

Державний університет інфраструктури та технологій
Міністерство освіти і науки України

ШТРИБЕЦЬ ВАЛЕРІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ



УДК 519.873: 621.389

**МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ
ДІАГНОСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ДВИГУНІВ
ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ**

05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту»
«05 – технічні науки»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному університеті інфраструктури та технологій, м. Київ.

Науковий керівник: Богом'я Володимир Іванович,
заслужений винахідник України, доктор технічних наук, професор, професор кафедри експлуатації водного транспорту на внутрішніх водних шляхах Державного університету інфраструктури та технологій МОН України.

Офіційні опоненти: Мачалін Ігор Олексійович,
доктор технічних наук, професор, декан факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій, Національного авіаційного університету МОН України;

Доронін Володимир Васильович,
кандидат технічних наук, доцент, заступник директора ДП «Укрводшлях» Міністерства інфраструктури України.

Захист дисертації відбудеться «2» липня 2020 року о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.110.01

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного університету інфраструктури та технологій за адресою: вул. Кирилівська, 9/3, Київ, 04080 та за електронною адресою: <http://duit.edu.ua/nauka/spetsializovani-vcheni-rady>

Автореферат розісланий «2» червня 2020 року.

Вчений секретар СВР Д 26.110.01

к.т.н.



О.А. Сьомін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Останнім часом збільшилась частина вантажоперевезень водним транспортом. Застосовуються як відносно невеликі засоби (судна) для транспортування вантажів річковим транспортом, та і засоби водного транспорту для трансатлантичних перевезень. З метою економії витрат на доставку вантажу або для швидкої доставки продуктів харчування необхідно завчасно планувати оптимальний маршрут для зменшення часу рейсу. Але, при цьому слід враховувати й технічний стан засобів водного транспорту, який може значно впливати на вартість перевезення. Так, наприклад, несправність силової установки (двигуна) засобу водного транспорту може призвести до збільшення витрат палива, зменшення потужності, або навіть виходу з ладу під час маршруту. Враховуючи те, що переважна більшість засобів водного транспорту України (включаючи ті, що знаходяться в оренді інших компаній) має значну витрату ресурсу, актуальним науковим завданням є розробка методу діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту для своєчасного усунення можливих несправностей. Це забезпечить оптимальні (планові) витрати на перевезення вантажів за допомогою засобів водного транспорту та дозволить зменшити (а може і, взагалі, уникнути), додаткових (непланових) витрат при цьому.

Основним методом визначення несправності двигунів є метод вібродіагностики. Недоліком такого методу є низька достовірність визначення реального технічного стану двигунів.

Більш високу достовірність має метод контролю технічного стану силових установок (двигунів) на основі виявлення та аналізу поточної концентрації деяких шкідливих речовин в оливі (наприклад, домішок зносу металу). Такий аналіз дозволяє визначити наявність несправностей у двигуні (із-за наявного зношення деталей двигуна), які омиваються оливою. Основними для контролю домішок у оливі є колориметричний, полярографічний, індукційний, спектральний методи. Поширеним способом технічної діагностики стану двигунів є метод спектрального аналізу оливи, який полягає у визначенні концентрації в оливі продуктів зносу деталей, порівнюючи ці концентрації з нормами вмісту продуктів зносу металу.

Отже, необхідні ефективні методи визначення (діагностування) технічного стану двигунів засобів водного транспорту для попередження можливих аварійних ситуацій під час транспортування вантажів або перевезення пасажирів.

Таким чином, наукове завдання, яке полягає у подальшому розвитку фільтрових методів спектрального аналізу випадкових сигналів для діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту, є актуальним.

Зазвичай при дослідженні характеристик випадкових сигналів використовується два підходи: спектральний, який полягає у вимірюванні

оцінок спектральних характеристик (наприклад, спектральної щільності потужності), та часовий, при якому вимірюються оцінки кореляційних функцій.

Кожен із зазначених підходів має свої переваги і недоліки, кожному з них віддається перевага при вирішенні тих чи інших конкретних завдань, а при окремих дослідженнях необхідно поєднання цих підходів.

Запропонував використовувати «спектральний підхід» для визначення зміни характеристик технічних систем Харкевич А.А. Але, так як методи вимірювання характеристик випадкових сигналів є більш складними, ніж методи вимірювання детермінованих (регулярних) сигналів (і процесів), то до сьогодення часу вони не нашли значного розповсюдження. Розвиток сучасної обчислювальної техніки дозволяє апаратну реалізацію методів вимірювання спектральних характеристик випадкових сигналів у реальному часі. Саме складність апаратною реалізації методів спектрального аналізу та відсутність необхідної технічної бази довгий час стримували створення та застосування апаратури спектрального аналізу, у тому числі для контролю технічного стану двигунів.

Отже, *тема дисертаційної роботи*, присвячена розробці фільтрових методів спектрального аналізу випадкових сигналів для діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту, є *актуальною*.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Тема дисертаційної роботи тісно пов'язана з положеннями Морської доктрини України на період до 2035 року, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 7 жовтня 2009 р. № 13074, та її нової редакції, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 18 грудня 2018 р.; здійснюється відповідно до Галузевої програми забезпечення безпеки судноплавства на 2014-2018 роки, відповідно до основних напрямів розвитку, визначених у Транспортній стратегії України на період до 2020 р., затвердженій розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р. № 2174-р.

Дисертаційна робота виконана у інтересах науково-дослідної роботи: «Розробка комплексного показника якості пасажирських круїзних суден змішаного плавання в системі безпересадкових круїзних перевезень між портами Дніпра, Чорного моря та Дунаю» (номер держреєстрації 0116U03946), яка виконувалася у Київській державній академії водного транспорту. В цій роботі автор приймав участь як виконавець.

Мета та завдання дослідження.

Мета дослідження – підвищення достовірності діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту.

Для досягнення мети дисертаційного дослідження пропонується розв'язати такі часткові наукові завдання.

1. Проведення аналізу сучасного стану методів вимірювання оцінок спектральної щільності потужності (СЩП) випадкових сигналів. Вибір і обґрунтування напрямків та постановка часткових завдань дослідження.

2. Розробка узагальненої математичної моделі оцінок СЩП для апаратних методів спектрального аналізу.

3. Розробка методу множення вимірювання оцінки СЦП випадкових сигналів.

4. Узагальнення та приведення різних методів апаратурного спектрального аналізу випадкових сигналів до запропонованої узагальненої математичної моделі оцінок СЦП, порівняльний аналіз методів спектрального аналізу та виявлення серед них оптимальних за критерієм максимуму функції правдоподібності.

5. Отримання аналітичних виразів для математичного очікування та дисперсії оцінок СЦП, які необхідні для оптимізації форми амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) вузько-смугових фільтрів (ВСФ) для спектрального аналізу.

6. Проведення порівняльного аналізу результатів оптимізації АЧХ за критеріями мінімуму середньоквадратичної похибки апроксимації та мінімуму впливу бічних пелюсток функції спектрального вікна (ФСВ).

7. Проведення моделювання АЧХ динамічного ВСФ для методу множення вимірювання оцінки СЦП для двох окремих законів зміни характеристик фільтра в процесі вимірювання.

Об'єкт дослідження – процеси діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту.

Предмет дослідження – фільтрові методи спектрального аналізу випадкових сигналів для діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту.

Методи дослідження. Аналіз сучасного стану методів вимірювання оцінок СЦП випадкових сигналів проводився за допомогою теорії системного аналізу. Розробка узагальненої математичної моделі та приведення методів апаратурного спектрального аналізу до цієї моделі засновано на використанні теорії статистичних рішень і теорії обробки вимірювальних сигналів на базі рядів Фур'є та Тейлора. При розробці методів оптимізації АЧХ ВСФ використана теорія оптимізації функцій (метод найменших квадратів), класична теорія розрахунку АЧХ фільтрів і основи теорії похибок.

Моделювання роботи запропонованого фільтра при спектральному аналізі випадкових сигналів для контролю технічного стану засобів водного транспорту проводилось за допомогою комп'ютерної техніки і методів теорії електро-радіо-ланцюгів, контролю технічних систем і теорії комплексних функцій.

Наукова новизна отриманих у дисертації результатів.

1. Отримала подальший розвиток узагальнена математична модель оптимальної оцінки спектральної щільності потужності випадкових сигналів для контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту, що, на відміну від відомих, побудована на теорії прийняття рішень і дозволяє порівняти різні методи апаратурного спектрального аналізу випадкових сигналів і виявити серед них оптимальні, виходячи з максимуму функції правдоподібності.

2. Отримав подальший розвиток метод оцінки характеристик випадкових сигналів для контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту, який, на відміну від відомих, базується на усередненні за часом результату множення вихідного сигналу та його відгуку після фільтра, та забезпечує мінімум похибки спектрального аналізу при достатньо простому апаратурному виконанні.

3. Отримав подальший розвиток метод формування оптимальних характеристик спектрального вікна за допомогою динамічного фільтра, параметри якого перебудовують встановленим чином, який, на відміну від відомих, забезпечує оптимальну апроксимацію «ідеального» спектрального вікна для оцінки характеристик випадкових сигналів.

Практичне значення отриманих результатів.

Отримані у роботі результати мають практичну спрямованість. Практичне значення полягає у тому, що розроблені узагальнена математична модель оцінок СЦП, кореляційно-фільтровий метод вимірювання оцінки СЦП випадкових сигналів, методи оптимізації ФСВ ВСФ і методики оптимального синтезу законів перебудови параметрів динамічних ВСФ для фільтрових методів спектрального аналізу є основою для створення нового класу фільтрових аналізаторів спектра з більш високою точністю при більш простій апаратурній реалізації, ніж з використанням класичних (стаціонарних) фільтрів. Введення та використання динамічних фільтрів на основі розроблених методів їх аналізу та синтезу є новим напрямком в прикладному спектральному аналізі випадкових сигналів для діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту.

Впровадження отриманих результатів. Основні результати досліджень були впроваджені: у ДП «Укрволшлях» (акт про впровадження від 20.10.2019 року №23-07/2) при навчанні судноводіїв; у навчальному процесі Державного університету інфраструктури та технологій (акт про впровадження від 21.10.2019 №1/а) при створенні курсу лекцій з дисципліни «Технічні засоби судноводіння» та «Експлуатація засобів водного транспорту»; у ПРАТ «Дунайсудноремонт» (акт про впровадження від 11.10.2019 року №1965-н) під час ремонтних та відновлюваних робіт на судах.

Одержані результати дослідження доведені до методів і моделей і мають високий ступінь готовності до використання.

Особистий внесок здобувача. Нові наукові результати дисертації отримані здобувачем особисто [1.2].

В основних наукових роботах, які написані в співавторстві, здобувачу належать: [1.1] – наведено часткове завдання дослідження, розроблена модель оцінки спектральної щільності потужності випадкових сигналів на прикладі морських навігаційних приладів, [1.3] – наведено особливості контролю технічного стану судових двигунів; [1.4] – наведено часткове завдання дослідження та обґрунтовано метод діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту; [1.5] – наведено часткове завдання дослідження, здійснено аналіз впливу випадкових сигналів на формування

вимірювальних сигналів для контролю технічного стану суднових систем; [1.6] – наведено особливості розроблених фільтрових методів аналізу випадкових сигналів; [3.1] – зроблено висновок про можливість використання апробованого математичного апарату, наведено результати аналізу впливу форми судна на потужність двигуна; [3.2] – наведено метод оптимізації законів перестройки динамічного фільтру для апаратного спектрального аналізу технічного стану суднових двигунів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися та були схвалені на 1 науковій, 4 науково-технічних і 3 науково-практичних конференціях, у тому числі міжнародних: IX Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління», м. Харків (11 – 12 квітня 2019 року) [2.1]; Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційна безпека та інформаційні технології, м. Харків (24 – 25 квітня 2019 року) [2.2]; XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Water transport problems», м. Баку (2 – 3 травня 2019 року) [2.3]; Науково-практичній конференції «Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку», м. Харків (15 березня 2019 року) [2.4]; 15 Міжнародній науковій конференції «Новітні технології – для захисту повітряного простору», м. Харків (10 – 11 квітня 2019 року) [2.5]; Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ», м. Львів (16 – 17 травня 2019 року) [2.6]; Міжнародна науково-практична конференція «Водний транспорт: сучасний стан та перспективи розвитку», м. Київ (16 – 17 травня 2019 року) [2.7]; Всеукраїнська інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Технічні науки в Україні: сучасні тенденції розвитку»: тези доповідей, 20-21 листопада 2019 року [2.8].

Публікації результатів дисертації. Основні наукові результати дисертації опубліковані у 8 статтях: 5 статей у виданнях, що занесені до переліку наукових фахових видань України в галузі технічні науки (з них 1 стаття без співавторів); 1 стаття надрукована як підрозділ колективної монографії та 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав з напрямку, з якого підготовлено дисертацію.

Крім того, за матеріалами дисертації опубліковано 8 тез доповідей на міжнародних конференціях, також матеріали дослідження увійшли до звіту про науково-дослідну роботу.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків; викладена на 200 сторінках друкованого тексту та містить 147 сторінок основного тексту, 36 рисунків (з них 4 на окремих аркушах), 8 таблиць, список використаних джерел з 136 найменувань на 14 аркушах, 5 додатків на 16 аркушах.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність дослідження, сформульована мета та науково-технічна задача дисертації, показаний зв'язок роботи з науковими темами та програмами, наведена наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, виділений особистий внесок автора в опублікованих роботах зі співавторами, наведені дані про апробацію, публікації та впровадження основних результатів.

У **першому розділі** проведений аналіз методів і засобів контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту, досліджено методи спектрального аналізу характеристик випадкових сигналів для діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту.

До основних вимог сучасних методів діагностування технічного стану двигунів засобів водного транспорту пропонується віднести: потрібний рівень достовірності та точності виявлення несправностей і пошкоджень двигунів; можливість своєчасного виявлення основних електричних і механічних дефектів двигунів; проведення необхідних вимірювань дистанційно; низька трудомісткість і простота технічного обслуговування (проведення вимірювань необхідних параметрів).

Розглянуті основні методи контролю та діагностування технічного стану двигунів засобів водного транспорту.

Головні (ходові) двигуни засобів водного транспорту є складною технічною системою, що складається з великого числа систем, вузлів і деталей, які взаємодіють між собою. Широкий частотний діапазон коливальних процесів в силовій установці обумовлює швидку реакцію віброакустичного сигналу на зміну технічного стану. Це є визначальним в аварійних ситуаціях. Агрегати, від надійності безаварійної роботи яких залежить життя людей, вимагають особливої уваги. Дуже важливо вчасно виявити і не допустити розвиток дефектів, що призводять до незворотних катастрофічних наслідків.

Перспективним є метод спектрального аналізу моторного мастила. Зміна в експлуатаційних характеристиках моторного мастила свідчить про появу несправності та дозволяє своєчасно виконати потрібний ремонт або регулювання. Визначити наявність домішок допомагає спектральний аналіз моторного мастила.

За допомогою спектрального аналізу стану моторного мастила можна визначити:

- фізико-хімічні показники, тобто склад палива та додаткових домішок (наприклад, води, сажі, кислот);
- наявність металів, які можуть вплинути на роботу двигуна (залізо, мідь, кальцій, алюміній тощо);
- в'язкість (при проведенні перевірки при температурі у 40 градусів і 100 градусів).

Такий метод є найбільш простим способом діагностики і профілактики можливих несправностей. При технічному контролі стану двигунів засобів

водного транспорту спектральний аналіз стану моторного мастила може надати інформацію про їх справність.

Для виявлення несправностей двигунів системи енергозабезпечення засобів водного транспорту виділяють характерні частоти напруги або струму.

Діагностування основних несправностей електродвигунів засобів водного транспорту здійснюється на характерних частотах: наявність міжвиткових замикань в обмотках статора та несправності ротора – на частоті мережі живлення (50 Гц; 400 Гц); відсутність співвісності валів електродвигунів і зв'язаних з електродвигуном механічних пристроїв – на частотах, кратних частоті обертання електродвигуна; дефекти ремінцевої передачі навантаження – на частотах, які кратні частоті биття ремня; пошкодження підшипника – на частотах, кратних частоті обертання ротора; пошкодження механічного обладнання із групи двигуна: насос, вентилятор, компресор – на лопатковій частоті.

З наведеного вище аналізу випливає, що ВСФ для спектрального аналізу випадкових сигналів вимагають постановки і розв'язання принципово нових завдань щодо їх удосконалення. Такими завданнями (і напрямками удосконалення фільтрації) в даній роботі є:

- розробка методу оптимізації АЧХ фільтра по мінімуму похибки апроксимації у вимірюванні оцінок СЦП фільтровими методами;
- розробка методу оптимізації АЧХ по мінімуму впливу бічних пелюсток на точність вимірювання оцінки СЦП фільтровими методами.

Розробка цих методів оптимізації є першим напрямком удосконалення фільтрових методів спектрального аналізу, досліджуваним в роботі. Інший, принципово новий напрямок вдосконалення фільтрових методів спектрального аналізу пов'язано з дослідженням можливості застосування ВСФ для спектрального аналізу випадкових сигналів при контролі технічного стану засобів водного транспорту.

Обґрунтовані часткові наукові завдання, які необхідно вирішити для досягнення мети дослідження, обґрунтовані методи розв'язання наукових завдань, що вирішуються в дисертаційній роботі, розглянуто структуру роботи.

Удосконаленню математичної моделі оцінки спектральної щільності потужності випадкових сигналів і розробці методу аналізу оцінок спектральної щільності потужності характеристик випадкових сигналів для діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту присвячений **другий розділ** роботи.

Показано, що будь-яка оцінка СЦП \hat{G} (локальна або інтегральна) випадкового сигналу представляє в загальному випадку лінійне перетворення від оцінки кореляційної функції $\hat{R}(\tau)$ цього сигналу. Тому загальний вигляд оцінки СЦП запишемо так:

$$\hat{G}(\omega_0, \Delta\omega) = \hat{G} = \int_0^T H(\tau) \hat{R}(\tau) d\tau, \quad (1)$$

де $H(\tau)$ – функція перетворення; ω_0 – частота аналізу; $\Delta\omega$ – смуга усереднення.

Функція перетворення $H(\tau)$ залежить від частоти аналізу ω_0 при локальній оцінці СЩП і від величин ω_0 , $\Delta\omega$ при інтегральній оцінці СЩП, а її вид (форма) визначають математичне очікування та дисперсію оцінки СЩП \hat{G} . Разом з тим при фіксованій функції $H(\tau)$ дисперсія оцінки СЩП \hat{G} буде залежати від обраної оцінки кореляційної функції $\hat{R}(\tau)$.

Позначимо сигнал, який характеризує дефект (несправність) двигунів засобів водного транспорту, за випадковий процес $x(t)$.

Для знаходження узагальненої математичної моделі оптимальної оцінки СЩП випадкового процесу $x(t)$ скористаємося статистичною теорією прийняття рішень. Позначимо спільну багатовимірну функцію розподілу величин $x(t)$ і $\hat{R}(\tau)$ через $w[\{x(t)\};\{\hat{R}(\tau)\}]$.

З точки зору статистичної теорії прийняття рішень функція $\hat{R}(\tau)$ не відома та є випадковою величиною, апріорна дисперсія якої значна. Причому апріорна функція розподілу $w[\{\hat{R}(\tau)\}]$ має значну дисперсію. У результаті вимірювання величин $\{x(t)\}$ функція розподілу величин $\hat{R}(\tau)$ перетворюється в умовну функцію розподілу:

$$w[\{\hat{R}(\tau)\}/\{x(t)\}] = \frac{w[\{x(t)\}/\{\hat{R}(\tau)\}]w[\{\hat{R}(\tau)\}]}{w[\{x(t)\}]} \quad (2)$$

Ширина умовної (апостеріорної) функції розподілу вуже, ніж апріорної, і чим вона вуже, тим точніше можна за рахунок дослідження, тобто вимірювання послідовності $\{x(t)\}$, визначити оцінку кореляційної функції $\hat{R}(\tau)$.

Тоді знаходимо оптимальну оцінку

$$\hat{R}(k) = \hat{R}_k = \frac{1}{N-k-1} \sum_{j=0}^{N-k-1} x_j x_{j+k}, \quad (3)$$

де $N = T/\tau_d$; $k = \tau/\tau_d$; τ_d – інтервал дискретизації випадкового процесу $x(t)$.
Переходячи до межі у формулі (3) при $\tau_d \rightarrow 0$, маємо

$$\hat{R}_{\text{опт}}(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} x(t)x(t+\tau)dt. \quad (4)$$

Ця оцінка кореляційної функції оптимальна в тому сенсі, що вона забезпечує найменшу, порівняно з іншими оцінками, дисперсію, внаслідок максимально повного використання інформації про процеси, що містяться в послідовності $\{x(t)\}$. Її використання дозволяє отримати з виразу (1) оптимальну оцінку СЩП $\hat{G}_{\text{опт}}$, забезпечує, порівняно з іншими оцінками, найменшу дисперсію, тобто вона забезпечує найбільшу точність вимірювань. У практиці апаратного спектрального аналізу використовують спрощену оцінку СЩП, в якій для всіх значень τ час інтегрування приймається постійним:

$$\hat{R}(\tau) = \frac{1}{T - \tau} \int_0^T x(t)x(t + \tau)dt. \quad (5)$$

З цього співвідношення видно, що для отримання оцінки $\hat{R}(\tau)$ необхідно знати значення сигналу $x(t)$ при $t > T$.

Отже, запропоновані математичні співвідношення (4) і (5) є узагальненою математичною моделлю оптимальної оцінки СЦП випадкових сигналів для контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту.

Для контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту методом спектрального аналізу випадкового сигналу, який характеризує дефекти (несправності), необхідно застосовувати ВСФ для підвищення точності оцінки частот дефекту (несправності). Підвищення такої точності дозволить виключити вплив сусідніх частот (характеристик спектру) (рис. 1).

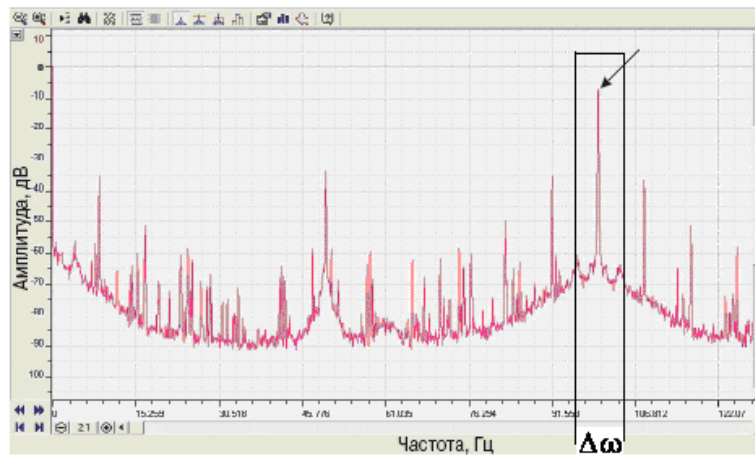


Рисунок 1 – Частотна характеристика модулю вектору струму електродвигуна при короткому замкненні обмотки статора для ВСФ частоти $\Delta\omega$

Із використанням запропонованої узагальненої математичної моделі оцінок СЦП (4) отримані аналітичні співвідношення для математичного очікування та дисперсії оцінок СЦП різних методів, які будуть використані для порівняльного аналізу методів і розв'язання задач оптимізації АЧХ ВСФ для спектрального аналізу.

Для математичного очікування оцінок СЦП з урахуванням формули (1), застосовуючи властивості математичного очікування,

$$M[\hat{G}] = \int_0^T H(\tau) M[\hat{R}(\tau)] d\tau. \quad (6)$$

Представимо цей вираз у вигляді

$$M[\hat{G}] = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\omega) G(\omega) d\omega = 2 \int_0^{\infty} \Phi(\omega) G(\omega) d\omega, \quad (7)$$

де $\Phi(\omega) = \int_0^T H(\tau) \cos \omega \tau d\tau$, $0 < \tau < T$, – ФСВ (або фільтруюча функція).

Локальну оцінку СЩП $\hat{G}(\omega_0)$ отримаємо, якщо функція $\Phi(\omega)$ має нескінченно вузький пік при $\omega = \omega_0$, тобто $\Phi(\omega) \sim \delta(\omega - \omega_0)$, де $\delta(\omega - \omega_0)$ – дельта функція. Тоді $M[\hat{G}] \sim G(\omega_0)$.

Для математичного очікування $M[\hat{G}]$ з тим же ступенем точності, що й для дисперсії $D[\hat{G}]$ з використанням формули (7) знаходимо

$$M[\hat{G}] = G(x_0) \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\omega) d\omega = G(\omega_0) 2\pi \int_0^T H(\tau) \delta(\tau) d\tau \approx \pi G(\omega_0) H(0). \quad (8)$$

Тоді маємо

$$\delta \hat{G} \approx \frac{4}{H^2(0)} \int_0^T \frac{H^2(\tau)}{T_{\text{уср}}(\tau)} d\tau. \quad (9)$$

Отриманий вираз (9) характеризує зміну оцінки СЩП \hat{G} залежно від впливу випадкового сигналу, який відповідає визначеним змінам технічного стану засобів водного транспорту.

У третьому розділі розроблений метод визначення оптимальних характеристик ФСВ ВСФ для спектрального аналізу випадкових сигналів при контролі технічного стану двигунів засобів водного транспорту.

Методи оптимізації форми АЧХ ВСФ для спектрального аналізу випадкових сигналів отримаємо для двох критеріїв: мінімуму середньоквадратичної похибки апроксимації ідеальної, прямокутної ФСВ реальної функцією та мінімуму впливу бічних пелюсток ФСВ на похибка вимірювання оцінки СЩП.

Використання зазначених критеріїв обумовлено двома можливими постановками задачі оптимізації.

У першому випадку (перша задача оптимізації) основною вимогою, що пред'являються до оптимальної АЧХ фільтра, є забезпечення мінімуму середньоквадратичної похибки апроксимації ідеальної АЧХ і не накладається ніяких обмежень на поведінку АЧХ як у смузі аналізу, так і поза нею.

У другому випадку (друга задача оптимізації) основна увага приділена забезпеченню мінімуму впливу бічних пелюсток ФСВ на похибка вимірювання оцінки СЩП. Ці дві задачі оптимізації охоплюють найбільш поширені вимоги, що пред'являються до ФСВ при вирішенні практичних завдань синтезу ВСФ, які використовуються в апаратурі спектрального аналізу випадкових сигналів.

Перша задача оптимізації АЧХ ВСФ $\Phi(\omega)$ формулюється так: знайти оптимальну перетворюючу функцію $H_{\text{опт}}(\tau)$ або оптимальну імпульсну перехідну характеристику $h(\tau)$ фільтра, що забезпечують мінімум функціоналу

$$\Gamma = \int_{-\infty}^{\infty} [\Phi(\omega) - \Phi_0(\omega)]^2 d\omega, \quad (10)$$

де $\Phi_0(\omega)$ – ідеальна (необхідна) спектральна функція (або АЧХ) фільтра. У нашому випадку ця функція прямокутна та аналітично описується виразом:

$$\Phi_0(\omega) = \begin{cases} \text{const}, & \text{при } \omega_0 - \Delta\omega/2 < \omega < \omega_0 + \Delta\omega/2; \\ 0, & \text{при інших значеннях } \omega. \end{cases} \quad (11)$$

Функція $\Phi(\omega)$ визначається наступною рівністю:

$$\Phi(\omega) = \int_0^T H(\tau) \cos \omega \tau d\tau, \quad 0 < \tau < T. \quad (12)$$

Для розв'язання задачі оптимізації скористаємося варіаційним методом, відповідно до якого повинна виконуватися умова:

$$\partial\Gamma/\partial H(\tau) = 0. \quad (13)$$

Тоді знаходимо:

$$H_{\text{опт}}(\tau) = A \int_{\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}} \cos \omega \tau d\omega, \quad (14)$$

де $A = \Phi_0/\pi = \text{const}$ – постійна.

Після обчислень з формули (14), отримаємо:

$$H_{\text{опт}}(\tau) = A \frac{\sin(\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2})\tau - \sin(\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2})\tau}{\tau} = 2A \cos \omega_0 \tau \frac{\sin \frac{\Delta\omega\tau}{2}}{\tau}, \quad 0 < \tau < T. \quad (15)$$

При методі множення вимірювання оцінки СЦП функція $H_{\text{опт}}(\tau)$ може бути реалізована, якщо вибрати $\Delta\omega T = 2k\pi$, де k – будь-яке ціле число. Тоді для оптимальної імпульсної характеристики фільтра, з урахуванням (15), маємо:

$$h_{\text{опт}}(\tau) = \frac{H_{\text{опт}}(\tau)}{T - \tau} = 2A \cos \omega_0 \tau \frac{\sin \frac{\Delta\omega\tau}{2}}{\tau(T - \tau)}. \quad (16)$$

Внесок від бічних пелюсток ФСВ $\Phi(\omega)$ визначимо наступним виразом:

$$\int_{-\infty}^{-\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}} \Phi(\omega) d\omega + \int_{\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}} \Phi(\omega) d\omega + \int_{\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}}^{\infty} \Phi(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\omega) d\omega - 2 \int_{\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}} \Phi(\omega) d\omega. \quad (17)$$

Очевидно, оптимізація вкладу бічних пелюсток функції $\Phi(\omega)$ у похибку вимірювання оцінки СЦП зводиться до забезпечення мінімуму різниці в правій частині виразу (17).

Отриманий вираз для імпульсної характеристики фільтра

$$h'_{\text{опт}}(\tau) = A' \int_{\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}} \cos \omega \tau d\omega = 2A' \cos \omega_0 \tau \frac{\sin \frac{\Delta\omega\tau}{2}}{\tau}, \quad (18)$$

де $A' = \text{const}$ – постійна.

Графік функції $\Phi(\omega)$ наведено на рисунку 2. З рисунку видно, що осциляції істотні тільки поблизу «країв» функції $\Phi(\omega)$, тобто поблизу частот $\omega = \pm\omega_0 \pm 0,5\Delta\omega$.

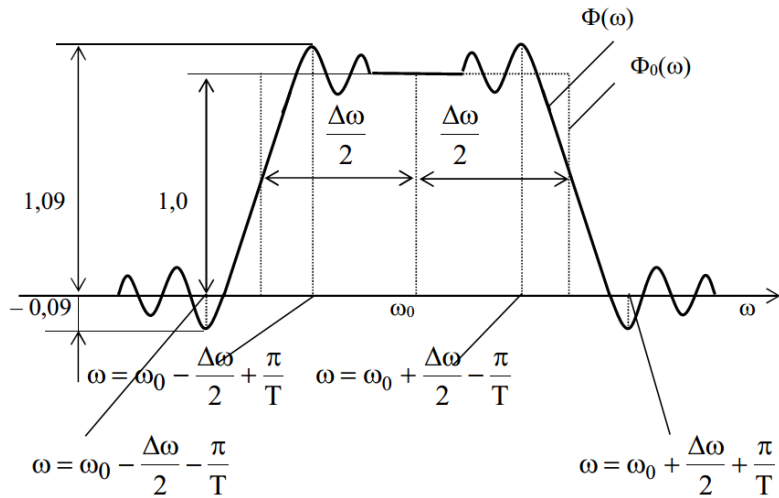


Рисунок 2 – Графік функції спектрального вікна $\Phi(\omega)$

Значимо, що на графіку (рис. 2) масштаб осі ω для наочності сильно перебільшений, так як при $T\Delta\omega \gg 1$ осциляції (коливання) є тільки поблизу «границь» функції $\Phi(\omega)$, на інтервалах порядку π/T .

При оптимізації спектральної характеристики фільтра за мінімумом бічних пелюсток при заданій дисперсії оцінки СЦП (друга задача оптимізації) застосування фільтра із імпульсною характеристикою $h'_{\text{опт}}(\tau)$, вираз (18), забезпечує форму спектральної характеристики $\Phi'(\omega)$. Крім того, функція $h'_{\text{опт}}(\tau)$ забезпечує більш просту технічну реалізацію фільтра.

Результати проведення дослідження розроблених моделей ВСФ для спектрального аналізу характеристик випадкових сигналів, зроблені рекомендації щодо використання таких фільтрів для діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту та оцінки ефективності запропонованих наукових результатів наведені у **четвертому розділі**.

На рисунках 3 і 4 показаний приклад застосування «ідеального», синтезованого та відомого фільтрів при спектральному аналізі випадкового (вібраційного) сигналу, який характеризує початок дефекту (рис. 3) і його розвиток (рис. 4) у електродвигуні засобів водного транспорту.

Аналіз залежностей на рисунках 3 і 4 доводить, що ФСВ існуючих фільтрів не дозволяють виявити своєчасно початок дефекту при спектральному аналізі вібраційного сигналу, а при його розвитку виявляють дефект як початковий. Це не дозволяє за допомогою існуючих фільтрів своєчасно виявити відмову двигунів, що може стати причинами відмови двигунів засобів водного транспорту під час рейсів. Однак, залежності на рисунках 3 і 4 доводять про підвищення достовірності контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту за допомогою запропонованих фільтрів для спектрального аналізу випадкових сигналів, які характеризують дефекти (несправності) двигунів.

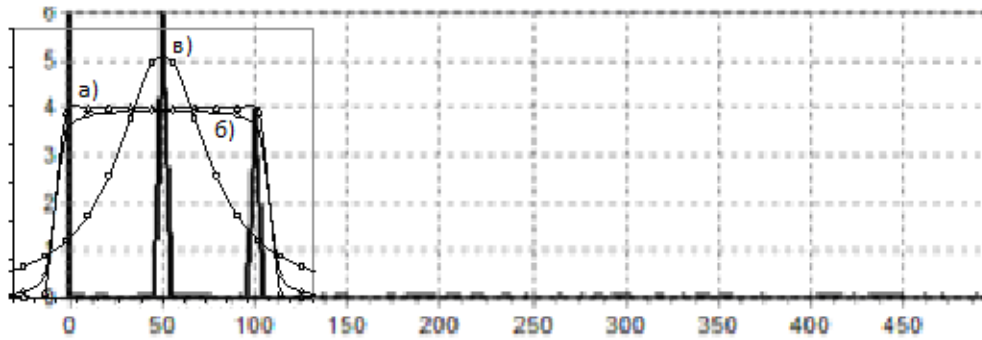


Рисунок 3 – Приклад застосування «ідеального» а), синтезованого б) та відомого в) фільтрів при спектральному аналізі початку дефекту у електродвигуні

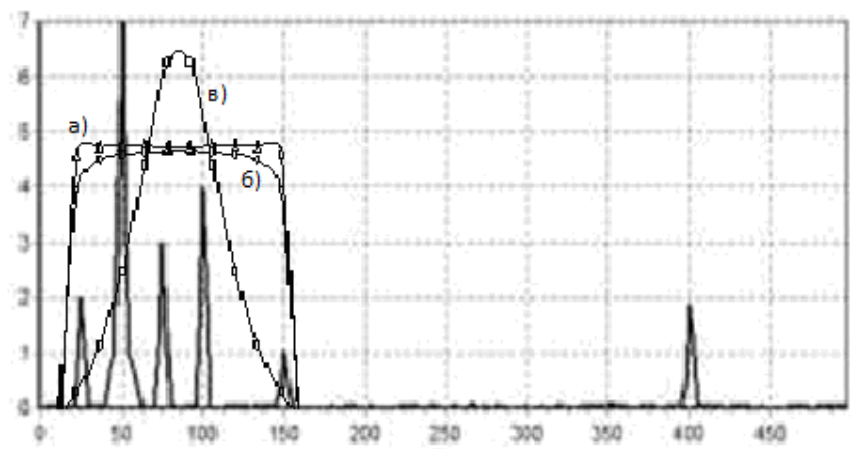


Рисунок 4 – Приклад застосування «ідеального» а), синтезованого б) та відомого в) фільтрів при спектральному аналізі розвитку дефекту у електродвигуні

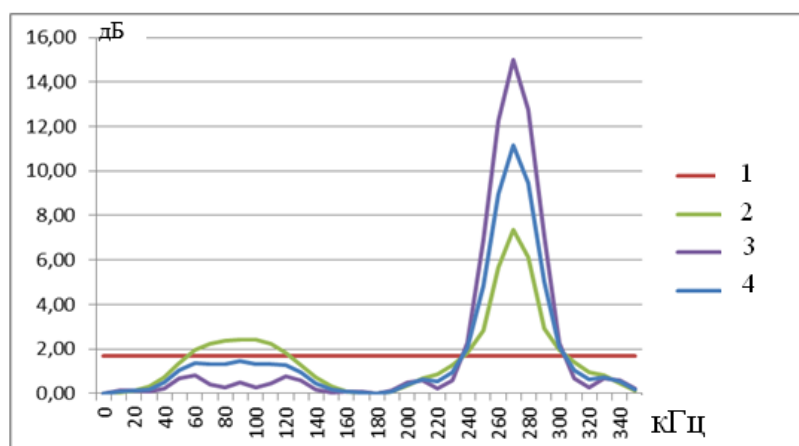


Рисунок 5 – Спектр роботи двигуна при несправності одного клапану:

- 1 – шумові зміни справного двигуна;
- 2 – шумові зміни при аналізі спектру роботи двигуна (запропоновано)
- 3 – шумові зміни при несправності двигуна (на «слух»);
- 4 – шумові зміни при аналізі спектру роботи двигуна (відомий метод)

На рисунках 5 і 6 показаний результати комп'ютерного моделювання запропонованого методу обробки випадкового сигналу при зміні роботи двигуна засобу водного транспорту.

Із рисунку 5 видно, що акустична вібродіагностика дозволяє виявити несправність двигуна засобу водного транспорту методом «на слух» при рівні шуму 15 дБ. Відомі методи вібродіагностування двигунів дозволяють визначити несправність двигуна при рівні шуму 11 дБ. Застосування запропонованого фільтру для спектрального аналізу вібраційного акустичного сигналу дозволяє визначити несправність при рівні шуму 7 дБ. Таким чином, підвищення достовірності контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту при застосуванні запропонованого фільтру для спектрального аналізу вібраційного акустичного сигналу становить до 36%.

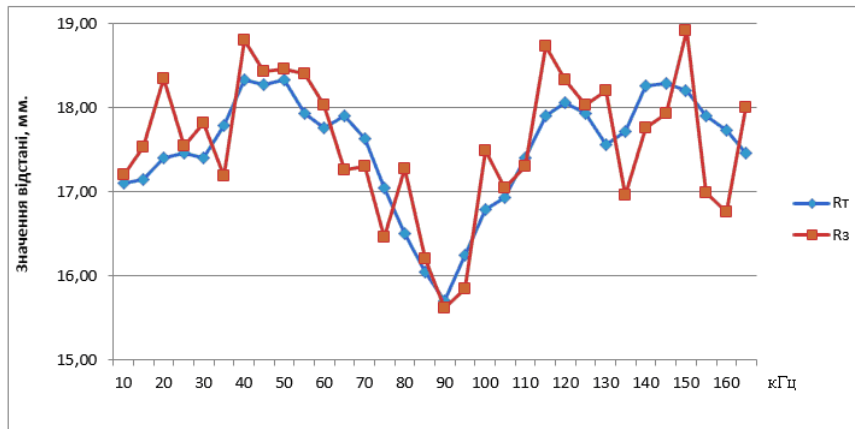


Рисунок 6 – Вібрація двигуна (мм) залежно від її частоти:

Rт – значення вібрації двигуна при несправності (запропоновано);

Rз – значення вібрації двигуна при несправності (відомо)

Із рисунку 6 видно, що значення механічної вібрації для виявлення несправності двигуна зменшується до 1 мм залежно від частоти при застосуванні запропонованого фільтру. Отже, підвищення достовірності контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту при застосуванні запропонованого фільтру для спектрального аналізу вібраційного сигналу становить до 10%.

Результати комп'ютерного моделювання показали, що запропоновані методи при діагностичному контролі технічного стану двигунів засобів водного транспорту дозволяють зменшити витрати часу на простій транспорту до 30%. Це дозволяє економити кошти до 25% від річних витрат на обслуговування засобів водного транспорту. При цьому підвищується достовірність контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту від 10% до 36% (залежно від метод діагностичного контролю). Це дозволяє економити до 15% коштів при транспортуванні вантажів за рахунок виключення можливих відмов у двигунах при переміщенні за вказаним маршрутом руху.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана актуальна науково-технічна задача розвитку фільтрових методів спектрального аналізу випадкових сигналів для діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту.

Основні результати дисертаційної роботи полягають у наступному.

1. Проведений аналіз сучасного стану методів і засобів контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту та напрямків розвитку методів спектрального аналізу характеристик випадкових сигналів для діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту. Доведено, що розробка фільтрових методів спектрального аналізу випадкових сигналів для діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту є актуальним завданням.

2. У дисертації наведене теоретичне узагальнення та нове розв'язання науково-технічної задачі, мета розв'язання якої полягає у підвищенні достовірності діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту та зменшення витрат на експлуатацію таких засобів.

3. Найбільш важливі наукові та практичні результати, які отримані в роботі, є такі:

– отримала подальший розвиток узагальнена математична модель оптимальної оцінки спектральної щільності потужності випадкових сигналів для контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту, що, на відміну від відомих, побудована на теорії прийняття рішень і дозволяє порівняти різні методи апаратного спектрального аналізу випадкових сигналів і виявити серед них оптимальні, виходячи з максимуму функції правдоподібності;

– отримав подальший розвиток метод оцінки характеристик випадкових сигналів для контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту, який, на відміну від відомих, базується на усередненні за часом результату множення вихідного сигналу та його відгуку після фільтра, та забезпечує мінімум похибки спектрального аналізу при достатньо простому апаратному виконанні;

– отримав подальший розвиток метод формування оптимальних характеристик спектрального вікна динамічним фільтром, параметри якого перебудовують встановленим чином, який, на відміну від відомих, заснований на оптимальному синтезі алгоритмів перебудови параметрів вузько-смугових фільтрів для спектрального аналізу, та забезпечує оптимальну апроксимацію «ідеального» спектрального вікна для оцінки характеристик випадкових сигналів при контролі технічного стану двигунів засобів водного транспорту.

Отримані у роботі теоретичні результати можуть бути застосовані при створенні мобільних контрольно-діагностичних комплексів для контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту. Це дозволяє скоротити витрати часу на проведення контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту та підвищити його достовірність.

Результати імітаційного моделювання отриманих результатів показали, що застосування запропонованих методів при діагностичному контролі технічного стану двигунів засобів водного транспорту зменшує витрати часу на простій транспорту до 30%. Це дозволяє економити кошти до 25% від річних витрат на обслуговування засобів водного транспорту та до 15% коштів при транспортуванні вантажів за рахунок виключення можливих відмов у двигунах при переміщенні за вказаним маршрутом руху. При цьому підвищується достовірність діагностування технічного стану двигунів на (10...36)% залежно від методу діагностичного контролю. Оперативність контролю підвищується за рахунок зменшення часу контролю та перебування засобів водного транспорту в черзі на обслуговування.

4. *Значення розв'язаної у дисертації задачі для науки та практики* полягає в подальшому розвитку теоретичних і прикладних основ обґрунтування системи технічного контролю двигунів засобів водного транспорту.

5. *Методи дослідження.* Методи дослідження базуються на теоріях системного аналізу, контролю технічних систем, обробки вимірювальних сигналів на базі рядів Фур'є та Тейлора, оптимізації функцій, класичній теорії розрахунку амплітудно-частотних характеристик фільтрів, теорії похибок вимірювальних приладів і математичного моделювання.

6. *Достовірність і обґрунтованість отриманих наукових результатів* підтверджується збігом деяких часткових результатів дисертації з відомими; коректним використанням адекватного математичного апарата для розв'язання часткових задач, поставлених у роботі. Основні теоретичні положення дисертаційної роботи базуються на початкових посилках і допущеннях, які виходять із існуючого стану робіт у даній області та не суперечать відомим положенням і результатам досліджень, приведеним у літературі.

7. *Наукові та прикладні результати досліджень*, отримані в дисертації, доцільно використовувати так.

Теоретичні результати можуть бути застосовані при створенні мобільних контрольно-діагностичних комплексів для контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту, а також розповсюджені на двигуни інших транспортних засобів. Це дозволить скоротити витрати часу на проведення контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту та підвищити його достовірність його визначення.

Практичне значення отриманих у роботі результатів полягає у тому, що запропоновані методи синтезу фільтрів для оцінки характеристик випадкових сигналів при контролі технічного стану двигунів засобів водного транспорту. Це дозволить обґрунтовувати рішення про прийняття в експлуатацію нових або модернізацію існуючих контрольно-діагностичних комплексів, що є складовою аналізу та синтезу системи контролю технічного стану двигунів різних засобів транспорту.

Дисертаційна робота завершена, а її мета досягнута.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1.1. Василенко В.М. Модель оцінки спектральної щільності потужності випадкових сигналів морських навігаційних приладів / В.М. Василенко, О.М. Вечурко, В.В. Штрибець // Наукоємні технології. – 2018. – №4 (40). – С. 487-491.

1.2. Штрибець В.В. Контроль технічного стану двигунів засобів водного транспорту методом спектрального аналізу випадкових сигналів / В.В. Штрибець // Новітні технології. – 2019. – Вип.1(8). – С. 59-69.

1.3. Дакі О.А. Аналіз методів формування вимірювальних сигналів для контролю систем навігації / О.А. Дакі, А.О. Трофіменко, В.В. Штрибець // Наукоємні технології. – 2019. – № 1(41). – С. 88-94. – DOI: 10.18372/2310-5461.41.13534.

1.4. Інформаційна безпека та інформаційні технології: монографія / За заг. ред. В.С. Пономаренка. – Х.: Вид. Рожко С.Г. – 2019. – 327 с. (п. 1.4 Метод діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту для зменшення витрат на перевезення вантажів / Герасимов С.В., Штрибець В.В. – С. 61-76).

1.5. Штрибець В.В., Кондратенко В.В., Абросимов В.В., Апчел В.І., Арванінов М.І. Дослідження фільтрів для спектрального аналізу випадкових сигналів двигунів засобів водного транспорту. Новітні технології. 2019. Вип.2(9). С.25–31.

1.6. Штрибець В.В., Трофіменко А.О., Шевченко А.П. Розроблення фільтрових методів спектрального аналізу випадкових сигналів для контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту. Slovak international scientific journal. Vol.1. No.34, 2019. P.30-38.

2. Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

2.1. Штрибець В.В. Оцінка спектральної щільності потужності випадкових сигналів / В.В. Штрибець // Матеріали дев'ятої міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління», 11-12 квітня 2019 р. – Баку – Харків – Жиліна. – 2019. – С. 65.

2.2. Герасимов С.В. Розробка методу діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту для зменшення витрат на перевезення вантажів / С.В. Герасимов, В.В. Штрибець // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційна безпека та інформаційні технології», 24-25 квітня 2019 р. – Х.: ХНЕУ імені Семена Кузнеця, 2019. – С. 3.

2.3. Герасимов С.В. Оптимізація законів перестройки динамічного фільтра для апаратного спектрального аналізу технічного стану

судовых двигательных установок / С.В. Герасимов, В.В. Штрибец // XIV International scientific-technical conference on «Water transport problems», 2-3 May 2019. – Bakı – 2019. – С. 16.

2.4. Штрибец В.В. Алгоритм процесу оцінки спектральної щільності потужності випадкових сигналів / В.В. Штрибец // International scientific and practical conference «Application of information technologies in the preparation and operation of law enforcement forces», 15 березня 2019 р. – Х.: НАНГУ. – 2019. – С. 27-28.

2.5. Штрибец В.В. Метод оцінки спектральної щільності потужності випадкових сигналів / В.В. Штрибец // 15 Міжнародна наукова конференція Харківського національного університету Повітряних Сил «Новітні технології – для захисту повітряного простору», 10-11 квітня 2019 р. – Х.: ХНУПС. – 2019. – С. 310-311.

2.6. Штрибец В.В. Методи оптимізації форми функції спектрального вікна фільтрів для спектрального аналізу випадкових сигналів / В.В. Штрибец // Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ», 16-17 травня 2019 р. – Львів: НАСВ. – 2019. – С. 280.

2.7. Штрибец В.В. Модель оцінки спектральної щільності потужності випадкових сигналів суднових навігаційних приладів / В.В. Штрибец // Міжнародна науково-практична конференція «Водний транспорт: сучасний стан та перспективи розвитку», 16-17 травня 2019 р. – К.: ДУІТ, 2019. – С. 393-394.

2.8. Штрибец В.В., Трофименко А.О. Методи спектрального аналізу випадкових сигналів для контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту. Всеукраїнська інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Технічні науки в Україні: сучасні тенденції розвитку»: тези доповідей, 20-21 листопада 2019 року. – К.: ДУІТ, 2019. – С.152-155.

3. Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

3.1. Українець Е.А. Теоретическое обоснование возможности физического моделирования обтекания сложных пространственных надводных частей кораблей в гидродинамических трубах / Е.А. Українець, В.Я. Моисеев, Л.М. Вильдяева, С.Л. Панов, В.А. Степук, В.В. Штрибец // Новітні технології. – 2018. – Вип. 3(7). – С. 61-72.

3.2. Герасимов С.В. Оптимизация законов перестройки динамического фильтра для аппаратного спектрального анализа технического состояния судовых двигательных установок / С.В. Герасимов, В.В. Штрибец // Elmi Əsərləri. Proceedings Of Azerbaijan State Marine Academy. – ВАКІ-2019. – № 2. – С. 102-106.

АНОТАЦІЯ

Штрибець В.В. Методи та моделі підвищення достовірності діагностичного контролю двигунів засобів водного транспорту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» («05 – технічні науки»). – Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, 2019.

Несправність двигуна (силової установки) засобу водного транспорту може призвести до збільшення витрат палива, зменшення потужності, або навіть виходу з ладу під час маршруту. Все це є причинами додаткових витрат на перевезення вантажів засобами водного транспорту. Для забезпечення оптимальних (планових) витрат на перевезення вантажів за допомогою засобів водного транспорту та з метою уникнення аварійних інцидентів необхідна ефективна система контролю технічного стану двигунів таких засобів.

Отже, науково-технічна задача, яка розв'язується у дисертаційному дослідженні та полягає у подальшому розвитку методів спектрального аналізу характеристик випадкових сигналів для діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту, є актуальною.

Отримані у роботі теоретичні результати можуть бути застосовані при створенні мобільних контрольно-діагностичних комплексів для діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту. Це дозволяє підвищити достовірність проведення контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту та зменшити витрати на обслуговування засобів водного транспорту під час експлуатації.

Результати імітаційного моделювання отриманих результатів показали, що застосування запропонованих методів при діагностичному контролі технічного стану двигунів засобів водного транспорту зменшує час простою транспорту до 30%. Це дозволяє економити кошти до 25% від річних витрат на обслуговування засобів водного транспорту та до 15% коштів при транспортуванні вантажів за рахунок виключення можливих відмов у двигунах при переміщенні за вказаним маршрутом руху. При цьому підвищується достовірність діагностування технічного стану двигунів на (10...36)% залежно від методу діагностичного контролю.

ANNOTATION

Stribets V.V. Methods and models for improving the reliability of diagnostic control of water transport engines. - Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Engineering (Doctor of Philosophy) in the specialty 05.22.20 "Operation and Repair of Means of Transport" ("05 - Engineering Sciences"). - State University of Infrastructure and Technology, Kyiv, 2019.

A malfunctioning engine of a water transport vehicle can lead to increased fuel consumption, reduced power, or even failure during the route. All these are the reasons for the additional costs of transportation of goods by means of water transport. To ensure optimal (planned) costs for transportation of goods by means of water transport and to prevent accidents, an effective system of control of the technical condition of the engines of such means is required.

Therefore, the scientific and technical problem, which is solved in the dissertation and consists in the further development of methods of spectral analysis of the characteristics of random signals for the diagnostic control of the technical condition of engines of water transport vehicles, is relevant.

The simulation results of the obtained results showed that the application of the proposed methods in the diagnostic control of the technical condition of engines of water transport vehicles reduces the idle time by up to 30%. This saves up to 25% of the annual costs of servicing the means of water transport and up to 15% of the cost of transporting goods by eliminating possible engine failures when moving along the specified route. This increases the accuracy of diagnosis of the technical condition of the engines by (10... 36)%, depending on the method of diagnostic control.