

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Проектування та експлуатації електронних апаратів  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

ГЮИК 501216.003 ПЗ

(позначення документа)

" Лабораторний практикум з віртуального моделювання радіоавтоматичних ланок "  
(тема)

Виконав:

здобувач 2 курсу, групи РЕАЗм-21-1

Муракаєв Є. Р.

(прізвище, ініціали)

спеціальність 172 "Телекомунікації та радіотехніка"

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Радіоелектронні апарати та засоби

(повна назва спеціалізації)

Керівник

проф. Чумаков В.І.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ПЕЕА

\_\_\_\_\_

(підпис)

Хорошайло Ю.Є.

(прізвище, ініціали)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
Кафедра Проектування та експлуатації електронних апаратів  
Освітньо-кваліфікаційний рівень Другий (магістерський)  
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
(шифр і назва)  
Освітньо-професійна програма Радіоелектронні апарати та засоби  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ПЕЕА

Хорошайло Ю.Є.

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2022 року

**ЗАВДАННЯ**

**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Студентові Муракаєву Ельдару Равільовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Лабораторний практикум з віртуального моделювання  
радіоавтоматичних ланок

затверджені наказом по університету від 14.11.2022 р. № 1475 Ст.

2. Термін подання студентом роботи 02.12.2022

3. Вихідні дані до роботи Теоретична інформація про радіоавтоматичні системи

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

4.1 Вступ

4.2 Основні поняття і визначення

4.2 Класифікація систем радіоавтоматики

4.3 Типові системи радіоавтоматики

4.4 Математичний опис автоматичних систем

4.5 Типові вхідні сигнали

4.6 Аналіз видів ланок

4.7 Види з'єднань ланок у радіоавтоматичних системах

4.8 Розрахунок оптимальної смуги пропускання і форми АЧХ фільтра

4.9 Розрахунок характеристик пропорційно-інтегруючих фільтрів

4.10 Висновки

4.11 Перелік джерел посилань

4.12 Додатки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал  
представлений у форматі презентації PowerPoint (\*.ppt)

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	Отримання завдання	01.09.2022– 08.09.2022	
2	Аналіз завдання	08.09.2022– 15.09.2022	
3	Огляд літератури з теми дослідження	15.09.2022– 22.09.2022	
4	Виконання розділу «Загальна інформація про радіоавтоматичні системи»	22.09.2022– 06.10.2022	
5	Виконання розділу «Типові ланки радіоавтоматичних систем»	06.10.2022– 20.10.2022	
6	Розрахунки	20.10.2022– 27.10.2022	
7	Оформлення пояснювальної записки	27.10.2022– 10.11.2022	
8	Висновки	10.11.2022– 17.11.2022	
9	Розробка презентації	17.11.2022– 24.11.2022	
10	Подання кваліфікаційної роботи до екзаменаційної комісії	01.12.2022	

Дата видачі завдання

01.09.2022

Здобувач

\_\_\_\_\_ (підпис)

Муракаєв Е.Р.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту)

\_\_\_\_\_ (підпис)

проф. Чумаков В.І.

\_\_\_\_\_ (посада, прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 85 с., 30 рис., 1 додаток, 19 джерел.

СИСТЕМИ РАДІОАВТОМАТИКИ, РАДІАВТОМАТИЧНІ ЛАНКИ, ВХІДНІ СИГНАЛИ, ПЕРЕДАВАЛЬНА ФУНКЦІЯ, АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНА ХАРАКТЕРИСТИКА, ПРОПОРЦІЙНО-ІНТЕГРУЮЧИХ ФІЛЬТРИ.

Об'єкт дослідження – лабораторний практикум з віртуального моделювання радіоавтоматичних ланок.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка віртуального моделювання радіоавтоматичних ланок з описом видів ланок.

Проаналізовано типові ланки радіоавтоматичних систем з описом схем та характеристик. Описано види з'єднань ланок в радіоавтоматичних системах.

Проведена класифікація типових систем радіоавтоматики з математичним описом автоматичних систем та класифікацією типових вхідних сигналів.

Розраховано оптимальну смугу пропускання і форми амплітудно-частотної характеристики фільтра та характеристик пропорційно-інтегруючих фільтрів.

Пояснювальна записка виконана згідно з ДСТУ-3008-2015 [1].

## ABSTRACT

Explanatory note: 85 pages, 30 figures, 1 appendice, 19 sources.

RADIOAUTOMATIC SYSTEMS, RADIOAUTOMATIC LANKS, INPUTS SIGNALS, TRANSFER FUNCTION, AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTIC, PROPORTIONAL-INTEGGING FILTERS.

The object of research is a laboratory workshop on virtual modeling of radio automatic links.

The purpose of the certification work is to develop a virtual simulation of radio automatic links with a description of the types of links.

Typical links of radio automatic systems are analyzed with a description of schemes and characteristics. Types of link connections in radio automatic systems are described.

The classification of typical radio automation systems with a mathematical description of automatic systems and the classification of typical input signals has been carried out.

The optimal bandwidth and frequency response filter shape and characteristics of proportional-integrating filters are calculated.

The explanatory note is made in accordance with DSTU-3008-2015 [1].

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП .....	9
1 ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО РАДІОАВТОМАТИЧНІ СИСТЕМИ .....	11
1.1 Основні поняття і визначення.....	11
1.2 Класифікація систем радіоавтоматики.....	14
1.3 Типові системи радіоавтоматики .....	15
1.4 Математичний опис автоматичних систем .....	16
1.4.1 Складання диференціального рівняння елемента автоматичної системи .....	16
1.4.2 Статичні і динамічні властивості елементів .....	18
1.4.3 Перетворення Лапласа .....	18
1.4.4 Перетворення Фур'є.....	20
1.4.5 Передатна функція .....	21
1.4.6 Перехід від передатної функції до частотної характеристики .....	23
1.4.7 Логарифмічні частотні характеристики .....	24
1.5 Типові вхідні сигнали .....	25
1.5.1 Східчаста вхідна дія .....	25
1.5.2 Імпульсна вхідна дія .....	26
1.5.3 Синусоїдальна вхідна дія .....	27
1.5.4 Лінійно-зростаюча вхідна дія .....	28
1.5.5 Білий шум .....	29
2 ТИПОВІ ЛАНКИ РАДІОАВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ .....	30
2.1 Аналіз видів ланок .....	30
2.1.1 Безінерційна ланка .....	30
2.1.2 Інерційна ланка .....	32
2.1.3 Інтегруюча ланка .....	33

2.1.4 Диференціююча ланка .....	34
2.1.5 Форсуюча ланка .....	35
2.1.6 Ланка запізнювання .....	36
2.1.7 Коливальна ланка .....	38
2.1.8 Помножувальна ланка .....	41
2.1.9 Корелятор.....	44
2.2 Види з'єднань ланок у радіоавтоматичних системах .....	45
2.2.1 Послідовне (каскадне) з'єднання .....	45
2.2.2 Паралельне (багатоканальне) з'єднання .....	47
2.2.3 З'єднання із зворотним зв'язком .....	48
3 РОЗРАХУНОК РОБОТИ ФІЛЬТРІВ .....	52
3.1 Розрахунок оптимальної смуги пропускання і форми АЧХ фільтра .....	52
3.1.1 Розрахунок звуження смуги пропускання АЧХ фільтра.....	52
3.1.2 Розрахунок частотної характеристики ланки запізнювання АЧХ фільтра .....	54
3.2 Розрахунок характеристик пропорційно-інтегруючих фільтрів .....	56
3.2.1 Розрахунок характеристик пасивних пропорційно-інтегруючих фільтрів .....	56
3.2.2 Розрахунок характеристик пропорційно-інтегруючих фільтрів за схемами другого порядку .....	58
4 ОХОРОНА ПРАЦІ .....	61
4.1 Аналіз умов праці на робочому.....	61
4.2 Техніка безпеки у виробничому приміщенні.....	64
4.3 Виробнича санітарія в приміщенні.....	65
4.4 Пожежна безпека виробничого приміщення місці .....	67
ВИСНОВКИ .....	69
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ .....	70
Додаток А – Презентація .....	72

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

ВЕ – виконавчий елемент;

Д – давач;

ДП – друкованих плат;

ЕП – елемент порівняння;

ЕРЕ – електрорадіоелемент;

З – задавач;

КД – конструкторської документації;

КЕ – коригувальний елемент;

ЛМС – система «людина-машина-середовище» ;

ОК – об'єкт керування;

П – підсилювач;

РА – радіоавтоматика;

ФЧХ – фазочастотна характеристика.

## ВСТУП

Вивчення технічних дисциплін використовує обидві дидактичні складові навчального процесу:

- теоретична підготовка, яка здійснюється під час лекційних занять;
- практична підготовка, основу якої становлять лабораторні роботи, що виконуються з використанням спеціалізованого обладнання, вимірювальних пристроїв, а також засобів комп'ютерної техніки.

Під час виконання лабораторного практикуму студенти використовують методичні вказівки, де міститься увесь комплекс даних стосовно теми певної лабораторної роботи. Окрему важливу частину методичного забезпечення лабораторного практикуму становить теоретична частина. Тут міститься обсяг інформації щодо наукового підґрунтя матеріалу, опанування якого є метою лабораторного завдання. На відміну від змісту лекційного матеріалу, теоретична частина лабораторного практикума більш глибоко і конкретно розкриває основні теоретичні положення, пов'язуючи їх із практикою, і вказуючи методику експеримента, що закріплює і підтверджує положення теорії.

У дисциплінах підготовки фахівців радіоелектронної галузі під час вивчення принципових положень теорії автоматичного курування використовуються такі поняття:

- основи спектрального аналізу сигналів і кіл;
- типові ланки радіоавтоматики;
- передатні функції;
- частотні характеристики.

Дана магістерська кваліфікаційна робота присвячена, в основному, розгляду теоретичної частини лабораторного практикуму, що стосується опанування основами автоматичного керування.

В кваліфікаційній роботі проаналізовано загальну інформацію про радіоавтоматичні системи(основні поняття та визначення, класифікацію типових систем радіоавтоматики, математичний опис типових систем та типові вхідні сигнали ) та типові ланки радіоавтоматичних систем з аналізом видів ланок та видами з'єднань ланок у радіоавтоматичних системах.

Під час виконання роботи було розраховано звуження смуги пропускання амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) фільтра, частотну характеристику ланки запізнювання АЧХ фільтра та розраховано характеристики пропорційно-інтегруючих фільтрів.

# 1 ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО РАДІОАВТОМАТИЧНІ СИСТЕМИ

## 1.1 Основні поняття і визначення

Маючи безперечною подібністю з іншими системами автоматичного управління, системи, радіоавтоматики мають також ряд істотних особливостей, що і визначає виділення їх в окремий самостійний клас. У системах радіоавтоматики здійснюється обробка радіосигналу, Вказана обробка ведеться радіотехнічними методами з широким використанням радіоелектронних приймально-підсилювальних, генеруючих та перетворюючих пристроїв. При цьому враховуються властивості радіосигналу, обумовлені застосуванням методом його модуляції, наявністю амплітудних, фазових та інших флюктуацій, а також враховується дія внутрішніх шумів радіоприймальних пристроїв. Системи радіоавтоматики з'явилися і набули значного поширення в 30-х роках нашого століття [2].

Сукупність пристроїв, що забезпечують автоматичний процес керування, називається автоматичною системою.

Автоматизована система – сукупність керованого об'єкта й автоматичних керуючих пристроїв, у якій частину функцій керування виконує людина [3].

Будь-яка автоматична система є інформаційною системою, оскільки усередині її циркулюють потоки інформації.

Носіями інформації є сигнали.

Сигнал – зміна фізичної величини, що використовується для пересилання даних [4].

Інформація – нові відомості про навколишній світ (т.е явища, факти, випадки...) [5].

Розрізняють початкову і робочу інформацію. Початкова (апріорна) інформація – це інформація, яка є до прийняття рішення [6] і функціонування

системи керування. Робоча інформація – це сукупність даних про стан процесу, що використовується у процесі керування.

Робота будь-якої системи радіоавтоматики відбувається в умовах дії різних перешкод. Перешкоди вносять у процес керування дії, що дезінформують.

Керуванням називається будь-яка дія, заснована на використанні інформації, яка вносить бажані зміни у процес, що підлягає керуванню.

Регулювання – це окремий випадок керування, при якому бажаний стан об'єкта керування забезпечується шляхом стабілізації однієї чи декількох фізичних величин згідно з заданими значеннями.

Більшість сучасних систем радіоавтоматики будується на основі використання принципу регулювання по відхиленню. Він передбачає негативний зворотний зв'язок виходу системи з її входом. У результаті цього система виходить замкнутою. На схемі (рис. 1.1) на елемент порівняння (ЕП) через задавач (З) надходить вхідна керуюча дія  $x(t)$ . Від давача (Д) надходить сигнал зворотного зв'язку  $y(t)$ . Призначення задавач (З) і давач (Д) – перетворення сигналів  $x(t)$  і  $y(t)$  у форму електричної напруги. У деяких системах радіоавтоматики елементи (З) і (Д) можуть бути відсутні.

На виході елемента порівняння (ЕП) утвориться сигнал помилки  $z(t)$ , що підсилюється в підсилювачі (П). Вихідний сигнал підсилювача (П) впливає на виконавчий елемент (ВЕ), що у свою чергу впливає на об'єкт керування (ОК) так, щоб увесь час зводити сигнал помилки до мінімуму.

Крім вхідного керуючого впливу  $x(t)$ , на систему радіоавтоматики діють різні збурювання  $Z_1(t)$ ,  $Z_2(t)$ , ...,  $Z_n(t)$ .

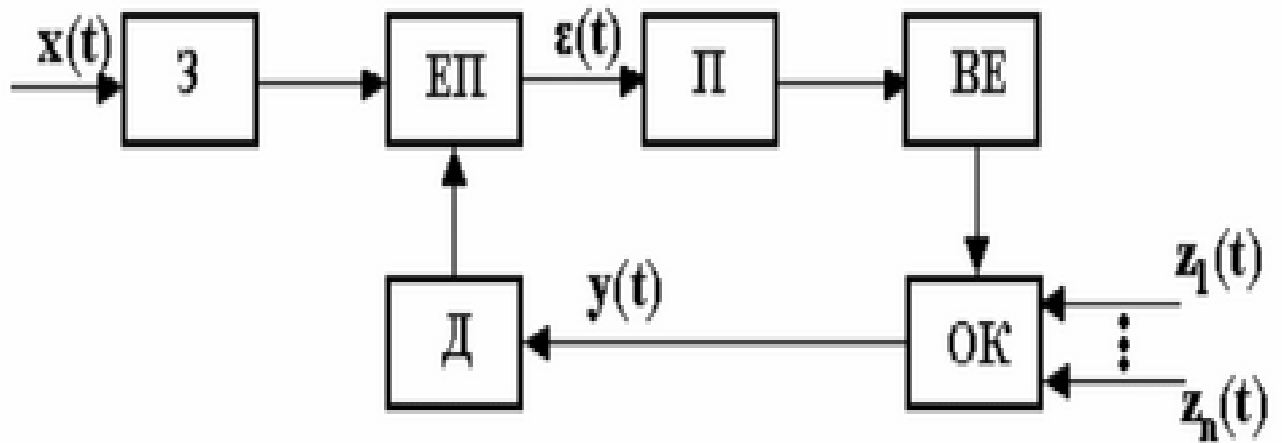


Рисунок 1.1 – Схема системи, що працює на основі регулювання по відхиленню

Крім зазначених елементів, у системи радіоавтоматики можуть входити коригувальні елементи (КЕ), необхідні для додання системі необхідних якісних показників при належному запасі стійкості.

Система є стійкою, якщо виведена зі стану рівноваги яким-небудь збурюванням, вона повертається у вихідний стан після усунення цього збурювання.

Поряд із принципом регулювання по відхиленню, у ряді випадків у системах радіоавтоматики застосовується принцип регулювання по збурюванню, сутність якого зводиться до компенсації збурювання. Цей принцип реалізується у розімкнених системах. Перевагою принципу регулювання по збурюванню є простота реалізації. Недолік цього принципу – відсутність контролю за вихідною величиною  $y(t)$ , що виключає її вплив на об'єкт керування (регулювання).

У ряді випадків застосовують комбіновані системи радіоавтоматики, що об'єднують обидва принципи регулювання [7].

## 1.2 Класифікація систем радіоавтоматики

Системи радіоавтоматики (РА) функціонують на основі автоматичного виміру та подальшого перетворення вхідного сигналу, в якості якого можуть використовуватися різні параметри сигналів: електрична напруга у системах стабілізації джерел живлення, частота або фаза напруги в системах автоматичної підбудови частоти, напрям приходу радіолокаційного сигналу в системах автоматичного супроводу станцій за кутовими координатами [8].

У зв'язку з великою різноманітністю систем радіоавтоматики їх класифікують за рядом ознак: принцип регулювання, вид сигналу помилки, вид статичних характеристик і т.ін.

За принципом регулювання системи радіоавтоматики (РА) розділяють на замкнуті системи, у яких реалізується принцип регулювання по відхиленню, і розімкнуті системи, у яких реалізується принцип регулювання по збурюванню.

За видом сигналу помилки системи РА розділяють на безперервні, у яких сигнал помилки є безперервна функція часу, що обумовлено аналоговою формою вхідного впливу  $x(t)$ , і дискретні, у яких сигнал помилки має переривчастий характер у часі, що обумовлено природною чи штучною дискретизацією вхідного впливу у часі.

За видом статичних характеристик системи РА розділяють на лінійні, у яких залежність вихідного процесу від вхідного впливу є лінійною, і нелінійні, у яких ця залежність описується нелінійною функцією через те, що один чи кілька ланок системи мають нелінійну статичну характеристику.

За характером початкової інформації системи РА розділяють на звичайні (з повною початковою інформацією) і кібернетичні (з неповною початковою інформацією). У свою чергу звичайні системи розділяють у залежності від типу вхідного впливу на стабілізуючі системи, у яких вхідний вплив є постійною величиною:

– системи програмного регулювання, у яких вхідний вплив змінюється за заданою програмою;

– слідкувальні системи, у яких вхідна дія змінюється довільно.

Кібернетичні системи РА розділяють:

- на адаптивні, у яких структура і спосіб функціонування змінюються цілеспрямовано з метою забезпечення оптимального функціонування об'єкта;
- ігрові, у яких процес керування розглядається як гра двох і більше сторін.

### 1.3 Типові системи радіоавтоматики

На практиці найчастіше використовуються такі типи систем РА: системи автоматичного визначення напрямку на джерело радіохвиль, системи автоматичного спостереження за частотою і фазою радіосигналу, системи автоматичного спостереження за часовим положенням одного або кількох радіо і відеоімпульсів, системи автоматичного регулювання підсилення.

Системи автоматичного визначення напрямку на джерело радіохвиль поширені у радіолокації, радіонавігації, радіокеруванні. Вони призначені для виміру кутових координат об'єктів, що рухаються, і спостереження за їх просторовим положенням.

Системи автоматичного спостереження за частотою застосовуються у радіоприймальних пристроях з метою підтримки постійної проміжної частоти сигналу і як демодулятори частотно-модульованих коливань. Також системи автоматичного спостереження за частотою використовуються для стабілізації частоти коливань, що генеруються і як вузькосмугові фільтри, які перебудовуються по частоті. Системи автоматичного спостереження за фазою використовуються для тих самих цілей, що й системи автоматичного спостереження за частотою, але відрізняються тим, що забезпечують підстроювання не тільки по частоті, але й по фазі коливань, тобто є чутливішими і точнішими системами.

Системи автоматичного спостереження за часовим положенням одного або кількох радіо і відеоімпульсів широко застосовуються у радіолокації і радіонавігації для виміру дальності до обраної цілі і спостереження за її радіальними переміщеннями у просторі. Також ці системи здійснюють просторово-часову селекції декількох об'єктів.

Системи автоматичного регулювання підсилення застосовуються у радіоприймальних пристроях різних видів для стабілізації рівня сигналу на виході підсилювачів при великому динамічному діапазоні вхідного сигналу.

#### 1.4 Математичний опис автоматичних систем

##### 1.4.1 Складання диференціального рівняння елемента автоматичної системи

Будь-яка система радіоавтоматики (РА) складається з ряду елементів (ланок). Для кожного елемента характерний зв'язок між його входом і виходом. Він виражається диференціальним рівнянням. Система РА описується системою диференціальних рівнянь.

Конкретний вид диференціального рівняння залежить від фізичної природи і властивостей елемента

Розглянемо, як приклад інерційну RC- ланку (рис. 1.2).

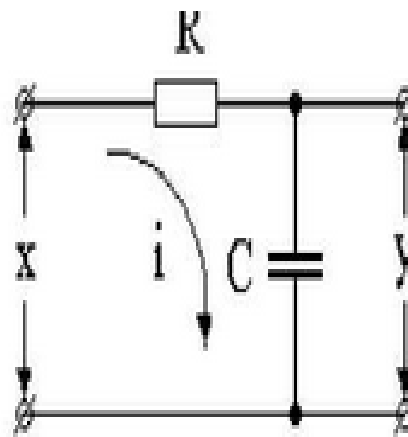


Рисунок 1.2 – Схема інерційної ланки

Якщо визначити  $x$  та  $y$  як відповідно вхідну і вихідну напруги цієї ланки, то згідно з теорією електричних кіл можна записати таке рівняння:

$$x + iR = y. \quad (1.1)$$

З урахуванням того, що  $i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dy}{dt}$ , отримаємо таке рівняння:

$$x = RC \frac{dy}{dt} + y. \quad (1.2)$$

Позначимо  $RC=T$ , тоді можна записати

$$x = T \frac{dy}{dt} + y. \quad (1.3)$$

Уведемо до розгляду символ диференціювання за часом

$$p = \frac{d}{dt}. \quad (1.4)$$

Цей штучний (але по суті вірний) прийом дозволяє переписати отримане диференціальне рівняння у формі

$$x = Tpy + y. \quad (1.5)$$

Винесемо вихідну напругу  $y$  за дужки і остаточно отримаємо

$$y = \frac{x}{1+PT} = \frac{1}{1+PT} x = kx. \quad (1.6)$$

Відзначимо, що наступний вираз називається операторним коефіцієнтом передачі інерційної (у даному випадку) ланки

$$k = \frac{1}{1+PT}. \quad (1.7)$$

#### 1.4.2 Статичні і динамічні властивості елементів

Після подачі на вхід елемента деякого впливу на його виході виникає перехідний процес, по закінченні якого настає стаціонарний стан.

Статична характеристика – функціональна залежність значення вихідного сигналу від значення вхідного в статичному режимі роботи [9].

Прикладом статичної характеристики може служити залежність між напругою на виході частотного дискримінатора і відхиленням частоти сигналу від його номінального значення (рис.1.3).

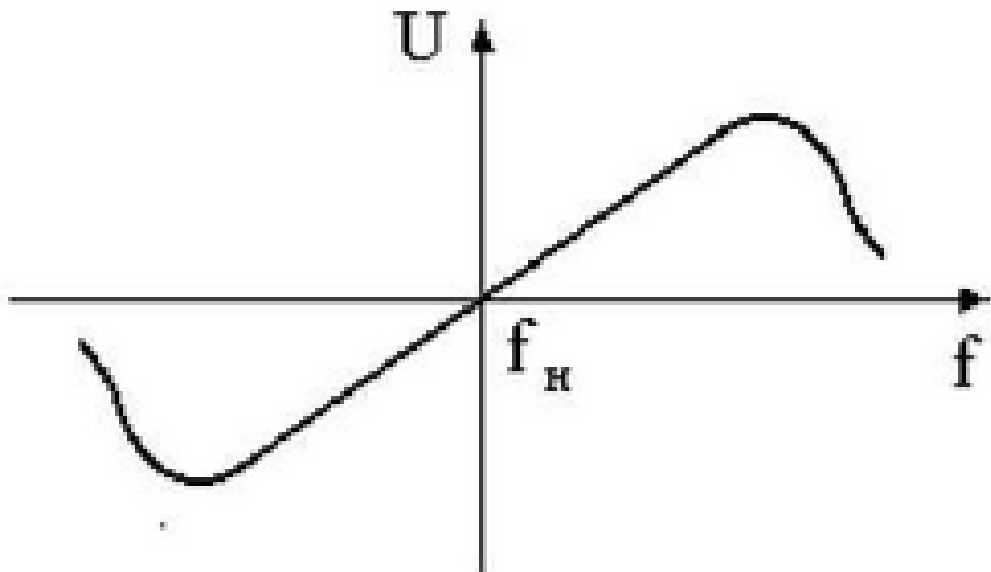


Рисунок 1.3 – Статична характеристика дискримінатора

#### 1.4.3 Перетворення Лапласа

Перетворення Лапласа має дві взаємозалежні форми – пряму і зворотну. Однією з особливостей перетворення Лапласа, які зумовили його

широке поширення в наукових і інженерних розрахунках, є те, що багатьом співвідношенням і операціям над оригіналам відповідають простіші співвідношення між їхніми зображеннями [10]. Пряме перетворення описується так

$$x(p) = \int_0^{\infty} x(t) e^{-pt} dt, \quad (1.8)$$

де  $x(t)$  – оригінал функції, тобто функційна залежність у часовому вимірі;  
 $x(p)$  – зображення функції  $x(t)$  за Лапласом, тобто у вимірі комплексної змінної

$$p = c + j\omega. \quad (1.9)$$

Зворотне перетворення вводиться у розгляд так

$$x(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\omega}^{c+j\omega} X(p) e^{pt} dp, \quad (1.10)$$

що дозволяє відшукати оригінал функції  $x(t)$  по її зображенню  $X(p)$ .

Існують такі методи відшукування оригіналу  $x(t)$ : табличний та метод інтегрування у комплексній площині.

Глибинний сенс перетворення Лапласа полягає у тому, що за його допомогою стає можливим здійснити перехід від вихідних диференціальних рівнянь, що описують систему РА у просторі комплексної змінної  $p$ .

На рис. 1.4 наведено загальну структурну схему ланки системи РА, яка описується коефіцієнтом передачі  $R(p)$ . На цьому рисунку  $G(p)$  та  $x(p)$  – відповідно сигнали у операторній формі на вході і виході ланки.



Рисунок 1.4 – Загальна структурна схема ланки системи РА з коефіцієнтом передачі  $R(p)$  у операторній формі.

Формула, яка описує ланку

$$x(p) = G(p)R(p). \quad (1.11)$$

Наприклад, якщо ланка є диференціатором, то

$$R(p) = p, \quad (1.12)$$

$$x(p) = pG(p). \quad (1.13)$$

Якщо ланка є інтегратором, то

$$R(p) = \frac{1}{p}, \quad (1.14)$$

$$x(p) = \frac{G(p)}{p}. \quad (1.15)$$

#### 1.4.4 Перетворення Фур'є

Якщо в перетворенні Лапласа замінити оператор  $p$  на змінну  $j\omega$  отримаємо перетворення Фур'є, яке також поділяється на пряме та зворотне.

Для прямого перетворення Фур'є маємо вираз:

$$x(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (1.16)$$

де  $x(j\omega)$  – спектральна функція дії  $x(t)$ .

Функція сигналу  $x(t)$  та його спектральна функція  $x(j\omega)$  пов'язаний між собою перетворення Фур'є. Змін однієї з цих функцій веде до зміни іншої [11].

Зворотне перетворення Фур'є має вид

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(j\omega)e^{j\omega t} d\omega. \quad (1.17)$$

Віконне перетворення Фур'є дозволяє виявити всі частоти, що містяться у сигналі на даний момент часу. При цьому сигнал ділиться на відрізки («вікна»), у яких його вважатимуться стаціонарним. Віконна функція та сигнал перемножуються. Потім вираз піддається перетворенню Фур'є. Наступним кроком є зсув віконної функції на певну величину. Зсунута функція знову множиться із сигналом, виконується перетворення Фур'є виразу. Ця процедура повторюється до кінця вихідного сигналу [12]. Все сказане вище можна записати в наступному вигляді:

$$S(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} w(\tau - t)s(\tau)e^{-j\omega t} d\tau, \quad (1.18)$$

де  $s(\tau)$ – вихідний сигнал;

$w(\tau - t)$ – віконна функція.

#### 1.4.5 Передатна функція

Передатною функцією  $N(s)$  елемента (системи) РА називається відношення зображення вихідної величини елемента (системи)  $Y(s)$  до зображення ) вхідної величини  $X(s)$  при нульових початкових умовах:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}. \quad (1.19)$$

Формально передатну функцію отримуємо з диференціального рівняння елемента (системи) РА у символічній формі шляхом заміни в ньому символу  $p$  на комплексну змінну  $s$  і розділення утвореного в такий спосіб багаточлена правої частини рівняння на многочлен лівої частини.

Наприклад, якщо диференціальне рівняння інерційного RC – елемента має вигляд:

$$x(t) = RC \frac{dy(t)}{dt}, \quad (1.20)$$

Звідки

$$x(p) = TpY(p) + Y(p) = Y(p)(Tp + 1), \quad (1.21)$$

Тоді

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{1}{Tp+1}. \quad (1.22)$$

Тепер при виконанні заміни оператора  $p$  на комплексну змінну  $S$  отримаємо

$$W(s) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{1}{Ts+1}. \quad (1.23)$$

У цьому виразі комплексні величини  $x(s)$  і  $Y(s)$  є зображенням за Лапласом часових величин  $x(t)$  і  $y(t)$ .

#### 1.4.6 Перехід від передатної функції до частотної характеристики

У загальному виді передатна функція записується так

$$W(s) = \frac{kQ(s)}{p(s)}, \quad (1.24)$$

де  $Q(s)$  – багаточлен у чисельнику,

$P(s)$  – багаточлен у знаменнику,

$k$  – постійний множник.

Замінімо комплексну перемінну  $s$  на комплексну частоту  $j\omega$  – одержимо амплітудно-фазочастотну характеристику елемента (системи)

$$W(j\omega) = \frac{kQ(j\omega)}{p(j\omega)}. \quad (1.25)$$

Наприклад, передатна функція послідовного з'єднання безінерційного підсилювача з коефіцієнтом підсилення  $k$ -го інерційного RC – ланцюга має вигляд:

$$W(s) = \frac{k}{Ts+1}. \quad (1.26)$$

Замінімо  $s$  на  $j\omega$

$$W(j\omega) = \frac{k}{j\omega T + 1} = \frac{k(1-j\omega T)}{1+\omega^2 T^2} = W(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (1.27)$$

$|W(\omega)| = \frac{k}{\sqrt{1+\omega^2 T^2}}$  – це модуль комплексного виразу, або ж, амплітудо-

частотна характеристика даного елемента;

$\varphi(\omega) = -\arctg(\omega T)$  – це аргумент комплексного виразу, або ж, фазо-  
частотна характеристика елемента.

Запишемо  $W(j\omega)$  в алгебраїчній формі

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega), \quad (1.28)$$

де  $U(\omega)$  – реальна частотна характеристика.

$V(\omega)$  – уявна частотна характеристика.

У випадку замкнутої системи РА передатна функція позначається через  $\Phi(s)$ , а амплітудно-фазочастотна характеристика – через

$$\Phi(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega), \quad (1.29)$$

де  $P(\omega)$  і  $Q(\omega)$  – відповідно реальна і уявна частотні характеристики замкнутої системи.

#### 1.4.7 Логарифмічні частотні характеристики

У реальних автоматичних системах модуль частотної характеристики змінюється в дуже широких межах при зміні частоти. Тому графічне зображення їх у звичайному масштабі неможливо. У цих випадках зручно скористатися логарифмічними частотними характеристиками: амплітудною і фазовою.

Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика визначається співвідношенням:

$$L(\omega) = 20 \lg |W(\omega)|, \quad (1.30)$$

де  $L(\omega)$  – у децибелах, а частота  $\omega$  відкладається в декадах чи октавах. Логарифмічна фазо-частотна характеристика  $\varphi(\omega)$  відображається в градусах, а частота – у декадах чи в октавах (рис.1.5).

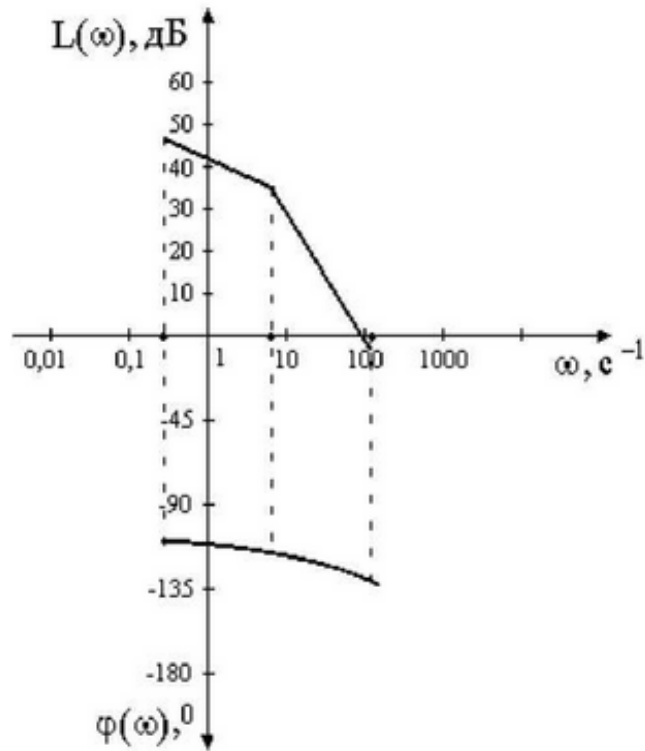


Рисунок 1.5 – Логарифмічні амплітудно-фазо-частотні характеристики

## 1.5 Типові вхідні сигнали

### 1.5.1 Східчаста вхідна дія

Типовий вхідний сигнал східчастої вхідної дії (рис.1.6):

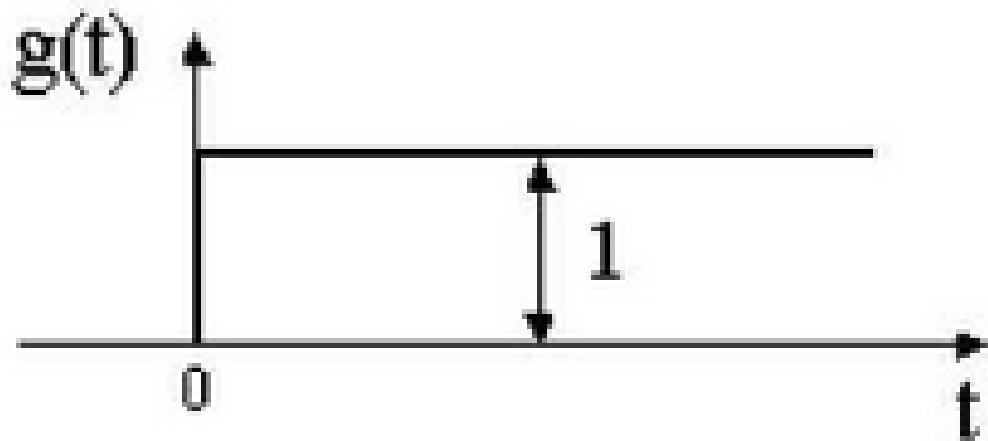


Рисунок 1.6 – Східчаста вхідна дія

Інакше її ще називають одиничним сигналом і описується так:  $g(t) = 1(t) = 0$  при  $t < 0$  і  $= 1$  при  $t > 0$ . Зображення по Лапласу має вигляд:

$$g(p) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-pt} dt = \int_0^{\infty} e^{-pt} dt = -\frac{1}{p}e^{-pt} \Big|_0^{\infty} = \frac{e^{-\infty}e^{-0}}{p} = \frac{1}{p}, \quad (1.31)$$

тобто,

$$L|1(t)| = \frac{1}{p}. \quad (1.32)$$

### 1.5.2 Імпульсна вхідна дія

Типовий вхідний сигнал імпульсної вхідної дії (рис. 1.7):

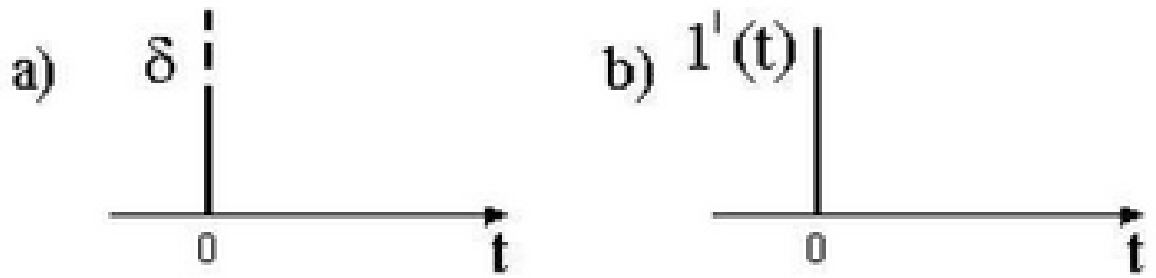


Рисунок 1.7 – Імпульсна вхідна дія

Інакше її ще називають дельта-імпульс;

$\delta$  - імпульс: висота нескінченно велика, тривалість нескінченно мала, площа дорівнює 1:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1, \quad (1.33)$$

де  $\delta$  – імпульс (рис. 1.7 а) є похідна від одиничного стрибка (рис. 1.7 б)

Зображення по Лапласу

$$L|1'(t)| = 1. \quad (1.34)$$

### 1.5.3 Синусоїдальна вхідна дія

Типовий вхідний сигнал синусоїдальної вхідної дії (рис. 1.8).

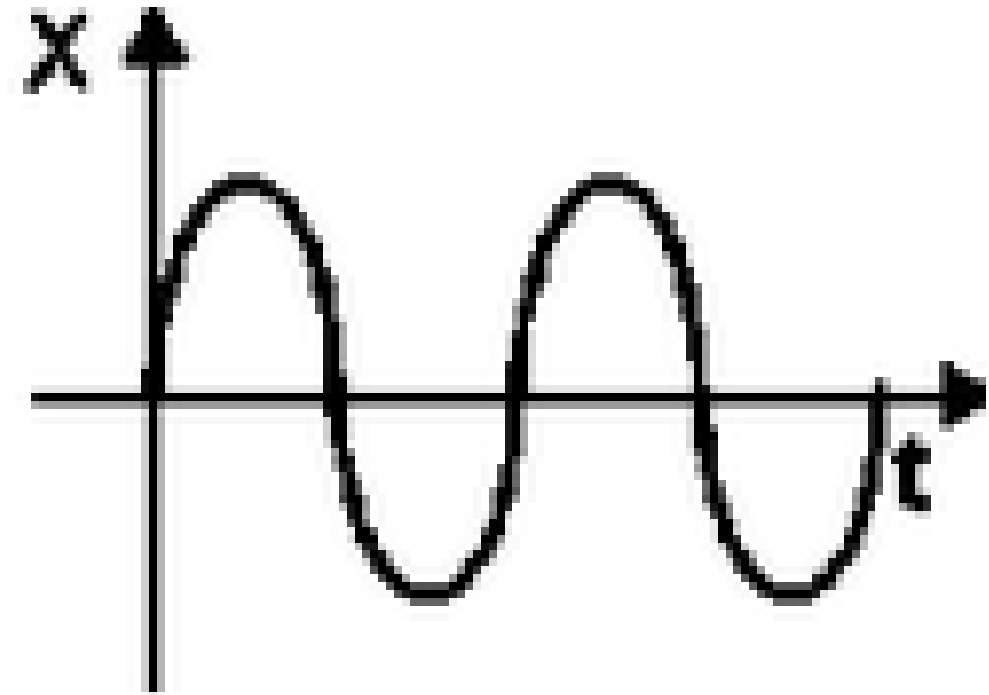


Рисунок 1.8 – Синусоїдальна вхідна дія

Формула синусоїдальної вхідної дії

$$g(t) = A \sin(\omega t + \varphi). \quad (1.35)$$

Зображення по Лапласу при  $\varphi = 0$

$$L|A \sin(\omega t)| = \frac{A\omega}{p^2 + \omega^2}. \quad (1.36)$$

#### 1.5.4 Лінійно-зростаюча вхідна дія

Типовий вхідний сигнал лінійно-зростаючою вхідної дії (рис. 1.9).

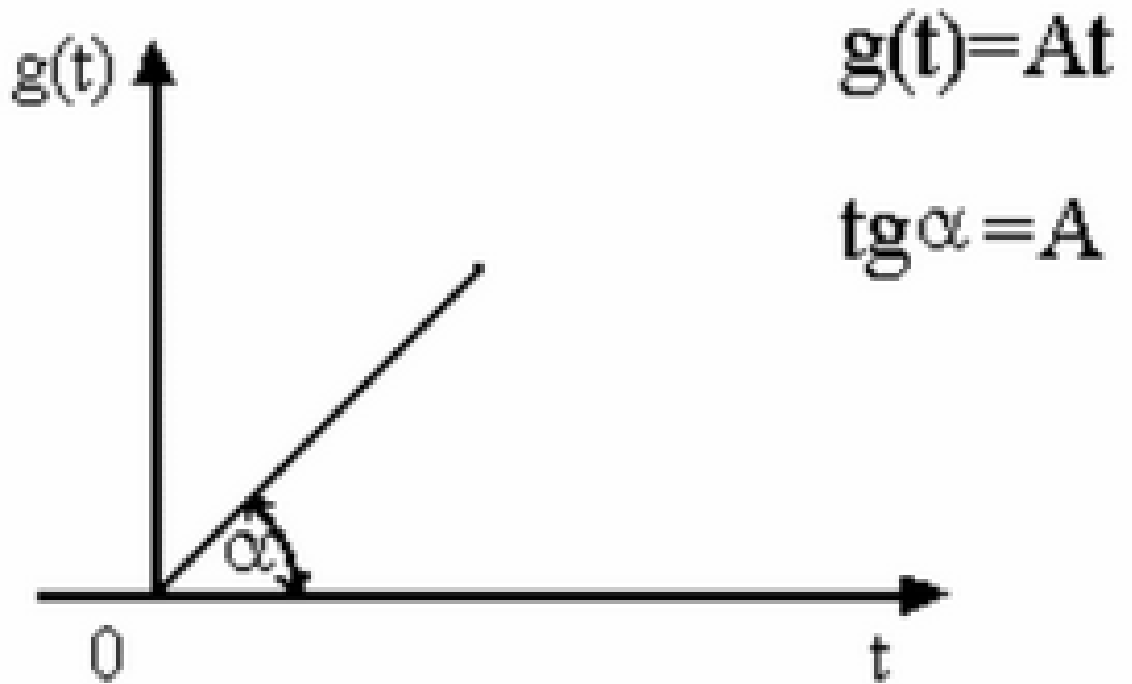


Рисунок 1.9 – Лінійно-зростаюча вхідна дія

Зображення по Лапласу

$$g(p) = \frac{A}{p^2}. \quad (1.37)$$

### 1.5.5 Білий шум

Білий шум – постійний шум, спектральні складові якого рівномірно розподілені по всьому діапазону частот. Назву одержав від білого світла, яке включає електромагнітні хвилі частот усього видимого діапазону електромагнітного випромінювання [13].

На відміну від раніше розглянутих, даний вплив є випадковим, а не детермінованим.

Прикладом випадкового процесу може служити флуктуаційна напруга, що спостерігається на екрані осцилографа, підключеного до виходу ненастроєного чутливого радіоприймача (рис 1.10).



Рисунок 1.10 – Загальний вид білого шуму

## 2 ТИПОВІ ЛАНКИ РАДІОАВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ

### 2.1 Аналіз видів ланок

Поняття “типові ланки” теорії управління технічними системами, переважно, пов'язані з описом систем автоматичного управління у змінних “вхід – вихід”, тобто. опис систем у передавальних функціях. Будь-яку лінійну систему автоматичного управління можна структурно розділити на найпростіші елементи (ланки) [14].

В аналізі складних систем широко використовується метод декомпозиції, за яким систему будь-якого ступеня складності можна уявити як сукупність елементарних кіл, що поєднані між собою певним чином та виконують основні функції перетворення сигналів. У радіоавтоматичних системах найчастіше використовуються дев'ять кіл, що мають назву типових ланок. Розглянемо їх схеми та основні характеристики.

Зазвичай при моделюванні використовуються часові характеристики – перехідна та імпульсна, а також частотні – комплексний коефіцієнт передачі, АЧХ, ФЧХ, амплітудно-фазова характеристика.

#### 2.1.1 Безінерційна ланка

До него відноситься пристрій, який має передавальну функцію вигляду

$$T(p) = K_0, \quad (2.1)$$

де  $K_0$  – стала величина, що є коефіцієнтом передачі.

АЧХ та ФЧХ безінерційної ланки подаються виразами відповідно

$$K(\omega) = K_0. \quad (2.2)$$

Схеми безінерційних ланок мають вигляд (рис 2.1).

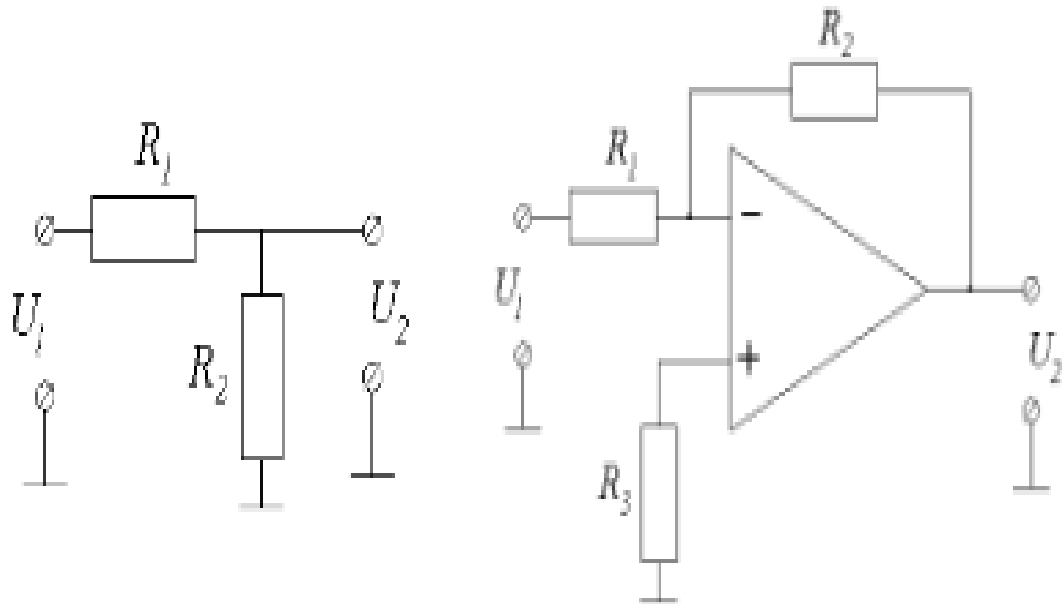


Рисунок 2.1 – Схеми безінерційних ланок

Згідно з (2.2) безінерційна ланка виконує функцію підсилення(масштабування) вхідного сигналу в нескінченному діапазоні частот  $0 \leq f \leq \infty$ , не змінюючи форми сигналу. Прикладами ланки є резистивний подільник та аперіодичний підсилювач.

Для першої схеми коефіцієнт передачі становить

$$K(\omega) = \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (2.3)$$

а для другої, у припущенні ідеального операційного підсилювача, для якого вхідні струми та напруга між входами дорівнюють нулю, з рівності  $U_1/R_1 = U_2/R_2$  отримується

$$K(\omega) = \frac{R_2}{R_1}. \quad (2.4)$$

### 2.1.2 Інерційна ланка

До таких ланок відносяться пристрої, які мають передавальну функцію вигляду

$$T(p) = \frac{K_0}{1+pt}. \quad (2.5)$$

Комплексний коефіцієнт передачі, АЧХ і ФЧХ визначаються за виразами:

$$T(j\omega) = \frac{K_0}{1+j\omega t}, \quad (2.6)$$

$$|T(j\omega)| = \frac{K_0}{\sqrt{1+(\omega t)^2}}, \quad (2.7)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg(\omega t). \quad (2.8)$$

У частотному аналізі використовується також поняття годографа системи, яка являє собою лінію, яку описує кінець вектора комплексного коефіцієнта передачі на комплексній площині при змінненні частоти від нуля до нескінченності. Для побудови годографа можна скористатися як алгебраїчною, так і експонентною формами запису комплексного коефіцієнта передачі

$$K(j\omega) = K_0 \left[ \frac{1}{1+(\omega t)^2} - j \frac{\omega t}{1+(\omega t)^2} \right] = K(w)e^{j\varphi(\omega)}. \quad (2.9)$$

Прикладом інерційної ланки є RC-коло. Тут  $K_0 = 1$ , а перехідна та імпульсна характеристика записуються

$$h(t) = 1 - e^{-t/\tau}, \quad g(t) = e^{-t/\tau}. \quad (2.10)$$

### 2.1.3 Інтегруюча ланка

Зробимо у виразі (2.6) припущення, що  $\omega\tau \gg 1$  та знехтуємо одиницею у знаменнику. У результаті отримаємо передавальну функцію ланки

$$T(p) = \frac{K_0}{pt}, \quad (2.11)$$

яка має назву ідеального інтегратора (рис. 2.2).

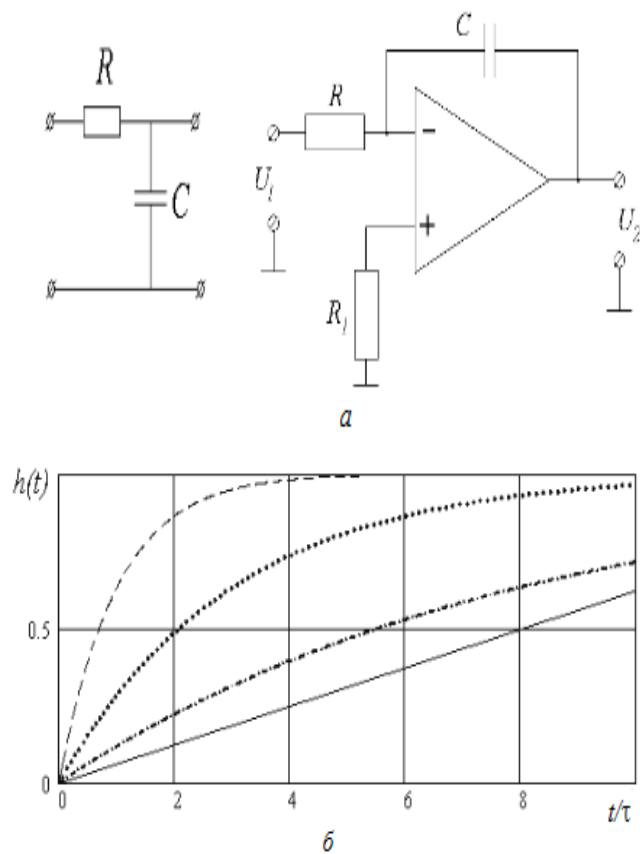


Рисунок 2.2 – Схема інтегратора (а), перехідні характеристики інерційної ланки та ланки інтегратора (б)

Таким чином, інтегратор – це інерційна ланка з досить великою сталою часу  $t$ , для якої коефіцієнт передачі та частотні характеристики відповідно виглядають

$$K(j\omega) = \frac{K_0}{j\omega t}, \quad (2.12)$$

$$K(\omega) = \frac{K_0}{\omega t}, \quad \varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2}. \quad (2.13)$$

Рисунок 2.2 (б), ілюструє перехідні характеристики інерційної ланки. Видно, як із зростанням сталої часу експонентна перехідна характеристика (2.10) прямує до вигляду лінійної функції.

#### 2.1.4 Диференціююча ланка

Передавальна функція диференціюючої ланки

$$T(p) = K_0 p, \quad (2.14)$$

не відповідає умові фізичної реалізації. Частотні характеристики диференціюючої ланки

$$K(j\omega) = j\omega K_0, \quad (2.15)$$

$$K(\omega) = \omega K_0, \quad \varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2}. \quad (2.16)$$

Схема, що за певних умов може виконувати функцію диференціювання вхідного сигналу, може бути побудована на основі операційного підсилювача (рис. 2.3). Тут комплексний коефіцієнт передачі становить  $K(j\omega) = j\omega RC$ .

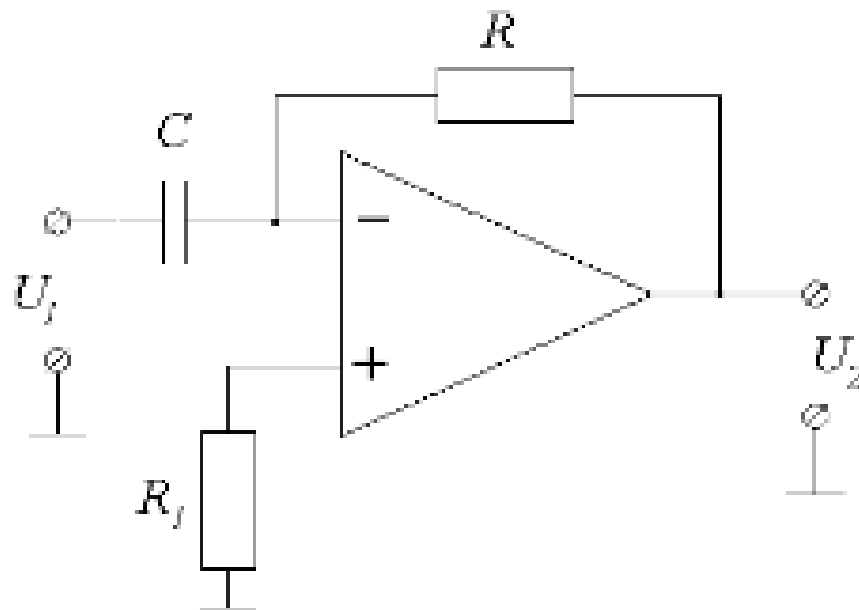


Рисунок 2.3 – Схема диференціюючої ланки на основі операційного підсилювача

### 2.1.5 Форсуюча ланка

Вираз для передавальної функції форсуючої ланки

$$T(p) = K_0(1 + pt), \quad (2.17)$$

показує, що для неї не виконується умова фізичної реалізації, оскільки порядок чисельника передавальної функції дорівнює одиниці, а знаменника – нулю, за виразом (2.3). Втім, за умов певних наближень схему форсуючої ланки на основі біполярного транзистора можна зобразити як на рис. 2.4. Отримаємо вираз для передавальної функції схеми, припустивши, що транзистор є ідеальним, тобто напругою база-емітер можна зневажити, прийнявши  $U_{бе} = 0$ , а коефіцієнт передачі струму емітера покласти  $\alpha = 1$ . Тоді струм в емітерному колі

$$I_1 = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1} (1 + pR_1C_1), \quad (2.18)$$

а напруга на виході  $U_{\text{ВІХ}} = I_1 R \frac{U_{\text{ВХ}} R}{R_1} (1 + pR_1C_1)$ , де позначено опір

$$R = \frac{R_K R_H}{R_K + R_H}. \quad (2.19)$$

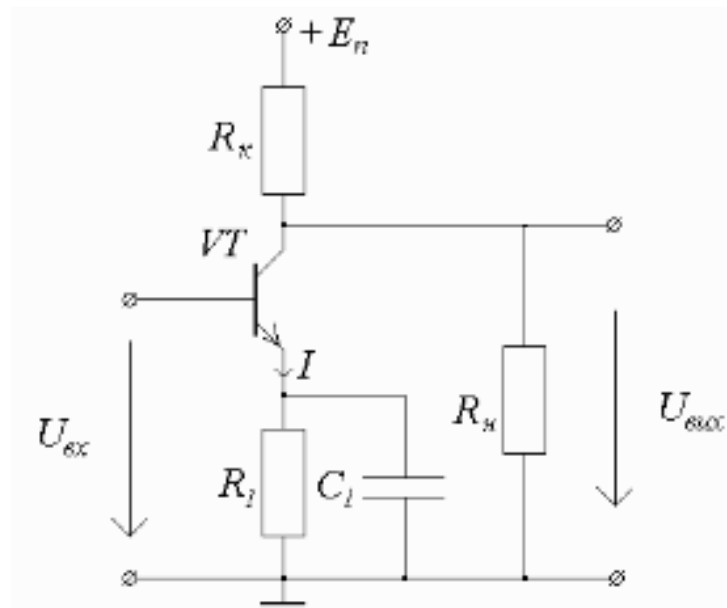


Рисунок 2.4 – Схема форсуючої ланки на біполярному транзисторі

У результаті отримуємо передавальну функцію схеми у вигляді

$$T(p) = \frac{U_{\text{ВІХ}}}{U_{\text{ВХ}}} I_1 R \frac{R}{R_1} (1 + pR_1C_1), \quad (2.20)$$

який збігається з (2.19), де  $K_0 = R/R_1$ ,  $t = R_1C_1$ .

### 2.1.6 Ланка запізнювання

Передавальна функція цієї ланки

$$T(p) = e^{-pt}, \quad (2.21)$$

коефіцієнт передачі, АЧХ і ФЧХ (рис. 2.5)

$$K(j\omega) = e^{-j\omega t}, \quad (2.22)$$

$$K(\omega) = 1, \quad \varphi(\omega) = -\omega t, \quad (2.23)$$

вказують, що сигнал на виході не зазнає амплітудних спотворень, а лише затримується на величину  $\tau$ , яка визначається кутом нахилу фазової характеристики

$$t = \left| \frac{d\varphi}{d\omega} \right|. \quad (2.24)$$

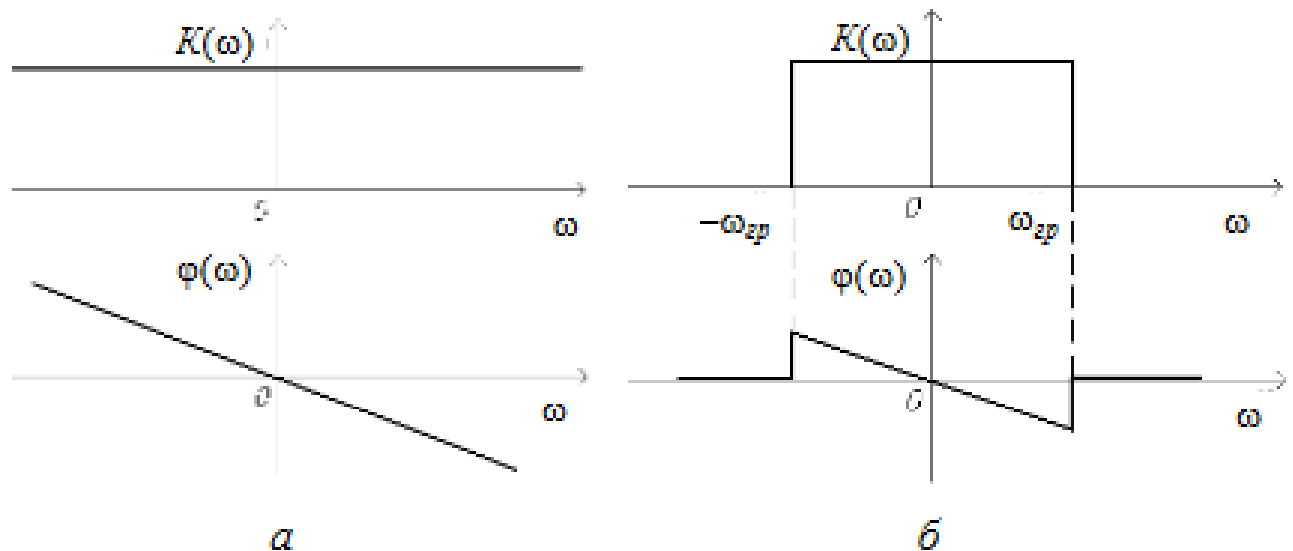


Рисунок 2.5 – Частотні характеристики ланки запізнювання

Імпульсна характеристика ланки запізнювання є  $\delta$ -функцією,

зсунутою по осі часу на величину  $\tau$  (рис. 2.5 а), тобто

$$g(t) = \delta(\tau - t). \quad (2.25)$$

Отримання однорідного коефіцієнта передачі і лінійної ФЧХ (2.23) у нескінченному частотному діапазоні неможливо, тому для реальних моделей введемо обмеження

$$K(j\omega) = \begin{cases} 1, & \omega \leq |\omega_{\text{гр}}| \\ 0, & \omega < -\omega_{\text{гр}}, \omega > \omega_{\text{гр}} \end{cases}, \quad (2.26)$$

тобто, ланка запізнювання представляє собою фільтра нижних частот, гранична частота якого становить  $\omega_{\text{гр}}$ .

Обмеження частотного діапазону коефіцієнта передачі, за (2.26) (рис. 2.5 б), призводить до збільшення тривалості імпульсної характеристики. Крім того, відгук системи перестає відповідати умові фізичної реалізації:

$g(t) = 0$  при  $t < 0$ . На рис. 2.6 показано спотворення імпульсної характеристики ланки запізнювання при обмеженні частотного діапазону коефіцієнта передачі.

Як ланка запізнювання використовуються штучні лінії на основі LC-контурів із різними видами зв'язку та твердотільні лінії затримки. Широко відомим прикладом є лінія затримки телевізійного приймача, яка забезпечує затримку рядка при розгортанні кадру в стандарті телебачення SECAM.

### 2.1.7 Коливальна ланка

Для коливальної ланки передавальна функція

$$T(p) = \frac{K_0}{p^2 + 2bp + \omega_0^2}. \quad (2.27)$$

Імпульсні характеристики ланки запізнювання мають вигляд (рис. 2.6)

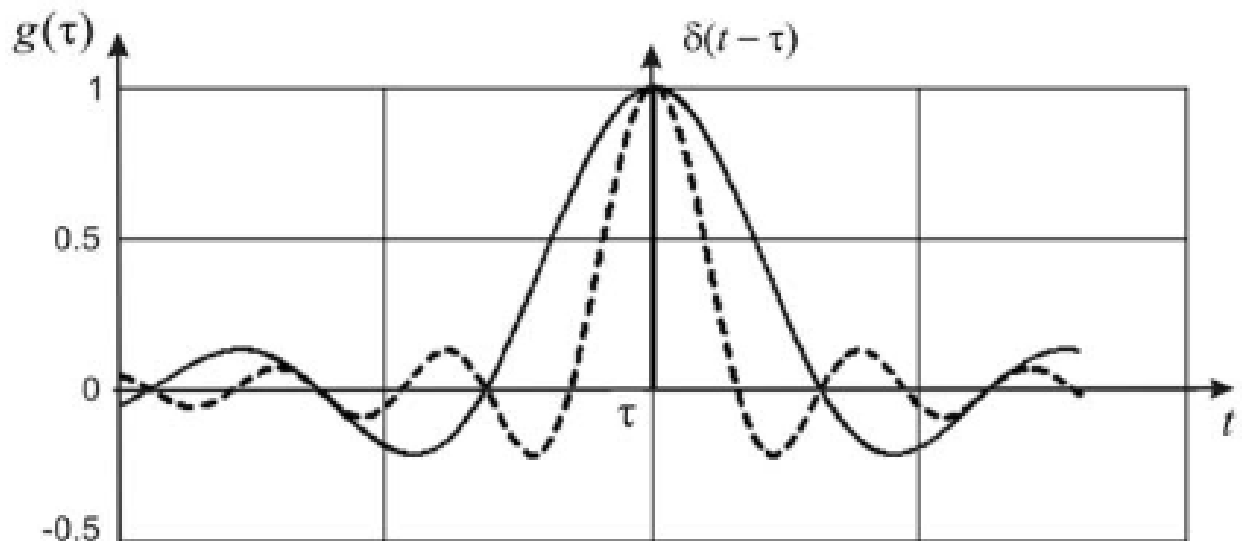


Рисунок 2.6 – Імпульсні характеристики ланки запізнювання

звідки впливають частотні характеристики

$$K(j\omega) = \frac{K_0}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2j\omega b}, \quad (2.28)$$

$$K(\omega) = \frac{K_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \delta^2}}, \quad (2.29)$$

$$\varphi(j\omega) = \arctg \frac{2\omega \delta}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (2.30)$$

Прикладом коливальної ланки є коливальний контур або резонансний підсилювач (рис. 2.7), для частотних характеристик яких введено параметри  $b = R / 2L$  – загасання,  $\omega_0 = 1 / \sqrt{LC}$  – резонансна частота. Величина  $\omega_B = \sqrt{\omega_0^2 - b^2}$  – є частотою вільних коливань.

Користуючись властивостями перетворення Лапласа, розрахуємо

імпульсну характеристику коливальної ланки  $(g)t$ . З виразу (2.27) видно, що вигляд функції  $(g)t$  визначатиметься характером коренів характеристичного рівняння  $p^2 + 2\delta p + \omega_0^2 = 0$ . Для комплексно сполучених коренів  $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_b$  імпульсна характеристика являє собою коливальний процес з загасаючою амплітудою

$$g(t) = \frac{K_0}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} e^{-\delta t} \sin \omega_b t. \quad (2.31)$$

Коливальна ланка являє собою коло першого порядку, тобто його передавальна функція може виглядати

$$T(p) = \frac{K_0}{(p-p_1)(p-p_2)}. \quad (2.32)$$

Це означає, що коливальну ланку можна уявляти як каскадне з'єднання двох інерційних ланок першого порядку.

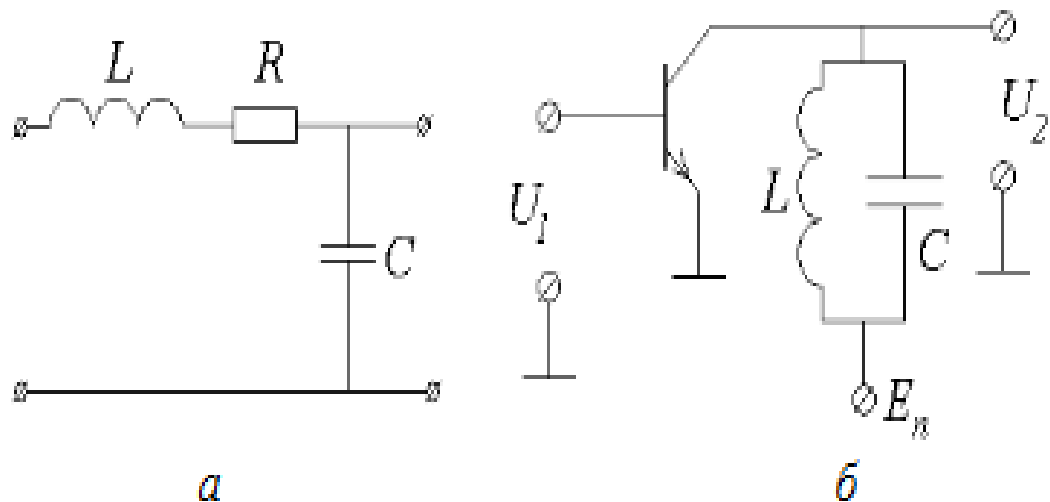


Рис. 2.7 – Схеми коливальної ланки:  
на основі контуру (а);  
і транзисторного резонансного підсилювача (б).

Розглянуті ланки виконують лінійні перетворення сигналів, тобто для них справедливі умови теореми накладання. Розглянемо також ланки, які виконують нелінійні перетворення.

### 2.1.8 Помножувальна ланка

Множення сигналів є однією з широко використовуваних операцій обробки в радіоавтоматичних системах. Вихідна функція помножувача визначається виразом:

$$Y = K_0 X_1 X_2, \quad (2.33)$$

де  $K_0$  – коефіцієнт пропорційності.

Розглянемо годографи типових ланок радіоавтоматики. В MathCAD приведено приклади побудови годографів типових радіоавтоматичних ланок за допомогою програмного пакета MathCAD.

Інерційна ланка має вигляд (рис. 2.8).

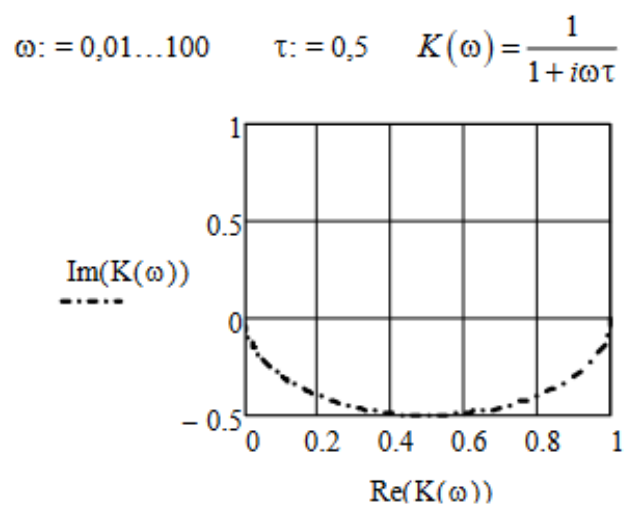


Рисунок 2.8 – Інерційна ланка

Форсууюча ланка має вигляд( рис. 2.9).

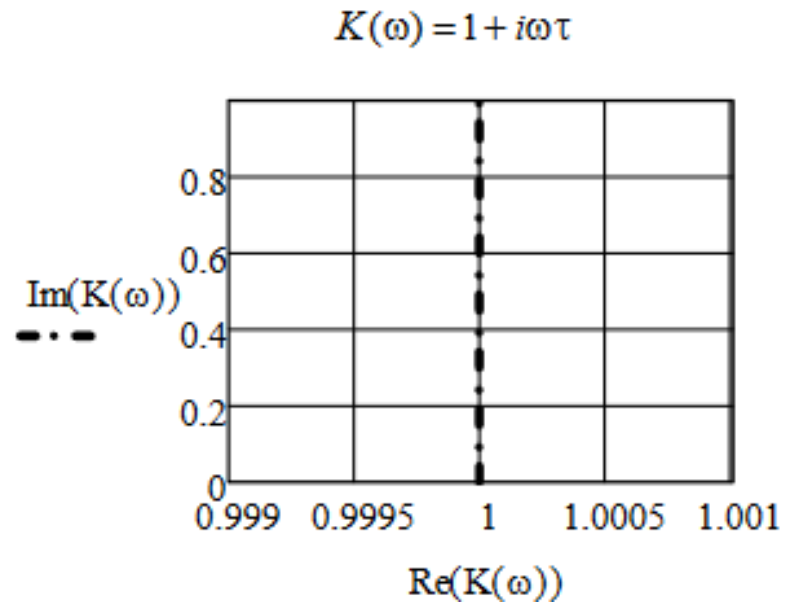


Рисунок 2.9 – Форсууюча ланка

Коливальна ланка має вигляд( рис. 2.10).

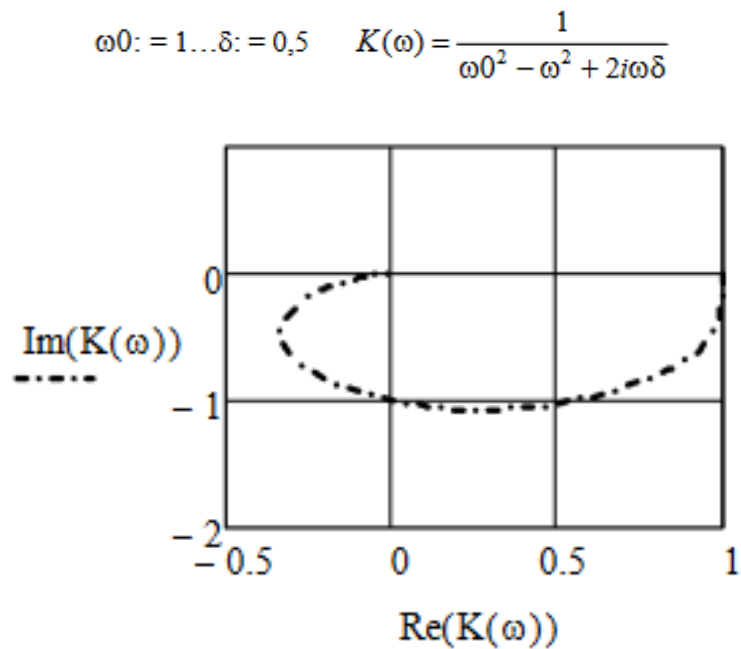


Рисунок 2.10 – Коливальна ланка

Ланка запізнювання має вигляд( рис. 2.11).

$$\tau = 0,1 \quad K(\omega) = \exp(-i\omega\tau)$$

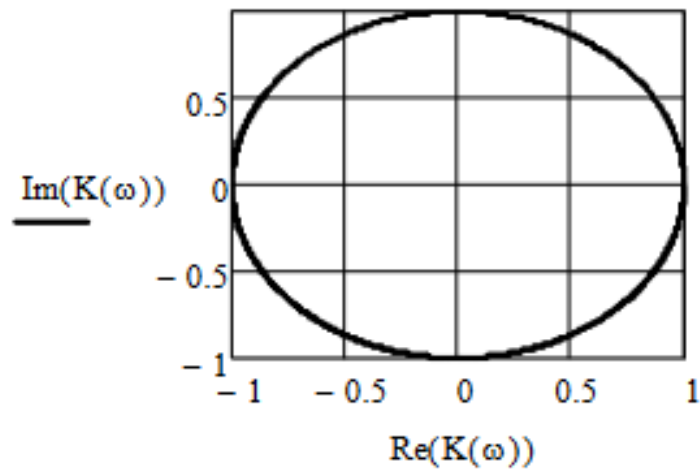


Рисунок 2.11 – Ланка запізнювання

Операція множення може здійснюватися двома методами:

а) як результат прямого множення в лінійно-параметричних пристроях, в яких коефіцієнт передачі є пропорційним одному з співмножників

$K = K_0 X_1$ , а вихідний сигнал є функцією другого співмножника:  $Y = K_0 X_2$ , що після підстановки в (2.33) дає в результаті добуток двох сигналів;

б) у помножувачах непрямого типу, де використовуються не лінійні елементи з квадратичною вольт-амперною характеристикою. Під дією напруги, що залежить від суми сигналів  $u = a(X_1 + X_2)$ , струм у колі нелінійного елемента з квадратичною ВАХ становитиме

$$i = i_0 + ac(X_1 + X_2) + \beta c(X_1 + X_2) + 2\beta c X_1 X_2, \quad (2.34)$$

тобто, містить складову, що пропорційна добутку сигналів  $X_1$  та  $X_2$ . Позбавитися зайвих складових суми (2.33) можна шляхом фільтрації або компенсації.

Помножувачі є обов'язковими елементами перетворювачів частоти в радіоприймальних пристроях та синтезаторах частоти некогерентного типу.

### 2.1.9 Корелятор

Функція обробки сигналів, виконувана корелятором виглядає

$$z(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t - \tau)dt. \quad (2.35)$$

Коливання  $x(t)$  та  $x(y)$  можуть бути як детермінованими сигналами, так і стаціонарними випадковими процесами. В такому випадку, якщо середні значення процесів дорівнюють нулю, то кореляційний інтеграл (2.35) є пропорційним взаємно кореляційній функції сигналів  $x(t)$  та  $x(y)$ , тобто

$$z(\tau) = R(\tau) = \overline{x(t)y(t - \tau)} = \sigma_x \sigma_y r(\tau), \quad (2.36)$$

де  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  – дисперсії,

$r(\tau)$  – коефіцієнт кореляції вхідних сигналів.

Формула (2.35) показує, що корелятор має складатися з помножувальної та інтегруючої ланок (рис. 2.12).

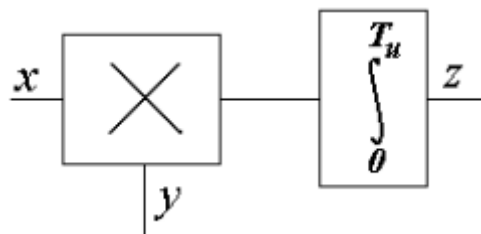


Рисунок 2.12 – Структурна схема корелятора

На практиці інтегрування здійснюється протягом скінченного

інтервалу, тривалість якого визначається часом існування сигналу, інтервалом кореляції або часом, що відведений для його обробки. В такому випадку корелятор виконує функцію інтегрування добутку сигналу у скінченних межах, і формула (2.37) виглядає

$$z(\tau) = \int_0^{Tu} x(t)y(t - \tau)dt. \quad (2.37)$$

Вираз (1.39) являє собою конволюцію функцій  $x(t)$  та  $x(y)$ , і згідно з властивостями перетворення Лапласа, передавальна функція корелятора є добутком передавальних функцій співмножників

$$T(p) = T_x(p)T_y(p). \quad (2.38)$$

Звідси отримаємо також вирази для частотних характеристик

$$K(\omega) = K_x(\omega)K_y(\omega), \quad \varphi(\omega) = \varphi_x(\omega)\varphi_y(\omega). \quad (2.39)$$

Корелятори є основними елементами кореляційних радіоприймачів радіолокаційних систем [15].

## 2.2 Види з'єднань ланок у радіоавтоматичних системах

Для виконання більш складних функцій, ніж показано вище, радіоавтоматичні системи складаються з типових ланок, які поєднуються різними способами. Розглянемо основні способи з'єднання ланок у системах.

### 2.2.1 Послідовне (каскадне) з'єднання

Схему послідовного з'єднання подано на рис. 2.13

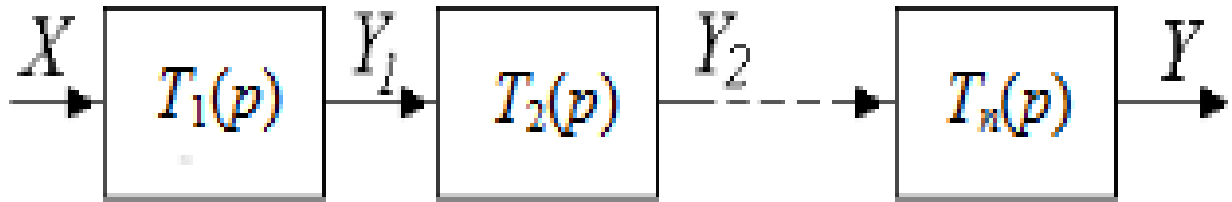


Рисунок 2.13 – Схема послідовного з'єднання ланок

За визначенням передавальної функції лінійної системи, у даному випадку отримуємо

$$T(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{Y(p)}{X_{n-1}(p)} \frac{Y_{n-1}(p)}{X_{n-2}(p)} \dots \frac{Y_1(p)}{X(p)} = T_1(p)T_2(p) \dots = T_n(p), \quad (2.40)$$

тобто передавальна функція системи дорівнює добутку передавальних функцій окремих ланок. АЧХ також визначатиметься як доданок, а ФЧХ як сума відповідних характеристик складових послідовної системи

$$\varphi(\omega) = \varphi_1(\omega)\varphi_2(\omega) + \dots + \varphi_n(\omega) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(\omega). \quad (2.41)$$

Логарифмічна АЧХ системи

$$L(\omega) = 20 \lg K(\omega), \quad (2.42)$$

також визначатиметься як сума логарифмічних АЧХ окремих ланок

$$L(\omega) = L_1(\omega) + L_2(\omega) + \dots + L_n(\omega) = \sum_{i=1}^n L_i(\omega), \quad (2.43)$$

що значно полегшує розрахунки і побудову графіків характеристик послідовного з'єднання.

### 2.2.2 Паралельне (багатоканальне) з'єднання

При паралельному з'єднанні вхідний сигнал подається на вхід кожної з складових ланок, а вихідні сигнали підсумовуються (рис. 2.14).

Для такого визначення

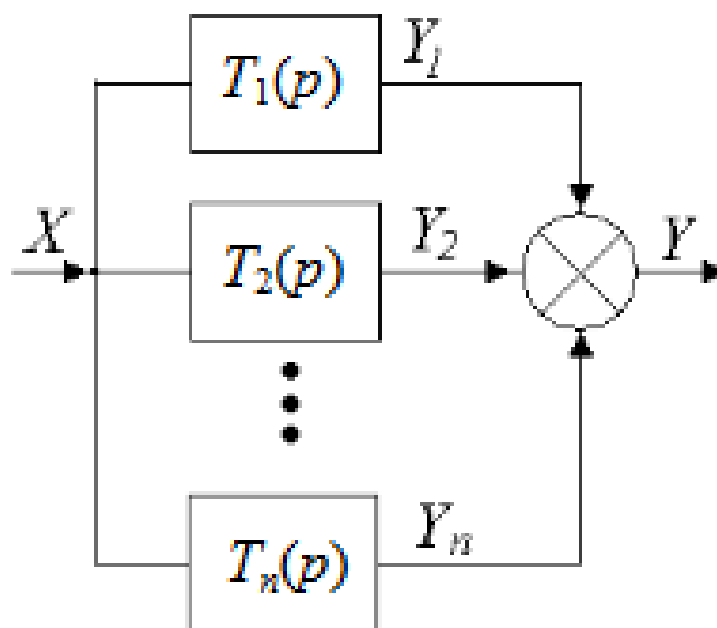
$$Y(\omega) = Y_1(\omega) + Y_2(\omega) + \dots + Y_n(\omega), \quad (2.44)$$

тобто передавальна функція паралельного з'єднання дорівнює сумі передавальних функцій окремих ланок

$$T(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = T_1(p) + T_2(p) + \dots + T_n(p) = \sum_{i=1}^n T_i(p), \quad (2.45)$$

а комплексний коефіцієнт передачі сумі коефіцієнтів передачі

$$K(j\omega) = \sum_{i=1}^n K_i(j\omega). \quad (2.46)$$



## Рисунок 2.14 – Схема паралельного з'єднання ланок

Щоб отримати вирази для АЧХ і ФЧХ, треба знайти реальну та уявну частини  $K(j\omega)$ , тобто

$$K(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega). \quad (2.47)$$

Тоді частотні характеристики запишемо як

$$K(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}, \quad (2.48)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}. \quad (2.49)$$

## 2.2.3 З'єднання із зворотним зв'язком

Визначимо характеристики з'єднання ланок, при якому вихідний сигнал подається на вхід через коло зворотного зв'язку (рис. 2.15). У результаті на вході ланки прямої передачі  $T_1(p)$  існує сигнал

$$E(p) = X(p) + Y_1(p) = X(p) + T_2(p)Y(p), \quad (2.50)$$

який має назву сигналу непогодженості або сигналу помилки. Вихідне коливання дорівнює

$$Y(p) = E(p) + T_1(p). \quad (2.51)$$

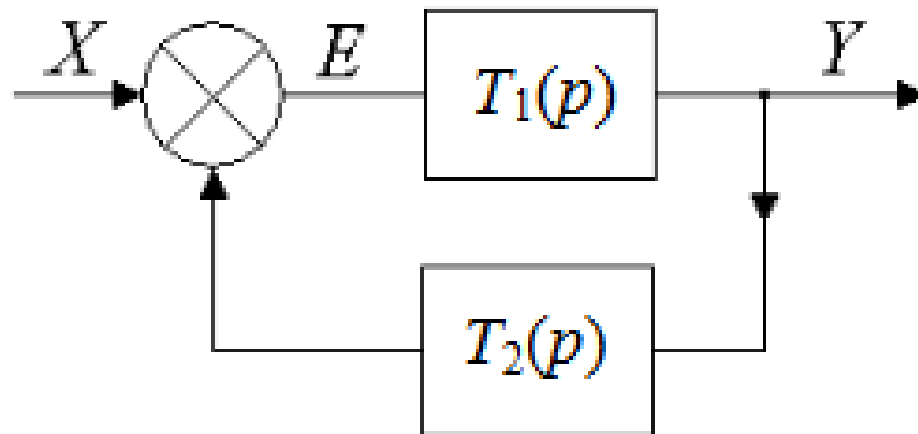


Рисунок 2.15 – Схема з'єднання ланок із зворотним зв'язком

Виключаючи з (2.50) та (2.51) сигнал помилки, отримуємо

$$Y(p) - T_1(p)T_2(p)Y(p) = T_1(p)X(p), \quad (2.52)$$

звідки фундаментальний вираз для передавальної функції системи із зворотним зв'язком має вигляд

$$T(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{T_1(p)}{1 - T_1(p)T_2(p)}. \quad (2.53)$$

Розрахунок було проведено для випадку, коли сигнал помилки (2.50) дорівнює сумі сигналів, що відповідає системі із позитивним зворотним зв'язком. Якщо ж сигнал помилки є різницею

$$E(p) = X(p) - T_2(p)Y(p), \quad (2.54)$$

то в системі має місце від'ємний зворотний зв'язок, а передавальна функція має вигляд

$$T(p) = \frac{T_1(p)}{1+T_1(p)T_2(p)}. \quad (2.55)$$

Коефіцієнт передачі системи із зворотним зв'язком виражається як:

$$K(j\omega) = \frac{K_1(j\omega)}{1-K_1(j\omega)K_2(j\omega)}, \quad (2.56)$$

Добуток коефіцієнтів передачі у знаменнику (2.56) визначає коефіцієнт передачі розімкненої системи або петльовий коефіцієнт передачі

$$K_p(j\omega) = \frac{Y_1(j\omega)}{X(j\omega)} = K_1(j\omega)K_2(j\omega), \quad (2.57)$$

Якщо  $K_2(j\omega) = 1$ , то в системі має місце жорсткий зворотний зв'язок, для якого

$$K_g(j\omega) = \frac{K_1(j\omega)}{1-K_1(j\omega)}. \quad (2.58)$$

АЧХ та ФЧХ знаходяться відомим способом через реальну та уявну частини комплексного коефіцієнту передачі. Вираз (2.58) встановлює зв'язок між коефіцієнтами передачі розімкненої і замкненої системи. Важливим параметром систем із замкненим зворотним зв'язком є коефіцієнт передачі сигналу помилки

$$K_\varepsilon(j\omega) = \frac{E(j\omega)}{X(j\omega)}. \quad (2.59)$$

Підставимо сюди вираз для сигналу помилки (2.50) та врахуємо (2.56), що дає

$$K_{\varepsilon}(j\omega) = 1 + K_1(j\omega)K_2(j\omega), \quad (2.60)$$

або для жорсткого зворотного зв'язку

$$K_{\varepsilon}(j\omega) = 1 + K_g(j\omega). \quad (2.61)$$

З наведеного розгляду видно, що типові ланки також можна уявити як з'єднання елементарних кіл. Наприклад, форсуюча ланка може розглядатися як паралельне включення ланки запізнювання і безінерційної ланки з коефіцієнтом передачі  $K(\omega) = 1$  з наступним поданням сигналу до безінерційної ланки з  $K(\omega) = K_0$ . З'єднання типових ланок у різних комбінаціях дозволяють створити системи, поведінка яких описується складними функціями. Так, в колах прямого та зворотного зв'язку використовуються послідовне або паралельне з'єднання, крім того в системах використовуються багатоконтурні кола зворотного зв'язку.

### 3 РОЗРАХУНОК РОБОТИ ФІЛЬТРІВ

#### 3.1 Розрахунок оптимальної смуги пропускання і форми АЧХ фільтра

##### 3.1.1 Розрахунок звуження смуги пропускання АЧХ фільтра

Аналіз співвідношення сигналів і завад у частотно-вибіркових системах показує, що існує таке мінімальне значення смуги пропускання, при якому відношення сигнал/шум на виході матиме максимальне значення. Розрахунок цієї величини, яка має назву оптимальної смуги пропускання, здійснюється спектральним методом.

Припустимо, на вході лінійного вибіркового підсилювача діє сигнал у вигляді адитивної суміші прямокутного радіоімпульсу тривалістю  $\tau$  з амплітудою  $U_{m0}$  та білого шуму з спектральною густиною потужності  $N0/2$ . АЧХ підсилювача має прямокутну форму із смугою пропускання  $\Delta\omega n = 2\pi\Delta F$ , а ФЧХ є лінійною функцією. Резонансна частота підсилювача і несуча частота збігаються.

$$U_{\text{вих}} \frac{1}{\pi} \int_0^{\Delta\omega/2} K S(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (3.1)$$

де  $S(\omega) = U_{m0} \tau \frac{\sin \frac{\omega t}{2}}{\frac{\omega t}{2}}$  – спектральна густина обвідної імпульсу,

$K$  – коефіцієнт підсилення.

Підстановка  $S(\omega)$  у (3.1) дає у результаті максимальну напругу на виході

$$U_{\text{макс.вих}} \frac{2}{\pi} K U_{m0} Si \left( \frac{x}{2} \right), \quad (3.2)$$

яка буде мати місце у момент часу  $t = \tau$ . Тут  $Si(\omega) = \int_0^x \frac{\sin(t)}{t} dt$  – інтегральний синус аргументу  $x = \Delta\omega_n\tau/2$ .

Спектральна густина вихідного шуму становить  $N_{\text{вих}} = KN_0/2$ , звідки шумова напруга на виході підсилювача виходить пропорційною квадратному кореню із смуги пропускання

$$U_{\text{ш.вих}} = \sqrt{N_{\text{вих}}\Delta\omega_n} = \sqrt{\frac{KN_0}{\tau}} \sqrt{x}. \quad (3.3)$$

Відношення сигнал/шум на виході (коефіцієнт розрізнюваності)

$$\gamma = \frac{U_{\text{макс.вих}}}{U_{\text{ш.вих}}} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{K\tau}{N_0}} U_{m0} \frac{Si\left(\frac{x}{2}\right)}{\sqrt{x}} A \frac{Si\left(\frac{x}{2}\right)}{\sqrt{x}}. \quad (3.4)$$

Графік другого доданка останнього виразу (3.4), який залежить від смуги, наведено на рис. 3.1. За певного значення  $x$  функція досягає максимуму.

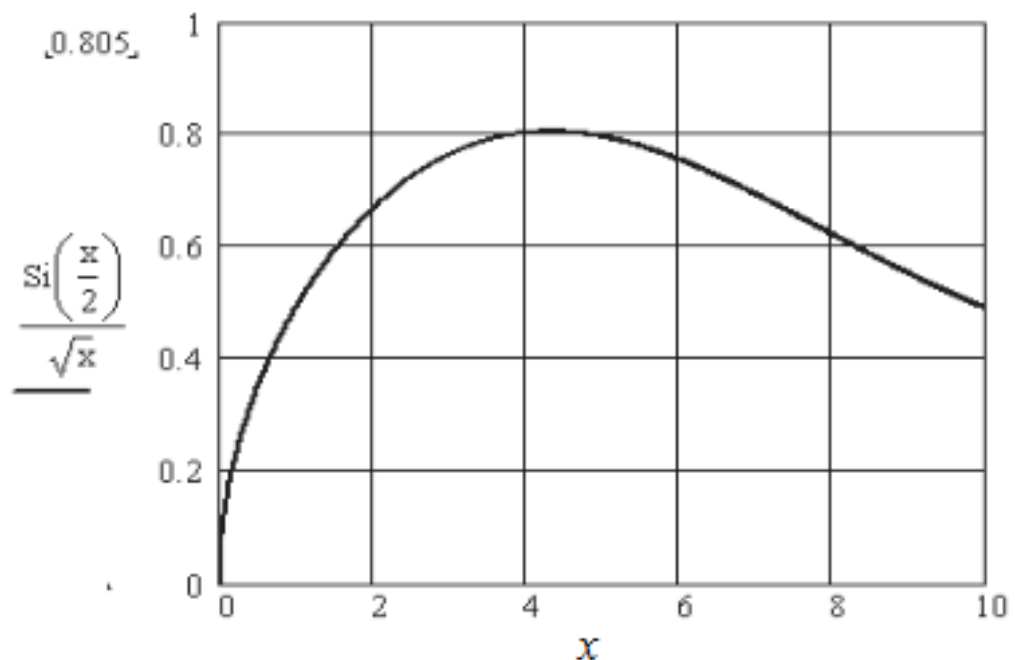


Рисунок 3.1 – Залежність відношення сигнал/шум на виході лінійного

### вибірною підсилювача від смуги пропускання

Далі, розв'язуючі рівняння

$$\frac{d}{dx} \left[ \frac{Si\left(\frac{x}{2}\right)}{\sqrt{x}} \right] = 0, \quad (3.5)$$

знаходимо абсцису максимуму:  $x_{\text{опт}} = 4,3$ , звідки отримуємо значення оптимальної смуги пропускання

$$\Delta F_{\text{пр.опт}} \frac{x_{\text{опт}}}{\pi\tau} = \frac{1,37}{\tau}. \quad (3.6)$$

Аналогічним методом можна отримати значення оптимальної смуги підсилювача з гауссівською АЧХ, яке становить

$$\Delta F_{\text{гс.опт}} = 1/\pi\tau, \quad (3.7)$$

тобто звуження смуги пропускання становить  $\frac{\Delta F_{\text{пр.опт}}}{\Delta F_{\text{гс.опт}}} = 4,3$ .

### 3.1.2 Розрахунок частотної характеристики ланки запізнювання АЧХ фільтра

Припустимо, на вході фільтра з АЧХ вигляду

$$K(f) = \begin{cases} K_0 & f_H < f < f_B \\ 0 & f < f_H, f > f_B \end{cases}, \quad (3.8)$$

діє сигнал  $u_1(t)$ , спектр якого виражається функцією  $W_1(t)$ . Спектр вихідного сигналу  $u_2(t)$  становить

$$W_2(t) = K(f)W_1(t). \quad (3.9)$$

Інтегральна квадратична помилка між вхідним і вихідним сигналами становить

$$\varepsilon = \int_{-\infty}^{\infty} |u_2(t) - u_1(t)|^2 dt. \quad (3.10)$$

З іншого боку, використовуючи теорему Парсеваля та лінійність перетворення Фур'є, помилку (3.10) можна подати

$$\varepsilon = \int_{-\infty}^{\infty} |W_2(f) - W_1(f)|^2 df. \quad (3.11)$$

Враховуючи обмеженість частотного діапазону фільтра відповідно (3.8), розіб'ємо межі інтегрування у формулі (3.11), в результаті чого інтеграл розпадеться на дві частини: в межах смуги пропускання і зовні неї

$$\varepsilon = \int_{f_H}^{f_B} |W_2(f) - W_1(f)|^2 df + \left( \int_0^{f_H} |W_1(f)|^2 df + \int_{f_B}^{\infty} |W_1(f)|^2 df \right). \quad (3.12)$$

Тут для суми в дужках використана умова  $W_2(f) = 0$  зовні діапазону частот  $f_H < f_B$ . Оскільки величина виразу в дужках не залежить від АЧХ фільтра, то мінімальне значення  $\varepsilon$  буде отримано, коли перший інтеграл у (3.12) дорівнюватиме 0, тобто  $W_2(f) = W_1(f)$ , що можливо тільки за умови, що АЧХ виражається як

$$K(f) = \begin{cases} 1 & f_H < f < f_B \\ 0 & f < f_H, f > f_B \end{cases} \quad (3.13)$$

і має вигляд (рис. 3.2).

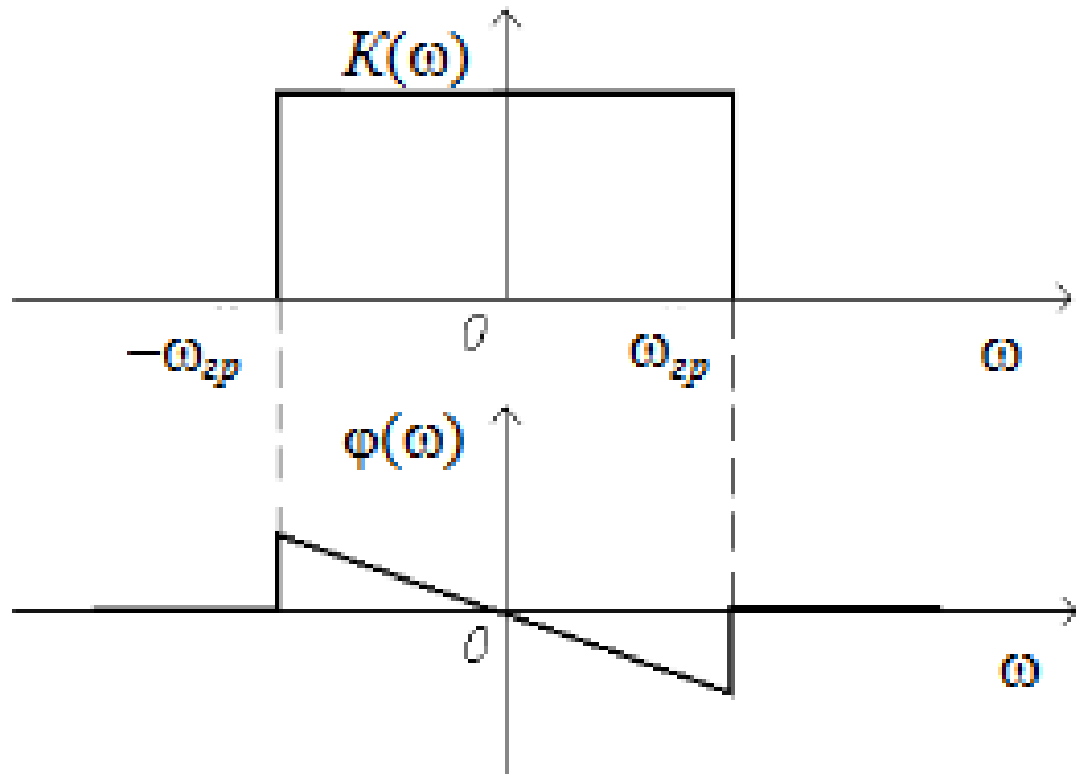


Рисунок 3.2 – Частотна характеристика ланки запізнювання

### 3.2 Розрахунок характеристик пропорційно-інтегруючих фільтрів

#### 3.2.1 Розрахунок характеристик пасивних пропорційно-інтегруючих фільтрів

Схеми пасивних пропорційно-інтегруючих фільтрів наведено на рис. 3.3. Вирази для комплексних коефіцієнтів передачі, АЧХ та ФЧХ цих схем можуть бути приведені до вигляду (2.16) – (2.18). Наведено вирази для передавальних функцій фільтрів.

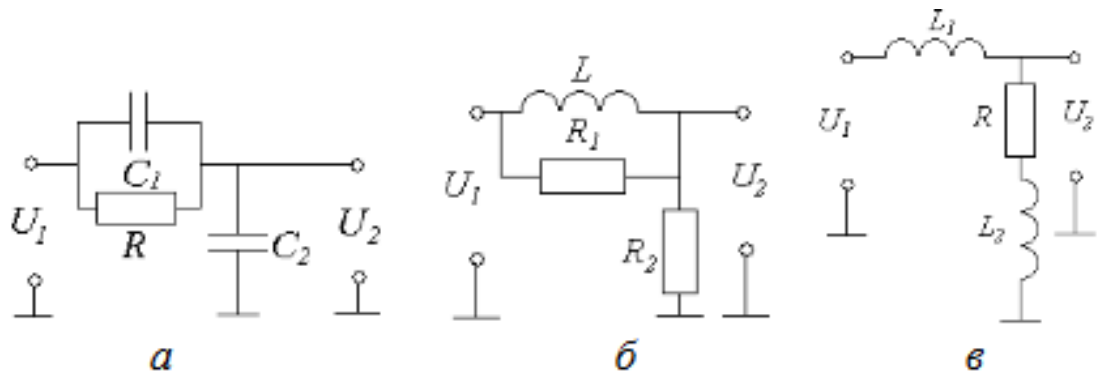


Рисунок 3.3 – Варіанти схем пропорційно-інтегруючих фільтрів

Для схеми рис. 3.3 а маємо

$$K(j\omega) = \frac{\frac{1}{j\omega C_2}}{\frac{R}{1+j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2}} = \frac{1+j\omega RC_1}{1+j\omega R(C_1+C_2)} \quad (3.14)$$

$$T(p) = \frac{1+p\tau_1}{1+p\tau}, \quad (3.15)$$

де  $\tau_1 = RC_1$ ,  $\tau = R(C_1 + C_2)$ .

Для схеми рис. 3.3 б маємо

$$K(j\omega) = \frac{R_2}{R_2 + \frac{j\omega LR_1}{R_1 + j\omega L}} = \frac{R_1 R_2 + j\omega LR_1}{R_1 R_2 + j\omega L(R_1 + R_2)} \quad (3.16)$$

$$T(p) = \frac{1+p\tau_2}{1+p\tau}, \quad (3.17)$$

де  $\tau_2 = \frac{L}{R_2}$ ,  $\tau = \frac{L}{R}$ ,  $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ .

Для схеми рис. 3.3, в маємо

$$K(j\omega) = \frac{R+j\omega L_2}{R+j\omega(L_1+L_2)}, \quad (3.18)$$

$$T(p) = \frac{1+p\tau_2}{1+p\tau}, \quad (3.19)$$

де  $\tau_2 = \frac{L_2}{R}$ ,  $\tau = \frac{L_1+L_2}{R}$ .

3.2.2 Розрахунок характеристик пропорційно-інтегруючих фільтрів за схемами другого порядку

Пропорційно-інтегруючі фільтри можуть бути побудовані за схемами другого порядку (рис. 3.4).

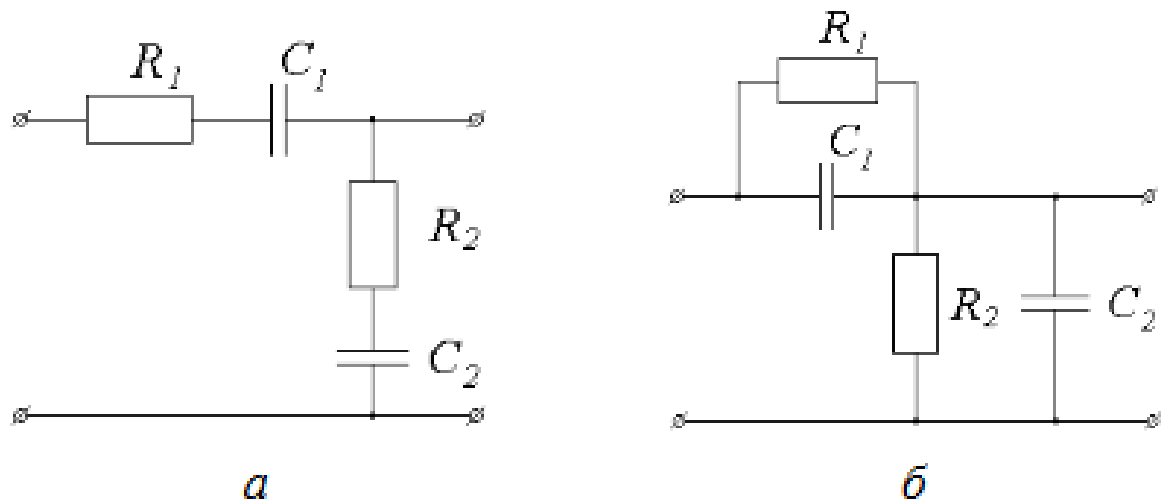


Рисунок 3.4 – Пропорційно-інтегруючі фільтрів другого порядку:

а – послідовна, б – паралельна

Передавальну функцію для фільтра за послідовною схемою (рис. 3.4 а) можна записати

$$T(p) = \frac{1+pR_2C_2}{1+\frac{C_2}{C_1}+p(R_2C_2+R_1C_2)}. \quad (3.20)$$

Коефіцієнт передачі подається виразом:

$$\begin{aligned} K(j\omega) &= \frac{1+j\omega R_2C_2}{1+\frac{C_2}{C_1}+j\omega(R_2C_2+R_1C_2)} = \frac{C}{C_1+C_2} \frac{1+j\omega R_2C_2}{1+j\omega \frac{C_1C_2}{C_1+C_2}(R_1+R_2)} = \\ &= b_c \frac{1+j\omega R_2C_2}{1+j\omega b_c C_2(R_1+R_2)}, \end{aligned} \quad (3.21)$$

звідки отримуємо вирази для АЧХ та ФЧХ схеми

$$K(\omega) = \frac{b_c \sqrt{1+(\omega R_2C_2)^2}}{1+\omega^2 b_c^2 C_2^2 (R_1+R_2)^2}, \quad (3.22)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg(\omega R_2C_2) - \arctg[\omega b_c C_2(R_1+R_2)], \quad (3.23)$$

Тут  $b_c = \frac{C_1}{C_1+C_2}$ . графіків АЧХ і ФЧХ видно, що для послідовної схеми граничні значення коефіцієнта передачі становлять

$$K(0) = b_c = \frac{C_1}{C_1+C_2}, K(\infty) = \frac{R_2}{R_1+R_2}, \quad (3.24)$$

а фазова характеристика має екстремум на частоті

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_2(R_1+R_2)C_2^2}}. \quad (3.25)$$

Для паралельної схеми (рис. 3.4 б) передавальна функція, коефіцієнт передачі, АЧХ та ФЧХ подаються наступними формулами:

$$T(p) = \frac{R_2(1+pR_1C_1)}{R_2(1+pR_1C_1)+R_1(1+pR_2C_2)} = b_R \frac{1+pR_1C_1}{1+pb_RR_1(C_1+C_2)}, \quad (3.26)$$

$$K(j\omega) = \frac{R_2(1+j\omega R_1C_1)}{R_2(1+j\omega R_1C_1)+R_1(1+j\omega R_2C_2)} = b_R \frac{1+j\omega R_1C_1}{1+j\omega b_RR_1(C_1+C_2)}, \quad (3.27)$$

$$K(\omega) = \frac{R_2\sqrt{(1+\omega R_1C_1)^2}}{(R_1+R_2)^2+\omega^2(R_1C_1+R_2C_2)^2} = b_R \frac{b_R\sqrt{(1+\omega R_1C_1)^2}}{\sqrt{1+\omega^2 b_R^2 R_1^2 (C_1+C_2)^2}}, \quad (3.28)$$

де  $b_R = \frac{R_2}{R_1+R_2}$ .

Частота екстремуму ФЧХ становить

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1^2 C_1 (C_1+C_2)}}. \quad (3.29)$$

Для паралельної схеми маємо граничні значення АЧХ, зворотні виразам (3.24)

$$K(0) = b_c = \frac{R_2}{R_1+R_2}, K(\infty) = \frac{C_1}{C_1+C_2}. \quad (3.30)$$

Згладжування виконуватиметься, якщо АЧХ є функцією, що монотонно убиває, тобто повинна виконуватися нерівність  $K(0) > K(\infty)$ . Відзначимо, що, за виразами для коефіцієнта передачі, моделлю пропорційно-інтегруючого фільтра другого порядку є каскадне з'єднання форсууючої та інерційної ланок, аналогічно фільтра першого порядку.

## 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Аналіз умов праці на робочому місці

Збірка і монтаж акустичного джерела світла ведеться на радіомонтажній ділянці складального цеху з розмірами: 8 м x 6 м x 3,5 м. При цьому площа становить 48 м<sup>2</sup>, а об'єм 168 м<sup>3</sup>. Воно розташоване на другому поверсі двоповерхового цегляного будинку. Перекриття будівлі виконані з залізобетонних плит. Для захисту від ураження блискавкою використовується горизонтальний тросовий блискавковідвід [16].

У приміщенні діляниці використовується загально обмінна вентиляція у вигляді витяжної віконного вентилятора з продуктивністю 4500 м / ч.

У приміщенні розміщено шість робочих місць, на яких працює шість радіомонтажників. До складу інструменту входить ручний електропаяльник напругою 36 В, потужністю 25 Вт, блок живлення паяльника, підставка паяльника, пінцет, кисть колонкова, ручка пір'яна, ручка кулькова, набір ватних тампонів, кусачки, ножиці, напилек для заточення жала паяльника, скальпель для зачистки місць пайки, браслет для зняття електростатичних зарядів і збільшувальне скло. До складу матеріалів входить олов'яно-свинцевий припій ПОС-61, флюс (спиртовий розчин каніфолі), розчинники (спирт і ацетон), маркувальна фарба, набір проводів, ізоляційна стрічка, нитки. Також на робочих місцях є набори електрорадіоелементів (ЕРЕ), друкованих плат (ДП) і кріпильних елементів. Кожне робоче місце висвітлюється системою загального і місцевого штучного освітлення [17].

Площа, що виділяється для одне робоче місце, повинна бути не менше 4,5 м<sup>2</sup>, а об'єм не менше 15 м<sup>3</sup>. Так як на одного працюючого припадає площа 8 м<sup>2</sup> і об'єм 28 м<sup>3</sup>, приміщення відповідає даним вимогам.

Для забезпечення максимально безпечних і нешкідливих умов праці побудуємо і проаналізуємо систему «людина-машина-Середовище».

Система «людина-машина-Середовище» (Л-М-С) має шість елементів «Людина», п'ять елементів «Машина», один елемент «Середовище» та один елемент «Предмет праці».

На схемі показані всі робочі місця (від РМ1 до РМ6). Кожне робоче місце радіомонтажника включає людини, машину і предмет праці.

Під «Машиною» в даній системі ЛМС розуміється сукупність технічних засобів, використовуваних радіомонтажником. Елемент «Машина» також представлений у вигляді трьох функціональних складових:

М1 – комплекс засобів, що складається з електропаяльника з блоком живлення і інструментом, систем вентиляції та освітлення. Основною технологічною функцією електропаяльника і інструменту є здійснення монтажних з'єднань між контактними майданчиками ДП і ЕРЕ за допомогою пайки;

М2 – елементи аварійного захисту, функції яких полягають у захисному відключенні блоку живлення електропаяльника при короткому замиканні і витoku струму через тіло людини;

М3 – вплив машини на зовнішнє середовище.

Елемент «Людина» також представлений у вигляді трьох функціональних складових:

Ч1 – людина (майстер і радіомонтажник) з точки зору управління машиною (збірка і монтаж модулів на друкованих платах);

Ч2 – людина з точки зору впливу на середовище за рахунок виділення тепла, вологи і споживання кисню;

Ч3 – людина з точки зору впливу на нього факторів виробничого середовища і трудового процесу.

Предметами праці на кожному робочому місці є складальні одиниці – модулі на платі. На робочому місці майстра проводиться їх оцінка на предмет відповідності конструкторської документації, а також їх кількісний облік відповідно до плану.

Під «Середовищем» маються на увазі мікрокліматичні умови, хімічний склад повітря, що оточує обладнання та інші матеріальні компоненти, а також відносини в колективі (психологічна «атмосфера» колективу). Середовище для всіх людей є спільною [18].

На схемі зображено наступні зв'язку:

1 – керуючі впливу з боку людини на машину для досягнення основної технологічної мети (налаштування температурного режиму, подача інструменту в робочу зону);

2 – отримання інформації від машини для прийняття адекватних рішень;

3 – виконання машиною необхідних функцій (нагрів припою, висновків ЕРЕ і контактних майданчиків плат);

4 – вплив людини на середу (виділення тепла, вологи, вуглекислого газу та споживання кисню);

5 – аварійний захист машини (занулення, аварійне відключення);

6 – вплив машини на людину (шум, теплове випромінювання);

7 – вплив середовища на стан людини;

8 – зміна середовища під впливом машини (підвищення температури повітря, парів свинцю і флюсу, зниження вмісту кисню);

9 – вплив психофізіологічного стану людини на його

Працездатність (продуктивність і якість праці).

Функціональна схема системи Л-М-С показана на рис. 4.1.

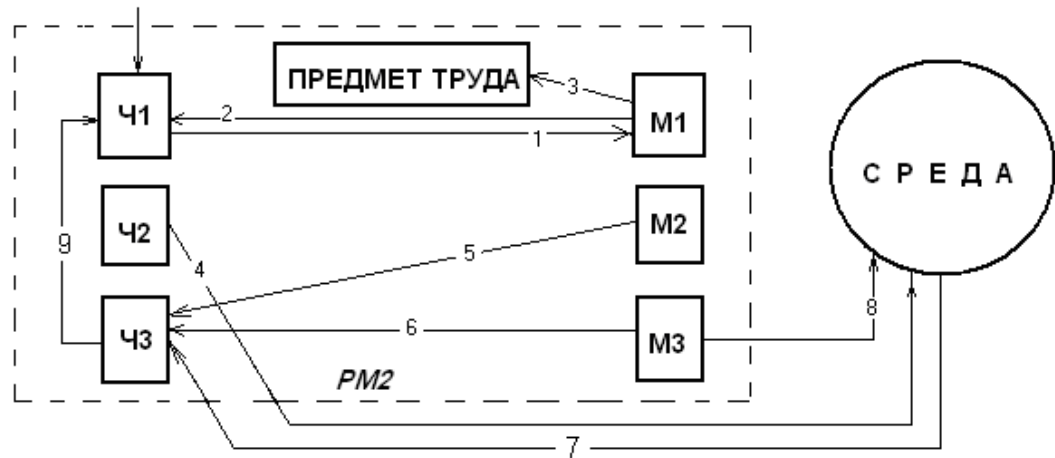


Рисунок 4.1 – Функціональна схема системи Л-М-С

Аналізуючи схему Л-М-С, приходимо до висновку, що відповідно до ГОСТ 12.0.003-74 "ССБТ. Небезпечні і шкідливі виробничі фактори. Класифікація» в даних умовах можуть діяти такі фактори:

- хімічні – підвищена концентрація парів свинцю й зварювання в повітрі робочих зон;
- фізичні – підвищена температура повітря робочих зон, недостатня штучна і природне освітленість робочих поверхонь; підвищений рівень шуму від працюючих вентиляційних систем; підвищене електрична напруга, замикання якого може відбутися через тіло людини;
- психофізіологічні – напруженість праці (тривалість зосередження, напруга зорового аналізатора, тривалість виконання повторюваних операцій) і змінність праці.

Найбільш гостро стоїть питання про чистоту повітря робочих зон, так як в процесі пайки виділяється свинець. Тому даний фактор слід вважати домінуючим.

#### 4.2 Техніка безпеки у виробничому приміщенні

Згідно ПБЕ 2011 «Правила будови електроустановок» за ступенем небезпеки ураження електричним струмом дане приміщення належить до

категорії «без підвищеної небезпеки», так як відсутні можливість одночасного дотику людини до яких з'єднання з землею металевих конструкцій приміщення з одного боку і до металевого корпусу пристрою з іншого, відсутня підвищена температура, вогкість і струмопровідна пил.

Електроживлення ділянки здійснюється за допомогою кабельної трифазної мережі змінного струму з глухозаземленою нейтраллю (система TN-S). Напруга мережі 380 / 220В, частота 50 Гц. Загальна споживана потужність – до 0,8 кВт.

Блоки живлення електропаяльників знижують фазна напруга до 36 В. В їх схемою застосована гальванічна розв'язка.

Періодично проводиться контроль стану електромережі. Опір ізоляції становить понад 500 кОм. Опір заземлення нейтралі – не більше 4 Ом. Повторне заземлення нульового проводу – не більше 10 Ом. Зазначені характеристики відповідають нормам [19].

#### 4.3 Виробнича санітарія в приміщенні

Потрібна оцінка продуктивності витяжної віконного вентилятора (4500 м / ч). Витрата припою ПОС-61 за одну годину становить 0,03 кг. Частка випаровується припою становить 0,3 %. Визначимо кількість свинцю, яке випарується за одну годину роботи

$$G = kmq, \quad (4.1)$$

де  $k$  – частка свинцю в припої ( $k = 0,39$ );

$m$  – витрата припою за одну годину ( $m = 0,03$  кг);

$q$  - частка випаровується припою ( $q = 0,003$ ).

$$G = 0,39 \times 0,03 \times 0,003 = 35\text{мг/ч.}$$

Визначимо витрата повітря, необхідний для розведення парів свинцю до гранично допустимої концентрації в робочій зоні. Формула має вигляд

$$L_{pb} = \frac{G}{C_{\text{ПДК}} - C_{\text{прит}}}, \quad (4.2)$$

де  $C_{\text{ПДК}}$  – гранично допустима концентрація свинцю в повітрі робочої зони;

$C_{\text{прит}}$  – концентрація свинцю в припливному повітрі.

$$L_{pb} = \frac{35}{0.005 - 0} = 7000 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

Визначимо необхідну витрату повітря з урахуванням кількості працюючих людей

$$L_{\text{л}} = nL_{\text{ч}}, \quad (4.3)$$

де  $n$  – кількість радіомонтажників;

$L_{\text{ч}}$  – норма подачі повітря на одну людину.

$$L_{\text{л}} = 5 \times 60 = 360 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

Порівнюючи отримані значення, приходимо до висновку що використовується вентилятор не забезпечує необхідної витрати повітря. У зв'язку з цим пропонується модернізувати систему вентиляції шляхом заміни наявного витяжного віконного вентилятора на систему комбінованої вентиляції (загальної та місцевої). Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 «санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» категорія робіт по енерговитратах організму – II а (роботи середньої важкості з енерговитратами 151 – 200 Ккал / год). У холодну і теплу пору року в робочих зонах даного

приміщення підтримуються нормальні мікрокліматичні умови (в холодну пору температура повітря з 19 до 21 °С, в теплу пору з 21 до 23 °С, відносна вологість з 40 до 60 %, швидкість руху повітря в холодну пору – до 0,2м/с, в тепле – до 0,3м/с. у холодну пору року це досягається за допомогою централізованого опалення, а в теплу пору – за допомогою двох кондиціонерів настінного типу (спліт-система) Samsung AC121AV– 02. У приміщенні використовується природне бічне, а також комбіноване штучне освітлення, яке відповідає вимогам ДБН В.2.5.28-2006 «Природньо и штучне освітлення».

При цьому робота відноситься до розряду II, підрозряду «в» (мінімальний об'єкт відмінності має розміри від 0,15 до 0,3 мм, контраст об'єкта з фоном – середній, фон – середній). Освітленість на робочій поверхні становить 2008 лк при нормі 2000 лк. Коефіцієнт природного освітлення становить 1,6 % при нормі не нижче 1,5 %. Рівень шуму (54 дБА) відповідає вимозі ДСН 3.3.6.037-99 «санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» не більше 75 дБА. Робоче місце радіомонтажника відповідає вимогам ГОСТ 12.2.032-78 "ССБТ. Робоче місце при виконанні робіт сидячи. Загальні ергономічні вимоги.

#### 4.4 Пожежна безпека виробничого приміщення

Відповідно до НАПБ.03.002-2007 (Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухонебезпечною та пожежною небезпечною) виробництво в даному приміщенні відноситься до категорії «В» (маються рідини з температурою спалаху вище 61°С; тверді спаленні речовини і матеріали; речовини, здатні при взаємодії з водою, повітрям або один з одним тільки горіти). Будівля, згідно ДБН В.1.1.7-2002. (Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва), відноситься до першого ступеня вогнестійкості (виконано зі штучних кам'яних матеріалів, число поверхів - не більше шести, площа, поверхи між протипожежними

стінами в будівлі менш 2500 м). Згідно ПУЕ 2011 «Правила улаштування електроустановок», приміщення має пожежонебезпечні зони класу П-ІІ а (спілкуються з твердими спалюваними матеріалами), а електрообладнання має оболонки зі ступенем захисту IP-44.

Причинами пожежі в приміщенні можуть бути: коротке замикання електропроводки; несправність електроінструмента та іншого електрообладнання; куріння в приміщенні, а так само порушення технологічного процесу.

У приміщенні є пожежна сигналізація, пов'язана каналом службового зв'язку з робочим місцем начальника зміни і пожежною частиною.

Для попередження пожежі проводиться ряд технічних і організаційних заходів, спрямованих на дотримання встановленого режиму експлуатації електричної мережі, обладнання та дотримання правил пожежної профілактики.

Відповідно до вимог ГОСТ 12.1.004-91, ГОСТ 12.4.009-83, приміщення оснащено:

- димовими пожежними сповіщувачами в кількості 4 штук (з розрахунку 2 сповіщувача на кожні 20 м<sup>2</sup> площі приміщення);
- вуглекислотними переносними вогнегасниками ВВК-5 місткістю 5 л в кількості 2 шт.;
- ящиком з піском об'ємом 0,03 м<sup>3</sup>.

Виконано наступні організаційні заходи:

- призначений відповідальний по приміщенню за пожежну безпеку;
- питання пожежної профілактики включені в усі інструктажі з ОП.

Так як відстань від найбільш віддаленого робочого місця до виходу з будівлі не перевищує 75 м, евакуацію при пожежі можна проводити через робочий вихід з приміщення, коридор і вихід з будівлі.

Презентація приведена у додатку А.

## ВИСНОВКИ

В процесі виконання роботи було описано основні поняття та визначення у радіоавтоматичних системах. Було проведено класифікацію систем радіоавтоматики за такими ознаками: принцип регулювання, вид сигналу помилки, вид статичних характеристик та характером початкової інформації. Описані типові системи радіоавтоматики.

Було проведено математичний опис автоматичних систем за такими параметрами: складання диференціального рівняння елемента автоматичної системи, статичні і динамічні властивості елементів, перетворення Лапласа, перетворення Фур'є, передатна функція, перехід від передатної функції до частотної характеристики та логарифмічні частотні характеристики.

Були описані такі типові вхідні сигнали: східчаста вхідна дія, імпульсна вхідна дія, синусоїдальна вхідна дія, лінійно-зростаюча вхідна дія та білий шум.

Проаналізовано такі типові ланки: безінерційна ланка, інерційна ланка, інтегруюча ланка, диференціююча ланка, форсууюча ланка, ланка запізнювання, коливальна ланка, помножувальна ланка. Розглянуті так види з'єднань ланок у радіоавтоматичних системах: послідовне, паралельне та з'єднання із зворотним зв'язком

Розраховано звуження смуги пропускання, яка становить 4,3. Розраховано частотну характеристику ланки запізнювання АЧХ фільтра. Було проведено розрахунки характеристик для пропорційно-інтегруючих та фільтрів за схемами.

У розділі охорона праці було проаналізовано умови праці на робочому місці. А також описана техніка безпеки у виробничому приміщенні, виробнича санітарія в приміщенні та пожежна безпека виробничого приміщення.

Розроблена робота відповідає вимогам технічного завдання.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення[Текст]. – Введ.22.06.2015. – К.:ДП«УкрНДНЦ», 2015.– 26 с.;
2. Первачев С. В. Радіоавтоматика: підручник для вузів / С. В. Первачов. - М.: Радіо і зв'язок, 1982. - 296 с.
3. «Енциклопедія кібернетики», відповідальний ред. В. Глушков, 2 тт., 1973, рос. вид. 1974.
4. ДСТУ 2938-94. Системи оброблення інформації. Основні поняття. Терміни та визначення.
5. Ситнік О.В. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни/ Харків – 2021 р. - 194с. Основи теорії прийняття рішень в ТК РТ системах
6. Studfiles [Електронний ресурс] <https://studfile.net/preview/13934784/>
7. Конспект лекцій з курсу "Радіоавтоматика" для студентів усіх форм навчання спеціальності 7.090702 “Радіоелектронні пристрої, системи та комплекси”, 7.090701 "Радіотехніка", 7.090703 "Апаратура радіозв'язку, радіомовлення та телебачення" / Упоряд. Посошенко В.О. – Харків: ХНУРЕ, 2008.– 64 с.
8. Коновалов Г. Ф. Радіоавтоматика: підручник для вузів з спец. "Радіотехніка" / Г. Ф. Коновалов. - М.: Вищ. школа, 1990. - 335 с.
9. Пономарьов С.В. Метрологія, стандартизація, сертифікація: підручник для вузів / С.В. Пономарьов, Г.В. Шишкіна, Г.В. Мозгова. - Тамбов: Вид-во ГОУ ВПО ТДТУ, 2010. - С.13 - 100 прим.
10. Wiki.uk.nina.az [Електронний ресурс] [https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Перетворення\\_Лапласа.html](https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Перетворення_Лапласа.html)

11. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник /С. И. Баскаков. – М.: Высш. школа, 1983. – 536 с.
12. Application of the fourier window Transformation to the processing of Electroencephalograms/ Huseinov A., Murakaiev E., Kharchenko O., Chumakov V. Development of scientific thought of post-industrial society: modern discourse, 2022 –3р.
13. Wikipedia [Електронний ресурс]  
[https://uk.wikipedia.org/wiki/Білий\\_шум](https://uk.wikipedia.org/wiki/Білий_шум)
14. Habr [Електронний ресурс]<https://habr.com/ru/post/532700/>
15. Чумаков, В. І. Моделювання пристроїв радіоавтоматики в системі МATHCAD [Текст] : навч. посіб. / В.І. Чумаков, А.А. Таранчук, О.І. Харченко. - Хмельницький : ХНУ, 2011. - 151 с.  
Studfiles [Електронний ресурс] <https://studfile.net/preview/13934784/>
16. Радіоавтоматика: Навч. посібник для студ. вузів спец. "Радіотехніка" / За ред. В.А. Бесекерського. - М.: Вищ. шк., 1985. - 271с.
17. Радіотехнічні системи: Навч. для вузів за спец. "Радіотехніка" / За ред. Ю.М. Казарінова. - М.: Вищ. шк., 1990. - 496 с.
18. Ваганов В.Б. Основи автоматки радіоелектронних систем: Навч. посібник, – Київ: Вища шк., 1995. – 358 с.
19. Хісматулін В.Ш. Основи автоматки: Навч. Допомога. - Харків: Харківський військовий університет, 1998. - 186 с.