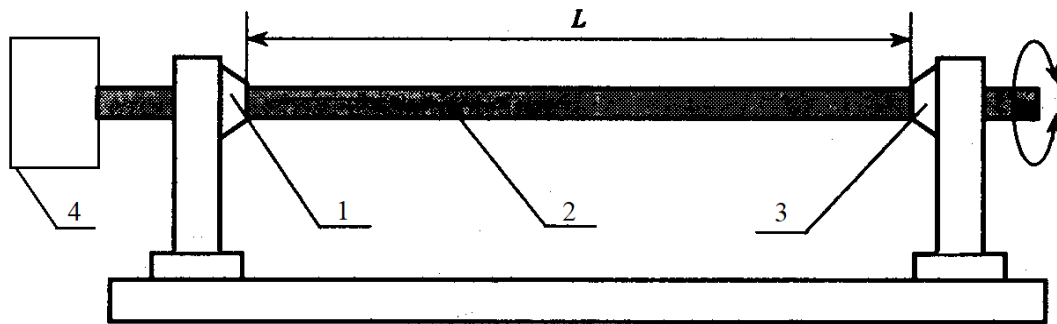


Рисунок 4.2 – Схема стана для визначення статичної характеристики: 1 – нерухливий затискач; 2 – об'єкт контролю; 3 – обертовий затискач із мікрометричним гвинтом і кутоміром; 4 – рефлектометр

У рефлектометрі сполучені функції рефлектометра, джерела лазерного випромінювання й вимірника потужності для роботи з усіма типами ОВ на довжинах хвиль 0,85, 1,30, 1,31, 1,55 і 1,625 мкм. Обробка результатів вимірів виконується програмою *Wintrace* [64].

Комплекс для дослідження динамічних характеристик для установки контрольованого об'єкта в заданих положеннях, генерації коливань, візуалізації інформації й здійснення керування процесом випробувань містить у собі низькочастотний і високочастотний вібростенди та рефлектометр *Wavetek*. Низькочастотний стенд, що складається з основи, з якої через пружинні підвіси, сполучається верхня рухлива плита (рис. 4.3). На валу двигуна постійного струму, закріпленого на основі, міститься ексцентрик. При обертанні валу ексцентрик викликає коливання верхньої плити, на якій перебуває контрольований об'єкт. Стенд створює коливання у діапазоні 200 ... 300 Гц для визначення впливу вібраційних процесів на ОВ довжиною 2000 м та стандартні оптичні з'єднувачі.

Високочастотний вібростенд із динамічним урівноважуванням коливних мас, що містить станину, основний вібратор із платформою для кріплення випробовуваного об'єкту й основою, закріпленим на станині вібратор, що врівноважує, генератор високої частоти й підсилювач (рис. 4.4).



Рисунок 4.3 – Загальний вигляд низькочастотного стенду

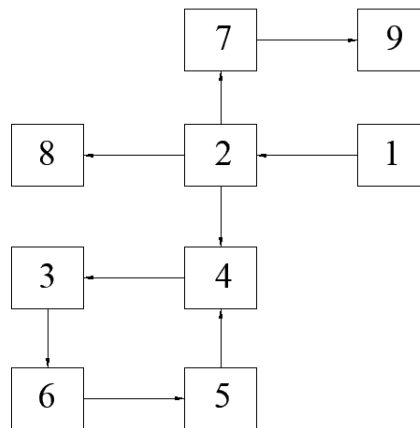


Рисунок 4.4 – Структурна схема стенда для дослідження динамічної характеристики: 1 – генератор високої частоти; 2 – основний вібратор; 3 – блок керування; 4 – датчик сили; 5 – вібратор, що врівноважує; 6 – підсилювач; 7 – об'єкт контролю; 8 – частотомір; 9 – рефлектометр

Для підвищення точності виміру амплітуди прискорення, стенд обладнаний блоком керування, з'єднаним з підсилювачем, що збуджує вібратор, що врівноважує, з датчиком сили, установленим між основою й станиною, а вібратори виконані у вигляді п'єзоелементів [7, 45]. Для виміру в процесі випробувань частоти вібрацій використаний частотомір MS6100. Контроль оптичних параметрів на обох стендах виконувався рефлектометром *Wavetek*. Підготовка ОВ до вимірів виконана за допомогою спеціалізованого зварювального пристрою *Fujikura*.

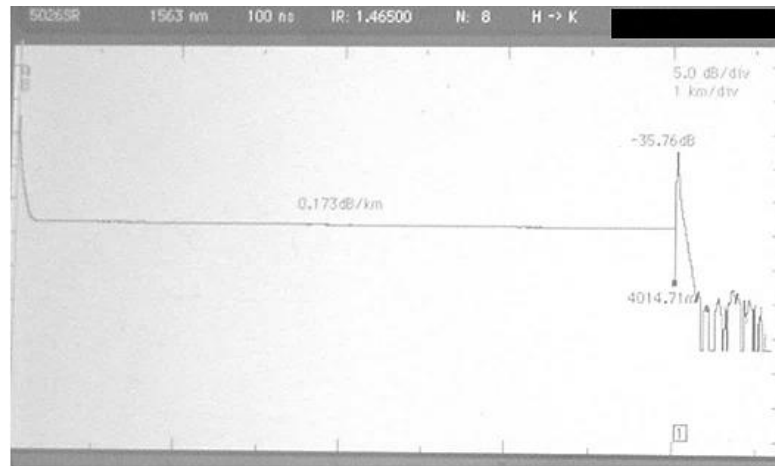
У якості контрольної характеристики прийняте загасання оптичної потужності. Цей параметр, з одного боку, підлягає найбільшим змінам, і це дозволяє більш точно виявити ступінь і характер змін, що відбуваються в об'єкті контролю. З іншого боку, контроль загасання можливо здійснювати в реальному масштабі й за мінімальний час на виконання вимірів. Усі дослідження проведені в кліматичних умовах у відповідності зі стандартом МЭК 60068-1. Випробування ОВ на стійкість до вібрації виконані відповідно до *Bellcore TR-NWT-001121*.

Випробування ОВ на стійкість до осьового крутіння виконані відповідно до МЭК 60794-1-2, метод E7 або ГОСТ 12182.7 [49].

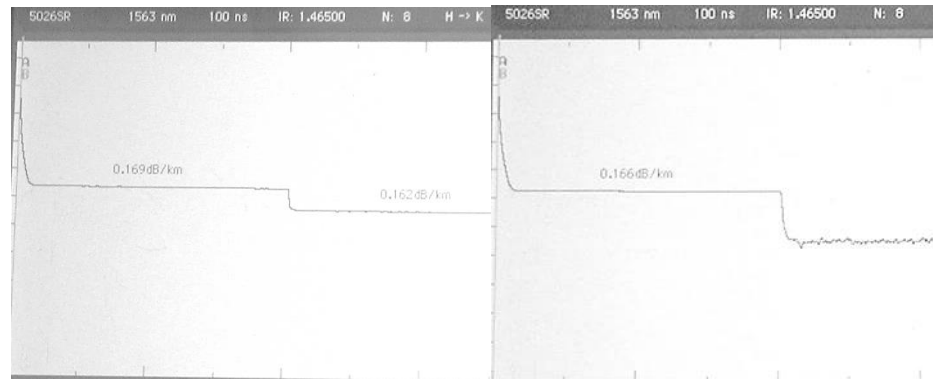
При дослідженні статичних характеристик моделі ЧЕ фіксувалися в затискачах стенда. Вільний кінець ЧЕ з'єднувався з рефлектометром. Потім, мікрометричним гвинтом приводився в дію рухливий затискач. Кут обертання рухливого затискача контролювався по кутоміру. З інтервалом кута закручування в $0,5^\circ$, у діапазоні $0 \dots 5^\circ$, знімалися рефлектограми. По досягненню граничної величини кута крутіння ОВ верталосся у вихідний стан і знімалася контрольна рефлектограма. На основі банку рефлектограм оцінювалася залежність величини загасання в оптичному коаксіальному ЧЕ від кута крутіння, а також наявність залишкових втрат оптичної потужності. Таким чином, формувався графік експериментальної статичної характеристики моделі ВОА.

Динамічні характеристики моделі досліджувалися за допомогою високочастотного вібростенду. Стенд створював коливання основи, на якій був закріплений досліджувана модель в діапазоні $15 \dots 20$ кГц. На сталих режимах коливань та після вимкнення стенду знімалася рефлектограми. На основі банку рефлектограм оцінювалася залежність величини загасання в оптичному коаксіальному ЧЕ від частоти коливань, а також наявність залишкових втрат оптичної потужності. Таким чином, формувався графік експериментальної динамічної характеристики моделі ВОА. Зразки отриманих рефлектограм наведені на рис. 4.5 а-д. З

урахуванням результатів досліджень [65] вплив температури на характеристики коаксіальної структури ЧЕ ВОА не досліджувався.

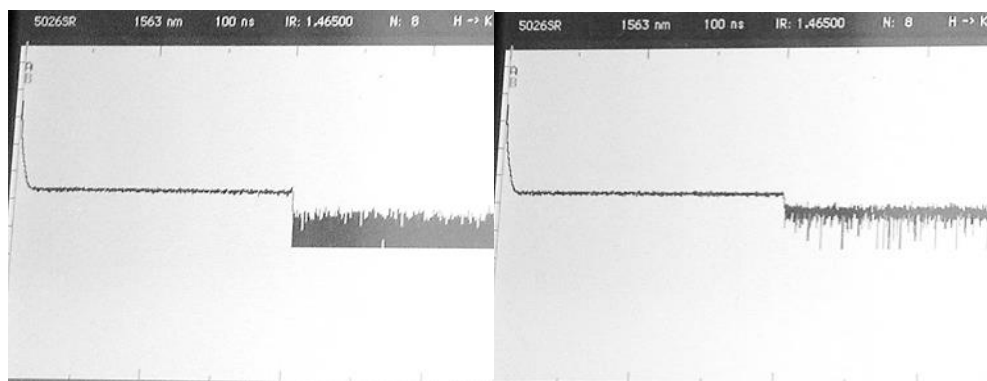


a)



б

в



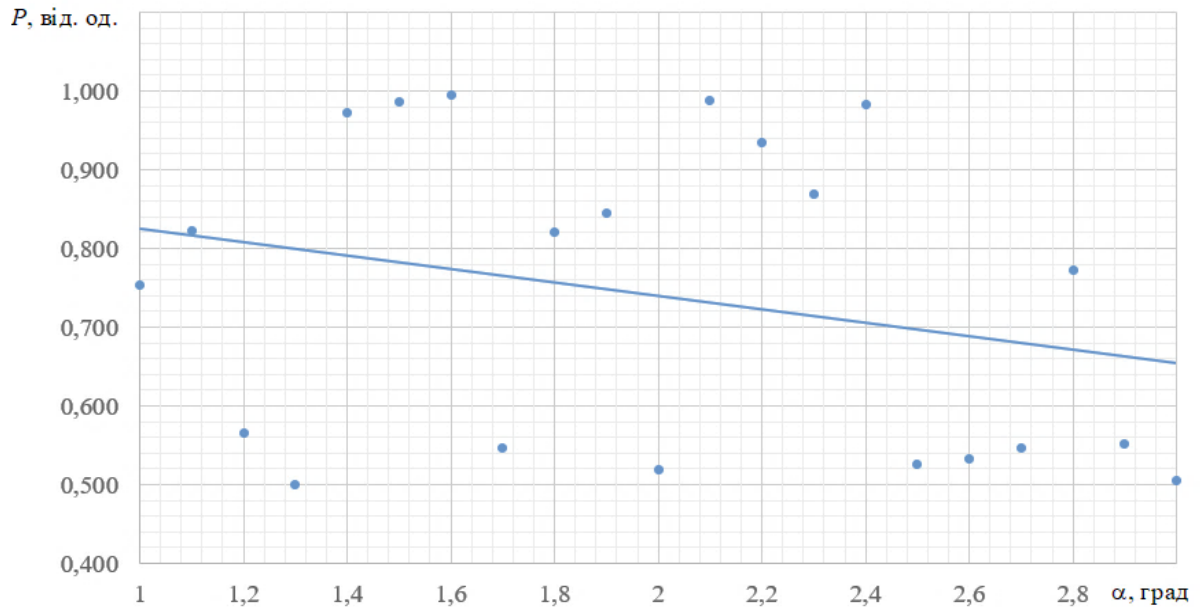
г)

д)

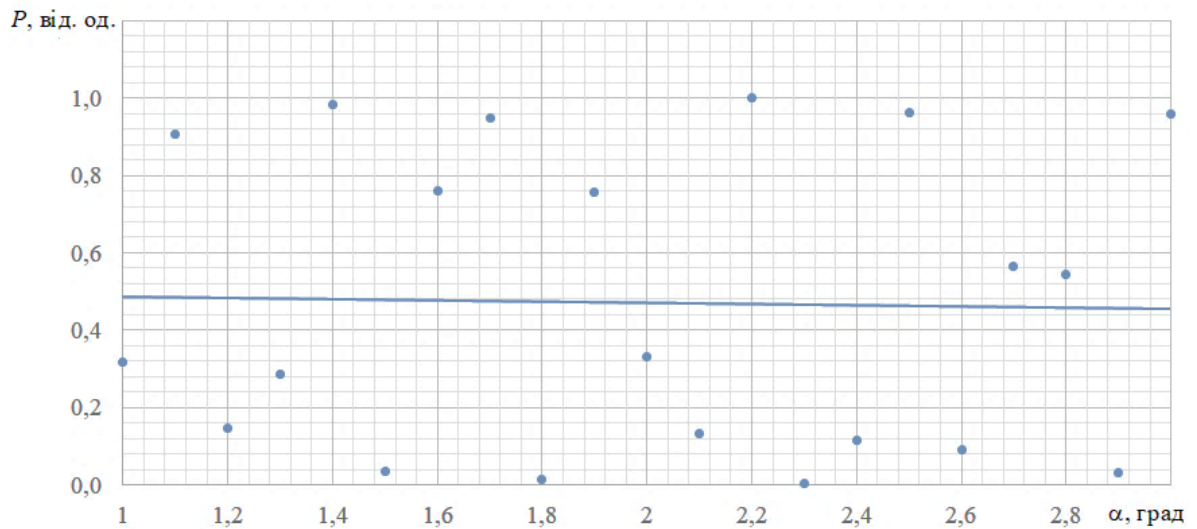
Рисунок 4.5 – Рефлектограми: а – перед початком випробувань; б – кут крутіння 3° ; в – кут крутіння 5° ; г – частота коливань 15 кГц; д – частота коливань 20 кГц

4.3 Результати експериментальних досліджень

Результати експериментальних досліджень величини інтенсивності оптичного випромінювання, що надходить з моделі ЧЕ, яка виконана з різних матеріалів, після деформації крутіття представлені на рис. 4.6 *а - в*.

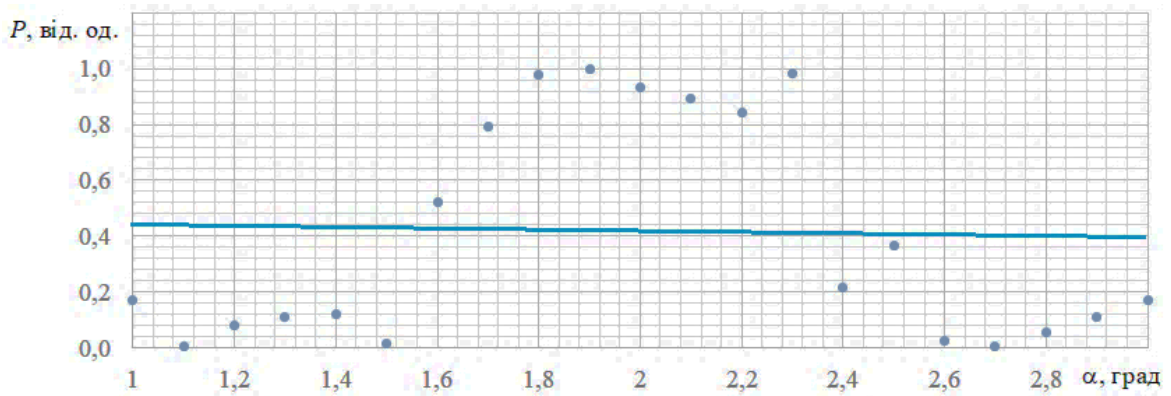


а



б

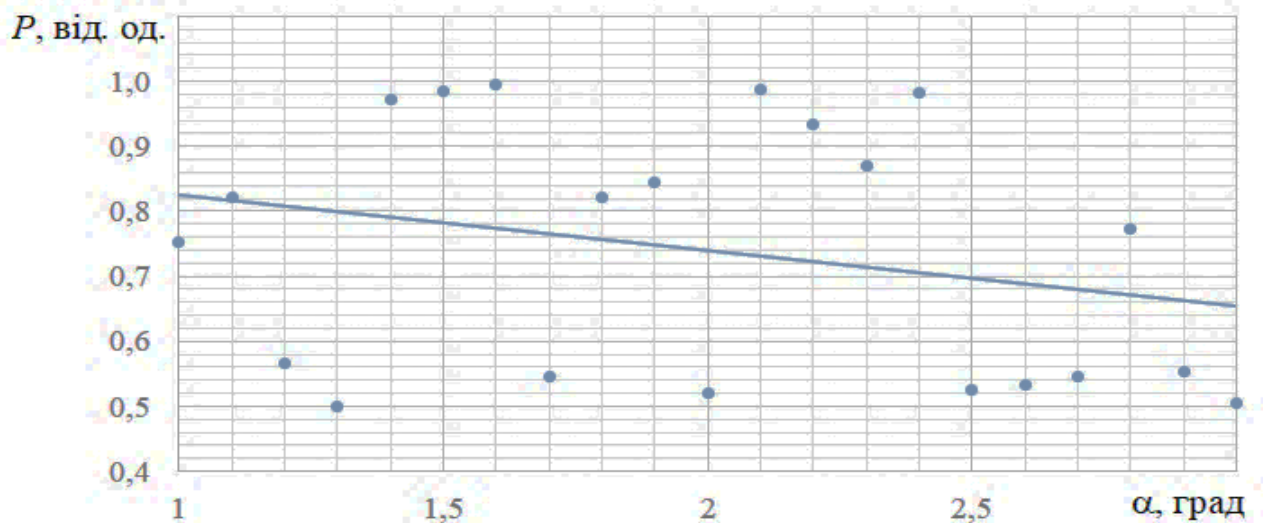
Рисунок 4.6 – Статична характеристика ЧЕ діаметром 0,014 м виготовленого зі скла: *а* – сапфірового; *б* – органічного



в

Рисунок 4.6 – Статична характеристика ЧЕ діаметром 0,014 м виготовленого зі скла: в – кварцового

Отримані результати (рис. 4.6, 4.7), аналогічні залежностям, наведеним у главі 3, і враховують реальний коефіцієнт зв'язку між серцевинами, що визначає тунелювання оптичної потужності між серцевинами ЧЕ. Аналіз наведених експериментальних і розрахункових статичних характеристик різних дослідних зразків показує, що максимальна їхня розбіжність не перевищує 5,9 % для ЧЕ діаметром 0,014 м і 6,4 % для ЧЕ діаметром 0,04 м щодо максимального значення вихідного сигналу.



а

Рисунок 4.7 – Статична характеристика ЧЕ діаметром 0,04 м виготовленого зі скла: а – сапфірового

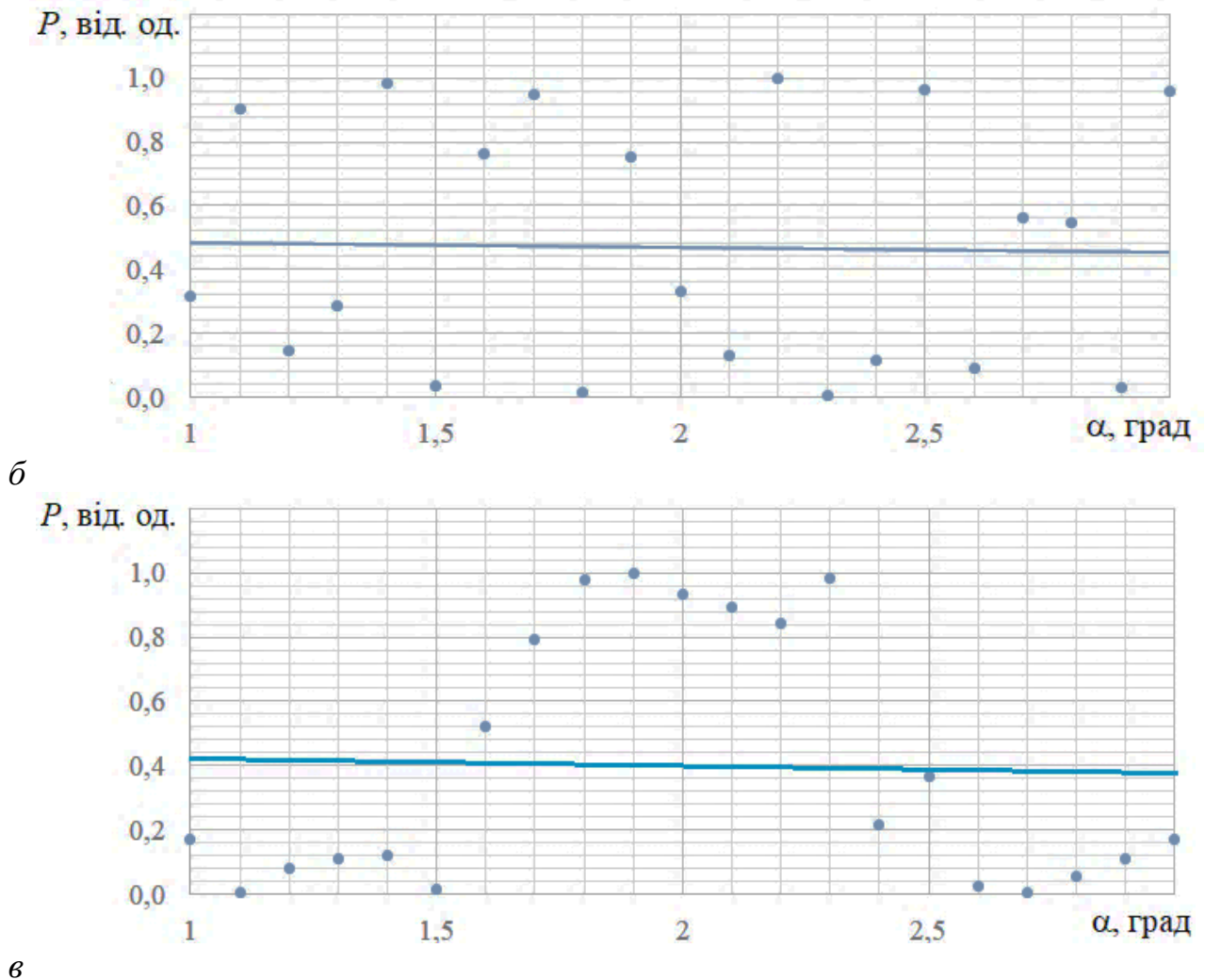


Рисунок 4.7 – Статична характеристика ЧЕ діаметром 0,04 м виготовленого зі скла: б – органічного; в – кварцового

Загалом результати статичних випробувань дозволили дійти висновку щодо адекватності функції перетворення ВОА, отриманої в третій главі дослідження.

Для визначення динамічних характеристик у високочастотному діапазоні застосовані ЧЕ діаметром 0,014 м, довжиною 0,005 м та набором ІМ різної ваги. Результати експериментальних досліджень динамічних характеристик дослідного зразка, представлено на рис. 4.8.

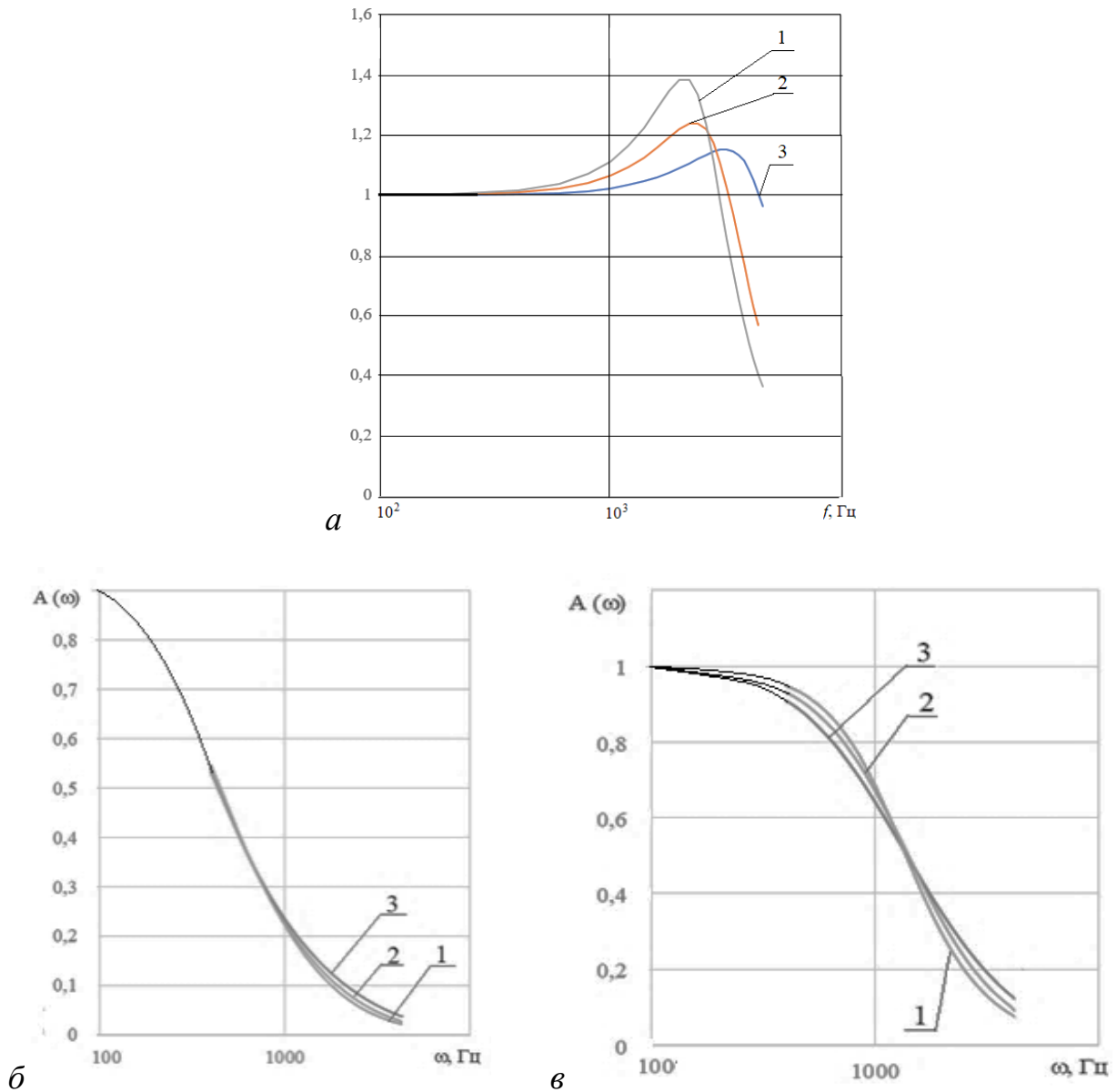


Рисунок 4.8 – Амплітудно-частотна характеристика ЧЕ діаметром 0,014 м виготовленого зі скла: *а* – сапфірового; *б* – органічного; *в* – кварцового. Вага ІМ, кг: 1 – 0,0001; 2 – 0,00015; 3 – 0,0002

Максимальне відхилення експериментальних значень від розрахункових не перевищує 3,8 %, що свідчить достатню ступінь адекватності визначеної математичної моделі механічної підсистеми ВОА.

Аналіз результатів випробування на низькочастотному стенді, з урахуванням результатів [121], дозволило запропонувати інваріантну до впливу ДФ конструкцію з'єднувача ОВ [80].

4.4 Висновки до розділу 4

Аналізуючи отримані результати експериментальних досліджень можна дійти таких висновків:

1. Розроблені й практично реалізовані дослідні зразки ВОА які виконані з різних матеріалів та з різними розмірами ЧЕ.
2. Реалізовані експериментальні комплекси для дослідження статичної та динамічних характеристик, що дозволяють здійснювати процес проведення експериментів, а також обробку їх результатів. При цьому експериментальні комплекси включають виключно існуючі обладнання та програмне забезпечення.
3. Уперше створений і експериментально досліджений макетний зразок ВОА маятникового типу, який відрізняється тим, що застосована модель моноблочного чутливого елемента перетворювача на основі сапфірового скла, що містить депресовану, первинну та вторинну серцевини.
4. У результаті визначення статичної характеристики ВОА встановлено, що максимальне відхилення теоретичних і експериментальних значень статичної характеристики не перевищує 5,9 % для ЧЕ діаметром 0,014 м і 6,4 % для ЧЕ діаметром 0,04 м, що свідчить про адекватність математичної моделі оптичної підсистеми акселерометра.
5. У результаті дослідження динамічних характеристик моделі ВОА визначено, що максимальне відхилення експериментальних АЧХ від теоретичних не перевищує 3,5 %, що дозволяє дійти висновку щодо адекватності математичної моделі руху маятникового елемента акселерометра, а також виразів для його динамічних характеристик.
6. На підґрунті досліджень встановлені найбільш доцільні діапазони геометричних розмірів елементів ВОА, при яких забезпечено максимальне наближення характеристик ВОА до теоретичних.

7. Встановлено, що вигляд залежності вихідного сигналу ВОА від величини контрольованого параметру, отриманий експериментально, схожий з виглядом залежності, визначеної в теоретичній функції перетворення акселерометра.

8. На основі досліджень визначено джерело втрат оптичної потужності у стандартних оптичних з'єднувачах та запропоновано нове схемотехнічне рішення інваріантного до ДФ з'єднувача.

9. На основі результатів експериментальних досліджень підтверджені отримані теоретично висновки про перевагу технічних характеристик досліджуваного ВОА над оптичними акселерометрами відомих типів.

ВИСНОВКИ

Дисертаційне дослідження містить нове вирішення актуального науково-технічного завдання, яке полягає у науковому обґрунтуванні, розробці і дослідженні нового засобу діагностики та прогнозування технічного стану підшипникових вузлів СГТУ. Доведено, що запропонований засіб забезпечує підвищення вірогідності процесів діагностування за рахунок використання принципів часткової інваріантності до зовнішніх неконтрольованих впливів на вимірювання, запропонованим методом синтезу основних процесів перетворення світла, конструкції, комбінації матеріалів і одержанням діагностичної інформації про стан підшипникових вузлів СГТУ.

Найбільш важливими науковими і практичними результатами, отриманими у ході виконання дослідження є наступні.

Найбільш важливими науковими і практичними результатами, отриманими у ході виконання дослідження, є наступні.

1. Аналіз основних ознак деструкції та можливостей основних методів контролю вібрації елементів підшипникових вузлів СГТУ дозволив визначити, що найбільш інформативним для задач діагностування стану підшипників є метод контролю обгинаючого спектру високочастотної вібрації.

2. Визначено, що найбільш завадостійкими до впливу експлуатаційних факторів є волоконно-оптичні засоби діагностики та прогнозування технічного стану підшипників СГТУ, які побудовані на основі запропонованої маятникової схеми перетворювача з закритим оптичним каналом і чутливим елементом з депресованою серцевиною. За результатами оцінки можливостей методів корекції погрешностей обґрунтовано обрання двоканальної схеми діагностичного засобу стану підшипників СГТУ. Запропонована схема забезпечує ефективне діагностування стану підшипникових вузлів СГТУ до температур до 1400 °С.

3. Синтезована математична модель акселерометра на основі багатошарового оптичного хвилеводу дозволила визначити параметри діагностичного

засобу з урахуванням властивостей матеріалів та особливостей технології виробництва.

5. Одержав подальшого розвитку метод визначення конструктивних параметрів акселерометрів, який може застосовуватися для створення широкого спектру і номенклатури волоконних вимірювальних перетворювачів різного цільового призначення.

6. Виконані експериментальні дослідження характеристик макетного зразка запропонованого діагностичного засобу, доведена адекватність фізичним процесам удосконалених і розроблених його математичних моделей. Створені експериментальні стенди для дослідження статичних й динамічних характеристик теоретично обґрунтованої конструкції діагностичного засобу.

7. Визначено, що впровадження нового засобу превентивного діагностування та прогнозування технічного стану підшипникових вузлів дозволить досягти підвищення ефективності використання та надійності СГТУ за рахунок зниження аварійності на 6 ... 11 %, збільшення міжремонтного періоду та зменшення експлуатаційних витрат на 8 ... 10 ам. дол. на 1 кВт·г генерованої потужності за рік роботи зі середньостатистичним навантаженням. Результати досліджень є універсальними і можуть бути розширеними для застосування у інших діагностичних засобах водного транспорту.

8. Перспективним напрямком подальших досліджень є синтез волоконно-оптичних засобів діагностики та прогнозування технічного стану для СГТУ, що функціонують у особливих умовах експлуатації, а також для підшипникових вузлів інших суднових машин і механізмів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аграфонов, Ю. В. и др. Взаимодействие излучения с веществом: фундаментальные проблемы физики и технологии. Режим доступа: [http:// holoscience.chat.ru/1.htm](http://holoscience.chat.ru/1.htm).
2. Адамс, М. Введение в теорию оптических волноводов. – М.: Мир, 1984. – 512 с.
3. Акимов, В. М. Основы надежности газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1981. – 257 с.
4. Алексеенко, Б. А. Системы измерения напряженности электромагнитного поля в объеме камеры СВЧ / Б. А. Алексеенко // Високі технології в машинобудуванні. – 2017. – № 1 (27). – С. 10-24.
5. Антонов А. В. Системный анализ. – М.: ВШ, 2004. – 454 с.
6. Артемов, Г. А. Совершенствование судовых газотурбинных двигателей. – Л.: Судостроение, 1984. – 240 с.
7. А.с. 317941 СССР, МПК G 01 m 7/00. Высокочастотный вибростенд / М.А. Каминский, Н.И. Корнеева, А.М. Муравьев, Н.И. Сидоров, Э.М. Умецкий (СССР). – №1235164/25-28; заявлено 19.04.68; опубл. 19.10.71, Бюл. № 31. – 2 с.
8. Бабій, Ю. О. Модель синтезу функціональної структури волоконно-оптичного засобу охорони підвищеної завадостійкості та живучості / Ю. О. Бабій // Збірник наукових праць Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова. – 2017. – Вип. 14. – С. 55-61.
9. Баринов, И. И. Высокотемпературные тензорезистивные датчики давления на основе карбида кремния / И. И. Баринов // Компоненты и технологии. – 2010. – №8. – С. 64-71.
10. Барков, А. В., Баркова, Н. А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. – СПб.: Изд. СПбГМТУ, 2004. – 151 с.

11. Барков, А. В., Баркова, Н. А., Азовцев, А. Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. – СПб.: Изд. СПбГМТУ, 2000. – 158 с.
12. Баркова, Н. А. Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и оборудования. – СПб.: Изд. СПбГМТУ, 2003. – 158 с.
13. Баркова, Н. А. Оптимизация методов диагностики подшипников качения по высокочастотной вибрации / Н. А. Баркова // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования / Санкт-Петербургский энергетический институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов Минэнерго РФ. – 2000. – № 15. – 128 с.
14. Барыбин, А. А. Электродинамика волноведущих структур. Теория возбуждения и связи волн. – М.: Физматлит, 2007. – 512 с.
15. Бекренев, Н. В., Великанов, О. А., Дударев, О. А. Керамика и ситаллы в приборостроении. Свойства. Технологические процессы обработки. Инструменты. – Саратов: СГТУ, 2006. – 128 с.
16. Белоус, П. А. Осесимметричные задачи теории упругости. – Одесса: ОГПУ, 2000. – 183 с.
17. Бескорвайный, В. В. Методы анализа и синтеза решений при автоматизированном проектировании структур территориально распределенных объектов: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.12. – Харьков, 2004. – 354 с.
18. Бондаренко, Л. Н., Нефедьев, Д. И. Анализ тестовых методов повышения точности измерений / Л. Н. Бондаренко, Д. И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 1(7). – С. 15-20.
19. Борисков, К. Ф., Плотников, П. Н. Комплексный анализ и статистика аварийных остановов газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях. Режим доступа: http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/55295/1/tmuenin_2017_029.pdf.

20. Буймистрюк, Г. Я. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий. Режим доступа: [https:// controlengrussia.com/apparatnye-sredstva/ volonno-opticheskie-datchiki-dlya-ekstremalnih-uslovij](https://controlengrussia.com/apparatnye-sredstva/volonno-opticheskie-datchiki-dlya-ekstremalnih-uslovij).

21. Бусленко, Н. П., Калашников, В. В., Коваленко, В. В. Лекции по теории сложных систем. – М.: Сов. радио, 1973. – 440 с.

22. Бусурин, В. И., Носов, Ю. Р. Волоконно-оптические датчики. Физические основы, вопросы расчета и применения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

23. Бусурин, В. И. Методика расчета микро-оптико-электро-механического преобразователя угловых скоростей / В. И. Бусурин, А. Т. Фам, В. В. Коробков, В. М. Медведев, М. Л. Жеглов // Вестник ЮУрГУ. Серия "Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника". – 2018. – Т.18. – № 2. – С. 93-102.

24. Вавилов, В. Д., Тимошенко, С. П., Тимошенко, А. С. Микросистемные датчики физических величин. – М.: Техносфера, 2018. – 550 с.

25. Вибрационная диагностика подшипников качения: Методические указания к лабораторной работе / Н. А. Баркова, Е. И. Крапивский, А. В. Шалыгин, В. В. Шорников. – СПб: СПбГИ, 2010. – 38 с.

26. Вибродиагностика подшипников качения. "Мнения". Режим доступа: <http://vibrotec.ru>.

27. Волков, В. З., Филатова, М. С., Неймарк, В. И. Создание и исследование оборудования для производства синтетических волокон / В. З. Волков, М. С. Филатова, В. И. Неймарк // сборник научных трудов Министерства машиностроения для легкой и пищевой промышленности и бытовых приборов СССР, Всесоюзный НИИ легкого и текстильного машиностроения, Всесоюзный НИИ машин для производства синтетических волокон. – 1981. – С. 119-136.

28. Волоконно-оптические датчики /Т. Окуси, К. Окамато, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К. Хататэ; под ред. Т. Окуси: пер. с японского. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

29. Гауэр, Д. Оптические системы связи: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 504 с.
30. Герова, С. В. Основные неисправности узлов и деталей турбин, методы восстановления деталей турбинных установок. Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/directions.html>.
31. ГОСТ 13659-78. Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры. – М.: Издательство стандартов 1978. – 27 с.
32. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 18 с.
33. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М.: Издательство стандартов, 1979. – 18 с.
34. ГОСТ 23136-93. Материалы оптические. Параметры. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, 1993. – 22 с.
35. ГОСТ 25865-83. Средства измерения вибрации с пьезоэлектрическими измерительными преобразователями. Основные параметры и технические требования. – М.: Издательство стандартов, 1983. – 17 с.
36. ГОСТ 3514-94. Стекло оптическое бесцветное. Технические условия. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, 1994. – 36 с.
37. Гречишников, В. М., Гречишников, С. В. Обобщенная математическая модель цифровых преобразователей перемещения и методы ее анализа / В. М. Гречишников, С. В. Гречишников // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия физико-математические науки. – 1998. – Вып. 6. – С. 111-119.
38. Гриндула, В. В. Влияние углеводородных смазочных средств на выносливость стали / В. В. Гриндула // Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – Вып. №1 (7). – С. 94-96.
39. Гроднев, И. И. Волоконно-оптические линии связи. – М.: Радио и связь, 1990. – 224 с.

40. Гроднев, И. И., Ишкин, В. Х. Волоконно-оптическая связь вдоль линий электропередачи / И. И. Гроднев, В. Х. Ишкин // Электросвязь. – №3. – 1996. – С. 21-22.
41. Грудинин, А. Б., Дианов, Е. М. Световоды для широкополосных линий связи / А. Б. Грудинин, Е. М. Дианов // Электросвязь. – 1981. – №1. – С. 33-38.
42. Гуляев, Ю. В., Меш, М. Я., Проклов, В. В. Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение. – М.: Радио и связь, 1991. – 152 с.
43. Дейнека, И. Г. Исследование и оптимизация точностных и динамических параметров волоконно-оптических интерферометрических датчиков: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.01. – СПб., 2014. – 124 с.
44. Демидович, В. М. Исследование теплового режима подшипников ГТД. – М.: Машиностроение, 1978. – 172 с.
45. ДСТУ ГОСТ ИСО 2954:2004. Вібрація машин з зворотно-поступальним й обертальним рухом. Вимоги до засобів вимірювання (ГОСТ ИСО 2954-97, IDT). – К.: ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ УКРАЇНИ, 2004. – 13 с.
46. Зак, Е. А. Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 125 с.
47. Зубчанников, В. Г. Основы теории упругости и пластичности. – М: ВШ, 1990. – 368 с.
48. Иноземцев, А. А., Нихамкин, М. А., Сандрацкий, В. Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. – М.: Машиностроение, 2007. – 208 с.
49. Иоргачев, Д. В., Бондаренко, О. В. Волоконно-оптические кабели и линии связи. – М.: Эко-Трендз, 2002. – 238 с.
50. Кизеветтер, Д. В., Малюгин В. И. Влияние дефектов торцевой поверхности световода на эффективность ввода излучения / Д. В. Кизеветтер, В. И. Малюгин // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72 – Вып. 9. – С. 80-86.

51. Кизеветтер, Д. В., Малюгин, В. И. Влияние шероховатости поверхности торца световода на эффективность ввода электромагнитного излучения / Д. В. Кизеветтер, В. И. Малюгин // Журнал технической физики. –1986. – Т.56. – Вып.1. – С. 68-71.

52. Кирюхин, А.Л. Повышение эффективности использования опорных гидростатодинамических подшипников корабельных энергетических установок: Дис. канд. техн. наук: 05.08.05 / Севастопольский военно-морской ин-т им. П.С. Нахимова. - Севастополь, 2000. – 238 с.

53. Кирюхин, А.Л., Романовский, Г.Ф., Ханмамедов, С.А. Системы удержания и стабилизации валов судовых энергетических установок / А. Л. Кирюхин, Г. Ф. Романовский, С. А. Ханмамедов // Судовые энергетические установки. – 2011. – Вып. 27. – С. 10-16.

54. Ковеза, Ю. В., Никитин, С. В., Пшеничных, С. И. О решении тепловой задачи применительно к обычным гибридным подшипникам качения газотурбинных двигателей / Ю. В. Ковеза, С.В. Никитин, С.И. Пшеничных // Авиационно-космическая техника и технологии. – 2008. – №10 (57). –С. 132-135.

55. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей / С. А. Вьюнов, Ю. И. Гусев, А. В. Карпов и др./ Под общ. ред. Д. В. Хромина. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.: ил.

56. Кравчук, А. С., Кравчук, А. И., Тарасюк, И. А. Уравнения крутильных колебаний круглого продольно волокнистого, поперечно слоистого и структурно неоднородного композиционного стержня / А. С. Кравчук, А.И. Кравчук, И. А. Тарасюк // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. – 2015. – №4. – С. 147-159.

57. Красюк, Б. А., Семенов, О. Г., Шереметьев, А. Г. Световодные датчики. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.

58. Кривулин, Н. П. Оптимизация параметров волоконно-оптических преобразователей информационно-измерительных систем: автореф. дис. ... докт. тех. наук: 05.11.16/ Пензенский государственный университет – Пенза, 2008. – 35 с.

59. Круглов, Р. С. Аппельт, В. Э., Задорин, А. С. Динамические искажения сигналов в многомодовых оптических волокнах. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskie-iskazheniya-signalov-v-mnogo-modovyh-opticheskikh-voлокнах>.

60. Кулеш, А. Ю. Оптимизация оптических и прочностных свойств световодов, изготавливаемых MCVD методом. дис. ... кандидата физ.-мат наук: 01.04.05/ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. – СПб., 2016. – 126 с.

61. Кумалагов, И. А. Пороки, вызванные химическим взаимодействием стекла. Режим доступа: <http://miuz.org/node/4299>.

62. Левшина, Е. С., Новицкий, П. В. Электрические измерения физических величин. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 315 с.

63. Лиманова, Н. И. Датчики механических величин, инвариантные к дестабилизирующим факторам. дис. ... доктора. техн. наук: 05.13.05. – Самара, 2006. – 288 с.

64. Листвин, А. В., Листвин, В. Н. Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРарт, 2005. – 208 с.

65. Майер, А. А. О возможности практического использования эффекта самопереключения в связанных волноводах для усиления полезной модуляции сигнала / А. А. Майер // Квантовая электроника. – 1987 – Т. 14. – № 8. – С. 1596-1602.

66. Маркузе, Д. Оптические волноводы. – М.: Мир, 1974. – 576 с.

67. Мартыновский, В. А. Использование спектра огибающей высокочастотной вибрации для диагностики подшипников качения / В. А. Мартыновский // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – № 3. – 2002. – С. 17-21.

68. Мендес, А. Морзе, Т. Справочник по специализированным оптическим волокнам. – М: Техносфера, 2012. – 728 с.

69. Менский, Б. М. Принцип инвариантности в автоматическом регулировании и управлении, – М.: Машиностроение, 1972. – 247 с.

70. Микаэлян, Э. А. Повышение надежности, безопасности, устойчивой работы газотурбинных газоперекачивающих агрегатов / Э. А. Микаэлян // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2009. – № 4. – С. 68-74.

71. Моек, Е., Штрикерт, Х. Техническая диагностика судовых машин и механизмов. – Л.: Судостроение, 1986. – 232 с.

72. Мурашкина, Т. И., Бадеева, Е. А. Волоконно-оптические приборы и системы: Научные разработки НТЦ "Нанотехнологии волоконно-оптических систем" Пензенского государственного университета. – СПб.: Политехника. – 2018. – 187 с.

73. Неразрушающий контроль: Справочник: Т. 7: Балицкий Ф.Я., Барков А. В., Баркова Н. А. и др. Вибродиагностика. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.

74. Новицкий, П. В., Левшина, Е. С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. – Л.: Энергия, 1975. – 576 с.

75. Овчинкин, А. В. Исследование процессов взаимодействия компонентов волоконно-оптического кабеля под воздействием механо-термических нагрузок, возникающих при эксплуатации информационно-измерительных систем: дис. ... канд. физ-мат. наук: 05.11.16. – Иркутск, 2004. – 146 с.

76. Осовицкий, А. Н., Тупанов, Л. В. Методика измерения шероховатости гладких поверхностей диэлектриков волноводным методом / А. Н. Осовицкий, Л. В. Тупанов // Фотон-экспресс. – 2006 – № 6. – С. 178-182.

77. Патент України на корисну модель № 71295А, МПК 7 G01М 11/00. П'єзооптичний акселерометр / В. В. Нікольський, А. К. Сандлер; заявники та

володарі патенту Нікольський, В. В., Сандлер, А. К. – № 20031211820; – заявл. 18.12.2003; опубл. 15.11.2004, бюл. № 11. – 2 с.

78. Патент України на корисну модель № 16068, МПК (2006) G01M 11/00. Волоконно-оптичний віброакселерометр / А. К. Сандлер; заявник та володар патенту Сандлер, А. К. – № u200601725; – заявл. 02.02.2011; опубл. 17.07.2006, бюл. № 7.–3 с.

79. Патент України на корисну модель № 62437, МПК (2011) G01M 11/00. Інваріантний волоконний акселерометр / А. К. Сандлер, О. А. Сандлер; заявники та володарі патенту Сандлер, А. К., Сандлер, О. А. – № u201101149; – заявл. 02.02.2011; опубл. 26.10.2011, бюл. № 18. – 3 с.

80. Патент України на корисну модель № 110051, МПК (2016.01) G02B 6/00 G01M 11/00. Повнообертовий волоконно-оптичний з'єднувач / А. К. Сандлер; заявник та володар патенту Сандлер, А. К. – № u201602359; – заявл. 11.03.2016; опубл. 26.09.2016, бюл. № 18. – 3 с.

81. Патент України на винахід № 108519, МПК (2015.01) G02B 6/00 G01N 19/10 G01K 5/10. Волоконно-оптичний датчик клімат-контролю для вимірювання вологості і температури / А. К. Сандлер, Ю. М. Цюпко, О. А. Сандлер, К. Ю. Цюпко; заявники та володарі патенту Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М., Сандлер, А. К., Цюпко, К. Ю – № a201306835; – заявл. 31.05.2013; опубл. 12.05.2015, бюл. № 9. – 3 с.

82. Петров, Б. М. Принцип инвариантности и условия его применения при расчете линейных и нелинейных систем / Б.М. Петров // Труды 1 Международного конгресса ИФАК. – 1961. – С. 259-271.

83. Петров, Б. М. Рутковский, В. Ю. Крутова, И. Н. Принцип построения и проектирования самонастраивающихся систем управления. – М.: Машиностроение, 1972. – 259 с.

84. Пластичные смазки SKF для подшипников: эффективные решения для любых областей применения. Режим доступа <http://www.tair74.ru/production/smearing/plsmaz>.

85. Поляков, А. В. Волоконно-оптическая система скважинной термометрии рециркуляционного типа / А. В. Поляков // Известия ВУЗОВ. Приборостроение. – Т. 55. – № 9. – С. 84-90.

86. Потапов, В. Т. Новые типы оптических волокон для высокоскоростных систем передачи / В. Т. Потапов // Фотон-Экспресс. – 2001. – № 17. – С. 18.

87. Приборы для неразрушающего контроля качества материалов и изделий: Справочник, в 2-х книгах. /Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1986. – 840 с.

88. Равин, А. А. Диагностическое обеспечение судового энергетического оборудования: дис. ... доктора. техн. наук: 05.08.05. – СПб., 2015. – 436 с.

89. Редкий, А. К. Поперечно-неоднородные и продольно-нерегулярные открытые диэлектрические волноводы: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07. – Нижний Новгород, 2007. – 141 с.

90. Русский оптоволоконный датчик работает при 900°C. Режим доступа: http://www.cnews.ru/news/top/russkij_optovolokonnyj_datchik_rabotaet.

91. Рыбалко, В. В. Безотказность и диагностика газотурбинных установок. – СПб.: СПбГТУ РП, 2006. – 185 с.

92. Рябко, М. В. Исследование поляризационных характеристик микроструктурных оптических волокон: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 01.04.21 / Институт радиотехники и электроники РАН. – М., 2007. – 28 с.

93. Саенко, А. В., Бондарчук, Д. А. Разработка конструкции датчика давления на основе структуры сапфир-стекловидный диэлектрик-керамика / А. В. Саенко, Д. А. Бондарчук // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 7(201). – С. 24-32.

94. Сандлер, А. К. Волоконно-оптический акселерометр для диагностирования судовых газовых турбин / А.К. Сандлер // Автоматика-2012: XIX Міжнародна конференція з автоматичного управління, 26-28 вересня 2012 р.: матеріали конференції. – 2012. – С. 336.

95. Сандлер, А. К. Волоконно-оптический акселерометр для контроля высокочастотной вибрации судовых газотурбинных установок / А. К. Сандлер // Автоматика-2008: доклады 15 Міжнародної конференції з автоматичного управління – 23-26 вересня 2008 р. – С. 504-506.

96. Сандлер, А. К. Інформаційно-вимірювальні пристрої на основі волоконно-оптичних технологій: навчальний посібник. – Одеса: Видатінформ НУ "ОМА", 2018. – 165 с.

97. Сандлер, А. К. Моделирование акселерометра маятникового типа / А. К. Сандлер // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2019. – №1. С. 75-81.

98. Сандлер, А. К., Логишев, И. В. Выбор рационального способа модуляции в волоконном акселерометре / А. К. Сандлер, И. В. Логишев // Энергетика судна: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – 2014. – С. 131-133.

99. Сандлер, А. К., Логишев, И. В. Контроль положения валов судовых механизмов волоконно-оптическими устройствами / А. К. Сандлер, И. В. Логишев // Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – 2013. – С. 110- 13.

100. Сандлер, А. К., Логишев, И. В. Разработка волоконного акселерометра для контроля высокочастотной вибрации судовых механизмов / А. К. Сандлер, И. В. Логишев // Річковий та морський флот: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – 2017. – Т.2. – С. 14-17.

101. Сандлер, А. К., Логишев, И. В., Сандлер, А. А. Инвариантный волоконный акселерометр / А. К. Сандлер, И. В. Логишев, А. А. Сандлер // Энергетика судна: експлуатація та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – 2011. – С. 277-279.

102. Сандлер, А. К., Логишев, И. В., Сандлер, А. А. Метрологическая модель волоконного преобразователя вибраций / А. К. Сандлер, И. В. Логишев, А.

А. Сандлер // Энергетика судна: эксплуатация та ремонт: материалы научно-технической конференции. – 2010. – С. 87-89.

103. Сандлер, А.К., Логишев, И.В., Сандлер, А.А. Структурная модель инвариантного волоконного акселерометра / А. К. Сандлер, И. В. Логишев, А. А. Сандлер // Судовые энергетические установки. – 2011. – Вып. 25. – С. 87-93.

104. Сандлер, А. К. Чувствительный элемент волоконно-оптического акселерометра на основе сапфирового стекла / А. К. Сандлер // IX міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 05-06 листопада 2019 р.: матеріали конференції. – 2019. – С. 27-33.

105. Семенов, Н. В. Остаточные напряжения в элементах анизотропного оптического волокна "Панда" с учетом технологических несовершенств геометрии. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.04. – Пермь, –2015. –108 с.

106. Семенов, С. Л. Прочность и долговечность волоконных световодов на основе кварцевого стекла: автореф. дис. ... докт. физ.-мат наук: 01.04.07 - физика конденсированного состояния/ Научный центр волоконной оптики РАН. – М., 2007. – 35 с.

107. Смирнов В. А. Вибрационная диагностика подшипников качения двигателя НК-12СТ газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-6,3. Режим доступа: <http://www.vibration.ru/12nks/12nks.shtml>.

108. Снайдер, А., Лав, Д. Теория оптических волноводов. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.

109. Сопротивление усталости стали в среде минеральных масел / Н.В. Олейник, Ю.В. Степуренко, В.В. Гриндула, Л.Я. Курочкин. – Одесса: Астропринт, 2001. – 180 с.

110. Справочник по волоконно-оптическим линиям связи / Л. М. Андрушко, В. А. Вознесенский, В. Б. Каток и др.; под ред. С. В. Свечникова и Л. М. Андрушко. – К.: Техника, 1988. – 239 с.

111. Ступин, А. В., Пудов, Д. И. Эксплуатационные дефекты подшипников качения и их проявление в вибросигнале. Режим доступа: <http://ucom.ru/doc/na.2016.04.03.197.pdf>.

112. Техническая эксплуатация судовых газотурбинных установок / Г. Ш. Розенберг, А. С. Бондаренко, Е. С. Голуб и др./ Под ред. Г. Ш. Розенберга. – М.: Транспорт, 1986. – 222 с.

113. Технические средства диагностирования: Справочник / В. В. Клюев, П. П. Пархоменко, В. Е. Абрамчук и др.; под общ. ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.

114. Ткачев, А. Л. Влияние температуры на частотные характеристики микроакустических датчиков на поверхностных и объемных акустических волнах / А. Л. Ткачев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2008. – №48. – С. 42-48.

115. Трофимович, Г. К., Архангельский, Г. Л., Гильмутдинов, А. Г. Справочник инженера-механика судовых газотурбинных установок /Под ред. Е.Л. Речистера. – Л.: Судостроение, 1985. – 368 с.

116. Туз, Ю. М. Структурные методы повышения точности измерительных устройств. – К.: ВШ, 1976. – 266 с.

117. Удд, Э. Волоконно-оптические датчик. Вводный курс для инженеров и научных работников. – М.: Техносфера, 2008 – 520 с.

118. Унгер, Г. Г. Планарные и волоконные оптические волноводы /Пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 656 с.

119. Устинов, А. А., Нагорнов, Ю. С., Козлов, А. И. Сравнительные характеристики однослойных и двухслойных тензопреобразователей давления на основе структур кремний-на-сапфире / А. А. Устинов, Ю. С. Нагорнов, А. И. Козлов // Материалы электронной техники.– 2012. – № 1. – С. 66-67.

120. Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления: в 3 т. / – М.: Машиностроение, 1973. – Т.1: Измерительные устройства, преобразующие элементы и устройства. – 679 с.

121. Червяков, В. В., Ларин, Ю. Т. Пассивные компоненты для общекорабельных информационных сетей на основе волоконно-оптической техники / В. В. Червяков, Ю. Т. Ларин // Фотон-экспресс. – 2006. – № 3. – С. 80-85.

122. Черненко, В. Д. Оптомеханика волоконных световодов. – СПб.: Политехника, 2010. – 291 с.

123. Шелестов, Д. А., Томилов, С. М. Стабилизация длины волны излучения диодных лазеров. Динамические характеристики элементов Пельтье / Д. А. Шелестов, С. М. Томилов // Фотоника. – 2016. – №4 (58). – С. 53- 63.

124. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента. Пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 382 с.

125. Шинкоренко, Д. Д. Перспективы развития энергетических установок надводных кораблей ВМС зарубежных стран / Д. Д. Шинкоренко // Зарубежное военное обозрение. – 2007. – №1. – С. 54-61.

126. Шишмарев, В. Ю. Электрорадиоизмерения. – М.: Юрайт, 2018. – 336 с.

127. Якобсон П. П. Особенности вибрационной диагностики газотурбинных установок. Режим доступа: <http://www.vibrotek.ru/russian/biblioteka/21>.

128. Янков, В. И., Глот, И. О., Труфанова, Н. М. Течение полимеров в отверстиях фильер: теория, расчет, практика. – М.: Институт компьютерных исследований, 2010. – 368 с.

129. Boudrioua, A. Photonic waveguides: theory and applications. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc. 2009. – 321 p.

130. Daniel Lynn/ Выявление дефектов подшипников качения с помощью анализа вибрации Пер. с англ. И.Р. Шейняк, под редакцией В.А. Смирнова. Режим доступа http://www.vibration.ru/v_defekt.shtml.

131. Davis C.M., Carome E.F., Weik M.H., Ezekiel S., Einzig R. E. *Fiberoptic sensor technologies handbook*. Optical Technologies (OPTECH) A Division of Dynamic Systems, Inc. 1986. – 112 p.
132. *Fiber optic sensors* / Shizhuo Yin, Paul B. Ruffin, Francis T.S. Yu, eds. -- 2nd ed. CRC Press. Taylor & Francis Group. 2008. – 477 p.
133. Huili Tang, Hongjun Li and Jun Xu. *Growth and Development of Sapphire Crystal for LED Applications*. Режим доступу: <https://www.intechopen.com/books/advanced-topics-on-crystal-growth/growth-and-development-of-sapphire-crystal-for-led-applications>.
134. Musin F., Mégret P., Wuilpart M. *Fiber-Optic Surface Temperature Sensor Based on Modal Interference*. *Sensors (Basel)*. 2016 Aug; 16(8): 1189. Published online 2016 Jul 28. doi: 10.3390/s16081189.
135. Okamoto K. *Fundamentals of Optical Waveguides*. Academic Press is an imprint of Elsevier. 2006. – 561 p.
136. *The Importance of Minimizing Hydrogen Aging Losses and Alkali Impurities OFS AllWave® Zero Water Peak (ZWP) Fiber by Dr. Kai Chang*. Режим доступу: <https://fiber-optic-catalog.ofsoptics.com/Asset/MinimizingHydrogenAgingLosses.pdf>
137. Tulaikova, T. *Fiber-optical sensors for ecology usage*. – LAP-LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 205 p.
138. Сандлер, А.К. Оптимізація конструктивних параметрів волоконного акселерометру / А. К. Сандлер // *Slovak international scientific journal*. – 2020. – № 42. –VOL.1. – P. 25-31.
139. Патент України на винахід № 122818. МПК (2006): G01M 11/00, G01M 1/02 (2006.01). *Волоконно-оптичний акселерометр для спеціальних умов експлуатації* / А. К. Сандлер; Заявник та володар патенту Сандлер А. К. – а201810909. – заявл. 05.11.2018; опубл. 06.01.2021, бюл. № 1/2021. – 3 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ"

Вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65029, Україна. Тел. (048) 793-16-72. E-mail:
info@onma.edu.ua. Web: www.onma.edu.ua



25.06.2020

№ 1

м. Одеса

Впровадження результатів дисертаційного дослідження Сандлера Альберта Кириловича на тему "Метод підвищення ефективності діагностування технічного стану суднових газотурбінних установок на основі волоконно-оптичних технологій" у навчальний процес
Національного університету "Одеська морська академія"

Складений начальником навчального відділу НУ "ОМА" Пархоменко М.М., деканом факультету автоматики к.т.н., доцентом Кар'янський С.А., завідувачем кафедри теорії автоматичного управління та обчислювальної техніки д.т.н., професором Горбом С.І.

Результати дисертаційної роботи Сандлера А.К. на тему "Метод підвищення ефективності діагностування технічного стану суднових газотурбінних установок на основі волоконно-оптичних технологій" впроваджені у навчальному процесі кафедри теорії автоматичного управління та обчислювальної техніки, а саме у лекційних заняттях з дисципліни "Метрологія, технологічні вимірювання та прилади" зі спеціальності 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології".

Складений у двох екземплярах: перший – до справи кафедри теорії автоматичного управління та обчислювальної техніки НУ "Одеська морська академія"; другий – до дисертаційної роботи Сандлера А.К.

М.М. Пархоменко

С. А. Кар'янський

С.І. Горб

Додаток Б

"УТВЕРЖДАЮ"

Главный инженер
п/о "Одескабель"
[Signature] Т.И. Луценко
"28" марта 1993 г.

"УТВЕРЖДАЮ"

Начальник НИС
[Signature] В.Д. Савчук
"3" марта 1993 г.

А К Т

по результатам научно-технического сотрудничества работников кафедры "Судовые турбинные установки" ОГМА и работников п/о "Одескабель".

Настоящий акт составлен в том, что в период январь-март 1993 г. была проведена серия экспериментов по теме "Исследование изменения передаточной функции оптических волокон под воздействием работы пропульсивного комплекса судна", с целью проверки теоретических научных разработок инженера Сандлера А.К.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что использование стекловолоконной оптики для получения технической информации о состоянии судовых энергетических установок целесообразно и дает положительный эффект.

Считаем необходимым полученные результаты использовать в практической деятельности флота, с реализацией волоконно-оптических систем контроля и управления объектами конкретных энергетических установок на базе технических решений п/о "Одескабель".

д.т.н. профессор Фока А.А.
[Signature]
инженер Сандлер А.К.
[Signature]

Главный технолог Будиц Н.И.
[Signature]
Зам. глав. технолога Дренев А.С.
[Signature]
Начальник ЦЗЛ Смелянский В.М.
[Signature]

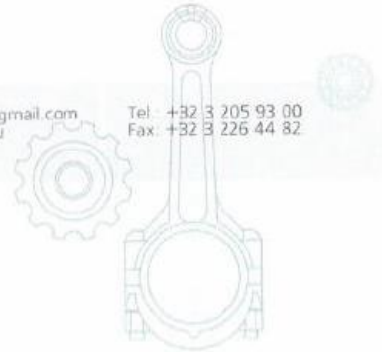
Додаток В



Belra Impex Inc.
80, Broad Street, Monrovia,
Liberia

belraimpex@gmail.com
www.belra.lv

Tel: +32 3 205 93 00
Fax: +32 3 226 44 82



Ref: Let-AS-01-20/ out-let
Date: 27-02-2020
To: To Whom it May concern

ACT OF IMPLEMENTATION

Subject:

To Whom It May Concern

Introduction of the results of the Sandler Albert dissertation on "Method of improving the efficiency of diagnosis of the technical condition of ship's gas turbines plants based on fiber-optical technologists" into the production process of the company Belra Impex inc.

Belra Impex inc., which specializes in the supply, operation and maintenance of Caterpillar ship engines, confirms the introduction into the company's production process of results of the A.K. Sandler's thesis "Method of improving the efficiency of diagnosis of the technical condition of ship's gas turbines plants based on fiber-optical technologists".

Results of the research were used in the works related to the diagnosis of the technical condition of bearing units of gas turbine compressors (GTC) of ship's internal combustion engines.

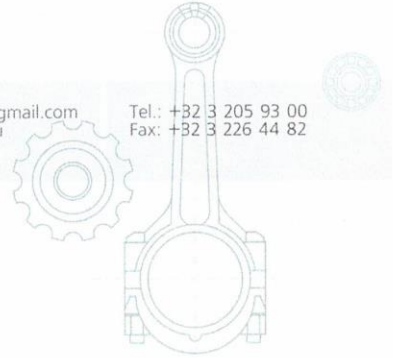
The inventive diagnostic tool is used for monitoring the vibration characteristics of rolling bearings of ship's GTC. It has been determined that it is advisable to use the resources of a preventive diagnostics of the elements of ship gas turbines. The possibility of continuous monitoring of high-frequency vibration of bearings by a fiber-optic



Belra Impex Inc.
80, Broad Street, Monrovia,
Liberia

belraimpex@gmail.com
www.belra.ru

Tel.: +32 3 205 93 00
Fax: +32 3 226 44 82



Ref: Let-AS-01-20/ out-let
Date: 27-02-2020
To: To Whom it May concern

ACT OF IMPLEMENTATION

Subject:

Compiled in two copies, the first one to the file of Belra Impex inc.; the second is for A. Sandler's dissertation.

Kind regards,

Viktor Filin

Managing director

Belra Impex inc

PhD in technical science



Додаток Г




 УКРАЇНА (11) **16068**
 (19) (UA) (51) МПК (2006) G01M 11/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
 ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ

Деклараційний патент на корисну модель
 вихідно відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі"

Голова Державного департаменту інтелектуальної власності *[Signature]* М. Паладій

(21) и 2006 01725
 (22) 20.02.2006
 (24) 17.07.2006
 (46) 17.07.2006. Бюл.№ 7

(72) Сандлер Альберт Кирилович
 (73) Сандлер Альберт Кирилович

(54) ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ ВІБРОАКСЕЛЕРОМЕТР



УКРАЇНА UKRAINE



ПАТЕНТ
 НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ
№ 62937
 ІНВАРІАНТНИЙ ВОЛОКОННИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **26.09.2011.**

Голова Державної служби інтелектуальної власності України *[Signature]* М.В. Паладій




 УКРАЇНА (11) **71295 A**
 (19) (UA) (51) 7 G01M11/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
 ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ

Деклараційний патент на винахід
 вихідно відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі"

Голова Державного Департаменту інтелектуальної власності *[Signature]* М. Паладій

(21) 20031211620
 (22) 18.12.2003
 (24) 15.11.2004
 (46) 15.11.2004. Бюл.№ 11

(72) Нікольський Віталій Валентинович, Сандлер Альберт Кирилович
 (73) Нікольський Віталій Валентинович, Сандлер Альберт Кирилович

(54) П'ЕЗООПТИЧНИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР



УКРАЇНА



ПАТЕНТ
 НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ
№ 110051
 ПОВНОБЕРТОВИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ З'ЄДНУВАЧ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **26.09.2016.**

В.о. Голови Державної служби інтелектуальної власності України *[Signature]* А.А.Малиш

