

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

У статті стверджується, що актуальною є науково-технічна задача, яка полягає у подальшому розвитку фільтрових методів спектрального аналізу випадкових сигналів для діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту.

Зазвичай при дослідженні характеристик випадкових сигналів використовується два підходи: спектральний та часовий. Можливість і доцільність поєднання спектрально-кореляційних методів аналізу випадкових сигналів створює спектрально-кореляційний аналіз, який дозволяє проводити глибоке кількісну оцінку параметрів випадкових процесів.

До найважливіших переваг спектрально-кореляційного аналізу випадкових сигналів слід також віднести універсальність.

Отже, стаття присвячена розробці фільтрових методів спектрального аналізу випадкових сигналів для діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту.

Ключові слова: *фільтрові методи, спектральний аналіз, випадкові сигнали, діагностичний контроль, технічний стан, експлуатація, двигуни, засоби водного транспорту.*

Вступ. Несправність 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. Крім того, несправність двигуна засобу водного транспорту може бути причиною екологічного забруднення ділянки водної поверхні. Таким чином, 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 дослідженні та полягає у подальшому розвитку методів спектрального аналізу характеристик випадкових сигналів для діагностичного контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту, є актуальним [1,2].

Постановка задачі дослідження. В контрольно-вимірвальній апаратурі спектрального аналізу, особливо в системах діагностування технічних об'єктів, таких як двигуни засобів водного транспорту, використовують вузько-смугові фільтри малих порядків, що спрощує їх синтез і технічну реалізацію апаратури. Отримання однакових характеристик точності спектрального аналізу може бути забезпечено динамічними фільтрами менших порядків, ніж класичних, стаціонарних, фільтрів [3].

Тому **метою** статті є наведення особливостей розроблення методів визначення оптимальних характеристик функції спектрального вікна вузько-смугових фільтрів для спектрального аналізу технічного стану двигунів засобів водного транспорту.

Оптимізація законів перебудови характеристик динамічного фільтра другого порядку

Запишемо вираз для комплексної частотної характеристики динамічного фільтра другого порядку [2,3]

$$W_t(j\omega) = \frac{A(t) + j\omega B(t)}{\omega_0^2(t) - \omega^2 + 2j\alpha(t)\omega}, \quad (1)$$

де $\omega_0(t)$ – функція перебудови центральної частоти ω_0 динамічного фільтра в часі;
 $\alpha(t)$ – функція перебудови коефіцієнта загасання α динамічного фільтра в часі;
 $A(t)$, $B(t)$ – функції зміни в часі параметрів A і B фільтра, що визначають його коефіцієнт передачі.

Після обчислень отримаємо:

– для кореляційно-фільтрової методу

$$\operatorname{Re} W_t^{(1)}(j\omega) = \frac{A_1(\omega_0^2 - \omega^2) + 2\omega^2 \alpha B_1}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2}; \quad (2)$$

– для методу безпосередньої фільтрації

$$\left| W_t^{(2)}(j\omega) \right|^2 = \frac{A_2^2 + \omega^2 B_2^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2}. \quad (3)$$

З умови еквівалентності фільтрів, прирівнюючи вирази (2) і (3), для кореляційно-фільтрової методу спектрального аналізу маємо [3]

$$A_1(\omega_0^2 - \omega^2) + 2\omega^2 \alpha B_1 = A_2^2 + \omega^2 B_2^2,$$

звідки знаходимо

$$A_1 \omega_0^2 = A_2^2; \quad 2\alpha B_1 - A_1 = B_2^2. \quad (4)$$

Для методу безпосередньої фільтрації, тобто для $\left| W_t^{(2)}(j\omega) \right|^2$ умова еквівалентності має вигляд

$$A_2^2 = \alpha \omega_0^2 B_1; \quad B_2^2 = \alpha B_1,$$

тобто $A_2 = \omega_0 B_2$.

Визначимо основні характеристики динамічного фільтра: ФСВ (або АЧХ) і відносну дисперсію оцінки СЩП [4].

Для обчислення ФСВ динамічного фільтра другого порядку знайдемо спочатку його комплексну частотну характеристику $W_t(j\omega)$, а потім її дійсну частину $\operatorname{Re} W_t(j\omega)$.

Розкладемо функцію $W_t(j\omega)$, на прості дроби

$$W_t(j\omega) = \frac{1}{\omega_1 - \omega_2} \left(\frac{A + j\omega_2 B}{\omega - \omega_2} - \frac{A + j\omega_1 B}{\omega - \omega_1} \right), \quad (5)$$

де $\omega_1 = j\alpha + \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = j\alpha + \tilde{\omega};$ (6)

$$\omega_2 = j\alpha - \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = j\alpha - \tilde{\omega}; \quad (7)$$

$$\tilde{\omega} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}. \quad (8)$$

Підставляючи рівності (6) – (8) в вираз (5), маємо

$$W_t(j\omega) = \frac{1}{2\tilde{\omega}} \left[\frac{A + j(j\alpha - \tilde{\omega})B}{\omega + \tilde{\omega} - j\alpha} - \frac{A + j(j\alpha + \tilde{\omega})B}{\omega - \tilde{\omega} - j\alpha} \right].$$

Запишемо це співвідношення у вигляді

$$W_t(j\omega) = \frac{1}{2\tilde{\omega}} \left(\frac{A - \alpha B - j\tilde{\omega} B}{\omega + \tilde{\omega} - j\alpha} - \frac{A - \alpha B + j\tilde{\omega} B}{\omega - \tilde{\omega} - j\alpha} \right).$$

Звідси, з урахуванням позначень для кореляційно-фільтрової методу, введених у формулі (2), знаходимо [4]

$$\operatorname{Re} W_t(j\omega) = \frac{1}{2\tilde{\omega}} \left[\frac{(A_1 - \alpha B_1)(\omega + \tilde{\omega}) + \alpha \tilde{\omega} B_1}{(\omega + \tilde{\omega})^2 + \alpha^2} + \frac{(\alpha B_1 - A_1)(\omega - \tilde{\omega}) + \alpha \tilde{\omega} B_1}{(\omega - \tilde{\omega})^2 + \alpha^2} \right]. \quad (9)$$

Для того, щоб складова $\operatorname{Re} W_t(j\omega)$ ФСВ фільтра $\Phi_1(\omega)$ була симетрична щодо частот $\omega = \pm\omega_0$, у співвідношенні (9) потрібно покласти [5]

$$A_1 = \alpha B_1. \quad (10)$$

Для величини $|W_t(j\omega)|^2$ функції спектрального вікна фільтра $\Phi_2(\omega)$, при використанні методу безпосередньої фільтрації, умова симетрії, аналогічне рівності (10), має вигляд [53]

$$A_2 = \omega_0 B_2. \quad (11)$$

При виконанні умов симетрії (10) і (11) ФСВ фільтра можна уявити сумою двох функцій

$$\Phi(\omega) = \Phi_+(\omega) + \Phi_-(\omega),$$

Причому

$$\Phi_+(-\omega) = \Phi_-(\omega). \quad (12)$$

Беручи до уваги умова (10) у формулі (9), маємо [6]

$$\operatorname{Re} W_t(\omega) = \frac{1}{2} \left[\frac{\alpha}{(\omega - \tilde{\omega})^2 + \alpha^2} + \frac{\alpha}{(\omega + \tilde{\omega})^2 + \alpha^2} \right] B_1. \quad (13)$$

Підставляючи співвідношення (12) з урахуванням рівності (10), знаходимо

$$\Phi_{1+}(\omega) = \frac{1}{2} \int_0^T \frac{\alpha(t)}{[\omega - \tilde{\omega}(t)]^2 + \alpha^2(t)} B_1(t) dt. \quad (14)$$

Ця формула пов'язує ФСВ динамічного фільтра другого порядку з його характеристиками $\alpha(t)$, $\tilde{\omega}(t)$, $B_1(t)$ для кореляційно-фільтрової методу вимірювання оцінки СЦП.

З використанням співвідношень (13) за умови $\alpha T \gg 1$ знаходимо [6,7]

$$h_t(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W_t(j\omega) e^{j\omega\tau} d\omega = B_1(t) \cos \tilde{\omega}(t) \tau e^{-\alpha(t)\tau}. \quad (15)$$

При $\alpha \ll \tilde{\omega}$ з цієї рівності отримаємо

$$\int_0^T h_t^2(\tau) d\tau = \int_0^T [B_1(t) \cos \tilde{\omega}(t) \tau e^{-\alpha(t)\tau}]^2 d\tau \approx \frac{1}{4\alpha(t)} [1 - e^{-2\alpha(t)\tau}] B_1^2(t). \quad (16)$$

Якщо ж $\tilde{\omega} = 0$ (фільтр низьких частот), то [7]

$$\int_0^t h_t^2(\tau) d\tau \approx \frac{1}{2\alpha(t)} [1 - e^{-2\alpha(t)t}] B_1^2(t). \quad (17)$$

З урахуванням співвідношення (16) знаходимо

$$\int_0^T dt \int_0^t h_t^2(\tau) d\tau \approx \frac{1}{4} \int_0^T \frac{B_1^2(t)}{\alpha(t)} dt, \quad \tilde{\omega} \neq 0. \quad (18)$$

Для фільтра низьких частот з рівності (17) маємо

$$\int_0^T dt \int_0^t h_t^2(\tau) d\tau \approx \frac{1}{2} \int_0^T \frac{B_1^2(t)}{\alpha(t)} dt, \quad \tilde{\omega} \approx 0.$$

Використовуючи вираз (15), отримаємо

$$\int_0^T h_t(0) dt = \int_0^T B_1(t) dt . \quad (19)$$

Після підстановки співвідношень (18) і (19), знаходимо [8,9]

$$\delta \hat{G}_1 = \frac{\int_0^T \frac{B_1^2(t)}{\alpha(t)} dt}{\left[\int_0^T B_1(t) dt \right]^2} . \quad (20)$$

Цей вираз пов'язує характеристики динамічного вузько-смугового фільтра – $\alpha(t)$, $B_1(t)$ з відносною дисперсією оцінки СЩП, вимірюваної кореляційно-фільтровим методом.

Таким чином, отримані співвідношення (14) і (20) є вихідними для вирішення задачі оптимізації законів перебудови характеристик (параметрів) динамічних фільтрів для кореляційно-фільтрової методу спектрального аналізу.

Висновки

В результаті постановки і вирішення зазначених завдань оптимізації отримані аналітичні співвідношення для функції спектрального вікна вузько-смугового фільтра, які дозволяють при заданих значеннях часу аналізу та відносною дисперсії оцінки СЩП оптимально (за відповідним критерієм) апроксимувати ідеальне спектральний вікно фільтра.

Проведено порівняльний аналіз результатів оптимізації функцій спектрального вікна вузько-смугових фільтрів за середньоквадратичним критерієм і мінімуму впливу бічних пелюсток функції спектрального вікна. Показано, що при оптимізації функції спектрального вікна фільтра по мінімуму середньоквадратичної похибки апроксимації ідеального вікна забезпечується мінімальне середньоквадратичне відхилення функції спектрального вікна від ідеальної, але при цьому отримана. Функція спектрального вікна фільтра має осциляції як в смузі аналізу, так і поза нею, що призводить до методичної похибки вимірювання оцінки СЩП. При оптимізації функції спектрального вікна фільтра по мінімуму впливу її бічних пелюсток осциляції функції відсутні, але при цьому приблизно удвічі збільшується середньоквадратичне похибка апроксимації ідеальної функції спектрального вікна.

Отримані вихідні співвідношення для оптимального синтезу законів перебудови характеристик динамічних смугових фільтрів для кореляційно-фільтрового методу та методу безпосередньої фільтрації вимірювання оцінок СЩП. Ці співвідношення пов'язують статистичні характеристики оцінок СЩП (математичне очікування й дисперсію) зазначеними методами з характеристиками динамічного фільтра (функцією спектрального вікна, комплексної частотної характеристикою і ін.) і вимірюваної СЩП.

Показано, що функції спектрального вікна динамічних фільтрів, використовуваних при спектральному аналізі випадкових сигналів кореляційно-фільтровим методом і методом безпосередньої фільтрації, і відносні дисперсії оцінок СЩП, отриманих цими методами, залежать від однієї й тієї ж узагальненої функції $\varphi_t(\omega)$, яка, в свою чергу, визначається комплексними частотними характеристиками $W(j\omega)$ фільтрів. На підставі цього дана узагальнена формулювання задачі оптимізації параметрів динамічних фільтрів, використовуваних при спектральному аналізі одним із зазначених методів.

ЛІТЕРАТУРА

1. В.І. Богомья, А.В. Горбань, М.А. Павленко, О.І. Тимочко, О.М. Тимошук. За заг. ред.О.М.Тимошук. Особливості системного підходу до вирішення наукових завдань експлуатації суднового обладнання. Київ. ДУІТ. 2018. 305 с.
2. Баранов Г.Л. Р-модельовання складних динамічних систем / [Баранов Г.Л., Брайловський М.М., Засядько А.А. ті інші.]. – К.: ДУИКТ, 2008. – 131 с.
3. O'Neill C.R., Arena A.S.Jr. (2005). Time-domain training signals comparison for computational fluid dynamics based aerodynamic identification. *Journal of Aircraft*. Vol. 42, № 2. P. 421-428.
4. Recio A., Rhode W.S. (2000). Basilar membrane responses to broadband stimuli. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 108, № 5. – P. 2281-2298.
5. Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управление движением судна. Одесса. Феникс, 2007. 367 с.
6. Тимошук О.М., Богомья В.І., Дакі О.А. Методологія синтезу полігармонійних вимірювальних сигналів з нормованим спектром. *Новітні технології*. 2018. Вип. 3(7). С. 33–44. DOI: <https://doi.org/10.31180/2524-0102/2018.3.07.05>
7. Доронин В.В. Радионавигационные приборы и системы/ В.В. Доронин В.В. – К: КГАВТ, 2006. – 472 с.
8. Богомья В.І., Давидов В.С., Доронін В.В., Пашков Д.П., Тихонов І.В. (2012). Навігаційне забезпечення управління рухом суден. К.:ДВВП «Компас». 336 с.
9. Дакі О.А. Автоматичні прилади контролю параметрів систем управління та навігації засобів водного транспорту. *Новітні технології: збірник наукових праць*. 2019. Вип. 1 (8). С. 95-104. DOI:10.31180/2524-0102/2019.1.08.12.

REFERENCES

1. V.I. Bohom'ya, A.V. Horban', M.A. Pavlenko, O.I. Tymochko, O.M. Tymoshchuk. Za zah. red.O.M.Tymoshchuk. Osoblyvosti systemnoho pidkходу do vyrishennya naukovykh zavdan' ekspluatatsiyi sudnovoho obladdnannya. Kyiv. DUIT. 2018. 305 s.
2. Baranov H.L. P-modelyuvannya skladnykh dynamichnykh system / [Baranov H.L., Braylovs'kyu M.M., Zasyad'ko A.A. ti inshi.]. – K.: DUYKT, 2008. – 131 s.
3. O'Neill C.R., Arena A.S.Jr. (2005). Time-domain training signals comparison for computational fluid dynamics based aerodynamic identification. *Journal of Aircraft*. Vol. 42, № 2. P. 421-428.
4. Recio A., Rhode W.S. (2000). Basilar membrane responses to broadband stimuli. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 108, № 5. – P. 2281-2298.
5. Vahushchenko L.L., TSymbal H.H. Systemy avtomatycheskoho upravlenye dvyzhenyem sudna. Odessa. Fenyks, 2007. 367 s.
6. Tymoshchuk O.M., Bohom'ya V.I., Daki O.A. Metodolohiya syntezy poliharmoniynykh vymiryval'nykh syhnaliv z normovanyim spektrom. *Novitni tekhnolohiyi*. 2018. Vyp. 3(7). С. 33–44. DOI: <https://doi.org/10.31180/2524-0102/2018.3.07.05>
7. Doronyn V.V. Radyonavyhatsyonnye prybory y systemy/ V.V. Doronyn V.V. – K: K-HAVT, 2006. – 472 s.
8. Bohom'ya V.I., Davydov V.S., Doronin V.V., Pashkov D.P., Tykhonov I.V. (2012). Navihatsiyne zabezpechennya upravlinnya rukhom suden. K.:DVVP «Kompas». 336 s.
9. Daki O.A. Avtomatychni pryklady kontrolyu parametriv system upravlinnya ta navihatsiyi zasobiv vodnoho transportu. *Novitni tekhnolohiyi: zbirnyk naukovykh prats'*. 2019. Vyp. 1 (8). S. 95-104. DOI:10.31180/2524-0102/2019.1.08.12.

**Штрибець В.В., Кондратенко В.В., Абросимов В.В., Апчел В.И., Арванінов М.И.
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ ДВИГАТЕЛЕЙ СРЕДСТВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА**

В статье утверждается, что актуальной является научно-техническая задача, которая заключается в дальнейшем развитии фильтровых методов спектрального анализа случайных сигналов для диагностического контроля технического состояния двигателей средств водного транспорта.

Обычно при исследовании характеристик случайных сигналов используется два подхода: спектральный и временной. Возможность и целесообразность сочетания спектрально-корреляционных методов анализа случайных сигналов создает спектрально-корреляционный анализ, который позволяет проводить глубокое количественную оценку параметров случайных процессов.

К важнейшим преимуществам спектрально-корреляционного анализа случайных сигналов следует также отнести универсальность.

Итак, статья посвящена разработке фильтровых методов спектрального анализа случайных сигналов для диагностического контроля технического состояния двигателей средств водного транспорта.

Ключевые слова: *фильтровые методы, спектральный анализ, случайные сигналы, диагностический контроль, техническое состояние, эксплуатация, двигатели, средства водного транспорта.*

**Stribets V.V., Kondratenko V.V., Abrosimov V.V., Apchel V.I., Arvaninov M.I.
RESEARCH OF FILTERS FOR SPECTRAL ANALYSIS OF ACCIDENTAL SIGNALS OF ENGINES OF WATER TRANSPORT MEANS**

The article states that the scientific and technical problem is urgent, which consists in the further development of filter methods of spectral analysis of random signals for the diagnostic control of the technical condition of engines of water transport vehicles.

Typically, two approaches are used to investigate the characteristics of random signals: spectral and temporal. The possibility and feasibility of combining spectral-correlation methods of random signal analysis creates spectral-correlation analysis, which allows to carry out a deep quantitative evaluation of the parameters of random processes.

The most important advantages of spectral correlation analysis of random signals should also be universality.

Therefore, the article is devoted to the development of filter methods of spectral analysis of random signals for the diagnostic control of the technical condition of engines of water transport vehicles.

Keywords: *filter methods, spectral analysis, random signals, diagnostic control, technical condition, operation, engines, means of water transport.*