*УДК 681.5* *DOI:10.31180/2524-0102/2019.1.08.07*

***Штрибець В.В.***

# КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДВИГУНІВ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ВИПАДКОВИХ СИГНАЛІВ

*Показано вплив технічного стану двигунів засобів водного транспорту на економічність вантажоперевезень. Обґрунтований метод діагностування технічного стану двигунів на основі спектрального аналізу масла двигуна. Запропоновано метод спектрального аналізу випадкових сигналів з використанням середньоквадратичного критерію та мінімуму впливу бічних пелюсток функції спектрального вікна на основі відповідних завдань оптимізації. Отримано співвідношення для оптимального синтезу характеристик динамічних фільтрів для вимірювання оцінок спектральної щільності потужності випадкових сигналів.*

*Отже, застосування запропонованих оптимальних фільтрів при спектральному аналізі випадкових сигналів діагностування технічного стану двигунів засобів водного транспорту дозволяє своєчасно виявити можливі несправності чи порушення у режимах роботи (відповідно до заздалегідь відомих, справних). Своєчасне виявлення можливих відмов двигунів засобів водного транспорту дозволить уникнути додаткових витрат під час перевезення вантажів, тобто зменшити додаткові (непланові) витрати.*

***Ключові слова**: технічний стан, спектральний аналіз, кошти водного транспорту, оптимальний фільтр, двигун.*

**Вступ.** Останнім часом збільшилась частина вантажоперевезень водним транспортом [1]. При цьому застосовуються як відносно не великі засоби (судна) для транспортування вантажів річковим транспортом, та і великі засоби для трансатлантичних перевезень. Для економії коштів при перевезені вантажів або при перевезені продуктів харчування актуальним є завдання планування (прокладання) оптимального маршруту для зменшення часу руху [2]. Однак, 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 контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту для своєчасного усунення можливих несправностей [3]. Це забезпечить оптимальні (планові) витрати на перевезення вантажів за допомогою засобів водного транспорту та дозволить зменшити (а може і, взагалі, уникнути), додаткові (непланові) витрати при цьому.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Одним з поширених методів контролю технічного стану силових установок (двигунів) є аналіз поточної концентрації домішок зносу металу в оливі. Даний тип аналізу дозволяє оцінити ступінь зношеності деталей двигуна, які омиваються оливою. Основними для контролю домішок у оливі є колориметричний, полярографічний, індукційний, спектральний методи [2-6].

Руйнування деталей вузлів тертя часто починається з викришування або стирання поверхневого шару матеріалу деталей, що під впливом динамічних навантажень в поєднанні з силами тертя. Утворені при цьому продукти зносу потрапляють до оливи двигуна. Так як засоби водного транспорту для перевезення вантажів, навіть без навантаження, мають значну вагу, здійснюють рух зі значним опором навколишнього середовища (вода, підвищена вологість тощо), то силові установки працюють під значним навантаженням. Таким чином, олива двигуна засобів водного транспорту надає інформацію про інтенсивність протікають процесів тертя. Кількість продуктів зношування, що надходять до оливи двигуна, залежить від швидкості зношування, яка, в свою чергу, обумовлена рівнем навантажень і умовами тертя. Отже, поширеним способом технічної діагностики стану двигунів є метод спектрального аналізу оливи, який полягає у визначенні концентрації в оливі продуктів зносу деталей, що труться, порівнюючи ці концентрації з нормами вмісту продуктів зносу металу, та визначенні ступеня зносу деталей, що труться [3]. Однак, на результати аналізів сильно впливає заміна оливи в ході експлуатації або після ремонту. Внесене цими замінами спотворення величини концентрації металу в оливі виявляється настільки значним, що на тлі такої перешкоди практично неможливо виділити корисну інформацію про темпи зносу деталей або про їх аварійний стан. Найбільш часто такий спосіб періодичного огляду фільтра при технічному обслуговуванні малоефективний, оскільки велика частина частинок має незначний розмір (приблизно 3 мкм). Кількість продуктів зносу, що надходять в оливу, залежить від швидкості зношування, яка в свою чергу залежить від ступеня пошкодження елемента. Кожному виду зносу відповідає певний вид і склад продуктів [3]. Отже, пропонується метод оптимізації динамічних фільтрів для спектрального аналізу випадкових сигналів при діагностичному контролі технічного стану двигунів засобів водного транспорту.

Запропонований метод спрямований на досягнення необхідної достовірності контролю технічного стану [7 – 10] двигунів засобів водного транспорту за допомогою спектрального аналізу випадкових сигналів, які виникають при наявності несправностей або порушені алгоритму роботи справних систем.

## Основна частина

*Методи оптимізації форми функції спектрального вікна фільтрів для аналізу випадкових сигналів.*

Точність апаратурного спектрального аналізу випадкових сигналів, заснованих на використанні вузько-смугової фільтрації, у значній мірі визначається відмінністю амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) вузько-смугового фільтра від ідеальної – прямокутної. При ідеальному спектральному вікні забезпечується повне усунення похибки "розмивання", або "перетіканняв" спектра та похибки, обумовленої амплітудною модуляцією спектру. Однак ідеальне спектральний вікно фізично не піддається реалізації. У зв'язку з цим великий практичний інтерес представляє задача оптимізації, що полягає у визначенні форми АЧХ $\Phi(\omega)$ або однозначно пов'язаної з ним перетворюючої функції $H(\tau)$, які забезпечують максимальну точність (мінімальну похибка) апроксимації ідеального спектрального вікна $\Phi_0(\omega)$ при заданих значеннях смуги пропускання $\Delta\omega$, часу вимірювання (аналізу) $T$ і відносної дисперсії оцінки спектральної щільності потужності (СЩП).

Розглянемо розв'язання цієї задачі для методу безпосередньої фільтрації та кореляційно-фільтрового методу вимірювання оцінок СЩП.

Методи оптимізації форми АЧХ фільтрів для спектрального аналізу випадкових сигналів отримаємо для двох критеріїв [7]:

– мінімуму середньоквадратичної похибки апроксимації ідеальної, прямокутної функції спектрального вікна реальної функцією;

– мінімуму впливу бічних пелюсток функції спектрального вікна 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, але при цьому 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 функції спектрального вікна на похибка вимірювання оцінки СЩП. Ці дві задачі оптимізації охоплюють найбільш поширені вимоги, що пред'являються до функції спектрального вікна при вирішенні практичних завдань синтезу вузько-смугових фільтрів, які використовуються в апаратурі спектрального аналізу випадкових сигналів [8, 10].

Сформулюємо та вирішимо обидві задачі оптимізації АЧХ вузько-смугових фільтрів для спектрального аналізу.

Задача оптимізації АЧХ вузько-смугового фільтра $\Phi(\omega)$ за середньоквадратичним критерієм формулюється так: знайти оптимальну перетворюючу функцію $H_{опт}(\tau)$ або оптимальну імпульсну перехідну характеристику $h(\tau)$ фільтра, що забезпечують мінімум функціоналу

$$\Gamma = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\Phi(\omega) - \Phi_0(\omega)\right]^2 d\omega, \tag{1}$$

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

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

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

$$\Phi(\omega) = \int_0^T H(\tau) \cos\omega\tau \, d\tau, \quad 0 < \tau < T. \tag{2}$$

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

$$\frac{\partial\Gamma}{\partial H(\tau)} = 0.$$

Тоді зі співвідношення (1) обчислимо

$$\frac{\partial\Gamma}{\partial H(\tau)} = 2\int_{-\infty}^{\infty} \begin{matrix} \left[\Phi(\omega) - \Phi_0(\omega)\right] \times \\ \times \dfrac{\partial\Phi(\omega)}{\partial H(\tau)} d\omega. \end{matrix} \tag{3}$$

З урахуванням формули (2) знаходимо

$$\frac{\partial\Phi(\omega)}{\partial H(\tau)} = \begin{cases} \cos\omega\tau, & 0 < \tau < T; \\ 0, & \tau > T. \end{cases}$$

Підставляючи це рівність у вираз (3), отримаємо

$$\frac{\partial\Gamma}{\partial H(\tau)} = 2\int_{-\infty}^{\infty} \left[\Phi(\omega) - \Phi_0(\omega)\right] \cos\omega\tau \; d\omega, \tag{4}$$
$$0 < \tau < T.$$

Прирівнюючи вираз (4) нулю, маємо:

$$\int_{-\infty}^{\infty}\left[\Phi(\omega)-\Phi_0(\omega)\right]\cos\omega\tau d\omega=0, < \tau < T. \quad (5)$$

Оскільки, відповідно до перетворенню Фур'є,

$$\int_{-\infty}^{\infty}\Phi(\omega)\cos\omega\tau\, d\omega=\pi H(\tau),$$

то з виразу (5) отримаємо:

$$\pi H(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty}\Phi_0(\omega)\cos\omega\tau\, d\omega.$$

З урахуванням рівності (3), знаходимо:

$$H_{onm}(\tau)=A\int_{\omega_0-\frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0+\frac{\Delta\omega}{2}}\cos\omega\tau\, d\omega\ , \quad (6)$$

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

Після обчислень з формули (6), є

$$\begin{aligned} &H_{onm}(\tau)= \\ &=A\frac{\sin(\omega_0+\frac{\Delta\omega}{2})\tau-\sin(\omega_0-\frac{\Delta\omega}{2})\tau}{\tau}= \\ &=2A\cos\omega_0\tau\frac{\sin\frac{\Delta\omega\tau}{2}}{\tau},\quad 0<\tau<T. \end{aligned} \quad (7)$$

При кореляційно-фільтровому методі вимірювання оцінки СЩП функція $H_{onm}(\tau)$ може бути реалізована, якщо вибрати $\Delta\omega T=2k\pi$ , де $k$ – будь-яке ціле число. Тоді для оптимальної імпульсної характеристики фільтра, з урахуванням рівності (7), маємо

$$\begin{aligned} &h_{onm}(\tau)=\frac{H_{onm}(\tau)}{T-\tau}= \\ &=2A\cos\omega_0\tau\frac{\sin\frac{\Delta\omega\tau}{2}}{\tau(T-\tau)}. \end{aligned} \quad (8)$$

У той же час для методу вимірювання оцінки СЩП, заснованого на зведенні в квадрат фільтрованої реалізації випадкового сигналу, оптимальна перетворює функція $H_{onm}(\tau)$ не може бути реалізована, так як рівняння

$$H_1(u)=2\int_0^T h(\tau)h(\tau-u)(T-u)d\tau\ ,$$

при $H_1 = H_{опт}$ , не має рішення для $h(\tau)$. Якісно це видно хоча б з того, що функція $\Phi_1(\omega) > 0$ , а перетворення Фур'є від $H_{опт}(\tau)$ може приймати і негативні значення.

Сформулюємо та розв'яжемо другу задачу оптимізації АЧХ вузько-смугових фільтрів для спектрального аналізу випадкових сигналів – за мінімумом впливу бічних пелюсток спектральної (частотної) характеристики фільтра $\Phi(\omega)$ при заданій дисперсії. Потім проведемо порівняльний аналіз результатів для обох задач оптимізації АЧХ фільтрів.

Переходимо до розв'язання другої задачі оптимізації, сформульованої вище.

Внесок від бічних пелюсток функції спектрального вікна $\Phi$ () визначимо наступним виразом:

$$\int_{-\infty}^{-\omega_0-\frac{\Delta\omega}{2}} \Phi(\omega)d\omega + \int_{-\omega_0+\frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0-\frac{\Delta\omega}{2}} \Phi(\omega)d\omega + \int_{\omega_0+\frac{\Delta\omega}{2}}^{\infty} \Phi(\omega)d\omega =$$
$$= \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\omega)d\omega - 2\int_{\omega_0-\frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0+\frac{\Delta\omega}{2}} \Phi(\omega)d\omega =$$
$$= T\,h(0) - 2\int_{\omega_0-\frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0+\frac{\Delta\omega}{2}} \Phi(\omega)d\omega. \tag{9}$$

Очевидно, оптимізація вкладу бічних пелюсток функції $\Phi(\omega)$ у похибку вимірювання оцінки СЩП зводиться до забезпечення мінімуму різниці в правій частині виразу (9).

Для розв'язання цієї задачі її більш зручно сформулювати наступним чином: визначити імпульсну характеристику фільтра $h(\tau)$, що забезпечує максимум величиною $\int_{\Delta\omega} \Phi(\omega)d\omega$ за умови, що

$$\int_0^T (T-\tau)h^2(\tau)d\tau \le L = const\,.$$

Таке завдання на умовний екстремум вирішується методом Лагранжа [2]. Введемо функціонал

$$\Gamma' = \int_{\omega_0-\frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0+\frac{\Delta\omega}{2}} \Phi(\omega)d\omega - \lambda\int_0^T (T-\tau)h^2(\tau)d\tau\ , \tag{10}$$

де $\lambda$ – множник (або коефіцієнт) Лагранжа.

Обчислимо часткову похідну $\partial\Gamma'/\partial h(\tau)$ і прирівняємо її до нуля

$$\frac{\partial\Gamma'}{\partial h(\tau)} = \int_{\omega_0-\frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0+\frac{\Delta\omega}{2}} \frac{\partial\Phi(\omega)}{\partial h(\tau)}d\omega - $$
$$-2\lambda(T-\tau)h(\tau) = 0, \tag{11}$$

де $\frac{\partial \Phi(\omega)}{\partial h(\tau)}$ з урахуванням співвідношень (3) і (2) визначається рівністю:

$$\frac{\partial \Phi(\omega)}{\partial h(\tau)} = (T-\tau)\cos \omega T, \ \ 0<\tau<T . \qquad (12)$$

Вирішуючи рівняння (11) з урахуванням рівності (12), аналогічно (7), отримуємо вираз для імпульсної характеристики фільтра

$$\begin{aligned} h'_{onm}(\tau) &= A' \int\limits_{\omega_0-\frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0+\frac{\Delta\omega}{2}} \cos \omega\tau \, d\omega = \\ &= 2A' \cos \omega_0\tau \frac{\sin \frac{\Delta\omega\tau}{2}}{\tau}, \end{aligned} \qquad (13)$$

де A′ = const – постійна.

Порівнюючи оптимальні функції $h_{onm}(\tau)$, вираз (8), і $h'_{onm}(\tau)$, вираз (13), відмітимо, що в області $\tau << T$, вони практично збігаються. У той же час функція $h'_{onm}(\tau)$ дещо простіше реалізується технічно, ніж функція $h_{onm}(\tau)$. Тому доцільно з'ясувати, наскільки істотно відрізняються спектральні функції (АЧХ) фільтрів $\Phi(\omega)$ і $\Phi'(\omega)$, отримані за допомогою функцій $h_{onm}(\tau)$, $h'_{onm}(\tau)$, і наскільки відрізняються їх дисперсії.

Проведемо порівняльний аналіз методів оптимізації функцій спектрального вікна вузько-смугових фільтрів.

Використовуючи вирази (13) і (8), введемо нормування функцій $h_{onm}(\tau)$ і $h'_{onm}(\tau)$ (постійні $A$ і $A'$) так, щоб $h(0) = 1$. тоді отримаємо:

$$h_{onm}(\tau) = \frac{2T}{\Delta\omega} \cos \omega_0\tau \frac{\sin \frac{\Delta\omega\tau}{2}}{\tau(T-\tau)} ;$$

$$h'_{onm}(\tau) = \frac{2}{\Delta\omega} \cos \omega_0\tau \frac{\sin \frac{\Delta\omega\tau}{2}}{\tau} .$$

При цьому відповідно до рівності (7), що перетворюють функції для кожного з методів оптимізації визначаються рівностями:

$$H_{onm}(\tau) = \frac{2T}{\Delta\omega} \cos \omega_0\tau \frac{\sin \frac{\Delta\omega\tau}{2}}{\tau} ; \qquad (14)$$

$$H'_{onm}(\tau) = \frac{2}{\Delta\omega} (T-\tau) \cos \omega_0\tau \frac{\sin \frac{\Delta\omega\tau}{2}}{\tau} . \qquad (15)$$

Для визначення спектральної функції (АЧХ) Φ(ω) підставимо в формулу (3) вираз (14), отримаємо:

$$\Phi(\omega) = \frac{2T}{\Delta\omega} \int\limits_0^T \cos \omega\tau \cos \omega_0\tau \frac{\sin \frac{\Delta\omega\tau}{2}}{\tau} d\tau .$$

Обчислимо функцію $\Phi(\omega, \omega_0)$. Знаходимо:

$$\Phi(\omega,\omega_0)=\frac{T}{2\Delta\omega}\left[\begin{array}{l}\int\limits_0^T \frac{sin\left(\omega_0-\omega+\dfrac{\Delta\omega}{2}\right)\tau}{\tau}d\tau+ \\ +\int\limits_0^T \frac{sin\left(\omega_0+\omega+\dfrac{\Delta\omega}{2}\right)\tau}{\tau}d\tau\end{array}\right].$$ Після перетворень запишемо:

$$\begin{aligned}\Phi(\omega)&=\frac{T}{2\Delta\omega}\sum_{i=1}^{4}(-1)^{i-1}\left[si\left(T\Omega_i\right)+\frac{\pi}{2}\right]= \\ &=\frac{T}{2\Delta\omega}\sum_{i=1}^{4}(-1)^{i-1}\ si\,T\Omega_i+ \\ &+\frac{T}{2\Delta\omega}\frac{\pi}{2}\sum_{i=1}^{4}(-1)^{i-1}=\frac{T}{2\Delta\omega}\sum_{i=1}^{4}si\left(T\Omega_i\right)\end{aligned}. \tag{16}$$

Оцінимо значення середньоквадратичного відхилення реальної функції спектрального вікна *Φ(ω)* від ідеальної (прямокутної) функції *$\Phi_0(\omega)$*, використовуючи формулу (1).

Для цього скористаємося тим, що функція *$\Phi_0(\omega)$* виходить з функції *Φ(ω)*, відповідно до виразу (3), при $T\to\infty$. Тоді

$$\Phi(\omega)-\Phi_0(\omega)=\int\limits_T^{\infty}H(\tau)\,cos\,\omega\tau\,d\tau\,. \tag{17}$$

Підставляючи співвідношення (17) у формулу (1), маємо:

$$\Gamma=\int\limits_{-\infty}^{\infty}d\omega\left[\int\limits_T^{\infty}H(\tau)cos\,\omega\tau\,d\tau\right]^2 .$$

Уявімо це рівність у вигляді:

$$\Gamma=\int\limits_{-\infty}^{\infty}d\omega\int\limits_T^{\infty}\int d\tau\,d\tau'\,H(\tau)H'(\tau')cos\,\omega\tau\,cos\,\omega\tau'.$$

Приймаючи до уваги, що

$$\begin{aligned}&\int\limits_{-\infty}^{\infty}cos\,\omega\tau\,cos\,\omega\tau'\,d\omega= \\ &=\frac{1}{2}\int\limits_{-\infty}^{\infty}\left[cos\,\omega(\tau-\tau')+cos\,\omega(\tau+\tau')\right]d\omega= \\ &=\pi\left[\delta(\tau-\tau')+\delta(\tau+\tau')\right],\end{aligned}$$

запишемо:

$$\Gamma=\pi\int\limits_T^{\infty}H^2(\tau)d\tau\ . \tag{18}$$

Підставляючи у вираз (18) оптимальну перетворюючу функцію *$H_{опт}(\tau)$* згідно (14), маємо:

$$\Gamma\approx\frac{\pi T^2}{(\Delta\omega)^2}\int\limits_T^{\infty}\frac{d\tau}{\tau^2}=\frac{\pi T}{(\Delta\omega)^2}\left[1+0\left(\frac{1}{T\Delta\omega}\right)\right].$$

У той же час

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varPhi_0^2\, d\omega = 2\varPhi_0^2\, \varDelta\omega = \frac{\pi^2 T^2}{2\varDelta\omega}, \tag{19}$$

де враховано $\varPhi_0 = \dfrac{\pi T}{2\varDelta\omega}$ .

Відносна середньоквадратична похибка наближення оптимальної спектральної характеристики $\varPhi(\omega)$ до ідеальної характеристиці $\varPhi_0(\omega)$ визначається виразом:

$$\delta\varGamma = \frac{\varGamma}{\int_{-\infty}^{\infty} \varPhi_0^2(\omega)\, d\omega} . \tag{20}$$

Після підстановки у формулу (20) рівності (19) знаходимо:

$$\delta\varGamma = \frac{2}{\pi T\, \varDelta\omega}\left[1 + 0\left(\frac{1}{T\varDelta\omega}\right)\right] . \tag{21}$$

Визначимо спектральну функцію $\Phi'(\omega)$ для оптимальної перетворюючої функції $H'_{опт}(\tau)$, одержуваної при оптимізації по мінімуму бічних пелюсток і описуваної виразом (15).

З урахуванням виразу (16) запишемо:

$$\varPhi'(\omega) = \frac{T}{2\varDelta\omega} \sum_{i=1}^{4} (-1)^{i-1} f(T\varOmega_i), \tag{22}$$

де

$$f(x) = Si(x) - \frac{1 - cos\, x}{x} . \tag{23}$$

Проаналізуємо поведінку функції f(x). Перш за все, відзначимо, що вона має такі властивості:

а) $f(-x) = -f(x)$ , тобто функція симетрична щодо нуля;

б) при $x << 1$ $\quad f(x) \approx x - \frac{1}{2}x = \frac{1}{2}x$;

в) при $x >> 1$ $\quad f(x) = \frac{\pi}{2} - \frac{cos\, x}{x} - \frac{sin\, x}{x^2} + \frac{cos\, x - 1}{x} \approx \approx \frac{\pi}{2} - \frac{1}{x} - \frac{sin\, x}{x^2};$

г) $f'(x) = \frac{sin\, x}{x} - \frac{sin\, x}{x} + \frac{1 - cos\, x}{x^2} = = \frac{1 - cos\, x}{x^2} = \frac{2\, sin^2 \frac{x}{2}}{x^2}.$

Точки екстремуму $x_l$ функції $f(x)$ визначимо з умови $\cos x_l = 1$, тобто $x_l = 2\pi l$, $l = 1,2,\ldots$ . Ці точки є точками перегину функції $f(x)$, яка монотонно зростає, так як $f'(x) \geq 0$.

Відзначимо важливу обставину: функція *Φ′(ω)* за межами вікна $\Delta\omega$ не має викидів (ні позитивних, ні негативних) і відрізняється від ідеального (прямокутного) спектрального вікна тільки поблизу "країв", в області ~1 / *T*.

Обчислимо тепер похибку наближення оптимальної спектральної характеристики $\Phi'(\omega)$ до спектральної характеристиці ідеального, прямокутного вікна $\Phi_0(\omega)$ вузько-смугового фільтра. Аналогічно формулі (1) запишемо:

$$\Gamma' = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \Phi'(\omega) - \Phi_0(\omega) \right]^2 d\omega . \tag{24}$$

Використовуючи співвідношення (3) і рівність Парсеваля вираз (24) представимо у вигляді:

$$\Gamma' = \pi \int_0^T \left[ H'(\tau) - H(\tau) \right]^2 d\tau + \pi \int_T^{\infty} H^2(\tau) d\tau ,$$

або

$$\Gamma' = \Gamma + \Delta\Gamma, \tag{25}$$

де $\Delta\Gamma = \pi \int_0^T \left[ H'(\tau) - H(\tau) \right]^2 d\tau$ .

Оскільки $\Delta\Gamma > 0$, то, як випливає із виразу (25), справедлива умова $\Gamma' > \Gamma$, що й слід було очікувати заздалегідь (з постановки задачі оптимізації).

Обчислимо величину $\Delta\Gamma$ з урахуванням рівності (14) і (15)

$$\Delta\Gamma = \frac{4\pi}{(\Delta\omega)^2} \int_0^T cos^2\, \omega_0\tau\, sin^2 \frac{\Delta\omega\tau}{2}\, d\tau =$$

$$= \frac{\pi}{(\Delta\omega)^2} \int_0^T (1 + cos\, 2\omega_0\tau)(1 - cos\, \Delta\omega\tau) d\tau \approx \Gamma .$$

Тоді, відповідно до рівності (25),

$$\Gamma' = 2\Gamma ,$$

а отже,

$$\delta\Gamma' = 2\,\delta\Gamma . \tag{26}$$

**Висновки.** При оптимізації спектральної характеристики фільтра за мінімумом середньоквадратичної похибки апроксимації ідеального вікна (перша задача оптимізації) застосування фільтра з імпульсною характеристикою $h_{опт}(\tau)$, відповідно до виразу (9), забезпечує мінімальне середньоквадратичне відхилення $\delta\Gamma$, формула (21), форми спектральної характеристики *Φ(ω)*, вираз (16), від ідеальної прямокутної.

При оптимізації спектральної характеристики фільтра за мінімумом бічних пелюсток при заданій дисперсії оцінки СЩП (друга задача оптимізації) застосування фільтра із імпульсною характеристикою $h'_{опт}(\tau)$, вираз (13), забезпечує форму спектральної характеристики *Φ′(ω)*, формула (22), яка не має осциляцій у всьому діапазоні частот, але при цьому відносна середньоквадратична похибка апроксимації $\delta\Gamma'$ ідеального спектрального вікна збільшується вдвічі, рівність (26). Крім того, функція $h'_{опт}(\tau)$ забезпечує більш просту технічну реалізацію фільтра.

Отже, застосування запропонованих оптимальних фільтрів при спектральному аналізі випадкових сигналів діагностування технічного стану двигунів засобів водного транспорту дозволяє своєчасно виявити можливі несправності чи порушення у режимах роботи (відповідно до заздалегідь відомих, справних). Своєчасне виявлення можливих відмов двигунів засобів водного транспорту дозволить уникнути додаткових витрат під час перевезення вантажів, тобто зменшити додаткові (непланові) витрати.

## ЛІТЕРАТУРА


1. Каретников В. В., Пащенко И. В., Соколов А. И., Кузнецов И. Г. К вопросу построения автоматизированной системы мониторинга параметров высокоточного навигационного поля / Морская радиоэлектроника. – 2015. – № 2 (52). – С. 24-27.
2. Борисенко М. В., Герасимов С. В., Костенко О. І., Макарчук Д. В. Development of optimum navigation information processing algorithm / Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2018. – № 3(32). – С. 38-44.
3. Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте // Материалы второй всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2016. – 368 с.
4. Алешин Б. С., Веременко К. К. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии. – М.: Наука, 2006. – 424 с.
5. Герасимов С., Шапран Ю., Стахова М. Measures of efficiency of dimensional control under technical state designation of radio-technical facilities / Системи обробки інформації. – 2018. – Вип. 1 (152). – С. 148-154. – DOI: 10.30748/soi.2018.152.21.
6. Герасимов С. В., Шапран Ю. Є., Кірвас В. В. Розробка та дослідження методу розрахунку достовірності вимірювального контролю параметрів радіотехнічних систем морського транспорту / Системи озброєння і військова техніка. – 2017. – № 4 (52). – С. 5-10.
7. Басов В. Г. Измерительные сигналы и функциональные устройства их обработки. – Минск: БГУИР, 2012. – 119 с.
8. Norman Friedman. The Naval Institute Guide to World Naval Weapon System. – Naval Institute Press, 2006. – 858 p.
9. Admiralty list of radio signals. Global maritime distress and safety system (GMDSS). – Vol 5. NP 285. – 2000. – 338 p.
10. Qriffiths B. E. Optimal control of jump-linear gaussian systems / Int. J. of control. – Vol. 42. N. 4. – 1985. – P. 791-819.


***Штрибец В.В.***

**КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ СРЕДСТВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ**

*Показано влияние технического состояния двигателей средств водного транспорта на экономичность грузоперевозок. Обоснованный метод диагностирования технического состояния двигателей на основе спектрального анализа масла двигателя. Предложен метод спектрального анализа случайных сигналов с использованием среднеквадратического критерия и минимума влияния боковых лепестков функции спектрального окна на основе соответствующих задач оптимизации. Получены соотношения для оптимального синтеза характеристик динамических фильтров для измерения оценок спектральной плотности мощности случайных сигналов.*

***Ключевые слова**: техническое состояние, спектральный анализ, средства водного транспорта, оптимальный фильтр, двигатель.*

**Shtribec V.**

**CONTROL OF THE TECHNICAL STATE OF VEHICLES OF WATER TRANSPORT BY METHOD OF SPECTRAL ANALYSIS OF RISK SIGNALS**

*Recently, part of the cargo transportation by water transport has increased. However, this should also take into account the technical state of water transport, which can significantly affect the cost of transportation. This will provide optimal (planned) costs for the carriage of goods by means of water transport and will reduce the additional costs in this case.*

*The proposed method is aimed at achieving the required reliability of the control of the technical state of engines of water transport with the help of spectral analysis of random signals that arise in the presence of malfunctions or broken algorithms for the operation of good systems.*

*Methods for optimizing the shape of the amplitude-frequency response of the filters for the spectral analysis of random signals were obtained for two criteria:*

*- the minimum of the mean-square error of approximation of the ideal, rectangular function of the spectral window by a real function;*

*- the minimum effect of the side lobes of the function of the spectral window on the error of measurement of the spectral density of power.*

*The use of these criteria is due to two possible formulations of the optimization problem. In the first case (the first task of optimization) the main requirement for an optimal amplitude-frequency characteristic of a filter is to ensure a minimum of the mean square error. In the second case (the second optimization task), the main attention is paid to ensuring the minimum of the effect of the side lobes of the spectral window function on the error of measurement of the spectral density of power. These two optimization tasks cover the most common requirements for the function of the spectral window when solving practical problems of filter synthesis, which are used in the spectral analysis of random signals.*

*The application of the proposed optimal filters in the spectral analysis of random signals of the diagnosis of the technical state of the engines of water transport means allows timely detection of possible malfunctions or disturbances in operating modes.*

***Keywords:*** *technical condition, spectral analysis, means of water transport, optimal filter, engine.*