

УДК 621.389: 621.317

МЕТОД СИНТЕЗУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО СИГНАЛУ З БУДЬ-ЯКОЮ КІЛЬКІСТЮ ТОЧОК ПЕРЕМИКАННЯ

Тимошук О.М., Дакі О.А.

METHOD OF SYNTHESIS OF THE MEASUREMENT SIGNAL WITH ANY QUANTITY OF THE CIRCUMFERENCE POINT

Tymoshchuk O.M., Daki O.A.

В статті наведено протиріччя, яке є у практиці контролю технічного стану складних систем. Забезпечення заданої достовірності інформації про технічний стан радіонавігаційних комплексів управління рухом засобів водного транспорту потребує збільшення обсягу та точності вимірювань при оцінюванні їх характеристик з одного боку. З іншого боку спостерігається відсутність методів автоматизації процесів синтезу вимірювальних сигналів та обробки відгуків на них для цього.

Реалізація традиційного підходу до вимірювання характеристик амплітудно-частотного спектру динамічних об'єктів, потребує значної трудомісткості вимірювань. Уникнути даного недоліку можна за рахунок використання вимірювальних сигналів. Постановка задачі отримання оптимальних параметрів вимірювальних сигналів передбачає визначення конкретних критеріїв синтезу.

Пропонується розроблення оптимального методу синтезу вимірювальних сигналів з потрібним спектром та проведення експериментальної перевірки отриманих теоретичних результатів і розроблення рекомендації щодо їх впровадження для автоматизованого контролю технічного стану радіонавігаційних комплексів управління рухом засобів водного транспорту.

Ключові слова: експлуатація, радіонавігаційні комплекси, управління рухом, засоби водного транспорту, методи, вимірювальні сигнали, автоматизація контролю.

Вступ. Актуальність дослідження, проведеного у статті, обумовлена зростанням ролі та значення засобів контролю сучасних і перспективних радіонавігаційних комплексів управління рухом засобів водного транспорту у підтриманні їх готовності до функціонування за призначенням та загальною тенденцією підвищення вимог до своєчасного виявлення відмов за рахунок автоматизації (підвищення точності та оперативності контролю) контрольно-діагностичних робіт при експлуатації радіонавігаційних комплексів управління рухом засобів водного транспорту [1–4].

Постановка проблеми. Наукова проблема, що буде розв'язуватися у подальших дослідженнях, полягає в розробленні методології синтезу параметрів полігармонійних вимірювальних сигналів, яка дозволяє отримувати перешкодозахищені вимірювальні сигнали з потрібними показниками спектра, зокрема, коефіцієнтами корисної потужності та нерівномірності, середнього значення гармонік у корисному діапазоні частот.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Провідними закордонними фахівцями в даній галузі, зокрема, Ван Схонвелд, Ван Оудер, А. Томпсон, І. Коллар, Т. Уїлсон, а також відомими вітчизняними вченими, такими як М.Я. Мінц, Д.В. Корольков, Ю.М. Парійський, Ю.Ф. Павленко, В.К. Волосюк, В.М. Чинков, П.А. Шпаньон В.Г. Алексішин, Л.А. Козырь, С.В. Симоненко Л.Л. Вагущенко, Н.Н. Цымбал та ін. розроблено ряд робіт, які доказують можливість використання складних вимірювальних сигналів, окрім періодичних синусоїдних і прямокутних, для контролю технічного стану технічних систем [3–7].

Проте лише оглядово розглянуто методи синтезу параметрів полігармонійних вимірювальних сигналів, які дозволяють отримувати перешкодозахищені вимірювальні сигнали з потрібними показниками спектра.

Мета статті. Таким чином, метою статті є розроблення аналітичного апарату (методу), що пов'язує амплітудний спектр полігармонійного сигналу з набором значень точок перемикання.

Результати досліджень. Реалізація традиційного підходу до вимірювання характеристик амплітудно-частотного спектру динамічних об'єктів, що ґрунтується на застосуванні генераторів синусоїдних коливань, потребує значної трудомісткості вимірювань, оскільки потрібно послідовно задавати на генераторі контрольні частоти об'єкту, що досліджується. Уникнути даного недоліку можна за ра-

жунок використання вимірювальних сигналів. Постановка задачі отримання оптимальних параметрів вимірювальних сигналів передбачає визначення конкретних критеріїв синтезу, основними з яких є максимізація коефіцієнта використання потужності, досягнення задовільного рівня найменшої за амплітудою корисної гармоніки у спектрі, мінімізація розкиду амплітуд спектральних складових на частотах аналізу тощо [4–6].

Крім наведених показників спектра сигналів, метод синтезу вимірювальних сигналів може так само враховувати інші показники, наприклад, коефіцієнт амплітуди, який визначається як відношення максимального за модулем значення сигналу до його середньоквадратичного значення. Оптимізація таких сигналів з метою мінімізації коефіцієнта амплітуди приводить до збільшення "відношення сигнал / шум" та, відповідно, забезпечує підвищену перешкодозахищеність вимірювань характеристик амплітудно-частотного спектру динамічних об'єктів [6,7].

Періодичні сигнали складної форми, що мають нормовані параметри амплітудного спектра, знаходять широке застосування в метрологічній практиці [7,8]. Вибір таких сигналів як вимірювальних впливів для ідентифікації технічного стану динамічних об'єктів у частотній області дозволяє отримати високу перешкодозахищеність контролю, оскільки у кожен момент часу сигнали приймають значення або F_0 , або $-F_0$, забезпечуючи при будь-якому рівні перешкоди високий показник "відношення сигнал / шум". Крім того, апаратурна реалізація калібраторів сигналів є найпростішою, що забезпечує їм економічну ефективність [8].

Найбільшими функціональними можливостями з управління спектральним складом володіють сигнали зі складним законом модуляції тривалості імпульсів, коли отримання необхідного спектру сигналу досягається за рахунок зміни моментів перемикання його рівнів [9].

Аналітичне завдання сигналу з метою подальшого його спектрального аналізу класичним апаратом перетворення Фур'є вже при кількості точок перемикання, більшому 10-ти, представляє досить трудомістке завдання навіть для сучасних систем комп'ютерної математики [10]. Крім того, деякі ітераційні алгоритми оптимізації сигналів передбачають багаторазове перебування амплітуд гармонік при різних значеннях моментів перепаду рівнів. Як вирішення завдання пропонується знайти залежність, що дозволяє обчислювати спектр амплітуд сигналу за відомим набором його точок перемикання.

Серед сигналів найбільш відомими є меандр, прямокутні імпульси та їх комбінації у пакетах, а так само послідовності максимальної довжини [9,10]. Однак їх застосування під час вимірювання характеристик амплітудно-частотного спектру динамічних об'єктів обмежується значною нерівномірністю гармонік та неефективним розподілом поту-

жності сигналів, оскільки значна її частина знаходиться поза зоною аналізу. Кращі результати можна досягти, якщо оптимізувати складний вимірювальний сигнал з довільним набором точок переключення [10,11], який наближується в середньоквадратичному відношенні в часовій області до заданого сигналу. Але, як і в попередніх аналізованих роботах, низька гнучкість управління спектральним складом, яка обумовлена у даному випадку залежністю цільової функції оптимізації від фаз гармонічних складових, не дозволяє отримати бажані значення нерівномірності гармонік і корисної потужності.

Більшість джерел з питань радіотехнічних ланцюгів і сигналів розглядають найпростіші види сигналів, такі, як послідовність прямокутних імпульсів з довільною скважністю або меандр, і призводять кінцеві співвідношення для визначення їх спектральних складових [11]. У роботі [12] наведені розрахункові формули перетворення Фур'є для деяких класів функцій. Огляд різних адаптивних квадратур для обчислення певних інтегралів від довільних функцій проведено в [13].

Розглянемо сигнал $f(\alpha)$, має довільний закон модуляції тривалості імпульсів. На інтервалі одного періоду $T=2\pi$ він має M точок перемикання $\{\alpha_i\}$, де $\alpha = \omega_0 t$; ω_0 – основна частота сигналу; $i = \overline{1, M}$, причому $\alpha_{i-1} < \alpha_i < \alpha_{i+1}$, $\alpha_1 = 0$, $\alpha_M = 2\pi$. Мінімальне значення кількості точок перемикання $M = 3$, що справедливо для послідовності прямокутних імпульсів або меандру.

Отримаємо залежність амплітудного спектра даного сигналу від вектора точок його перемикання $\{\alpha_i\}$ для двох різних випадків: при парному та непарному значенні M .

Запишемо аналітичний вираз для визначення сигналу $f(\alpha)$, коли M – будь-яке непарне число:

$$f_1(\alpha) = \begin{cases} F_0, & \text{якщо } \alpha_1 \leq \alpha < \alpha_2, \dots, \alpha_{M-2} \leq \alpha < \alpha_{M-1}; \\ -F_0, & \text{якщо } \alpha_2 \leq \alpha < \alpha_3, \dots, \alpha_{M-1} \leq \alpha < \alpha_M. \end{cases} \quad (1)$$

Форма сигналу (1) представлена на рис. 1.

Аналогічно аналітичний запис складного сигналу, у якого M – парне число, буде мати вигляд:

$$f_2(\alpha) = \begin{cases} F_0, & \text{якщо } \alpha_1 \leq \alpha < \alpha_2, \dots, \alpha_{M-1} \leq \alpha < \alpha_M \\ -F_0, & \text{якщо } \alpha_2 \leq \alpha < \alpha_3, \dots, \alpha_{M-2} \leq \alpha < \alpha_{M-1}, \end{cases} \quad (2)$$

а його форма показана на рис. 2.

Знайдемо комплексні коефіцієнти Фур'є сигналів (1) і (2), використовуючи наступну рівність [12–14]

$$d_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\alpha) e^{-jn\alpha} d\alpha = \frac{1}{2} c_n e^{j\psi_n}, \quad \text{при } n \neq 0, \quad (3)$$

де c_n і ψ_n – амплітуда та початкова фаза n -й гармоніки.

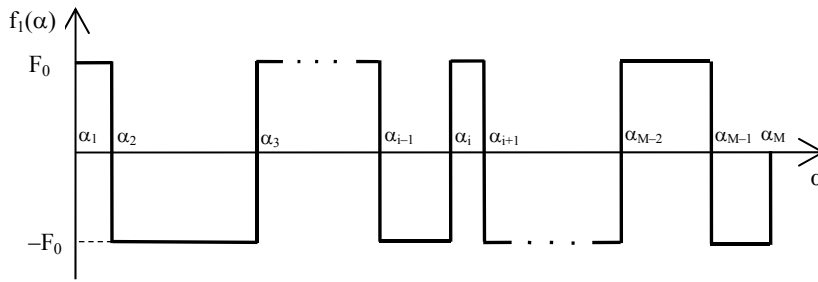


Рис. 1. Вимірювальний сигнал з непарною кількістю точок перемикання

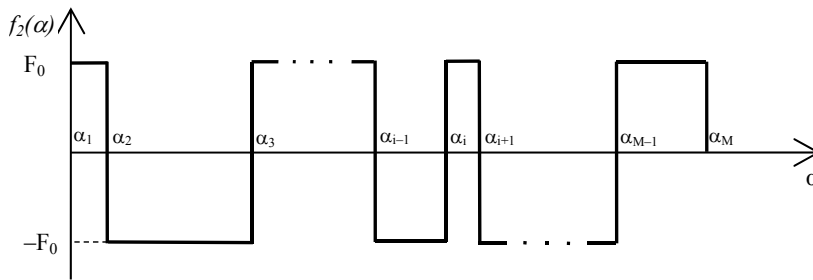


Рис. 2. Вимірювальний сигнал з парною кількістю точок перемикання

Із виразу (3) після перетворення [12] випливає, що амплітуда n -ї гармоніки визначається як

$$c_n = 2|d_n| = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} |f(\alpha)e^{-jn\alpha} d\alpha|. \quad (4)$$

Постійна складова сигналу c_0 дорівнює

$$c_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\alpha) d\alpha. \quad (5)$$

Квадратурні формули (4) і (5) визначають амплітудний спектр складного сигналу з довільним законом модуляції тривалості його імпульсів, однак при відомому векторі точок перемикання сигналу $\{\alpha_i\}$ безпосереднє використання співвідношень (4) і (5) неможливо. Тому доцільно перейти від інтегралів до записів з використанням кінцевих сум.

Для цього, підставляючи в формулу (4) вирази (1) і (2), отримуємо відповідно амплітудний спектр сигналу $f_1(\alpha)$

$$c_{1n} = \frac{2F_0}{\pi n} |e^{-jn\alpha_1} - e^{-jn\alpha_2} + e^{-jn\alpha_3} - \dots - e^{-jn\alpha_{M-1}}| = \frac{2F_0}{\pi n} |\sum_{i=1}^{M-1} (-1)^{i+1} e^{-jn\alpha_i}|. \quad (6)$$

і амплітудний спектр сигналу $f_2(\alpha)$

$$c_{2n} = \frac{2F_0}{\pi n} |-e^{-jn\alpha_2} + e^{-jn\alpha_3} - \dots - e^{-jn\alpha_{M-1}}| = \frac{2F_0}{\pi n} |\sum_{i=2}^{M-1} (-1)^{i+1} e^{-jn\alpha_i}|. \quad (7)$$

Різниця між формулами (6) і (7) складається лише у нижніх межах індексу підсумовування. Для непарної кількості точок перемикання величина та приймає значення від 1 до $M-1$, а для парного кількості – від 2 до $M-1$. З метою узагальнення рівності (6) і (7) наведемо універсальну формулу для розра-

хунку нижньої межі індексу підсумовування, позначивши його M_0 , що дозволить для будь-яких M (парних або непарних) отримувати відповідні значення нижніх меж сум:

$$M_0 = \frac{|(-1)^{M+1}-1|}{2} + 1. \quad (8)$$

Елемент $(-1)^{i+1}$ у співвідношеннях (6) і (7), визначає знакозмінний ряд, запишемо у вигляді $(-1)^i$, оскільки збереження показника ступеня, рівного $(i+1)$, необхідно тільки при обчисленні фаз гармонічних складових ψ_n .

Розклавши комплексні експоненти виразів (6) і (7) за формулою Ейлера [15] і з урахуванням виразу (8), отримаємо аналітичне співвідношення, що зв'язує спектр амплітуд сигналу з набором його точок перемикання $\{\alpha_i\}$:

$$c_n = \frac{2F_0}{\pi n} \cdot \sqrt{\left[\sum_{i=M_0}^{M-1} (-1)^i \cos(n\alpha_i) \right]^2 + \left[\sum_{i=M_0}^{M-1} (-1)^i \sin(n\alpha_i) \right]^2}. \quad (9)$$

Відзначимо, що формула (9) справедлива й у разі $f_1(\alpha) = -f_1(\alpha)$, $f_2(\alpha) = -f_2(\alpha)$.

У той же час перетворення формули (10) для обчислення постійної складової сигналу вимагають обліку значення, а точніше знаку $f(\alpha)$ на першому інтервалі аналізу ($\alpha_1 \leq \alpha < \alpha_2$).

Наведемо кінцеве вираз для розрахунку величини c_0 :

$$c_0 = \frac{F_0}{2\pi} \sum_{i=1}^{M-1} (-1)^{i+1} (\alpha_{i+1} - \alpha_i) \sin(f(\alpha)) \Big|_{\alpha_1 \leq \alpha < \alpha_2} \quad (10)$$

У статті запропоновано та досліджено методологію синтезу параметрів полігармонійних вимірювальних сигналів, які дозволяють отримувати перешкодозахищені вимірювальні сигнали з потрібними показниками спектра, зокрема, коефіцієнтами корисної потужності та нерівномірності, середнього значення гармонік у корисному діапазоні частот.

Висновки.

У статті запропоновано та досліджено методологію синтезу параметрів полігармонійних вимірювальних сигналів, які дозволяють отримувати перешкодозахищені вимірювальні сигнали з потрібними показниками спектра, зокрема, коефіцієнтами корисної потужності та нерівномірності, середнього значення гармонік у корисному діапазоні частот.

Також поставлена та вирішена задача знаходження аналітичного апарату, що пов'язує амплітудний спектр полігармонійного сигналу, що має довільний закон модуляції тривалості імпульсів, з набором значень точок перемикавання. Причому, амплітуди гармонік з номерами 1 і вище однозначно визначаються вектором точок перемикавань $\{\alpha_i\}$ і значенням рівня сигналу F_0 , а обчислення постійної складової вимагає, крім цього, додаткового знання про знак сигналу на першому інтервалі аналізу (знаку першого імпульсу).

Таким чином, пропонується у подальших дослідженнях розроблення методу синтезу вимірювальних сигналів з потрібним спектром та проведення експериментальної перевірки отриманих теоретичних результатів і розроблення рекомендації щодо їх впровадження для автоматизованого контролю технічного стану радіонавігаційних комплексів управління рухом засобів водного транспорту.

Література

1. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море СОЛАС. С-Пб.: ЦНИИМФ, 2008. 984 с.
2. Беляевський Л.С. Глобальні супутникові системи навігації та зв'язку на транспорті. Навчальний посібник для ВУЗів транспортного профілю / [Беляевський Л.С., Ткаченко А.М., Левковець П.Р. та інші.]. – К.: В-во «Даж Бог», 2009. – 216 с.
3. В.І. Богомья, А.В. Горбань, М.А. Павленко, О.І. Тимошко, О.М. Тимошук. За заг. ред. О.М. Тимошук. Особливості системного підходу до вирішення наукових завдань експлуатації суднового обладнання. Київ. ДУІТ. 2018. 305 с.
4. Алексишин В.Г., Козырь Л.А., Симоненко С.В. Обеспечение навигационной безопасности плавания: учебное пособие. Одесса: Феникс. 2009. 518 с.
5. Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управление движением судна. Одесса. Феникс, 2007. 367 с.

6. Баранов Г.Л. Р-моделирование сложных динамических систем / [Баранов Г.Л., Брайловский М.М., Засядько А.А. та інші.]. – К.: ДУИКТ, 2008. – 131 с.
7. Mozeson E., Levanon N. (2003). Multicarrier radar signals with low peak-to-mean envelope power ratio. IEE Proc.-Radar Sonar Navig. Vol. 150, № 2. P. 71-77.
8. 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.
9. 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.
10. Даки 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.
11. Даки О.А. Розробка автомата контролю лінійних і нелінійних систем управління та навігації засобів водного транспорту / О.А. Даки, Ф.О. Кривошей, С.Л. Панов // Наукоємні технології. – 2018. – №4(40). – С. 458-463. – DOI: 10.18372/2310-5461.40.13272.
12. Измерительные информационные системы. Под общей ред. Н.А. Рубичева. М.: Дрофа, 2010. 334 с.
13. Доронин В.В. Радионавигационные приборы и системы / В.В. Доронин В.В. – К.: КГАВТ, 2006. – 472 с.
14. 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.
15. Фридман А.Э. Основы метрологии. Современный курс / А.Э. Фридман. – С.Пб.: НПО «Профессионал», 2008. – 284 с.

References

1. International Convention for the Safety of Life at Sea SOLAS. С-Пб.: ЦНИИМФ, 2008. 984 с.
2. Belyaevsky L. Global satellite navigation and communication systems for transport. Educational manual for universities of transport profile / [Belyaevsky LS, Tkachenko AM, Levkovets PP and other.]. - K.: In "Dazh God", 2009 - 216 p.
3. VI Bogomya, AV Gorban, MA Pavlenko, OI Timochko, O.M. Tymoshchuk Per unit ed. O.M. Tymoshchuk. Features of a systematic approach to solving scientific problems of the operation of marine equipment. Kiev. DUIT 2018. 305 p.
4. Aleksyshyn VG, Kozyr L.A., Simonenko SV Providing navigational navigation safety: a manual. Odessa: Phoenix. 2009. 518 p.
5. Vagushchenko L.L., Tymbal N.N. Systems for automatic control of vessel movement. Odessa Phoenix, 2007. 367 p.
6. Baranov G.L. P-modeling of complex dynamical systems / [Baranov GL, Brailovsky MM, Zasyadko AA those others.]. - K.: DUKT, 2008. - 131 p.
7. Mozeson E., Levanon N. (2003). Multicarrier radar signals with low peak-to-mean envelope power ratio. IEE Proc.-Radar Sonar Navig. Vol. 150, № 2. P. 71-77.
8. O'Neill C.R., Arena A.S.Jr. (2005). Time-domain training signals comparison for calculating fluid dynamics based aerodynamic identification. Journal of Aircraft. Vol. 42, No. 2. P. 421-428.
9. Recio A., Rhode W.S. (2000). Basilar membrane responses to broadband stimuli. The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 108, No. 5. - P. 2281-2298.

10. Daki O.A. Automatic devices for controlling the parameters of navigation and navigation systems for water transport. Newest technologies: a collection of scientific works. 2019. Vip. 1 (8). Pp. 95-104. DOI: 10.31180 / 2524-0102 / 2019.1.08.12.
11. Daki O.A. Development of automatic control of linear and nonlinear systems of navigation and navigation of water transport vehicles / O.A. Daki, FO Krivoshey, SL Panov // Knowledge technologies. - 2018 - No. 4 (40). - P. 458-463. - DOI: 10.18372 / 2310-5461.40.13272.
12. Measuring information systems. Under the general ed. ON. Rubicheva M. : Drofa, 2010. 334 p.
13. Doronin VV Radio navigation equipment and systems / VV Doronin VV - To: KGAVT, 2006. - 472 p.
14. Bogomya V.I., Davydov VS, Doronin V.V., Pashkov D.P., Tikhonov I.V. (2012). Navigation support for controlling the movement of ships. K.: DVVP "Compass". 336 s.
15. Friedman AE Fundamentals of Metrology. Modern course / AE Friedman - S.Pb. : NGO "Professional", 2008. - 284 p.

Тимошук Е.Н., Дакі Е.А. Метод синтеза измерительных сигналов с любым количеством точек переключения

В статье обозначено противоречие, которое существует в практике контроля технического состояния сложных систем. Обеспечение заданной достоверности информации о техническом состоянии радионавигационных комплексов управления движением средств водного транспорта требует увеличения объема и точности измерений при оценке их характеристик с одной стороны. С другой стороны наблюдается отсутствие методов автоматизации процессов синтеза измерительных сигналов и обработки отзывает на них для этого.

Реализация традиционного подхода к измерению характеристик амплитудно-частотного спектра динамических объектов, требует значительной трудоемкости измерений. Избежать данного недостатка можно за счет использования измерительных сигналов. Постановка задачи получения оптимальных параметров измерительных сигналов предусматривает определение конкретных критериев синтеза.

Предлагается разработка оптимального метода синтеза измерительных сигналов с нужным спектром и проведения экспериментальной проверки полученных теоретических результатов и разработка рекомендации по их внедрению для автоматизированного контроля технического состояния радионавигационных комплексов управления движением средств водного транспорта.

Ключевые слова: эксплуатация, радионавигационные комплексы, управление движением, средства водного транспорта, методы, измерительные сигналы, автоматизация контроля.

Tymoshchuk O.M., Daki O.A. Method of synthesis of the measurement signal with any quantity of the circumference point

The article presents the contradiction that exists in the practice of controlling the technical condition of complex systems. Provision of the given reliability of the information on the technical state of the radionavigation complexes of the traffic control of water transport means requires an increase in the scope and accuracy of measurements when evaluating their characteristics on the one hand. On the other hand, there is a lack of methods for automating the synthesis of measurement signals and processing responses to them for this.

Implementation of the traditional approach to measuring the characteristics of the amplitude-frequency spectrum of dynamic objects, requires a considerable complexity of measurements. Avoid this disadvantage due to the use of measuring signals. The statement of the problem of obtaining optimal parameters of measuring signals involves the definition of specific synthesis criteria.

It is proposed to develop an optimal method for synthesizing measuring signals with the required spectrum and conduct an experimental verification of the theoretical results and develop recommendations for their implementation for the automated control of the technical state of the radionavigation complexes for controlling the movement of water transport vehicles.

Key words: operation, radionavigation complexes, traffic control, means of water transport, methods, measuring signals, automation of control.

Тимошук О.М. – д.т.н., доцент, директор інституту, Київський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, вулиця Кирилівська, 9, Київ, 02000, E-mail: mnielena7@gmail.com

Дакі О.А. – кандидат філологічних наук, доцент, декан факультету, Дунайський факультет морського і річкового транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, 68606, г. Ізмаїл, вул. Іванівська, 44, E-mail: df_duit@ukr.net.

Рецензент: д.т.н., проф. **Горбунов М.І.**

Стаття подана .05.04.2019