

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)

Розробка лінійного цифрового фільтру сигналів для ідентифікації
лінійних об'єктів автоматизації
(тема)

Виконав:

студентки 3 (прискорений) курсу,
групи АКТСІу-21-1

Осман А. Я.

(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системна інженерія

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Ромашов Ю. В.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

Невлюдов І. Ш.

(прізвище, ініціали)

2024р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Системна інженерія
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові Осман Амірі Ясирівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка лінійного цифрового фільтру сигналів для ідентифікації лінійних об'єктів автоматизації

затверджена наказом по університету від “ 20 ” червня 2024р. № 478 Ст.

2. Термін подання студентом роботи “ 26 ” червня 2024р.

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1 Електромеханічні аналогії, рівняння Лагранжа 2-го роду;

3.2 Збурення сигналів, лінійні фільтри;

3.3 Передаточна функція та амплітудно-частотна характеристика;

3.4 Комп'ютерна система математичних розрахунків та моделювання

Scilab;

3.5 Середовище графічного моделювання Xcos системи Scilab.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ;

4.2 Роботехнічні системи та їх ідентифікація;

4.3 Застосування фільтрів для вирішення завдань ідентифікації роботехнічних системи;

4.4 Моделювання лінійного цифрового фільтру для ідентифікації лінійних об'єктів автоматизації;

4.5 Охорона праці;

4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 12 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Роботехнічні системи та їх ідентифікація</i>	<i>20.05 – 23.05.24</i>	<i>виконано</i>
2	<i>Застосування фільтрів для вирішення завдань ідентифікації роботехнічних системи</i>	<i>24.05 – 31.05.24</i>	<i>виконано</i>
3	<i>Моделювання лінійного цифрового фільтру для ідентифікації лінійних об'єктів автоматизації</i>	<i>01.06 – 09.06.24</i>	<i>виконано</i>
4	<i>Охорона праці</i>	<i>10.06 – 13.06.24</i>	<i>виконано</i>
5	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>14.06 – 16.06.24</i>	<i>виконано</i>
6	<i>Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk</i>	<i>17.06 – 19.06.24</i>	<i>виконано</i>
7	<i>Подання роботи на рецензію</i>	<i>20.06 – 22.06.24</i>	<i>виконано</i>
8	<i>Подання роботи на підпис зав. кафедри</i>	<i>23.06 – 25.06.24</i>	<i>виконано</i>
9	<i>Подання кваліфікаційної роботи в ЕК</i>	<i>26.06.24</i>	<i>виконано</i>

Дата видачі завдання 20.06.2024р.

Студент _____ Осман А. Я.
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Ромашов Ю. В.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

Я, як студентка ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавала і не одержувала допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«21» червня 2024 р. _____ Осман А. Я.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 69 с., 3 табл., 22 рисунок, 1 дод., 19 джерел.

ЛІНІЙНІ ФІЛЬТРИ, ЦИФРОВІ ФІЛЬТРИ, ІДЕНТИФІКАЦІЯ, УПРАВЛІННЯ, ОБ'ЄКТИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, РОБОТОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ, ОБРОБКА СИГНАЛІВ, КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

Об'єкт розробки – цифрові фільтри сигналів.

Предмет розробки – використання цифрових фільтрів сигналів щодо розв'язування задач ідентифікації об'єктів автоматизації.

Мета роботи – розробка цифрового фільтру сигналів, що досліджуються при розв'язуванні задач ідентифікації об'єктів автоматизації.

Методи дослідження – аналіз та узагальнення існуючих публікацій, комп'ютерне моделювання.

Цифрові фільтри сигналів – це область знань, що пов'язана із обробкою сигналів для відділення із них корисної інформації та має широкі застосування, починаючи від найпростіших іграшок до автоматизованих систем для заміни людей при виконанні важких, монотонних та небезпечних робіт.

Ядром цифрових фільтрів є програмно-апаратні засоби обчислювальної техніки. Забезпечена висока швидкість виконання обчислень надає насправді великі можливості щодо реалізації різноманітних цифрових фільтрів для обробки сигналів, які досліджуються при розв'язуванні задач ідентифікації об'єктів автоматизації.

Задачі дослідження спрямовані на реалізацію мети та містять огляд базових понять про робототехнічні системи, огляд підходів щодо управління робототехнічних систем, а також формулювання проблем ідентифікації та дослідження фільтрації сигналів для компенсації збурень.

ABSTRACT

Explanatory note: 69 pp., 3 tab., 22 figs., 1 appendices, 19 sources.

LINE FILTERS, DIGITAL FILTERS, IDENTIFICATION, CONTROL, AUTOMATION FACILITIES, ROBOTIC SYSTEMS, SIGNAL PROCESSING, COMPUTER SIMULATION.

The object of research is digital signal filters.

The subject of the study is the use of digital signal filters for solving automation object identification problems.

The purpose of the work is to develop a digital filter for signals that are investigated when solving problems of identification of automation objects.

Research methods – analysis and generalization of existing publications, computer modeling.

Digital signal filters is a field of knowledge related to processing signals to extract useful information from them and has a wide range of applications, ranging from the simplest toys to automated systems to replace people in performing difficult, monotonous and dangerous jobs.

The core of digital filters is computer hardware and software. The ensured high speed of calculations actually provides great opportunities for the implementation of various digital filters for signal processing, which are studied when solving the problems of identification of automation objects.

The research tasks are aimed at the realization of the goal and include an overview of the basic concepts of robotic systems, an overview of approaches to the control of robotic systems, as well as the formulation of identification problems and the study of signal filtering for disturbance compensation.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	8
Вступ	9
1 Робототехнічні системи та їхня ідентифікація.....	11
1.1 Поняття про робототехнічні системи.....	11
1.2 Управління робототехнічними системами	13
1.3 Проблеми ідентифікації та використання фільтрів.....	14
2 Застосування фільтрів для вирішення завдань ідентифікації РТС....	17
2.1 Математична модель робототехнічної системи	17
2.2 Ідентифікація робототехнічної системи.....	23
2.3 Визначення параметрів фільтрів сигналів	27
2.3.1 Огляд фільтрів	33
2.3.2 Лінійні фільтри	38
3 Моделювання лінійного цифрового фільтру для ідентифікації лінійних об'єктів автоматизації	40
3.1 Цифровий лінійний фільтр	46
3.2 Використання лінійного цифрового фільтру для компенсації збурень східчастого сигналу	47
3.3 Використання лінійного цифрового фільтру для компенсації збурень синусоїдального сигналу	54
4 Охорона праці	61
4.1 Аналіз умов праці в лабораторії	61
4.2 Промислова безпека в лабораторії	61
4.3 Виробнича санітарія і гігієна праці	62
4.4 Пожежна безпека лабораторії.....	64
Висновки	66
Перелік джерел посилання	67
Додаток А Демонстраційний матеріал	70

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БВПУ – блок вибору програми управління;

ЕД – електричний двигун;

ЕП – електропривод;

ЕРС – електро-рушійна сила;

ІУУ – інтелектуальна система управління;

МС – механічна система;

МЧ – механічна частина;

ПК – персональний комп'ютер;

РТС – робототехнічні системи;

ССІ – система ситуаційної ідентифікації.

ВСТУП

Велика увага до проблем ідентифікації обумовлена наявністю значної кількості неконтрольованих зовнішніх впливів які мають бути відповідним чином враховані при формування сигналів керування. Неперервне розв'язування задач ідентифікації протягом функціонування роботехнічних систем (РТС) дозволяє визначати зміну характеристик систем в наслідок неконтрольованих зовнішніх впливів.

Лінійний фільтр – динамічна система, яка застосовує якийсь лінійний оператор до вхідного сигналу для виділення, або відкидання певних частот сигналу та інших функцій по обробці вхідного сигналу. Лінійні фільтри широко застосовуються в електроніці, цифровій обробці сигналів і зображень, в оптиці, теорії управління та інших областях.

Найбільш часто вони використовуються для того, щоб прибрати небажані частоти вхідного сигналу, або для того щоб виділити потрібну смугу частот у сигналі. Існує велика кількість різних типів і модифікацій лінійних фільтрів, у статті описані найбільш поширені.

Похибки розв'язування задач ідентифікації зрозуміло призводять до похибок оцінки поточних параметрів які визначають характеристики РТС, що відповідним чином впливатиме на формування сигналів керування та призводитиме до погіршення якості функціонування РТС.

Метою роботи є огляд стану проблеми щодо ідентифікації робототехнічних систем.

Об'єкт дослідження – задачі ідентифікації робототехнічних систем.

Методи дослідження – аналіз та узагальнення існуючих публікацій.

Завданнями, які необхідно вирішити для досягнення мети є:

- провести огляд базових понять про роботехнічні системи;
- огляд підходів щодо управління робототехнічних систем;
- формулювання проблем ідентифікації;
- дослідження фільтрації сигналів для компенсації збурень.

Пояснювальну записку оформлено згідно з ДСТУ 3008:2015 [1], а також з рекомендаціями з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти [2-3].

1 РОБОТОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ ТА ЇХ ІДЕНТИФІКАЦІЯ

1.1 Поняття про робототехнічні системи

Сучасна робототехніка створюється на основі синтезу механіки та кібернетики і пропонує нові напрямки її розвитку. Для механіки це пов'язано з багатоланковими механізмами, такими як маніпулятори, для кібернетики це пов'язано з інтелектуальним керуванням, яке необхідне для останнього покоління роботів зі штучним інтелектом.

Таким чином задача робототехніки – це розвиток і синтез механіки та кібернетики з метою створення і застосування роботів і заснованих на їх використанні робототехнічних систем різного призначення.

Роботи виконують різні ролі в системах і комплексах, починаючи від основних виконавців функцій і закінчуючи допоміжною підтримкою обладнання, яке ці функції виконує. Системи та комплекси, автоматизовані за допомогою роботів, прийнято називати роботизованими. У робототехнічних системах і комплексах ті, в яких роботи виконують основні функції, називаються робототехнічними.

Сфера роботизованих систем охоплює різноманітний діапазон машин, починаючи від простих іграшок і закінчуючи повністю автономним виробничим обладнанням і механізмами, розробленими, щоб замінити людей у складних, виснажливих і небезпечних завданнях. В основі цих роботизованих систем лежить найсучасніше комп'ютерне обладнання та програмне забезпечення, які є основою. Завдяки винятковій швидкості обробки та інтелектуальним інструментам керування, що швидко реагують, вони пропонують широкі можливості для виконання точного та адаптивного керування робочими пристроями, враховуючи зовнішні впливи та неінформативні змінні [4].

Основні сфери застосування таких систем:

- авіаційна, космічна та військова техніка;
- промислові маніпулятори;
- станкобудування та обладнання для автоматизації технологічних процесів;
- медичне обладнання;
- сервісні системи;
- ігрові роботи та роботи з принципово новими типами руху.

Інакше кажучи, РТС – це виробнича система, яка працює за автоматизованою технологією й дає змогу відмовитись від технічної та супровідної документації та замінити її інформацією, що передається локальною мережею зв'язку або зосереджується на машинних носіях.

Для вирішення завдання управління роботом в умовах невизначеності спроектовано наступна архітектура системи інтелектуального управління (рисунок 1.1).

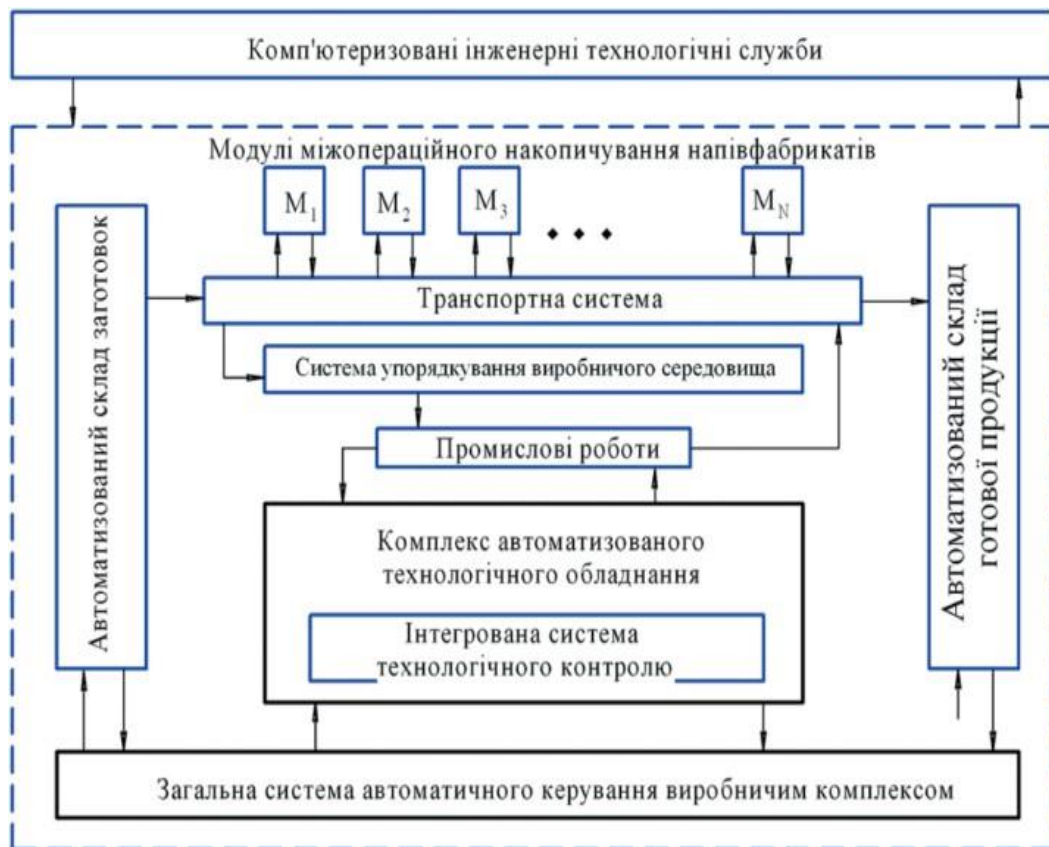


Рисунок 1.1 – Узагальнена структура РТС

Реалізація алгоритмів та програм інтелектуального управління робототехнічними системами за умов невизначеності пов'язані з низкою значних труднощів [4].

Складність алгоритмів попередньої обробки вхідної інформації та структурна невизначеність моделі поведінки самої робототехнічної системи зумовлюють надмірність структури системи інтелектуального управління.

Система ситуаційної ідентифікації (СІІ) має входити до складу будь-якої інтелектуальної системи управління робототехнічною системою. Інтелектуальний пристрій управління (ІУУ) містить у своєму складі БЗ та блок вибору програми управління (БВПУ) [5].

Призначення цього блоку – вироблення керуючого впливу системи електроприводів (ЕП), що впливають на механічну систему (МС) робота (рисунок 1.2).

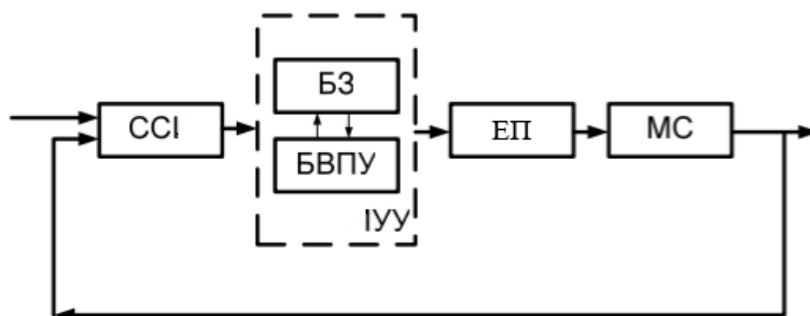


Рисунок 1.2 – Структурна схема системи інтелектуального керування робототехнічною системою

1.2 Управління робототехнічними системами

Традиційні системи управління промисловими маніпуляторами діляться на кілька класів. Перший клас систем – системи програмного управління.

Система безперервного керування робочим органом маніпулятора має на увазі підрівнювання маніпулятора під еталонну модель [6]. У такому алгоритмі управління не враховуються втрати в МС маніпулятора і

приймається, що всі зусилля приводами, що розвиваються, передаються робочий орган.

Система програмного управління силою в робочому органі застосовується для керування як по вектору сили, а й у векторі становища робочого органу.

Система незалежного управління переміщенням та зусиллям у робочому органі маніпулятора за різними ступенями рухливості має два контури управління зі зворотним зв'язком: за становищем і за силою.

У системі зв'язаного управління переміщенням та зусиллям у робочому органі маніпулятора завдання по вектору положення робочого органу коригується за поточним значенням сили вектора. Це означає, що під час руху робочого органу величина його ходу коригується за силою на зовнішнє середовище.

Адаптивні системи управління застосовуються, коли виконуються: операції взяття довільно розташованого або об'єкта, що переміщається, дугове зварювання швів з варіюваним положенням, обхід рухомих і непередбачених перешкод. З цією метою застосовуються адаптивні системи з асоціативною пам'яттю.

Для управління промисловими маніпуляторами застосовуються також області. системи управління, що у час знаходять широке практичне застосування.

1.3 Проблеми ідентифікації та використання фільтрів

Робототехнічні системи – це сукупність інформаційно-сенсорних, механічних виконавчих та мікроконтролерних керуючих пристроїв, що функціонують спільно з метою виконання заданого технологічного процесу чи операції.

Тому основними цілями та завданнями спеціалізації є:

– вивчення, розробка та дослідження структурних, алгоритмічних,

схемотехнічних та програмних рішень підсистем контролю та адаптивного управління виконавчими пристроями робототехнічних систем;

– отримання практичних навичок макетування та налагодження прикладного програмного забезпечення окремих компонентів та систем управління робототехнічних комплексів.

У теорії організації виробництва одним із найважливіших є поняття типу виробництва, під яким розуміють комплексну організаційно-технологічну характеристику виробничого процесу, що враховує ступінь його спеціалізації, різноманітність та стійкість номенклатури виробів, розміри їхніх партій, які запускаються у виробництво, ритмічність та повторність випуску виробів.

Тип виробництва визначає методи, що застосовуються для керування й організації як виробничого процесу, так і всієї виробничо-господарської діяльності підприємства. Діалектика розвитку основних методів виробництва показує, що на першому його етапі головним завданням було:

– збільшення обсягу виробництва досить обмеженого кола товарів шляхом зниження питомих витрат на випуск одиниці товару. Основний спосіб вирішення цього завдання зводився до поглиблення розподілу праці, коли робітник відносно вузької спеціалізації виконував найпростіші операції;

– стандартизація товарів;

– збільшення кількості окремих деталей (виробничої програми). Однак, починаючи з шістдесятих років ХХ століття, міняється структура попиту, коли за умови задоволення первинних потреб за основними видами товарів відбувається диференціація попиту за номенклатурою товарів і їхньою якістю.

Ця обставина визначила потенціальну перспективність робототехнічних систем (РТС). Одночасно всередині самого виробництва з'явилися фактори, що сприяли переходу до нової моделі виробництва:

– в технології – це зростання витрат, пов'язаних зі збільшенням номенклатури виробів;

– в організації – це деперсоналізація товаровиробника, коли кінцевий продукт став результатом діяльності різних робітників, що перешкоджає

підвищенню якості кінцевого продукту;

- в соціально-психологічній сфері – це та обставина, що тенденція до розподілу праці, спрощення операцій на одному робочому місці, використання конвеєрної системи для захисту ритму операцій сприяли зростанню частки низько кваліфікованих робітників, які виконують найпростіші операції, що багаторазово повторюються;

- в техніці – це розвиток технічних засобів і засобів обчислювальної техніки, зокрема поява багатоцільового автоматичного технологічного обладнання (наприклад, багатоопераційних верстатів із числовим програмним керуванням), промислових роботів, автоматичних вантажно-розвантажувальних пристроїв, транспортних і нагромаджувальних систем [6].

Таким чином, виникло соціально-економічне замовлення суспільства на створення РТС, яке може бути реалізоване сукупним використанням сучасних науково-технічних знань та технічних засобів. Визначення РТС – є сукупність інформаційно-сенсорних, механічних виконавчих і керуючих пристроїв, що функціонують разом з метою виконання заданого технологічного процесу або операції.

РТС реалізується у вигляді комплексу технологічного та транспортного обладнання в сукупності с промисловими роботами, що виконують основні або допоміжні технологічні операції в умовах автоматизованого виробництва. Робототехнічна система є сукупність підсистем, а саме:

- комп'ютеризованої інженерно-технологічної служби;
- комплексу автоматизованого технологічного обладнання з інтегрованою системою контролю, включаючи промислові роботи;
- автоматизованої транспортної системи, що поєднують склад заготовок, підсистему упорядкування виробничого середовища та склад готової продукції;
- загальної системи автоматичного керування виробничим комплексом.

Головна ознака РТС від інших організаційно-виробничих структур – властивість оперативного переналагодження при виробництві виробів довільної номенклатури [7].

2 ЗАСТОСУВАННЯ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ІДЕНТИФІКАЦІЇ РТС

Наявність збурень вимірюваних сигналів суттєво впливає на вирішення завдань ідентифікації РТС. Застосування фільтрів дозволяє усунути деякі види досліджуваних сигналів і завдання полягає в тому, щоб підібрати параметри таких фільтрів, які забезпечили б вирішення завдань ідентифікації РТС.

Досліджувані РТС представлені математичною моделлю і отримані результати з її допомогою використовуємо для вирішення задачі ідентифікації. При цьому маємо можливість оцінювати похибку ідентифікації шляхом зіставлення її результатів із параметрами використаної моделі.

2.1 Математична модель робототехнічної системи

РТС є електромеханічними системами з великою кількістю ступенів свободи.

Математичні моделі таких систем можна отримати за допомогою рівнянь Лагранжа 2-го роду:

$$\frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial L}{\partial q_k} = - \frac{\partial R}{\partial q_k} = Q_k, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (2.1)$$

де t — час;

q_k — узагальнена координата;

$\dot{q} = \frac{dq_k}{dt}$ — узагальнена швидкість;

n — число ступенів свободи;

L — функція Лагранжа;

R — дисипативна функція Релея;

Q_k – узагальнена сила, що відповідає координаті q_k і представляє непотенційну та недисипативну силу.

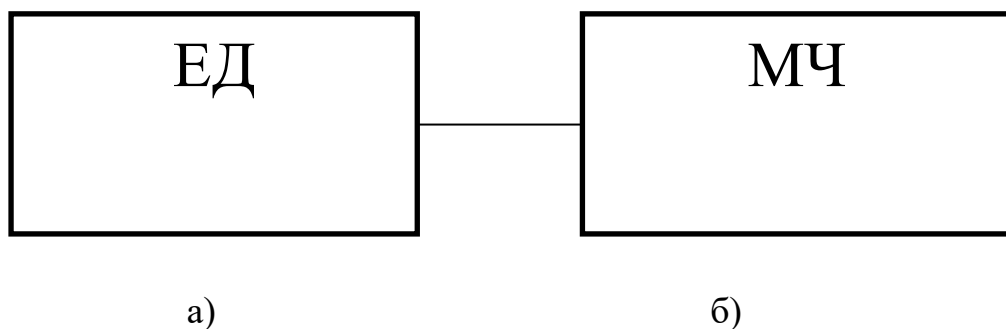
Характерною рисою РТС і те, що узагальнені координати мають механічну та електричну природу, оскільки РТС – електромеханічні.

Електромеханічна природа РТС відповідним чином враховується у виразах L , R та Q_k .

Існуючі РТС влаштовані таким чином, що рух, що відповідає окремому ступені свободи, забезпечується власним електродвигуном, кількість електродвигунів збігається з числом ступенів свободи РТС як чисто механічної системи [12].

Якщо рух РТС відбувається лише за рахунок одного ступеня свободи, то при такому русі РТС має один суто механічний ступінь свободи, який забезпечується відповідним електродвигуном.

З урахуванням цього можна розглядати окремі рухи, що відповідають кожному з ступенів свободи, таким чином, без втрати спільності міркувань будемо розглядати далі, що окремі рухи РТС, що відповідають будь-якій з чисто механічних ступенів свободи (рисунок 2.1).



а – електричний двигун; б – механічна частина

Рисунок 2.1 – Спрощена модель РТС

Найчастіше у РТС застосовують двигуни постійного струму. Такі двигуни зазвичай характеризуються активним опором R та індуктивністю L обмотки, прикладеним напругою U живлення та ЕРС (електро-рушійною силою)

самоіндукції E_{ω} , яке пропорційно кутовій швидкості обертання ротора [13]:

$$E_{\omega} = B_E \omega, \quad (2.2)$$

де $B(e)$ – параметр ЕД;

ω – кутова швидкість ротора ЕД.

Обертаний момент, що створюється електродвигуном пропорційний силі струму в ланцюзі:

$$M_e = B_e I, \quad (2.3)$$

де $M(e)$ – обертальний момент ЕД

I – сила струму в ланцюзі обмотки ротора ЕД

Природно як узагальнену механічну координату РТС вибрати кут повороту ротора приводного електродвигуна. Таким чином у найпростішому випадку РТС може розглядатися як електромеханічна система з двома ($n=2$) ступенями свободи та узагальненими координатами:

$$q_1 = \varphi; q_2 = \kappa, \quad (2.4)$$

де φ – кут повороту ротора ЕД

κ – заряд у ланцюзі обмотки ротора ЕД

При цьому функція Лагранжа, функція Релея, узагальнені сили записуються так:

$$L = \frac{1}{2} J(q_1) \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} L \dot{q}_2^2,$$

$$R = \frac{1}{2} b \dot{q}^2 + \frac{1}{2} R \dot{q}_2^2, \quad (2.5)$$

$$Q_1 = B_e \dot{q}_2,$$

$$Q_2 = U_e - B_e \dot{q}_1.$$

Підставимо вираз (2.5) рівняння Лагранжа 2-го роду (2.1).

$$\frac{dL}{dq} = J\dot{q}_1,$$

$$\frac{dJ}{dq} \dot{q}_1^2 + J\dot{q}_1 - \frac{1}{2} \frac{dJ}{dq_1} \dot{q}_1^2 = -b\dot{q}_1 + B_E \dot{q}_2, \quad (2.5)$$

$$L\ddot{q}_2 = -R\dot{q}_2 + U_e - B_e \dot{q}_1.$$

Оскільки розглядається рух, що відповідає лише одному ступені свободи за відсутності інших рухів, то можемо прийняти

$$\frac{dJ}{dq_1} = 0 \Rightarrow J(q_1) = J = \cos A. \quad (2.7)$$

Таким чином, рівняння математичної моделі РТС у найпростішому випадку мають вигляд

$$J\ddot{q}_1 = -b\dot{q}_1 + B_E \dot{q}_2,$$

$$L\ddot{q}_2 = -R\dot{q}_2 + U_e - B_e \dot{q}_1. \quad (2.8)$$

Рівняння (2.8) можна спростити шляхом зниження порядку:

$$\omega = \dot{q}_1; I = \dot{q}_2, \quad (2.9)$$

$$L\dot{\omega} = -b\omega + B_e I,$$

$$L\dot{I} = -B_e\omega - RI + U_e. \quad (2.10)$$

З першого рівняння (2.10) отримуємо:

$$I = \frac{J}{B_e}\dot{\omega} + \frac{b}{B_e}\omega. \quad (2.11)$$

Підставимо вираз (2.11) у друге рівняння (2.10)

$$L\left(\frac{J}{B_e}\ddot{\omega} + \frac{b}{B_e}\dot{\omega}\right) = -B_e\omega - R\left(\frac{J}{B_e}\dot{\omega} + \frac{b}{B_e}\omega\right) + U_e. \quad (2.12)$$

Наведемо подібні доданки у виразі (2.12)

$$\frac{LJ}{B_e}\ddot{\omega} + \frac{Lb+RJ}{B_e}\dot{\omega} + B_e + \frac{Rb}{B_e}\omega = U_e. \quad (2.13)$$

Таким чином, математичні моделі РТС у найпростішому випадку зводяться до диференціального рівняння 2-го порядку щодо кутової швидкості ротора ЕД виду (2.13), об'єкти автоматизації зручно представляти у вигляді динамічних ланок, які у випадку РТС мають вигляд якої наведено на рисунку 2.2.

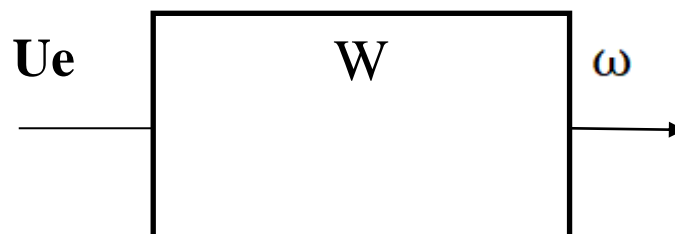


Рисунок 2.2 – Модель РТС у вигляді динамічної ланки

Введемо загальноприйняті у ТАУ позначення (рисунок 2.3):

$$U_e = U; \omega = x. \quad (2.14)$$

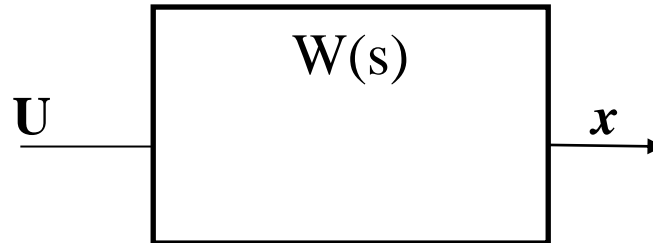


Рисунок 2.3 – Узагальнене подання математичної моделі РТС

З урахуванням позначень (2.14), рівняння (2.15) набуде вигляду:

$$a_2 \frac{d^2x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = u, \quad (2.15)$$

$$a_2 = \frac{JL}{B_e},$$

$$a_1 = \frac{Lb + RJ}{B_e},$$

$$a_0 = B_e + \frac{Rb}{B_e}.$$

Диференціальне рівняння (2.15) є лінійним, так що досліджувану РТС можна подати у вигляді динамічної ланки (рисунок 2.4) з передавальною функцією:

$$W = \frac{1}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}. \quad (2.16)$$

Таким чином, завдання ідентифікації РТС зводиться до задачі ідентифікації лінійної динамічної ланки 2-го порядку.

2.2 Ідентифікація робототехнічної системи

Як було показано вище, математична модель робототехнічної системи можна представити у вигляді звичайного дифференціального рівняння 2-го порядку, яке розглядатимемо із нульовими початковими умовами. Отже математичну модель робототехнічної системи представляємо у вигляді лінійної динамічної ланки (рисунок 2.3) 2-го порядку.

$$a_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = u(t),$$

$$x(0) = 0; \frac{dx}{dt}(0) = 0, \quad (2.17)$$

де a_0, a_1, a_2 – параметри системи.

Ідентифікація системи (2.17) полягати в тому щоб за заданим управлінням та вимірним результуючим сигналом визначити параметри робототехнічної системи a_0, a_1, a_2 :

$$u(t), x(t) \rightarrow a_0, a_1, a_2. \quad (2.18)$$

Для розв'язування задачі ідентифікації використовуємо метод найменших квадратів. Для цього розглядаємо оцифровані сигнали $u(t)$ та $x(t)$ (рисунок 2.1):

$$t_1, t_2, \dots, t_k, \dots, t_n,$$

$$u_1, u_2, \dots, u_k, \dots, u_n, \quad (2.19)$$

$$x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n,$$

де $t_k - t_{k-1} = \Delta t$ – інтервал дискретизації

$u_k = u(t_k)$, $x_k = x(t_k)$ – значення вхідного та вихідного сигналу в моменти дискретизації

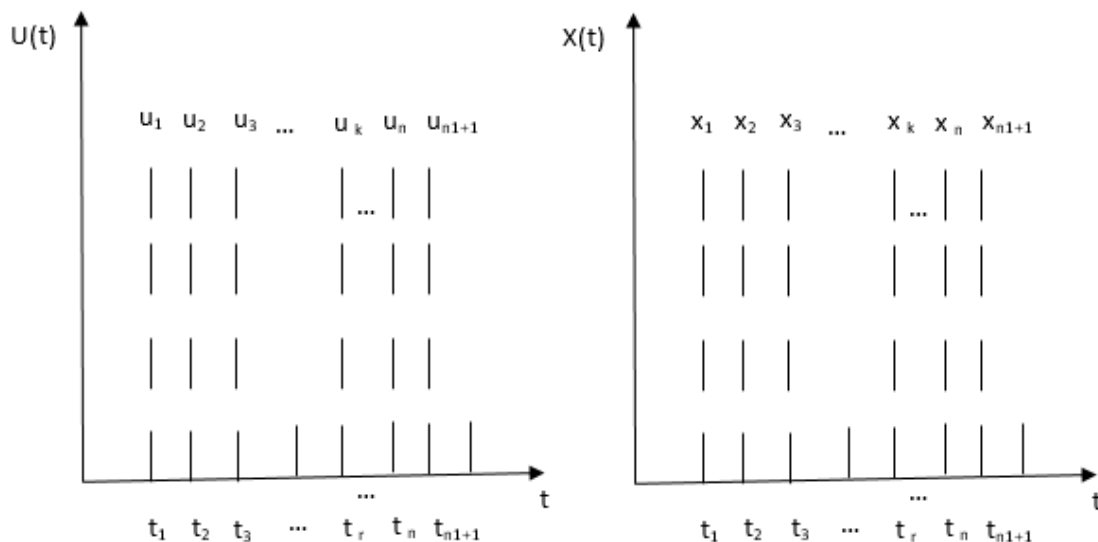


Рисунок 2.4 – Дискретизація досліджуваних сигналів

Для застосування методу найменших квадратів з урахуванням дискретного подання (2.19) досліджуваних сигналів (рисунок 2.4) використовуємо наступне добре відоме кінцево-різницевої формули:

$$\frac{dx_k}{dt} = \frac{x_{k+1} - x_{k-1}}{2\Delta t}, \quad \frac{d^2x_k}{dt^2} = \frac{x_{k-1} - 2x_k + x_{k+1}}{\Delta t^2}. \quad (2.20)$$

З урахуванням співвідношень (2.20) диференціальні рівняння набуде наступного вигляду:

$$a_2 \frac{x_{k+1} - 2x_k + x_{k-1}}{\Delta t^2} + a_1 \frac{x_{k+1} - x_{k-1}}{2\Delta t} + a_0 x_k = A_k. \quad (2.21)$$

Відповідно до методу найменших квадратів визначаємо нев'язку рівняння (2.21) у вигляді суми квадратів похибки виконання цього рівняння:

$$s = \sum_{k=2}^{n-1} \left(a_2 \frac{x_{k+1} - 2x_k + x_{k-1}}{\Delta t^2} + a_1 \frac{x_{k+1} - x_{k-1}}{2\Delta t} + a_0 x_k - u_k \right)^2. \quad (2.22)$$

Для скорочення запису введемо позначення:

$$D'_k = \frac{x_{k+1} - x_{k-1}}{2\Delta t}; \quad D''_k = \frac{x_{k+1} - 2x_k + x_{k-1}}{\Delta t^2}. \quad (2.23)$$

З урахуванням позначень (2.23) вираз (2.22) набуде вигляду:

$$S = \sum_{k=2}^n (a_2 D''_k + a_1 D'_k + a_0 x_k - u_k)^2. \quad (2.24)$$

Відповідно до методу найменших квадратів параметри a_0 , a_1 , a_2 визначимо так, щоб нев'язка (2.24) була мінімальною. У результаті визначення a_0 , a_1 , a_2 маємо три рівняння:

$$\frac{ds}{da_0} = 0; \quad \frac{ds}{da_1} = 0; \quad \frac{ds}{da_2} = 0. \quad (2.25)$$

Підставимо вираз нев'язки (2.24) за умови мінімуму (2.25)

$$\sum_{k=2}^{n-1} (a_2 D''_k + a_1 D'_k + a_0 x_k - u_k) x_k = 0,$$

$$\sum_{k=2}^{n-1} (a_2 D''_k + a_1 D'_k + a_0 x_k - u_k) D'_k = 0, \quad (2.26)$$

$$\sum_{k=2}^{n-1} (a_2 D''_k + a_1 D'_k + a_0 x_k - u_k) D''_k = 0.$$

Рівняння (2.26) – це система лінійних рівнянь алгебри щодо параметрів a_0, a_1, a_2 . Запишемо цю систему у зручнішому вигляді:

$$\left(\sum_{k=2}^{n-1} D_k'' x_k \right) a_2 + \left(\sum_{k=2}^{n-1} D_k' x_k \right) a_1 + \left(\sum_{k=2}^{n-1} x_k^2 \right) a_0 = \sum_{k=2}^{n-1} u_k x_k,$$

$$\left(\sum_{k=2}^{n-1} D_k'' D_k' \right) a_2 + \left(\sum_{k=2}^{n-1} (D_k')^2 \right) a_1 + \left(\sum_{k=2}^{n-1} x_k D_k' \right) a_0 = \sum_{k=2}^{n-1} u_k D_k', \quad (2.27)$$

$$\left(\sum_{k=2}^{n-1} (D_k'')^2 \right) a_2 + \left(\sum_{k=2}^{n-1} D_k' D_k'' \right) a_1 + \left(\sum_{k=2}^{n-1} x_k D_k \right) a_0 = \sum_{k=2}^{n-1} u_k D''.$$

Рішення системи лінійних рівнянь алгебри (2.27) краще здійснювати численно за допомогою комп'ютера, а для цього систему (2.27), зручно представити в матрично-векторній формі. Для цього введемо таке позначення:

$$\{a\} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix},$$

$$[U] = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{pmatrix}, \quad (2.28)$$

$$b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix},$$

$$\text{де } u_{11} = \sum_{k=2}^{n-1} D_k'' x_k;$$

$$u_{12} = \sum_{k=2}^{n-1} D_k' x_k;$$

$$u_{13} = \sum_{k=2}^{n-1} x_k^2;$$

$$u_{21} = \sum_{k=2}^{n-1} D_k'' D_k';$$

$$u_{22} = \sum_{k=2}^{n-1} (D_k')^2;$$

$$\begin{aligned}
 u_{23} &= \sum_{k=2}^{n-1} x_k D'_k ; \\
 u_{31} &= \sum_{k=2}^{n-1} (D''_k)^2 ; \\
 u_{32} &= \sum_{k=2}^{n-1} D'_k D''_k ; \\
 u_{33} &= \sum_{k=2}^{n-1} x_k D''_k .
 \end{aligned}$$

З обліків введених позначень (2.28) система лінійних рівнянь алгебри (2.27) набуде вигляду:

$$[u] \cdot \{a\} = \{b\} . \quad (2.29)$$

Таким чином рішення задачі ідентифікації РТС можна записати у вигляді:

$$\{a\} = [u] \cdot \{b\} . \quad (2.30)$$

Розв'язання задачі (2.30) не становить важливих труднощів.

2.3 Визначення параметрів фільтрів сигналів

Збурення вимірюваних сигналів можуть мати значний вплив на результат розв'язування задачі ідентифікації.

Спочатку виконаємо дослідження щодо сутності впливу збурень досліджуваних сигналів на результати розв'язування задачі ідентифікації об'єктів автоматизації.

Збурення сигналів зводимо далі до не пов'язаних із властивостями досліджуваного об'єкту автоматизації відхилень результуючого сигналу від його вигляду, відповідного виключно властивостям досліджуваного об'єкту автоматизації, який представляється у вигляді динамічної ланки:

$$u(t) \xrightarrow{W(s)+\hat{W}(s)} \tilde{x}(t), \quad \tilde{x}(t) = x(t) + \hat{x}(t) \quad (2.31)$$

де $u(t)$ – випробувальний сигнал, що використовується для ідентифікації об'єкту автоматизації;

$W(s)$ – передаточна функція досліджуваного об'єкту автоматизації та незалежних від нього збурень результуючого сигналу;

$x(t)$ – результуючий сигнал, що містить складову $x(t)$, яка визначається властивостями досліджуваного об'єкту автоматизації, та складову, що обумовлена наявністю збурень, які не залежать від властивостей досліджуваного об'єкту автоматизації.

Розглядатимемо далі виключно важливий з практичної точки зору випадок обмежених малих збурень:

$$|\hat{x}(t)| \leq \varepsilon_x \quad (2.32)$$

де $\varepsilon_x > 0$ – похибка результуючого сигналу, яка обумовлена наявністю збурень та є малою величиною.

Досліджуваний об'єкт автоматизації та збурення результуючого сигналу наведено на рисунку 2.5.

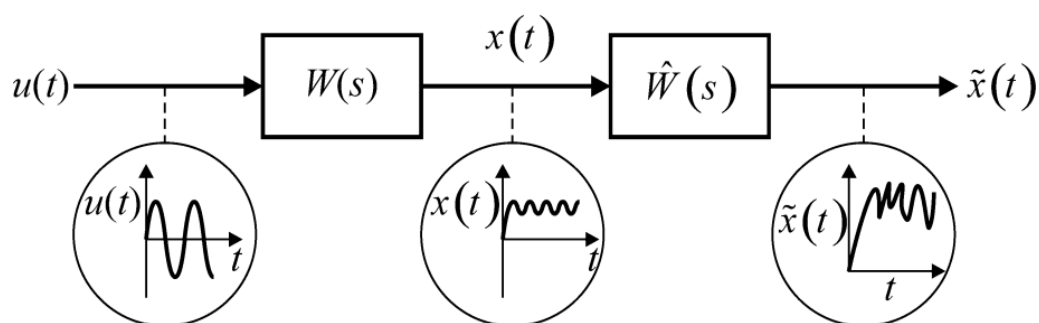


Рисунок 2.5 – Досліджуваний об'єкт автоматизації та збурення результуючого сигналу

Наближена рівність не забезпечує у загальному випадку малої похибки результатів ідентифікації, що можна показати на приладі досліджуваного об'єкту автоматизації, математична модель якого визначається лінійним звичайним диференціальним рівнянням.

Похідна збуреного сигналу може нескінченно відрізнятись від похідної незбуреного сигналу, якщо згадати про геометричний зміст поняття про похідну як тангенс кута нахилу дотичної по кривій, що відображає функцію. Дійсно, навіть при малому збуренні, похідна збуреного сигналу досить помітно відрізняється від похідної незбуреного сигналу, причому, навіть, змінює знак. Зрозуміло, що за умов нескінченної похибки похідної збуреного сигналу результати ідентифікації відповідно співвідношенню також будуть мати нескінченну похибку.

Розглянемо далі загальну ідею фільтрації сигналів та можливості щодо її використання для зменшення впливу збурень досліджуваних сигналів на результати ідентифікації об'єктів автоматизації (рисунок 2.6).

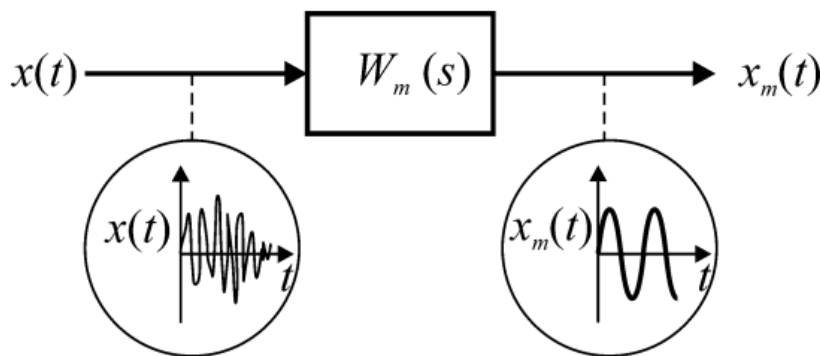


Рисунок 2.6 – Фільтрація сигналу

Пристрій, який здійснює виділення заданої гармоніки із складного сигналу називають фільтром. Таким чином, проблему фільтрації можна звести до визначення передаточної функції фільтру. Досить розповсюдженими є лінійні фільтри другого порядку [13].

Для отримання АЧХ лінійного фільтра ми приймаємо:

$$S = i\omega \quad (2.33)$$

Виконаємо перетворення:

$$W_m(i\omega) = \frac{b}{(i\omega)^2 + 2w(i\omega) + p^2},$$

$$W_m(i\omega) = \frac{b}{p^2 - \omega^2 + i2n\omega}.$$

Скоротимо подібні знаменники до нормального вигляду:

$$W_m(i\omega) = \frac{b}{p^2 - \omega^2 + i2n\omega} \cdot \frac{p^2 - \omega^2 - i2n\omega}{p^2 - \omega^2 - i2n\omega} =$$

$$\frac{b(p^2 - \omega^2)}{(p^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2} - i \cdot \frac{2nb\omega}{(p^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}. \quad (2.34)$$

Таким чином отримуємо речовинну та уявну частину АЧХ у такому вигляді:

$$R_e(W_m(i\omega)) = \frac{b(p^2 - \omega^2)}{(p^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2},$$

$$R_m(W_m(i\omega)) = -\frac{2nb\omega}{(p^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}. \quad (2.35)$$

Далі використовуємо відоме співвідношення визначення залежності АЧХ:

$$A(\omega) = \sqrt{R_e^2(W_m(i\omega)) + I_m^2(W_m(i\omega))}, \quad (2.36)$$

$$A(\omega) = \sqrt{\frac{b^2(p^2 - \omega^2)^2}{((p^2 - \omega^2) + 4n^2\omega^2)^2}} + \frac{4n^2b^2\omega^2}{((p^2 - \omega^2) + 4n^2\omega^2)^2} =$$

$$\sqrt{\frac{b^2(p^2 - \omega^2)^2 + 4n^2b^2\omega^2}{((p^2 - \omega^2) + 4n^2\omega^2)^2}} =$$

$$\sqrt{\frac{b^2(p^2 - \omega^2 + 4n^2\omega^2)}{((p^2 - \omega^2) + 4n^2\omega^2)^2}} = \sqrt{\frac{b^2}{(p^2 - \omega^2 + 4n^2\omega^2)}} , \quad (2.36)$$

$$A(\omega) = \frac{b}{\sqrt{(p^2 - \omega^2) + 4n^2\omega^2}} , \quad (2.37)$$

$$A(\omega) \rightarrow \max ; D = (p^2 - \omega^2) + 4n^2\omega^2 \rightarrow \min. \quad (2.38)$$

Умови мінімуму $D(\omega)$:

$$\frac{dD}{d\omega} = 0 , \quad (2.39)$$

$$\frac{dD}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} ((p^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2) =$$

$$2(p^2 - \omega^2)(-2\omega) + 8n^2\omega =$$

$$-4(p^2 - \omega^2)\omega + 8n^2\omega =$$

$$-4p^2\omega + 4\omega^3 + 8n^2\omega = 4\omega^3 + 4\omega(2n^2 - p^2), \quad (2.40)$$

$$\frac{dD}{d\omega} = 0 \Rightarrow \omega^3 + \omega(2n^2 - p^2) = 0, \quad (2.41)$$

$$\omega(\omega^2 + (2n^2 - p^2)) = 0,$$

$$\omega = 0, \quad \omega^2 + (2n^2 - p^2) = 0,$$

$$\omega^2 = p^2 - 2n^2 \Rightarrow \omega_* = \sqrt{p^2 - 2n^2}, \quad (2.42)$$

$$A_* = A(\omega_*), \quad (2.43)$$

$$\begin{aligned} A_* &= \frac{b}{\sqrt{(p^2 - (p^2 - n^2))^2 + 4n^2(p^2 - 2n^2)}} = \frac{b}{\sqrt{(p^2 - p^2 + 2n^2)^2 + 4n^2(p^2 - 2n^2)}} = \\ &= \frac{b}{\sqrt{4n^4 + 4n^2p^2 - 8n^4}} = \frac{b}{\sqrt{4n^2p^2 - 4n^4}}. \end{aligned} \quad (2.44)$$

Таким чином отримуємо кінцеву формулу:

$$A_* = \frac{b}{2n\sqrt{p^2 - n^2}}. \quad (2.45)$$

АЧХ фільтру другого порядку наведена на рисунку 2.7.

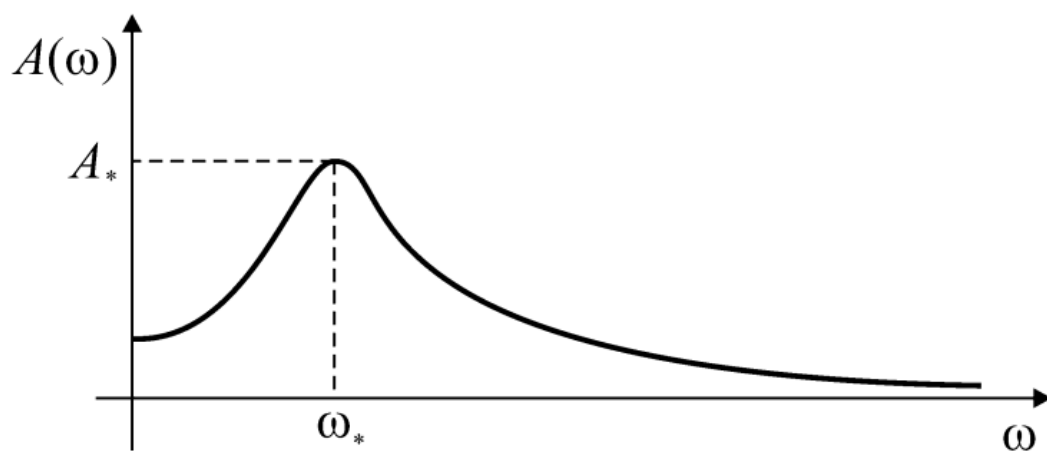


Рисунок 2.7 – Амплітудно-частотна характеристика фільтру другого порядку.

Основна ідея вибору параметрів фільтру другого порядку полягає в тому, щоб частота ω_* , яка відповідає максимуму амплітуди, дорівнювала частоті ω_m , складової, яка має бути відфільтрованою, та щоб амплітуда цієї складової не була зміненою.

Отже маємо нескінченну кількість фільтрів другого порядку, що відповідають різним значенням параметру n передаточної функції фільтру. Слід підкреслити, що вибір параметрів фільтру у вигляді є ілюстративним для роз'яснення загальної ідеї фільтрації і не є оптимальним для забезпечення найкращої фільтрації, оскільки при такому виборі параметрів не враховано фазово-частотну характеристику, тобто зміну фази відфільтрованого сигналу. В той же час, підбір параметрів фільтру у вигляді повністю відповідає меті даної лабораторної роботи і є досить нескладним та зрозумілим.

2.3.1 Огляд фільтрів

Фільтри в широкому значенні слова є приладами або пристроями, за допомогою яких можна відокремити один від одного предмети, явища, що володіють різними характеристиками. Так, наприклад, механічні фільтри, що зустрічаються в повсякденному житті майже на кожному кроці, стали для нас часто настільки звичайним явищем, що ми не замислюємося навіть над тим, що той чи інший прилад або пристрій є не що інше, як фільтр, наприклад сито. просіювання борошна, сітка для відокремлення кавової гущі від рідини, прилади для очищення води тощо. частот, бажано відокремити струми однієї частоти від струмів іншої частоти або затримати проходження певної смуги частот і надати іншій смузі частот вільний шлях, або навпаки.

Майже бездоганна робота сучасних радіопристроїв-передавачів, приймачів, телевізійних і радіолокаційних пристроїв тощо – є результатом широкого застосування електричних фільтрів як у силовій частині, так і у високочастотних і низькочастотних частинах цих пристроїв. Електричні фільтри мають дуже широке застосування у сучасній техніці.

Вони знаходять застосування щодо характеристик устаткування зв'язку, при передачі імпульсів складної форми, які є, наприклад, мова, музика тощо. Вони дають можливість розкласти складний звук на його складові частоти для вивчення або виділення для будь-яких інших потреб. Вони широко використовуються, наприклад, у телефонії для виправлення деяких з її недоліків для послаблення одних частот або для виділення, надання більшої виразності іншим частотам.

За допомогою так званих смугових фільтрів можна виділити цілі смуги частот.

Це дає можливість проводити по одній і тій же лінії телефонного ланцюга або по радіо одночасно кілька передач або розмов, а потім ці передачі на приймальному пункті відокремити один від одного. Наприклад, у мультиплексній схемі, відомій під назвою телефонії на несучій частоті, по одній і тій же парі проводів можна передавати одночасно 10 телеграфних депеш на 10 різних частотах, що лежать трохи вище звукових частот, дві звичайні телеграфні передачі на постійному струмі, тобто на нульовій частоті, і звичайна телефонна розмова.

Поділ всіх цих одночасних передач здійснюється в місці прийому за допомогою електричних фільтрів, кожен з яких виділяє тільки ту смугу частот, для пропуску якої він призначений, і підводить цю смугу частот до відповідного апарату, не пропускаючи в той же час до нього всі інші цієї передачі [14].

Дія всіх типів електричних фільтрів ґрунтується на наступних чотирьох законах ланцюгів змінного струму.

Індуктивність становить значно менший опір проходженню через неї низької частоти або струму постійного постійний струм – можна розглядати як струм змінний, частота якого дорівнює нулю, ніж струмів високої частоти.

Дійсно, з теорії електротехніки відомо, що чиста індуктивність, тобто котушка, що не містить в собі жодних активних опорів, що зумовлюють в ній втрату потужності і не володіє власною ємністю, представляє реактивний опір,

що визначається формулою:

$$x_L = \omega L = 2\pi f,$$

де $\pi = 3,14$;

f – частота проходить через індуктивність струму;

L – величина індуктивності.

Коли частота f струму, що проходить через індуктивність, дорівнює нулю, тобто через індуктивність проходить постійний струм, то $X_L = 6,28 \cdot L = 0$ – індуктивний опір котушки постійному струму дорівнює нулю.

У міру збільшення частоти пропорційно зростанню останньої буде лікуватись і індуктивний реактивний опір котушки. Цей закон ілюстрований графічно на рисунку 2.8, звідки видно, що індуктивне опір зростає пропорційно збільшенню частоти струму, що проходить через дану котушку струму.

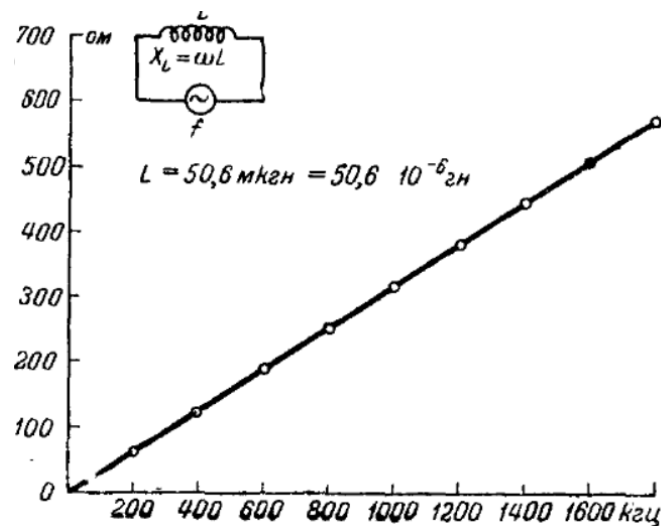


Рисунок 2.8 – Криві зміни реактивного опору індуктивності залежно від частоти

Фактично будь-яка котушка має деякий активний опір, що враховує всі втрати потужності, що мають у ній: втрати в міді дроту, в ізоляції каркаса, втрати в навколишніх котушку предметах тощо. Цей активний опір R_L збільшує

повний опір котушки, і котушка втрачає свої властивості чистої (ідеальної) індуктивності. Але зазвичай у правильно розрахованої і сконструйованої котушки цей активний опір R_L у тому діапазоні частот, для роботи в якому вона призначена, дуже мало в порівнянні з її реактивним опором X_L і тому в деяких випадках їм можна в першому наближенні нехтувати і вважати, що дана котушка має тільки індуктивний реактивний опір, як це і зроблено при побудові кривої (рисунок 2.8).

Але в деяких випадках, зокрема у фільтрах, навіть цей невеликий активний опір істотно впливає на умови роботи фільтрів. Враховувати цей вплив зараз ми не будемо, оскільки це ускладнило б виклад питання, але надалі, у своєму місці, ми вкажемо, у чому позначається вплив активних опорів елементів позначається вплив активних опорів елементів, що становлять електричний фільтр, на роботу останніх.

Місткість становить значно менший опір проходженню через неї струмів високої частоти, ніж струмів низької частоти, і повністю затримуємо „блокує” – проходження через неї постійного струму. З теорії електротехніки відомо, що чиста ємність, тобто конденсатор без втрат і індуктивності, представляє для змінного струму, що проходить через неї, реактивний ємнісний опір, який визначається формулою:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{6,28 f C}$$

де $\pi = 3,14$;

f – частота проходить через індуктивність струму;

C – величина індуктивності.

Ця формула показує, що ємнісний реактивний опір конденсатора змінюється обернено пропорційно до частоти змінного струму, що проходить через нього.

Як і у разі чистої індуктивності цей закон можна ілюструвати графічно (рисунок 2.9). Ця крива наочно показує, що для постійного струму опір конденсатора нескінченно велике, а в міру збільшення частоти струму, що проходить через нього, ємнісний опір даного конденсатора спочатку різко, а потім все повільніше та повільніше зменшується і при дуже великих частотах стає мізерно малим.

Будь-який реальний конденсатор володіє деяким активним опором, що враховує всі втрати потужності, що мають в ньому місце.

Цей активний опір R_c збільшує повний опір конденсатора. Але так як зазвичай це опір в тому діапазоні частот, на роботу в якому розрахований даний конденсатор, мізерно мало в порівнянні з реактивним ємнісним опором, то їм можна нехтувати і вважати, що конденсатор має тільки суто реактивний опір.

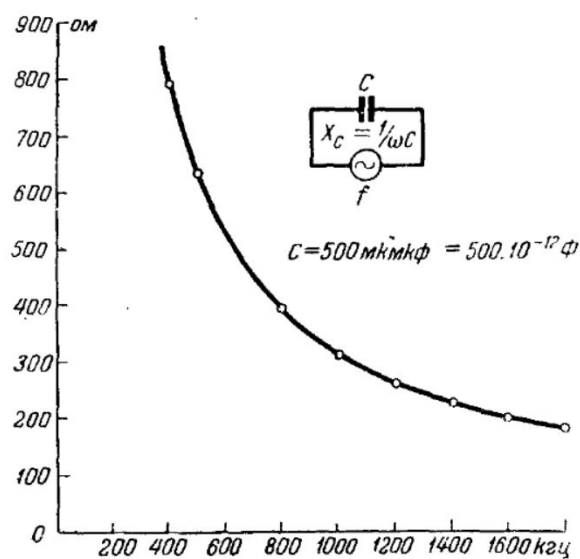


Рисунок 2.9 – Крива зміни реактивного опору ємності, залежно від частоти.

Якщо ємність та індуктивність увімкнути паралельно один одному і складений таким чином контур включити послідовно з джерелом змінної напруги, то цей контур представлятиме при його резонансній частоті для джерела напруження дуже великий опір і тому не пропускатимемо через себе змінних струмів резонансної та близьких до неї частот, а всі інші частоти

зустрічатимуть у ньому тим менший опір, чим далі ця частота віддалена від резонансної [14].

2.3.2 Лінійні фільтри

Лінійні фільтри – фільтри, що включаються на вході лінії і здійснюють поділ діапазонів частот системи передачі, що працюють по одному і тому ж ланцюгу.

У напірних гідролініях насосів і об'єднаної зливної лінії встановлені манометри, а в баку датчик температури. Потік рідини фільтрується лінійним фільтром з переливним клапаном.

На об'єднаній зливальній гідролінії встановлені два лінійних фільтри є переливними золотниками.

Фільтрація – це операція над сусідніми елементами (neighborhood operation), тобто значення будь-якого отриманого пікселя вихідного зображення визначається значеннями пікселів, сусідніх відповідного вхідного пікселя. Лінійна фільтрація характерна тим, що значення вихідного пікселя визначається лінійною комбінацією відповідних вхідних пікселів.

Основним завданням фільтрації є виділення корисного сигналу з суміші сигнал / шум. У цифровій обробці зображень, фільтрація використовується для перетворення зображення і / або поліпшення його якості, для підкреслення або видалення деяких деталей зображення [14].

Лінійна фільтрація зображення виконується за допомогою операції згортки. При виконанні цієї операції, значення вихідного пікселя обчислюється як зважена сума сусідніх пікселів. Матриця ваг називається ядром згортки (ця матриця також називається фільтром).

Всі види фільтрів можна розділити на такі класи: частотні, лінійні, нелінійні, комбіновані. У класі частотних фільтрів обробці підлягають коефіцієнти розкладання зашумленого сигналу по базису Фур'є або інших базисах, зокрема, вейвлет-базису. Перетворення Фур'є особливо важливе для лінійних фільтрів, оскільки множення в Фур'є-області для частотних методів –

це операція згортки для вихідного зображення.

У цифровій обробці сигналів широко використовуються методи лінійної фільтрації. Однак, лінійна фільтрація дає хороші результати лише в разі наявності гауссова адитивного шуму. У випадку імпульсного шуму ефективніше працюють методи нелінійної фільтрації, зокрема медіанна та рангова фільтрація.

У випадку комбінованого шуму можна послідовно застосовувати лінійні і нелінійні фільтри або компонувати ці фільтри так, щоб посилити їх сильні сторони і послабити недоліки, це відбувається при використанні гібридних фільтрів.

Лінійні фільтри ще називають згладжуючими або усереднюючими, тому що відповідь лінійного фільтра усереднює значення пікселів, що містяться в апертурі, і таким чином згладжує зображення. Фільтр Гауса усереднює по закону Гауса пікселі довкола точки [15].

3 МОДЕЛЮВАННЯ ЛІНІЙНОГО ЦИФРОВОГО ФІЛЬТРУ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЛІНІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Фільтри вкрай необхідні для компенсації збурень, що природно присутні в досліджуваних сигналах при проведенні випробувань щодо розв'язування задач ідентифікації лінійних об'єктів автоматизації. Лінійні фільтри є досить простими та добре вивченими та мають при цьому усі досить велику кількість властивостей, які можна використовувати для фільтрації сигналів при розв'язуванні задач ідентифікації лінійних об'єктів автоматизації. Слід зазначити, що використання цифрових лінійних фільтрів надає великих переваг через забезпечення реалізації різноманітних алгоритмів фільтрації сигналів, що досліджуються при розв'язуванні задач ідентифікації об'єктів автоматизації, за рахунок можливості запису алгоритмів перетворення досліджуваних сигналів у вигляді відповідних комп'ютерних програм. На відміну від аналогових фільтрів, у цифрових фільтрах відсутні перехідні процеси та зсув фаз сигналів [16].

3.1 Цифровий лінійний фільтр

Досліджувані сигнали є функціями часу, тому фільтр сигналів можна розглядати як оператор, який здійснює перетворення вихідного сигналу:

$$x_F(t) = F(x(t)), \quad (3.1)$$

де $x(t)$ та $x_F(t)$ – досліджуваний сигнал, та результат його фільтрації;

$F(x(t))$ – оператор, який визначає фільтр сигналів.

В цифрових фільтрах передбачено, на відміну від співвідношення (3.1), як досліджуваний сигнал так й результат його фільтрації представлені в дискретному вигляді, тобто як множини дискретних моментів часу та множин

відповідних цим моментам часу окремих значень, що відповідним чином характеризують досліджуваний сигнал та результат його фільтрації:

$$\Delta t \Rightarrow t_1, t_2 = t_1 + \Delta t, t_3 = t_2 + \Delta t, \dots, t_n = t_{n-1} + \Delta t, \quad (3.2)$$

$$x_k = x(t_k), \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (3.3)$$

$$x_{Fk} = x_F(t_k), \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (3.4)$$

де Δt та t_k – крок дискретизації у часі та відповідні цьому кроку дискретні моменти часу;

x_k та x_{Fk} – дискретні значення, що визначають характеристики досліджуваного сигналу та результату його фільтрації;

n – кількість кроків дискретизації, яка визначає обсяг наявних даних.

Введені у співвідношеннях (3.2), (3.3) та (3.4) дискретні значення зручно у подальшому представляти як вектори:

$$\mathbf{t} = (t_1 \quad t_2 \quad t_3 \quad \dots \quad t_n)^T, \quad (3.5)$$

$$\mathbf{x} = (x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad \dots \quad x_n)^T, \quad (3.6)$$

$$\mathbf{x}_F = (x_{F1} \quad x_{F2} \quad x_{F3} \quad \dots \quad x_{Fn})^T, \quad (3.7)$$

де \mathbf{t} – вектор, що містить дискретні моменти часу;

\mathbf{x} та \mathbf{x}_F – вектори, що містять відповідні характеристики досліджуваного сигналу та результату його фільтрації.

Введені у вигляді (3.5), (3.6) та (3.7) вектори дозволяють представити загальне визначення (3.1) фільтру у вигляді, що відповідає цифровому фільтру, наступним чином:

$$\mathbf{x}_F = \mathbf{F}(\mathbf{t}, \mathbf{x}), \quad (3.8)$$

де $\mathbf{F}(\mathbf{t}, \mathbf{x})$ – вектор-функція багатьох змінних, що визначає цифровий фільтр сигналів.

Цифровий лінійний фільтр сигналів є окремим випадком цифрового фільтру загального вигляду (3.8), в якому функція $\mathbf{F}(\mathbf{t}, \mathbf{x})$ є лінійною відносно вектору \mathbf{x} . Як відомо із математики, лінійна відносно вектору \mathbf{x} функція $\mathbf{F}(\mathbf{t}, \mathbf{x})$ має задовольняти умовам такого вигляду:

$$\mathbf{F}(\mathbf{t}, C\mathbf{x}) = C\mathbf{F}(\mathbf{t}, \mathbf{x}), \quad \mathbf{F}(\mathbf{t}, \mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2) = \mathbf{F}(\mathbf{t}, \mathbf{x}_1) + \mathbf{F}(\mathbf{t}, \mathbf{x}_2), \quad (3.9)$$

де C – довільна стала;

\mathbf{x} , \mathbf{x}_1 та \mathbf{x}_2 – довільні вектори, які визначають досліджувані сигнали.

Введена у співвідношенні (3.8) функція $\mathbf{F}(\mathbf{t}, \mathbf{x})$, що визначає цифровий лінійний фільтр та задовольняє умовам лінійності (3.9), у загальному випадку можна представити таким чином:

$$\mathbf{F}(\mathbf{t}, \mathbf{x}) = \mathbf{F}_n(\mathbf{t})\mathbf{x}, \quad (3.10)$$

де $\mathbf{F}_n(\mathbf{t})$ – матрична функція розміром $n \times n$ векторного аргументу.

З урахуванням виразу (3.10) цифровий фільтр (3.8) загального вигляду буде відповідати цифровому лінійному фільтру:

$$\mathbf{x}_F = \mathbf{F}_n(\mathbf{t})\mathbf{x}. \quad (3.11)$$

Як свідчить вираз (3.11), цифровий лінійний фільтр може бути визначений за допомогою відповідної матриці $\mathbf{F}_n(\mathbf{t})$. Залежність матриці $\mathbf{F}_n(\mathbf{t})$ від моментів часу, відповідних прийнятій дискретизації (3.2) досліджуваного сигналу (3.3) та результату його фільтрації (3.4), може використовуватися,

наприклад, для надання лінійному цифровому фільтру необхідних додаткових властивостей. Досить часто використовують також спрощені лінійні цифрові фільтри, в яких відповідна матриця не залежить від моментів дискретизації часу:

$$\mathbf{F}(t, \mathbf{x}) = \mathbf{F}_n \mathbf{x}, \quad (3.12)$$

де \mathbf{F}_n – матриця розміром $n \times n$.

З урахуванням виразу (3.12) цифровий фільтр (3.8) загального вигляду буде відповідати найпростішому цифровому лінійному фільтру, що має такий вигляд:

$$\mathbf{x}_F = \mathbf{F}_n \mathbf{x}. \quad (3.13)$$

Як свідчить вираз (3.13), цифровий лінійний фільтр може бути визначений за допомогою відповідної матриці \mathbf{F}_n . Властивості цифрового лінійного фільтру (3.13) визначаються властивостями матриці \mathbf{F}_n , та навпаки властивості матриці визначаються властивостями фільтру.

Розглянемо лінійний цифровий фільтр, який визначається таким чином, що характеристика x_{Fk} сигналу – результату фільтрації в момент часу $t = t_k$ визначається як математичне очікування характеристики x_k досліджуваного сигналу в момент часу $t = t_k$, які є розташованими поруч та віддалені від моменту часу $t = t_k$ не більше ніж на N інтервалів часу. Цілочислова величина N насправді є параметром, що визначає властивості такого лінійного цифрового фільтру. Зрозуміло, що такий лінійний цифровий фільтр сигналів має бути належним чином узгодженим із наявною кількістю n кроків дискретизації часу (3.2) при оцифруванні досліджуваних сигналів, і така узгодженість зводиться як мінімум до задовольняння нерівності наступного вигляду:

$$2N - 1 \leq n, \quad (3.14)$$

де N та n – відповідно параметр лінійного цифрового фільтру та кількість кроків дискретизації, яка визначає обсяг наявних даних щодо дискретизації сигналів.

Обґрунтування вибору величини N , яка представляє параметр, що характеризує лінійний цифровий фільтр, насправді є досить складною задачею, та, нажаль, не зводиться до задовольнення нерівності (3.14) та має враховувати також інші фактори, величину Δt кроку дискретизації у часі (3.2), щоб позбутись від небажаного впливу віддалених від моменту часу $t = t_k$ значень характеристик сигналів. Нажаль неможливо надати загальних рекомендацій щодо обґрунтування вибору величини N , однаково придатних для усіх можливих випадків, тому за цих умов вибір величини N має обґрунтовуватися в кожному окремому випадку щодо фільтрації сигналів при виконанні досліджень. Усі зазначені обставини можуть бути врахованими різними способами, відповідно до яких матимемо різноманітні лінійні цифрові фільтри. Далі розглянемо лінійний цифровий фільтр сигналів, який визначається таким чином:

$$x_{Fk} = \frac{1}{2N + 1} \begin{cases} \sum_{j=1}^{2N+1} x_j, & k \leq N, \\ \sum_{j=k-N}^{k+N} x_j, & N < k \leq n - N, \\ \sum_{j=k-N}^{k+N} x_j, & k > n - N. \end{cases} \quad (3.15)$$

В запропонованому лінійному цифровому фільтрі (3.15) для тих моментів часу $t = t_k$, що відповідають значенням $k \leq N$ та $k > n - N$, характеристики фільтрованого сигналу математичними очікуваннями відповідних

характеристик досліджуваного сигналу для перших та останніх $2N + 1$ моментів часу.

У випадку лінійного цифрового фільтру вигляду (3.15) бачимо, що цей цифровий фільтр дійсно зручно визначати шляхом формулювання алгоритму обчислення характеристики x_{Fk} фільтрованого сигналу в кожен момент часу $t = t_k$ для кожного із значень індексу $k = 1, 2, \dots, n$, якими пронумеровані дискретні моменти часу. Разом із тим, зрозуміло також, що лінійний цифровий фільтр (3.15) можна також визначити у векторно-матричному вигляді (3.13), в якому матриця має мати відповідний такому фільтру (3.15) вигляд. Наприклад, така матриця для лінійного цифрового фільтру (3.15) із параметром $N = 1$, матиме такий вигляд:

$$F_n = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.16)$$

Бачимо, що матриця (3.16) є стрічковою, а ширина стрічки визначається параметром N лінійного цифрового фільтру (3.15). Отже, програмування лінійного цифрового фільтру, визначеного матрицею (3.16) зводиться множення (3.13) матриці (3.16) на вектор \mathbf{x} досліджуваного сигналу, але такий підхід міститиме велику кількість множень на нуль та витратить пам'ять комп'ютера на зберігання матриці (3.16). Таким чином, більш доцільним є програмування формули (3.15).

Оскільки для виконання досліджень у подальшому передбачається використання комп'ютерної системи наукових розрахунків та моделювання

Scilab, то розглянемо далі програмування лінійного цифрового фільтру (3.15) засобами програмування сценаріїв, що вбудовані в систему Scilab. Програма, що здійснює фільтрацію сигналів відповідно фільтру (3.15), оформлена у вигляді підпрограми-функції та показана на рисунку 3.1.

```

1 function res=DLF(x,N)
2     n=length(x);
3     xf=zeros(n);
4     for k=1:1:n
5         if (k <= N) then
6             xf(k)=sum(x(1:2*N+1))/(2*N+1);
7         end
8         if ((k > N) & (k <= n-N)) then
9             xf(k)=sum(x(k-N:k+N))/(2*N+1);
10        end
11        if (k > n-N) then
12            xf(k)=sum(x(n-2*N:n))/(2*N+1);
13        end
14    end
15    res=xf;
16 endfunction

```

Рисунок 3.1 – Програмна реалізація лінійного цифрового фільтру засобами програмування сценаріїв системи Scilab

Параметрами цієї підпрограми-функції (рисунок 3.1) є масив (3.3) характеристик цифрованого вихідного досліджуваного сигналу та параметр лінійного цифрового фільтру (3.15). Програмування лінійного цифрового фільтру (3.15) зводиться до запису засобами програмування сценаріїв формули (3.15) з використанням відповідних конструкцій керування послідовностями команд, які зазвичай передбачені в мовах програмування (рисунок 3.1). В результаті виконання розробленої підпрограми-функції (рисунок 3.1), що реалізує лінійний цифровий фільтр (3.15), матимемо масив даних, що визначає результат фільтрації у цифровій формі (3.4) досліджуваного цифрованого сигналу (3.3). Розроблена підпрограма-функція (рисунок 3.1) ілюструє гнучкість цифрових фільтрів, оскільки модифікація алгоритму фільтрації зводиться лише до відповідних змін програмного коду цієї підпрограми. Крім того, бачимо (рисунок 3.1), що програмування досить складних обчислень

(3.15), які мають декілька варіантів відповідно до різних моментів часу, є відносно нескладним та фактично зводиться до використання типових структур керування, що прийняті в мовах програмування. Зазначимо також, що використання мов програмування сценаріїв (рисунок 3.1) спростило програмування лінійного цифрового фільтру за рахунок уникнення необхідності програмування циклів накопичення сум, замість яких використано відповідні еквівалентні команди комп'ютерної системи Scilab.

3.2 Використання лінійного цифрового фільтру для компенсації збурень східчастого сигналу

Східчасті сигнали широко використовуються при розв'язуванні задач ідентифікації лінійних об'єктів автоматизації, тому компенсація збурень в таких сигналах є надважливою задачею, отже розглянемо використання лінійного цифрового фільтру (3.15) щодо компенсації збурень у східчастому сигналі. Спроможність фільтру видаляти збурення із східчастих сигналів певним чином характеризує цей фільтр, тому вибір саме східчастого сигналу в якості корисної складової досліджуваного сигналу є також важливим з точки зору встановлення можливостей фільтрації з використанням лінійного цифрового фільтру (3.15).

В якості досліджуваного сигналу розглянемо сигнал такого вигляду [17]:

$$x(t) = \eta(t - t_n) + \xi(t), \quad (3.17)$$

де $\eta(t)$ – функція Хевісайда, що представляє складову досліджуваного сигналу, яка містить корисну інформацію;

t_n – момент часу, в який здійснюється стрибок;

$\xi(t)$ – випадкова функція часу, що представляє складову досліджуваного сигналу, яка відповідає збуренням та не містить корисної інформації.

Вважаємо, що введена у співвідношенні (3.17) функція $\xi(t)$ є шматково-

сталого та приймає випадкове значення кожні t_{ξ} одиниць часу, та є обмеженою, в тому сенсі, що:

$$|\xi(t)| \leq [\xi], \quad (3.18)$$

де $[\xi]$ – задана величина максимально можливого збурення корисного сигналу.

Моделювання досліджуваних сигналів (3.15) здійснюватимемо із кроком Δt часу в інтервалі часу

$$0 \leq t \leq t_{fin}, \quad (3.19)$$

де t_{fin} – час виконання моделювання.

При виконанні комп'ютерного моделювання досліджуваного сигналу (3.17) використовуємо такі данні:

$$t_{fin} = 100 \text{ с}, \quad \Delta t = 0.01 \text{ с}, \quad t_{\eta} = 25 \text{ с}, \quad [\xi] = 0.2. \quad (3.20)$$

Величину t_{ξ} будемо варіювати при проведенні досліджень та її значення вказуватимемо окремо за необхідністю.

Для моделювання досліджуваного сигналу (3.17) та його складових використовуємо комп'ютерну систему Scilab та вбудоване середовище графічного моделювання Xcos. Комп'ютерна модель для дослідження сигналу (3.17) та його складових представлена на рисунку 3.2. В цій моделі передбачено формування складової досліджуваного сигналу (3.17), яка містить корисну інформацію, та самого сигналу (3.17) з урахуванням випадкового збурення для подальшого експортування даних із середовища Xcos до Scilab для проведення досліджень з використанням цих даних.

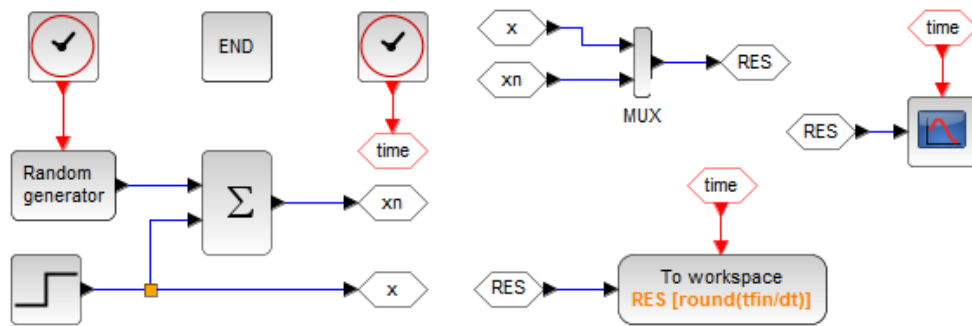


Рисунок 3.2 – Комп'ютерна модель для дослідження випадкового збурення східчастого сигналу

Для виконання досліджень сигналу (3.17) використовуємо розроблену програму-сценарій Scilab, що показана на рисунку 3.3.

```

1 clear; -clc;
2
3 loadXcosLibs(); -loadScicos(); -exec('FormatCharts.sce',-1);
4
5 function res=simulation(tksi)
6     -importXcosDiagram("modell1.zcos");
7     -typeof(scs_m);
8     -Context.tksi=tksi;
9     -scicos_simulate(scs_m,Context);
10    -res=RES;
11 endfunction
12
13 res=simulation(0.1); -show_window(1);
14 t=res.time; -x=res.values(:,1); -xn=res.values(:,2);
15 plot(t,x,"k-", "linewidth", 3); -plot(t,xn,"k:", "linewidth", 1.5);
16 LEG=["корисний сигнал", "збурення"];
17 titlec="$t \xi=0.1 \mathrm{s}$";
18 FormatCharts("$t, \mathrm{s}$", "$x(t)$", titlec, LEG, 4);
19 xsave("Comp1A.scg");
20
21 res=simulation(2); -show_window(2);
22 t=res.time; -x=res.values(:,1); -xn=res.values(:,2);
23 plot(t,x,"k-", "linewidth", 3); -plot(t,xn,"k:", "linewidth", 1.5);
24 LEG=["корисний сигнал", "збурення"];
25 titlec="$t \xi=2 \mathrm{s}$";
26 FormatCharts("$t, \mathrm{s}$", "$x(t)$", titlec, LEG, 4);
27 xsave("Comp1B.scg");

```

Рисунок 3.3 – Програма-сценарій дослідження випадкового збурення східчастого сигналу

В цій програмі (рисунок 3.3) передбачено використання комп'ютерної графічної моделі, що показана на рисунку 3.2, яка використовується шляхом програмного керування відповідно сценарію дослідження, в якому передбачається варіювання величиною t_{ξ} , що характеризує випадкове збурення корисного сигналу. В розробленій програмі-сценарії (рисунок 3.3) передбачається також побудова та автоматизоване форматування графіків, що представляють досліджуваний сигнал (3.17) та його складової, яка містить корисну інформацію.

Результати моделювання сигналу (3.17) показані на рисунку 3.4 та свідчать, що випадкове збурення істотно ускладнює оцінку характеристик складової досліджуваного сигналу, яка містить корисну інформацію, причому таке ускладнення майже не залежить від величини параметру t_{ξ} . Зрозуміло, що ускладнення у визначенні характеристик складової досліджуваного сигналу, яка містить корисну інформацію призводитиме до похибок визначення таких характеристик, що матиме вплив на результати розв'язування задач ідентифікації лінійних об'єктів автоматизації.

Результати що показані на рисунку 3.4, свідчать про те, що випадкове збурення можна уявляти як високочастотні доданки до східчастої складової, яка містить корисну інформацію. За цих умов використання фільтрації сигналу буде корисним, якщо воно призводитиме до зменшення впливу збурень на складову, що містить корисну інформацію. Для дослідження можливостей щодо компенсації лінійним цифровим фільтром (3.15) випадкових збурень східчастого сигналу (3.17) розроблено програму-сценарій, що показана на рисунку 3.4. Ця програма-сценарій (рисунок 3.4) розроблена на основі створеної раніше програми (рисунок 3.3), та додатково використовує розроблену раніше підпрограму-функцію (рисунок 3.1), яка реалізує лінійний цифровий фільтр (3.15). В якості параметру цифрового фільтру прийнято значення:

$$N = 75. \quad (3.21)$$

```

1 clear; clc;
2
3 loadXcosLibs(); loadScicos(); exec('FormatCharts.sce',-1);
4 exec('LDF.sci',-1);
5
6 function res=simulation(tksi)
7     importXcosDiagram("modell1.zcos");
8     typeof(scs_m);
9     Context.tksi=tksi;
10    scicos_simulate(scs_m,Context);
11    res=RES;
12 endfunction
13
14 res=simulation(0.1); show_window(1);
15 t=res.time; x=res.values(:,1); xn=res.values(:,2); xf=DLF(xn,75);
16 plot(t,x,"k-","linewidth",3); plot(t,xf,"k:","linewidth",1.5);
17 LEG=["корисний сигнал","фільтрація"];
18 titlec="$t_{\xi}=0.1 \mathrm{s}$";
19 FormatCharts("$t, \mathrm{s}$", "$x(t)$", titlec, LEG, 4);
20 xsave("Comp2A.scg");
21
22 res=simulation(2); show_window(2);
23 t=res.time; x=res.values(:,1); xn=res.values(:,2); xf=DLF(xn,75);
24 plot(t,x,"k-","linewidth",3); plot(t,xf,"k:","linewidth",1.5);
25 LEG=["корисний сигнал","фільтрація"];
26 titlec="$t_{\xi}=0.1 \mathrm{s}$";
27 FormatCharts("$t, \mathrm{s}$", "$x(t)$", titlec, LEG, 4);
28 xsave("Comp2B.scg");

```

Рисунок 3.4 – Програма-сценарій дослідження компенсації цифровим фільтром випадкового збурення східчастого сигналу

Ідея дослідження полягає в тому, щоб використати лінійний цифровий фільтр (3.15) із параметром (3.21) щодо компенсації випадкових збурень, які присутні у досліджуваному сигналі (3.17) та ускладнюють оцінку складової цього досліджуваного сигналу, яка містить корисну інформацію. В якості досліджуваних сигналів (3.17) використані саме ті, що наведені на рисунку 3.5, оскільки вони відповідають випадковим збуренням із різними величинами t_{ξ} , які визначають характерний період випадкових збурень, що дозволить оцінити можливості лінійного цифрового фільтру (3.15) із параметром (3.21).

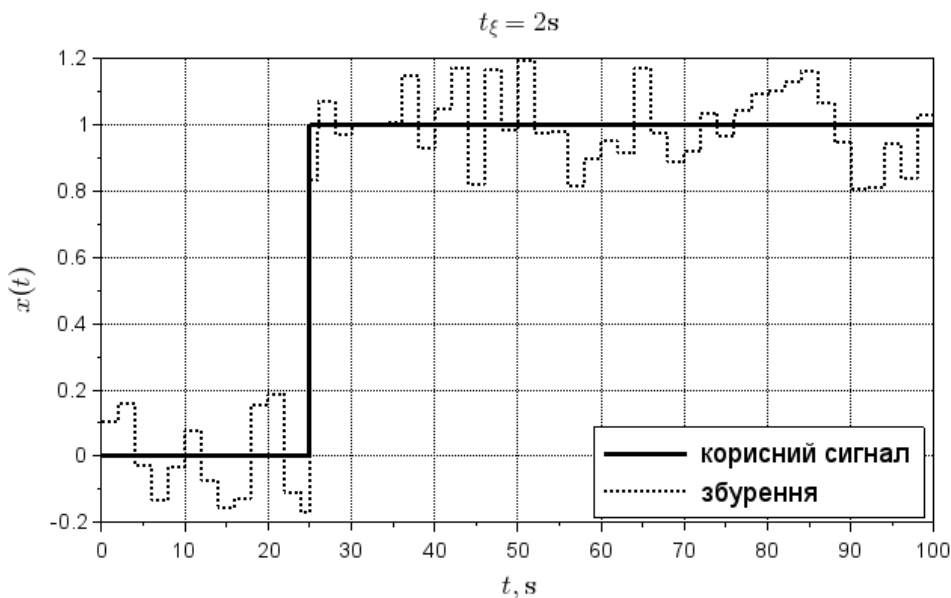
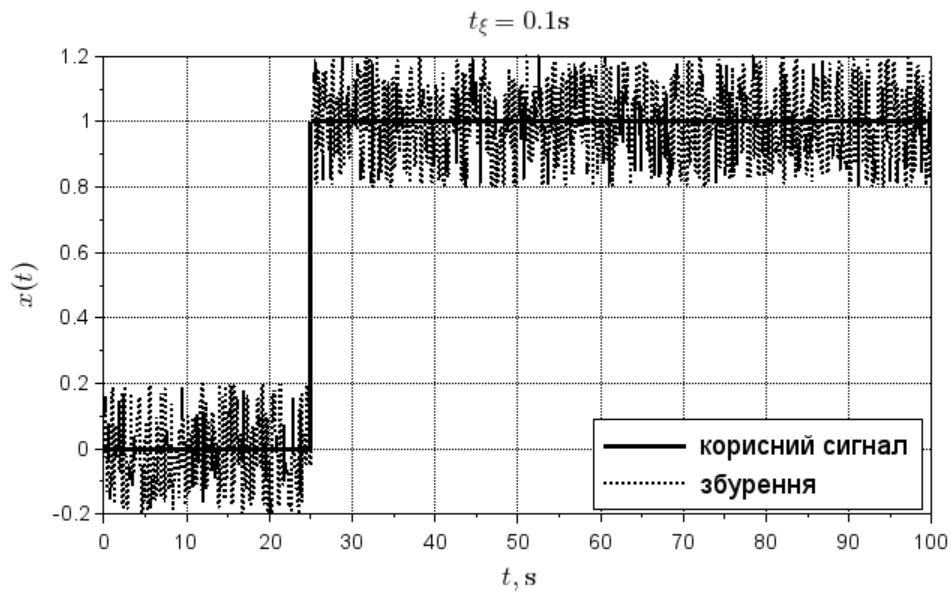


Рисунок 3.5 – Результати моделювання збурення східчастого сигналу при меншому (а) та більшому (б) періодах випадкового збурення

Результати моделювання (рисунок 3.6, а) свідчать, що лінійний цифровий фільтр (3.15) є дуже ефективним щодо компенсації високочастотних збурень, таких як показані на рисунку 3.4, а. В той же час, результати моделювання, що наведені на рисунку 3.6, б, свідчать, що лінійний цифровий фільтр погано пристосований щодо компенсації низькочастотних збурень як на рисунку 3.4, б.

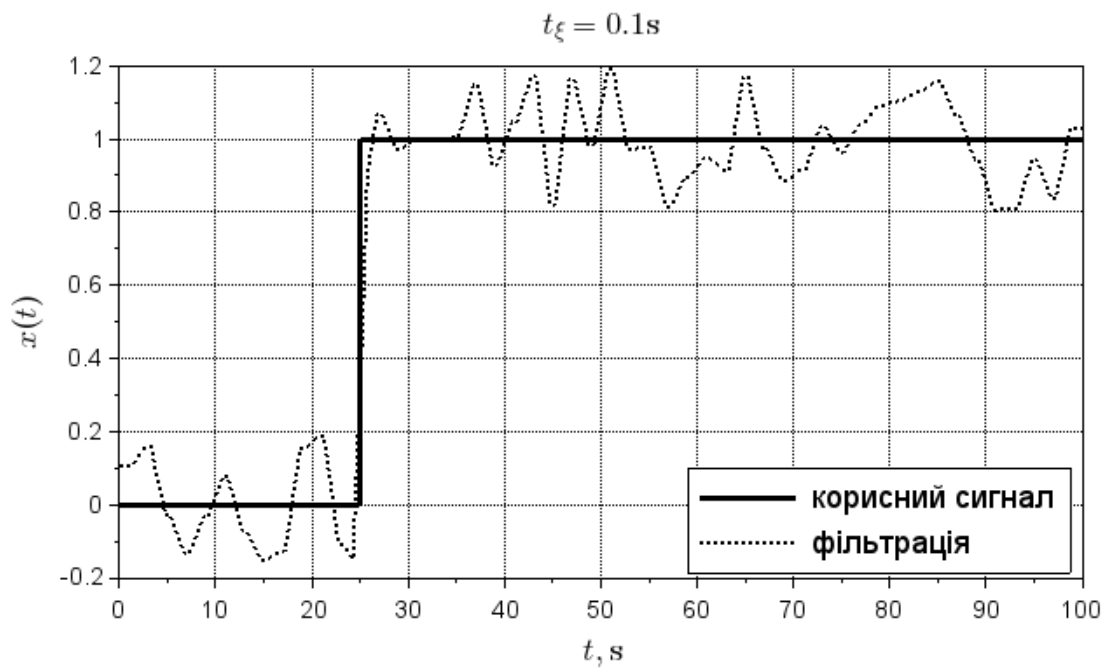
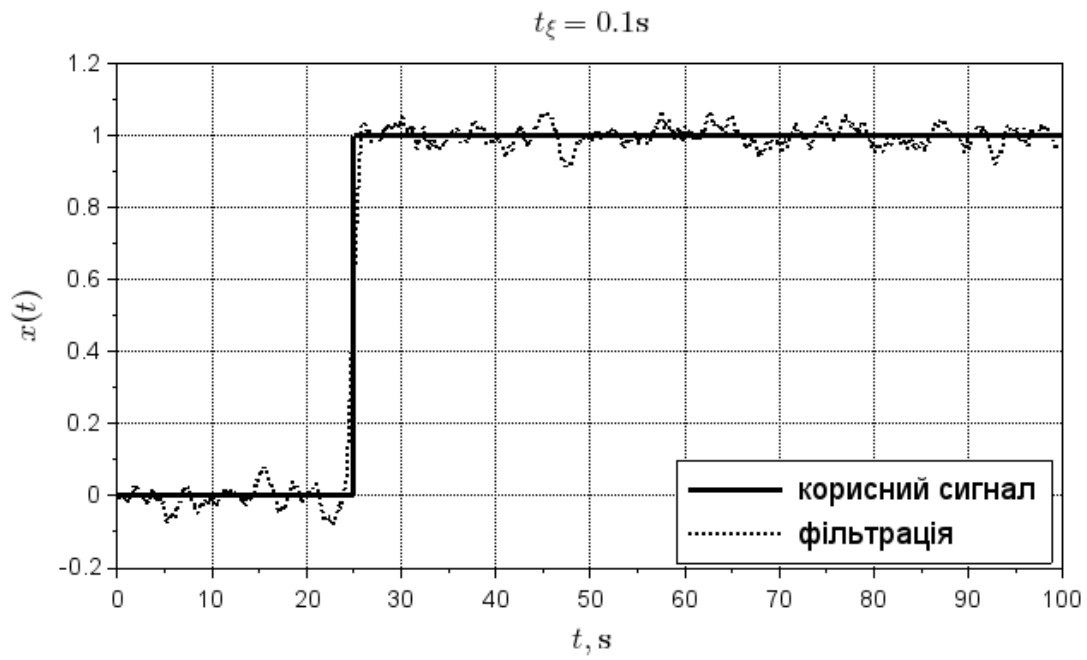


Рисунок 3.6 – Результати моделювання збурення східчастого сигналу при меншому (а) та більшому (б) періодах випадкового збурення

3.3 Використання лінійного цифрового фільтру для компенсації збурень синусоїдального сигналу

Синусоїдальні сигнали широко використовуються при розв'язуванні задач ідентифікації лінійних об'єктів автоматизації, тому компенсація збурень в таких сигналах є надважливою задачею, отже розглянемо використання лінійного цифрового фільтру (3.15) щодо компенсації збурень у синусоїдальному сигналі. Спроможність фільтру видаляти збурення із синусоїдальних сигналів певним чином характеризує цей фільтр, тому вибір саме синусоїдального сигналу в якості корисної складової досліджуваного сигналу є також важливим з точки зору встановлення можливостей фільтрації з використанням лінійного цифрового фільтру (3.15).

В якості досліджуваного сигналу розглянемо сигнал, що має такий вигляд [17]:

$$x(t) = \sin(\Omega t) + \xi(t), \quad (3.22)$$

де Ω – кругова частота синусоїдальної складової досліджуваного сигналу, яка містить корисну інформацію;

$\xi(t)$ – випадкова функція часу, що представляє складову досліджуваного сигналу, яка відповідає збуренням та не містить корисної інформації.

Вважаємо, що введена у співвідношенні (3.22) функція $\xi(t)$ є шматково-сталою та приймає випадкове значення кожні t_ξ одиниць часу, та є обмеженою у сенсі нерівності (3.18). Моделювання досліджуваних сигналів (3.22) здійснюватимемо із кроком Δt часу в інтервалі часу (3.19). При виконанні комп'ютерного моделювання досліджуваного сигналу (3.22) використовуємо такі данні [18]:

$$\Omega = 1 \text{ c}^{-1}, \quad t_{fin} = 20 \text{ c}, \quad \Delta t = 0.01 \text{ c}, \quad [\xi] = 0.2. \quad (3.23)$$

Величину t_{ξ} будемо варіювати при проведенні досліджень та її значення вказуватимемо окремо за необхідністю.

Для моделювання досліджуваного сигналу (3.22) та його складових використовуємо комп'ютерну систему Scilab та вбудоване середовище графічного моделювання Xcos. Комп'ютерна модель для дослідження сигналу (3.22) та його складових представлена на рисунку 3.7. В цій моделі передбачено формування складової досліджуваного сигналу (3.22), яка містить корисну інформацію, та самого сигналу (3.22) з урахуванням випадкового збурення для подальшого експортування даних із середовища Xcos до Scilab для проведення досліджень з використанням цих даних.

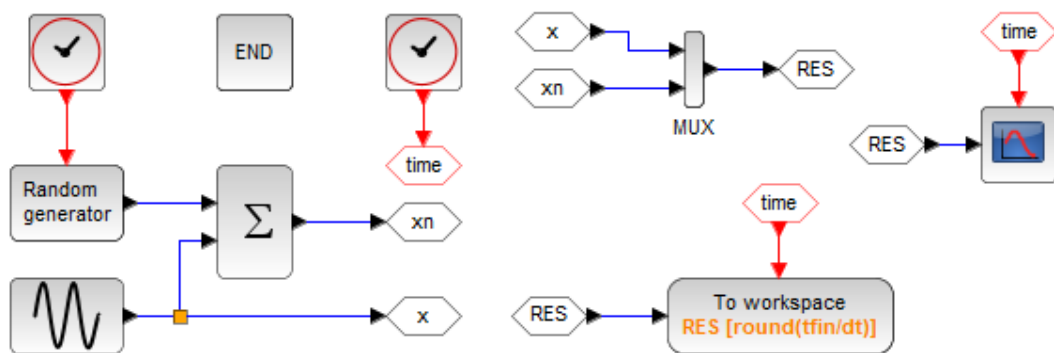


Рисунок 3.7 – Комп'ютерна модель для дослідження випадкового збурення синусоїдального сигналу

Для виконання досліджень сигналу (3.22) використовуємо розроблену програму-сценарій Scilab, що показана на рисунку 3.8. В цій програмі (рисунок 3.8) передбачено використання комп'ютерної графічної моделі, що показана на рисунку 3.7, яка використовується шляхом програмного керування відповідно сценарію дослідження, в якому передбачається варіювання величиною t_{ξ} , що характеризує випадкове збурення корисного сигналу. В розробленій програмі-сценарії (рисунок 3.8) передбачається також побудова та автоматизоване форматування графіків, що представляють досліджуваний сигнал (3.22) та його складової, яка містить корисну інформацію.

```

1 clear; clc;
2
3 loadXcosLibs(); loadScicos(); exec('FormatCharts.sce',-1);
4
5 function res=simulation(tksi)
6     importXcosDiagram("model2.zcos");
7     typeof(scs_m);
8     Context.tksi=tksi;
9     scicos_simulate(scs_m,Context);
10    res=RES;
11 endfunction
12
13 res=simulation(0.1); show_window(1);
14 t=res.time; x=res.values(:,1); xn=res.values(:,2);
15 plot(t,x,"k-","linewidth",3); plot(t,xn,"k:","linewidth",1.5);
16 LEG=["корисний сигнал","збурення"];
17 titlec="$t_{\xi=0.1} \mathrm{s}$";
18 FormatCharts("$t, \mathrm{s}$", "$x(t)$", titlec, LEG, 4);
19 xsave("Comp3A.scg");
20
21 res=simulation(2); show_window(2);
22 t=res.time; x=res.values(:,1); xn=res.values(:,2);
23 plot(t,x,"k-","linewidth",3); plot(t,xn,"k:","linewidth",1.5);
24 LEG=["корисний сигнал","збурення"];
25 titlec="$t_{\xi=2} \mathrm{s}$";
26 FormatCharts("$t, \mathrm{s}$", "$x(t)$", titlec, LEG, 4);
27 xsave("Comp3B.scg");

```

Рисунок 3.8 – Програма-сценарій дослідження випадкового збурення синусоїдального сигналу

Результати моделювання сигналу (3.22) показані на рисунок 3.9 та свідчать, що наявність випадкового збурення помітно ускладнює оцінку характеристик синусоїдальної складової досліджуваного сигналу, яка містить корисну інформацію, причому таке ускладнення майже не залежить від величини параметру t_{ξ} . Зрозуміло, що ускладнення у визначенні характеристик синусоїдальної складової досліджуваного сигналу, яка містить корисну інформацію, призводитиме до похибок визначення таких характеристик як амплітуда, частота та зсув фаз, що матиме вплив на результати розв'язування задач ідентифікації лінійних об'єктів автоматизації.

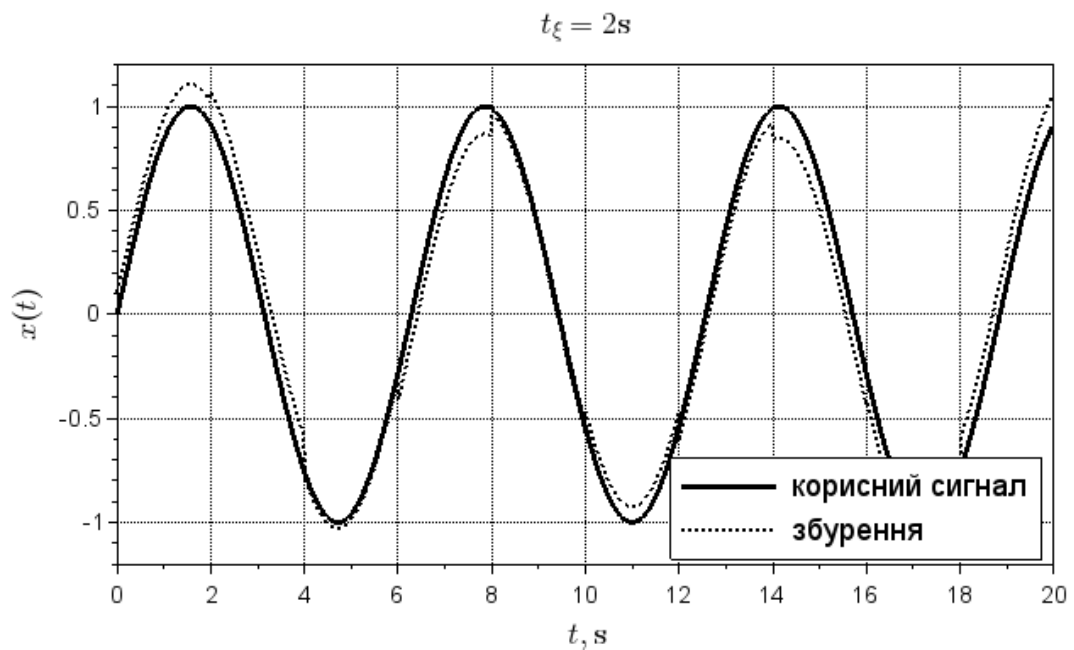
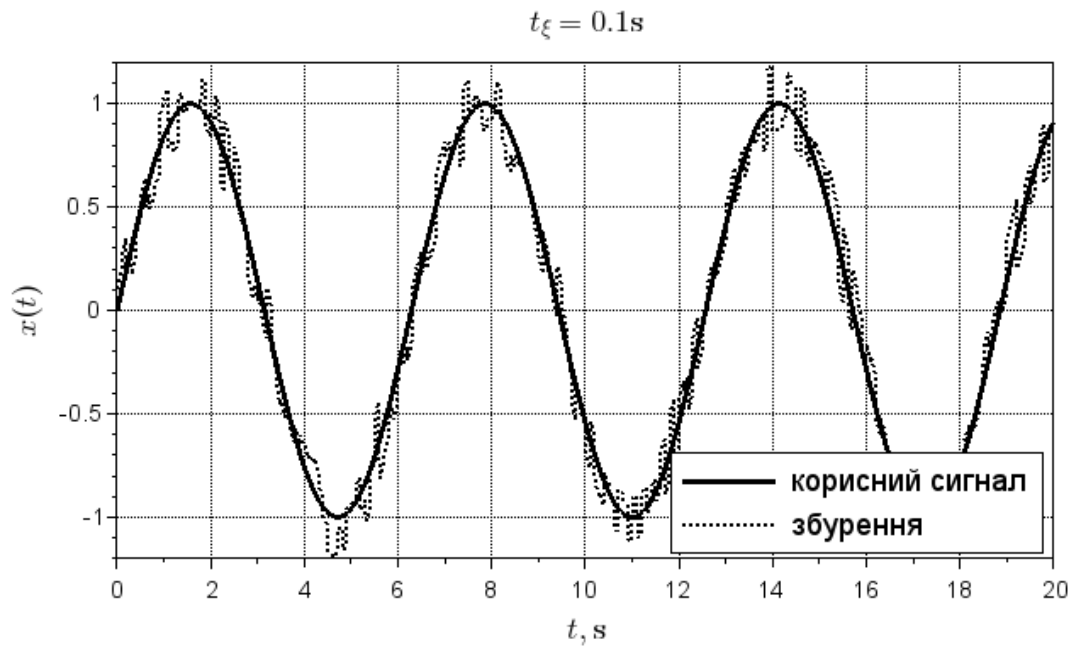


Рисунок 3.9 – Результати моделювання збурення синусоїдального сигналу при меншому (а) та більшому (б) періодах випадкового збурення

Результати що показані на рисунку 3.9, свідчать про те, що випадкове збурення можна уявляти як височастотні доданки до синусоїдальної

складової, яка містить корисну інформацію. За цих умов використання фільтрації сигналу буде корисним, якщо воно призводитиме до зменшення впливу збурень на синусоїдальну складову, що містить корисну інформацію. Для дослідження можливостей щодо компенсації лінійним цифровим фільтром (3.15) випадкових збурень синусоїдального сигналу (3.22) розроблено програму-сценарій, що показана на рисунку 3.10. Ця програма-сценарій (рисунок 3.10) розроблена на основі створеної раніше програми (рисунок 3.8), та використовує розроблену раніше підпрограму-функцію (рисунок 3.7), яка реалізує лінійний цифровий фільтр (3.15). В якості параметру цифрового фільтру прийнято значення (3.21). Ідея дослідження полягає в тому, щоб використати лінійний цифровий фільтр (3.15) із параметром (3.21) щодо компенсації випадкових збурень, які присутні у досліджуваному сигналі (3.22) та ускладнюють оцінку синусоїдальної складової цього досліджуваного сигналу, яка містить корисну інформацію. В якості досліджуваних сигналів (3.22) використані саме ті, що наведені на рисунку 3.9, оскільки вони відповідають випадковим збуренням із різними величинами t_{ξ} , які визначають характерний період випадкових збурень, що дозволить оцінити можливості лінійного цифрового фільтру (3.15) із параметром (3.21).

Результати моделювання (рисунок 3.11, а) свідчать, що лінійний цифровий фільтр (3.15) із параметром (3.21) є дуже ефективним щодо компенсації високочастотних збурень, таких як показані на рисунку 3.9, а. Аналогічні результати, що наведені на рисунку 3.11, б, свідчать, що лінійний цифровий фільтр також досить непогано пристосований щодо компенсації низькочастотних збурень як на рисунку 3.9, б. В той же час, бачимо, що результат фільтрації та синусоїдальна складова досліджуваного сигналу (3.22), яка містить корисну інформацію, мають помітну різницю в амплітуді, але при цьому частота та фаза є досить близькими. Можливо, що похибки визначення амплітуди можна пояснити не досить вдалим вибором значення (3.21) параметру лінійного цифрового фільтру (3.15), але це потребує додаткового дослідження. Можемо зробити висновок, що лінійний цифровий фільтр (3.15) є

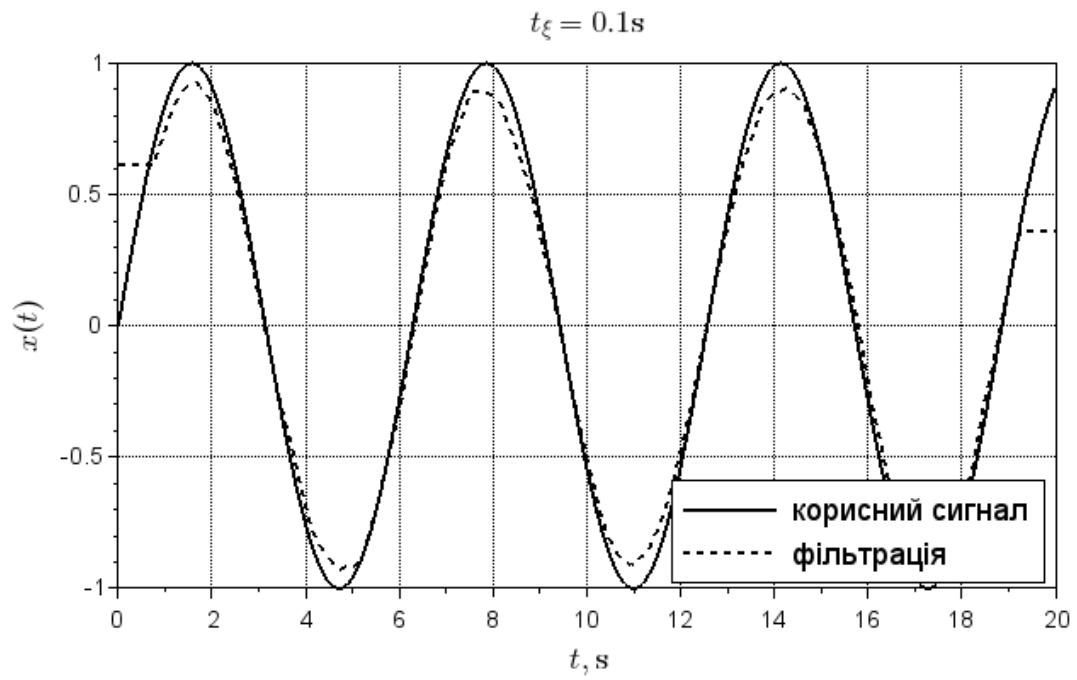
досить пристосованим щодо компенсації випадкових збурень у досліджуваних сигналах вигляду (3.22), які мають синусоїдальну складову, що містить корисну інформацію.

```

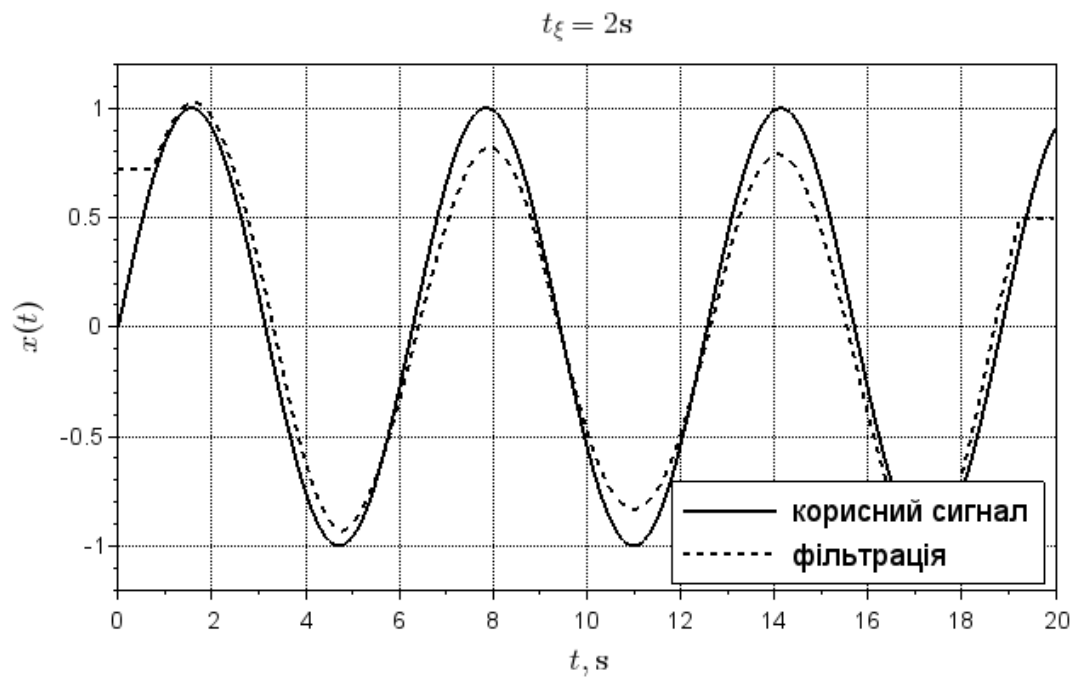
1 clear; clc;
2
3 loadXcosLibs(); loadScicos(); exec('FormatCharts.sce',-1);
4 exec("LDF.sci",-1);
5
6 function res=simulation(tksi)
7     importXcosDiagram("model2.zcos");
8     typeof(scs_m);
9     Context.tksi=tksi;
10    scicos_simulate(scs_m,Context);
11    res=RES;
12 endfunction
13
14 res=simulation(0.1); show_window(1);
15 t=res.time; x=res.values(:,1); xn=res.values(:,2); xf=DLF(xn,75);
16 plot(t,x,"k-","linewidth",2); plot(t,xf,"k:","linewidth",2);
17 LEG=["корисний сигнал","фільтрація"];
18 titlec="$t_{\xi=0.1} \mathrm{s}$";
19 FormatCharts("$t, \mathrm{s}$", "$x(t)$", titlec, LEG, 4);
20 xsave("Comp4A.scg");
21
22 res=simulation(2); show_window(2);
23 t=res.time; x=res.values(:,1); xn=res.values(:,2); xf=DLF(xn,75);
24 plot(t,x,"k-","linewidth",2); plot(t,xf,"k:","linewidth",2);
25 LEG=["корисний сигнал","фільтрація"];
26 titlec="$t_{\xi=2} \mathrm{s}$";
27 FormatCharts("$t, \mathrm{s}$", "$x(t)$", titlec, LEG, 4);
28 xsave("Comp4B.scg");

```

Рисунок 3.10 – Програма-сценарій дослідження компенсації цифровим фільтром випадкового збурення синусоїдального сигналу



а)



б)

Рисунок 3.11 – Результати моделювання збурення синусоїдального сигналу при меншому (а) та більшому (б) періодах випадкового збурення

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці в лабораторії

Дослідження з кваліфікаційної роботи проводилися в лабораторії розміром: 4,2 м × 3,5 м × 3,2 м. У приміщенні працює 1 людина. Площа приміщення становить 14,7 м², об'єм – 47,04 м³. На одне робоче місце припадає вся площа і об'єм приміщення, відповідає нормативному документу НПАОП 0.00-1.28-10 [19].

Було визначено, згідно з ДСТУ 2293-99, що в лабораторії існують небезпечні та шкідливі фактори:

- знижена рухливість повітря;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини (небезпечний фактор).

Домінуючий шкідливий виробничий фактор – недолік штучного освітлення.

4.2 Промислова безпека в лабораторії

В лабораторії використовується трифазна чотирьохдротова мережа змінного струму напругою 220/380 В, частота 50 Гц, режим нейтралі – глухозаземлена. Згідно НПАОП 40.1-1.21-98, приміщення належить до класу приміщень без підвищеної небезпеки. Умови, які створюють підвищену та особливу небезпеку (підвищена вологість, струмопровідна пил, струмопровідні підлоги, можливість одночасного дотику до заземлених металоконструкцій будівлі і металевих поверхонь електроприладів), відсутні.

Для захисту працівників від ураження електричним струмом в лабораторії, згідно НПАОП 40.1-1.32-01, використовується система заземлення TN-C-S типу та захисне відключення.

Необхідно проводити контроль ізоляції відповідно до вимог ПУЕ-2011. Контроль проводити між нульовим та фазним провідниками, а також між фазами. Опір ізоляції не менше 500 кОм на фазу. Контроль проводити не рідше 1 разу на рік при відключеному електроживленні.

Електропроводка в приміщенні виконана з можливістю заміни: прихована в каналах будівельних конструкцій, що відповідає вимогам НПАОП 40.1-1.32-01.

4.3 Виробнича санітарія і гігієна праці

Роботи, що виконуються в приміщенні лабораторії, проводяться сидячи та не потребують систематичних важких фізичних навантажень, підняття та перенесення важких речей. В таких умовах енерговитрати працівників складають не більше 120 ккал/год. Отже, виконувані роботи відносяться до категорії 1а.

Згідно ДСН 3.3.6.042-99 та категорії виконуваних робіт, для приміщення встановлені наступні оптимальні норми мікроклімату: температура в літній період 23 – 25 °С, в зимовий період 22 – 24 °С, відносна вологість повітря 40 – 60 %, швидкість руху повітря $\leq 0,1$ м/с.

Щоб забезпечити необхідні норми мікрокліматичних параметрів та чистоти повітря в лабораторії використовується кондиціонування. Підтримка зазначених параметрів в холодний період здійснюється системою опалення відповідно до СНиП 2.04.05-91.

Ще одним шкідливим фактором є розумове перенапруження. Основні заходи щодо захисту від розумового перенапруження людини:

– регулярно, через кожні 40 – 50 хв. робочого часу робити технологічні перерви, для розрядки розумового напруження;

– проведення фізичних вправ (зарядки, розминки) під час перерви.

Рівень загального штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності.

Розрахунок штучного освітлення проводиться методом коефіцієнта використання світлового потоку. Мета перевірного розрахунку – визначення фактичної освітленості в приміщенні. Основна розрахункова формула методу коефіцієнта використання світлового потоку:

$$F = \frac{E_f k_z S_z}{n \eta \gamma N}, \quad (4.1)$$

де E_f – фактична освітленість, лк;

S – площа освітлюваного приміщення, що залежить від розмірів приміщення;

z – коефіцієнт нерівномірності освітленості ($z=1,1$);

k_z – коефіцієнт запасу, що враховує запилення світильників та знос джерел запасу світла в процесі експлуатації;

N – кількість світильників в ряду;

η – коефіцієнт використання світлового потоку ламп;

γ – коефіцієнт затінення ($\gamma=0,8$);

n – кількість рядів світильників;

У таблиці 4.1 наведено вихідні дані.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані

F_l	n_l	N	η	N	k_3
1600	2	2	0.5	4	1.5

Фактична освітленість складає:

$$E_f = \frac{Fn\eta\gamma N}{k_z S_z}, \quad (4.2)$$

$$F = F_i n_i, \quad (4.3)$$

$$F = 1600 \cdot 2 = 3200 \text{ Лк},$$

$$E_f = \frac{3200 \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot 4 \cdot 0,88}{1,5 \cdot 14,07 \cdot 1,1} = 441 \text{ Лк}.$$

За результатами розрахунку отримали освітленість складає 441 лк, що належить допустимому діапазону 200 – 500 лк. У приміщенні нестачі штучного освітлення немає.

4.4 Пожежна безпека лабораторії

Приміщення лабораторії за вибухо- та пожежною небезпекою відноситься до категорії В за НАПБ Б.03.002-2007, оскільки в приміщеннях лабораторії знаходяться тверді горючі матеріали [19]. Основними причинами виникнення пожежі можна вважати:

- випадкове пошкодження ізоляції струмоведучих провідників;
- незадовільний стан вилок, розеток;
- перенавантаження дротів живлення.

Лабораторія розташована в будівлі II ступеня вогнестійкості відповідно до ДБН В.1.1.7-2016 .

За пожежонебезпекою, згідно з ПУЕ - 2011, лабораторія належить зоні II – Па [19]. У ній присутні тверді горючі речовини, папір, меблі, одяг.

Заходи пожежної профілактики відповідно до ГОСТ 12.1.004-91. ССБТ, до яких входять: застосування системи запобігання пожежі, протипожежного захисту, виконання організаційних заходів.

Згідно НАПБ Б03.001-2004 в приміщеннях розміщені первинні засоби пожежогасіння – вуглекислотний вогнегасник ВВК-1,4 з розрахунку 1 вогнегасник на 3 ПК, але не менше 1 на приміщення [19].

Згідно ДБН В.2.5.56-2010 в приміщеннях встановлено точковий димової-пожежний сповіщувач ДП-1, який контролює площу до 86 м².

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота присвячена вирішенню актуального завдання, розробці та розрахунку лінійного цифрового фільтру сигналів для ідентифікації лінійних об'єктів автоматизації.

Під час роботи над кваліфікаційною роботою було з'ясовано що робототехнічні системи це сукупність інформаційно-сенсорних, механічних виконавчих та мікроконтролерних керуючих пристроїв, що функціонують спільно з метою виконання заданого технологічного процесу чи операції.

Також ми провели огляд різних фільтрів і тепер маємо найкраще уявлення про них. Лінійний фільтр – пристрій для обробки сигналів, вихід якого є лінійним оператором від вхідного сигналу. Лінійні фільтри широко використовуються в техніці, електроніці, теорії управління і обробці сигналів, а також щодо ідентифікації об'єктів автоматизації.

Фільтрація – це операція над сусідніми елементами (neighborhood operation), тобто значення будь-якої отриманої характеристики вихідного сигналу визначається значеннями характеристик в сусідніх відповідного дослуджуваного моменту часу. Лінійна фільтрація характерна тим, що значення вихідної характеристики сигналу визначається лінійною комбінацією відповідних вхідних характеристик.

Завдяки дослідженням показано, що цирооброблений цифровий фільтр є гарно пристосованим щодо видалення високочастотних збурень східчастих сигналів, але при цьому не є пристосованим щодо видалення низкочастотних збурень. Показано, що запропонований цифровий фільтр досить добре пристосований щодо видалення шумів в синусоїдальних сигналах, та при цьому не впливає на частоту і фазу корисної складової, але впливає на її амплітуду.

Проведено заходи і розрахунки для забезпечення умов безпечної праці в лабораторії де виконувалась кваліфікаційна робота.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація «Звіти у сфері науки і техніки». Структура та правила оформлювання. / В. Земцева; Ю. Поліщук, канд. фіз.-мат. наук; Р. Санченко, канд. техн. наук; Л. Шрамко; А. Ямчук (науковий керівник) ДП «УкрНДНЦ» від 22 червня 2015р. № 61 з 2017- 07-01.

2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал, О.В. Токарєва, А.І. Бронніков. Харків: ХНУРЕ, 2022. – 66 с.

3. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» освітньої програми «Системна інженерія»: навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, О. В. Токарєва, О. М. Цимбал, А. І. Бронніков ; М-во освіти і науки України, ХНУРЕ. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2023. – 218 с.

4. Zhe Cheng, Ming Gao, Xihui Liang, Libin Liu, Incipient fault detection for the planetary gearbox in rotorcraft based on a statistical metric of the analog tachometer signal, Measurement, Volume 151, 2020, 107069, ISSN 0263-2241.

5. Huan Huang, Natalie Baddour, Ming Liang, A method for tachometer-free and resampling-free bearing fault diagnostics under time-varying speed conditions, Measurement, Volume 134, 2019, Pages 101-117, ISSN 0263-2241.

6. Xiaoqiang Xu, Weiming Li, Ming Zhao, Hongwei Hu, Mobile device-based bearing diagnostics with varying speeds, Measurement, Volume 200, 2022, 111639, ISSN 0263-2241.

7. Yang Kang, Zizhen Qiu, Qiming Fan, Hao Zhang, Zhanqun Shi, Fengshou Gu, Tacholless estimation of time-varying dynamic coefficients of journal bearing based on the square-root cubature Kalman filter, *Measurement*, Volume 203, 2022, 111956, ISSN 0263-2241.

8. Xinnan Yu, Zhipeng Feng, Dong Zhang, Adaptive high-resolution order spectrum for complex signal analysis of rotating machinery: Principle and applications, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 177, 2022, 109194, ISSN 0888-3270.

9. Anil Kumar, Govind Vashishtha, C.P. Gandhi, Hesheng Tang, Jiawei Xiang, Tacho-less sparse CNN to detect defects in rotor-bearing systems at varying speed, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 104, 2021, 104401, ISSN 0952-1976.

10. Chunzhi Wu, Pengcheng Jiang, Chuang Ding, Fuzhou Feng, Tang Chen, Intelligent fault diagnosis of rotating machinery based on one-dimensional convolutional neural network, *Computers in Industry*, Volume 108, 2019, Pages 53-61, ISSN 0166-3615.

11. Xu Hao, Jingyu Zhai, Junshuai Liang, Yitong Chen, Qingkai Han, Time-varying stiffness characteristics of roller bearing influenced by thermal behavior due to surface frictions and different lubricant oil temperatures, *Tribology International*, Volume 144, 2020, 106125, ISSN 0301-679X.

12. Dongdong Liu, Lingli Cui, Weidong Cheng, Fault diagnosis of wind turbines under nonstationary conditions based on a novel tacho-less generalized demodulation, *Renewable Energy*, Volume 206, 2023, Pages 645-657, ISSN 0960-1481.

13. A. Débarbouillé, F. Renaud, Z. Dimitrijevic, D. Chojnacki, L. Rota, J-L. Dion, Wheel forces estimation with an Augmented and Constrained Extended Kalman Filter applied on a nonlinear multi-body model of a half vehicle, *Procedia Structural Integrity*, Volume 38, 2022, Pages 342-351, ISSN 2452-3216.

14. David Vera Anaya, Mehmet R. Yuce, Forearm Dual-Triboelectric Sensor (FDTS) for assistive Human-Machine-Interfaces (HMIs) and robotic control with potential uses in prosthetic devices, *Nano Energy*, Volume 111, 2023, 108366, ISSN 2211-2855.

15. Chol-Guk Choe, Jong-Hyon Pak, Chol-Song Rim, Joint near-isometry and optimal sparse recovery: Nonuniform recovery from multi-sensor measurements, *Signal Processing*, Volume 208, 2023, 108980, ISSN 0165-1684.

16. Dino Hüllmann, Niels Paul, Harald Kohlhoff, Patrick P. Neumann, Achim J. Lilienthal, Measuring rotor speed for wind vector estimation on multirotor aircraft, *Materials Today: Proceedings*, Volume 5, Issue 13, Part 2, 2018, Pages 26703-26708, ISSN 2214-7853.

17. Mehran Mirzaei, Pavel Ripka, Vaclav Grim, An eddy current speed sensor with a novel configuration of longitudinal and transversal coils, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 352, 2023, 114201.

18. Mouna Fradi, Faïda Mhenni, Raoudha Gaha, Abdelfattah Mlika, Jean-Yves Choley, Category theory-based collaborative design methodology for mechatronic systems, *Advanced Engineering Informatics*, Volume 55, 2023, 101865, ISSN 1474-0346.

19. Організація керування умовами праці» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т.Є. Стиценко, Г.В. Пронюк, Н.М. Сердюк. – Харків, 2017. – 108 с.