

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерних технологій і систем»
(назва факультету)

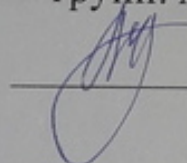
Кафедра «Автоматика та телекомунікації»
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
бакалавр
(ступінь вищої освіти)

на тему: Проектування цифрових фільтрів для приймача тональних рейкових кіл

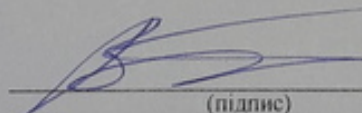
за освітньою програмою Автоматика та автоматизація на транспорті
зі спеціальності: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент групи: АТ1811 (947)


(підпис студента)

/ Артем Лещенко /
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

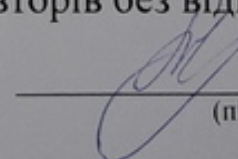
Керівник:


(підпис)

/ доцент Профатілов В.І. /
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент


(підпис)

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies

Faculty of Computer Technologies and Systems

(faculty)

Department of Automation and Telecommunications

(department)

Explanatory Note
to Master's Thesis
bachelor

(higher education degree)

on the topic: Designing digital filters for the receiver of voice-frequency track circuits

according to educational curriculum Automation and automation in transport
in the speciality: 151 Automation and computer-integrated technologies

Done by the student of the group AT1811 (947)

/Artem Leshchenko/
(name, surname)

Scientific Supervisor:

/ Volodymyr Profatylov /
(position, name, surname)

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Комп'ютерні технології та системи

Кафедра: Автоматика та телекомунікації

Рівень вищої освіти: бакалавр

Освітня програма: Автоматика та автоматизація на транспорті

Спеціальність: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АТ

_____ Гаврилук В.І.
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата _____

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу

бакалавр

(ступінь вищої освіти)

студенту Лещенко Артему Дмитровичу

(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: Проектування цифрових фільтрів для приймача тональних рейкових кіл

Керівник роботи: Профатилів В.І., кт.н., доцент

(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від

" 18 " жовтня 2021 р.

№ 704ст

2. Строк подання студентом роботи: 10.06.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи: _____

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналітична частина: _____

4.2 Основна частина: _____

4.3 Охорона праці та захист навколишнього середовища: _____

4.4 Економічна частина: _____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): _____

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри		
8	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії		

Студент

_____ (підпис)

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Відомості про об'єм пояснювальної записки: 43 сторінок, 6 таблиць, 11 рисунок, 14 джерел літератури.

Ключові слова: тональні рейкові кола, цифрова обробка сигналу, цифровий фільтр, смуговий фільтр.

Об'єкт проектування: цифровий смуговий фільтр для обробки сигналів тональних рейкових кіл.

Мета бакалаврської роботи: проектування цифрового сумогового фільтру для обробки сигналів тональних рейкових кіл.

У першому розділі приведений аналіз існуючих сучасних систем діагностики. Проаналізована історія і розвиток рейкових кіл, а також виконаний аналіз аналогової апаратури рейкових кіл та недоліків у пристроях автоматики та у рейкових колах.

У другому розділі приведено класифікацію цифрових фільтрів та їх основні параметри. Розроблено модель цифрового сумогового фільтру для приймача ТРК. Програмно реалізовано модель цифрового сумогового фільтру на універсальній мові Сі.

Галузь застосування: системи керування рухом поїздів на залізничному транспорті.

Висновок. Використання цифрових сумогових фільтрів замість аналогових має ряд переваг: універсальність; гнучкість; значне зниження потужності споживання; зменшення ваго-габаритних параметрів; широкий температурний діапазон роботи приймача; стабільність роботи у широкому діапазоні напруги живлення.

Зміст

Вступ	7
Розділ 1. Опис тональних рейкових кіл.....	9
1.1. Історія і розвиток тональних рейкових кіл	9
1.2. Системи автоблокування з ТРК	13
1.3. Апаратура тональних рейкових кіл	16
1.3.1. Колійні приймачі типу ПП та ПП1	17
1.3.2. Колійні приймачі типу ПРЦ4	19
1.4. Недоліки аналогових приймачів	22
Розділ 2. Розробка цифрових смугових фільтрів для приймача ТРК	23
2.1. Класифікація цифрових фільтрів	23
2.2. Моделювання смугових цифрових фільтрів для приймача ТРК.....	33
2.3. Програмна реалізація смугового цифрового фільтра.....	35
Висновок.....	40
Список використаної літератури.....	41

Вступ

Пріоритетними задачами на залізниці при автоматизації процесів керування рухом поїздів є забезпечення безпеки руху та інтервальне регулювання. Для забезпечення безпеки руху однією із головних умов є визначення місцезнаходження поїздів відповідно один до одного. Контроль за цим відбувається за допомогою рейкових кіл та покладено на блоки-ділянок, з яких складається залізниця України.

Рейковим колом називають сукупність рейкових ниток залізничної колії (які виступають у якості провідників) та апаратури, яка підключається до них на початку та в кінці. Рейкові кола є основним елементом багатьох пристроїв залізничної автоматики і телемеханіки. За допомогою рейкових кіл визначається вільність блок-ділянок на перегонах та станційних ділянок; контролюється цілісність рейкових ниток; передається інформація про показання колійних світлофорів на локомотив для роботи автоматичної локомотивної сигналізації; забезпечується ув'язка між світлофорами в кодових системах автоблокування; виключається переведення стрілок у пристроях електричної централізації при знаходженні на них рухомих одиниць; здійснюється сигналізація про наближення поїздів до переїздів та управління автошлагбаумами; контролюється на диспетчерському посту та на посту чергового станції стан блок-ділянок на перегонах і приймально-відправних коліях і т.д.

В рейкових колах використовуються одноелементні, двоелементні, електронні та мікропроцесорні колійні реле. Двоелементні (фазочутливі) реле мають колійну обмотку, включену в рейкове коло і місцеву обмотку. Спрацювання реле відбувається при однаковій частоті струму в колійній та місцевій обмотках і зсуву фаз між ними на певний кут. Перевагою фазочутливих реле є надійний захист від впливу тягового струму та інших перешкод. Для контролю зайнятості стрілочних переводів використовуються розгалужені рейкові кола, які можуть мати два або три колійних реле.

При виборі частоти живлення та кодування рейкових кіл необхідно враховувати вид тяги поїзда. При електричній тязі змінного струму на рейкових

колах використовують живлення такої частоти щоб гармоніки тягового струму не заважали передачі сигналу, тобто не створювали завад. При тязі постійного струму цей вплив можна легко прибрати або її взагалі немає.

Окремим випадком кодових рейкових кіл є тональні рейкові кола. Рейковими колами тональної частоти, або тональними рейковими колами, називають клас рейкових кіл, частота сигнального струму яких знаходиться в діапазоні тональних частот.

Основні переваги тональних рейкових кіл на відміну від класичних рейкових є:

- виключаються ізолюючі стики;
- відпадає необхідність встановлення дорогих дросель-трансформаторів;
- поліпшені умови протікання зворотнього тягового струму по рейковим ниткам:
- підвищується завадо захищеність рейкового кола;
- підвищується чутливість приймача і як наслідок зменшується потужність яка споживається тональними рейковими колами.

З розвитком сучасних технологій залізнична автоматика потребує оновлення. Одним із пріоритетних завдань можна вважати використання систем цифрової обробки сигналу, яка використовує алгоритм

Та з розвитком технологій залізнична автоматика також потребує оновлення. Одним із методів осучаснення систем залізничної автоматики можна вважати використання цифрової обробки сигналів, яка використовує алгоритми перевірки спектру сигналу для виділення необхідних частот, які зчитуються завдяки електронно-обчислювальним механізмам.

1 Опис тональних рейкових кіл

1.1. Історія і розвиток тональних рейкових кіл

Рейкові кола складаються з:

- рейкових ліній, які мають рейкові нитки зі стиковими з'єднувачами, ізолюючі стики, які забезпечують електричну розв'язку суміжних рейкових кіл;
- апаратури живильного кінця, яка складається з регульованого резистора, що знаходиться в релейній шафі, пристроїв живлення – акумулятора та випрямляча, розміщених у батарейній шафі;
- апаратури релейного кінця, яка містить приймач – колійне реле, розташоване в релейній шафі.

Апаратура живильних і релейного кінців у релейних шафах з'єднується з кабельними стійками, жилами кабелю і далі сталевими тросами з рейковими нитками.

При вільному стані рейкового кола струм акумуляторної батареї протікає рейковою лінією і замикається через обмотку колійного реле. Реле збуджене і його спільний та фронтний контакти замкнуті між собою, що говорить про вільність і справність ділянки рейкового кола, обмеженого ізолюючими стиками.

Коли рухомий склад вступає на рейкове коло, рейкові нитки закорочуються через малий опір колісних пар рухомого складу, що знижує струм в обмотках колійного реле до значення струму відпускання, останнє відпускає якір і, відповідно, замикаються його спільний і тильний контакти. При цьому шунтується рейкова лінія і ця ділянка вважається зайнятою. Через це реле перемикає показання останнього світлофора на червоний, і посилає сигнал до попереднього рейкового кола, змінюючи показання відповідного світлофора на жовтий. Тобто, потяг, що рухається, сповільнюється на попередній блок-ділянці і зупиняється перед поточною.

Для забезпечення безпеки руху довжина блок-ділянки залізниці повинна бути більшою за гальмівний шлях поїзда, та меншою максимальної довжини

роботи рейкового кола, за якої відбувається виконання всіх режимів його роботи (нормальний, шунтовий, контрольний та, окремий випадок шунтового, режим КЗ).

Нормальний режим рейкового кола передбачає, що рейкове коло вільне від рухомого складу та забезпечує відповідність зеленого сигналу світлофора до вільності рейкового кола. Забезпечення роботи цього режиму виконується через забезпечення доходження необхідного струму через рейкову лінію від живильного кінця до релейного. Цьому може завадити високий опір рейкової лінії, низький опір баласту та недостатня напруга на живильному кінці.

Шунтовий режим передбачає, що хоча б одна колісна пара рухомого складу знаходиться на рейковому колі та забезпечує надійне відпускання реле при знаходженні поїзда на блок-ділянці. В шунтовому режимі рейкові нитки замикаються між собою через малий опір колісних пар, різко зменшується сила струму, що протікає через колійне реле, яке розмикає фронтові контакти і замикає тилові, і фіксує зайнятість контрольованого ділянки. При цьому опір шунта (колісної пари) не повинен перевищувати необхідне значення, а напруга живильного кінця не повинна бути занадто великою.

Контрольний режим означає, що порушена цілісність рейкового кола (рейкової нитки або кабелю). Він необхідний для перевірки стану рейкової лінії, і реле повинно надійно відпускатися при пошкодженні рейкової лінії. Ці умови виконуються аналогічно шунтовому режиму.

Для живлення рейкових кіл може використовуватися як постійний, так і змінний сигнальний струм. Рейкові кола постійного струму застосовуються на ділянках з автономною тягою, змінного — на ділянках, як з автономною, так і з електричною тягою.

Режим живлення рейкових ланцюгів може бути:

- Безперервний — використовується в рейкових колах, контролюючих станційні колії та стрілочні переводи; рейкові кола можуть доповнюватися апаратурою кодування (при цьому кодування рейкового кола включається при визначенні її зайнятості);

- Імпульсний — застосовується для живлення рейкових кіл постійним струмом;
- Кодовий — застосовується в системах кодового автоблокування на перегонах.

Тональні рейкові кола — один з видів автоматичної сигналізації, в якому сигнальний струм використовує частоти тонального діапазону від 400 Гц до 6 кГц. Назва тональних рейкових кіл з'явилася в 90-му році, хоча рейкові кола з тональними частотами і безконтактної апаратури були розроблені і почали застосовуватися набагато раніше.

Тональні рейкові кола застосовують на перегонах і станціях при будь-якому вигляді тяги. На перегонах застосовують рейкові кола без ізолюючих стиків, на станції - з ізолюючими стиками. Апаратура рейкових ланцюгів встановлена на станції і з рейкової лінією пов'язана за допомогою кабелю.

Рейкові кола залізничної автоматики функціонують в складних умовах під впливом багатьох дестабілізуючих факторів, до яких можна віднести вплив погодних умов (температура, вологість), що головним чином впливає на опір ізоляції баласта, завади від тягового електропостачання, зміни параметрів елементів апаратури ТРК з часом та інше.

З появою тональних рейкових кіл з'явилася можливість відмовитись від ізолюючих стиків, відмови яких складають близько 27 % всіх відмов систем залізничної автоматики. Але, при цьому з'являється зона додаткового шунтування, для запобігання якої світлофор встановлюється раніше приймального кінця на відстань, яка становить 12-25 м в залежності від частоти сигнального струму, напруги на приймальному кінці та опору рейкової лінії.

При модуляції сигналу у низькочастотному діапазоні використовується комбінація несучих та модулюючих частот, які можуть бути виражені через такі позначення: $f_{8/8}$, $f_{8/12}$, $f_{9/8}$, $f_{9/12}$, $f_{11/8}$, $f_{11/12}$, $f_{14/8}$, $f_{14/12}$, $f_{15/8}$, $f_{15/12}$. Перше число в позначенні означає ділення значення модулюючої частоти на значення промислової частоти в 50 Гц. Друге число - модулюючу частоту 8 Гц або 12 Гц.

У якості несучої частоти сигнальні струми високочастотного діапазону використовують одну з трьох частот: 4 545 Гц, 5 000 Гц, 5 555 Гц та можуть бути позначені так: 4,5/8; 4,5/12; 5,0/8; 5,0/12; 5,5/8; 5,5/12, де перше число означає округлення до першого знаку після коми при діленні на 1 кГц, а друге, як і при низькочастотному, означає несучу частоту.

На сучасній залізниці тональні рейкові кола перших 2-х поколінь використовуються рідко, бо мають один доволі великий недолік, а сам: частоти цих систем залежать від промислової частоти, тому це унеможливило їх застосування на ділянках залізниць з електричним типом тяги змінного струму, які займають більшу частину усієї залізниці України.

Частоти першого і другого поколінь тональних рейкових кіл мали наступні значення: 425 Гц, 475 Гц; 575 Гц; 725 Гц; 775 Гц. Такі значення частот тональних рейкових кіл дозволяють їх використовувати лише на ділянках залізниці з автоматичною тягою та електричною тягою постійного струму. Ще одним із недоліків частот першого тональних рейкових кіл є використання живлення на вихідному кінці та приймач на вхідному та необхідність розташування напільного обладнання у приміщеннях з температурою від +5 °С до +40 °С. У другого покоління вже не було останнього недоліку, і робочим діапазоном вважається від -45 °С до +60 °С. З урахуванням вищевикладених недоліків було розроблено АБ з централізованим розміщенням апаратури.

З появою ТРК 3-го покоління з'явилась можливість їх встановлення на ділянках з електричною тягою змінного струму, що зумовило стрімкий розвиток систем АБ з ТРК. Частоти сигнального струму вже не являються гармоніками промислової частоти, а трохи відрізняються від модулюючих частот 2-го покоління. Для 4-го покоління використовується високочастотний діапазон для модуляції сигналу. Але, недоліком цього рішення є зменшення довжини блок-ділянки, при цьому зменшується і зона додаткового шунтування, що дозволяє використовувати її разом з ТРК-3 в якості електронної заміни ізолюючих стиків. Частотне розподілення у 3-го та 4-го покоління виглядає наступним чином: 420 Гц, 480 Гц, 580 Гц, 720 Гц, 780 Гц; ТРК-4: 4545 Гц, 5000 Гц, 5555 Гц, відповідно.

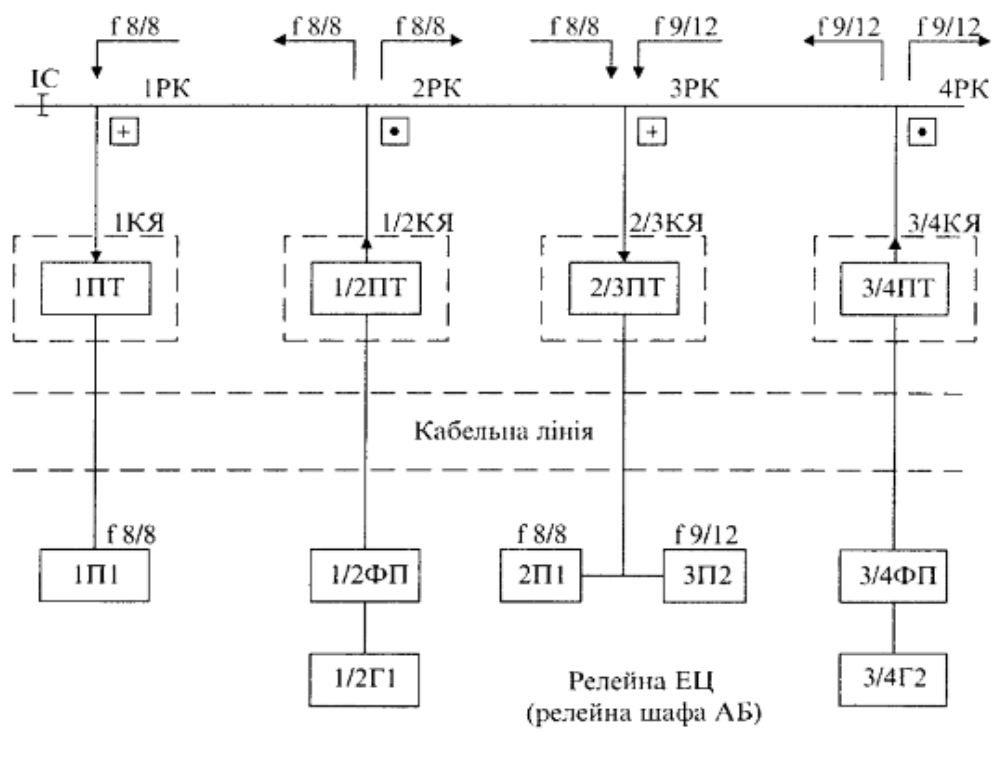


Рис. 1.1. Структурна схема ТРК-3

Апаратура 3-го покоління використовується як і на посту так і в польових шафах АБ, оскільки робочий діапазон температур знаходиться в межах від -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$. Ще однією перевагою ТРК-3 є збільшення довжини однієї блок-ділянки за рахунок можливості одного живильного кінця посилати сигнал в обидва напрямки, для цього в приймальній апаратурі розташовано два фільтри для сусідніх живильних кінців. Структурна схема розділення ТРК-3 зображена на рисунку 1.1.

1.2 Системи автоблокування з ТРК

З моменту винайдення ТРК було розроблено декілька систем автоблокування:

- ЦАБ-АЛСО (ЦАБ-М-АЛСО) — рух організовується за допомогою АЛСН, світлофори та ізолюючі стики відсутні, з централізованим розміщенням апаратури;
- ЦАБс — апаратура розміщується на посту, з наявністю світлофорів та ізолюючих стиків;

- АБТс — апаратура знаходиться в польових шафах, з наявністю світлофорів та ізолюючих стиків;

- АБТ — децентралізоване розміщення апаратури, з наявністю світлофорів та без ізолюючих стиків;

- АБТ-2000 — децентралізоване розміщення апаратури, з наявністю світлофорів та без ізолюючих стиків.

Узагальнена порівняльна характеристика систем автоблокування показана у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Різновиди релейних систем АБ з ТРК

	ЦАБ	ЦАБ-М (АЛСО)	АБТс (АБ-ПСБ)	ЦАБс	АБТ	АБТЦ
Розташування апаратури	центр.	центр.	децент.	центр.	децентр.	центр.
Прохідні світлофори	відсутні	відсутні	присутні	присутні	присутні	присутні
Ізолюючі стики на кордонах БУ	відсутні	відсутні	присутні	присутні	відсутні	відсутні
Покоління ТРК	ТРК-1	ТРК-2	ТРК-3	ТРК-3	ТРК-3, ТРК-4	ТРК-3
Несучі частоти ТРЦ, Гц	425, 475	425, 475, (575)	420, 480, (580)	420, 480, (580)	420, 480, (580); 4545, 5000, 5555	420, 480, 580, 720, 780

У ТРК-1 використовувалась апаратура яка складалась з генератора ПГМ; фільтрів Ф8,9 і Ф11,14,15; приймач УПКЦ. Для другого покоління використовувалась така апаратура: генератор ГРЦ; фільтри ФП8,9 та ФП11,14,15; та приймач ГРЦ. За підсилення сигнальних струмів відповідальні колійні підсилювачі ПУ-1 і ПУ-2 з використанням трансформаторів ПТЦ і ВТ. Апаратура перших двох поколінь взаємозамінна. Для третього покоління використовується апаратура яка складається з: генератора ГП, фільтра ФПМ і приймача ПП. Для ТРК-4 використовуються: генератор ГРЦ4, фільтри ФРЦ4 і приймачі ПРЦ4. Різновиди релейних систем АБ з ТРК наведено у табл. 1.1.

На цей час пріоритетним завданням для УЗ є впровадження на залізничних шляхах України ТРК. Завдяки перевагам ТРК, наприклад, можливість централізованого розміщення апаратури, пришвидшуються ремонтні роботи, пов'язані з несправністю живильного та приймального кінців, а також полегшується обслуговування цього устаткування. Ще одною з переваг є використання безстиківих ділянок, що дозволяє зменшити загальну кількість неполадок пов'язаних з рейковими колами.

На іноземних залізницях також активно впроваджують ТРК. В Японії на високошвидкісній магістралі Токайдо введені в експлуатацію в 1963-му році ТРК з несучими частотами 720, 840, 900, 1090 Гц і модулюючими в діапазоні 10..36 Гц. Французькі залізниці використовують рейкові кола типу VM-71, в них несучі частоти: 1700, 2000, 2300, 2600 Гц, і модулюючі 10,3..29 Гц, при цьому поїзд повинен бути оснащеним інвертором і тиристором. Польща ж у свою чергу впроваджує рейкові кола SOT-2, в яких модулюючі частоти можуть бути в інтервалах 1..3 кГц і 8..20 кГц. У Британії використовуються безстиківі рейкові кола з частотами 1.7..2.6 кГц.

Основними перспективними напрямками розвитку є: встановлення ТРК на ділянках наближення до переїзду та для організації захисних ділянок при використанні інших систем АБ.

1.3 Апаратура тональних рейкових кіл

Апаратура тональних рейкових кіл складається з наступних складових:

- живильної апаратури;
- рейкової лінії;
- фільтр на приймальному кінці;
- приймальна апаратура.

Живильна апаратура утворює амплітудно-модульований сигнал, який надходить до рейкової лінії, який утворюється завдяки накладанню несучої частоти на частоту модуляції (рис.1.2).

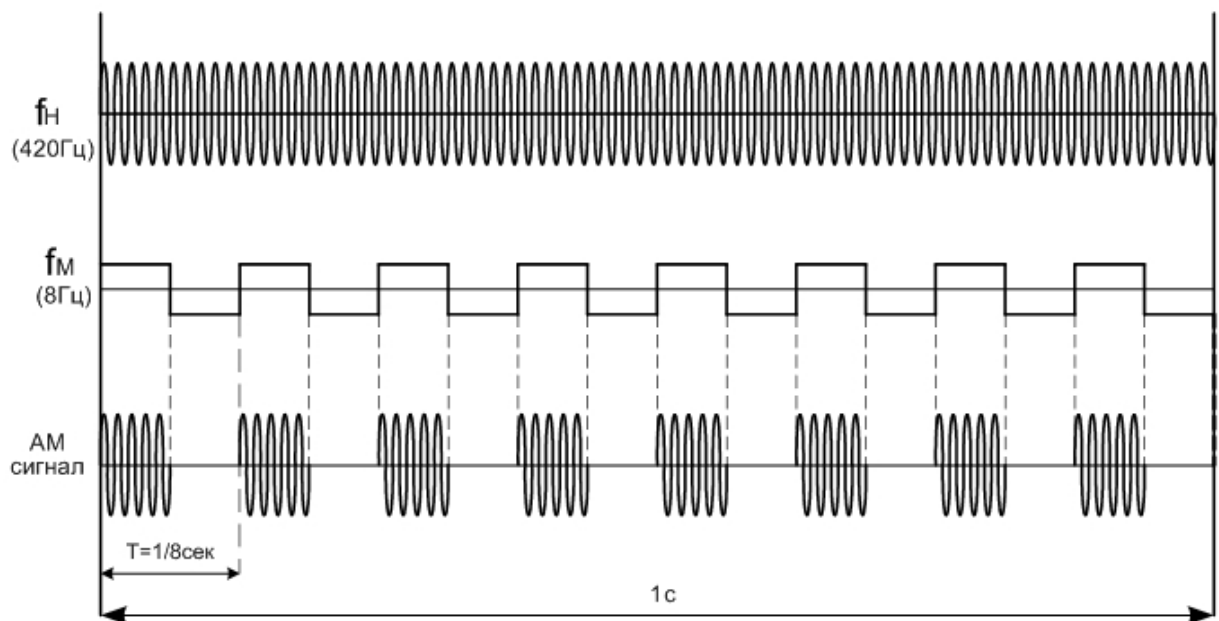


Рис. 1.2. Утворення сигналу на виході генератора 8/8

Рейкова лінія виконує функцію провідника сигналу, по якому протікає струм до фільтру, який необхідний для виділення потрібної частоти за допомогою комбінації певного конденсатора та складається з вбудованого набору і обмотки трансформатора. Приймач додатково фільтрує сигнал, демодулює його, виділяючи частоту модуляції, за якою і відбувається контроль.

1.3.1 Колійні приймачі типу ПП та ПП1

На сьогодні залізницею використовуються колійні приймачі типу ПП та ПП1, які призначені для контролю кіл з частотами, відповідними третьому поколінню ТРК. Приймачі виконані на основі реле ДСШ в якості моноблочної конструкції. Таких приймачів випускається 10 варіацій в залежності від частот прийнятих сигналів. В позначенні варіації приймача перше число відповідає номеру гармоніки промислової частоти, за якою знаходиться дана частота, а друге число — частоті модуляції. Характеристики колійних приймачів наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 - Характеристики колійних приймачів

Виконання приймача	8/8	8/ 12	9/8	9/ 12	11/8	11/ 12	14/8	14/ 12	15/8	15/ 12
Частота модуляції, Гц	8	12	8	12	8	12	8	12	8	12
Несуча частота, Гц	420		480		580		720		780	
Частота сусіднього каналу, Гц	480		420		480		780		720	
Загасання вхідного фільтра, дБ	38				30					
Вихідні клеми	31-33		31-13		31-83		31-52		31-51	

Принципова електрична схема приймача, зображена на рисунках 1.3 і 1.4, складається з наступних функціональних вузлів:

- вхідний фільтр;
- демодулятор;
- амплітудний обмежувач і підсилювач струму;
- проміжний фільтр низьких частот;
- буферний каскад;
- пороговий пристрій;
- вихідний фільтр з підсилювачем;

- вихідний підсилювач;
- вторинне джерело живлення.

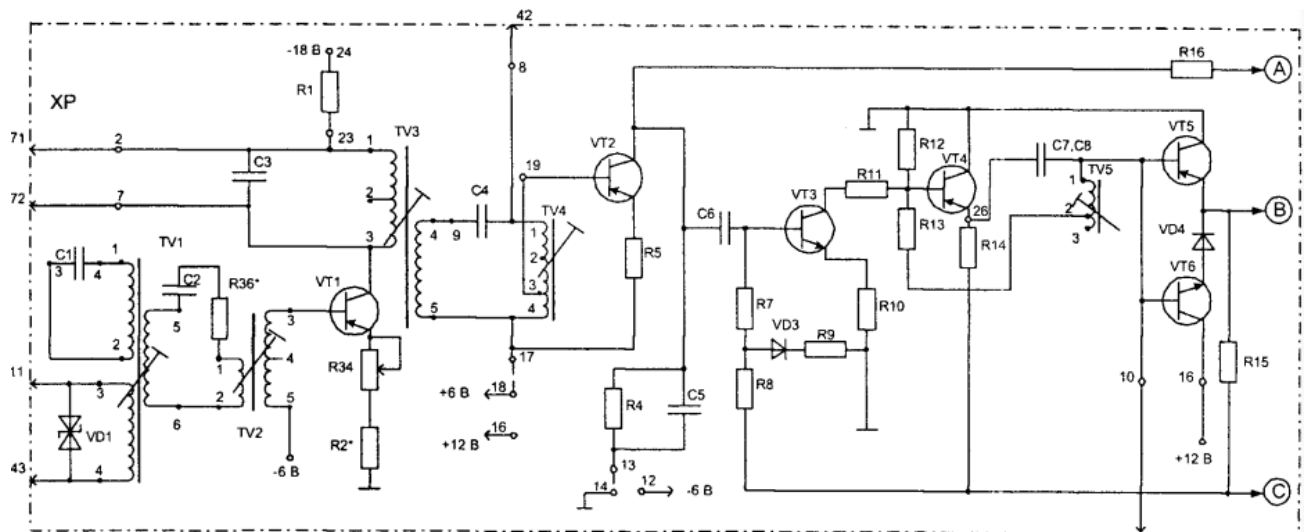


Рис. 1.3. Принципова електрична схема ПП1(1)

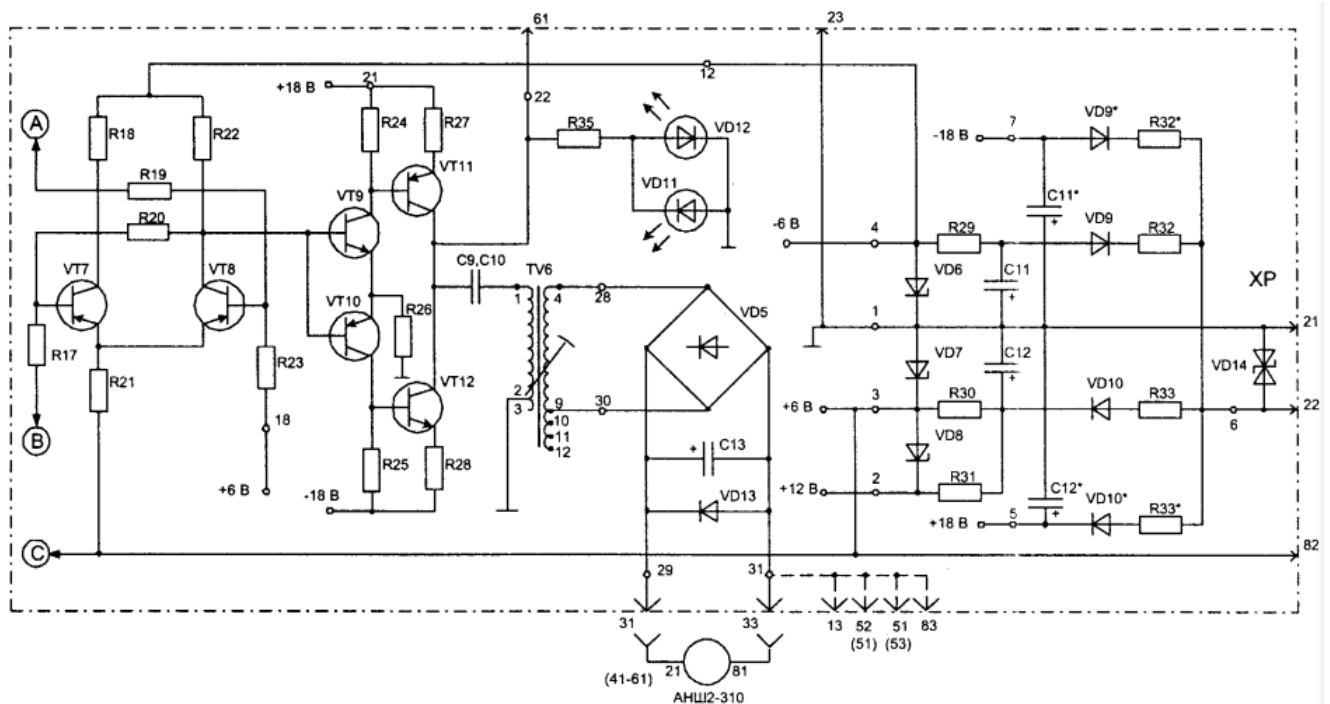


Рис. 1.4. Принципова електрична схема ПП1(2)

Приймач працює наступним чином: сигнал, що приходить з рейкового кола, потрапляє на вхідний фільтр, в якому відбувається виділення несучої частоти та бічних частот необхідного сигналу, при цьому відбувається подавлення частот з сусіднього рейкового кола. Після цього сигнал надходить до демодулятора, в якому відбувається відсіювання несучого сигналу за допомогою низькочастотного фільтра. Демодульований сигнал поступає до амплітудного обмежувача для

захисту послідує каскадів. Проміжний фільтр низьких частот призначений для пропускання власної частоти модуляції для відсіювання будь-яких гармонік, які можуть бути отримані при попередніх кроках. Функцію порогового елемента виконує симетричний тригер, після проходження якого сигнал йде на вихідний підсилювач. Його функцію складається з підсилення сформованого прямокутного сигналу відповідно до частоти модуляції. Вихідний фільтр виконує функції аналогічні ФНЧ і передає остаточну версію сигналу на реле АНШ2-310, з послідовно підключеними обмотками.

Гарантований час на безвідмовну роботу колійного приймача типу ПП та ПП1 становить не менше 70 000 год., інтенсивність відмов не перевищує $15 \cdot 10^{-6}$ 1/год., середній час на відновлення працездатного стану приблизно дорівнює 1 год., установлений ресурс до припинення експлуатації — не менше 15 років.

1.3.2. Колійні приймачі типу ПРЦ4

Колійні приймачі типу ПРЦ4 належать до 4-го покоління ТРК та працюють в складі апаратури систем автоблокування без ізолюючих стиків. Для ПРЦ4, як і для ПП (ПП1), навантаженням слугує реле АНШ2-310 з послідовно з'єднаними обмотками. Приймачі ПРЦ4 випускаються 6-ти видів в залежності від несучої та модулюючої частоти прийнятого сигналу. Характеристики приймачів ПРЦ4 наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 - Характеристики приймачів ПРЦ4

Тип приймача	Номинальні частоти сигналу, Гц		Середня частота смуги пропускання вхідного фільтра, Гц	Вихідні клеми
	Несуча	Модулююча		
ПРЦ4-4/8	4545	8	4525-4565	31-33
ПРЦ4-4/12		12		
ПРЦ4-5/8	5000	8	4980-5020	31-13
ПРЦ4-5/12		12		
ПРЦ4-6/8	5555	8	5535-5575	31-83
ПРЦ4-6/12		12		

Принцип дії та електрична принципова схема ПРЦ4 аналогічний до ПП. Принципова схема містить ті ж функціональні вузли: вхідний фільтр; демодулятор; амплітудний обмежувач і підсилювач струму; проміжний фільтр низьких частот; буферний каскад; пороговий пристрій; вихідний фільтр з підсилювачем і окремо вихідний підсилювач; вторинне джерело живлення.

Гарантований час на безвідмовну роботу пристрою ПРЦ4 становить не менше 69 000 год., інтенсивність відмов не перевищує $15 \cdot 10^{-6}$ 1/год., середній час на відновлення працездатного стану приблизно дорівнює 1 год. Установлений ресурс до припинення експлуатації — не менше 15 років.

На сьогоднішній час існують і коїльні приймачі з вбудованою цифровою обробкою сигналу. Одним із прикладів є ППЗС, який працює на частотах як 3-го, так і 4-го покоління тональних рейкових кіл. На відміну від ППЗ і ПРЦ4 живлення відбувається однофазним змінним струмом промислової частоти.

Навантаженням коїльного приймача з вбудованою цифровою обробкою сигналу ППЗС слугує все те ж реле АНШ2-310 з послідовним з'єднанням обмоток, при цьому підключається два таких реле гарячим резервуванням. Зовнішній вид та принципова схема даного реле наведена на рис. 1.5 та 1.6



Рис. 1.5. Зовнішній вигляд реле ППЗС



12, 13 — блоки керування реле.

21

- виявлено нестабільність значень параметрів індуктивних та ємнісних елементів пов'язані з коливаннями температури, що призводить до неякісної роботи фільтрів приймача та потребує сезонного налаштування та регулювання параметрів приймачів;

- велике енергоспоживання приймачів ТРК;
- великі габарити та вага приймачів ТРК;
- неуніфікованість обладнання.

Використання мікроелементної бази та методів цифрової обробки сигналу дозволить позбутися індуктивних та ємнісних елементів та дозволить подолати значну кількість цих недоліків. Для цього необхідно виконувати перетворення аналогового сигналу у цифровий і всі подальші розрахунки і перетворення будуть відбуватися з оцифрованим сигналом, що також виключає вплив зовнішніх гармонік на сигнал всередині пристрою.

2. Розробка цифрових смугових фільтрів для приймача ТРК

2.1. Класифікація цифрових фільтрів

Цифровий фільтр – це апаратна або програмна реалізація математичного алгоритму, входом якого є цифровий сигнал, а виходом – інший цифровий сигнал, форма якого і/або амплітудна та фазова характеристики спеціальним чином модифіковані.

Цифрові фільтри призначені для вирішення двох основних завдань:

- 1) розподілу двох і більше поширених спільно сигналів;
- 2) відновлення сигналів, які були якимось чином спотворені.

Операція розподілу застосовується в тих випадках, коли корисний сигнал поширюється разом з іншими сигналами, які грають роль перешкод.

Завдання відновлення вирішується у випадках, коли сигнал піддається різноманітним спотворенням.

Для вирішення цих задач можна використати аналогові фільтри, однак цифрові фільтри дозволяють досягнути набагато високої точності. Цифрові фільтри займають одне з найважливіших місць в цифровій обробці сигналів. Унікальні властивості цифрових фільтрів дозволили значно розширити галузь застосування ЦОС. Операція розділу використовується в тих випадках, коли корисний сигнал розповсюджується разом з іншими сигналами, які грають роль перешкод.

Для рішення задачі розділу сигналів можна скористатись аналоговим фільтром, реалізація якого зазвичай пов'язана з меншими грошовими затратами. Окрім того, такі фільтри мають високу швидкодію і широкий динамічний діапазон по амплітуді і по частоті. В свою чергу цифрові фільтри перевершують аналогові за точністю відтворення бажаних частотних характеристик.

До 60-х років для реалізації фільтрів застосовувалися, в основному, пасивні елементи, тобто індуктивності, конденсатори і резистори. При цьому основними проблемами виявляються розмір котушок індуктивності (на низьких частотах вони

стають дуже громіздкими) і нестабільність параметрів (особливо при коливаннях температури).

З розробкою інтегральних операційних підсилювачів (ОУ) з'явився новий напрям проектування активних фільтрів на базі ОУ. В складі активних фільтрів застосовуються резистори, конденсатори і підсилювачі (активні компоненти), котушок індуктивності в них не має.

Надалі активні фільтри майже повністю замінили пасивні. Зараз пасивні фільтри застосовуються тільки на високих частотах (вище 1 МГц), за межами частотного діапазону більшості ОУ широкого застосування. [8]

На сьогоднішній час в багатьох випадках аналогові фільтри замінюються цифровими. Робота цифрових фільтрів забезпечується програмними засобами, що дозволяє їм бути значно гнучкішими у порівнянні з аналоговими. За допомогою цифрових фільтрів можна реалізувати такі передаточні функції, які дуже важко отримати звичайними методами. Проте, цифрові фільтри поки не можуть замінити аналогові всюди, тому потреба в найбільш популярних аналогових фільтрах - активних RC – фільтрах зберігається. Порівняння цифрових і аналогових фільтрів наведено в таблиці 2.1.

Звичайно, що на практиці існують багато інших чинників, які враховуються при порівняльній оцінці аналогових і цифрових фільтрів. Тому, у більшості сучасних систем обробки сигналів використовуються комбінації аналогових і цифрових методів для реалізації бажаних функцій і використовуються переваги всіх методів, як аналогових, так і цифрових.

Проте у випадках, коли вимоги до фільтрації сигналу набагато жорсткіші, можуть знадобитися схеми фільтру з характеристиками вищих порядків, ніж перший або другий. Проектування фільтру високих порядків є складнішим завданням. [9]

Спираючись на тенденції розвитку теорії і практики цифрової фільтрації, основними використовуваними методами є частотна селекція сигналів і оптимальна (адаптивна) фільтрація.

Таблиця 2.1 - Порівняння цифрових та аналогових фільтрів

Аналогові фільтри	Цифрові фільтри
низька точність із-за допуску на елементи	висока точність
нелінійна фаза	лінійна фаза (КІХ-фільтр)
дрейф унаслідок зміни параметрів компонентів	немає дрейфу унаслідок зміни параметрів компонентів
реалізація адаптивних фільтрів ускладнена	гнучкість, можлива адаптивна фільтрація
складні в моделюванні і проектуванні	легкі в моделюванні та проектуванні
використовуються на високих частотах і для усунення ефекту накладання спектру	обмеження при роботі в реальному масштабі часу - обчислення повинне бути завершене за час інтервалу дискретизації

Найбільш широко використовуються сигнали, дискретизовані в часовій області - відліки сигналу вибираються з постійним кроком по часу. Однак можуть траплятися й інші сигнали. Наприклад, вибірка відліків може йти з рівномірним інтервалом у просторі, прикладом чого служить зчитування інформації з масиву тензодатчиків, розміщених по крилу літака з кроком на один сантиметр. Крім тимчасової та просторової можна перерахувати і ряд інших областей опису сигналів, але на практиці широкого застосування вони не отримали.

Властивості лінійного фільтра повністю визначають три основні характеристики фільтрів: імпульсна, перехідна та частотна, які містять вичерпну інформацію щодо його фільтруючих властивостей. Відрізняються вони лише формою представлення інформації.

Існує два основних типи цифрових фільтрів: фільтри з кінцевою імпульсною характеристикою (КІХ) і фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою (БІХ). Ця класифікація відноситься до імпульсних характеристик фільтрів.

КІХ-фільтри реалізуються згорткою вхідного сигналу з імпульсною характеристикою. Даний спосіб дозволяє сконструювати майже будь-який лінійний фільтр. В фільтрах, які ґрунтуються на операції згортки, кожний відлік вихідного сигналу отримується в результаті множення затриманих відліків вхідного сигналу на відповідні вагові коефіцієнти та подальшого підсумування отримуваних добутоків.

БІХ-фільтри - рекурсивні фільтри. Рекурсивні фільтри являють собою ширший клас фільтрів і, окрім відліку вхідного сигналу, враховують також відліки вихідного сигналу, отримані на попередніх ітераціях. Набір вагових коефіцієнтів рекурсивного фільтру відрізняється від коефіцієнтів нерекурсивного фільтру.

Будь-який лінійний фільтр повністю визначається імпульсною характеристикою, яка являє собою реакцію фільтру на одиничний імпульс. Імпульсна характеристика рекурсивного фільтру може бути представлена у вигляді суми синусоїдальних сигналів зі спадаючою по експоненційному закону амплітудою. Це означає, що рекурсивний фільтр має імпульсну характеристику нескінченної довжини. Однак, починаючи з деякого моменту часу, амплітуда синусоїдальних коливань затухає настільки, що становиться нижче рівня шумів округлення, тому наступними відліками імпульсної характеристики можна знехтувати.

Ключова різниця між аналоговим та цифровим фільтрами полягає в тому, що замість обчислення величин опорів, ємностей та індуктивностей для аналогового фільтра розраховуються значення коефіцієнтів для цифрового фільтра. Іншими словами, у цифровому фільтрі числа замінюють фізичні опори та ємності аналогового фільтра. Ці числа є коефіцієнтами фільтра, вони постійно перебувають у пам'яті та використовуються для обробки (фільтрації) дискретних даних, отриманих від АЦП.

Цифровий фільтр, що працює у реальному масштабі часу, оперує дискретними за часом даними на протилежність безперервному сигналу, що обробляється аналоговим фільтром. При цьому черговий відлік, відповідний відгуку фільтра, формується після закінчення кожного періоду дискретизації.

Внаслідок дискретної природи оброблюваного сигналу розрахунки даних часто посиляються на їх номери, наприклад: відлік 1, відлік 2, відлік 3 тощо.

При проектуванні високочастотних, смугових і режекторних (загороджувальних) фільтрів попередньо розраховують низькочастотний фільтр (НЧ-фільтр), а потім перетворюють його на бажаний вид. Саме з цієї причини, говорячи про розрахунок фільтрів, найчастіше описують лише НЧ-фільтри. Існує два методи перетворення НЧ-фільтра у високочастотний (ВЧ-фільтр) - інверсія АЧХ та звернення АЧХ. Обидва методи знайшли широке поширення.

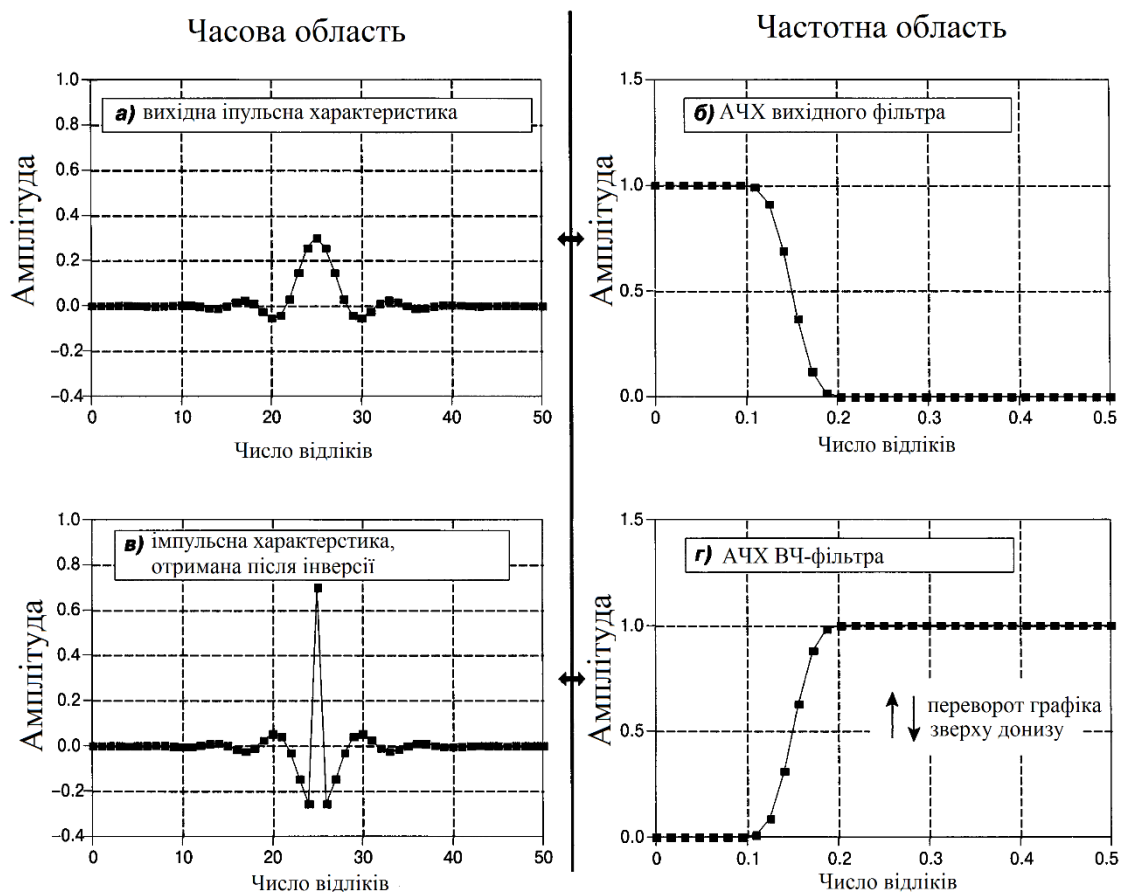


Рис 2.1. Приклад інверсії АЧХ: а) імпульсна характеристика НЧ-фільтру; б) АЧХ НЧ-фільтру; в) імпульсна характеристика ВЧ-фільтра, отримана з імпульсної характеристики НЧ-фільтра після зміни арифметичних знаків при вагових коефіцієнтах на протилежні та додавання одиниці до середнього коефіцієнта, що представляє собою центр симетрії; г) АЧХ отриманого ВЧ-фільтра є відображенням АЧХ вихідного НЧ-фільтра «згори донизу»

Приклад інверсії показано на рис. 2.1. На (а) зображена імпульсна характеристика віконного НЧ-фільтра. Такий КІХ-фільтр має 51 ваговий коефіцієнт,

причому багато з коефіцієнтів настільки малі, що на графіку не відрізняються від нуля. АЧХ фільтра (б) можна отримати, доповнивши імпульсну характеристику 13 нулями та застосувавши БПФ 64-го порядку. Перетворення НЧ-фільтра в ВЧ-фільтр виконується в дві дії: 1) міняємо арифметичні знаки всіх коефіцієнтів фільтра; 2) додаємо одиницю до середнього відліку, до якої імпульсна характеристика симетрична. В результаті отримуємо ВЧ-фільтр, імпульсна характеристика та АЧХ якого показані на (в і г). Інверсія АЧХ виявляється у перевороті графіка АЧХ зверху донизу. При цьому смуга пропускання перетворюється на зону придушення, а зона придушення - у смугу пропускання. Це означає, що НЧ-фільтр перетворюється на ВЧ-фільтр, ВЧ-фільтр - в НЧ-фільтр, смуговий - в режекторний, а режекторний - в смуговий.

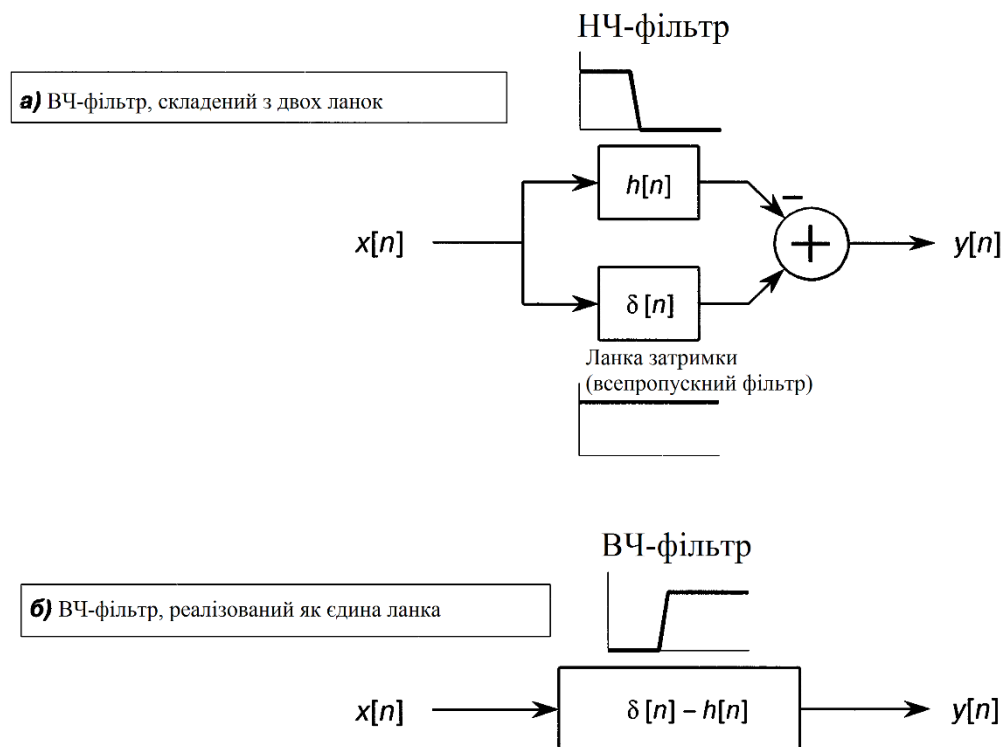


Рис 2.2. Інверсія АЧХ: а) вхідний сигнал $x[n]$ надходить одночасно на вхід двох ланок - $h[n]$ та $\delta[n]$; б) ці дві ланки можуть бути об'єднані в одну з імпульсною характеристикою $\delta[n] - h[n]$. АЧХ такої ланки утворюється в результаті інверсії АЧХ вихідного НЧ-фільтра $h[n]$

Рис. 2.2 допомагає розібратися в тому, чому розглянуте перетворення імпульсної характеристики фільтра призводить до інверсії його частотної характеристики. Як показано на (а), вхідний сигнал $x[n]$ надходить одночасно на дві

ланки, однією з яких є НЧ-фільтр з імпульсною характеристикою $h[n]$, а іншим - ланка затримки (всепропускний фільтр), імпульсна характеристика якого описується зміщеною дискретною дельта-функцією $\delta[n]$. Результируючий вихідний сигнал $y[n]$ дорівнює різниці сигналів, отриманих на виході ланки затримки та на виході НЧ-фільтра. Так як низькочастотні компоненти спектра віднімаються з вихідного сигналу, то в вихідному сигналі залишаються тільки верхні частоти, а це означає, що ми отримаємо ВЧ-фільтр.

Програмна реалізація цього методу передбачає два етапи: спочатку сигнал обробляється НЧ-фільтром, а потім результат фільтрації віднімається із вихідного сигналу. Дві ці операції можуть, однак, бути замінені одною процедурою, якщо об'єднати вагові коефіцієнти двох відповідних фільтрів.

Класифікувати цифрові фільтри можна за областю застосування та за внутрішньою структурою. За областю застосування усі цифрові фільтри можна розділити на три великі групи: фільтри часової обробки, фільтри частотної обробки та спеціальні фільтри.

Обробка часової області використовується, коли уся інформація міститься безпосередньо у формі сигналу (кодування у часовій області). Фільтрація у часовій області використовується тоді, коли уся інформація використовується в рішенні таких задач, як згладжування, усунення постійної складової, формування огинаючої тощо.

Обробка в частотній області використовується, коли вся інформація, що переноситься сигналом, міститься в амплітуді, частоті та фазі складових сигнал гармонічних компонентів (кодування в частотній області). Основною задачею таких фільтрів є — розділ частотних діапазонів (частотна селекція сигналів).

Як видно з табл. 2.1, КІХ-фільтри (фільтри на основні згортки) і БІХ-фільтри (рекурсивні фільтри) — два суперні класи фільтрів, і в кожному окремому випадку доводиться віддавати перевагу тому чи іншому.

Розглянемо їх переваги і недоліки детальніше, щоб обрати найбільш підходящий для нашого проекту фільтр.

Таблиця 2.2 - Класифікація фільтрів по робочій області та структурі конструювання

За області використання	За внутрішньою структурою	
	На основі згортки (KIX-фільтри)	Рекурсивні фільтри (БІХ-фільтри)
Фільтри часової області	Однорідні фільтри	Однополосні рекурсивні фільтри
Фільтри частотної області	Віконні фільтри	Фільтри Чебишева
Спеціальні фільтри	Спеціальні KIX-фільтри	Фільтри з ітеративною структурою

KIX-фільтри — фільтри з кінцевою імпульсною характеристикою, змінюючи ваги коефіцієнтів та число ланок якого можна реалізувати майже будь-яку частотну характеристику. Такі фільтри можуть мати властивості, які неможливо досягнути, використовуючи аналогову фільтрацію.

БІХ-фільтри — фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою, тобто їх імпульсні характеристики розтягнуті по нескінченному часовому інтервалу. Це пояснюється тим, що ці фільтри — рекурсивні, тобто вони використовують зворотний зв'язок, і хоча БІХ-фільтри можуть бути реалізовані з меншої кількості розрахунків ніж KIX-фільтри, БІХ-фільтри не можуть мати характеристик, які мають KIX-фільтри. Більш того, БІХ-фільтри не мають лінійної характеристики, але розрахункові переваги БІХ-фільтрів втрачаються, коли вихідний сигнал фільтру піддається децимації, оскільки в такому випадку кожний раз доводиться знову розраховувати значення вихідної величини.

Зазвичай БІХ-фільтри більш ефективні, ніж KIX-фільтри, це пов'язане з тим, що вони потребують меншої кількості пам'яті і меншої кількості операцій множення з накопиченням. БІХ-фільтри можуть приносити проблеми нестійкості, але вони рідко виникають, якщо проєктований фільтр високого порядку реалізується як система, яка складається з каскадів другого порядку. З іншої сторони, KIX-фільтри потребують більшої кількості ланок та, відповідно, операцій

множення з накопиченням для реалізації частотної характеристики з заданою частотою зрізу, але при цьому мають лінійну фазову характеристику. КІХ-фільтри працюють на кінцевому часовому інтервалі даних, тому, якщо частина даних зіпсована (наприклад, в результаті збою в роботі АЦП), КІХ-фільтр буде “дзвеніти” тільки на часовому інтервалі. БІХ-фільтр буде “дзвеніти” значно довший період часу через наявність зворотнього зв’язку.

Взагалі, вибір між фільтрами залежить від відносних переваг обох класів. Розглянемо їх, спираючись на необхідні для нашого проекту характеристики.

1. КІХ-фільтри мають строго лінійну фазову характеристику. Отже, фільтр не вводить фазового спотворення в сигнал, що важливо в багатьох сферах, наприклад, передачі даних, біомедицині, цифровій аудіообробці або обробці зображень. Фазова характеристика БІХ-фільтрів нелінійна, особливо на краях смуг.

2. КІХ-фільтри реалізовані нерекурсивно, тобто вони завжди стійкі. Гарантувати стійкість БІХ-фільтрів вдається не завжди.

3. Для реалізації фільтрів використовується обмежене число бітів. Практичні наслідки цього (наприклад, шум округлення і помилки квантування) значно менш істотні для КІХ-фільтрів, ніж для БІХ-фільтрів.

4. Для отримання кінцевої імпульсної характеристики за допомогою фільтрів з різкими зрізами характеристики, буде потрібно більше коефіцієнтів, ніж для отримання нескінченної імпульсної характеристики. Тому, для реалізації запропонованої специфікації амплітудної характеристики з КІХ необхідно більше обчислювальної потужності і пам'яті, ніж для реалізації її з БІХ. Але, ефективність КІХ-реалізацій підвищується за рахунок обчислювальної швидкості і обробки при декількох швидкостях.

5. Аналогові фільтри легко перетворювати в еквівалентні цифрові БІХ-фільтри, що задовольняють схожим специфікаціям. Для отримання КІХ-фільтрів таке перетворення неможливе, оскільки для них не існує аналогових прототипів. Втім, отримувати довільні частотні характеристики на КІХ-фільтрах легше.

6. Синтез КІХ-фільтрів алгебраїчно складніший, якщо не використовувати комп'ютерну підтримку розробки.

7. БІХ-фільтри рекурентні. Це означає, що, пропустивши через фільтр один і той же сигнал, але зі «зворотним ходом часу», ми отримаємо різні результати. Тому БІХ-фільтри мають ряд обмежень по застосуванню.

Враховуючи приведені міркування, загальний принцип вибору між КІХ і БІХ можна сформулювати таким чином.

- використовувати БІХ, якщо єдиними важливими вимогами являються характеристика з різкими зрізами і висока пропускна спроможність, оскільки БІХ-фільтри вимагатимуть визначення меншого числа коефіцієнтів, ніж КІХ-фільтри.

- використовувати КІХ, якщо число коефіцієнтів фільтрів не дуже велике і, зокрема, якщо потрібно, щоб фазове спотворення було відсутнє або малим.

Очевидно, що БІХ-фільтри економніші, ніж КІХ-фільтри, як з огляду необхідних обчислень, так і з огляду вимог до пам'яті. Втім, можна ще додатково врахувати симетрію коефіцієнтів КІХ-фільтрів і вважати більш ефективнішими КІХ-фільтри. При однакових специфікаціях амплітудної характеристики число коефіцієнтів КІХ-фільтру звичайно в шість разів перевищує порядок передаточної функції БІХ-фільтру.

Ознайомившись з особливостями КІХ- і БІХ-фільтрів, можна зробити вибір - що для нашого проектування ми використовуватимемо КІХ-фільтр, оскільки він є більш стійким і має певний ряд особливостей, які ми надалі використовуватимемо.

Розрізняють два види реалізації цифрового фільтру: апаратний і програмний. Апаратні цифрові фільтри реалізуються на елементах інтегральних схем, тоді як програмні реалізуються за допомогою програм, що виконуються процесором або мікроконтролером. Перевагою програмних перед апаратним є легкість втілення, а також настройки і змін, а також те, що в собівартість такого фільтру входить тільки праця програміста. Недолік - низька швидкість, що залежить від швидкодії процесора, а також складно реалізувати цифрові фільтри високого порядку.

Широко поширене застосування мікро-ЕВМ в науці і техніці значно збільшило число цифрових сигналів, які реєструються і обробляються. Оскільки такі дані завжди обробляються лінійним чином, то необхідно розуміти спотворення

і зміни, що вносяться цифровими фільтрами. Більш того, оскільки цифрова передача стійкіша до шуму в порівнянні з передачею аналогових сигналів, то вона швидко стає домінуючою в світі. Тому знову необхідно точно вивчити, як діють або можуть діяти цифрові фільтри для різних сигналів.

2.2. Моделювання цифрових смугових фільтрів для приймача ТРК

Смуговий фільтр - фільтр, який пропускає частоти, що знаходяться в деякій смузі частот.

Смуговий фільтр - лінійна система, яка може бути представлена у вигляді послідовності, що складається з фільтру нижніх частот і фільтру високих частот. Смугові фільтри застосовуються в тих випадках, коли необхідний тільки певний діапазон частот.

Існує декілька різновидів смугових фільтрів – смугові та смугозапираючі фільтри. Визначення даних фільтрів можна отримати прямо з їх назви - перший вид фільтрів пропускає лише певну смугу частот, а другий відповідно пропускає практично все, окрім якоїсь смуги частот.

Розглянемо частотну характеристику смугового фільтра нижніх частот.

Частотна характеристика ідеального ФНЧ представлена на рис. 2.3, б. Відповідна імпульсна характеристика у часовій області представлена на рис. 2.3, б і є функцією $\sin(x)/x$ (sinc). Якщо реалізації цієї частотної характеристики використовувати КІХ-фільтр, він повинен мати нескінченне число ланок. Метод $\sin(x)/x$ із зважуванням полягає в наступному.

Спочатку імпульсна характеристика обрізується до розумної кількості точок N , як на рис. 2.3, в. Частотна характеристика, що відповідає рис. 2.3, в, має занадто великий вплив бічних пелюсток через розриви в області кінцевих точок у усіченій імпульсній характеристиці. Наступний крок у процесі проектування полягає у застосуванні до усіченого імпульсу відповідної вагової функції, як показано на рис. 2.3, г, який обнуляє кінцеві точки. Вибрана таким чином вагова функція визначає

спад та характеристики бічних пелюсток фільтра. Зазвичай, існує кілька прийнятних варіантів залежно від бажаної частотної характеристики.

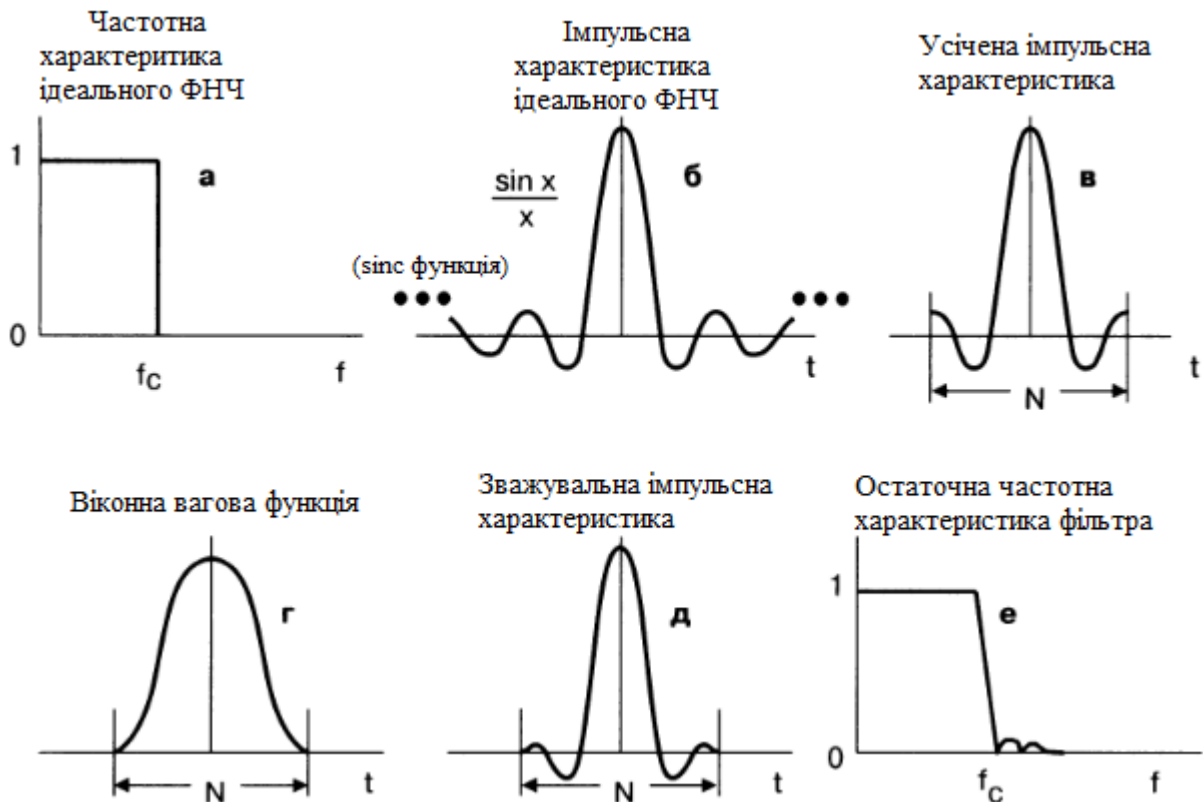


Рис 2.3. Проектування КІХ-фільтра методом $\sin(x)/x$ зі зважанням

Частотна характеристика фільтра з усіченою імпульсною характеристикою $\sin(x)/x$ (рис 2.3, д) представлена на рис 2.3, е.

Відповідно до вище викладеного, для проектування обираємо смуговий фільтр.

Ідеальні смугові фільтри характеризуються двома характеристиками:

- нижня частота зрізу F_{C1} ;
- верхня частота зрізу F_{C2} .

У свою чергу, реалізація смугового фільтру характеризується шістьма характеристиками

- нижня межа частоти пропускання $F_{пр1}$;
- верхня межа частоти пропускання $F_{пр2}$.
- нижня межа частоти затримання $F_{зат1}$;
- верхня межа частоти затримання $F_{зат2}$;

- максимальне придушення в смузі пропускання R_P ;
- мінімальне придушення в смузі придушення R_S .

Прикладом реалізації такого фільтру може служити коливальний контур (коло з послідовно з'єднаних резистора, конденсатора та індуктивності).

2.3. Програмна реалізація смугового цифрового фільтра

Обробка аналогових (безперервних в часі і по значенню) вимагає спеціальних електронних схем, які часто складні в розробці і дорогі. Набагато краще перетворювати вхідний аналоговий сигнал в цифрове значення, яке потім можна обробити за допомогою мікропроцесора. Цю методику називають аналого-цифровим перетворенням або дискретизацією. Дискретизація впливає на сигнал у двох аспектах. Перший з них полягає в тому, що частотний спектр дискретного сигналу повторюється в частотній області з періодом, рівним частоті дискретизації. Під другим впливом розглядатимемо накладення - частотні складові спектру частково перекривають один одного, оскільки деякі високочастотні компоненти в спектрі не відрізняються від низькочастотних в найближчому спектрі. Зазвичай присутність накладення в системі вважається небажаним, і хоча повністю усунути його в реальному світі не можливо, зниження його впливу до незначного рівня - завдання, цілком здійсненне.

Якщо у нас є дискретний вхідний сигнал x_i , де $i = 0, 1 \dots, n-1$, ми можемо сформувати відфільтрований вихідний сигнал y_i :

$y_i = a_0x_0 + a_1x_1 + \dots + a_{n-1}x_{n-1}$. Тут a_i - постійні значення, які застосовуються до відповідних дискретних значень x_i вхідного сигналу.

Ряд компаній випускає спеціальні програми для проектування і аналізу цифрових фільтрів. У нашій розробці цифрового фільтру ми скористаємося програмою dsPICFilterDesign від компанії Microchip.

Процес проектування цифрових фільтрів складається з тих же етапів, що і процес проектування аналогових фільтрів. Спочатку формулюються вимоги до

бажаних характеристик фільтру, по яких потім розраховуються параметри фільтру. Амплітудна і фазова характеристики формуються аналогічно аналоговим фільтрам. Ключова відмінність між аналоговим і цифровим фільтрами полягає в тому, що замість обчислення величин опорів, ємкостей і індуктивностей для аналогового фільтру розраховуються значення коефіцієнтів для цифрового фільтру. Тобто, в цифровому фільтрі числа замінюють фізичні опори і ємкості аналогового фільтру. Ці числа є коефіцієнтами фільтру, вони постійно знаходяться в пам'яті і використовуються для обробки (фільтрації) дискретних даних, що поступають від аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Цифровий фільтр, що працює в реальному масштабі часу, оперує дискретними за часом даними в протилежність безперервному сигналу.

Проте цифрові фільтри не можуть бути вирішенням всіх можливих задач фільтрації, що виникають при обробці сигналів.

Розробка цифрового фільтру відбувається в п'ять етапів.

1. Специфікація вимог до фільтру:

- характеристик сигналів (тип джерела і одержувача сигналу, інтерфейс введення-виводу, швидкість передачі даних і ширина смуги, найвища частота);
- характеристик фільтру (швидкість роботи і режими фільтрації);
- принципу реалізації (виконується вибір процесора сигналів);
- інші вимоги до структури (наприклад, вартість фільтру).

2. Обчислення підходящих коефіцієнтів фільтру.

3. Представлення фільтру підходящою структурою.

4. Аналіз впливу кінцевої розрядності на продуктивність фільтру.

5. Реалізація фільтру на програмному і/або апаратному рівні.

Названі п'ять етапів не завжди незалежні; крім того, вони не завжди розташовуються у вказаному порядку. Фактично існують методи, які дозволяють об'єднувати другий етап і деякі аспекти третього і четвертого.

Розробник може не мати достатньо інформації, щоб повністю визначити фільтр на початкових етапах, але для спрощення процесу розробки слід сформулювати максимальну кількість вимог.

Як вже раніше обмовлялося, для проектування цифрового фільтру оберемо фільтр з кінцевою імпульсною характеристикою. Спершу скористаємося програмою Matlab, за допомогою якої ми зможемо побудувати графік спектральної потужності. На даному графіку нам потрібно буде визначити головну гармоніку і дві її бічних, своєрідні перешкоди, а також знайти характеристики фільтру (табл. 2.3). Візьмемо, наприклад, частоту дискретизації 8 Гц, а частоту несучої - 420 Гц. Всі дані напишемо у виді програми і отримаємо графік спектральної щільності потужності смугового фільтру, який показаний на рис.2.4.

Таблиця 2.3 - Характеристики фільтру

Несуча частота, Гц	Значення параметрів смугового фільтру							
	Частота модуляції 8 Гц				Частота модуляції 12 Гц			
	Частота пропускання, Гц		Частота запирання, Гц		Частота пропускання, Гц		Частота запирання, Гц	
420	412	428	400	440	408	432	390	450
480	472	488	460	500	468	492	450	510
580	572	588	560	600	568	592	545	610
720	712	728	700	740	708	732	690	750
780	772	788	760	800	768	792	750	810
4545	4537	4553	4530	4560	4533	4557	4515	4575
5000	4992	5008	4980	5020	4988	5012	4960	5030
5555	5547	5563	5535	5575	5543	5567	5515	5585

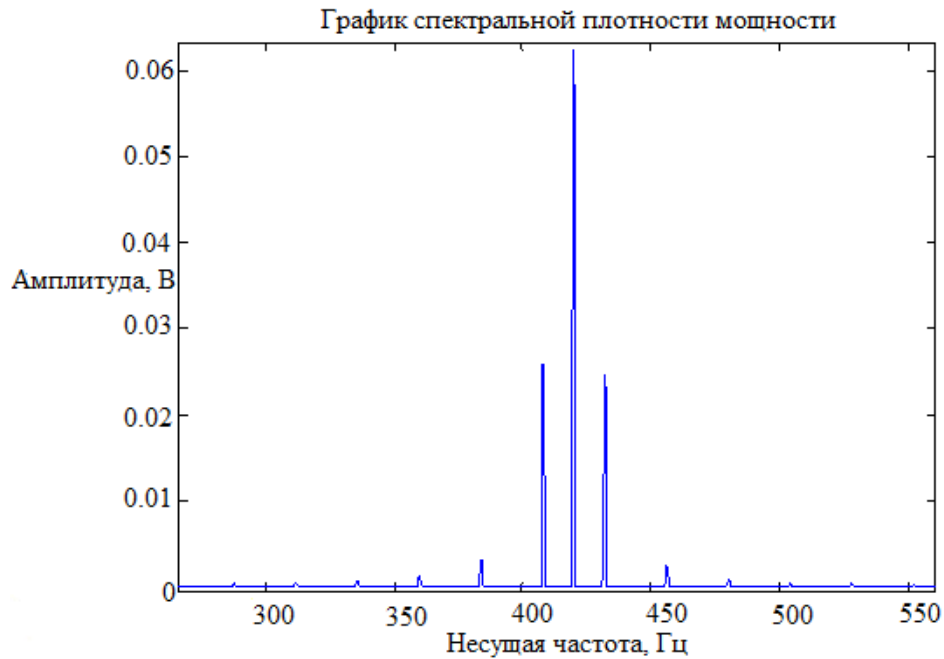


Рис. 2.4. Графік спектральної щільності потужності смугового фільтру

Скориставшись вищезазначеною програмою для моделювання цифрового фільтру dsPICFilterDesign, отримуємо такий результат:

Код на програмі «С», який буде використовуватися для цифрового контролеру сигналів:

```
#define NZEROS20

#define NPOLES20

#define GAIN3.223202976e+05

static float xv[NZEROS+1], yv[NPOLES+1];

static void filterloop()
{ for (;;)

{ xv[0] = xv[1]; xv[1] = xv[2]; xv[2] = xv[3]; xv[3] = xv[4]; xv[4] = xv[5]; xv[5] =
xv[6]; xv[6] = xv[7]; xv[7] = xv[8]; xv[8] = xv[9]; xv[9] = xv[10]; xv[10] = xv[11];
xv[11] = xv[12]; xv[12] = xv[13]; xv[13] = xv[14]; xv[14] = xv[15]; xv[15] = xv[16];
xv[16] = xv[17]; xv[17] = xv[18]; xv[18] = xv[19]; xv[19] = xv[20];

xv[20] = next input value / GAIN;
```

```

yv[0] = yv[1]; yv[1] = yv[2]; yv[2] = yv[3]; yv[3] = yv[4]; yv[4] = yv[5]; yv[5] = yv[6];
yv[6] = yv[7]; yv[7] = yv[8]; yv[8] = yv[9]; yv[9] = yv[10]; yv[10] = yv[11]; yv[11] =
yv[12]; yv[12] = yv[13]; yv[13] = yv[14]; yv[14] = yv[15]; yv[15] = yv[16]; yv[16] =
yv[17]; yv[17] = yv[18]; yv[18] = yv[19]; yv[19] = yv[20];

yv[20]=(xv[0]+xv[20])-10*(xv[2]+xv[18])+45*(xv[4]+xv[16])
-120*(xv[6]+xv[14])+210*(xv[8]+xv[12])-252*xv[10]
+(-0.9228111876*yv[0])+(18.3696430200*yv[1])
+(-173.8537518200*yv[2])+(1040.1496534000*yv[3])
+(-4412.0971070000*yv[4])+(14104.3896920000*yv[5])
+(-35257.5242720000*yv[6])+(70572.7414840000*yv[7])
+(-114879.5590600000*yv[8])+(153578.6379900000*yv[9])
+(-169538.9661700000*yv[10])+(154817.3159700000*yv[11])
+(-116740.1384100000*yv[12])+(72294.1495760000*yv[13])
+(-36408.8278980000*yv[14])+(14682.4287140000*yv[15])
+(-4629.9615067000*yv[16])+(1100.3145595000*yv[17])
+(-185.3932031700*yv[18])+(19.7469107650*yv[19]);
next output value=yv[20];
}
}

```

На графіку приведеному на рис. 2.5. межа 0,5 по осі X становить частоту Найквіста (подвоєна частота дискретизації), яка дорівнює 1000 Гц.

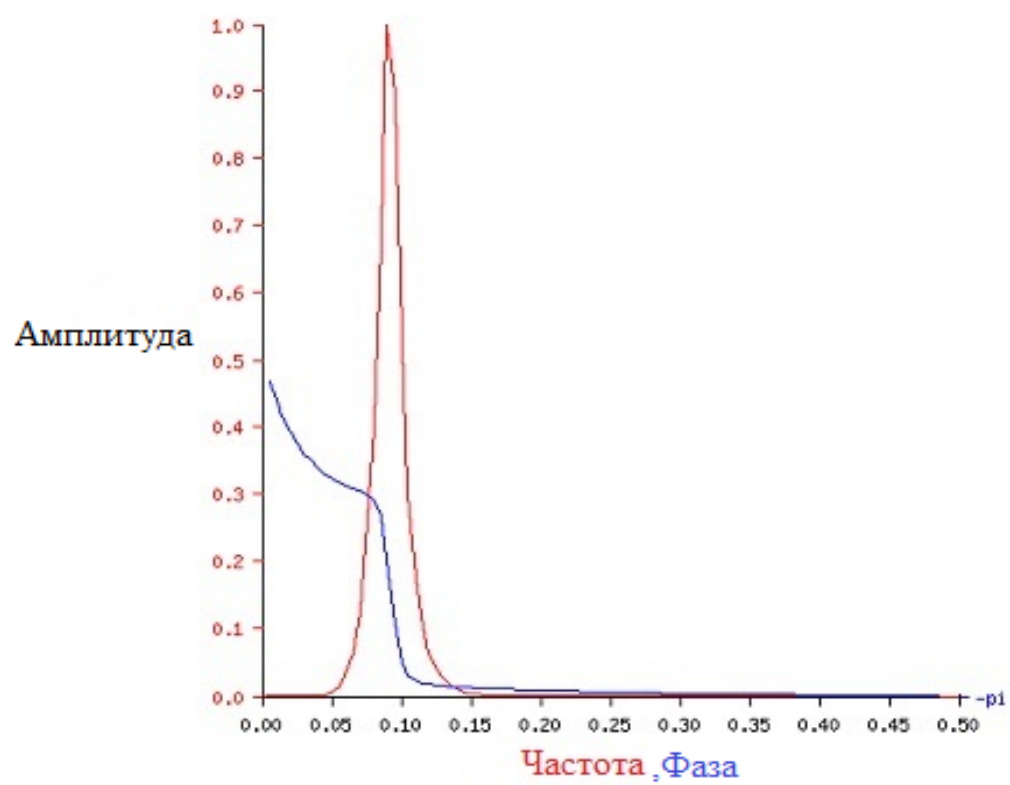


Рис. 2.5. Результирующий графік програми dsPICFilterDesign

Висновки

У даній дипломній роботі програмно реалізований цифровий смуговий фільтр, основою для якого покладено цифровий КІХ-фільтр.

Для розробки цифрового смугового фільтру на 8 і 12 Гц використовували математичний пакет Matlab та програму dsPICFilterDesign від компанії Microchip, за допомогою яких змодельовали фільтр, отримали його характеристики та побудували графік спектральної щільності потужності.

Цифрові системи дозволяють використовувати інтегральні мікросхеми цифрової логіки, завдяки чому збільшується їх надійність, зменшуються габаритні розміри апаратури і вартість. Набагато краще перетворювати вхідний аналоговий сигнал в цифрове значення, яке потім можна обробити за допомогою мікропроцесора.

Зараз у багатьох випадках аналогові фільтри замінюються цифровими. Робота цифрових фільтрів забезпечується, в основному програмними засобами, тому вони виявляються значно гнучкішими в застосуванні в порівнянні з аналоговими.

Процес проектування цифрових фільтрів складається з тих же етапів, що і процес проектування аналогових фільтрів. Спочатку формулюються вимоги до бажаних характеристик фільтру, по яких потім розраховуються параметри фільтру. Амплітудна і фазова характеристики формуються аналогічно аналоговим фільтрам. Ключова відмінність між аналоговим і цифровим фільтрами полягає в тому, що замість обчислення величин опорів, ємкостей і індуктивностей для аналогового фільтру розраховуються значення коефіцієнтів для цифрового фільтру.

Тобто, в цифровому фільтрі числа замінюють фізичні опори і ємкості аналогового фільтру. Ці числа є коефіцієнтами фільтру, вони постійно знаходяться в пам'яті і використовуються для обробки (фільтрації) дискретних даних, що поступають від аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Цифровий фільтр, що працює в реальному масштабі часу, оперує дискретними за часом даними в протилежність безперервному сигналу.

Список використаної літератури

1. Федоркін, Ю.А. Приймачі тональних рейкових кіл з цифровою обробкою сигналу: «Автоматика, зв'язок, інформатика» [Текст] / Ю.А. Федоркін. - М.: Друкарня Парадиз, 2008.- с. 21-26
2. Автоматика, телемеханіка і зв'язок на залізничному транспорті [Текст]: Підручник для вузів зал. трансп./ А.А. Устінський, Б.М. Степенський, Н.А. Цибуля і ін. -М.: Транспорт, 1985.- 441 с.
3. Кестер, У. Проектування систем цифрової і змішаної обробки сигналів [Текст] / У. Кестер – М.: Техносфера, 2010. – 328 с.
4. Федоров, Н.Е. Сучасні системи автоблокування з тональними рейковими колами [Текст]: навчальний посібник / Н.Е. Федоров. - Самара: САМГАПС, 2004. - 132 с.
5. Виноградова, В.Ю. Автоблокування і сигналізація переїзду [Текст]: навчальний посібник / В.Ю. Виноградова. - М.: Маршрут, 2003. - 120 с.
6. Методи цифрової обробки сигналів для рішення прикладних задач [Текст] / Марчук В.І. та ін. – М.: Радіотехніка, 2012. – 128 с.
7. Дмитрієв, В.С. Системи автоблокування з рейковими колами тональної частоти [Текст] / В.С. Дмитрієв, В.А. Мінін. - М.: Транспорт, 1992. - 175 с.
8. Трахтмана, А.М. Цифрові фільтри [Текст]: пер. з англ./ під ред. А.М. Трахтмана. - М.: Рад.радіо, 1980. - 224 с.
9. Сергієнко, А.Б. Цифрова обробка сигналів [Текст]/ А.Б. Сергієнко. - СПб.: Пітер, 2003. - 604 с.
10. Назаренко, А.В. Цифрова обробка сигналів [Текст]: пер. з англ. / під ред. А.В. Назаренко. - М.: Видавничий будинок «Вільямс», 2004. - 992 с.
11. Основи цифрової обробки сигналів [Текст]: курс лекцій / А.І. Солонина, Д.А. Уляхович, С.М. Арбузов, Є.Б. Соловйова. - СПб.: БХВ-Петербург, 2005. - 768 с.

12. Власенко, А.А. Проектування систем цифрової і змішаної обробки сигналів [Текст]: пер. з англ./ під ред. А.А. Власенко. - М.: Техносфера, 2010. - 330 с.

13. Смит Стивен. Цифровая обработка сигналов [Текст]: практическое руководство для инженеров и научных работников / Стивен Смит; пер. с англ. А.Ю. Линовича, С.В. Витязева, И.С. Гусинского. - М.: Додэка-XXI, 2012. - 720 с.

14. Титова, Т.С. Спеціальні технічні вимоги до ВШМ [Електронний ресурс] / Т. С. Титова – 2016. - Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/6339445/>