

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій
Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

ДОВІДКА

про відсутність плагіату у випускній кваліфікаційній роботі

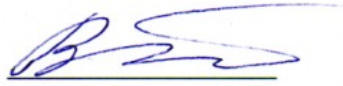
За результатами перевірки випускної кваліфікаційної роботи (ВКР) здобувача вищої освіти освітнього ступеня (ОС) «магістр»

Леонова Максима Вадимовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

на тему: Удосконалення роботи тональних рейкових кіл за рахунок використання методів цифрової обробки сигналів

в роботі не виявлено порушень академічної доброчесності.

Керівник ВКР


(підпис)

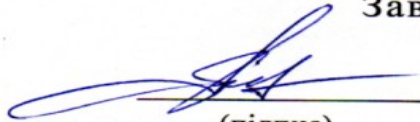
Прочанилов В.І.
(прізвище, ім'я, по батькові)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Український державний університет науки і технологій

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

**«ДО ЗАХИСТУ»
Завідувач кафедри**


(підпис)

Гаврилюк В.І.
(ПІБ)

2021 р. чэрпня « 16 »

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня «магістр»**

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Автоматика та автоматизація на транспорті»

Тема Удосконалення роботи тональних рейкових кіл за рахунок використання методів цифрової обробки сигналів

Theme The digital methods of signal processing use for a work improvement of voice-frequency track circuits

Керівник дипломної роботи

доцент



Профатилів В.І.


Студент(ка) групи АТ2021 (967М)



Леонов М.В.

Student

АТ2021 (967М)



Leonov Maksym

**Дніпро
2021**

Український державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерні технології і системи»

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Автоматика та автоматизація на транспорті

Спеціальність
ОПП

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри АТ

Гаврилюк В.І.

« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

до кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеню «магістр»

Леонов Максим Вадимович

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема роботи

Удосконалення роботи тональних рейкових кіл за рахунок використання методів цифрової обробки сигналів.

Затверджена наказом по університету № 630-ст від « 19 » жовтня 2020 р.

2. Термін подання студентом закінченої роботи _____

3. Вихідні дані до роботи _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Обсяг %	Кількість креслень
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		

Студент

Науковий керівник

Реферат

Відомості про об'єм пояснювальної записки: 52 сторінки, 6 таблиць, 18 рисунків, 15 джерел літератури.

Ключові слова: тональні рейкові кола, цифрова обробка сигналу, цифровий фільтр, цифровий сигнальний процесор, dsPIC-мікроконтролер, аналого-цифровий перетворювач.

Об'єкт проектування: апаратура тональних рейкових кіл.

Мета магістерської роботи: розробка приймача для тональних рейкових кіл з використанням цифрової обробки сигналів.

У першому розділі розглядаються етапи розвитку тональних рейкових кіл, їх різновиди, апаратуру, а також характеристики тональних рейкових кіл, а також перспективність розвитку систем спрямованих на розвиток даного типу рейкових кіл.

У другому розділі розглядається проектування цифрового смугового фільтру для тональних рейкових кіл. Проектування проводилось у математичному пакеті MATLAB, завдяки зручності його використання та високій функціональності.

У третьому розділі виконана безпосередня розробка цифрового приймача тональних рейкових кіл, яка включає до себе принципову та структурну схеми, розрахунок фільтрів та інших параметрів, необхідних у цій системі. Також приведений опис роботи даного приймача.

Галузь застосування: Автоматика на залізничному транспорті.

Висновки: використання цифровий приймач тональних рейкових кіл замість аналогового має ряд переваг: універсальність цифрового приймача, що дозволить використовувати всього лише один тип приймача для різних частот; значне зниження потужності споживання; зменшення ваго-габаритних параметрів; широкий температурний діапазон роботи приймача; стабільність роботи у широкому діапазоні напруги живлення.

Зміст

Вступ.....	5
Розділ 1. Опис тональних рейкових кіл.....	7
1.1. Історія і розвиток тональних рейкових кіл	7
1.2. Системи автоблокування з ТРК	9
1.3. Апаратура тональних рейкових кіл	11
1.3.1. Колійні приймачі типу ПП та ПП1	12
1.3.2. Колійні приймачі типу ПРЦ4	15
1.3.3. Колійні приймачі типу ППЗС.....	16
1.4. Недоліки аналогових приймачів	17
Розділ 2. Розробка цифрових смугових фільтрів для приймача ТРК.....	19
2.1. Загальна структура цифрових фільтрів.....	19
2.2. Моделювання смугового фільтру.....	25
2.3. Проектування смугового фільтру	26
Розділ 3. Розробка цифрового приймача тональних рейкових кіл на базі цифрового сигнального процесора.....	33
3.1. Розробка структурної та принципової схем приймача ТРК на базі цифрового сигнального процесора.....	33
3.1.1. Розгляд мікроконтролера з цифровим сигнальним процесором dsPIC	40
3.1.2. Архітектура мікроконтролера dsPIC	43
3.2. Особливості та принцип роботи dsPIC30F1010	47
Висновок.....	49
Список використаної літератури.....	51

Вступ

Забезпечення безпеки руху, а також інтервальне регулювання — є пріоритетними задачами при роботі з залізницею. Для її виконання необхідно знати про місцезнаходження поїздів відповідно одне до одного. Забезпечення цього покладено на блок ділянки, з яких складається залізниця України, і контроль відбувається за допомогою рейкових кіл.

Рейкові кола складаються з живильного кінця, рейкової лінії та релейного кінця. При заїзді поїзда на блок-ділянку він шунтує рейкову лінію 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. Таким чином рухаючий слідом поїзд сповільнюється на попередній блок-ділянці і зупиняється перед поточною.

Довжина блок ділянки повинна бути більшою за гальмівний шлях поїзда, та менше максимальної довжини роботи рейкового кола, за якої відбувається виконання всіх режимів роботи, а саме: нормальний, шунтовий, контрольний та, окремий випадок шунтового, режим КЗ. Нормальний режим повинен забезпечувати відповідність зеленого сигналу світлофора до вільності рейкового кола. Для роботи цього режиму треба щоб необхідний струм доходив 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 повинен забезпечувати надійне відпускання реле при знаходженні поїзда на блок-ділянці. Це досягається тим що поїзд шунтує своєю колісною парою рейки і струм протікає від живильного кінця по рейці до колісної пари і по другій рейці назад до поїзда, при цьому опір шунта (колісної пари) не повинен перевищувати необхідне значення, а напруга живильного кінця не повинна бути занадто великою. Контрольний режим необхідний для перевірки стану рейкової лінії, і реле повинно надійно відпускатися при пошкодженні рейкової лінії. Для виконання цих умов вимоги аналогічні шунтовому режиму.

Рейкові кола відрізняються за типом живлення: постійного та змінного струму, при цьому тип живлення може бути неперервний, імпульсний і кодовий. При цьому вибираючи частоту 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. Також при тязі постійного струму, чи автономній вплив можна легко прибрати або її взагалі немає.

Окремим випадком кодових рейкових кіл - є тональні рейкові кола. Вони так називаються, оскільки амплітудно модульований сигнал кодується тональною частотою. Тональні рейкові кола пройшли чотири покоління і з кожним наступним збільшувалась тональна частота, за рахунок зменшення довжини блок-ділянки. Основною перевагою рейкових кіл — є відсутність у них ізолюючих стиків. Це досягається завдяки зміні частоти у сусідніх ділянках. Тональні рейкові кола мають великий потенціал за рахунок своїх переваг, одна з яких висока завадостійкість, тому їх намагаються впроваджувати на більшості залізничних шляхів при новому будівництві, в основному на станціях. Та все ж ця система не завжди застосовується оскільки має значну вартість обладнання.

Та з розвитком технологій залізнична автоматика також потребує оновлення. Одним із методів осучаснення систем можна вважати цифрову обробку сигналів. Вона використовує алгоритми перевірки спектру сигналу для виділення необхідних частот, які зчитуються завдяки електронно-обчислювальним пристроям.

1 Опис тональних рейкових кіл

1.1 Історія і розвиток тональних рейкових кіл

Тональні рейкові кола — один з видів автоматичної сигналізації в якому сигнальний струм використовує частоти тонального діапазону, а саме від 400 Гц до 6 кГц. З появою ТРК покоління з'явилася можливість відмовитись від ізолюючих стиків, які складають 27 % всіх відмов систем залізничної автоматики. При цьому з'являється зона додаткового шунтування для запобігання якої світлофор необхідно встановлювати раніше приймального кінця. Довжина додаткового шунтування становить 12-25 м, та залежить 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 може бути отримано завдяки діленню значення модулюючої частоти на значення промислової частоти, а саме 50 Гц. Друге число означає модулюючу частоту 8 Гц або 12 Гц. Сигнальні струми високочастотного діапазону використовують одну з трьох частот у якості несучої: 4545 Гц, 5000 Гц, 5555 Гц. Для них використовують наступні позначення: $4,5/8$; $4,5/12$; $5,0/8$; $5,0/12$; $5,5/8$; $5,5/12$. На відміну від низькочастотного діапазону перше число означає округлення до першого знаку після коми при діленні на 1 кГц, а друге, як і при низькочастотному, означає несучу частоту.

Тональні рейкові кола перших 2-х поколінь рідко використовуються на сучасній залізниці бо мають один доволі великий недолік. Частоти цих систем залежать від промислової частоти, тому це унеможлиблює їх застосування на ділянках залізниць з електричним типом тяги змінного струму, які займають більшу частину усієї залізниці України. Самі частоти першого і другого поколінь мали такі значення: 425 Гц та 475 Гц;

575 Гц, 725 Гц, 775 Гц, відповідно. Це дозволяло їх використовувати тільки на ділянках з автономною тягою та електричною тягою постійного струму. Також ці системи використовували живлення на вихідному кінці та приймач на вхідному. Ще одним недоліком систем АБ на першому поколінні була необхідність розташування напільного обладнання у приміщеннях з температурою від +5 °С до +40 °С. У другого покоління вже не було такого недоліку, і робочим діапазоном вважається від -45 °С до +60 °С. На основі цих поколінь ТРК була розроблена 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. Та 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.

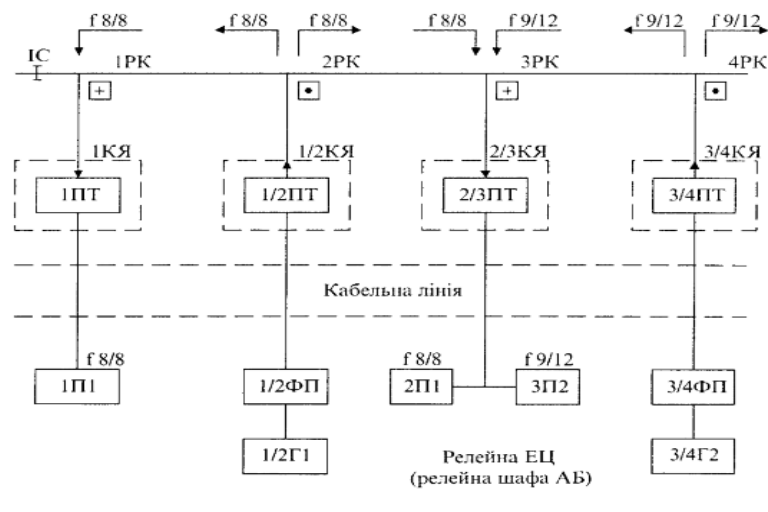


Рис. 1.1. Структурна схема ТРК-3

Апаратура 3-го покоління може використовуватись як і на посту так і в польових шафах АБ, оскільки робочий діапазон температур, не сильно відрізняється від другого покоління знаходиться в межах від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ще однією перевагою ТРК-3 є можливість одного живильного кінця посилати сигнал в обидва напрямки, таким чином збільшуючи довжину однієї блок-ділянки. Для досягнення цього в приймальній апаратурі розташовано два фільтри для сусідніх живильних кінців. Структурна схема розділення ТРК-3 зображена на рис. 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 таблиці 1.1.

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.

Таблиця 1.1 - Різновиди релейних систем АБ з ТРК

	ЦАБ	ЦАБ-М (АЛСО)	АБТс (АБ-ПСБ)	ЦАБс	АБТ	АБТЦ
Розташування апаратури	центр.	центр.	децентр.	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

На цей час впровадження ТРК на залізничних шляхах України є пріоритетним завданням для УЗ. Завдяки великій кількості переваг, таких як можливість

централізованого розміщення апаратури дозволяє пришвидшити ремонтні роботи, пов'язані з несправністю живильного та приймального кінців, а також полегшує обслуговування цього устаткування. А також використання безстиківих ділянок, що зменшує загальну кількість неполадок пов'язаних з рейковими колами.

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

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.

1.3 Апаратура тональних рейкових кіл

Загалом апаратура ТРК складається з:

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

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

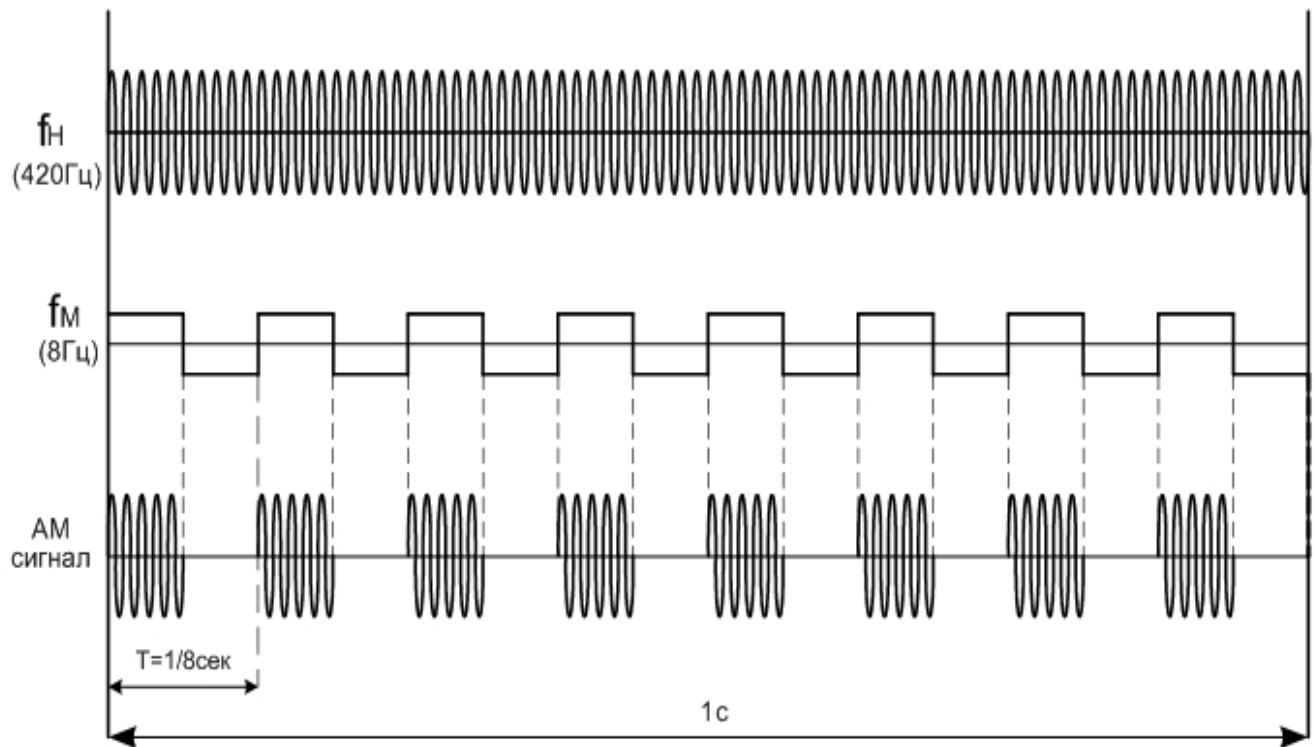


Рис. 1.2. Утворення сигналу на виході генератора 8/8

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

1.3.1 Колійні приймачі типу ПП та ПП1

Наразі залізницею використовуються колійні приймачі типу ПП та ПП1. Які призначені для контролю кіл з частотами відповідними третьому поколінню ТРК. Ці приймачі виконані на основі реле ДСШ в якості моноблочної конструкції. В цілому випускається 10 варіацій даних приймачів в залежності від частот прийнятих сигналів, в позначенні перше число відповідає номеру гармоніки промислової частоти за якою знаходиться дана частота, а друге число — частота модуляції.

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	

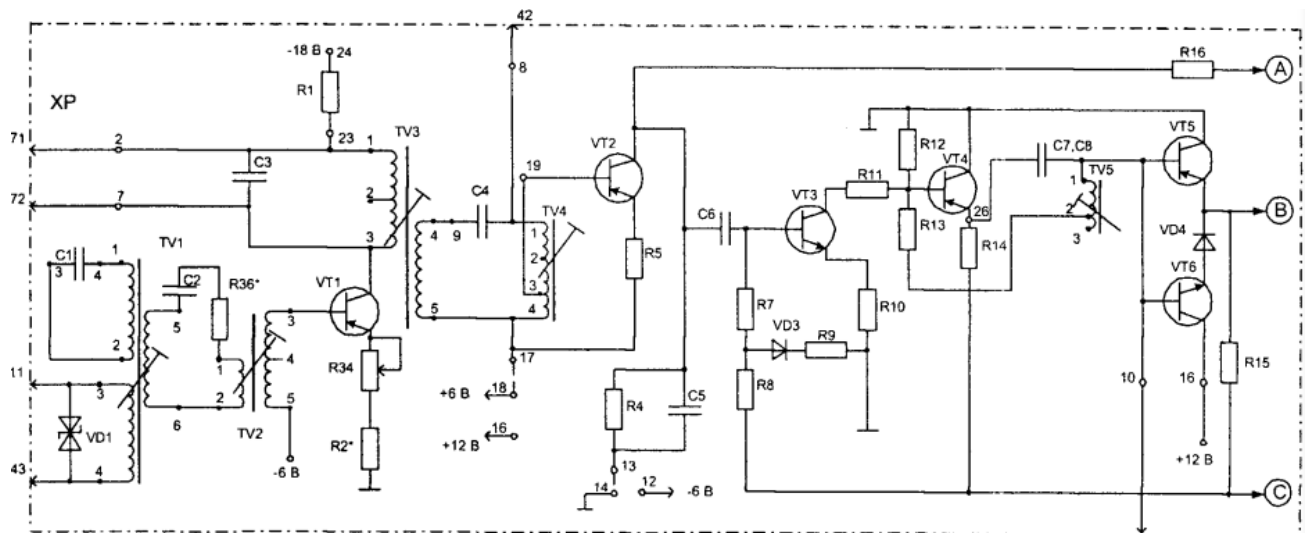


Рис. 1.3. Принципова електрична схема ПП1(1)

Принципова електрична схема, зображена на рисунках 1.3 і 1.4, складається з таких функціональних вузлів: вхідний фільтр; демодулятор; амплітудний обмежувач і підсилювач струму; проміжний фільтр низьких частот; буферний каскад; пороговий

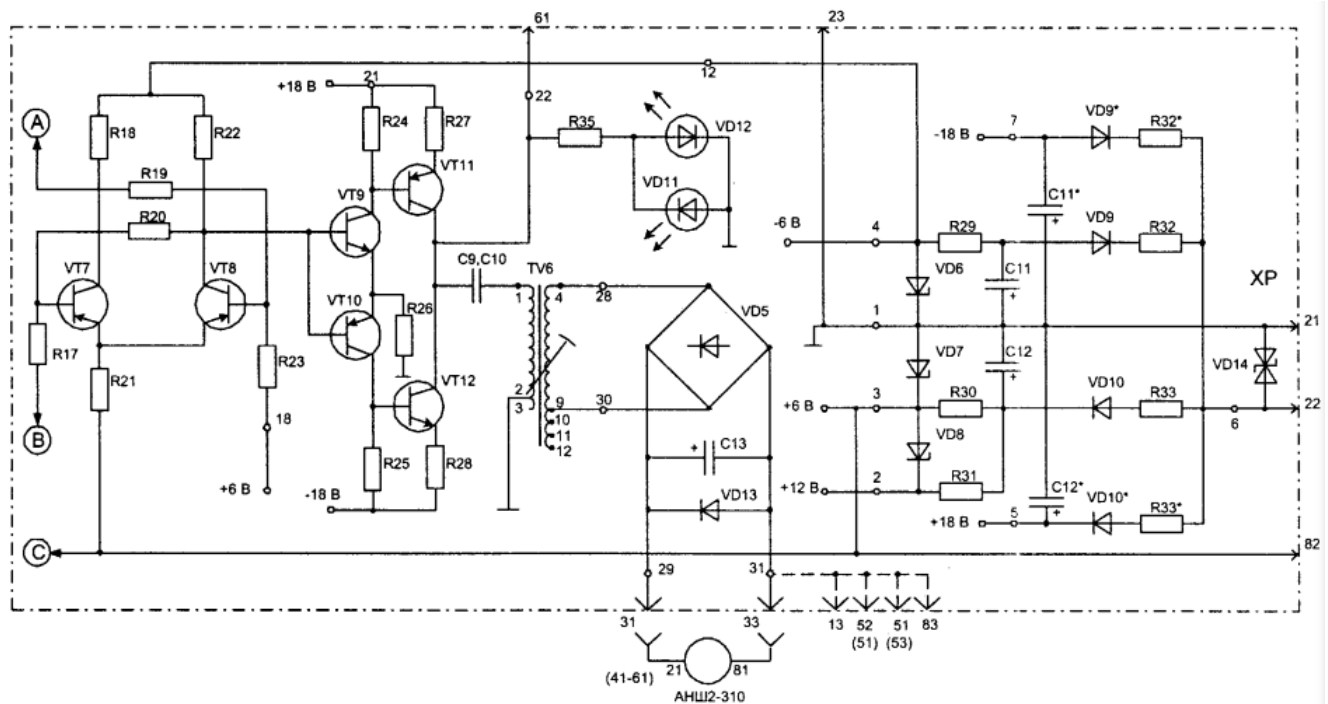


Рис.1.4 Принципова електрична схема ПП1(2)

пристрій; вихідний фільтр з підсилювачем і окремо вихідний підсилювач; вторинне джерело живлення.

Сигнал, що приходить з рейкового кола, потрапляє на вхідний фільтр, в якому відбувається виділення несучої частоти, та бічних частот необхідного сигналу, при цьому відбувається придушення частот з сусіднього рейкового кола.

Отриманий після фільтру сигнал надходить до демодулятора, в якому відбувається відсіювання несучого сигналу за допомогою низькочастотного фільтра. Демодульований сигнал надходить до обмежувача для захисту послідуєчих каскадів. Проміжний фільтр призначений для пропускання власної частоти модуляції для відсіювання будь-яких гармонік, які можуть бути отримані при попередніх кроках. Симетричний тригер виконує функцію порогового елемента. Після тригера сигнал йде на вихідний підсилювач, який підсилює сформований прямокутний сигнал відповідний 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 пристрою становить не менше 70000 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

Для 4-го покоління ТРК використовується приймач типу ПРЦ4, який працює в складі апаратури систем автоблокування без ізолюючих стиків. Як і для ПП (ПП1) навантаженням слугує реле АНЩ2-310 з послідовно з'єднаними обмотками. Приймачі випускаються 6-ти видів в залежності від несучої та модулюючої частоти прийнятого сигналу.

Принцип дії ПРЦ4 аналогічний до ПП, та електрична принципова схема містить такі 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.

Таблиця 1.3 - Характеристики приймачів ПРЦ4

Тип приймача	Номінальні 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		

Гарантований час на безвідмовну роботу пристрою становить не менше 69000 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.

1.3.3 Колійні приймачі типу ППЗС

Наразі існують і колійні 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 слугує все те ж реле АНШ2-310 з послідовним з'єднанням обмоток, при цьому підключається два таких реле гарячим резервуванням. Принципова схема даного реле наведена на рис. 1.6



Рис. 1.5. Зовнішній вигляд реле ППЗС

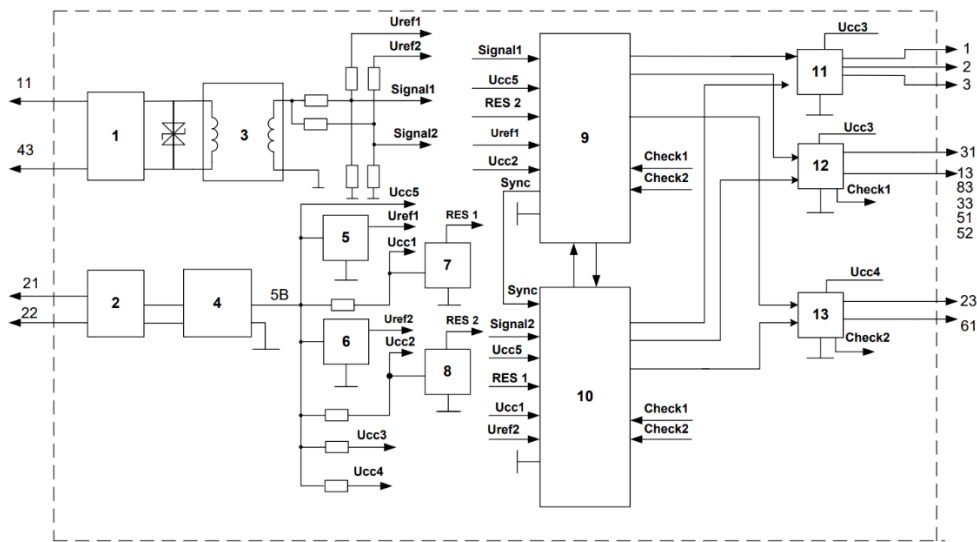


Рис. 1.6. Принципова схема ППЗС

Основними елементами схеми є:

- 1,2 — блоки фільтрів;
- 3 — вихідний смуговий фільтр;
- 4 — випрямляч;
- 5,6 — джерело опорної напруги;
- 7,8 — супервізор живлення;
- 9,10 — мікропроцесорний вузол;
- 11 — блок формування сигналу диспетчерського контролю;
- 12, 13 — блоки керування реле.

1.4 Недоліки аналогових приймачів

Проаналізувавши колійні приймачі типу ППЗ та ПРЦ4 можна зробити такі висновки:

- висока вартість обладнання за рахунок великої кількості індуктивних елементів;

- нестабільність значень параметрів індуктивних та ємнісних елементів пов'язані з коливаннями температури;
- велике енергоспоживання;
- великі габарити;
- відсутня уніфікованість обладнання.

Значну кількість цих недоліків можна подолати використовуючи мікроелементну базу та цифрову обробку сигналу, яка дозволить позбутися індуктивних та ємнісних елементів. Але для них необхідно виконувати перетворення аналогового сигналу у цифровий і подальші розрахунки і перетворення відбуваються з оцифрованим сигналом, що також виключає вплив зовнішніх гармонік на сигнал всередині пристрою.

2 Розробка цифрових смугових фільтрів для приймача ТРК

2.1 Загальна структура цифрових фільтрів

Фільтр — алгоритм який виконує обробку сигналу у часовій області завдяки якій змінюється спектральний склад на виході. Найчастіше це виконується для послаблення певного спектру або окремої її частини.

До 1960-х років фільтри використовувались для виділення певного діапазону частот, використовуючи пасивні елементи, а саме резистори, котушки і конденсатори. Але в таких фільтрах є велика кількість недоліків, які пов'язані саме з індуктивним елементом. Основною з цих проблем — є ненадійність, пов'язана з коливанням значень в залежності від зовнішніх факторів, вторинними проблемами — є вартість і габарити, через те що індуктивність представляє собою велику кількість мідного проводу намотаного на сердечник, або без сердечника.

Наразі цифрові фільтри витісняють аналогові, через низку недоліків останніх. Однією з основних переваг цифрового фільтру — є незмінність її характеристик з часом, наприклад коефіцієнти передатної функції аналогових фільтрів змінюються під впливом зовнішніх факторів. Основними відмінностями аналогових і цифрових фільтрів — є:

- Вартість: аналогові фільтри потребують велику кількість апаратури для достатньої точності, яка і підвищує загальну вартість пристрою, в той час як цифрові використовують лише аналого-цифровий перетворювач (АЦП) і обчислювальний механізм.
- Швидкість: через те що обчислення в цифрових фільтрах залежить від тактів вони є більш повільними у порівнянні з аналоговими в яких все обмежується рухом струму.
- Квантування: поява помилок обчислення через неточності під час оцифруванні сигналу, чого не буває в аналогових фільтрах.

- Зовнішній шум: вплив сигналів навколишнього світу на оброблюваний сигнал, що впливає на кінцевий результат, в цифрових фільтрах цей фактор відсутній.
- Дрейф характеристик: вплив зовнішніх факторів на значення пасивних елементів, що впливає на вихідний сигнал, цифрові фільтри не мають такого недоліку оскільки коефіцієнти передатної функції незмінні з часом.
- Динамічний діапазон: співвідношення значення амплітуд максимального і мінімального сигналів має бути більшим для аналогових фільтрів, та впливає на вибір АЦП для цифрових фільтрів.
- Частотний діапазон: для цифрових фільтрів, щоб виключити накладання сигналів, обмеженням є — частота Найквіста, для аналогових такого обмеження немає.

Та на жаль наразі цифрові фільтри не можуть повністю витіснити аналогові через вузьконаправленість певних задач. Наприклад, фільтри високих частот 3-го порядку легше реалізувати використовуючи RLC-кола.

Згідно з розвитком цифрових фільтрів, основними методами які використовуються — є частотна селекція сигналів і адаптивна фільтрація. Використання фільтрів наразі є розповсюдженим в галузях, де необхідна цифрова обробка сигналу, наприклад при спектральному аналізі, обробці зображень, відео, мовлення та звуку, та для інших цілей. З безперервним сигналом можна робити багато лінійних операцій, наприклад диференціювання, інтеграцію, екстраполяцію, аналіз на періодичність та інші. Отже всі ці операції можна виконувати за допомогою цифрового фільтру.

Основною характеристикою лінійного стаціонарного цифрового фільтру — є його передаточна функція. Саме з її допомогою описується реакція фільтру на її вхідний сигнал. Математично передаточна функція описує відношення вихідного сигналу до вхідного. Проте це відношення розраховується не з безперервними сигналами, а з їх з-перетвореннями, тож остаточно вона має вигляд:

$$G(z) = \frac{V(z)}{U(z)} = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}}{1 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}} \quad (2.1)$$

де, $V(z)$ — z -перетворення вихідної функції, $U(z)$ — z -перетворення вхідної функції, $a_0..a_n$ — вибірки вихідної функції, $b_1..b_m$ — вибірки вхідної функції.

Вибіркою називається значення сигналу на певному інтервалі часу, тому при оцифруванні АЦП за один такт дає у відповідність значення сигналу певне своє значення. При цьому тривалість такту не має перевищувати півперіод основного сигналу, оскільки це може викликати накладання частот.

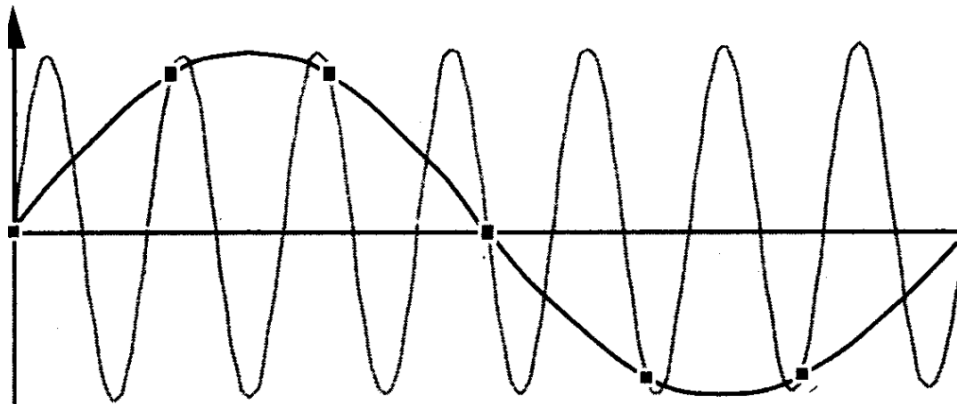


Рис. 2.1. Візуалізація ефекту накладання частот

Оскільки вибірка будь якої оцифрованої частоти f_0 може представляти частоту $f_0 + kf_s$, то частоту дискретизації необхідно обирати не менш як у 2 рази більшу. Ця частота називається частотою Найквіста, і саме вона необхідна для обробки вхідного сигналу без спотворення.

Як і аналогові, цифрові фільтри відрізняються за смугою пропускання певних частот. Власне існують фільтри нижніх частот, фільтри верхніх частот, смугові фільтри і смугоблокуючі. Різниця полягає в частотах які можуть бути на виході цих фільтрів. Як показано на рисунках 2.2-2.5 зі зміною частоти змінюється коефіцієнт підсилення сигналу, тобто потужність смуги частот яка не входить в дозволена зону послаблюється.

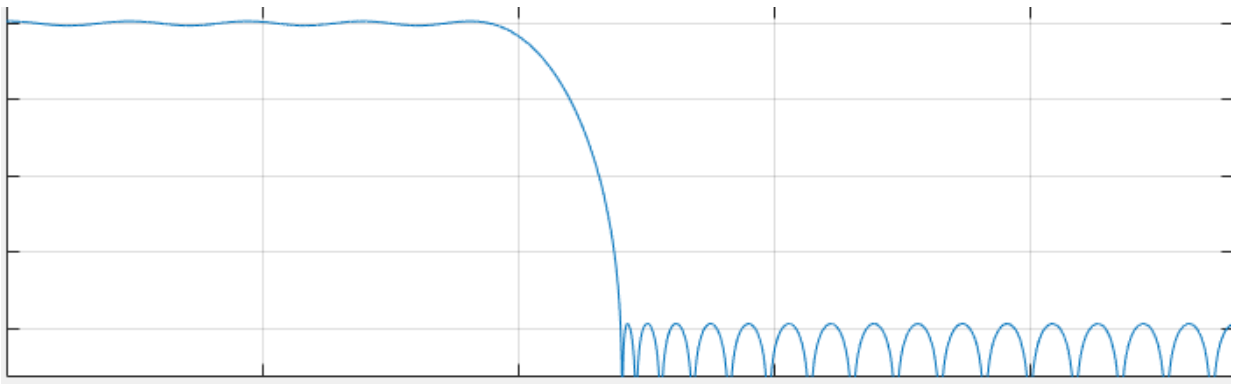


Рис. 2.2. Принцип дії фільтру нижніх частот

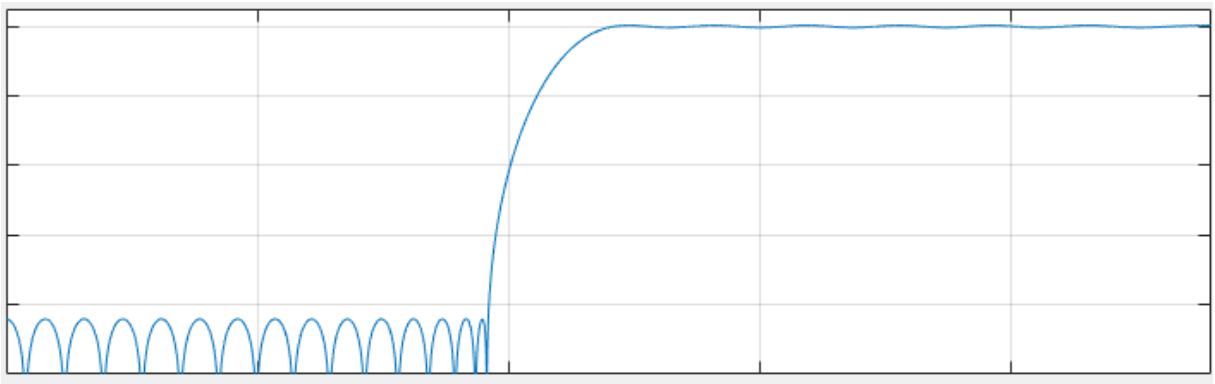


Рис. 2.3. Принцип дії фільтру верхніх частот

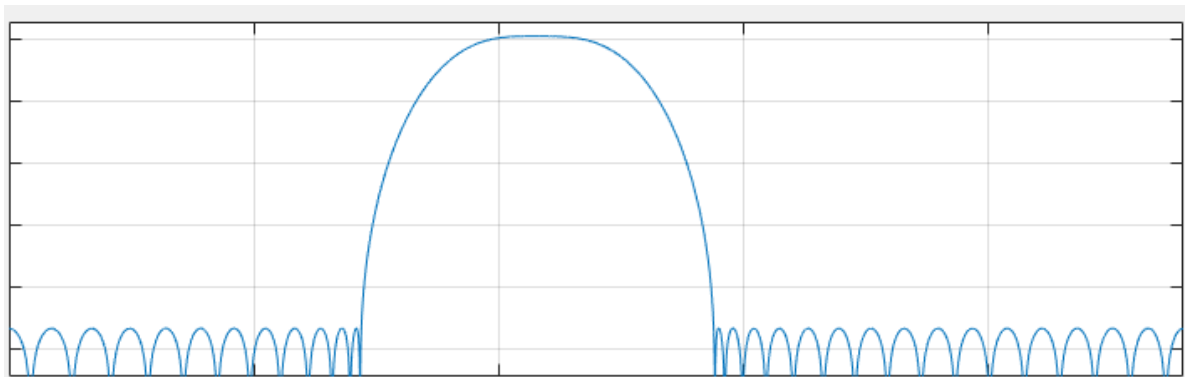


Рис. 2.4. Принцип дії смугового фільтру

При реалізації цифрових фільтрів є складнощі пов'язані з апроксимацією сигналу. Це означає що не на всіх частотах сигнал однаково послаблюється і перехід від забороненої до дозволеної зони не може бути ідеальним, тобто є певна смуга частот в якій послаблення відбувається поступово. Це пов'язано з фізичною неможливістю

реалізації подібних фільтрів. Проте до більшості фільтрів не застосовують такі сурові вимоги і при проектуванні дозволяється робити відхилення, що зводить всю процедуру до вибору схеми з задовільною конфігурацією.

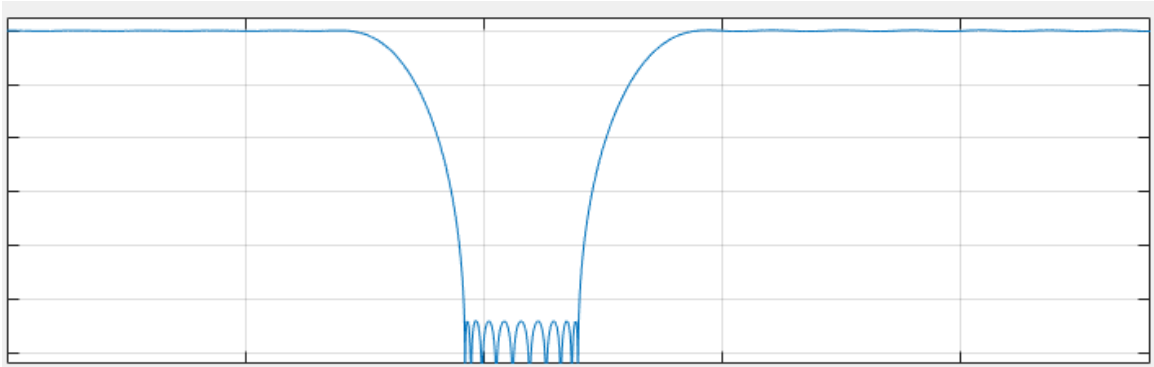


Рис. 2.5. Принцип дії смугоблокуючого фільтру

Загалом усі лінійні цифрові фільтри діляться на 2 типи:

- КІХ-фільтри — з кінцевою імпульсною характеристикою;
- БІХ-фільтри — з нескінченною імпульсною характеристикою.

КІХ-фільтр для обчислення поточного значення вихідного сигналу використовує поточний і попередні значення сигналу на вході, і не залежать від сигналів на виході. Тому їх інколи називають нерекурсивними. З цього можна зробити висновок, що при кінцевій довжині відліків сигналу на вході, ми отримаємо кінцеву кількість відліків сигналу на виході. Оскільки при отриманні нульового сигналу з певного часу, на виході фільтру через певний час теж з'явиться нульовий сигнал. Саме тому КІХ-фільтр і отримав свою назву.

БІХ-фільтр відрізняється від КІХ-фільтра наявністю зворотного зв'язку, що робить його рекурсивним. Також його властивостями є те, що їх імпульсна характеристика має нескінченну довжину через вплив попереднього вихідного сигналу який був не нульовим, а передаточна функція стає дрібно-раціональною.

При виборі необхідного цифрового фільтру необхідно визначитись з задачею і зважити переваги і недоліки обох фільтрів:

Переваги КІХ-фільтрів:

- відсутність вводу фазового спотворення в сигнал;
- стійкість завдяки нерекурсивності;
- стійкість до шуму та помилки квантування.

Переваги БІХ-фільтрів:

- простота переходу з аналогових фільтрів;
- більш дешеві за рахунок простішої елементної реалізації;
- простота алгебраїчного представлення.

Тож основною перевагою БІХ-фільтрів — є їх простота реалізації і економічна ефективність, через невелику потребу у пам'яті та обчислювальних можливостей механізму. При цьому надійність КІХ-фільтрів вища, як і завадостійкість, і менше вплив на сигнал.

Тож для проектування приладів, які призначені для залізничної автоматики краще підходить КІХ-фільтр, який завдяки своїй надійності може конкурувати з аналоговими приймачами.

В цілому реалізація цифрових фільтрів може бути апаратною, для якої виготовляються спеціалізовані інтегральні мікросхеми, чи програмною, проектування фільтру в такому разі зводиться до написання програми. Розповсюдження мікро-ЕОМ в сучасному світі та їх стрімкий розвиток призводять до того, що їх вартість значно знижується і відносно потужний обчислювальний механізм коштує відносно недорого. Єдиною перевагою апаратного методу представлення цифрового фільтру є його швидкодія, яка все ж потроху нівелюється завдяки збільшенню швидкості обчислень на сучасних мікро-ЕВМ.

2.2 Моделювання смугового фільтру

Смуговий фільтр призначений для пропускання частот певного діапазону. Він може бути представлений у вигляді комбінації фільтрів верхніх і нижніх частот. Даний

тип фільтрів є найбільш поширеним оскільки для багатьох задач необхідно пропускати лише певну смугу частот, наприклад при радіомовленні чи телетрансляції.

Окремим випадком смугового фільтру є смугоблокуючий фільтр, який навпаки блокує сигнал з певного діапазону, і пропускає всі частоти які виходять за її межі. Найчастіше подавлення стосується лише однієї частоти.

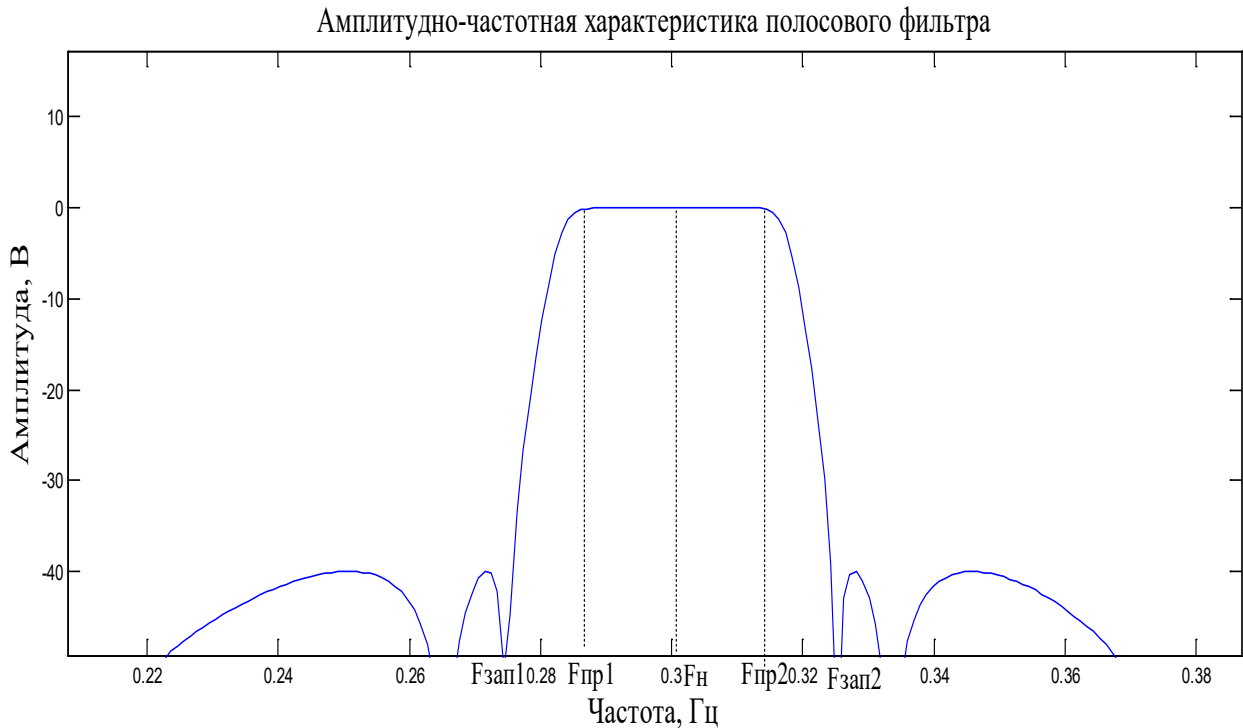


Рис. 2.6. Амплітудно-частотна характеристика смугового фільтру

Смуговий фільтр характеризується шістьма параметрами:

- нижня запираюча частота $F_{зап1}$ — всі частоти, які знаходяться нижче цього значення блокуються;
- верхня запираюча частота $F_{зап2}$ — всі частоти, які знаходяться вище цього значення блокуються;
- нижня пропуская частота $F_{пр1}$ — мінімізація придушення частот, які знаходяться вище цього значення;
- верхня пропуская частота $F_{пр2}$ — мінімізація придушення частот, які знаходяться нижче цього значення;

- придушення в смузі блокування K_s — коефіцієнт зменшення амплітуди у смугах нижче $F_{зап1}$ і вище $F_{зап2}$;
- придушення у смузі пропускання K_p — коефіцієнт зменшення амплітуди у смузі вище $F_{пр1}$ і нижче $F_{пр2}$.

2.3 Проектування смугового фільтру

При отриманні аналогового сигналу в першу чергу його необхідно оцифрувати, для подальшого розуміння процесором. Процес перетворення аналогового сигналу в цифровий називається дискретизацією. При цьому застосовується сторонній пристрій, який називається аналогово-цифровий перетворювач. Проте процес дискретизації вносить певні зміни в сигнал, а саме частотний спектр сигналу після оцифрування повторюється з періодом рівному відлікам, які утворює АЦП. Також може виникнути процес накладання частот, запобігти якому можна за допомогою збільшення частоти дискретизації, оскільки вона повинна бути більшою або дорівнювати частоті Найквіста. Також для відсутності впливу ефекту накладання частот можна використовувати додатково аналоговий фільтр нижніх частот на вході АЦП. Але всі ці методи не забезпечують повне усунення накладання частот, але допомагають максимально знизити їх вплив при обчисленні сигналу.

При наявності на вході дискретного сигналу, який утворюється рядом x_i , в якому $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$, то вихідний сигнал можна представити за допомогою формули:

$$y = a_0 x_0 + a_1 x_1 + \dots + a_{n-1} x_{n-1} \quad (2.2)$$

де, a_i — постійні значення, які використовуються до відповідних значень вхідного сигналу.

При цьому безліч компаній випускають готові програми для проектування і аналізу цифрових фільтрів. Скористаємось програмою Matlab для проектування фільтру.

При проектуванні цифрових фільтрів використовуються ті ж самі алгоритми що і для аналогових фільтрів. Спершу необхідно сформулювати вимоги, яким має відповідати фільтр, і по яким розраховуються його параметри. Амплітудна частотна характеристика і фазова частотна характеристика розраховуються так само як і для аналогових фільтрів. Основною відмінністю між аналоговим і цифровим фільтрами — є те, що замість розрахунку опорів, ємностей та індуктивностей відбувається розрахунок коефіцієнтів a_i для вхідного сигналу. Тобто цими коефіцієнтами заміняються резистори котушки та конденсатори, та на відміну від других значення коефіцієнтів є постійними і знаходяться в пам'яті цифрового фільтру з подальшим використанням щодо сигналу, який поступає від АЦП.

Етапи розробки цифрового фільтру:

1. Визначення вимог до фільтру:
 - характеристики сигналів;
 - характеристики фільтру;
 - принцип реалізації;
 - інші вимоги.
2. Обчислення необхідних коефіцієнтів.
3. Представлення фільтру відповідною структурою.
4. Аналіз впливу розрядності на продуктивність.
5. Реалізація фільтру.

Представлені етапи не прив'язані ні до даного порядку і можуть бути залежними одне від одного. Інколи користуються методами, що дозволяють об'єднати другий і певні аспекти третього і четвертого. Проте при розробці може бути недостатньо інформації для повного визначення фільтру на початку, тому для спрощення розробки формулюється максимальна кількість вимог.

Визначившись з фільтром для проекту, а саме фільтр з кінцевою імпульсною характеристикою, необхідно визначитись з його параметрами. Для прикладу візьмемо

середню несучу частоту для третього покоління тональних рейкових кіл — а саме 580 Гц, з частотою модуляції 12 Гц, і побудуємо в Matlab графік спектральної потужності для визначення основної та двох бічних гармонік. З її допомогою можна визначити характеристики фільтру.

Таблиця 2.1 - Частотні характеристики фільтру

Несучі частоти, Гц	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

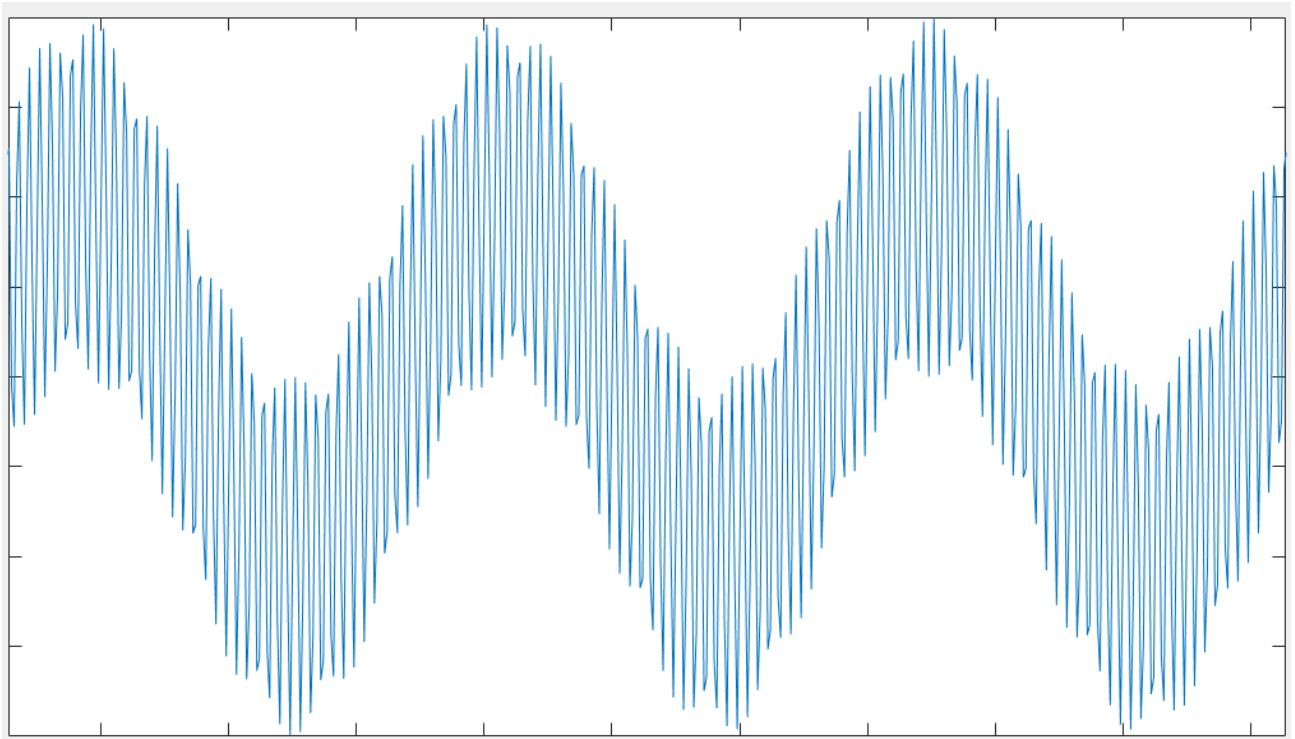


Рис. 2.7. Сигнал на вході АЦП

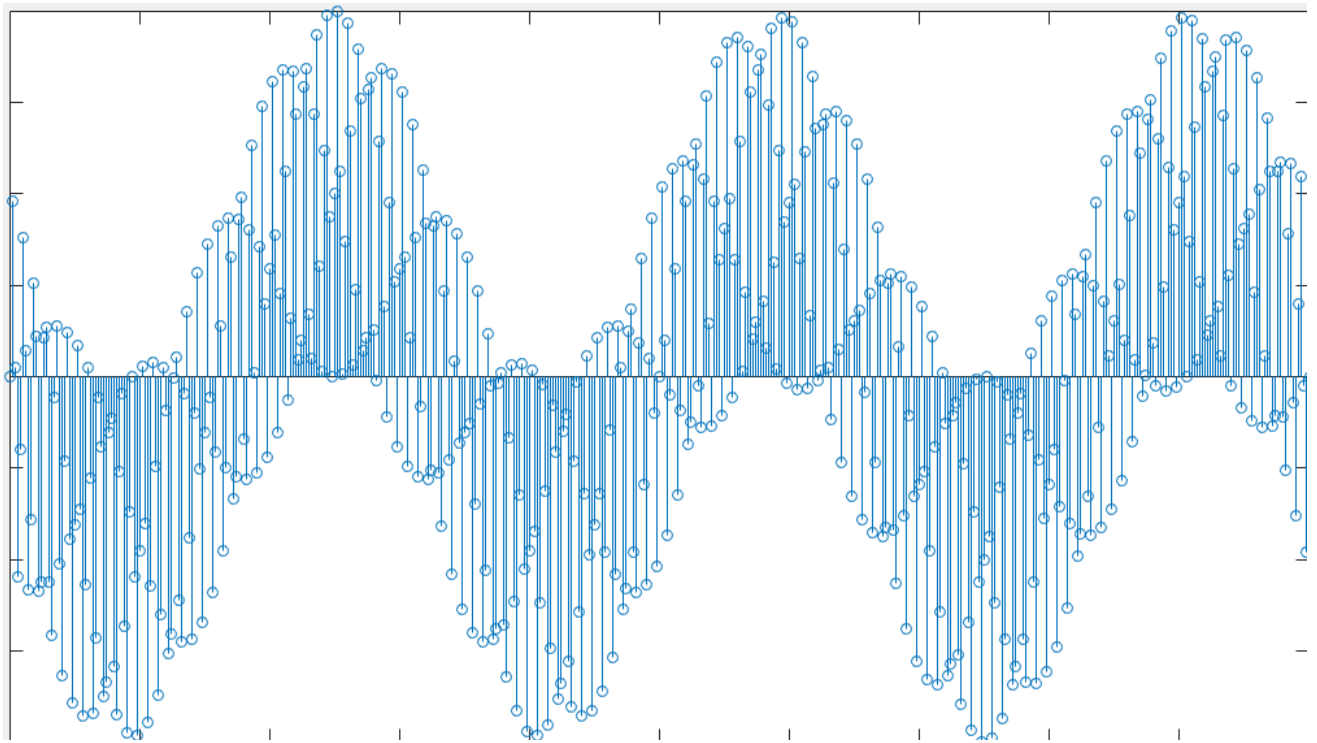


Рис. 2.8. Дискретизований сигнал

За допомогою програми Matlab можна переглянути сигнал, який надходить до фільтру, з несучою частотою 580 Гц і частотою модуляції 12 Гц. А також дискретизований сигнал.

Тож для програми Matlab код для створення смугового фільтру з заданими параметрами буде мати вигляд:

```
function Hd = filtr1
%FILTR1 Returns a discrete-time filter object.

% Equiripple Bandpass filter designed using the FIRPM function.

% All frequency values are in Hz.
Fs = 15000; % Sampling Frequency

Fstop1 = 560;      % First Stopband Frequency
Fpass1 = 568;     % First Passband Frequency
Fpass2 = 592;     % Second Passband Frequency
Fstop2 = 600;     % Second Stopband Frequency
Dstop1 = 0.001;   % First Stopband Attenuation
Dpass  = 0.057501127785; % Passband Ripple
Dstop2 = 0.0001;  % Second Stopband Attenuation
dens   = 20;      % Density Factor

% Calculate the order from the parameters using FIRPMORD.
[N, Fo, Ao, W] = firpmord([Fstop1 Fpass1 Fpass2 Fstop2]/(Fs/2), [0 1 ...
    0], [Dstop1 Dpass Dstop2]);

% Calculate the coefficients using the FIRPM function.
b = firpm(N, Fo, Ao, W, {dens});
Hd = dsp.FIRFilter( ... 'Numerator', b);
```

Згенерувавши смуговий фільтр, ми отримаємо амплітудно-частотну та фазово-частотну характеристики які матимуть вигляд представлений на рис. 2.9. На них чітко можна побачити зміни при частоті 580 Гц, відображені як на АЧХ так і на ФЧХ.

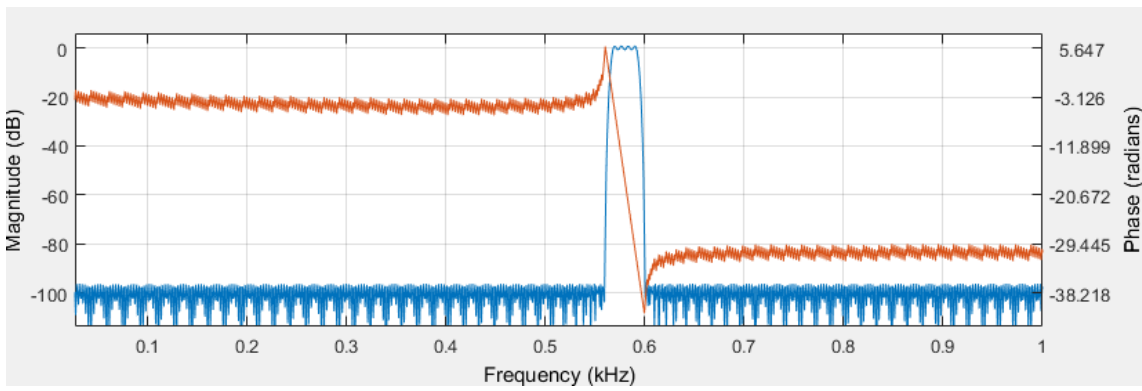


Рис. 2.9. АЧХ та ФЧХ смугового фільтру

3. Розробка цифрового приймача тональних рейкових кіл на базі цифрового сигнального процесора

3.1 Розробка структурної та принципової схем приймача ТРК на базі цифрового сигнального процесора

Для початку необхідно створити структурну схему згідно якої відбуватиметься побудова цифрового приймача ТРК. Розробка відбуватиметься на базі цифрового сигнального процесора розробленого компанією Microchip, dsPIC30F1010, який випускається з вбудованим АЦП. Сама ж структурна схема зображена на рисунку 3.1.

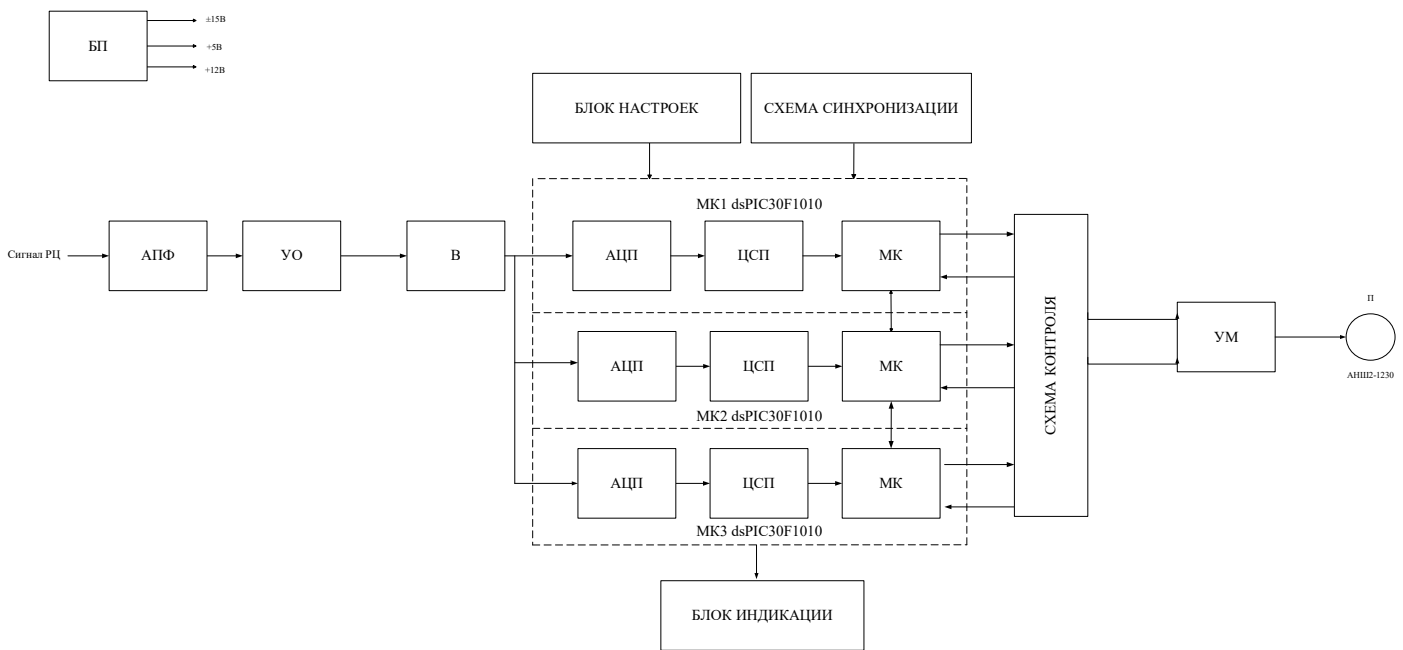


Рис. 3.1. Структурна схема приймача ТРК за бази ЦСП

Основними функціональними вузлами приймача є:

- активний смуговий фільтр (АПФ), за допомогою якого відбувається обмеження смуги частот сигналу і запобігає появі частот накладання, які можуть виникнути при дискретизації;

- підсилювач-обмежувач (УО) зменшує вхідну напругу, захищаючи подальші ланки кола від перенапруги;
- випрямляч (В) прибирає від'ємну напівхвилю сигналу, оскільки АЦП працює тільки в однополярному діапазоні 0..5 В;
- аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), який вбудований до корпусу dsPIC30F1010 перетворює отриманий однополярний сигнал у 10-розрядний цифровий код;
- цифровий сигнальний процесор(ЦСП) виконує обробку інформації;
- мікроконтролер (МК) визначає стан рейкового кола і формує сигнал на вихід;
- Схема контролю перевіряє правильність отриманого сигналу від ЦСП;
- підсилювач потужності (УМ) узгоджує сигнал, отриманий з схеми контролю з колійним реле;
- колійне реле (П) зображує остаточний результат;
- схема синхронізації задає частоту ЦСП dsPIC30F1010, при цьому для кожного каналу під'єднується особиста схема синхронізації;
- блок налаштувань використовується для задання типу приймача, і складається з набору механічних ключів;
- блок індикації використовується для відображення стану колійного приймача.

Для збільшення надійності у даному приймачі використовується три канали для обробки інформації з одночасною перевіркою одне одного. Стан ключів для блоку налаштувань приведено в таблиці 3.1.

На рис. 3.2 представлена принципова схема приймача ТРК на базі цифрового сигнального процесора. Сигнал з рейкового кола через трансформатор Tr1 приходить на смуговий фільтр. Трансформатор виконує функцію гальванічної розв'язки колійного приймача від рейкового кола, а також допомагає в узгодженні опорів з релейним кінцем ТРК. Стабілітрони VD1 і VD2 виконують захисну функцію для первинної обмотки трансформатора, обмежуючи напругу на позначці в 5.6 В.

Таблиця 3.1 — Відповідність ключів блоку налаштувань до типу приймача

Стан ключів				Тип приймача
SA1	SA2	SA3	SA4	
0	0	0	0	8 Гц (420 Гц)
0	0	0	1	12 Гц (420 Гц)
0	0	1	0	8 Гц (480 Гц)
0	0	1	1	12 Гц (480 Гц)
0	1	0	0	8 Гц (580 Гц)
0	1	0	1	12 Гц (580 Гц)
0	1	1	0	8 Гц (720 Гц)
0	1	1	1	12 Гц (720 Гц)
1	0	0	0	8 Гц (780 Гц)
1	0	0	1	12 Гц (780 Гц)
1	0	1	0	8 Гц (4545 Гц)
1	0	1	1	12 Гц (4545 Гц)
1	1	0	0	8 Гц (5000 Гц)
1	1	0	1	12 Гц (5000 Гц)
1	1	1	0	8 Гц (5555 Гц)
1	1	1	1	12 Гц (5555 Гц)

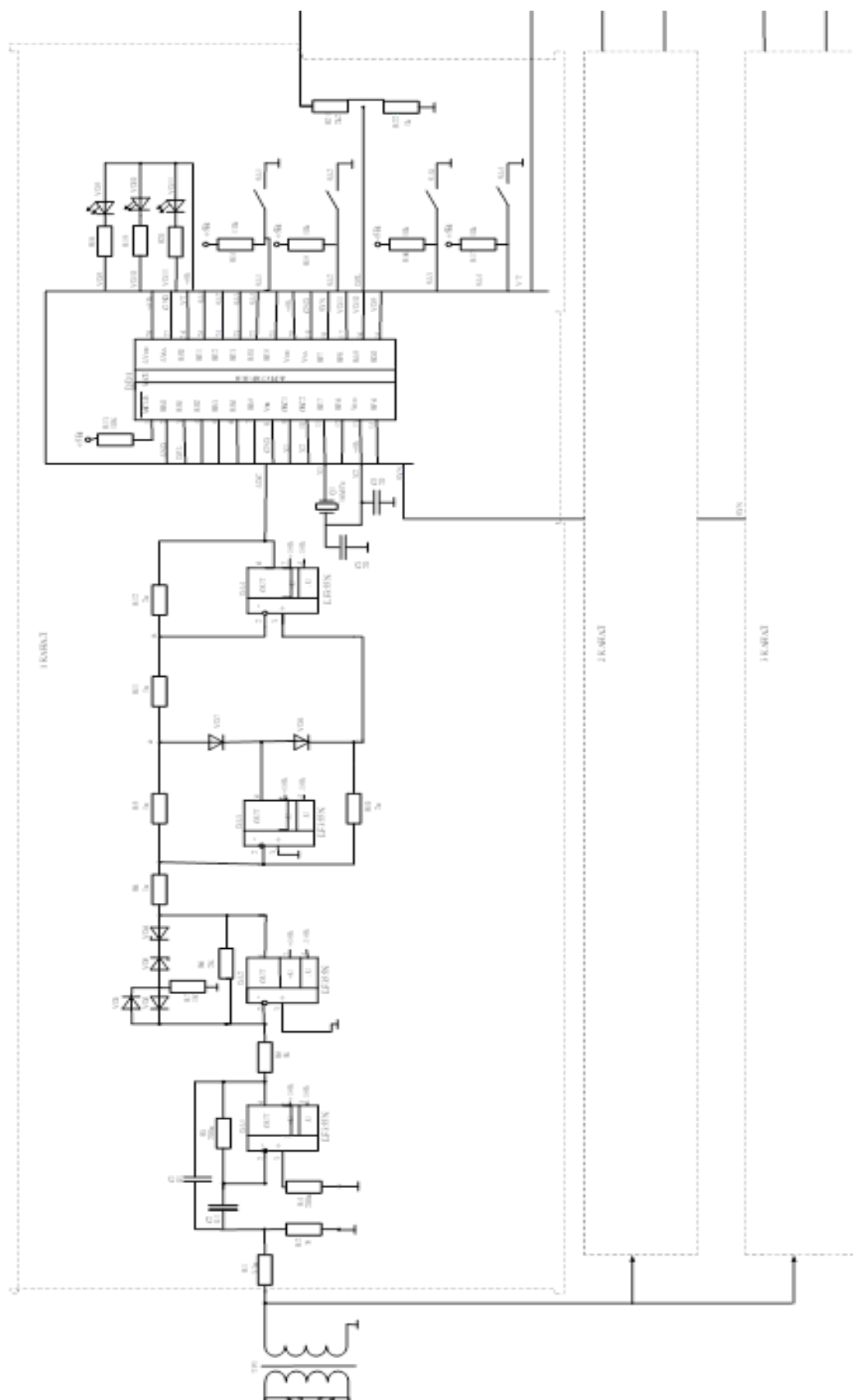


Рис. 3.2. Принципова схема колійного приймача

Смуговий фільтр виділяє необхідний для обробки сигнал. За необхідності точного налаштування цифрових фільтрів використовують позитивний зворотній зв'язок. Проте в даному випадку ми використаємо паралельний зворотній зв'язок. Опір R2 використовується для встановлення необхідного коефіцієнту підсилення у смузі пропускання.

Розрахунок схеми смугового фільтру з паралельним зворотнім зв'язком:

1. Спершу необхідно обрати частоти для обчислення. Тож як і в другому розділі обираємо несучу частоту — 580 Гц і частоту модуляції — 12 Гц. Отримаємо $f_1 = 568$ Гц і $f_2 = 592$ Гц. Для підсилювача на цих частотах має виконуватись умова $A > 2Q^2$, де Q — обчислюємо по обраних значеннях f_1 і f_2 .

2. Виконаємо розрахунок f_0 і Q за формулами

$$f_0 = \sqrt{f_1 * f_2} \quad (3.1)$$

$$Q = f_0 / (f_2 - f_1) \quad (3.2)$$

Обчисливши формули отримаємо $f_0 = \sqrt{568 * 592} = 580$ Гц і $Q = 580 / (592 - 568) = 24$.

3. Для визначення коефіцієнта посилення у смузі пропускання необхідно перевірити умову $Q < 15$, якщо умова виконується, то $K_n < 2Q^2$. При невиконанні умови $K_n = Q$, отже обираємо $K_n = 24$.

4. Для розрахунку опорів оберемо ємності $C_1 = C_2 = C = 0,1$ мкФ і виконаємо обчислення за формулами:

$$R_1 = \frac{Q}{2 * \pi * f_0 * C * K_n} \quad (3.3)$$

$$R_2 = \frac{Q}{2 * \pi * f_0 * C * (2Q^2 - K_n)} \quad (3.4)$$

$$R_3 = \frac{2 * Q}{2 * \pi * f_0 * C} \quad (3.5)$$

Виконавши обчислення отримаємо $R_1 = 24 / (2 * 3.14 * 580 * 0.1 * 10^{-6} * 24) = 2744$ Ом, $R_2 = 24 / (2 * 3.14 * 580 * 0.1 * 10^{-6} * (2 * 24^2 - 24)) = 58$ Ом, $R_3 = 48 / (2 * 3.14 * 580 * 0.1 * 10^{-6}) = 132$ кОм. Згідно з таблицею номіналів оберемо опори $R_1 = 2.7$ кОм $R_2 = 56$ Ом $R_3 = 120$ кОм.

5. Для перевірки величини K_n перерахуємо її за формулою:

$$K_n = \frac{R_3}{2R_1} \quad (3.6)$$

Обчислимо $K_n = 132 / (2 * 2.7) = 24$.

Задля налаштування схеми з паралельним зворотнім зв'язком використаємо обчислені опори R_1 і R_2 , а також обрані ємності C_1 і C_2 для встановлення частоти f_0 ; далі за допомогою відношення R_3/R_1 встановимо Q , при цьому повинна виконуватись умова, що $R_3 * R_1 = \text{const}$; коефіцієнт підсилення у смузі пропускання регулюється зміною опору R_2 .

Після цього сигнал поступає на обмежувач-підсилювач. Їх завдання полягає у захисті кіл від підвищеної напруги, тобто на виході з'являється зменшена напруга, значення якої не буде перевищувати певної величини. Безпосередньо обмеження відбувається за допомогою стабілітронів чи звичайних діодів. Струм на виході операційного підсилювача є максимальним, тому він має витримувати струм короткого замикання протягом необмеженого часу та за максимальної температури його роботи. При занадто високому впливі струмів витоку стабілітрона чи діода, то є можливість скористатись схемою, в якій струм витоку проходить через резистор на землю, замість точки підсумовування струмів. Цей резистор відокремлюється від інвертуючого входу операційного підсилювача зустрічно ввімкнутими діодами. Опір резистора має бути достатньо малим щоб струм йшов на землю через нього а не через діоди, для цього падіння напруги на резисторі повинно бути меншим за напругу відкриття діодів. При цьому опір не повинен бути занадто малим, бо в режимі обмеження вихідний струм занадто виросте. В основному його опір обирають в межах від 0.1 до 1 кОм. Діоди ж необхідно обирати з малим струмом витоку.

Після обмежувача струм поступає на випрямляч, який забезпечує сигнал на виході аналогічній величині на вході, але без втрат напруги які можуть виникати при підключенні діода. Даний випрямляч можна використовувати навіть з напругами

мілівольтного діапазону. Вплив падіння напруги через діоди зменшується, завдяки їх підключенню у колі зворотного зв'язку підсилювача.

Подібні випрямлячі використовують у вольтметрах змінного струму, для вимірювання потужності в інших вимірювальних схемах. Також їх використовують при демодуляції амплітудно-модульованих коливань з відносно низькою несучою частотою.

Розглянемо роботу цієї схеми. Для початку необхідно щоб $R_8=R_9=R_{10}=R_{11}=R_{12}$. При зростанні напруги на вході операційного підсилювача на виході зростає напруга від'ємного значення. Діоди VD7 і VD8 отримують зсув у прямому і зворотному напрямках відповідно. Так як неінвертований вхід DA4 приєднаний до інвертованого входу DA3 через резистор, то DA4 стає інвертуючим підсилювачем з коефіцієнтом підсилення -1. Значення напруги на виході відносно напруги на вході при цьому не змінюється. Проте якщо на вході напруга від'ємного значення і зростає по абсолютній величині, то на виході отримаємо позитивну напругу аналогічної амплітуди. При цьому діоди VD7 і VD8 будуть отримувати зсув вже у зворотному і прямому напрямках відповідно. Підсилювач DA4 стає неінвертуючим, так як його інвертуючий вхід приєднаний через резистори до потенційно заземленого входу DA3. Відтепер значення коефіцієнта розраховується згідно з формулою:

$$K_{DA4} = 1 + \frac{R_{12}}{R_9 + R_{11}} \quad (3.7)$$

Так як усі резистори мають однаковий опір, то коефіцієнт підсилення дорівнює 1.5. При цьому для інвертуючого підсилювача DA3 коефіцієнт підсилення перестає дорівнювати одиниці, так як весь струм відтепер протікає через резистори R8 і R10. Відтепер DA3 можна розглядати як суматор з двома виводами вхідного сигналу, або як інвертуючий підсилювач. Оскільки опір резисторів рівний, то $R_8 + R_{11} = 2R_{10}$. Отже третина вхідного струму протікає через резистори R9 і R11 та дві третини через резистор R10. В такому випадку коефіцієнт підсилення на підсилювачі DA3 розраховується згідно з формулою:

$$K_{DA3} = [(R_9 + R_{11}) || R_{10}] / R_8 \quad (3.8)$$

Розрахувавши, отримаємо $K_{DA3}=2/3$. Загальний коефіцієнт підсилення при негативній вхідній напрузі розраховуватиметься за формулою:

$$K_{\text{заг}} = K_{DA3} \times K_{DA4} \quad (3.9)$$

Виконавши обчислення отримаємо $K_{\text{заг}}=(2/3)*(3/2)=1$. Отже загальний коефіцієнт підсилення схеми при однакових резисторах дорівнює одиниці. Проте якщо опори резисторів R10 і R12 вдвічі більші за R8, R9 та R11, то загальний коефіцієнт підсилення стане дорівнювати 2.

Наша схема використовує фільтр Бесселя. Його параметри визначаються завдяки значенням пасивних елементів R11, R12, R13, R14, C5, C6. Для розрахунку фільтру обираємо частоту зрізу $F_c=10$ кГц, тоді коефіцієнти фільтру дорівнюватимуть $k_1 = 0,1251$ та $k_2 = 0,268$. Для опору R11 приймаємо значення 10 кОм, а для ємностей C5 та C6 0,1мкФ. Тоді розрахуємо значення решти елементів:

$$R13 = R14 = \frac{k_1}{C5 \times F_c} \quad (3.10)$$

$$R12 = R11 \times k_2 \quad (3.11)$$

Виконавши обчислення отримаємо $R13=R14=1.2$ кОм $R12= 2.7$ кОм.

Після цього сигнал поступає на аналогово-цифровий перетворювач, який його квантує по амплітуді та дискретизує за часом. Перетворений сигнал надходить до цифрового сигнального процесора на якому відбувається фільтрація сигналу. Відфільтрований сигнал поступає на мікроконтролер в якому відбувається обробка та порівняння даного сигналу. Завдяки схемі контролю відбувається перевірка правильності функціонування приймача, а приймач контролює стан рейкового кола.

3.1.1 Розгляд мікроконтролера з цифровим сигнальним процесором dsPIC

З 2004 року компанією Microchip відбувається випуск нового сімейства шістнадцяти розрядних Flash мікроконтролерів які мають підтримку команд для цифрової обробки сигналів dsPIC30F. Завдяки високій швидкодії до 30 мільйонів

операцій в секунду та ефективній системі команд цей мікроконтролер є актуальним в складних системах нашого часу.

Цими контролерами об'єднуються високі математичні потужності «чистих» цифрових процесорів для обробки сигналів і визначена поведінка стандартних мікроконтролерів. Даний мікроконтролер має безліч функціональних можливостей які реалізовані на одному кристалі, що дозволяє розробникам створювати надійні вироби для вимірювань та управління в доволі маленьких масштабах.

Завдяки вивченню можливостей мікроконтролера dsPIC вийде дізнатись склад мікросхеми і дозволяє зрозуміти причини реалізації розробниками саме такого набору засобів. При розгляданні цифрового контролера найбільш важливими аспектами є:

- архітектура обробки даних;
- математичні уявлення та операції, які може підтримувати мікросхема;
- допоміжні засоби, які реалізовані на кристалі.

Повне розуміння цих компонентів є основою для створення надійних та ефективних систем при застосуванні dsPIC.

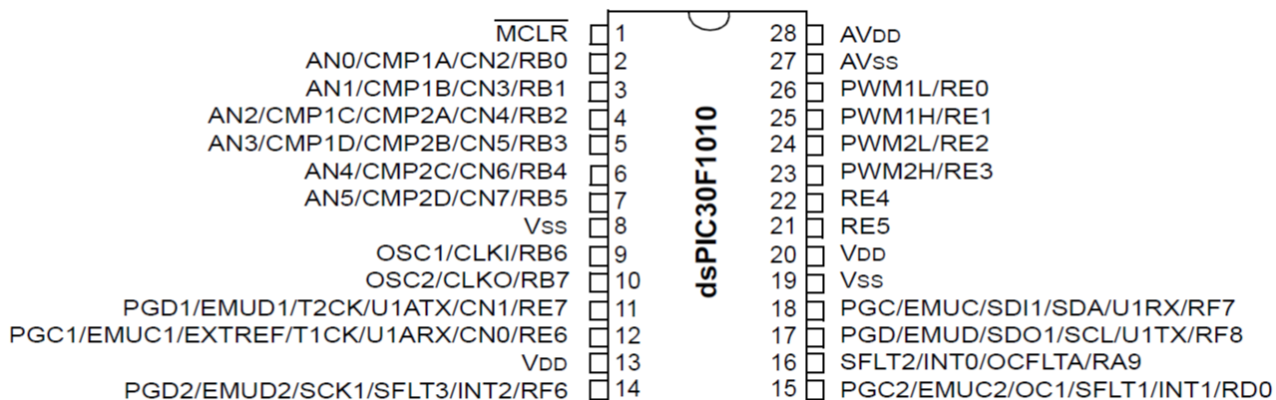


Рис. 3.3. Розташування виводів dsPIC30F1010 у корпусі SDIP-28

Мікропроцесор dsPIC складається з двох споріднених сімейств мікросхем з безліччю конфігурацій, тому не є доречним називати його в однині. Також така різноманітність дає можливість розробнику підібрати таку комбінацію периферійних

пристроїв, яка найкраще підходить до необхідної конкретної задачі. Через це в нашому проекті застосовується мікросхема dsPIC30F1010, через те що вона найкраще відповідає необхідним параметрам для приймача ТРК. Схематичне зображення виводів наведено на рисунку 3.3 та 3.4. Основні параметри наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 — Основні параметри dsPIC30F1010

Ядро	dsPIC30
Частота, МГц	від 0,512 до 14,55
Пам'ять: Flash, кБ	6
Пам'ять: RAM,Б	256
Кількість виводів, шт.	28
I/O (макс.),шт.	21
Таймери: 16-бит,шт.	2
Таймери: Каналів ШИМ, шт.	2
Таймери: RTC	ні
Інтерфейси: UART, шт.	1
Інтерфейси: SPI, шт.	1
Інтерфейси: I ² C, шт.	1
Аналогові входи: Розрядність АЦП, біт	10
Аналогові входи: Канали АЦП, шт.	6
Аналогові входи: Швидкодія АЦП, Квиб/с	2000
Аналогові входи: Аналоговий компаратор, шт.	2
V _{CC} , В	від 3 до 5,5
I _{CC} , мА	22
T _A , °C	від -40 до 125
Види корпусу	<u>SOIC-28</u> SDIP-28 QFN-28

Незважаючи на невелику кількість представленої інформації, компанією Microchip надається повний зміст матеріалів щодо їх мікроконтролерів. Основним документом є — «Технічний опис dsPIC30F1010/202X», та окрім нього ще є безліч приміток до застосування такі як: «AN887 — Основи асинхронного двигуна змінного струму», «AN908 — Використання dsPIC30F/dsPIC33F для векторного керування АСІМ», «AN1017 — Синусоїдне керування двигунами PMSM за допомогою dsPIC30F / dsPIC33F / dsPIC33E DSC» та багато інших. Отже окрім основного мікропроцесора компанія Microchip надає й методики його застосування необхідний під поставлену перед розробником задачу.

Ядро dsPIC30F побудовано згідно шістнадцяти розрядної модифікованої Гарвардської архітектури, яка містить в собі розширену систему команд, до яких входять специфічні команди підтримки цифрової обробки сигналів(DSP). Інструкції цього ж ядра двадцяти чотирьох розрядні і виконуються протягом одного машинного циклу (чотири періоди тактової частоти), окрім команд ділення, переходів, пересилання даних з регістра в регістр, а також табличних команд. Завдяки розрядності програмного лічильника на процесорі можна адресувати до 4М слів програмної пам'яті. Також в ядро включена апаратна підтримка циклів типу DO і REPEAT, на виконання яких не витрачається додаткова пам'ять і час на аналіз умов закінчення. При цьому ж ці цикли можуть бути перервані заздалегідь обумовленими подіями переривання в будь-який момент. Кількість робочих регістрів дорівнює шістнадцяти (W0...W15), і кожен регістр масиву може виступати як адреса, зсув адреси чи дані. Проте один з регістрів(W15) виконує функції програмного покажчика стека для викликів підпрограм та переривань.

Ядро dsPIC30F має 2 класи команд:

- мікроконтролерні інструкції (DCU);
- команди ЦОС (DSP).

Обидва ці класи однаково вбудовані в архітектуру процесора і обробка виконується одним ядром. У даному типі мікроконтролерів підтримується адресація різних типів, а система команд оптимізована таким чином, щоб отримати максимальну ефективність при написанні коду мовою високого програмування Сі.

В цілому dsPIC30F діляться на три сімейства:

- мікроконтролери загального призначення;
- мікроконтролери для систем керування приводом;
- мікроконтролери для обробки сигналів датчиків.

3.1.2. Архітектура мікроконтролера dsPIC

Мікроконтролери dsPIC розроблені спеціально для виконання операцій на високій швидкості з інтенсивними математичними обчисленнями, та містять в собі спеціалізовані апаратні елементи, за допомогою яких відбувається керування інтенсивними за часом процесами максимально зменшивши навантаження на ядро процесора. Рівно як в механічному двигуні всі процеси мають працювати злагоджено та по заздалегідь визначеному алгоритму, так і всі елементи мікроконтролера мають координуватись між собою, в іншому випадку розробнику не вдасться використати весь закладений в мікроконтролер потенціал. Для створення найкращого функціонування необхідно досконально розуміти архітектуру мікросхеми та компоненти що входять до складу її елементів.

Краще всього починати вивчення архітектури мікропроцесора dsPIC з архітектури пам'яті, так як це — один з найважливіших елементів від якого залежить пропускна спроможність, і його розробка була спеціалізована під системи цифрової обробки сигналів. Як зазначалось раніше, dsPIC побудований за модифікованою гарвардською архітектурою, в якій передбачено роздільні шини для пам'яті програм та пам'яті даних, що дозволяє процесору робити одночасну вибірку даних і команд під ці дані.

В звичайній гарвардській архітектурі ці шини повністю розділені, що робить неможливий обмін даними між ними. Не дивлячись на те, що архітектура цілком логічна при виконанні певних завдань її використання не є доцільним, оскільки відбувається витяг за один цикл одного значення даних. В нашому випадку необхідно за один цикл витягувати два значення даних, значення коефіцієнту та значення вибірки, яка множиться на цей коефіцієнт. Для стандартної гарвардської архітектури на це потрібно два машинних циклу. На подолання цього обмеження в модифікованій гарвардській архітектурі використовується окрім стандартних шин пам'яті програм та пам'яті даних ще одну шину для пам'яті даних. Ці шини даних ще називають шинами X та Y. Така методика дозволяє реалізувати справжню одноциклову операцію, що дозволяє вдвічі збільшити пропускну спроможність системи в порівнянні зі звичайною гарвардською архітектурою при тій самій тактовій частоті.

Завдяки об'єднанню в dsPIC обчислювальної потужності цифрових процесорів сигналів при детермінованій поведінці мікропроцесора, стає можливим застосовувати необхідну структуру пам'яті, яка найкраще підходить до необхідного типу команд. Команди, яким потрібно декілька джерел даних для обчислення отримують перевагу при використанні декількох шин даних, в той час як інші команди розглядають процесор який має єдиний простір даних.

Також варто виділити те, що в ЦКШ не реалізований певний аспект, який є розповсюдженим у звичайних ЦПЗ та інших мікропроцесорах з високою продуктивністю, а саме багатоступенева конвеєрна обробка команд. Суть цього конвеєра полягає в забезпеченні для процесора внутрішню чергу команд, які могли б заздалегідь декодуватись для прискорення виконання. Не дивлячись на те, що такий підхід доволі часто використовується в різних прикладних областях, в яких є необхідність безперервної обробки даних без переривань, конвеєризація може зменшити пропускну здатність процесору при частій зміні ходу обробки сигналу, в цілому це відбувається в тих системах, коли їх робота заснована на перериваннях. При зміні послідовності

обробки даних черга конвеєру звільняється і заново наповнюється актуальними командами.

Незважаючи на те, що мікроконтролеру dsPIC бракує багатоступінчатого конвеєра, в ньому передбачений механізм одноступінчастої вибірки команд, за допомогою якого відбувається зчитування і часткове декодування команди за один цикл до моменту їх виконання. Саме завдяки цьому мікропроцесор може виконувати більшість команд за один цикл, що дозволяє покращити визначені часові характеристики системи.

Пам'ять даних в мікроконтролері dsPIC ділиться на три області:

- реєстри спеціального призначення;
- статичне ОЗУ;
- пам'ять програм.

Відображені в пам'яті реєстри використовуються контролером для конфігурації, відстеження та управління різними аспектами своєї роботи. Ці реєстри спеціального призначення знаходяться у діапазоні 2 кБ молодших адрес. Стандартні елементи пам'яті даних використовуються в якості сховищ загального призначення. На відміну від них реєстри спеціального призначення аналізують свій вміст порозрядно. Це означає, що запис даних до реєстрів спеціального призначення, а інколи і читання з деяких, викликає певні дії в ЦКШ.

Необхідно бути вкрай обережним при роботі з реєстрами спеціального призначення, так як читання будь-якого з цих реєстрів та запис до них має вплив на роботу апаратної частини мікроконтролера dsPIC та може призвести до несподіваних наслідків.

При цьому використання статичного ОЗУ не впливає на роботу dsPIC, а тільки на інформацію, яка зберігається у відповідних осередках. Тобто вплив на апаратну частину повністю відсутній.

Використовуючи деякі алгоритми, особливо ті, які необхідні при цифровій обробці сигналів, дуже часто необхідно використовувати множення щодо фіксованих компонентів з даними змінних. Враховуючи те, що коефіцієнти залишаються незмінними можна було б зберегти ці значення в пам'яті програм, не займаючи дорогоцінне місце у пам'яті статичного ОЗУ, проте необхідно залишити частину пам'яті програм для апаратних засобів обробки даних.

При використанні будь-якої системи з цифровою обробкою сигналу початок відбувається з того моменту, коли аналоговий сигнал на вході оцифрується за допомогою аналогово-цифрового перетворювача. Також контролер dsPIC підтримує декілька методів оцифрування сигналу:

- використання вбудованого багатоканального АЦП;
- з використанням зовнішнього аудіокодека, дані з якого підключаються через інтерфейс перетворювача даних DCI (Data Converter Interface), який є частиною dsPIC;
- за допомогою зовнішнього АЦП, яким можна керувати через порт інтерфейсу SPI (Serial Peripheral Interface), або завдяки інтерфейсу I2C (Inter-Integrated Circuit).

3.2 Особливості та принцип роботи dsPIC30F1010

Мікроконтролер dsPIC30F1010 містить в собі високошвидкісний модулятор для ШІМ (Широтно-Імпульсна Модуляція/Pulse-Width Modulation) з роздільною здатністю в 1 нс, що дає пропускну спроможність у 2 Мвб/с, а також 10-бітний аналогово-цифровий перетворювач для швидкого і точного контролю. Така мікросхема використовується при задачах аналогового контролю для комунікацій, встановлення черги подачі живлення і забезпечення плавного старту в інтелектуальних блоках живлення, даючи можливість розробнику контролювати весь шлях перетворення енергії в апаратурі. Такий контроль

можливий завдяки поєднанню якості програмного забезпечення та вбудованим продуктивним периферійним модулям. А також значну роль відіграють функції, які можуть вмикати автоматичне калібрування, температурну компенсацію, а також забезпечувати підвищену щільність потужності і більшу економічну ефективність з підтримкою введення відмінностей до апаратури використовуючи програмне забезпечення. Якщо розглянути приклади використання даної мікросхеми, в яких переваги щодо ціни і функцій, що вона виконує найбільш виражені, то можна помітити що використовується джерело живлення з декількома виходами, добре скоординована робота на одне навантаження, містить підтримку гарячого включення, використовується спільна робота декількох виходів, має вбудовану корекцію коефіцієнту потужності і впевнену обробку аварійних ситуацій. Гарними прикладами, в яких застосовується передова периферія даної мікросхеми слугує цифрове керування освітленням та задне підсвічування РКІ великого розміру.

Модуль широтно-імпульсної модуляції, який вбудований до даної мікросхеми має сім режимів роботи, включаючи стандартний компліментарний, режим зі змінною фазою і протифазний. Щем цей модуль забезпечує регулювання шаруватості імпульсів з роздільною здатністю в 1 нс. Десяти бітний аналогово-цифровий перетворювач може мати до дванадцяти каналів для входу, забезпечуючи швидкодію до 2 Мвиб/с. Функції для поліпшеного керування вибірками включають одночасне або індивідуальне управління для кожного з чотирьох пристроїв вибірки та зберігання. Мікроконтролер dsPIC30F1010 містить у собі 6 кБ пам'яті типу Flash і два генератора з широтно-імпульсною модуляцією.

Випускаються dsPIC30F1010 в одному з трьох корпусів: SOIC, SDIP і QFN, та мають 28 виводів. Спеціалізований ШІМ-контролер підтримує сім різних режимів роботи:

- стандартний однотоктний режим;
- комплементарний однотоктний режим;

- двотактний режим;
- багатофазний режим;
- режим зі змінною фазою;
- режим управління скважністю;
- режим частотного управління.

В якості середовища для розробки програмного забезпечення для dsPIC30F1010 можна використовувати MPLAB IDE, C-компілятором MPLAB C30 або внутрішньо схемними відладчиками MPLAB ICD2 і MPLAB ICE. При початковому ознайомленні та для швидкого освоєння реалізації імпульсних джерел живлення, побудованих на основі SMPS-мікроконтролерів, пропонується відносно недорогий комплект налагодження dsPICEM™ SMPS. До даного комплекту входять: мікроконтролер dsPIC2020; два незалежних DC/DC перетворювача (робота в асинхронному та синхронному режимах) малої потужності; вузол для імітації динамічно змінюваного навантаження (при дослідженні перехідної характеристики перетворювача); змінний резистор і кнопки (для налаштування рівня вихідної напруги, стартового струму і режимів роботи перетворювача).

Висновки

Протягом дипломної роботи проводилась розробка цифрового приймача сигналів тональних рейкових кіл з використанням методів цифрової обробки сигналів. Основою для ТРК покладено рейкове коло без використання ізолюючих стиків на живильному та приймальному кінцях. Загалом у тональних рейкових колах використовується амплітудно-модульований сигнал з частотами модуляції 8 Гц та 12 Гц, і несучими частотами 420, 480, 580, 720, 780 Гц для третього покоління ТРК, а також 4545, 5000, 5555 Гц для четвертого покоління ТРК. Це дозволяє підвищити надійність системи і захистити пристрої приймального кінця від впливу перешкод зумовлених тяговим струмом та іншими джерелами.

Для розробки цифрового смугового фільтру під необхідні частоти тональних рейкових кіл був використаний математичний пакет MATLAB, та як додаток до нього програму Simulink у якій і відбувалось безпосереднє моделювання цифрового фільтру. Також були представлені графіки спектральної щільності потужності, амплітудно-частотної та фазо-частотної характеристики сигналу.

Використання методів цифрової обробки сигналу дозволяє замінити ненадійні пасивні елементи на інтегральні мікросхеми цифрової логіки. Це означає, що підвищується надійність системи, тому що краще перетворити вхідний аналоговий сигнал цифровий, який можна обробити за допомогою процесора. Окрім цього зменшуються габаритні розміри і вартість.

З моменту винайдення цифрових фільтрів розпочався їхнє активне впровадження на заміну аналоговим, і наш час не є виключенням. В основному робота цифрових фільтрів забезпечується завдяки програмним засобам, що робить їх значно гнучкішими в застосуванні, при порівнянні з аналоговими.

При побудові приймача для тональних рейкових кіл з використанням методів цифрової обробки сигналів був обраний мікроконтролер dsPIC30F1010. Даний

обчислювальний механізм оснащений вбудованим АЦП та ЦСП. Сімейство мікроконтролерів dsPIC розроблені спеціально для високошвидкісного виконання операцій, які передбачають інтенсивні математичні обчислення, і оснащені спеціальними апаратними елементами для управління інтенсивних, за часом, процесів при цьому викликаючи мінімальне навантаження на процесор.

Вищевказана розробка цифрового приймача є актуальною у наш час завдяки активному впровадженню цифрових систем у суспільне життя, витісняючи застарілі, аналогові. Даний приймач є універсальним, тобто може бути використаний під різні частоти, та має меншу вагу та габарити. Завдяки використанню подібного обладнання також можна зменшити енергоспоживання. Даний приймач розроблений спеціально для використання на тональних рейкових колах, які в наш час мають найбільшу надійність та ряд особливостей, які вносять позитивний ефект у порівнянні з стиковими рейковими колами. Завдяки відсутності ізолюючих стиків забезпечується надійна електрична безперервність ланцюгів повернення тягового струму, зменшується кількість дросель-трансформаторів і знижуються втрати електроенергії на тягу поїздів. Тож ТРЦ відповідають умовам електромагнітної сумісності як для рухомих складів які знаходяться в експлуатації, так і для перспективних електрорухомих складів, як в Україні так і за кордоном.

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. Хеммінг Р. В. Цифрові фільтри [Текст]: пер. с англ./під ред. В.И. Ермишина А. М. Трахтмана: Москва, 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. Соловійова. - 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 доступу: <https://studfiles.net/preview/6339445/>
15. Практичний посібник з технічного утримання апаратури тональних рейкових кіл[Текст]: Кулик П. Д., О. О. Удовіков, В. І. Басов: Київ 2006 – 232 с.