

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

**ДАКІ ОЛЕНА АНАТОЛІЇВНА**



УДК 656.6:681.5

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АВТОМАТИЗАЦІЇ КОНТРОЛЮ  
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ  
ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ**

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

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному університеті інфраструктури та технологій,  
м. Київ, Міністерство освіти і науки України

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор,  
**Богом'я Володимир Іванович,**  
Державний університет інфраструктури та  
технологій  
Міністерства освіти і науки України,  
професор кафедри експлуатації водного транспорту  
на водних шляхах України

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,  
**Мачалін Ігор Олексійович,**  
Національний авіаційний університет  
Міністерства освіти і науки України,  
декан факультету аеронавігації,  
електроніки та телекомунікацій

доктор технічних наук, професор,  
**Машков Олег Альбертович,**  
Державна екологічна академія післядипломної  
освіти та управління  
Міністерства енергетики та захисту довкілля,  
проректор з наукової роботи

доктор технічних наук, професор,  
**Онищенко Олег Анатолійович,**  
Національний університет "Одеська морська  
академія"  
Міністерства освіти і науки України,  
професор кафедри технічної експлуатації флоту

Захист відбудеться «03» липня 2020 року о 11.00 годині на засіданні  
спеціалізованої вченої ради Д 26.110.01

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного університету  
інфраструктури та технологій за адресою: вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071

Автореферат розісланий «02» червня 2020 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.110.01  
к.т.н.



О.А. Сьомін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Перспективним напрямком розвитку методів і приладів контролю та діагностування технічного стану радіонавігаційних комплексів (РНК) засобів водного транспорту на етапі експлуатації є їх автоматизація та універсалізація. Це реалізується в проектуванні й виробництві обчислювальних приладів контролю та діагностування, вимірювальних інформаційних систем, оснащених сучасною мікропроцесорною технікою, пристроями спряження з персональним комп'ютером, зручним програмним забезпеченням користувача тощо.

Результати контролю та діагностування технічного стану РНК засобів водного транспорту є базою для прийняття рішень про необхідність проведення відповідних заходів технічного обслуговування, визначення обсягу та часу їх реалізації, строки здійснення чергових операцій контролю.

Актуальність дослідження, проведеного в дисертаційній роботі, зумовлена:

- зростанням ролі та значення приладів контролю сучасних і перспективних РНК засобів водного транспорту в підтриманні їх готовності до функціонування за призначенням;

- загальною тенденцією підвищення вимог до своєчасного виявлення відмов за рахунок автоматизації (підвищення точності та оперативності контролю) контрольно-діагностичних робіт при експлуатації РНК засобів водного транспорту;

- необхідністю розробки сучасного науково-методичного апарату щодо підвищення достовірності контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту на етапі експлуатації;

- недостатнім вивченням питань контролю поточного технічного стану РНК засобів водного транспорту на етапі експлуатації.

Заходи технічного обслуговування РНК засобів водного транспорту на етапі експлуатації здійснюються з використанням багатьох приладів контролю. Причому кожний тип приладів контролю, у свою чергу, також потребує своєчасного проведення перевірки або калібрування. Окрему ланку серед таких приладів займають радіовимірювальні пристрої, які, на відміну від інших типів (електричних, лінійно-кутових, теплотехнічних величин тощо), є складнішими і мають більшу кількість нормованих метрологічних характеристик. Останнє призводить до зростання трудомісткості та часу, відведеного на їх перевірку (калібрування), а отже, до зниження коефіцієнта використання як приладів контролю зокрема, так і РНК засобів водного транспорту в цілому. Крім того, при проведенні контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту процес автоматизації обмежується використанням тестових сигналів прямокутної, трикутної та трапецеїдальної форм. Ці сигнали передбачають використання аналізаторів для визначення параметрів РНК засобів водного транспорту, які потребують обов'язкового втручання оператора. Відсутність автоматизованих високоточних приладів контролю для вимірювання параметрів сигналів прямокутної, трикутної та трапецеїдальної форм

(присутність оператора) збільшує час і зменшує достовірність контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту.

При цьому виникає відоме в практиці контролю технічного стану складних систем *протиріччя*: забезпечення заданої достовірності та оперативності отримання інформації про технічний стан РНК засобів водного транспорту потребує збільшення обсягу та точності вимірювань при оцінюванні їх характеристик з одного боку, а з іншого – відсутність методів автоматизації процесів контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту.

У відповідності до протиріччя *наукова проблема*, що розв'язується в дисертації, полягає в розробці методів синтезу тестових сигналів і обробці відгуків на них для підвищення достовірності та оперативності контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту.

Подолання зазначеного протиріччя для розв'язання сформульованої наукової проблеми полягає в розробці комплексу заходів, спрямованих на забезпечення потрібної точності вимірювань параметрів РНК засобів водного транспорту при проведенні контролю їх технічного стану за фіксований або зменшений інтервал часу. З цією метою в сучасних приладах контролю широко застосовуються такі технічні рішення, як автоматизація вимірювальних операцій; модульний принцип побудови та наявність стандартного інтерфейсу, що забезпечує можливість роботи приладів контролю в складі інформаційно-вимірювальних систем; впровадження мікропроцесорної техніки, яка дозволяє проводити діагностику та самоконтроль основних вузлів приладів контролю, самокалібрування, введення поправок тощо.

Традиційним для визначення частотних характеристик РНК засобів водного транспорту є застосування генераторів синусоїдних коливань. Проте такий підхід потребує значної трудомісткості вимірювань і знижує оперативність контролю технічного стану через необхідність послідовно задавати на генераторі контрольні частоти. Крім того, для збільшення коефіцієнта завадостійкості РНК застосовують інерційні блоки (елементи), що збільшує час на проведення контролю. Уникнути цього недоліку можливо за рахунок використання тестових сигналів з нормованим спектром, які є сумою певної кількості корисних гармонік – складних тестових сигналів.

Провідними закордонними фахівцями в цій галузі, зокрема, К. ван Схонвелдом, Е. ван дер Оудером, А. Томпсоном, І. Колларом, Т. Уілсоном, 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 та ін. розроблено низку робіт, які доводять можливість використання складних тестових сигналів, окрім періодичних синусоїдних і прямокутних, для контролю технічного стану складних систем. Проте лише оглядово розглянуто методи синтезу тестових сигналів складної форми для контролю технічного стану радіотехнічних систем. Це пов'язано з відсутністю на той час технічної можливості створити відповідні моделі для перевірки синтезованих сигналів складної форми. Тому існує проблема розробки методів синтезу тестових сигналів для автоматизованого контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту із більш високими характеристиками, що в цілому забезпечить

підвищення ефективності обслуговування та виявлення відмов; проводити діагностування технічного стану РНК засобів водного транспорту під час експлуатації.

Таким чином, *тема дисертаційної роботи*, яка направлена на розробку теоретичних основ автоматизації контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту, є *своєчасною та актуальною*.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, темами.** Вибраний автором напрямок дослідження тісно пов'язаний з положеннями Морської доктрини України на період до 2035 року, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 07 жовтня 2009 року № 1307; здійснюється згідно з Галузевою програмою забезпечення безпеки судноплавства на 2014-2018 роки, затвердженої наказом Міністерства інфраструктури України від 26.06.2013 року №426; виконаний у рамках Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 року № 430-р.

Дисертаційна робота виконана в 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 в Київській державній академії водного транспорту ім. гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного (Державний університет інфраструктури та технологій).

**Мета та завдання дослідження.** *Мета дослідження* – підвищення достовірності та оперативності контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту за рахунок розробки методів синтезу та обробки тестових сигналів складної форми.

Для досягнення мети дослідження необхідно розв'язати наступні часткові наукові завдання.

1. Провести аналіз відомих методів синтезу тестових сигналів для контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту.

2. Удосконалити метод обґрунтування критеріїв (кількісних оцінок) оптимальності синтезу тестових сигналів для автоматичного контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту.

3. Розробити методи синтезу тестових сигналів для контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту, які працюють при пасивній і активній радіонавігації.

4. Удосконалити метод обробки відгуку тестового сигналу (вихідного сигналу) РНК засобів водного транспорту.

5. Удосконалити метод визначення технічного стану РНК засобів водного транспорту при їх автоматичному контролі.

6. Розробити метод синтезу тестових сигналів з потрібним спектром для контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту.

7. Провести перевірку отриманих теоретичних результатів і розробити рекомендації щодо їх впровадження для автоматичного контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту.

*Об'єкт дослідження* – процес контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту.

*Предмет дослідження* – методи синтезу та обробки тестових сигналів для контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту.

**Методи дослідження.** Методологічною основою дисертаційного дослідження є системний підхід при розробленні теоретичних основ синтезу тестових сигналів і обробки відгуків на них. Для розв'язання поставлених часткових завдань у дисертації використані теорія чутливості динамічних систем, теорія контролю технічних систем, методи варіаційного числення, теорія оптимізації функцій і теорія матриць, методи математичного моделювання.

При проведенні аналізу відомих методів синтезу тестових сигналів для контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту використовується теорія системного аналізу. Для вдосконалення методу обґрунтування критеріїв (кількісних оцінок) оптимальності синтезу тестових сигналів для автоматичного контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту використано теорію чутливості динамічних систем, теорію контролю технічних систем. Розробка методів синтезу тестових сигналів для контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту, які працюють при пасивній та активній радіонавігації, проводилася з використанням методів варіаційного числення та динамічного програмування. Удосконалення методу обробки вихідного сигналу та визначення технічного стану РНК засобів водного транспорту проводилось із застосуванням теорії оптимізації функцій і теорії матриць. Використання методу оптимізації функції Лагранжа дозволило вдосконалити метод синтезу тестових сигналів з потрібним спектром. Проведено експериментальну перевірку отриманих теоретичних результатів на основі методів математичного моделювання.

**Наукова новизна отриманих у дисертації результатів** полягає в наступному.

1. Отримав подальший розвиток метод обґрунтування критеріїв оптимальності синтезу вимірювальних сигналів, який відрізняється від відомих запропонованою реалізацією умовної апостеріорної функції розподілу параметрів контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту та дозволяє автоматизувати наявні процедури контролю їх технічного стану за рахунок врахування радіоелектронних завад.

2. Вперше отримано методи синтезу вхідних тестових сигналів, які дозволяють підвищити ефективність контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту за рахунок використання методів варіаційного числення і застосування в умовах пасивної та активної радіонавігації.

3. Отримали подальший розвиток методи обробки відгуку тестового сигналу для РНК засобів водного транспорту, які відрізняються від існуючих урахуванням характеристик розробленої апостеріорної функції розподілу параметрів контролю і вхідних вимірювальних сигналів та дозволяють автоматизувати процес визначення технічного стану РНК.

4. Отримав подальший розвиток метод синтезу тестових сигналів з потрібним спектром з використанням функції Лагранжа, який відрізняється від відомих оптимальним формуванням спектрального складу тестового сигналу та дозволяє забезпечити ефективний контроль технічного стану РНК засобів водного транспорту.

5. Отримав подальший розвиток метод визначення похибок координат засобів водного транспорту залежно від технічного стану РНК, який, на відміну від відомих, враховує функції втрат від помилок у визначенні маршруту руху і дозволяє оптимізувати час контролю при необхідному рівні достовірності та спростити процедуру для автоматичного контролю технічного стану РНК.

**Практичне значення результатів дисертаційної роботи.** Запропоновані у роботі методи синтезу та обробки, а також алгоритми роботи калібраторів (мір) і аналізаторів розроблених тестових сигналів рекомендовано застосовувати при створенні автоматичних приладів для контролю технічного стану радіонавігаційних комплексів засобів водного транспорту. Це дозволяє скоротити витрати часу на проведення заходів з технічного обслуговування та підвищити його якість.

Показано, що автоматизація процедур контролю технічного стану за рахунок розроблених методів синтезу тестових сигналів та обробки відгуків дозволяє підвищити достовірність контролю технічного стану радіонавігаційних комплексів засобів водного транспорту до (10...15)% при незначному часі контролю та до (5...10)% при значному часі контролю; вигреш за оперативністю контролю складає до 40% при незначному часі контролю та до 20% при підвищенні часу контролю.

**Впровадження отриманих результатів.** Основні результати дослідження були впроваджені в Комітеті з питань транспорту Верховної Ради України, ПрАТ «Дунайсудноремонт», ДП «Ізмаїльський морський торговельний порт», ТОВ «Учбово-тренажерний центр «Альфа-трейнінг», Державному університеті інфраструктури та технологій.

**Особистий внесок здобувача.** Нові наукові результати дисертації отримані здобувачем особисто. В основних наукових роботах, які написані в співавторстві, здобувачу належать: [1] – результати аналізу методів синтезу вимірювальних сигналів для контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту; [2] – пропозиції щодо використання сигналів складної форми для контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту; [3] – теоретичні напрацювання щодо синтезу сигналів складної форми для контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту; [4] – пропозиції щодо автоматизації процесу визначення маршруту судна; [5] – метод синтезу вимірювального сигналу з будь-якою кількістю точок перемикавання; [6] – метод синтезу сигналів складної форми; [9] – результати аналізу методів формування вимірювальних сигналів для контролю систем навігації засобів водного транспорту; [10] – схема автомата контролю систем навігації засобів водного транспорту; [11] – принципи побудови автоматичних приладів для контролю параметрів систем управління та навігації засобів водного транспорту; [16] – метод синтезу складних сигналів з нормованим спектром; [17] – метод експертного

визначення уступки між вартістю та ефективністю системи навігації та управління рухом; [18] – результати аналізу методів прогнозування технічного стану суднового обладнання; [19] – обґрунтовані особливості організації процесу експлуатації засобів водного транспорту; [20] – обґрунтовані особливості застосування пасивних радіотехнічних комплексів для вирішення задач контролю водних акваторій; [21] – теоретично обґрунтовані критерії оптимальності технічного обслуговування суднових комплексів; [22] – обґрунтування застосування сигналів з нормованим спектром для контролю технічного стану радіонавігаційних приладів засобів водного транспорту; [23] – обґрунтовані пропозиції щодо вдосконалення методів оцінки ефективності системи контролю технічного стану радіотехнічних систем засобів водного транспорту; [24] – метод синтезу тестового сигналу з використанням функції Лагранжа; [25] – дослідження методу тестового синтезу сигналу складної форми; [26] – методи обробки радіолокаційної інформації; [27] – особливості вантажних перевезень на етапі експлуатації; [28] – розрахунки динамічного навантаження за представленими розрахунками; [29] – результати дослідження пасивної доплерівської навігаційної системи. Наукові роботи [7], [8], [12], [13], [14], [15] написані самостійно, без співавторів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися та були схвалені на 11 науково-технічних конференціях, форумах та семінарах, у тому числі міжнародних: X Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатизації», м. Київ (12-13 квітня 2018 року) [30]; XXII Всеукраїнській науково-практичній конференції «Теорія та практика створення, розвитку і застосування високотехнологічних систем спеціального призначення з урахуванням досвіду антитерористичної операції», м. Житомир (26-27 квітня 2018) [31]; науково-практичній конференції «Стандартизація, сертифікація, метрологія та менеджмент», м. Київ (25-29 квітня 2016) [32]; Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційна безпека та інформаційні технології», м. Харків (24-25 квітня 2019 року) [33]; Міжнародній науково-практичній конференції «Водний транспорт: сучасний стан та перспективи розвитку», м. Київ (16-17 травня 2019 року) [34]; IX Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління», м. Харків (11-12 квітня 2019 року) [35]; науково-технічній конференції «Інноваційні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу», м. Київ (24-25 квітня 2018 року) [36]; XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми водного транспорту», м. Баку, Азербайджан, (02-03 травня 2019 року) [37]; Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ», м. Львів (16-17 травня 2019 року) [38]; XV Міжнародній науковій конференції «Новітні технології – для захисту повітряного простору», м. Харків (10-11 квітня 2019 року) [39]; XVI науковому семінарі «Невизначеність вимірювань: наукові, нормативні, прикладні та методичні аспекти», м. Созополь, Болгарія, (06-08 березня 2019 року) [40].

**Публікації результатів дисертації.** Основні наукові результати дисертації опубліковано у 29 наукових статтях: 1 стаття у вигляді розділу

колективної монографії, 24 статті ( 6 з яких написано одноосібно) у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України в галузі технічних наук та до міжнародних наукометричних баз даних, 4 статті у журналах, що входять до наукометричної бази даних Scopus.

Крім того, за матеріалами дисертації опубліковано 11 тез доповідей на конференціях. Матеріали дослідження увійшли до звіту про науково-дослідну роботу «Розробка комплексного показника якості пасажирських круїзних суден змішаного плавання в системі безпересадкових круїзних перевезень між портами Дніпра, Чорного моря та Дунаю» (номер держреєстрації 0116U03946).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків; викладена на 338 сторінках друкованого тексту та містить 275 сторінок основного тексту, 48 рисунків, 2 таблиці, список використаних джерел з 222 найменувань на 22 аркушах, 4 додатки на 18 аркушах.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дослідження, сформульовано мету та наукову проблему дисертації, показано зв'язок роботи з науковими темами та програмами, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено інформацію щодо кількості публікацій, апробацію та впровадження основних результатів дослідження, виділено особистий внесок здобувачки в опублікованих працях зі співавторами.

У **першому розділі** проведено аналіз методів і способів формування тестових сигналів для контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту. Результати такого аналізу дозволили визначити недоліки та обґрунтувати проблему контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту при обслуговуванні за фактичним станом.

Призначенням навігаційної системи або комплексу навігаційних систем на засобах водного транспорту є вироблення в результаті проведення вихідних вимірювань і їх подальшої обробки вектора навігаційних параметрів, що використовується в подальшому в системах управління рухом, забезпечення безпеки плавання тощо.

Вироблення навігаційних параметрів у РНК засобів водного транспорту ґрунтується на обробці радіотехнічних сигналів від датчиків первинної інформації (вимірювачів швидкості та курсу, прискорення та кутів, які задають положення гіроскопів) і в припущенні відсутності похибок цих датчиків, що забезпечує безпомилкове вироблення навігаційних параметрів.

Сьогодні на засобах водного транспорту застосовуються інтегровані навігаційні системи (Integrated Navigation System), які комплексно використовують інформацію декількох навігаційних датчиків. Інтегровані навігаційні системи засобів водного транспорту, як правило, складаються з наступних датчиків (джерел інформації): пристрій електронного визначення місця, показчик курсу, лаг, радіолокаційна станція, картографічна база даних. Інтегровані навігаційні системи засобів водного транспорту призначені для: планування маршруту, моніторингу плавання за маршрутом, попередження

зіткнень, забезпечення даними для управління судном, управління попередженнями, визначення навігаційного статусу та відображення даних.

Основним елементом РНК засобів водного транспорту є радіотехнічні системи (РТС). Розглянуто результати аналізу існуючих методів і засобів формування тестових сигналів для контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту на прикладі РТС.

Враховуючи характер корисних і негативних впливів на справну РТС, можна правильно вибрати їх динамічні якості для отримання необхідних вихідних реакцій. Цей висновок покладено в основу принципу контролю технічного стану РТС – знаючи характеристики вхідних і вихідних сигналів РТС, можливо оцінити їх технічний стан. На рисунку 1 зображено існуючу (неавтоматизовану) і запропоновану (автоматизовану) схеми проведення контролю технічного стану РТС, де блок автоматизації виділено пунктиром.

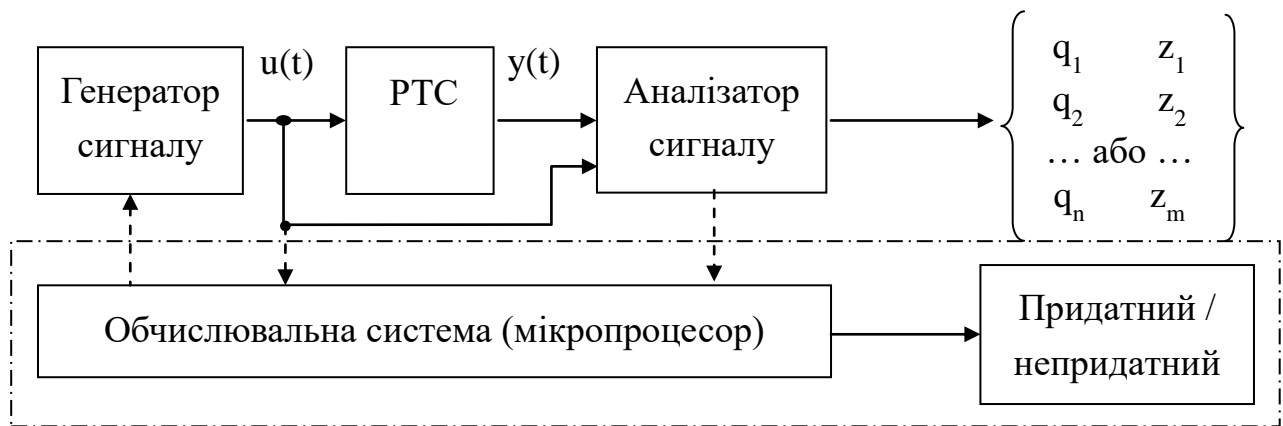


Рисунок 1 – Структурна схема проведення контролю РТС

Контроль технічного стану РТС визначається за результатами дослідження відгуку  $y(t)$  на вхідний сигнал, зазвичай напруги,  $u(t)$ . Існуюча схема контролю передбачає визначення параметрів контролю технічного стану РТС  $q_n$  або узагальнених параметрів  $z_m = f(q_n)$ . Відмінністю запропонованої схеми контролю є можливість автоматизації. Автоматизація контролю технічного стану РТС передбачає розробку алгоритмів генерування (синтезу) потрібних тестових сигналів (впливів) та алгоритмів обробки відгуків на тестові сигнали для оцінки технічного стану.

В основу дослідження впливу типу тестового сигналу на якість контролю технічного стану РТС покладено основне завдання теорії чутливості – аналіз додаткового руху, викликаного варіацією параметрів контролю. За прями оцінки чутливості прийнято використання функцій чутливості  $u(t, q_j)$ ,  $j = \overline{1, n}$ , що відіграють значну роль у кількісній оцінці ступеня впливу варіації параметрів контролю  $q_j$  на динамічні якості  $W$  об'єкта контролю (ОК):

$$S_{q_j}^W = \frac{\partial W/W}{\partial q_j/q_j} = \frac{\partial \ln W}{\partial \ln q_j}. \quad (1)$$

Зміна параметра контролю  $q_0$  на величину  $\Delta q_0$  приводить до зміни рівняння, яке характеризує функціонування РТС:

$$F(\ddot{u}, \dot{u}, u, t, q_0 + \Delta q) = 0 \quad (2)$$

і його розв'язок  $u = u(t, q_0 + \Delta q)$ , що описує варіаційний рух.

Різниця  $u = u(t, q_0 + \Delta q) - u(t, q_0)$  характеризує додатковий рух. Границя відношення цієї різниці

$$\lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{u(t, q_0 + \Delta q) - u(t, q_0)}{\Delta q} = \frac{\partial u(t, q_0)}{\partial q_0} = u(t, q_0) \quad (3)$$

є функцією чутливості  $u(t, q_0)$  технічного стану РТС на зміну параметрів контролю.

У роботі показано, що нелінійні системи, представлені аналогічними співвідношеннями, є системами, що приводяться до лінійних.

Проведено аналіз методів синтезу тестових сигналів для контролю технічного стану РТС. Зазвичай використовуються часові та частотні методи синтезу тестових сигналів. Поширення зазначених методів зумовлено простою технічною реалізацією тестових сигналів синусоїдної та прямокутної форм. На рисунках 2 і 3 наведено функціональні схеми проведення контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту за допомогою синусоїдних і прямокутних сигналів відповідно, де  $h(t)$  – вагова (імпульсна) функція об'єкта контролю.

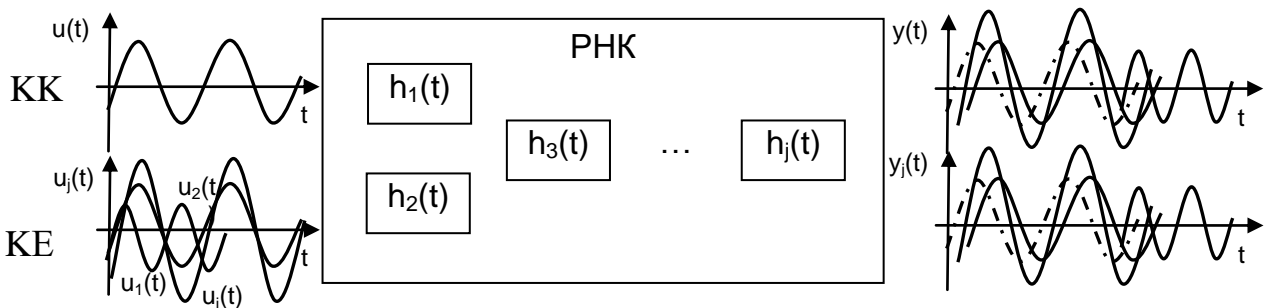


Рисунок 2 – Функціональна схема проведення контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту синусоїдним сигналом: для комплексного контролю (КК) і контролю за елементами (КЕ)

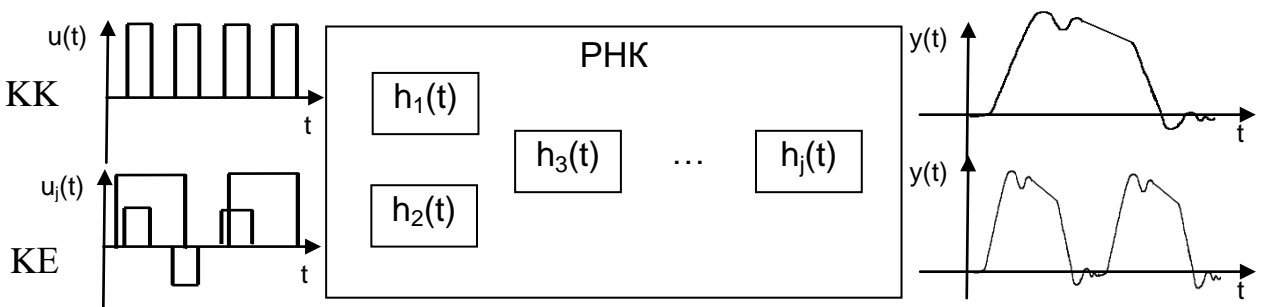


Рисунок 3 – Функціональна схема проведення контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту прямокутним сигналом: для комплексного контролю (КК) і контролю за елементами (КЕ)

Після проходження через РНК синусоїдний вхідний сигнал  $u(t)$  змінює амплітуду, фазу або частоту (рис. 2), а прямокутний – форму (рис. 3), що дозволяє визначити параметри контролю РНК. Але такі сигнали мають певні недоліки. Крім того, головним недоліком частотних і часових методів є обмеження у використанні в автоматизованих приладах контролю через їх низьку точність та завадозахищеність, складність технічної реалізації.

Подання потрібного тестового сигналу з певними характеристиками (складного сигналу) на РНК для його автоматизованого контролю, порівняно з часовими та частотними методами вимірювань, має такі переваги:

- підвищення якості, завадозахищеності та оперативності вимірювальних операцій при обслуговуванні;
- збільшення термінів безвідмовної роботи приладів за рахунок високої технологічності виготовлення мір фізичних величин;
- можливість створення універсальних вимірювальних інформаційних систем, побудованих за модульним принципом з оснащенням їх пристроями сполучення з комп'ютером та зручним програмним забезпеченням;
- використання самокалібрування та самодіагностики основних вимірювальних вузлів засобів вимірювальної техніки (каналів вимірювально-інформаційних систем), що дозволяє зменшити похибки вимірювань, своєчасно виявляти відмови та виходи характеристик за границі встановлених норм;
- зменшення вагогабаритних характеристик і енергоспоживання вимірювальної апаратури.

Функціональна схема проведення контролю технічного стану РНК за допомогою запропонованого складного сигналу вигляду

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} U_{i \max} \sin(i\omega t + \varphi_i) \text{ представлена на рисунку 4.}$$

Калібратори зразкових сигналів можна застосовувати не тільки в стаціонарних умовах лабораторій, а також як автономні прилади або вбудовані у засоби контролю.

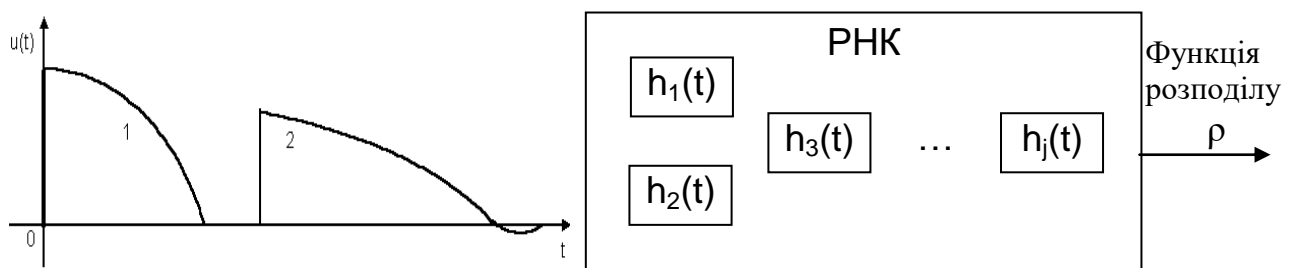


Рисунок 4 – Функціональна схема проведення контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту запропонованим складним сигналом

До основних переваг використання калібраторів складних сигналів слід також віднести можливість створення мобільних повірочних комплексів, здатних працювати як у лабораторних умовах, так і на виїзді. Це сприяє

значному скороченню часу на проведення обслуговування та є одним з основних заходів з підвищення оперативності проведення контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту та, відповідно, збільшення коефіцієнта їх використання.

Удосконаленню показників ефективності контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту присвячено **другий розділ** роботи.

РТС, що входять до складу РНК засобів водного транспорту, призначені для перетворення вхідного тестового сигналу  $u(t)$  у вихідний сигнал  $y(t)$ . У загальному випадку може бути кілька паралельних вхідних і вихідних сигналів, тому маємо вектори вхідних і вихідних сигналів. Якість перетворення описується оператором системи  $\Phi(\{u\})$  і це перетворення можна записати у вигляді  $y = \Phi(\{u\})$ .

Для лінійних об'єктів контролю (ОК) із зосередженими параметрами оператор  $\Phi(\{u\})$  залежить від їх кінцевої кількості. Якщо  $G(p)$  – лапласівське зображення передатної функції ОК, тоді

$$G(p) = \frac{\sum_{i=1}^m b_i p^i}{\sum_{j=1}^n a_j p^j}, \quad (4)$$

де  $a_j, b_i$  – коефіцієнти,  $j = \overline{1, n}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ;  $m, n$  – кількість параметрів контролю вихідного та вхідного тестового сигналу відповідно, то за такі параметри можна взяти, наприклад, коефіцієнти  $a_j$  та  $b_i$  або їх комбінації (коефіцієнт підсилення, постійні часу та затухання, власні частоти), а для електричних систем – активний опір, індуктивність або ємність.

Оператор нелінійного ОК не визначається кінцевою кількістю параметрів. Але з відомим ступенем точності його завжди можна апроксимувати оператором (у загальному випадку нелінійним), але залежним від кінцевої кількості параметрів. Так, наприклад, якщо ОК вміщує ланки типу елементів з насиченням, то, представивши характеристику такої ланки на окремих ділянках відповідною функцією апроксимації (відрідками прямих, арктангенсом, гіперболічним тангенсом тощо), можна за параметри контролю взяти параметри цих апроксимуючих функцій.

Позначимо параметри контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту вектором  $q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ ,  $j = \overline{1, n}$ , таким чином, що оператор системи контролю  $\Phi(\{u\})$  буде функцією цих параметрів:  $\Phi(\{u\}) = \Phi(q_1, q_2, \dots, q_n)$ . Значення параметрів  $q_j$  є випадковими величинами, які в процесі зберігання та експлуатації ОК можуть змінюватися. Вважаємо в процесі контролю ці параметри незмінними, тому що час контрольних операцій, як правило, значно менший часу зміни параметрів.

Технічний стан РНК засобів водного транспорту визначається вектором параметрів  $q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ . Якщо відома апріорна функція розподілу параметрів (щільність розподілу якої  $\rho_1$ ) або дисперсія параметрів і кореляційні зв'язки між ними, то відома й апріорна область, в якій знаходиться вектор

$q$  – апіорна область «відхилень» параметрів контролю комплексу (рис. 5). Чим меншою є апіорна інформація про ОК, тим ширшою є ця область «відхилення». Інформація, отримана за результатами контролю, уточнює функцію розподілу параметрів  $q_j$  – апостеріорна область  $\rho_2$  (рис. 5). Але за рахунок наявності помилок першого та другого роду достовірність контролю знижується.

Чим точнішим та повнішим є проведений контроль (отримано більше інформації про ОК), тим вузьчою є апостеріорна область. Тому основою запропонованого методу обґрунтування критеріїв оптимальності синтезу складних тестових сигналів є розрахована апостеріорна область  $\rho_3$ .



Рисунок 5 – Область відхилення параметрів контролю РНК

Часто метою контролю є визначення не самих параметрів  $q_j$ , а якоїсь функції від цих параметрів  $Z = f(q_1, q_2, \dots, q_n)$ , тобто визначення технічного стану ОК за узагальненим параметром. Хоча функція  $Z$  (при  $m < n$ ) несе меншу інформацію про ОК, ніж повний набір величин  $q_j$ , однак у більшості випадків вдалий вибір відносно невеликої кількості параметрів  $z_i$ ,  $i = \overline{1, m}$ , вважається достатнім для порівняно повної оцінки якості ОК, а, з іншого боку, може істотно спростити контроль. Іноді параметри  $z_i$  можуть співпадати з  $q_j$ . Отже,

вихідний сигнал  $y(t)$  є функцією від параметрів контролю  $q_j$  і функціоналом від вхідного тестового сигналу  $u(t)$ :  $y = y_0(\{u\}, q, t)$ . На цей вихідний сигнал накладаються завади  $\xi(t)$ , що виникають через похибки генератора, різного роду зовнішні завади, наводки і похибки засобів вимірювання. Ці завади з відомим ступенем точності можна вважати адитивними. Тоді вихідний сигнал можна записати так:

$$y(t) = y_0(\{u\}, q, t) + \xi(t). \quad (5)$$

До завади віднесено також складові вихідного сигналу, зумовлені відхиленням від номінальних значень тих параметрів, які не підлягають визначенню в результаті контролю. З цього погляду складова вихідного сигналу, обумовлена відхиленням від номінальних значень параметрів, які підлягають визначенню, є корисним сигналом.

Задача синтезу вхідного складного тестового сигналу під час контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту набуває сенсу тільки при врахуванні названих завад. Інакше, за відсутністю завад, для визначення  $n$  параметрів контролю ОК  $\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$  достатньо провести вимірювання

значень вихідного сигналу  $y(t)$  в точках  $\{t_1, t_2, \dots, t_s\}$ , де  $s$  – кількість моментів відліку (точок дискретизації), і розв'язати систему рівнянь (5), складену для моментів часу  $\{t_1, t_2, \dots, t_s\}$  відносно параметрів  $\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ .

Розрахована умовна функція розподілу параметрів контролю РНК:

$$\rho(z/y) = (2\pi)^{-m/2} |\det H|^{-1/2} \exp\left\{-\frac{1}{2} (vH^{-1}v)\right\}, \quad (6)$$

де  $v = \Delta z - \Delta z^0$  – відхилення від центру розподілу функції  $\rho(z/y)$ ;  $\Delta z^0$  – центр розподілу функції  $\rho(z/y)$ ;

$$H = E - \alpha \left[ E - \sigma_\xi^2 (a^T \cdot a + \sigma_\xi^2 E)^{-1} \right] = \sigma_\xi^2 \alpha (a^T \cdot a + \sigma_\xi^2 E)^{-1} \alpha^T, \quad (7)$$

де  $E$  – одинична функція;  $\sigma_\xi^2$  – дисперсія завади;  $\alpha = [\alpha_{ij}] = \left( \frac{\partial z_i}{\partial q_j} \right) \Big|_{q_j = q_{j0}}$ .

З використанням виразів (6) і (7) отримано критерії синтезу тестових сигналів для різних процедур контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту: забезпечення точності, інформативності, чутливості контролю.

Нехай  $\tilde{R}_y = a^T \cdot a + \sigma_\xi^2 E$ , тоді матриця  $H$  є матрицею  $\tilde{R}_y^{-1}$ , яка спроектована з простору векторів  $q$  розмірності  $n$  у простір векторів  $z$  розмірності  $m$ . Марковано власне значення матриці  $\tilde{R}_y^{-1}$  в підпросторі векторів  $z$  через  $\lambda_i^{-1}$ ,  $i = \overline{1, m}$ . Як відомо,  $\text{Sp}$  матриці дорівнює сумі її власних значень. Для критерію точності (мінімальної похибки вимірювання параметрів контролю) отримано співвідношення:

$$\varepsilon_{\min} = \sigma_\xi^2 \sum_{i=1}^m \frac{1}{\lambda_i}. \quad (8)$$

Критерій  $\varepsilon_{\min}$  являє собою апостеріорне середньоквадратичне значення похибки, яка зведена до мінімуму за всіма можливими оцінкам  $z_i^*$  параметрів  $z_i$ . Матриця коефіцієнтів  $a$  згідно з виразом (4) залежить від параметрів контролю, часу контролю та вхідного впливу:  $a = \{a_{kj}\} = a_j(t_k, q_0, \{u\})$ . Після мінімізації величина  $\varepsilon_{\min}$  залежить від величини дисперсії завади або похибки вимірювання  $\sigma_\xi^2$ , від часу спостереження вихідного сигналу  $T$  (або від кількості його відліків  $s$ ) і від величини та форми вхідного сигналу  $u(t)$ . Тоді задача оптимізації процедури (методики) контролю за точністю полягає у знаходженні такого оптимального тестового сигналу  $u_{\text{опт}}(t)$ , який забезпечує мінімум похибки контролю, тобто знаходження  $\min_{\{u\}} \varepsilon(\{u\})$  у класі можливих вхідних сигналів  $u(t)$ :

$$\varepsilon_{\min}(\{u\}) = \min_{\{u\}} \varepsilon(\{u\}). \quad (9)$$

Оскільки функція  $\varepsilon(\{u\})$  є монотонно спадною функцією часу спостереження  $T$  або кількості відліків  $s$ , то розв'язання поставленої задачі визначає також вхідний сигнал  $u_{\text{опт}}(t)$ , який забезпечує мінімальний час контролю або кількість відліків  $s$  при заданій точності контролю.

У практиці контролю (вимірювання) параметрів ОК інформаційні оцінки отримали широке поширення. Згідно з теорією інформації контроль призводить до зменшення міри невизначеності в значеннях параметрів системи порівняно з невизначеністю значень цих параметрів до контролю.

Отримано, що величина інформації про технічний стан ОК  $I(z/y)$  дорівнює:

$$I(z, y) = \frac{1}{2} \ln(\lambda_1, \dots, \lambda_m) + m \ln \sigma_\xi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \ln \lambda_i + m \ln \sigma_\xi. \quad (10)$$

Оскільки власні значення матриці є інваріантами, тобто не залежать від вибору системи ортонормованих параметрів  $q_j$  і  $z_i$ , то інваріантом буде й величина інформації  $I(z/y)$ . Геометричний зміст величини  $I(z/y)$ : ця величина пропорційна логарифму об'єму еліпсоїду, який породжено матрицею  $H$  у підпросторі  $Z$ , тобто об'єму апостеріорної області невизначеності параметрів  $z_i$ .

Оптимізація процедури (методики) контролю з інформаційної точки зору полягає, таким чином, у знаходженні вхідного сигналу  $u_{\text{опт}}(t)$ , який при заданому рівні завади  $\sigma_\xi^2$  і заданому часі спостереження  $T$  (або кількості відліків  $s$ ) відгуку забезпечував би максимальне значення величини  $I(z/y)$ .

Ця функція оптимізації  $u_{\text{опт}}(t)$  має задовольняти співвідношенню:

$$I(z, y; \{u_{\text{опт}}\}) = \max_{\{u\}} I(z, y; \{u\}). \quad (11)$$

За міру чутливості при відомому рівні завади використано величину  $S$ , яка дорівнює:

$$S = \text{Sp} \left[ \frac{1}{\alpha} \tilde{R}_y \left( \frac{1}{\alpha} \right)^T \right]. \quad (12)$$

Задача оптимізації процедури (методики) контролю за чутливістю може бути сформульована наступним чином: при заданій тривалості контролю  $T$  або кількості відліків вихідного сигналу  $s$  знайти такий оптимальний тестовий сигнал  $u_{\text{опт}}(t)$ , при якому величина чутливості  $S$  найбільша (максимальна):

$$S(\{u_{\text{опт}}\}) = \max_{\{u\}} S(\{u\}). \quad (13)$$

Показано взаємозв'язок між запропонованими критеріями синтезу вхідних тестових сигналів. Доведено, що метод синтезу складного тестового сигналу, який заснований на максимальній чутливості, одночасно буде призводити до мінімальної похибки та максимальної кількості інформації про технічний стан РНК засобів водного транспорту, що контролюються.

Розроблений метод обґрунтування критеріїв синтезу тестових сигналів дозволяє запропонувати задачу синтезу вхідних сигналів: знайти такий вхідний складний тестовий сигнал  $u(t)$ , при якому за час контролю  $T$  функція апіорної щільності розподілу параметрів контролю  $\rho$  переходить з початкового стану  $\rho_1$  у той, при якому  $\rho \rightarrow \min$ , тобто в запропонований стан  $\rho_3$  (рис. 5):

$$\rho[u(t)] = F(\rho_1; \rho_3; u(t); t) \Big|_T \rightarrow \min_{\{u\}} \rho[u(t)]. \quad (14)$$

Отримані співвідношення (9), (11) – (14) є базовими в удосконаленому методі обґрунтування критеріїв оптимальності синтезу тестових сигналів.

**У третьому розділі** запропоновано використання методів варіаційного числення та динамічного програмування при синтезі вхідного тестового сигналу для автоматичного контролю технічного стану РНК.

Синтез тестового сигналу для контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту полягає у визначенні такого вхідного сигналу  $u(t)$ , при

якому функціонал чутливості  $S = \int \sum_{i=1}^m b_i^2(t, \{u\}) dt$  приймає максимальне

значення, де  $b_i(t, \{u\}) = \sum_{j=1}^n \frac{1}{\alpha_{ij}} a_j(t, \{u\})$ ;  $a_j(t, \{u\}) = \left. \frac{\partial y(t, \{u\})}{\partial q_j} \right|_{q_j=q_{jn}}$ .

Розглянуто рівняння, яке описує динаміку РНК засобів водного транспорту як ОК:

$$\dot{X}_\alpha = f_\alpha(y(u, t), t, q_j); \alpha = \overline{1, g}; j = \overline{1, n}, \quad (15)$$

де  $y(u, t)$  – вихідний сигнал РНК засобів водного транспорту, який залежить від синтезованого вхідного сигналу  $u(t)$ ;  $g$  – порядок диференціального рівняння, яке описує зразок РНК засобів водного транспорту.

Для визначення точки на границі області інтегрального обмеження  $\int_0^T [u(t)]^2 dt \leq E_c$  при максимально допустимому рівні тестового сигналу за

потужністю  $E_c$ , в якій функціонал  $S$  має екстремум, складено функціонал

$\Psi = S - \lambda \int_0^T u^2 dt$  і прирівняно нулю варіацію цього функціоналу. За такої умови

для визначення вхідного сигналу  $u(t)$  отримаємо інтегральне рівняння:

$$\int_0^T k(\tau, \tau') u(\tau') d\tau' = \lambda u(\tau). \quad (16)$$

На границі області інтегрального обмеження  $\int_0^T [u(t)]^2 dt = E_c = \text{const}$ , тому

в точці  $k$   $S(\{u_k\}) = \lambda_k E_c$ . Нехай максимальне власне значення рівняння (16) дорівнює  $\lambda_0$ . Тобто, оптимальним тестовим сигналом є функція

$$u_{\text{опт}}(\tau) = \varphi_0(\tau) \cdot \text{const} , \quad (17)$$

де  $\varphi_0(\tau)$  є розв'язок рівняння (16), що забезпечує максимальне значення  $\lambda_0$ .

При цьому максимальне значення величини  $S$  буде дорівнювати:

$$S_{\text{max}} = \lambda_0 E_c . \quad (18)$$

У випадку обмежень оптимальний тестовий сигнал визначається так:

$$u_{\text{опт}}(t) = \int_0^T h_i^{-1}(t, \tau) \varphi_0(\tau) d\tau , \quad (19)$$

при цьому  $\varphi_0(\tau)$  є розв'язком рівняння (17), який відповідає максимальному власному значенню  $\lambda_0$  цього рівняння, а максимум  $S$  згідно виразу (18).

Метод динамічного програмування застосовується в задачах про визначення впливу завод на організацію оптимального управління. У математичній постановці задачі визначення оптимального управління полягає в знаходженні такої функції  $u(t)$  у класі допустимих функцій, для яких

функціонал  $\Psi = \int_0^T \psi(x_\alpha, u, t) dt$  має мінімальне значення. «Координати»  $x_\alpha$

зв'язані з сигналом управління  $u(t)$  системою диференціальних рівнянь  $\dot{x} = \varphi(x_\beta, u, t)$ .

Особливо ефективними ці методи є тоді, коли на сигнал управління  $u(t)$  накладені локальні обмеження, наприклад,  $|u(t)| \leq U$ .

Метод динамічного програмування використаний у роботі для синтезу тестового сигналу. При цьому величина  $\Psi$  є чутливістю

$$\Psi = S = \int_0^T \sum_{i=1}^m b_i^2(t, \{u\}) dt . \quad (20)$$

Це рівняння дозволяє послідовно знаходити тестовий сигнал у момент часу  $t_{s-k}$  залежно від значень «координат»  $\zeta_\gamma(s-k)$  у цей же час:

$$u_{\text{опт}}(s-k) = u_{\text{опт}}[\zeta_\gamma(s-k)] . \quad (21)$$

Величини  $\zeta_\gamma(s-k)$  можуть бути після цього визначені з системи різницевих рівнянь, яка замінює систему рівнянь (18)

$$\zeta_\gamma(s-k+1) = \zeta_\gamma(s-k) + \Delta t \varphi_\gamma[\zeta_\gamma(s-k), u_{\text{опт}}(\zeta_\gamma(s-k))] . \quad (22)$$

Розв'язавши рівняння (22) і підставивши розв'язок у формулу (21), визначимо залежність тестового сигналу  $u_{\text{опт}}(t)$  від часу.

Метод динамічного програмування характеризується можливою неоднозначністю розв'язання. У даному випадку необхідно не пропустити момент розгалуження розв'язань. Якщо рівняння (21) було б точним, то в точці розгалуження максимальне значення другого доданку в правій частині рівняння (22) досягалося б одночасно для двох різних значень величини  $u(s-k)$ . Через дискретний характер рівняння (22) ці два значення величини  $u(s-k)$  можуть призвести до близьких, але різних за величиною значень  $C_{s-k+1}$ . Тоді те

значення, яке призводить до мінімального значення, буде невірно відкинуто. Тому на кожному етапі потрібно зберігати не тільки те значення  $u(s-k)$ , для якого величина  $C_{s-k+1}$  максимальна, але й те, для якого ця величина незначним чином відрізняється від максимального значення, у той час як самі величини  $u(s-k)$  відрізняються сильно. Після отримання всієї множини можливих розв'язків потрібно вибрати з них той, для якого величина  $S$  максимальна.

Оскільки в методах динамічного програмування тестовий сигнал  $u_{\text{опт}}(t)$  розраховується (залежно від «координат») для кожного даного моменту часу, то для ефективного застосування цих методів можливі обмеження на сигнал  $u(t)$  повинні задаватися для кожного моменту часу, тобто мати локальний характер. Можливі випадки, коли такого роду обмеження накладається не на вхідний сигнал  $u(t)$ , а на сигнал  $x_i(t)$  на деякому елементі (блоці) РНК засобів водного транспорту. Якщо обмеження накладаються одночасно на тестовий сигнал  $u(t)$  і сигнали на елементах  $x_i(t)$  або на декілька сигналів  $x_i(t)$  на різних елементах (блоках) РНК засобів водного транспорту, то для визначення складного тестового сигналу необхідно розв'язати задачу з обмеженими «фазовими координатами».

Отримані співвідношення (17) і (19) є базовими для варіаційного методу, а вирази (21) і (22) – для методу динамічного програмування при синтезі тестових сигналів для контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту.

У **четвертому розділі** розглянуто методи обробки відгуків на запропоновані вхідні складні тестові сигнали – методи обробки відгуку. Отримані результати цього розділу встановлюють принципи побудови та алгоритми роботи апаратури аналізатора відгуку (вихідного сигналу).

При використанні статистичних методів основною величиною, яка описує контроль і надає максимальну інформацію про його результати, є апостеріорна функція розподілу  $\rho(z/y)$ . Функція  $\rho(z/y)$  є щільністю ймовірності параметрів  $z_i$  за умови, що вихідний сигнал, який спостерігається в моменти часу  $t_k$ , дорівнює  $y(t_k)$ . Позначимо апріорну функцію розподілу параметрів контролю РНК  $q_j$  через  $\rho_1(q)$ , а функцію розподілу завади через  $\rho_2(\xi)$ . Тоді апостеріорна функція розподілу  $\rho(z/y)$  може бути знайдена із співвідношення  $\rho(z/y) = \rho(z, y) / \rho(y)$ . У цьому виразі  $\rho(z, y)$  є сумісною функцією розподілу  $z_i$  і  $y_i$ , а  $\rho(y)$  є функцією розподілу величин  $y_i$ . Після виразів функцій розподілу  $\rho(z, y)$  і  $\rho(y)$  через вихідні апріорні функції розподілу  $\rho_1(q)$  і  $\rho_2(\xi)$  та враховуючи, що завада  $\xi$  не залежить від параметрів  $q_j$ , отримаємо:

$$\rho(z, y) = \int \int_{11}^{sn} \rho_1(q) \rho_2(\xi) \delta[z - z(q)] \delta[y - y_0(q) - \xi] dq d\xi; \quad (23)$$

$$\rho(y) = \int_1^m \rho(z, y) dz = \int \int_{11}^{sn} \rho_1(q) \rho_2(\xi) \delta[y - y_0(q) - \xi] dq d\xi; \quad (24)$$

$$\rho(z/y) = \frac{\rho(z, y)}{\rho(y)} = \frac{\int_1^{s_n} \int_1^{s_n} \rho_1(q) \rho_2(\xi) \delta[z - z(q)] \delta[y - y_0(q) - \xi] dq d\xi}{\int_1^{s_n} \int_1^{s_n} \rho_1(q) \rho_2(\xi) \delta[y - y_0(q) - \xi] dq d\xi}. \quad (25)$$

У формулах (23) – (25) під змінними  $q, z, y, \xi$  розуміємо сукупності параметрів (величин)  $\{q_1, \dots, q_j, \dots, q_n\}$ ,  $\{z_1, \dots, z_i, \dots, z_m\}$ ,  $\{y(t_1), \dots, y(t_k), \dots, y(t_s)\}$ ,  $\{\xi(t_1), \dots, \xi(t_k), \dots, \xi(t_s)\}$ , а величина  $dq d\xi \equiv \prod_{j=1}^n dq_j \prod_{k=1}^s d\xi(t_k)$ .

Дельта-функції в підінтегральних виразах забезпечують виконання рівностей  $z = z(q)$  і  $y = y_0(q) + \xi$ . Після проведення інтегрування за  $\xi_k$ :

$$\rho(z, y) = \int_1^n \rho_1(q) \rho_2[y - y_0(q)] \delta[z - z(q)] dq; \quad (26)$$

$$\rho(y) = \int_1^n \rho_1(q) \rho_2[y - y_0(q)] dq; \quad (27)$$

$$\rho(z/y) = \frac{\int_1^n \rho_1(q) \rho_2[y - y_0(q)] \delta[z - z(q)] dq}{\int_1^n \rho_1(q) \rho_2[y - y_0(q)] dq}. \quad (28)$$

Формули (26) – (28) складають метод обробки відгуку (вихідного сигналу) РНК засобів водного транспорту при контролі технічного стану.

Коли завада (або похибка вимірювання) настільки мала, що ширина функції  $\rho_2(\xi)$  є набагато меншою за ширину функції  $\rho_1(q)$  (для гаусовських кривих це буде при  $\sigma_2^2 \ll \sigma_1^2$ ), формула (28) дещо спрощується. Дійсно, для цього випадку можна в підінтегральних виразах у (28) замінити функцію  $\rho_1(q)$  на постійну величину, яка дорівнює значенню функції  $\rho_1(q)$  у тій точці, де функція  $\rho_2[y - y_0(q)]$  має максимум. Після цього формула (28) набуває вигляду:

$$\rho(z/y) \approx \frac{\int_1^n \rho_2[y - y_0(q)] \delta[z - z(q)] dq}{\int_1^n \rho_2[y - y_0(q)] dq}. \quad (29)$$

Однак, навіть спрощена формула (29) все ще складна для технічної реалізації серійних аналізаторів за рахунок великої собівартості.

Розглянуто критерії оцінки відгуку на тестовий сигнал РНК для спрощення технічної реалізації аналізаторів вихідного сигналу.

При використанні критерію максимальної апостеріорної ймовірності за оцінку для  $z_i$  приймається величина  $z^* = \{z_1^*, \dots, z_i^*, \dots, z_m^*\}$ , яка відповідає максимуму функції  $\rho(z/y)$ , тобто параметри  $z_i^*$  визначаються з рівнянь:

$$\frac{\partial \rho(z_i^*/y)}{\partial z_i^*} = 0, \quad i = \overline{1, m}. \quad (30)$$

Оскільки функція  $\rho(y)$  не залежить від  $z_i$ , то максимум функції  $\rho(z/y)$  співпадає з максимумом функції  $\rho(z, y)$ .

Рівняння (30) з урахуванням (26) визначає алгоритм роботи аналізатора на основі критерію максимальної апостеріорної ймовірності.

При використанні критерію мінімального ризику з квадратичною функцією втрат величина середнього ризику залежно від вибраної оцінки  $z^*$  буде дорівнювати:

$$R(z^*) = \int_1^m (z - z^*)^2 \rho(z/y) dz. \quad (31)$$

Оцінки  $z^*$  дорівнюють середньому апостеріорному значенню вектора  $z$ :

$$z^* = \int_1^m z \rho(z/y) dz. \quad (32)$$

Після підстановки замість  $\rho(z/y)$  співвідношення (25) отримано:

$$z^* = \frac{1}{\int_1^n \rho_1(q) \rho_2[y - y_0(q)] dq} \int_1^n z(q) \rho_1(q) \rho_2[y - y_0(q)] dq. \quad (33)$$

Формула (33) визначає алгоритм роботи аналізатора, оснований на критерії мінімального ризику, а вираз (31) показує той мінімальний ризик (мінімальну середньоквадратичну похибку), який отримується при оцінці  $z^*$ .

Коли функція розподілу  $\rho(z/y)$  має один максимум і симетрична відносно нього, середнє значення вектора  $z$ , яке визначається формулою (32), співпадає з найбільш імовірним значенням згідно з виразом (29). У цьому випадку критерії мінімального ризику та максимальної апостеріорної ймовірності призводять до однієї оцінки. Такий самий результат отримуємо й у випадку, коли функція розподілу  $\rho(z/y)$  має різкий максимум у точці  $z_i = z_m$ . Водночас у виразі (32) можна винести з під знаку інтегралу значення  $z_i = z_m$  і,

оскільки  $\int_1^m \rho(z/y) dz = 1$ , отримуємо  $z^* \cong z_m$ . Якщо функція розподілу  $\rho(q/y) = \rho_1(q) \rho_2[y - y_0(q)]$  має максимум у точці  $q = q^*$ , то аналогічно, якщо винести величину  $z(q^*)$  з-під знаку інтегралу у формулі (33), отримано

$z^* = z(q^*)$ . При цьому алгоритм роботи аналізатора полягає в обчисленні точки максимуму функції  $\rho(q/y)$ , тобто до (33).

При незначних відхиленнях параметрів контролю РНК від номінальних значень величина  $\overline{\Delta y}$  може бути записана так:

$$\overline{\Delta y} = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^n a_j(t_k) q_j + \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s \xi(t_k). \quad (34)$$

Позначимо через  $A_j = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s a_j(t_k)$  і  $\xi = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s \xi(t_k)$ . Вважаємо, що величини

$\xi(t_k)$  розподілені за нормальним законом і незалежні:  $\langle \xi(t_i) \xi(t_k) \rangle = \sigma_{\xi}^2 \xi_{ik}$ .

Завада  $\xi$  також буде розподілена за нормальним законом з дисперсією

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_{\xi}^2}{s}. \quad (35)$$

Параметри  $q_j$  будемо також вважати розподіленими за нормальним законом з матрицею кореляції  $Q_{ij} = \langle q_i q_j \rangle$ . Запишемо величину  $\overline{\Delta y}$  так:

$$\overline{\Delta y} = \sum_{j=1}^n A_j q_j + \xi. \quad (36)$$

Мета контролю полягає у визначенні величини  $z = \sum_{j=1}^n \alpha_j q_j$  за відомими величинами  $\overline{\Delta y}$ . У частковому випадку, коли всі величини  $\alpha_j$ , крім однієї, дорівнюють нулю, параметри  $z_i$  співпадають з відповідним параметром  $q_j$ .

Відношення  $\varepsilon/\sigma_z^2$  характеризує звуження області розкиду параметрів  $z_i$ , яке досягається в результаті контролю:

$$\frac{\varepsilon}{\sigma_z^2} = \frac{1}{1 + s\lambda^2 \frac{\sigma_z^2}{\sigma_{\xi}^2}}. \quad (37)$$

Як видно з відношення (37), зменшення величини  $\varepsilon/\sigma_z^2$  досягається, по-перше, за рахунок фільтрації завади при великих  $s$ , і, по-друге, за рахунок максимально допустимого збільшення величини  $\lambda$ . При достатньо великих значеннях  $s$  і  $\lambda$  можна досягти незначного значення відношення  $\varepsilon/\sigma_z^2$  навіть у випадку, коли дисперсія завади  $\sigma_{\xi}^2$  незначна. У цьому фактично проявляється заводозахищеність методу контролю, що розглядається.

Перевагою є простота технічної реалізації вимірювального генератора та аналізатора, що може призвести до суттєвого спрощення всієї процедури контролю при збереженні достатньо високої заводозахищеності.

Недоліком розглянутого методу є необхідність проведення вимірювання кожного з параметрів  $z_i$  або кожного параметра системи  $q_j$ , тому для кожного з них необхідно формувати свій сигнал. Отже, сумарний час контролю параметрів РНК буде більшим порівняно з розглянутим алгоритмом роботи аналізатора, оснований на критерії мінімального ризику. В цьому методі використовується один сигнал для визначення усіх параметрів, так що аналізатор після обробки цього сигналу може одночасно видати інформацію про всі параметри контролю РНК.

У другому спрощеному методі визначення технічного стану РНК для визначення параметрів контролю використане не середнє значення сигналу непогодження, а середнє квадратичне значення:  $U^2 = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s [\Delta y(t_k)]^2$ .

У цьому методі використовується значення  $U^2$  для визначення сумарного середньоквадратичного виходу параметрів контролю за встановлені границі  $Z = \sum_{j=1}^n \beta_j q_j^2$ , де  $q_j$  – вихід  $j$ -го параметра, а  $\beta_j$  – відповідний коефіцієнт ваги.

Визначення величини  $Z$  важливе при загальній оцінці технічного стану РНК засобів водного транспорту. Перевищення величиною  $Z$  даного рівня буде свідчити про несправність комплексу, що контролюється. Визначення сумарного середньоквадратичного виходу параметрів дає меншу інформацію про стан РНК, ніж визначення кожного з його параметрів або частини параметрів. Це може бути корисним, коли для скорочення часу контролю необхідно жертвувати його глибиною.

Для дослідження можливостей розглянутого методу розрахована умовна функція розподілу параметрів контролю  $q_j$  при відомій (виміряній) величині

$$U^2 = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s (\Delta y_i)^2 = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s (\Delta y_i^0 + \xi_i)^2.$$

Заваду  $\xi$  будемо вважати розподіленою за нормальним законом з дисперсією  $\langle \xi_i^2 \rangle = \sigma_\xi^2$ . Для умовної функції розподілу  $\rho(q/U^2)$  отримано:

$$\rho(q/U^2) = \frac{1}{\rho(U^2)} \rho(q, U^2) = \frac{\rho_q(q)^T}{\rho(U^2)_0} \int \rho(U^2/q) dt. \quad (38)$$

Отримані співвідношення (26) – (28) є базовими для запропонованого методу обробки відгуку на синтезовані тестові сигнали.

Суттєве спрощення алгоритму обробки відгуку на тестовий сигнал при одночасному збереженні високої завадозахищеності може бути отримане за спрощеними методами обробки відгуку – співвідношення (33), (34), (38).

Отримані у розділі алгоритми дозволяють автоматизувати процедуру контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту.

У розділі 5 запропоновано принципи побудови цифрових автоматичних приладів для контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту. Вони ґрунтуються на розроблених методах синтезу тестових сигналів і обробки відгуків на них. На основі цих методів створено алгоритми роботи генераторів сигналів складної форми і аналізаторів відгуків на тестовий сигнал.

Прилади контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту за своїм функціональним призначенням складаються з апаратури генератора вхідних тестових впливів та апаратури, яка призначена для аналізу відгуку (вихідного сигналу) ОК. Обґрунтована доцільність і можливість побудови такої апаратури на базі цифрової дискретної техніки.

Розглянута функціональна схема генератора, побудованого за принципом перетворення коду в аналог (рис. 6). Схема складається з генератора еталонної частоти – генератор імпульсів (ГІ), подільника частоти (Д) із змінним коефіцієнтом ділення, перетворювача коду в аналог (ПКА) та підсилювача постійного струму (ППС). Для підвищення точності оцінки технічного стану РНК засобів водного транспорту такий генератор повинен бути синхронізований з аналізатором відгуку на тестовий сигнал (рис. 1). Тому до схеми додано обчислювальний пристрій (мікропроцесор).

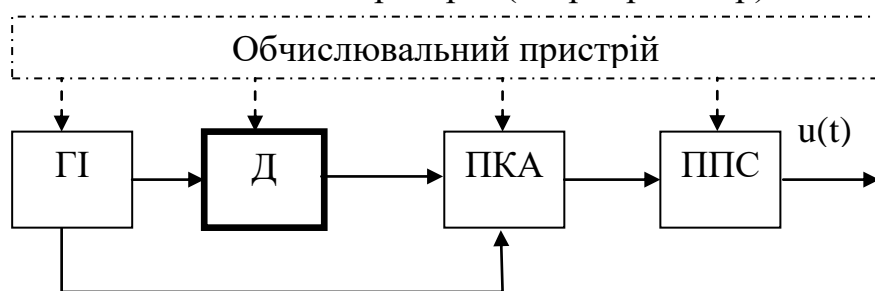


Рисунок 6 – Схема генератора за принципом перетворення коду в аналог

Запропоновані методи довели, що в багатьох випадках оптимальний тестовий сигнал становить кусково-постійну функцію  $u(t) = \pm U$  з точками перемикання  $t_i$  (у загальному випадку не рівновіддаленими). Для формування такого сигналу запропонована наступна схема (рис. 7).

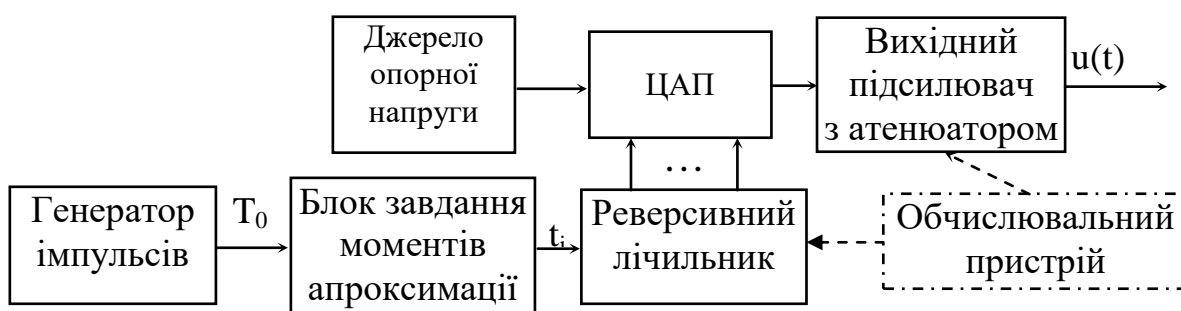


Рисунок 7 – Схема генератора кусково-постійної функції  $u(t) = \pm U$

Генератор імпульсів є мірою часових інтервалів  $T_0$ , при накопиченні яких формуються моменти дискретизації  $t_i$  кусково-східчастого сигналу  $u_a(t)$ . Цю функцію виконує блок встановлення моментів апроксимації  $t_i$ . Він формує, залежно від виду апроксимації, рівномірну або нерівномірну послідовність імпульсів, які потрапляють на вхід реверсивного лічильника. Код поточного числа імпульсів, записаного в реверсивному лічильнику, подається на кодові входи цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) і на його виході виникає кусково-східчаста напруга. Значення рівнів цієї напруги задаються реверсивним лічильником і визначаються законом зміни опорів у ЦАП.

Розроблена функціональна блок-схема автомата контролю, яка виконує обробку відгуку (вихідного сигналу) РНК за спрощеним алгоритмом (38). Вона представлена на рисунку 8.

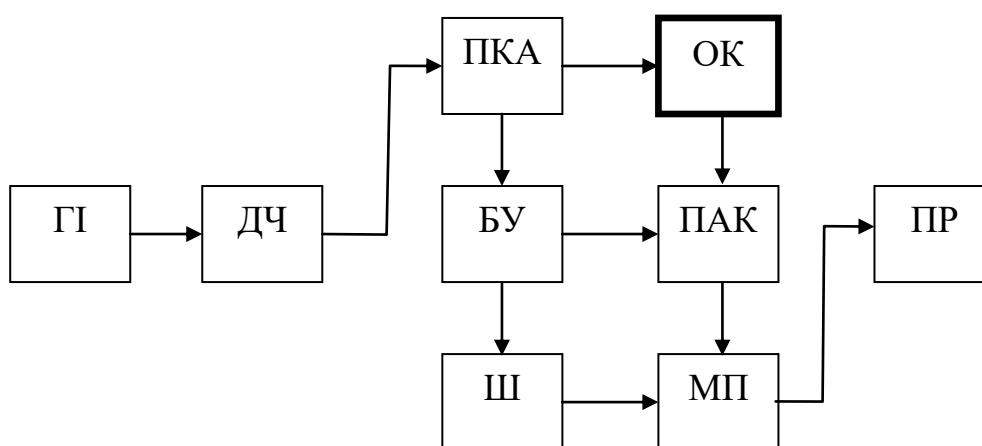


Рисунок 8 – Функціональна блок-схема автомата контролю

Схема містить такі основні елементи: кварцовий генератор еталонної частоти (ГІ), дільник частоти (ДЧ) зі змінним коефіцієнтом ділення, перетворювач код-аналог (ПКА), блок управління (БУ), шифратор (Ш), перетворювач аналог-код (ПАК), обчислювальний пристрій (мікропроцесор) (МП), пристрій реєстрації (ПР).

Застосування цифрової дискретної апаратури контролю дозволяє реалізувати оптимальні методи контролю, забезпечує високу швидкість та точність контролю. Використання такої апаратури дозволяє автоматизувати процес контролю за рахунок застосування розроблених алгоритмів генерування тестових сигналів складної форми і обробки відгуків на них.

Принципи побудови та створені на основі цих принципів генератори вхідних сигналів дозволяють формувати вхідний сигнал потрібної форми з необхідним ступенем точності. З метою підвищення оперативності контролю може бути використаний комбінований метод, при якому для визначення відхилень невеликої кількості найбільш суттєвих (значимих) параметрів застосовується оптимальний метод обробки вихідного сигналу, або який використовує визначення середнього значення вихідного сигналу, а для

інтегральної оцінки уходів всіх інших параметрів – метод, заснований на визначенні середньоквадратичного значення неузгодженості вихідного сигналу.

У шостому розділі розроблений метод визначення похибок координат засобів водного транспорту залежно від процедур контролю технічного стану РНК і метод синтезу складного тестового сигналу з використанням функції Лагранжа з потрібним спектром, проведено оцінку ефективності застосування синтезованих тестових сигналів.

Показано, що в практиці контролю технічного стану складних систем виникають задачі забезпечення максимальної ефективності їх використання при експлуатації за рахунок своєчасного виявлення відмов. Це досягається вибором оптимальної номенклатури параметрів контролю. Вищезазначені задачі у загальній постановці можуть бути описані так.

Нехай  $\Phi(q)$  - заданий оператор цілі функціонування об'єкта контролю. Він залежить від вектора параметрів контролю  $q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ , де  $n$  – кількість параметрів контролю. Необхідно визначити вектор параметрів контролю  $q$ , який забезпечує екстремум функції  $\Phi(q)$ .

Нехай параметри контролю РНК  $q_j$  мають допустимі відхилення приросту  $\Delta q_j$ , тоді відповідний приріст функціонала цілі  $\epsilon$  (рис. 9):

$$\Delta\Phi = \Phi(q_1 + \Delta q_1, \dots, q_j + \Delta q_j, \dots, q_n + \Delta q_n) - \Phi(q_1, \dots, q_j, \dots, q_n). \quad (39)$$

Під час експлуатації засобів водного транспорту, особливо в жорстких морських умовах, відбувається дрейф параметрів контролю  $q_j$ , які відповідають за технічний стан РНК. Своєчасне виявлення виходу параметрів контролю за границі зміни допоможе запобігти виходу з ладу РНК.

Розглянуто вплив зміни (дрейфу) параметрів контролю РНК під час експлуатації на похибки координат засобів водного транспорту на маршрут руху. Позначимо  $\delta q_j$ ,  $j = \overline{1, n}$ , за відносний приріст параметрів (віднесений до номінальних значень):  $\delta q_j = \Delta q_j / q_{\text{ном } j}$ . Зафіксуємо довжину вектора

$$\|\delta q\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n \delta q_j^2}. \quad \text{Для різних напрямків,}$$

тобто для різних співвідношень між компонентами  $\delta q_j$ , величина приросту  $\Delta\Phi$  буде різною.

Відношення  $\delta\Phi / \|\delta q\|$ , де  $\delta\Phi = \Delta\Phi / \Phi_{\text{ном}}$ , характеризує нестабільність роботи РНК у даному напрямку, тобто при даному співвідношенні між

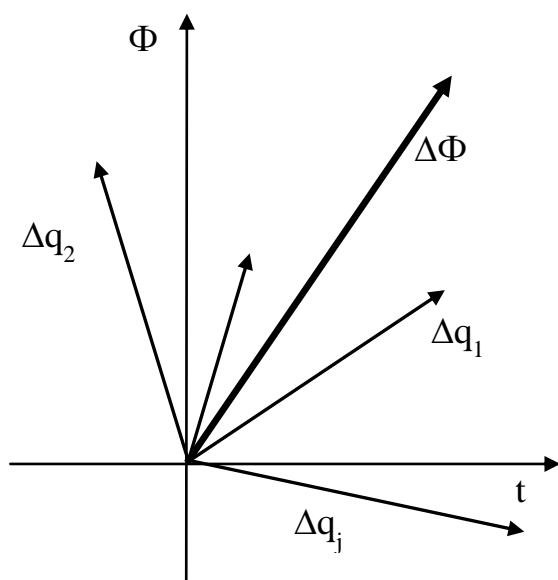


Рисунок 9 – Зміна функціонала цілі контролю  $\Phi$  залежно від параметрів  $q$

величинами  $\delta q_j$ ,  $j = \overline{1, n}$ . Для деякого напрямку величина  $\delta\Phi$  (при фіксованій величині  $\|\delta q\|$ ) буде максимальною. Тоді за оцінку нестабільності роботи РНК використаємо величину

$$\delta_{\text{РНК}} = \lim_{\|\delta q\| \rightarrow 0} \frac{\delta\Phi_{\text{max}}}{\|\delta q\|}. \quad (40)$$

Величина  $\delta_{\text{РНК}}$  має такий фізичний зміст. Оскільки  $\|\delta q\|$  є кількісною мірою «перестроювання» ОК, то  $\delta_{\text{РНК}}$  є максимально можливим відносним приростом функціоналу цілі, яке приходиться на одиничне перестроювання.

Величина  $\delta_{\text{РНК}}$  дозволяє оцінити потенційну спроможність РНК до адаптації. Наприклад, з декількох комплексів вибрати той, для якого потрібний ступінь адаптації отримується шляхом мінімального перенастроювання; або забракувати той комплекс, для якого адаптація досягається при дуже значному перенастроюванні параметрів.

Оцінка  $\delta_{\text{РНК}}$  є корисною в альтернативній задачі адаптації, коли до комплексів висуваються вимоги за точністю її вихідних характеристик. У цьому випадку перевагу необхідно віддати жорстким комплексам, тобто комплексам з малою нестабільністю роботи  $\delta_{\text{РНК}}$ .

Для показника нестабільності роботи  $\delta_{\text{РНК}}$  отримано:

$$\delta_{\text{РНК}} = \frac{\Delta\Phi_{\text{max}}}{\delta q} = a \sin\theta. \quad (41)$$

Фізичний зміст величин виразу (41): величина  $a$  враховує чутливість РНК при зміні параметрів без врахування умов обмежень; величина  $\sin\theta$  враховує нестабільність роботи при врахуванні обмежень.

Фізичний зміст виразу (41) полягає в тому, що програш є тим більший, чим ближче напрямок, який визначається вектором зміни параметра контролю в напрямку вектора напрямку градієнта функціоналу  $\Phi$  (рис. 9). Відносний програш при цьому складає

$$\frac{\delta_{\text{РНК}_g}^2 - \delta_{\text{РНК}_{g+1}}^2}{\delta_{\text{РНК}_g}^2} = \cos^2 \psi. \quad (42)$$

Таким чином, отримані співвідношення (39) – (42) є методом розрахунку нестабільності роботи РНК і дозволяють визначити вплив зміни їх параметрів контролю на похибки координат засобів водного транспорту на маршруті.

Запропонований метод дозволяє проводити діагностування технічного стану РНК засобів водного транспорту, оскільки за його допомогою можливо прогнозувати час між проведенням періодичного контролю під час експлуатації. Раціональний інтервал між проведенням періодичного контролю (міжконтрольний інтервал) під час експлуатації РНК засобів водного транспорту дозволить збільшити достовірність їх справногo стану. Збільшення достовірності експлуатації справних РНК дозволяє підвищити ефективність експлуатації засобів водного транспорту.

Запропоновано метод синтезу складного тестового сигналу з нормованим спектром з використанням функції Лагранжа.

Математична постановка задачі синтезу полягає в пошуку найкращого середньоквадратичного наближення спектра синтезованого складного тестового сигналу  $F(\alpha)$  до спектра опорного сигналу  $f(\alpha)$ :

$$\sigma = \min \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left( |\dot{d}_n| - |\dot{D}_n| \right)^2, \quad (43)$$

де 
$$\dot{d}_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\alpha) e^{-jn\alpha} d\alpha = \frac{1}{2} c_n e^{j\psi_n}; \quad \dot{D}_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(\alpha) e^{-jn\alpha} d\alpha = \frac{1}{2} C_n e^{j\varphi_n} -$$

відповідно комплексні коефіцієнти Фур'є сигналів  $f(\alpha)$  та  $F(\alpha)$  при  $n \neq 0$ ;  $\alpha = \omega_0 t -$  фазовий кут ( $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ );  $\omega_0$  – основна кругова частота;  $c_n$  і  $\psi_n$ ,  $C_n$  і  $\varphi_n$  – амплітуди й початкові фази  $n$ -ї гармоніки сигналів  $f(\alpha)$  та  $F(\alpha)$ .

Критерій оптимізації функції (43) полягає в максимізації середнього значення амплітуд гармонік  $\bar{C}$  сигналу в корисному діапазоні частот:

$$G = \max \bar{C} = \max \frac{1}{K} \sum_{n=1}^N \rho_n C_n, \quad (44)$$

де  $K$  дорівнює кількості корисних гармонічних складових.

Було проведено комп'ютерне моделювання запропонованого методу. Наведено результати синтезу сигналу запропонованим методом та одним з відомих методів, в якому критерієм оптимальності є мінімум середньоквадратичного відхилення сигналів  $f(\alpha)$  та  $F(\alpha)$  у часовій області. За початкове наближення обрано переходи через нуль опорного сигналу  $f(\alpha)$ , що складається з 10-ти гармонік однакових амплітуд та довільних фаз (рис. 10).

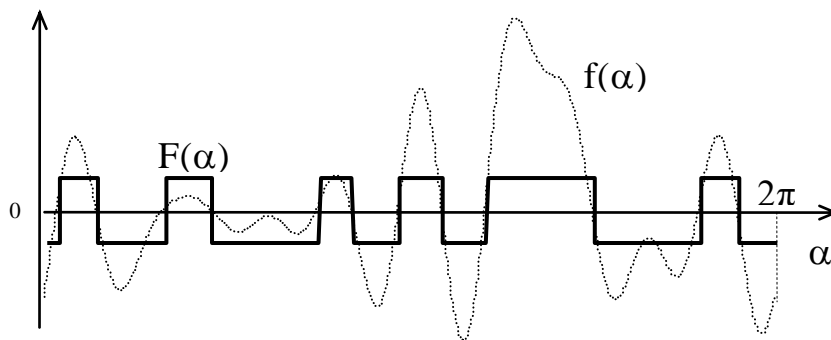


Рисунок 10 – Вихідний опорний сигнал  $f(\alpha)$  та його апроксимація  $F(\alpha)$

На рисунку 11 наведено синтезований складний сигнал і його спектр, що можна отримати з використанням відомого методу, причому  $P_{\text{кор}} = 0,843 \text{ В}^2$ .

Однак далі, щоб зменшити нерівномірність гармонік або підвищити корисну потужність тестового сигналу, треба здійснити модифікацію опорного сигналу й знову провести ітераційну процедуру. Але і в цьому випадку отриманий сигнал може не відповідати потрібному, з зазначеними характеристиками. Запропонований метод навпаки більш гнучкий щодо

керування спектром синтезованого тестового сигналу (рис. 12).

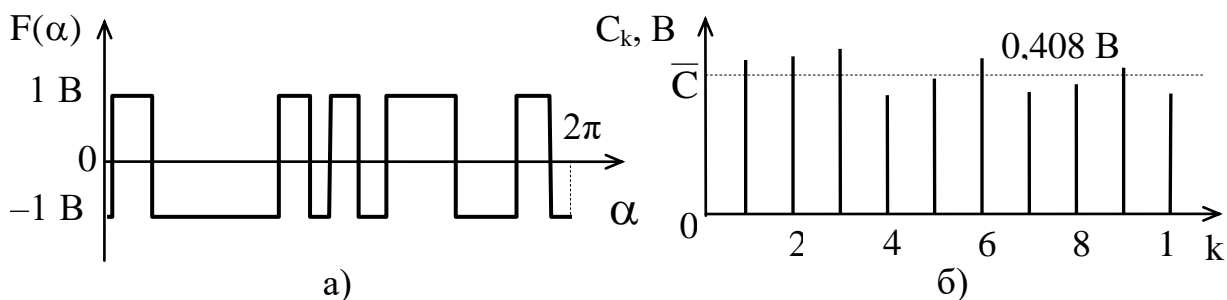


Рисунок 11 – Оптимальний сигнал (а) та його спектр (б) за критерієм мінімуму опорного та синтезованого у часовій області

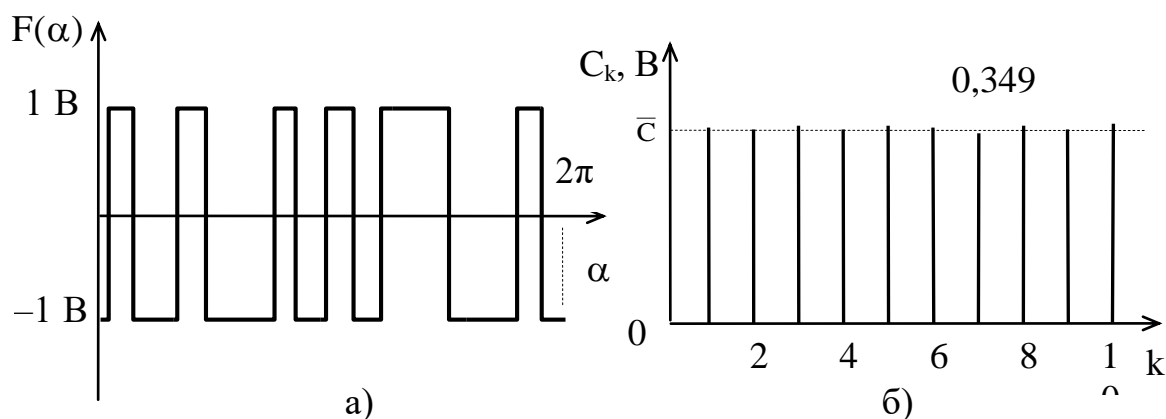


Рисунок 12 – Оптимальний сигнал (а) та його спектр (б), отримані запропонованим методом при  $P_{кор} = 0,6 V^2$

Можна задати обмеження на корисну потужність та отримати складний сигнал з такими характеристиками, як, наприклад,  $P_{кор} = 0,843 V^2$  або  $P_{кор} = 0,95 V^2$ . Майже рівномірний спектр отримуємо при  $P_{кор} = 0,6 V^2$  (рис. 12).

Аналогічно попередньому проведено моделювання бінарного тестового сигналу з частотно-імпульсною модуляцією для отримання спектра, що складається з 20-ти гармонік. На рисунку 13, а, б, подано відповідно бінарний складний сигнал і його спектр, оптимізований за критерієм максимуму середнього значення корисних гармонік при обмеженні на корисну потужність сигналу  $P_{кор} \geq 0,95 V^2$ . Діаграми на рисунку 13, в, г, відповідають оптимальному сигналу та спектру при  $P_{кор} \geq 0,85 V^2$ . Результатом оптимізації будуть сигнали, що мають відповідно значення  $\bar{C} = 0,232 V$ ,  $P_{кор} = 0,947 V^2$  та  $\bar{C} = 0,29 V$ ,  $P_{кор} = 0,85 V^2$ . Отже, запропонований метод дозволяє отримати тестові сигнали з наперед заданими параметрами спектра. За початкове наближення вектору точок переключення в обох випадках обрано моменти переходу через нуль бажаного сигналу з довільними фазами.

Як видно з рисунку 13, при підвищених вимогах до корисної потужності сигнал має значний розкид між амплітудами на частотах аналізу. У першому випадку розкид складає  $0,703 V$ , а в другому –  $0,17 V$ .

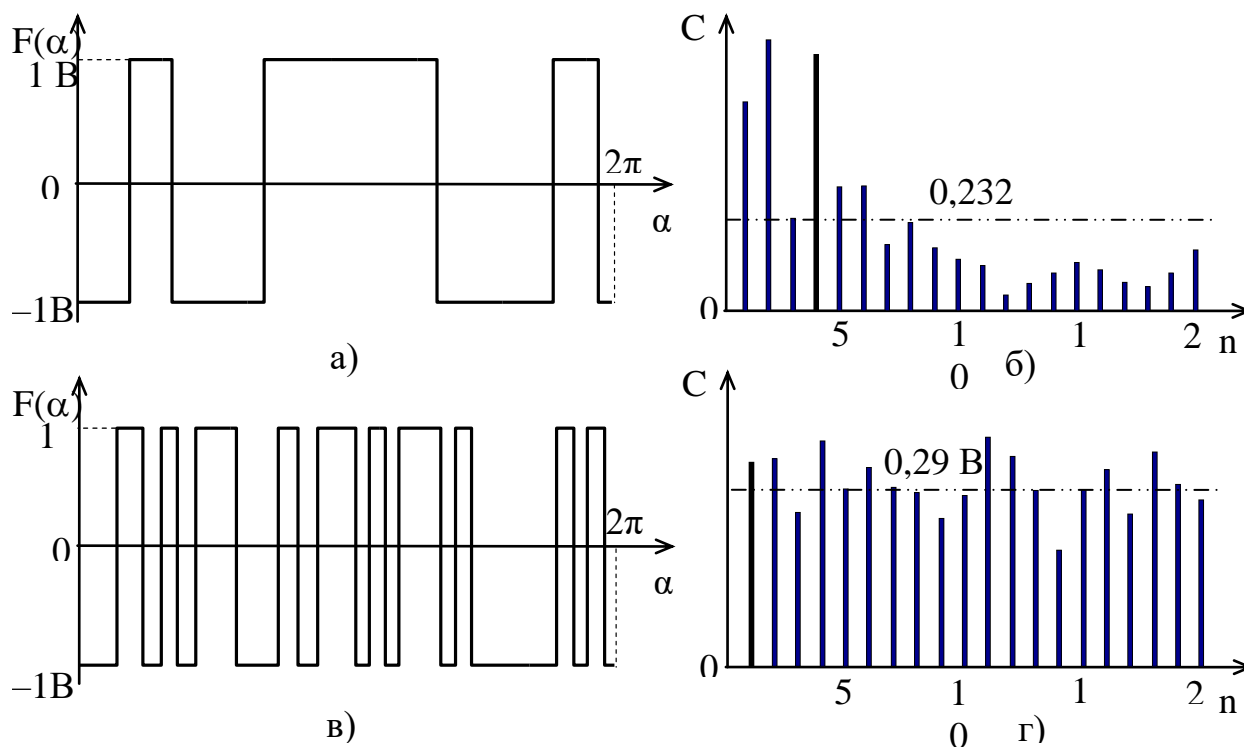


Рисунок 13 – Результати синтезу бінарного сигналу

Аналіз наведених діаграм дозволяє зробити висновок: чим більшою є кількість точок переключення бінарного сигналу, тим більше гармонік можна отримати з рівними амплітудами. Зокрема для першого, другого та третього наборів відповідно перші 16, 18 та 20 гармонік будуть мати приблизно однакові амплітуди. Значення відносної нерівномірності, під якою розуміється відношення різниці між максимальною та мінімальною гармонічними складовими у квазірівномірному спектрі до середнього значення квазірівномірних гармонік, для трьох розглянутих вище варіантів складають відповідно 0,004 %, 0,013 % та 0,23 %.

За початковий набір оберемо точки переключення бінарного сигналу, наведеного на рисунку 13, в. Результатом оптимізації буде зменшення розкиду амплітуд гармонічних складових у корисному діапазоні частот до величини 0,06 В та збільшення середнього значення гармонік до 0,317 В. При оптимізації було задано та досягнуто коефіцієнт амплітуди 1,3, що набагато нижче відповідного коефіцієнта амплітуди парного та непарного тестових сигналів для 20-ти гармонік. Отже, за критерієм завадозахищеності найкращим є бінарний сигнал.

Для оцінки ефективності застосування запропонованих складних тестових сигналів з метою контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту розрахований тестовий сигнал для контролю передавача РНК, аперіодичний ланцюг з передатною функцією

$$h(p) = \frac{k}{T_0 p + 1}. \quad (45)$$

Розрахуємо для цього ланцюга співвідношення, яке визначає характеристики тестового сигналу  $u(t)$  при контролі постійної часу  $T_0$ .

Нехай  $T$  – час, який відведено для контролю ланцюга. За умови функціонування ланцюга середня потужність вимірювального сигналу  $u(t)$ , отже, й енергія обмежені інтегрально.

Знайдено оптимальний сигнал  $u_{\text{опт}}(t)$ :

$$u_{\text{опт}}(t) = B_1 e^{i\alpha_0 T/T_0} + B_2 e^{-i\alpha_0 t/T_0}. \quad (46)$$

Враховуючи, що  $B_2/B_1 = e^{2i\alpha_0 T/T_0}$ , для оптимального сигналу знайдено:

$$u_{\text{опт}} = U_m \sin\left(\alpha_0 \frac{T-\tau}{T_0}\right) = U_m \sin\left(x_0 \frac{T-\tau}{T}\right). \quad (47)$$

Амплітуда сигналу  $U_m$  визначається відповідно до інтегрального обмеження та дорівнює:  $U_m = \sqrt{2E_c/T}$ .

Зауважимо, що оскільки  $x_0 \leq \pi$ , то функція  $u_{\text{опт}}(t)$  на інтервалі  $[0, T]$  не змінює знака. На рисунку 14 показана форма оптимального тестового сигналу  $u_{\text{опт}}(t)$  при значеннях  $T/T_0 \ll 1$ ,  $T/T_0 \approx 1$  і  $T/T_0 \gg 1$ .

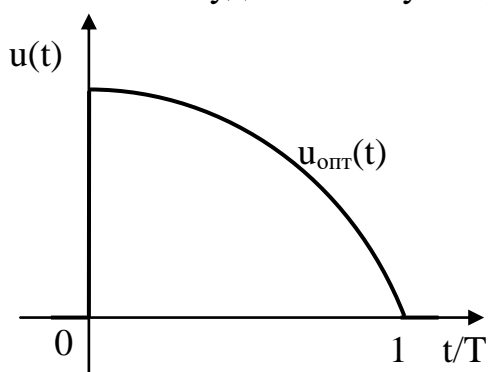
З використанням отриманих співвідношень отримана залежність для визначення  $S_{\text{max}}(T)$ :

$$S_{\text{max}}(T) = \frac{PT}{1 + x_0^2 (T_0/T)^2}, \quad (48)$$

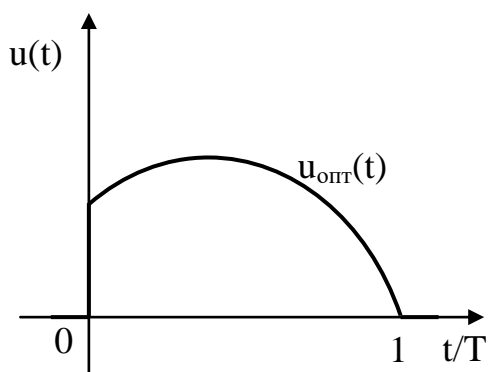
де  $P = E_c/T$  – середня потужність сигналу.

На рисунку 15 наведено графік функцій  $S_{\text{max}}(T)$  і  $S_{\text{max}}(T)/T$ , який має зміст «продуктивності» контролю. Як видно з рисунку 15, максимальний зріст величини  $S_{\text{max}}(T)$  має місце при збільшенні  $T$  в області малих  $T$ . Потім цей зріст зменшується й при достатньо великих  $T$  величина  $S_{\text{max}}(T)$  зростає пропорційно  $T$ :  $S_{\text{max}}(T) \cong PT$ . Із графіку (рис. 15) визначається мінімальний час контролю  $T_{\text{min}}$ , який необхідний для досягнення заданої величини чутливості  $S$ , а з формули (47) – форма оптимального тестового сигналу, що відповідає мініимальному часу контролю.

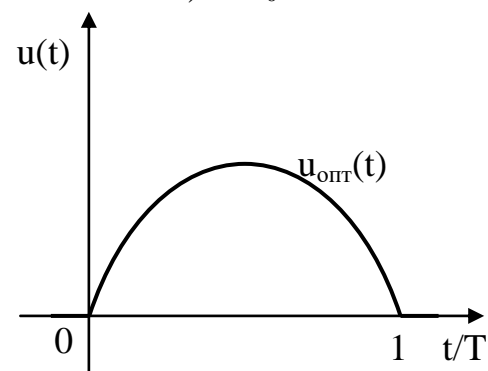
Проведено порівняння величини  $S_{\text{max}}(T)$  і чутливості, яку отримано при застосуванні для визначення постійної часу  $T_0$  ступеневих сигналів  $u_{\text{ст}}(t) = U_0 \sigma(t)$ .



а)  $T/T_0 \ll 1$



б)  $T/T_0 \approx 1$



в)  $T/T_0 \gg 1$

Рисунок 14 – Форма оптимального тестового сигналу згідно з виразом (47)

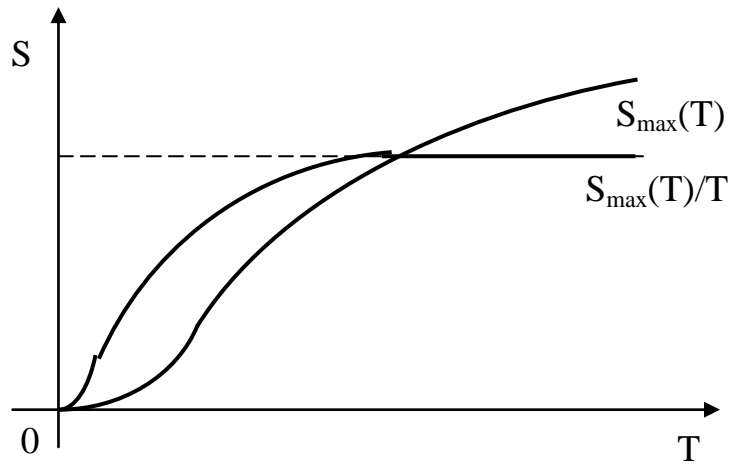


Рисунок 15 – Залежність чутливості контролю  $S$  від його тривалості  $T$

Підставимо формулу сигналу  $u_{ст}(t)$  у вираз (18) для  $S$  і після спрощення є:

$$S_{ст}(T) = E_c \left\{ 1 - \frac{3T_0}{2T} + \frac{2T_0}{T} e^{-\frac{T}{T_0}} - \frac{T_0}{2T} e^{-\frac{2T}{T_0}} \right\}. \quad (49)$$

Вирази (48) і (49) дозволяють визначити відношення величин  $S_{max}(T)/S_{ст}(T)$  при різних значеннях  $T$ . Результат розрахунків для деяких значень  $T$  наведено у таблиці 1. При  $T/T_0 \ll 1$  відношення  $S_{max}/S_{ст} = 1,22$ , а при  $T/T_0 \rightarrow \infty - S_{max}/S_{ст} \rightarrow 1$ . Максимальний виграш від застосування оптимальної методики буде при незначному часі контролю  $T/T_0 < 1$  і складає приблизно 20%. При більшому часі контролю  $T/T_0 > 1$  виграш зменшується також в області  $T \approx (3 \div 4)T_0$  й складає близько 10%.

Таблиця 1 – Результати розрахунку  $S_{max}(T)/S_{ст}(T)$

$T/T_0$	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
$S_{max}/S_{ст}$	1,20	1,18	1,14	1,13	1,12

На рисунку 16 представлено діаграму, яка характеризує час контролю  $T_k$  технічного стану передавача РНК за допомогою синтезованого складного тестового сигналу та відомих сигналів прямокутної та синусоїдної форми.

Результати аналізу залежностей на рисунку 15 і діаграми (рис. 16) доводить

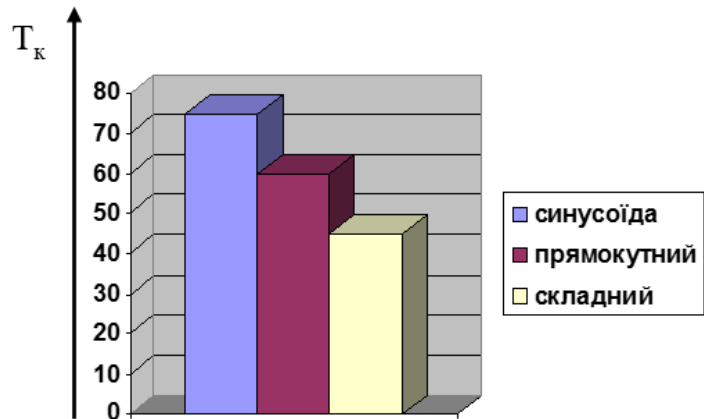


Рисунок 16 – Час контролю передавача різними формами сигналів

перевагу синтезованого сигналу у зменшенні часу контролю, тобто підвищення оперативності.

Результати комп'ютерного моделювання запропонованих методів синтезу тестових сигналів і обробки відгуків на них довели, що мета роботи, направлена на підвищення достовірності та оперативності проведення контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту за рахунок розробки методів синтезу та обробки тестових сигналів складної форми, досягнута.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновано розв'язання протиріччя, яке виникає при здійсненні контролю технічного стану складних систем: забезпечення заданої достовірності та оперативності отримання інформації про технічний стан РНК засобів водного транспорту потребує збільшення обсягу та точності вимірювань при оцінюванні їх характеристик з одного боку, а з іншого – відсутність методів автоматизації процесів контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту.

Основні результати дисертаційної роботи полягають у наступному.

*1. Проведено аналіз методів і засобів формування тестових сигналів для контролю РНК засобів водного транспорту, виділено переваги та недоліки кожного з методів. Результати проведеного аналізу дозволили обґрунтувати актуальність наукової проблеми, визначити часткові завдання дослідження та запропонувати методи проведення дослідження.*

*2. У дисертації наведено теоретичне узагальнення та нове розв'язання наукової проблеми розробки методів синтезу тестових сигналів і обробки відгуків на них для підвищення достовірності та оперативності контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту. Ця проблема розв'язується на базі розробки методів синтезу та обробки тестових сигналів і обґрунтування варіантів створення гнучких програмнокерованих калібраторів сигналів з нормованими характеристиками для контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту.*

У рамках поставленої проблеми розв'язані часткові завдання: проведено аналіз відомих методів синтезу тестових сигналів для контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту; вдосконалено метод обґрунтування критеріїв (кількісних оцінок) оптимальності синтезу тестових сигналів для автоматичного контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту; розроблено методи синтезу тестових сигналів для контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту, які працюють при пасивній і активній радіонавігації; вдосконалено метод обробки відгуку тестового сигналу (вихідного сигналу) РНК засобів водного транспорту; вдосконалено метод визначення технічного стану РНК засобів водного транспорту при їх автоматичному контролі; розроблено метод синтезу тестових сигналів з потрібним спектром для контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту; проведено перевірку отриманих теоретичних результатів і

розроблено рекомендації щодо їх впровадження для автоматичного контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту.

*3. Найбільш важливі наукові результати, які отримано в роботі:*

- отримав подальший розвиток метод обґрунтування критеріїв оптимальності синтезу вимірювальних сигналів, який відрізняється від відомих запропонованою реалізацією умовної апостеріорної функції розподілу параметрів контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту та дозволяє автоматизувати наявні процедури контролю їх технічного стану за рахунок врахування радіоелектронних завод;

- вперше отримано методи синтезу вхідних тестових сигналів, які дозволяють підвищити ефективність контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту за рахунок використання методів варіаційного числення і застосування в умовах пасивної та активної радіонавігації;

- отримали подальший розвиток методи обробки відгуку тестового сигналу для РНК засобів водного транспорту, які відрізняються від існуючих урахуванням характеристик розробленої апостеріорної функції розподілу параметрів контролю і вхідних вимірювальних сигналів та дозволяють автоматизувати процес визначення технічного стану РНК;

- отримав подальший розвиток метод синтезу тестових сигналів з потрібним спектром з використанням функції Лагранжа, який відрізняється від відомих оптимальним формуванням спектрального складу тестового сигналу та дозволяє забезпечити ефективний контроль технічного стану РНК засобів водного транспорту;

- отримав подальший розвиток метод визначення похибок координат засобів водного транспорту залежно від технічного стану РНК, який, на відміну від відомих, враховує функції втрат від помилок у визначенні маршруту руху і дозволяє оптимізувати час контролю при необхідному рівні достовірності та спростити процедуру для автоматичного контролю технічного стану РНК.

Запропоновані в роботі теоретичні основи і практичні методи синтезу тестових сигналів дозволили розробити алгоритми генерування тестових сигналів складної форми і обробки відгуків на них залежно від процедур контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту. Це дозволяє створити автоматичні прилади контролю. Автоматизація зменшить витрати часу на проведення контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту та підвищить його достовірність.

Результати імітаційного моделювання отриманих результатів показали, що для підвищення показників контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту (чутливості та достовірності контролю) необхідно використовувати сумарний синусоїдний сигнал, який складається з декількох гармонік (складний за формою сигнал). Кількість гармонік такого сигналу дорівнює половині параметрів, що контролюються. Наприклад, для аперіодичного ланцюга РНК застосування запропонованих тестових сигналів порівняно з відомим синусоїдним надає вигоду у чутливості до 20% при незначному часі контролю і до 10% при збільшенні часу контролю. За рахунок підвищення чутливості збільшується достовірність контролю. Порівняно з відомими прямокутними

сигналами виграш за оперативністю контролю від застосування запропонованих сигналів є ще більшим: до 40% при незначному часі контролю та до 20% при збільшенні часу контролю.

Показано, що збільшення чутливості контролю дозволяє підвищити достовірність контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту до (10...15)% при незначному часі контролю та до (5...10)% при значному часі контролю. Це свідчить також про підвищення оперативності контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту при використанні розроблених тестових сигналів (підвищенні коефіцієнта готовності РНК засобів водного транспорту до функціонування за призначенням). Крім того, отримані тестові сигнали за рахунок автоматизації операцій контролю підвищують кількість інформації про технічний стан РНК засобів водного транспорту, що контролюються. Це дозволяє зменшити імовірності помилок першого та другого роду, тобто підвищити достовірність контролю технічного стану РНК.

Отже, мета роботи, направлена на підвищення достовірності та оперативності контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту за рахунок розробки методів синтезу та обробки тестових сигналів складної форми, досягнута.

4. *Значення розв'язаної у дисертації задачі для науки та практики* полягає в розвитку теоретичних та прикладних основ обґрунтування складової системи технічного контролю РНК засобів водного транспорту – методів синтезу тестових сигналів і методів обробки відгуків на них.

5. *Методи дослідження.* Методологічною основою дисертаційного дослідження є системний підхід при розробленні теоретичних основ синтезу тестових сигналів і обробки відгуків на них. Для розв'язання поставлених часткових завдань у дисертації використані теорія чутливості динамічних систем, теорія контролю технічних систем, методи варіаційного числення та динамічного програмування, теорія оптимізації функцій і теорія матриць, методи математичного моделювання.

6. *Достовірність і обґрунтованість отриманих наукових результатів* підтверджується збігом певних часткових результатів дисертації з висновками, отриманими в попередніх працях дослідників: 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 цій області та не суперечать відомим положенням і результатам досліджень, наведеним у літературі.

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

Теоретичні та практичні результати можуть бути застосовані при створенні мобільних автоматичних контрольно-діагностичних комплексів для контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту, а також поширені на інші системи транспорту. Це дозволить скоротити витрати часу на проведення контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту та підвищити його достовірність, скоротити витрати на експлуатацію таких

засобів. Запропоновані у роботі методи синтезу та обробки, а також алгоритми роботи калібраторів (мір) і аналізаторів розроблених тестових сигналів можуть бути застосовані при створенні автоматичних приладів для перспективних інформаційних вимірювальних систем (комплексів).

Дисертаційна робота завершена, а її мета досягнута.

## **СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Богом'я В.І., Дакі О.А. Аналіз методів синтезу вимірювальних сигналів для контролю технічного стану радіонавігаційних комплексів управління рухом засобів водного транспорту. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2019. Вип. 33. Т. 1. С. 96–106. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2018-33-1-9>.

2. Богом'я В.І., Дакі О.А., Тимощук О.М. Аналіз вимірювальних сигналів для контролю технічного стану радіонавігаційних комплексів управління рухом засобів водного транспорту. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. Н.В. Вернадського*. 2019. Т. 30(69). № 3. Ч. 2. С. 137–142. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-2/24>.

3. Богом'я В.І., Тимощук О.М., Дакі О.А. Теоретичні основи синтезу вимірювальних сигналів для контролю технічного стану радіонавігаційних комплексів управління рухом засобів водного транспорту. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Вип. 9. Т. 1. DOI: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2019-1-16>.

4. Ганношина І.М., Дакі О.А. Метод автоматизації процесу визначення маршруту судна при плануванні переходу. *Системи обробки інформації*. 2019. № 2(157). С. 84–89. DOI: <https://doi.org/10.30748/soi.2019.157.11>.

5. Герасимов С.В., Яковлев М.Ю., Дакі О.А. Синтез полігармонійного вимірювального сигналу з будь-якою кількістю точок перемикання. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2018. № 79(2). С. 73–76. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2018/02/073>.

6. Дакі О.А., Асланов А.В., Билима Р.М., Дениченко А.А., Дехтяр В.В. Метод синтезу вимірювального сигналу для контролю технічного стану судових радіонавігаційних комплексів. *Новітні технології*. 2019. Вип. 2(9). С. 32–40. DOI: <https://doi.org/10.31180/2524-0102/2019.2.09.04>.

7. Дакі О.А. Метод розрахунку критерію чутливості контролю радіонавігаційних комплексів засобів водного транспорту. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2019. № 2(35). С. 184–189. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2019.35.24>.

8. Дакі О.А. Автоматичні прилади контролю параметрів систем управління та навігації засобів водного транспорту. *Новітні технології*. 2019. Вип. 1(8). С. 96–104. DOI: <https://doi.org/10.31180/2524-0102/2019.1.08.12>.

9. Дакі О.А., Штрибець В.В., Трофіменко А.О. Аналіз методів формування вимірювальних сигналів для контролю систем навігації та

управління рухом засобів водного транспорту. *Наукоємні технології*. 2019. № 1(41). С. 88–94. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.41.13534>.

10. Дакі 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. 458–464. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.40.13272>.

11. Дакі О.А., Трофименко А.О. Принципи побудови автоматичних приладів для контролю параметрів систем управління та навігації засобів водного транспорту. *Інформаційна безпека та інформаційні технології: монографія / за заг. ред. В.С. Пономаренко*. Харків, 2019. С. 77–91.

12. Дакі О.А. Метод розрахунку функції розподілу параметрів контролю радіонавігаційних комплексів засобів водного транспорту. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2019. № 2(154). С. 76–84. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2019.2.10>.

13. Дакі О.А. Методи синтезу вимірювальних сигналів з нормованим спектром. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2019. № 2(90). С. 89–98. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2019.2.08>.

14. Дакі О.А. Метод розрахунку критерію інформативності про технічний стан радіонавігаційних комплексів засобів водного транспорту. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 2(54). С. 7–11. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.2.007>.

15. Дакі О.А. Метод динамічного програмування щодо синтезу вхідного вимірювального сигналу для контролю технічного стану радіонавігаційних комплексів. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2019. № 3(155). С. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2019.3.07>.

16. Дакі О.А., Тимошук О.М., Богом'я В.І. 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>.

17. Данік О.В., Дакі О.А., Коломієць О.М., Горбань А.В. Верифікація технології експертного визначення уступки між вартістю та ефективністю системи навігації та управління рухом. *Новітні технології*. 2018. Вип. 1(5). С. 29–42.

18. Мусорин А.А., Трофименко І.В., Даки Е.А. Методы прогнозирования для определения технических параметров судового оборудования. *Новітні технології*. 2017. Вип. 1(3). С. 64–68.

19. Пліта Л.Л., Шевченко А.П., Дакі О.А. Особливості організації процесу експлуатації засобів річкового та морського транспорту. *Новітні технології*. 2019. Вип. 3(10). С. 6–12. DOI: <https://doi.org/10.31180/2524-0102/2019.3.10.01>.

20. Тимошук О.М., Коломієць О.М., Горбань А.В., Дакі О.А. Прикладні аспекти застосування пасивних радіотехнічних комплексів до вирішення задач контролю водних акваторій. *Новітні технології*. 2017. Вип. 2(4). С. 87–99.

21. Тимошук О.М., Дакі О.А., Коломієць О.М., Трофименко І.В. Критерій оптимальності процесу технічного обслуговування суднових комплексів. *Наука*

*і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2017. № 4(29). С. 132–136. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.29.18>.

22. Тимощук О.М., Дакі О.А., Коломієць О.М. Обґрунтування застосування сигналів з нормованим спектром для контролю технічного стану радіонавігаційних приладів засобів водного транспорту. *Новітні технології*. 2018. Вип. 2(6). С. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.31180/2524-0102/2018.2.06.05>.

23. Тимощук О.М., Дакі О.А. Пропозиції щодо удосконалення методів оцінки ефективності системи контролю технічного стану радіотехнічних систем засобів водного транспорту. *Прикладна радіоелектроніка*. 2019. Вип. 18. № 3,4. С. 116–122.

24. Тимощук О.М., Дакі О.А. Метод оптимізації параметрів вимірювального полігармонійного сигналу з використанням функції Лагранжа. *Вісник Східноукраїнського Національного університету імені В. Даля*. 2019. № 2 (250). С. 89–94.

25. Тимощук О.М., Дакі О.А. Метод синтезу вимірювального сигналу з будь-якою кількістю точок перемикавання. *Вісник Східноукраїнського Національного університету імені В. Даля*. 2019. № 3 (251). С. 176–180.

26. O. Daki, Nguen Van Huu, V. Pavlikov, A. Sobkolov, O. Tymoschuk, Imaging by aerospace radar systems with active aperture synthesis, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2019. Vol. 78, No. 14. P. 1233–1247. DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i14.20>.

27. O. Fomin, A. Lovska, O. Daki, V. Bohomia, O. Tymoshchuk, P. Prokopenko, The substantiation of the concept of creating containers with viscous-elastic connections in fitting. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. Vol. 14, No. 15. P. 2771–2776.

28. O. Fomin, A. Lovska, O. Daki, V. Bohomia, O. Tymoshchuk, V. Tkachenko. Determining the dynamic loading on an open-top wagon with a two-pipe girder beam. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3, No.7 (99). P. 18–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.166329>.

29. Tymoshchuk O.M., Daki O.A., Bohomia V.I., Bukariev A.O. Passive doppler navigation system using measurements of ship-based millimeter-wave radiometer. *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. 2019. Vol. 7. Issue 2. P. 89–103.

30. Герасимов С.В., Дакі О.А. Вимоги до генераторів сигналів для контролю технічного стану радіоелектронного обладнання. *Проблеми інформатизації: тези доп. 10-ої міжнар. наук.-техн. конф. К.: ДУТ*. 2018. С. 134. (Київ, 12-13 квітня 2018 р.).

31. Герасимов С.В., Дакі О.А. Калібратори полігармонічних сигналів для контролю технічного стану радіотехнічних систем. *Теорія та практика створення, розвитку і застосування високотехнологічних систем спеціального призначення з урахуванням досвіду антитерористичної операції: тези доп. XXII Всеукраїн. наук.-практ. конф. Житомир: ЖВІ*. 2018. С. 124–125. (Житомир, 26-27 квітня 2018 р.).

32. Дакі О.А. Методи прогнозування технічного стану параметрів суднового обладнання. *Стандартизація, сертифікація, метрологія та*

*менеджмент*: тези доп. наук.-практ. конф. К.: ДП «УкрНДНЦ». 2016. С. 17. (Київ, 25-29 квітня 2016 р.).

33. Дакі О.А., Трофименко А.О. Обґрунтування принципів побудови автоматичних приладів для контролю параметрів систем управління та навігації засобів водного транспорту. *Інформаційна безпека та інформаційні технології*: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. Х.: ХНЕУ, ЦУНТУ. 2019. С. 5. (Харків, 24-25 квітня 2019 р.).

34. Дакі О.А. Теоретичні основи синтезу оптимальних вимірювальних сигналів для оцінювання точності вимірювань параметрів руху засобів водного транспорту. *Водний транспорт: сучасний стан та перспективи розвитку*: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. Київ: ДУІТ. 2019. С. 380–381. (Київ, 16-17 травня 2019 р.).

35. Дакі О.А. Підхід до розрахунку функції розподілу параметрів контролю систем навігації та управління засобів водного транспорту. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління*: матер. 9-ої міжнар. наук.-техн. конф. Баку, Харків, Жиліна. 2019. С. 20. (Харків, 11-12 квітня 2019 р.).

36. Данік О.В., Дакі О.А., Коломієць О.М. Верифікація технології експертного визначення уступки між вартістю та ефективністю. *Інноваційні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу*: тези доп. наук.-техн. конф. К.: ДЕА. 2018. С. 59–60. (Київ, 24-25 квітня 2018 р.).

37. Тимощук Е.Н., Даки Е.А. Постановка задачі обоснования критериев синтеза измерительных сигналов для контроля радионавигационных комплексов управления движением средств водного транспорта. *Проблеми водного транспорта (Water transport problems; Azərbaycan Xəzər Dəniz Gəmiçiliyi)*: програм. XIV междунар. науч.-техн. конф. Баки. 2019. С. 14. (Баку, 2-3 травня 2019).

38. Тимощук О.М., Дакі О.А. Критерії синтезу вимірювальних сигналів для контролю радіонавігаційних комплексів управління рухом. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ*: тези доп. міжнар. наук.-техн. конф. Львів: НАСВ. 2019. С. 269. (Львів, 16-17 травня 2019 р.).

39. Тимощук О.М., Дакі О.А. Автоматичні прилади контролю систем управління та навігації засобів руху. *Новітні технології – для захисту повітряного простору*: тези доп. 15-ої міжнар. наук. конф. Харківського національного університету Повітряних Сил. Х.: ХНУПС. 2019. С. 316. (Харків, 10-11 квітня 2019).

40. Iasechko M., Atamanenko I., Daki O., Martynov I., Samsonov Yu., Mudryk V. The Use of the Solid-State Plasma-based Material for the Protection of Radio-electronic Means of Laser Emission. *Measurement Uncertainty: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects*. XVI Scientific Workshop UM\*2019 CAOL\*2019, September 6-8 SOZOPOL, BULGARIA. – P. 614.

## АНОТАЦІЯ

Дакі О.А. Теоретичні основи автоматизації контролю технічного стану радіонавігаційних комплексів засобів водного транспорту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» (05 – Технічні науки). – Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, 2020.

Мета дослідження – підвищення достовірності та оперативності контролю технічного стану радіонавігаційних комплексів (РНК) засобів водного транспорту за рахунок розробки методів синтезу та обробки тестових сигналів складної форми.

Наукова новизна отриманих у дисертації результатів наступна: отримав подальший розвиток метод обґрунтування критеріїв оптимальності синтезу тестових сигналів; вперше отримано методи синтезу вхідних тестових сигналів; отримали подальший розвиток методи обробки відгуку тестового сигналу для РНК засобів водного транспорту; отримав подальший розвиток метод синтезу тестових сигналів з потрібним спектром з використанням функції Лагранжа; отримав подальший розвиток метод визначення похибок координат засобів водного транспорту залежно від процедур контролю РНК.

Порівняно з відомими прямокутними сигналами вигреш часу від застосування запропонованих сигналів складає до 40% при незначному часі контролю та до 20% при збільшенні часу контролю. Підвищення достовірності контролю технічного стану РНК засобів водного транспорту становить до (10...15)% при незначному часі контролю та до (10...15)% при значному часі контролю.

Ключові слова: засоби водного транспорту, радіонавігаційні комплекси, контроль технічного стану, ефективність контролю, тестові сигнали, синтез, обробка, прилади контролю та діагностування.

## ABSTRACT

Daki O.A. Theoretical bases of automation of technical condition monitoring radio navigation complexes on water transport means. - Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for a doctoral degree in technical sciences: Speciality 05.22.20 «Operation and repair of transport means» (05 – Technical sciences). – State university of infrastructure and technologies, Kyiv, 2020.

The aim of the study is to increase the reliability and efficiency of monitoring technical condition of radio navigation complexes on water transport means due to the development of complex-formed test signals methods of synthesis and processing.

Scientific novelty of the results obtained in the dissertation is as follows: the method of justifying the criteria for optimality of test signals synthesis has been further developed; the methods of input test signals synthesis have been obtained for the first time; the methods of the test signal response processing for radio navigation

complexes on water transport means have been further developed; the method of synthesizing test signals with the necessary spectrum using Lagrange function has been further developed; the method of determining coordinates errors on water transport means, depending on the procedures of monitoring the technical condition of radio navigation complexes, has received the further development. Compared to the known rectangular signals, the time gain due to the application of the proposed signals is up to 40% with a short monitoring time and up to 20% with increased monitoring time. The increased reliability of technical condition monitoring radio navigation complexes on water transport means is up to (10...15)% with a short time of monitoring and up to (5...10)% with considerable time of monitoring.

Keywords: water transport means, radio navigation complexes, technical condition monitoring, monitoring efficiency, test signals, synthesis, processing, monitoring and diagnostics devices.

### **АННОТАЦИЯ**

Даки Е.А. Теоретические основы автоматизации контроля технического состояния радионавигационных комплексов средств водного транспорта. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.20 «Эксплуатация и ремонт средств транспорта» (05 – Технические науки). – Государственный университет инфраструктуры и технологий, Киев, 2020.

Цель исследования – повышение достоверности и оперативности контроля технического состояния РНК средств водного транспорта за счет разработки методов синтеза и обработки тестовых сигналов сложной формы.

В первой главе работы проведен анализ методов и средств формирования тестовых сигналов для контроля РНК средств водного транспорта. Сформулированы научная проблема и частичные задачи исследования, обоснованы методы исследования. Во втором разделе предложен метод обоснования критериев оптимальности синтеза тестовых сигналов для контроля технического состояния РНК средств водного транспорта. В третьем разделе разработаны методы синтеза тестовых сигналов для контроля технического состояния РНК средств водного транспорта. В четвертом разделе усовершенствован метод обработки отзывают тестовых сигналов РНК средств водного транспорта для повышения достоверности контроля их технического состояния. В пятом разделе обоснованы принципы построения цифровых автоматических приборов для контроля параметров РНК средств водного транспорта на базе предложенных методов синтеза и обработки тестовых сигналов. В шестом разделе приведены: разработанный метод определения погрешности координат средства водного транспорта во время маршрута в зависимости от процедур контроля технического состояния РНК, результаты практической реализации предложенных методов синтеза тестовых сигналов, также проведена оценка эффективности полученных научных результатов.

Научная новизна полученных в диссертации результатов следующая:

– получил дальнейшее развитие метод обоснования критериев оптимальности синтеза тестовых сигналов, который отличается от известных предложенной реализацией условной апостериорной функции распределения параметров контроля РНК средств водного транспорта и позволяет автоматизировать процедуры контроля их технического состояния при радиоэлектронных помехах;

– впервые получены методы синтеза входных тестовых сигналов, которые позволяют повысить эффективность контроля технического состояния РНК средств водного транспорта за счет использования методов вариационного исчисления и применения в условиях пассивной и активной радионавигации;

– получили дальнейшее развитие методы обработки отклика тестового сигнала для РНК средств водного транспорта, которые отличаются от известных учетом характеристик разработанной апостериорной функции распределения параметров контроля и входных тестовых сигналов, а также позволяют автоматизировать процесс определения технического состояния РНК;

– получил дальнейшее развитие метод синтеза тестовых сигналов с необходимым спектром с использованием функции Лагранжа, который отличается от известных оптимальным формированием спектрального состава тестового сигнала и позволяет обеспечить эффективность контроля технического состояния РНК средств водного транспорта;

– получил дальнейшее развитие метод определения погрешностей координат средств водного транспорта в зависимости от технического состояния РНК, который отличается от известных учетом функции потерь от ошибок определения маршрута движения и позволяет оптимизировать время контроля при необходимой достоверности, а также упростить процедуру для автоматического контроля технического состояния РНК.

Методологической основой исследования является системный подход при разработке теоретических основ синтеза и обработки тестовых сигналов. Для решения поставленных частных задач в диссертации использованы теория чувствительности динамических систем, теория контроля технических систем, методы вариационного исчисления, теория оптимизации функций и теория матриц, методы математического моделирования.

Результаты имитационного моделирования полученных результатов показали, что по сравнению с известными прямоугольными сигналами выигрыш во времени от применения предложенных сигналов составляет до 40% при незначительном времени контроля и до 20% при увеличении времени контроля. Повышение достоверность контроля технического состояния РНК средств водного транспорта составляет до (10...15)% при незначительном времени контроля и до (5...10)% при значительном времени контроля. Цель работы достигнута.

Ключевые слова: средства водного транспорта, радионавигационные комплексы, контроль технического состояния, эффективность контроля, тестовые сигналы, синтез, обработка, приборы контроля и диагностики.