

ТРАНСПОРТ

УДК 519.873: 621.389

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-2/24>**Богом'я В.І.**

Державний університет інфраструктури та технологій

Дакі О.А.

Державний університет інфраструктури та технологій

Тимощук О.М.

Державний університет інфраструктури та технологій

АНАЛІЗ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ УПРАВЛІННЯ РУХОМ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

У статті розглянуто наявність у практиці контролю технічного стану складних систем протиріччя, а саме забезпечення заданої достовірності інформації про технічний стан радіонавігаційних комплексів управління рухом засобів водного транспорту потребує збільшення обсягу та точності вимірювань для оцінювання їх характеристик, з одного боку, з іншого – відсутність методів автоматизації процесів синтезу вимірювальних сигналів та обробки відгуків на них для цього. Реалізація традиційного підходу до вимірювання характеристик амплітудно-частотного спектра динамічних об'єктів потребує значної трудомісткості вимірювань. Уникнути цього недоліку можна за рахунок використання вимірювальних сигналів. Постановка задачі отримання оптимальних параметрів вимірювальних сигналів передбачає аналіз вимірювальних сигналів та визначення конкретних критеріїв синтезу. За результатами аналізу вимірювальних сигналів та відомих методів синтезу вимірювальних сигналів для контролю технічного стану радіонавігаційних комплексів управління рухом засобів водного транспорту пропонується розроблення оптимального методу синтезу вимірювальних сигналів з потрібним спектром та проведення експериментальної перевірки отриманих теоретичних результатів і розроблення рекомендацій 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.

Постановка проблеми. Перспективним напрямом розвитку методів і приладів контролю та діагностування технічного стану радіонавігаційних комплексів управління рухом засобів водного транспорту є їх автоматизація та універсализація [1; 2].

При цьому виникає відоме у практиці контролю технічного стану складних систем протиріччя: забезпечення заданої достовірності інформації про технічний стан радіонавігаційних комплексів управління рухом засобів водного транспорту потребує збільшення обсягу та точності вимірювань для оцінювання їх характеристик, з одного боку, з іншого – відсутність методів автоматизації процесів синтезу вимірювальних сигналів та обробки відгуків на них для цього.

У рамках зазначеного протиріччя актуальними є дослідження, які пов'язані з аналізом вимірювальних параметрів та подальшим розробленням оптимального методу синтезу вимірювальних сигналів з потрібним спектром [3].

Аналіз останніх досліджень. Провідними закордонними фахівцями в цій 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. Алексишин, Л.А. Козырь, С.В. Симоненко, Л.Л. Вагущенко, Н.Н. Цимбал та ін., розроблено низку робіт, які доказують можливість використання складних вимірювальних сигналів, окрім періодичних

синусоїдних і прямокутних, для контролю технічного стану технічних систем [3–8].

Проте лише оглядово розглянуто методи синтезу вимірювальних сигналів складної форми для контролю технічного стану радіотехнічних систем. Це пов'язано з відсутністю тоді технічної можливості створити відповідні моделі для перевірки синтезованих сигналів складної форми.

Формулювання цілей статті. У статті запропоновано дослідження предметної сфери, яке включає проведення аналізу вимірювальних сигналів для контролю технічного стану радіотехнічних систем.

Основні матеріали дослідження. Об'єктивною тенденцією розвитку радіотехнічних систем навігації та управління рухом морських суден на сучасному етапі є постійне зростання їх складності з урахуванням умов експлуатації – агресивного середовища: підвищена вологість і сіль, різні кліматичні зони експлуатації. Нині є загально визнаним, що одним з основних напрямів удосконалення системи експлуатації складних технічних об'єктів (у тому числі РТС) є розвиток системи їх обслуговування, що полягає в проведенні операцій з вимірювання та контролю параметрів об'єктів з метою визначення ступеня їх придатності до подальшого використання за призначенням.

Підвищити оперативність обслуговування та, відповідно, збільшити коефіцієнт оперативної готовності систем і комплексів навігації та управління рухом морських суден загалом можливо за рахунок зменшення часу проведення заходів обслуговування [4].

Вимоги до оперативності та якості проведення операцій з контролю технічного стану підвищуються у зв'язку з переведенням систем і об'єктів на експлуатацію за технічним станом [4; 5].

Традиційними вимірювальними сигналами для контролю технічного стану РТС є синусоїдні коливання [3]. Проте такий підхід потребує значної працездатності контролю та призводить до зниження оперативності його проведення через необхідність введення інерційних блоків для підвищення перешкодозахищеності.

Уникнути цього недоліку можна за рахунок використання багаточастотних сигналів з нормованим спектром – полігармонійних сигналів [6]. Вони являють собою суму певної кількості корисних гармонік, модульовані сигнали з нормованим спектром і різні форми бінарних сигналів.

Тому актуальною науковою проблемою є розробка методів синтезу полігармонійних вимірювальних сигналів і обробки відгуків на них для

підвищення достовірності та оперативності автоматизованого контролю технічного стану РТС. Теоретичні основи синтезу входних полігармонійних вимірювальних сигналів і обробки відгуку на такі сигнали дають змогу удосконалити процес автоматизованого контролю технічного стану РТС [7; 8].

Розглянемо входні вимірювальні сигнали та сигнали-відгуки (вихідні сигнали) РТС загалом, які можна вважати лінійними динамічними ланками, і відповідні їм динамічні характеристики [6; 9].

Вимірювальним радіотехнічним сигналом є електрична напруга або струм, що змінюється в часі, із заздалегідь відомими характеристиками, які використовуються для визначення параметрів окремих радіотехнічних пристроїв (ланцюгів) або їх контролю [7].

Тестові синусоїдні сигнали використовують для визначення частотних характеристик радіотехнічних систем [8; 9].

Відгуком (реакцією) системи на такий сигнал $x(t)$ з постійною амплітудою X_{\max} є також синусоїдний сигнал $y(t)$, частота якого залишається тією самою. Але в загальному випадку ці сигнали можуть відрізнятися за амплітудою та фазою, тобто між сигналами є фазовий зсув ϕ (рис. 1).

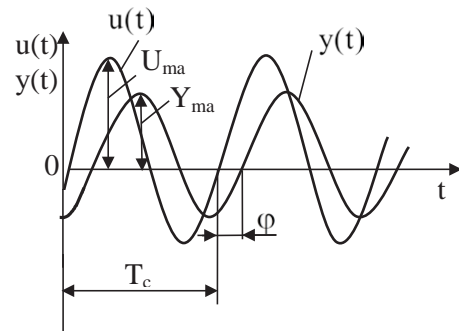


Рис. 1. Тестовий входний $x(t)$ і вихідний $y(t)$ синусоїдні сигнали

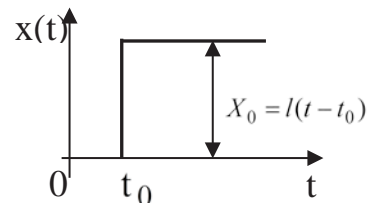


Рис. 2. Одиничний стрибок

Різним круговим частотам $\omega = 2\pi f$ ($f = \frac{1}{T_c}$ – циклічна частота, T_c – період синусоїдного тестового сигналу $x(t)$) за умови $X_{\max} = \text{const}$ відповідають різні зсуви фаз ϕ і різні співвідношення амплітуд Y_{\max} , X_{\max} вихідного та входного сигналів РТС.

Це дає змогу використовувати ці залежності для визначення частотних характеристик системи:

– АЧХ як залежності амплітуди Y_{\max} (чи середньоквадратичного значення (СКЗ) Y) вихідного сигналу $y(t)$ системи або найчастіше відношення амплітуд $\frac{Y_{\max}}{X_{\max}}$ (чи СКЗ $\frac{Y}{X}$) вихідного та вхідного сигналів системи від частоти ω (або циклічної частоти вхідного сигналу f);

– фазово-частотної характеристики (ФЧХ) як залежності фазового зсуву ω між вихідним $y(t)$ і вхідним $x(t)$ сигналами системи від частоти ω (або f).

Недоліком таких сигналів є неможливість технічної реалізації синусоїдного сигналу без вищих гармонік (коефіцієнт гармонік у синусоїдного сигналу завжди більше нуля). Гармоніки такого вимірювального сигналу можуть розглядатися у вигляді перешкоди, що вносить додаткові похибки в результат вимірювання.

Для дослідження та оцінки часткових часових динамічних характеристик радіотехнічних систем використовують стрибкоподібні тест-сигнали $x(t)$ [3; 6]. Причому під часовими динамічними характеристиками систем маються на увазі не тільки установлені ГОСТ 8.009-84, але й інші, що широко використовуються в практиці вимірювань, наприклад САУР або ЗВТ системи навігації та управління рухом морських суден.

Якщо рівень стрибка дорівнює X_0 , то відгук системи на такий сигнал визначається за такою формулою:

$$g(t) = \frac{y(t)}{X_0}$$

Для однакового опису тест-стрибків і відповідних їм відгуків РТС незалежно від виду фізичної величини вибирають $X_0 = 1(t - t_0)$ і такий стрибок називають одиничним (рис. 2), а відгук (реакцію) на нього $g(t)$ – перехідною характеристикою (функцією).

Уявлення про одиничний стрибок як миттєве (або стрибкоподібне) змінювання рівня тест-сигналу $x(t)$ є ідеалізацією. Реально час стрибкоподібного змінювання сигналу не є нульовим, тобто нескінченно малим. Найбільш часто зустрічаються аперіодична та коливальна перехідні характеристики радіотехнічних систем, що наведені на рис. 3 [6; 7].

Аперіодична перехідна характеристика (рис. 3 а) справедлива для систем із затримкою першого порядку, а коливальна перехідна характеристика (рис. 3 б) – для систем із затримкою другого порядку, тобто із затухаючим коливальним перехідним процесом і запізненням.

Аперіодична крива (рис. 3 а) є розв’язанням диференціального рівняння, яке описує передатну ланку із затримкою першого порядку:

$$\tau \dot{y} + y = X_0,$$

де τ – момент часу подачі (прикладання) вхідного сигналу.

Розв’язання цього диференціального рівняння

$$h(t, \tau) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1)$$

є імпульсною характеристикою РТС [7; 8].

Коливальна крива (рис. 3 б) являє собою розв’язання диференціального рівняння [7], що описує передатну ланку із затримкою другого порядку.

Так, наприклад, одна з конкретних форм запису рівняння

$$a_2 \ddot{y}(t) + a_1 \dot{y}(t) + a_0 y(t) = kx(t)$$

має вигляд:

$$\tau^2 \ddot{y} + 2d\tau \dot{y} + y = kX_0,$$

де d – відносний коефіцієнт затухання (демпфірування) РТС;

k – статичний коефіцієнт передачі (коефіцієнт підсилення) РТС.

Перехідні характеристики динамічних систем з коливальним перехідним процесом за різних значень коефіцієнта затухання d зображені на рис. 4.

Теоретично вихідний сигнал (відгук) $y(t)$ або перехідна характеристика $g(t)$ РТС досягає свого дійсного (усталеного) значення $Y_0 = kX_0$ за нескінченно великий інтервал часу.

Але за часову характеристику цього процесу використовують час установлення (заспокоєння) T_y (або час реакції t_c), за який сигнал $y(t)$ досягає певного значення (рівня).

Так, для систем з аперіодичною перехідною характеристикою (рис. 3 а) за час установлення T_y

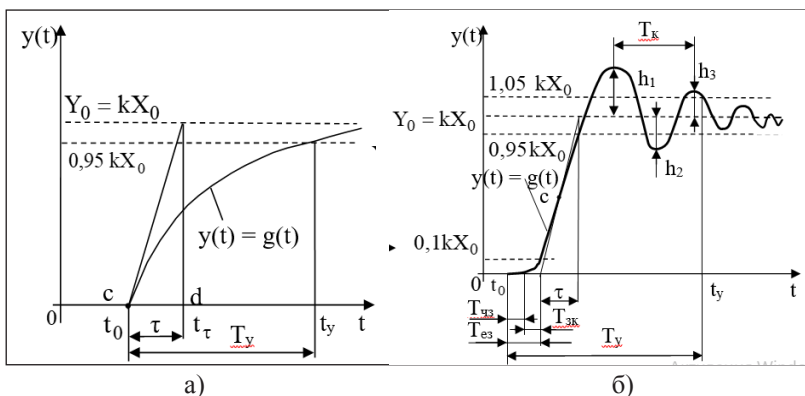


Рис. 3. Перехідні характеристики радіотехнічної системи: а – аперіодична; б – коливальна

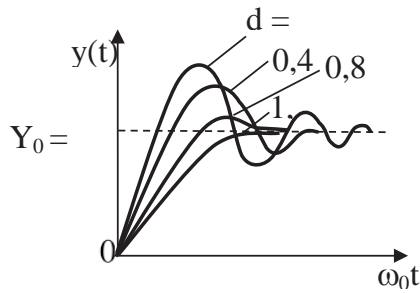


Рис. 4. Перехідні характеристики радіотехнічної системи для різних значень коефіцієнта затухання d

приймають інтервал від моменту часу початку дії одиничного стрибка t_0 до моменту часу t_y , за якого вихідна величина $y(t)$ або перехідна характеристика $g(t)$ системи перестає виходити за межі (рис. 3 а)

$$(1 \pm 0,05)Y_0 = (1 \pm 0,05)kX_0.$$

Важливою часовою характеристикою системи з аперіодичною перехідною характеристикою є постійна часу τ , яка визначається як інтервал часу між абсцисою s точки t_0 перетину дотичної до перехідної характеристики $g(t)$ з віссю t та абсцисою d точки t_τ перетину тієї самої дотичної з лінією $Y_0 = kX_0$ (рис. 3 а) [12; 13].

Для систем з коливальною перехідною характеристикою (рис. 3 б) показані також час чистого запізнення $T_{чз}$, час затримки коливань $T_{зк}$, еквівалентний час запізнення $T_{езз}$, постійна часу τ і період коливань T_k .

Час затримки коливань $T_{зк}$ визначається точкою перетину дотичної у точці s кривої вихідного сигналу $y(t)$ з віссю t . Але оскільки ланки затримки високих порядків не мають чітко виражених меж між цими часовими параметрами, то їх звичайно об'єднують в еквівалентний час запізнення $T_{езз} = T_{чз} + T_{зк}$ [14].

Для окремих систем замість часу встановлення коливань T_y вводять час наростання відгуку T_B , який відрховується між рівнями $0,1 \cdot kX_0$, $0,95 \cdot kX_0$ і (рис. 3 б).

Аналогічно попередньому час установлення (заспокоєння) T_y систем з коливальною перехідною характеристикою являє собою інтервал часу від моменту t_0 початку дії одиничного стрибка до моменту часу t_y , коли вихідний сигнал $y(t)$ або перехідна характеристика $g(t)$ системи перестає виходити за поле допуску, що розташовується між рівнями $0,95Y_0 = 0,95 \cdot kX_0$ та $1,05Y_0 = 1,05 \cdot kX_0$. Тобто поле допуску становить $\pm 0,05Y_0 = \pm 0,05 \cdot kX_0$ і розташоване симетрично відносно рівня усталеного значення $Y_0 = kX_0$.

Імпульсна характеристика (функція) РТС визначається як її реакція (відгук) на корот-

кий імпульс з амплітудою $X_0 \rightarrow \infty$ і тривалістю $T_0 \rightarrow \infty$, який називають одиничним імпульсом або дельта-функцією та позначають $\delta(t)$ [10; 11].

Основна властивість дельта-функції полягає у виконанні умови

$$\int \delta(t)dt = 1,$$

тобто вона має одиничну площу. Як впливає з цього виразу розмірність дельта-функції дорівнює c^{-1} .

Але ідеально сформувані одиничний імпульс $\delta(t)$ неможливо. Тому на практиці замість нього формують квазіодиничний імпульс або квазідельта-імпульс $\delta_k(t)$, який має обмежені амплітуду X_0 і тривалість T_0 , причому необхідно виконати умову $T_0 \ll \tau$.

Одиничний імпульс, як і одиничний стрибок, – це математична ідеалізація. Тому на практиці для визначення вагової функції формують одиничний імпульс такої тривалості, щоб до його завершення досліджувана система залишилася ще в стані спокою.

Імпульсну характеристику $h(t)$ РТС теоретично можна визначити диференціюванням перехідної функції. За приклад на рис. 5 якісно показана крива цієї характеристики, отримана диференціюванням перехідної характеристики, зображеної на рис. 3 а [15].

Таким чином, вважаємо за доцільне впровадження для визначення технічного стану систем і комплексів навігації та управління рухом морських суден засобів синтезу (калібраторів) вимірювальних сигналів з поліпшеними характеристиками. Серед певної низки переваг від використання таких сигналів найбільш суттєвими є значне скорочення часу, що виділяється на проведення вимірювання параметрів, тобто контролю технічного стану систем, збільшення міжповірочних інтервалів, підвищення точності відтворення форми сигналу, підвищення перешкодостійкості та точності визначення параметрів радіотехнічних систем спеціального призначення, що контролюються, тобто підвищення достовірності контролю їхнього технічного стану.

Висновки. У кожному конкретному практичному випадку вибір вигляду дослідного сигналу (тест-сигналу) і динамічної характеристики системи, що визначається, диктується технічною або економічною доцільністю.

Наведено, що найбільш поширеними є гармонійні сигнали, які мають певні недоліки. Обґрунтовано, що більш ефективно використовувати для контролю технічного стану систем і комплексів

навігації та управління рухом морських суден вимірювальні сигнали складної форми (полігармонійні).

Застосування запропонованих теоретичних основ і практичних методів синтезу вимірювальних сигналів дає змогу створити якісно нові види приладів контролю. Запропоновані у роботі методи синтезу та обробки, а також алгоритми

роботи калібраторів (мір) і аналізаторів розроблених вимірювальних сигналів можуть бути застосовані у разі створення автоматизованих приладів для контролю технічного стану радіонавігаційних комплексів засобів водного транспорту. Це дає змогу скоротити витрати часу на проведення заходів з технічного обслуговування та підвищити його якість.

Список літератури:

1. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море СОЛАС. Санкт-Петербург : ЦНИИМФ, 2008. 984 с.
2. Беляєвський Л.С. Глобальні супутникові системи навігації та зв'язку на транспорті : навчальний посібник для вузів транспортного профілю / Беляєвський Л.С., Ткаченко А.М., Левковець П.Р. та інші. Київ : В-во «Даж Бог», 2009. 216 с.
3. Богомья В.І., Горбань А.В., Павленко М.А., Тимочко О.І., Тимошук О.М. Особливості системного підходу до вирішення наукових завдань експлуатації суднового обладнання / за заг. ред. О.М. Тимошук. 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 управления движением судна. Одесса : Феникс, 2007. 367 с.
6. Баранов Г.Л. Брайловський М.М., Засядько А.А. та інші. Р-моделювання складних динамічних систем. Київ : ДУІКТ, 2008. 131 с.
7. Mozeson E., Levanon N. Multicarrier radar signals with low peak-to-mean envelope power ratio. *IEEE Proc.-Radar Sonar Navig.* 2003. Vol. 150, № 2. P. 71–77.
8. O'Neill C.R., Arena A.S.Jr. Time-domain training signals comparison for computational fluid dynamics based aerodynamic identification. *Journal of Aircraft.* 2005. Vol. 42, № 2. P. 421–428.
9. Recio A., Rhode W.S. Basilar membrane responses to broadband stimuli. *The Journal of the Acoustical Society of America.* 2000. 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. Кривошей Ф.О., Панов С.Л. Розробка автомата контролю лінійних і нелінійних систем управління та навігації засобів водного транспорту. *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. Москва : Дрофа, 2010. 334 с.
13. Доронин В.В. Радионавигационные приборы и системы. Киев : КГАВТ, 2006. 472 с.
14. Богомья В.І., Давидов В.С., Доронін В.В., Пашков Д.П., Тихонов І.В. Навігаційне забезпечення управління рухом суден. 2012. Київ : ДВВП «Компас». 336 с.
15. Фридман А.Э. Основы метрологии. Современный курс. Санкт-Петербург : НПО «Профессионал», 2008. 284 с.

АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РАДИОНАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СРЕДСТВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

В статье рассмотрено наличие в практике контроля технического состояния сложных систем противоречия, а именно 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 – отсутствие методов автоматизации процессов синтеза измерительных сигналов и обработки отзвучив на них для этого. Реализация традиционного подхода к измерению характеристик амплитудно-частотного спектра динамических объектов требует значительной трудоёмкости измерений. Избежать данного недостатка можно за счёт использования измерительных сигналов. Постановка задачи получения оптимальных параметров измерительных сигналов предусматривает анализ измерительных сигналов и определения конкретных критериев синтеза.

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

**ANALYSIS OF MEASUREMENT SIGNALS
FOR CONTROL OF THE TECHNICAL STATE OF THE RADIONAVIGATION
COMPLEXES OF MANAGEMENT OF MOVING VEHICLES OF WATER TRANSPORT**

In the article the presence in the practice of controlling the technical condition of complex systems of contradiction is considered, namely the provision of the given reliability of information about the technical state of the radionavigation complexes of the traffic control of water transport means requires an increase in the volume and accuracy of measurements in evaluating their characteristics, on the one hand, and on the other – the lack of methods for automating processes the synthesis of the measurement signals and processing feedback on 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 task of obtaining optimal parameters of measuring signals involves the analysis of measuring signals and the determination of specific synthesis criteria. According to the results of the analysis of measuring signals and known methods for measuring the synthesis of measuring signals for the control of the technical state of the radionavigation complexes of motion control of water transport vehicles, it is proposed to develop an optimal method for synthesizing measurement signals with the required spectrum and conduct an experimental verification of the obtained theoretical results and develop recommendations for their implementation for automated control of the technical state, radionavigation complexes for controlling the movement of water resources of transport.

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