

Вінницький національний технічний університет
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
Кафедра телекомунікаційних систем та телебачення

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем «магістр»

на тему:

РОЗРОБКА СВІП-ГЕНЕРАТОРА МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ХВИЛЬ
НА ОСНОВІ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА
08-34.МКР.011.00.000 ПЗ

Виконав: студент 2-го курсу,
групи АРЗ-18м
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

_____Щепанівський В.Ю.

Керівник: к.т.н., доцент каф. ТКСТБ

_____Кононов С.П.

« ____ » _____ 2019 р.

Рецензент: к.т.н., доцент каф. БМІ

_____Тимчик С.В.

« ____ » _____ 2019 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
Кафедра телекомунікаційних систем та телебачення
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Галузь знань 17– Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітня програма Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТКСТБ
к.т.н., професор Г.Г. Бортник

“ ___ ” _____ 2019 року

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Щепанівському Віталію Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача

керівник роботи Кононов Сергій Павлович, канд. техн. наук, доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “02” 10 2019 року № 254

2. Строк подання студентом роботи 02 грудня 2019 року

3. Вихідні дані до роботи 1) діапазон частот — 30 – 50 ГГц; 2) мінімальна смуга хитання – 100 МГц; 3) тип модуляції – амплітудна маніпуляція 100 кГц; 4) рівень вихідної напруги на навантаження (75 Ом) – 0 – (-60) дБ; 5) похибка встановлення частоти та смуги хитання – не гірше 0,05%

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Огляд методів вимірювання частотних характеристик та способів реалізації свіп-генераторів; свіп-генератор на основі частотного перетворювача; електричні розрахунки вузлів свіп-генератора, комп'ютерне моделювання, економічна частина, охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

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

Параметри і характеристики елементної бази; Свіп-генератор на основі частотного перетворювача. Структурна електрична схема; Перетворювач частоти на основі квадратора. Структурна електрична схема; Сигнали в частотному перетворювачі на основі квадратора; Формувача міток та керований фільтр. Структурна електрична схема; Свіп-генератор міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача. Структурна електрична схема; Результати комп'ютерного моделювання; Допустимі значення виробничих факторів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Кононов С.П., доцент кафедри ТКСТБ		
Економічна частина	Лесько О.Й. к.е.н. професор ЕПВМ		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Березюк О.В. к.т.н. доц. кафедри БЖДПБ.		

7. Дата видачі завдання 02 вересня 2019 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	06.09.2019р.	
2.	Огляд методів вимірювання частотних характеристик та способів реалізації свіп-генераторів	13.09.2019р.	
3.	Розробка структурної схеми свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача	04.10.2019р.	
4.	Вибір елементної бази свіп-генератора	25.10.2019р.	
5.	Проведення електричних розрахунки вузлів свіп-генератора	08.11.2019р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	15.11.2019р.	
7.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	22.11.2019р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	29.11.2019р.	
9.	Нормоконтроль МКР	02.12.2019р.	
10.	Попередній захист МКР, рецензування МКР	06.12. 2019р.	
11.	Захист МКР ЕК	09.12. 2019р.	

Студент

(підпис)

Щепанівський В.Ю.

Керівник роботи

(підпис)

Кононов С.П.

РЕФЕРАТ

Щепанівський В.Ю. Розробка свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача: магістерська кваліфікаційна робота – Вінниця: ВНТУ 2019р., 118 - стор., 43 – рис., 7 – табл., 23 – бібл. – українською мовою.

В даній магістерській кваліфікаційній роботі проведено розробку свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача, який встановлюється в панорамні вимірювачі характеристик електронного обладнання, зменшить похибку визначення смуги хитання до 0,05% та автоматизує процес встановлення частоти в режимі реального часу.

У роботі було розроблені структурну схеми пристрою. Проведено моделювання у програмі NI Multisim. Результати моделювання дозволили перевірити правильність роботи окремих вузлів свіп-генератора.

ABSTRACT

Shchepanivskiy V.Yu. Development of a sweep generator of millimeter waveband on the basis of the frequency converter: Master's qualification work - Vinnitsa: VNTU 2019, 118 - pages, 43 - fig., 7 - table, 23 - bibl. - in ukrainian.

In this master's qualification, the development of a sweep generator of millimeter waveband on the basis on a frequency converter, which is installed in the panoramic meters of the characteristics of electronic equipment, will reduce the error of determination of the swing band to 0.05% and automates the process of setting the frequency in real time.

In this work the structural scheme of the device was developed. NI Multisim simulation was carried out. The simulation results made it possible to check the correct operation of the individual sweep generator units.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА СПОСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ СВІП-ГЕНЕРАТОРІВ.....	11
1.1 Використання частотних характерографів в телекомунікаціях і радіотехніці.....	11
1.2 Методи вимірювання АЧХ.....	14
1.3 Способи реалізації свіп-генераторів та методи визначення його частоти....	19
2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СВІП-ГЕНЕРАТОРА МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ХВИЛЬ НА ОСНОВІ НА ОСНОВІ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА	28
2.1 Запропонована структурна схема свіп-генератора.....	28
2.2 Вибір елементної бази свіп-генератора.....	33
2.3 Детальна структурна схема.....	40
3 ЕЛЕКТРИЧНІ РОЗРАХУНКИ ВУЗЛІВ СВІП-ГЕНЕРАТОРА.....	42
3.1 Фільтр нижніх частот.....	42
3.2 Опорний генератор.....	48
4 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	59
4.1 Обґрунтування вибору пакету моделюючих програм.....	59
4.2 Моделювання суматора.....	60
4.3 Моделювання фільтру нижніх частот.....	67
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	70
5.1 Технологічний аудит розробленого свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача	70
5.2 Розрахунок витрат на розробку свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача.	75

5.3 Розрахунок економічного ефекту від можливої комерціалізації розробки.....	79
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	86
6.1 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	87
6.2 Технічні рішення щодо промислової та пожежної безпеки під час проведення розробки свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача	92
6.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях	93
ВИСНОВКИ.....	99
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	101
ДОДАТКИ.....	103
Додаток А (обов'язковий). Технічне завдання.....	104
Додаток Б(довідниковий). Параметри і характеристики елементної бази.....	111
Додаток В (обов'язковий). Свіп-генератор на основі частотного перетворювача. Структурна електрична схема.....	112
Додаток Г (обов'язковий). Перетворювач частоти на основі квадратора. Структурна електрична схема	113
Додаток Д (обов'язковий). Сигнали в частотному перетворювачі на основі квадратора.....	114
Додаток Е (обов'язковий). Формувач міток та керований фільтр. Структурна електрична схема	115
Додаток Є (обов'язковий). Свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача. Структурна електрична схема	116
Додаток Ж (обов'язковий). Результати комп'ютерного моделювання	117
Додаток З (довідниковий). Допустимі значення виробничих факторів	118

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АГ – автогенератор

АТ – атенюатор

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

БК – блок керування

ВВД – вузол вводу даних

ВВІ – вузол відображення інформації

ВВЧ – вкрай високі частоти

Д – детектор

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина

З – змішувач

ЗІГ – залізо-ітрієвий гранат

К-компаратор

КВ - квадратор

КФ- керований фільтр

ЛЗХ – лампа зворотної хвилі

МК – мікроконтролер

НВЧ – надвисокі частоти

ОГ – опорний генератор

ОП – операційний підсилювач

ПМ – підсилювач-модулятор

С – суматор

СФ – смуговий фільтр

ФМ – формувач міток

ФНЧ – фільтр нижніх частот

ФЧХ – фазо-частотна характеристика

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

ЧП – частотний перетворювач

ВСТУП

Актуальність теми полягає у тому, що автоматизація вимірювань частотних характеристик є дуже важливою задачею в галузі телекомунікацій, радіомовлення і телебачення. При визначенні параметрів електронних пристроїв і ліній зв'язку важливо знати їх частотні характеристики, знаходження яких є відносно складною операцією. Для спрощення вимірювання частотних характеристик використовують панорамні прилади на основі свіп-генераторів, що сприяє підвищенню точності та швидкості вимірів [1, 3].

З розвитком галузі електроніки стало можливо використовувати мікропроцесорні свіп-генератори, що спрощує роботу та дає змогу частково або повністю автоматизувати процес роботи з приладами. При частковій автоматизації без участі оператора автоматично виконується лише певна частина вимірювань. При повній автоматизації, весь процес вимірювання проходить без участі людини.

Аналіз останніх досліджень показав, що мікропроцесорні прилади отримали широке розповсюдження через їхню багатофункціональність. Перевага таких приладів над традиційними багатофункціональними приладами з жорсткою логікою полягає в тому, що дані пристрої є програмно-керованими і їх функціональні можливості визначаються набором програм, що зберігаються в енергонезалежній пам'яті.

Використання мікропроцесорів дозволяє накопичувати результати проміжних вимірювань, що дає змогу отримати статистичні характеристики досліджуваних процесів або покращити метрологічні характеристики вимірювальних приладів, наприклад, за рахунок виключення систематичних, випадкових або грубих похибок [1].

Використання в свіп-генераторах мікропроцесорів дозволило не тільки розширити функціональні можливості та підвищити точність встановлення частоти, але і створювати на їх основі інформаційно-вимірювальні комплекси. Їх

об'єднують за допомогою спеціальних технічних пристроїв та програмних засобів (інтерфейсів) в єдину систему засоби вимірювання і ЕОМ [3-4].

В якості кращих зразків пристроїв можна привести серійний прилад Р4-МВМ-53 виробництва фірми MWM LAB (Білорусь) [4]. Цей генератор сигналів являється основною складовою частиною автоматизованих вимірювальних систем, які призначені для панорамного відображення і вимірювання як амплітудних, такі і фазових параметрів надвисокочастотних трактів.

Мета та постановка задачі. Метою роботи є розробка свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача, що підвищить температурну стабільність генератора, зменшить похибку визначення смуги хитання до 0,05% та автоматизувати процес встановлення частоти в режимі реального часу.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- аналіз існуючих методів вимірювання частотних характеристик;
- огляд способів реалізації свіп-генераторів;
- розробка структурної схеми свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача;
- розробка електричних схем вузлів свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача;
- виконати електричні розрахунки вузлів свіп-генератора;
- виконати комп'ютерне моделювання вузлів свіп-генератора;
- виконати економічну частину магістерської кваліфікаційної роботи;
- виконати розгляд питань з охорони праці та цивільного захисту.

Об'єктом дослідження є свіп-генератор міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача.

Предметом дослідження є способи реалізації свіп-генераторів з використанням частотного перетворювача.

Методи досліджень базуються на методах аналізу радіотехнічних кіл, методах формування спеціальних опорних та випробувальних сигналів, методах аналогової частотної фільтрації, методі комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

а) вперше запропоновано нове схемне рішення свіп-генератора на основі частотного перетворювача; завдяки введенню частотного перетворювача в свіп-генератор зменшується похибка встановлення мінімальної та максимальної частоти хитання, частотної смуги хитання, що викликані температурною нестабільністю та нелінійністю розгортання частоти свіп-генератора.

б) вперше розроблено структурну схему свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача.

Практичне значення. Практичне значення роботи полягає в тому, що на основі проведених досліджень обґрунтовано та розроблено структуру свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача. Виконано розробку детальної структурної схеми для подальшого його виготовлення.

Результати отримані в процесі виконання даної роботи будуть впроваджені в галузі телекомунікацій в Регіональному Центрі експлуатації телекомунікаційної мережі України

Крім того, результати магістерської кваліфікаційної роботи можна використовувати в навчальному процесі в дисциплінах «Вимірювання в телекомунікаціях», «Системи радіозв'язку, радіомовлення і телебачення».

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи тричі обговорювались на I міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем» СПРН-2019 (14-16 листопада 2019 р., м. Вінниця), ВНТУ (дві доповіді) та міжнародній науково-технічній конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи – 2019» (18-24 листопада 2019 р., м. Київ); КПІ ім. Ігоря Сікорського.

1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА СПОСОБІВ РЕАЛІЗАЦІЇ СВП-ГЕНЕРАТОРІВ

1.1 Використання частотних характерографів в телекомунікаціях і радіотехніці

Для відображення на екрані осцилографа сімейств різних характеристик служать спеціальні пристрої – характерографи. Характерографи – це назва приладів, призначених для спостереження і дослідження характеристик радіоелектронних пристроїв і компонентів; вимірювальна інформація в цих приладах відображається зазвичай на екрані у вигляді кривої або сім'ї кривих. Специфічним їх компонентом є генератор ступінчатої напруги, він створює напругу прямокутної форми, що стрибкоподібно змінює своє значення на початку кожного періоду розгортки досліджуваної характеристики і через певне число m ступенів зростає (або спадає) повертається до початкового рівня. Ступінчата і пилкоподібна напруга, що необхідні для роботи характерографів, можуть створюватися автогенератором. Перевірка і настройка багатьох радіотехнічних пристроїв їх окремих трактів і вузлів прискорюється і полегшується при можливості спостереження на екрані амплітудно-частотних характеристик. Автоматичне формування частотних характеристик забезпечується з допомогою генераторів спеціального типу – свіп-генераторів, що працюють сумісно з осцилографічними індикаторами. Такі генератори являються джерелом напруги постійної амплітуди, частота яких періодично плавно змінюється в потрібній смузі частот. Частота настройки свіп-генератора, відносно якої відбувається хитання частоти, називається центральною. Центральна частота f_c може бути фіксованою або плавно регульованою в деякому робочому діапазоні частот. Смуга хитання свіп-генератора задається в процентах від центральної частоти або частотним інтервалом; в тому випадку якщо вона регулюється, вказують її максимальне і мінімальне значення. Розрізняють свіп-генератори широкосмугові, максимальна смуга хитання яких

досягають 30-60% частоти f_u , вузькосмугові з мінімальною смугою хитання, рівними одиницям або частки відсотку від частоти f_u , і універсальні.

Високочастотні свіп-генератори представляють собою автогенератори типу LC , частота коливань яких хитається в наслідок періодичної зміни індуктивності або ємності коливального контуру. Частотна модуляція в них виконується трьома основними способами: за допомогою реактивного елемента, магнітного модулятора або використанням ємності р-п переходу напівпровідникових приладів.

В якості реактивних елементів в свіп-генераторах використовують електронні лампи або транзистори, внутрішній опір яких при відповідних схемах ввімкнення отримує реактивний характер. Еквівалентний опір такого елемента, що визначає поточну частоту настройки свіп-генератора, регулюється зміною напруги на одному із електродів. Отримана при цьому смуга хитання не перевищує $0,1 f_u$.

Широку смугу хитання, що досягає $(0,6 \div 0,8) f_u$, можна отримати з допомогою магнітних модуляторів. В свіп-генераторах, що працюють на більш високих частотах, магнітний модулятор виконується в вигляді електромагніту між полюсами якого розміщують феритовий сердечник з намотаним на ньому контурною котушкою. Пульсуючий струм, що протікає по обмотці електромагніту, викликає пульсації поля між полюсами, що приводить до синхронних коливань магнітної проникності сердечника і індуктивності контуру котушки.

Свіп-генератори з магнітними модуляторами мають ряд недоліків. Їх модуляційні характеристики не лінійні, а центральні частоти схильні до високого температурного впливу. З підвищення частоти зменшується амплітуда вихідної напруги через зростання втрат, що вносяться в контур генератора колом електромагніту. Оскільки котушки магніту мають велике число витоків, то різноманітні поля створюють наводки, що спричиняють паразитну частотну модуляцію.

Для перекриття великого діапазону частот без розбиття його на піддіапазони вирішується реалізацією свіп-генератора на основі принципу змішування частот. Такий свіп-генератор має два гетеродина – опорний, збуджуючий коливання фіксованої частоти f_1 , і діапазонний, частота коливань якого f_2 може плавно регулюватися в межах від $f_1 + f_{ц.н.}$, до $f_1 + f_{ц.в.}$, де $f_{ц.н.}$ і $f_{ц.в.}$ – відповідно нижня і верхня граничні частоти вибраного діапазону центральних частот. Коливання обох гетеродинів змішуються, детектуються і з допомогою ФНЧ виділяється напруга різності частоти $f_{ц} = f_2 - f_1$. Якщо частота одного з гетеродинів під дією модуляційної напруги хитається в певній смузі, то хитання в смузі тієї ж ширини буде піддаватися і частота результуючих коливань.

Свіп-генератори даного типу дають меншу вихідну напругу при більшому коефіцієнті гармонік і низькій стабільності центральних частот.

Вимірювання частотних характеристик може відбуватися з допомогою пристроїв, що складаються з типового осцилографа і приставки до нього, що містять свіп-генератори і допоміжні пристрої, або спеціальні прилади, що поєднують в спільній схемі і конструкції всі необхідні компоненти. Такі прилади називають вимірювачами амплітудно-частотних характеристик [1].

В промислових свіп-генераторах періоди автоматичного хитання частоти фіксують, вибираючи їх із ряду значень 0,01; 0,02; 0,04; 0,08; 0,1; 1; 10 та 40 с і крім того, передбачають можливість ручного хитання частоти.

На зображенні отриманої частотної характеристики створюють маркерні мітки, що відповідають відомим значенням частоти. Цього досягають за допомогою зв'язку з виходом свіп-генератора коливального контуру високої добротності, точно настроєного на потрібну частоту, наприклад 450 кГц. Коли частота генератора в процесі її качання проходить через 450 кГц, через поглинання цим контуром енергії в вихідній напрузі з'явиться провал, що створював характерну мітку на зображенні частотної характеристики.

Більш досконалою є калібрування частоти з допомогою кварцового генератора частотних міток. Якщо при зміні частота свіп-генератора приблизиться до гармонік генератора міток на навантажені детекторного

змішувача, до якого одночасно підведено два коливання, ФНЧ виділяє низькочастотну напругу биття, що діє на вертикальний вхід осцилографа і створює на зображенні АЧХ мітки в вигляді вертикальних сплесків, амплітуда яких зазвичай регулюється. Відстань між мітками відповідає відповідному частотному інтервалу. Мітки на частотній шкалі відповідають точкам частотної характеристики. Методи вимірювання частотних характеристик, розглянемо більш детально в наступному підрозділі, на прикладі вимірювання амплітудно-частотних характеристик (АЧХ).

1.2 Методи вимірювання АЧХ

1.2.1 Вимірювання АЧХ в дискретних точках

Найбільш простий метод вимірювання АЧХ – це визначення амплітуд вихідної і вхідної напруги гармонічного сигналу в окремих частотних точках з послідовною інтерполяцією всієї кривої. На практиці, легше виміряти залежність амплітуди напруги на виході пристрою U_2 від частоти при постійній амплітуді генератора U_G . При вимірюванні використовують перелаштовуваний генератор гармонічних коливань з відомим внутрішнім опором. Іноді цей метод називають «метод відомого генератора». Для вимірювання амплітуди вихідної напруги U_2 може бути використано вольтметр змінного току будь-якого виду.

Генератор послідовно настроюють на ряд вибраних частот, амплітуду $U_2 = U_{вих}$ вимірюють на опорі навантаження. При цьому амплітуда генератора підтримується постійною. Залежність відношення амплітуд від частоти $U_{вих}(f)/U_G$, побудована по результатах вимірювань з інтерполяцією проміжних точок, представляє собою АЧХ кола при стандартному вихідному опорі генератора.

Для зниження впливу параметрів генератора на точність вимірювання АЧХ використовують іншу схему включення генератора. В ній передбачений

другий вольтметр і додатковий опір Z_0 , рівний заданому опоріві джерела сигналу (рис. 1.1).

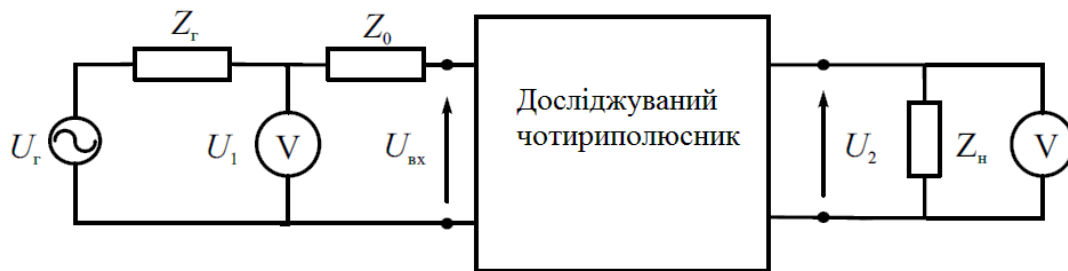


Рисунок 1.1 – Вимірювання АЧХ чотириполосника по точках з допомогою двох вольтметрів

АЧХ пристрою визначають як відношення показів вольтметрів U_2/U_1 в кожній частотній точці. Вимірювання АЧХ по точках забезпечує достатньо високу точність. Основний недолік вимірювання АЧХ по точках – його трудомісткість і велика кількість затраченого часу. При довготривалих вимірах відчувається вплив температури. Ці недоліки вирішуються в панорамних вимірювачах АЧХ, де використовують електронну перестройку частоти.

1.2.2 Панорамний метод вимірювання АЧХ

Панорамний метод називають через використання осцилографічного індикатора, на який виводиться крива АЧХ одразу в усьому досліджуваному діапазоні частот. Суть метода – застосування в якості джерела вхідного сигналу генератора, що керується по частоті напруги [1]. Частота генератора лінійно змінюється в межах встановленого діапазону вимірювання АЧХ, а потім скидається в початкову точку. Тому такий генератор прийнято називати свіп-генератор. Вихідний сигнал з досліджуваного пристрою детектується і подається на осцилографічний індикатор. При постійній амплітуді генератора вертикальна вісь на екрані індикатора відповідає рівню АЧХ. Розгортка

зображення на індикаторі здійснюється тією самою пилкоподібною напругою, якою керується свіп-генератор. Це створює на екрані горизонтальну вісь частот. Прилади, що реалізують панорамний метод, називають вимірювачі АЧХ. Такі вимірювачі АЧХ складаються з генератора, свіп-генератора, детектора і осцилографічного індикатора. Свіп-генератор виробляє гармонічний сигнал з постійною амплітудою, що змінюється по лінійному закону миттєвої частоти (рис. 1.2).

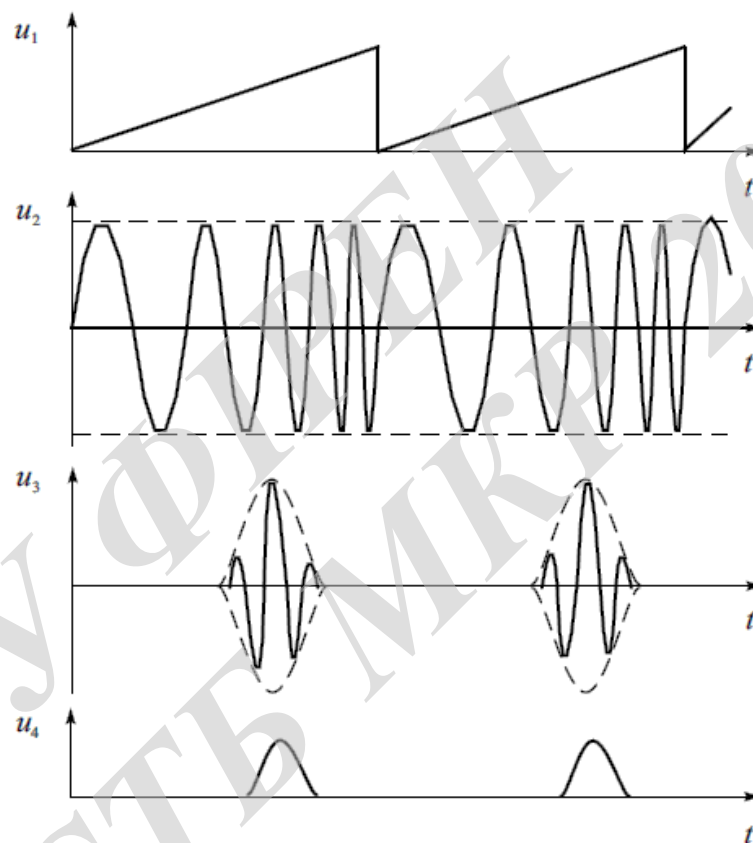


Рисунок 1.2 – Осцилограми сигналів в вимірювачі АЧХ

Закон вимірювання частоти повторює форму модулюючої напруги $u_1 = u_{кер}(t)$:

$$f_{CG} = f_1 + \frac{f_1 - f_2}{U_{кер\ max}} u_{кер}(t).$$

Сигнал з свіп-генератора проходить через досліджуваний пристрій. Його амплітуда міняється в залежності від АЧХ пристрою. Виділяючи обвідну сигналу u_3 з допомогою лінійного детектора, отримують сигнал u_4 , що повторює АЧХ пристрою. Оскільки в свіп-генераторі встановлено взаємно-однозначне лінійне співвідношення між напругою розгортки і частотою генератора, горизонтальна вісь екрану являється віссю частоти.

На осцилографічному індикаторі буде відтворена крива залежності вихідної напруги від частоти.

Для панорамного методу вимірювання АЧХ характерним є динамічні спотворення. При повільному вимірюванні частоти свіп-генератора обвідна вихідного сигналу повторює форму АЧХ, але при дослідженні вузькосмугових пристроїв і при швидкій зміні частоти в них виникає тривалий перехідний процес. Амплітуда вихідного сигналу уже не буде пропорційна АЧХ в кожній частотній точці. Виникнуть динамічні спотворення форми кривої, аналогічний ефект спостерігається в послідовному аналізаторі спектру [1].

Панорамні пристрої дозволяють не тільки спостерігати форму АЧХ, але і змінювати її значення в окремих точках кривої. Вимірювання рівня АЧХ найбільш часто відтворюють методом калібрування шкал. На екрані вимірювача АЧХ передбачують прямокутну сітку зі шкалою рівня. Вимірювання АЧХ здійснюють підрахунком кількості поділок шкали від нульової лінії до потрібної точки на графіці. Перед вимірюванням необхідно відкалібрувати шкалу по двох рівнях. Нульовий рівень встановлюється регулювання зміщення осцилограми по вертикалі при відсутності сигналу на виході індикаторного блоку. Рівень одиничного коефіцієнту передачі (рівень 0 дБ) встановлюється регулюванням чутливості каналу вертикального відключення при подачі сигналу з свіп-генератора прямо на індикатор. При цьому можна на екрані спостерігати власну АЧХ приладу і при необхідності виміряти її.

Частотну вісь калібрують з допомогою частотних міток. Їх створюють з допомогою еталонного генератора гармонік і змішувача (рис. 1.3).

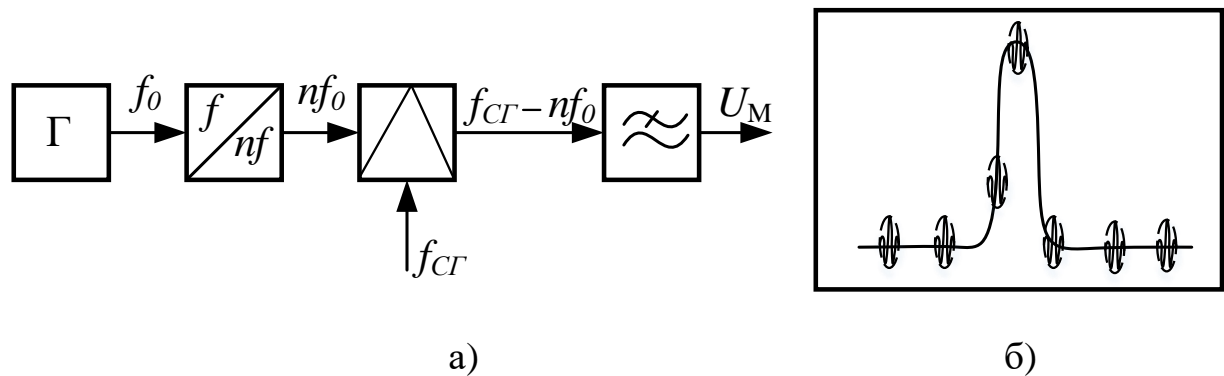


Рисунок 1.3 – Генератор рівновіддалених міток:
а) структурна схема; б) вид АЧХ з частотними мітками

Сигнал з свіп-генератора подають на змішувач на виході якого ставлять вузькосмуговий ФНЧ. Він виділяє сигнали u_m з різницевою частотою перетвореного сигналу, що є близькою до нульової частоти. Цей сигнал називають «нульовим биттям». Він проявляється в момент часу, коли частота свіп-генератора співпадає з якоюсь гармонікою частоти кварцового генератора. Сигнал нульового биття подають в канал Y індикатора. На екрані з'являються зображення рівновіддалених частотних міток. Відстань між ними відповідає частоті еталонного генератора [1].

Найбільш точні частотні виміри виконують з допомогою методу стоп-мітки. На пилкоподібній напрузі розгортки створюють сходинку фіксованої довжини. На екрані з'являється яскрава точка – частотна мітка. Положення мітки змінюють вручну, регулюючи час початку сходинки. В момент початку сходинки частота свіп-генератора перестає змінюватися. В цей момент часу виробляється імпульс запуску електронно-лічильного частотоміра. Він вимірює частоту сигналу свіп-генератора, що відповідає моменту зупинки частоти і, відповідно, положенню частотної мітки на екрані індикатора [1]. Перевагою метода стоп-мітки являється висока точність вимірювання частоти, недоліком є підвищення часу вимірювання АЧХ. Відмітимо, що в точці зупинки частоти відсутні динамічні спотворення, що дозволяє визначити точне значення АЧХ.

1.3 Способи реалізації свіп-генераторів та методи визначення його частоти

1.3.1 Способи реалізації свіп-генераторів

Свіп-генератори – це генератори, частота яких міняється в залежності від прикладеної керуючої напруги. В свіп-генераторах використовують різні типи автогенераторів з коливальними системами, частота яких змінюється електричним способом. Найбільш часто перелаштування резонансних систем свіп-генераторів відбувається варикапами. При цьому закон зміни частоти може бути лінійним, чи логарифмічним. Зазвичай свіп-генератори застосовують в вимірювальній апаратурі для реєстрації амплітудно-частотних і фазо-частотних характеристик елементів ВВЧ та НВЧ пристроїв, а також для вимірювання коефіцієнту стоячої хвилі, повного опору і т.д.

Свіп-генератори дозволяють отримувати хитання частоти на різних проміжках спектру електромагнітних коливань в діапазоні від декількох МГц до сотень ГГц.

При побудові свіп-генератора ВЧ-діапазону часто використовують помноження частоти. Низькочастотний сигнал свіп-генератора подають на помножувач частоти. Фільтр виділяє смугу частот, в якій знаходиться одна із вищих гармонік помножувача. Перелаштовуючи фільтр і вибираючи номер гармоніки, перемикають діапазон хитання частоти вихідного сигналу. Так, при варіації частоти генератора в межах 100...120 МГц на 100-й гармоніці отримаємо свіп-генератор з перекриттям 10...12 ГГц. Але рівень вищих гармонік невисокий, тому застосовують помноження частоти в 2-4 рази [1].

В діапазоні НВЧ використовують пристрої, що мають електронну перестройку частоти генерації. Такою властивістю володіють клістриони і діоди Ганна, однак діапазон перелаштування цих приладів недостатній, а нерівномірність вихідної потужності велика.

В світл-генераторах санти- і міліметрового діапазону використовують лампи зворотної хвилі (ЛЗХ), частота генерації в яких залежить від напруги між катодом і затримуючою системою. Такі прилади забезпечують діапазон електронного перелаштування в межах від одиниць до сотень ГГц [1].

Реалізувати світл-генератор можна за допомогою поєднання сигналів двох генераторів, при цьому один генератор має працювати на фіксованій частоті, а другий має змінювати частоту. Класична структура світл-генератора наведена на рис.1.4.

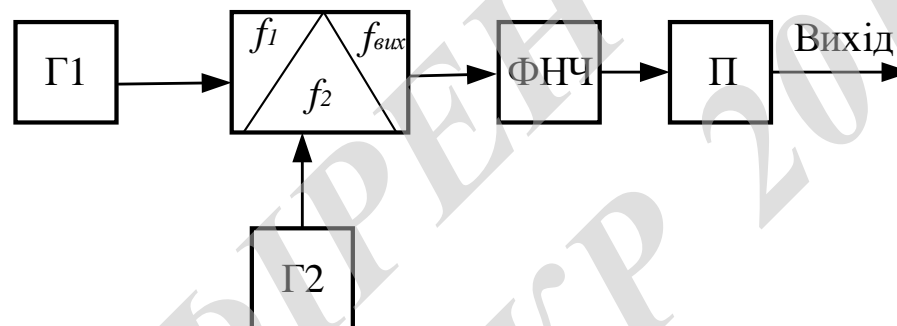


Рисунок 1.4 – Структурна схема світл-генератора

Генератор фіксованої частоти генерує коливання максимально приближені до синусоїдального. Сигнал з генератора надходить до змішувача. Аналогічно на змішувач подається коливання другого генератора, що має пилкоподібний сигнал, частота коливань якого керується за допомогою варикапів, що входять до коливального контуру генератора.

Щоб частоту генератора можна було змінювати, на аноди варикапів подають постійну позитивну напругу. Девіація частоти генератора змінної частоти досягається зміною ємності варикапа. На виході змішувача виділяються коливання різнецевої частоти, що залежить від частоти генератора з змінною частотою. Сигнал з змішувача проходить через емітерний повторювач і ФНЧ і

надходить до підсилювача, а з нього через узгоджувальний каскад на вихід пристрою.

Перевагами цієї схеми є малі габарити, зручність керування, низькі напруги, висока швидкість перестройки. Недоліками схеми є малий діапазон переналаштування, нелінійність характеристик керування, температурна залежність ємності варикапа.

В діапазоні сантиметрових і міліметрових хвиль велику популярність отримали свіп-генератори на ЗІГ-резонаторах. На основі ЗІГ-резонаторів будуються перелаштовувані генератори і фільтри НВЧ-діапазону. Завдяки поєднанню здатності до перебудови в широкому діапазоні і малому рівню фазових шумів ЗІГ-генератори використовуються в якості гетеродинів аналізаторів спектру і генераторів стандартних сигналів.

Робота резонаторів на основі залізо-ітрієві граната (ЗІГ) базується на явищі феромагнітного резонансу в монокристалах фериту. Резонатор являє собою сферу діаметром 0,2-0,7 мм з добре оброблену поверхню охоплену взаємно перпендикулярними петлями. На не резонансних частотах сфера веде себе як звичайний діелектрик і зв'язок між напівпетлями відсутній [2]. Для використання ЗІГ-резонатора в схемі свіп-генератора достатньо однієї напівпетлі.

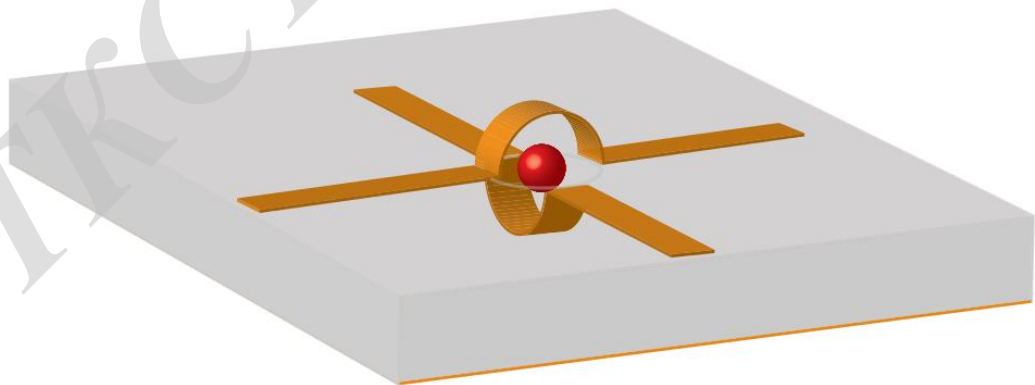


Рисунок 1.5 – Спрощена схема ЗІГ-резонатора

Частота резонансу пропорційна зовнішньому магнітному полю, що дозволяє зміною струму електромагніту перелаштовувати резонатор в межах до трьох октав і навіть до декади. Обмеження в застосуванні ЗІГ-резонаторів обумовлено інертністю електромагніту, що керує частотою. Зазвичай їх час перестройки по частоті складає декілька мілісекунд, тому оптимально використовувати ЗІГ-резонатори в системах з достатньо плавною змінною частоти.

Генератори на ЗІГ- резонаторах мають широку смугу перелаштування і низький рівень фазових шумів. На основі резонаторів створюються світ-генератори, генератори складних сигналів і т.д. Перелаштування частоти генератора відбувається за рахунок зміни частоти феромагнітного резонансу ЗІГ-сфери. Її резонансна частота лінійно залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля, тобто, від струму в котушках електромагніту [2]. Частота резонатора такого типу може змінюватися в широких межах. В діапазоні міліметрових хвиль використовують світ-генератори на лампах зворотної хвилі. В таких генераторах частота залежить від напруги на колекторі електронного пристрою.

Недоліком таких світ-генераторів є відносно повільне перелаштування частоти через обмеженість швидкості зміни струму в котушці електромагніту, велика споживана потужність в електромагніті.

1.3.2 Методи визначення частоти світ-генератора

Основними способами вимірювання частоти світ-генератора являються : застосування цифрових частотних синтезаторів з ідентифікацією частоти за відомим кодом керування, прямий вимір частоти світ-генератора без зупинки або із зупинкою хитання, непрямий вимір частоти за відомими напругою або струмом керування, метод вимірювання частоти міток.

Цифрові синтезатори ускладнюють вимірювальне обладнання, непрямий вимір без зупинки хитання потребує встановлення високостабільного діапазонного генератора, прямий вимір із зупинкою хитання знижує швидкодію характерографа. Визначення частоти завідомими напругою, струмом керування не забезпечує високої точності частотного масштабу. Тому доцільно розглянути метод який дозволить суттєво збільшити точність виміру частоти та визначення номера гармонік.

Метод вимірювання частоти міток полягає в використанні опорних генераторів. Частота напруги свіп-генератора змінюється за лінійним законом та надходить до стробоскопічного змішувача, куди також подається напруга з опорного генератора, гармоніки якого розподіляються рівномірно в робочому діапазоні частот з кроком f_0 . Формувач міток, що підключений до виходу змішувача, формує імпульси міток. Вони відповідають моменту часу, коли $f = nf_0$, де f – миттєва частота свіп-генератора, $n = 1, 2, 3, \dots$

Формувач міток являє собою послідовно з'єднані фільтр нижніх частот, детектор і компаратор. Фільтр виділяє різницеву частоту, детектор з компаратором формують імпульси міток. Частота f вихідної напруги свіп-генератора, що підключений до входу стробоскопічного змішувача змінюється під час прямого ходу напруги розгортки блоку перестройки за лінійним законом [5]. На інший вхід змішувача подається напруга з одного з трьох опорних генераторів. Гармоніки вихідної напруги опорних генераторів ОГ1–ОГ3 розподілені рівномірно у робочому діапазоні частот з кроком $f_0, f_0 - F, f_0 + F$. На виході змішувача спостерігаються «нульові биття», за якими формувач міток створює імпульси міток на вході блоку керування та обчислення. З підключеним ОГ1 перша мітка відповідає моменту часу, коли $f = (n - 1)f_0$, де $n = 2, 3, 4, \dots$. Після першої мітки ключ (К) переключує вхід змішувача на генератор ОГ2. Тоді друга мітка з'явиться, при умові $f = n(f_0 - F)$ [3]. Після цього блок керування та обчислення знову переводить ключ у положення, при якому на вхід змішувача подається напруга від генератора ОГ1 і наступна третя мітка буде

відповідати моменту часу, коли $f = nf_0$. Часовий інтервал між другою і третьою мітками:

$$\tau_- = \frac{nf_0 - n(f_0 - F)}{\eta} = \frac{\eta F}{\eta},$$

де η – швидкість зміни частоти світ-генератора.

Після того, як сформована третя мітка, ключ під'єднає до змішувача генератор ОГЗ. Четверта мітка з'явиться, коли $f = n(f_0 + F)$, часовий інтервал між третьою і четвертою мітками:

$$\tau_+ = \frac{n(f_0 + F) - nf_0}{\eta} = \frac{\eta F}{\eta}.$$

Після четвертої мітки на змішувач подається напруга від генератора ОГ1, і наступна п'ята мітка буде відповідати моменту часу, коли $f = (n + 1)f_0$.

Інтервали між першою і третьою мітками, третьою і п'ятою мітками будуть становити відповідно:

$$\tau_1 = \frac{nf_0 - (n-1)f_0}{\eta} = \frac{f_0}{\eta},$$

$$\tau_2 = \frac{(n+1)f_0 - nf_0}{\eta} = \frac{f_0}{\eta}.$$

Тоді частота третьої мітки, що вимірюється:

$$f_M = nf_0 = \frac{\tau_+ + \tau_-}{\tau_1 + \tau_2} \frac{f_0^2}{F}.$$

Точність вимірювання частоти мітки зростає у зв'язку з тим, що у вимірювачі, на компенсується вплив нелінійності розгортки свіп-генератора на результат [3]. Послідовність міток, що формуються у вимірювачі, наведено на рис. 1.6.

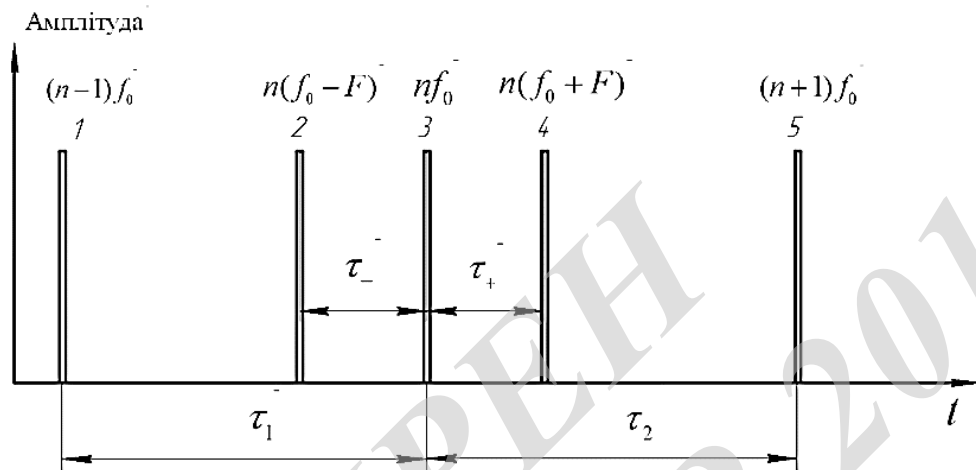


Рисунок 1.6 – Послідовність міток, що формуються у вимірювачі

У залежності від швидкості зміни частоти свіп-генератора та її коефіцієнта нелінійності τ_- , τ_+ , τ_1 і τ_2 приймають різні значення для однієї і тієї ж мітки f_M [3]. У випадку сталої швидкості зміни частоти свіп-генератора η :

$$\tau_+ = \tau_- = \tau,$$

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau_0.$$

Формула для частоти мітки:

$$f_M = \frac{\tau}{\tau_0} \frac{f_0^2}{F},$$

збігається з формулою, за якою визначається частота мітки в вимірювачі.

Послідовність міток, що формуються в пристрої наведено на рис. 1.7.

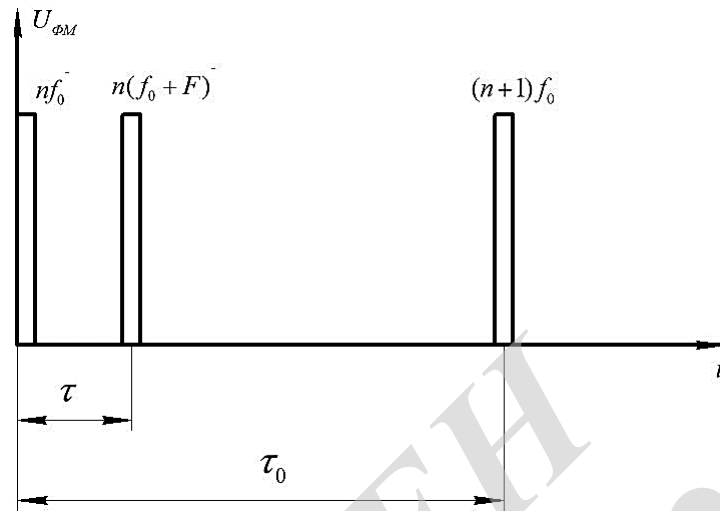


Рисунок 1.7 – Послідовність міток, що формуються у вимірювачі

Виконаємо нормування часової залежності частоти f свіп-генератора за віссю ординат до $y = f/f_m$, за віссю абсцис – до $x = t/T_p$ де f_m – максимальна частота, а T_p – період розгортки частоти свіп-генератора. Найгірший, з точки зору впливу нелінійності розгортання на точність визначення частоти, випадок – це зміна частоти f за період розгортки від $(n-1)f_0$ до $(n+1)f_0$ (рис. 1.8).

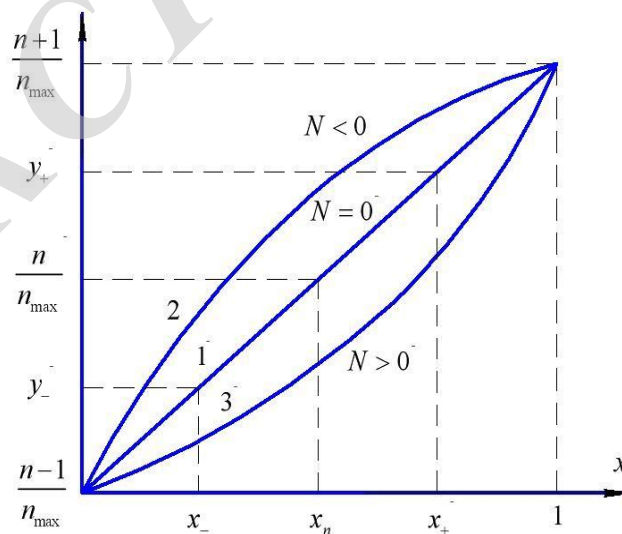


Рисунок 1.8 – Лінійна та нелінійна зміна частоти свіп-генератора

Тоді для лінійної зміни частоти f (рис. 1.8, крива 1) у вимірювачі з двома опорними генераторами номер гармоніки:

$$n = n_{\max} = \frac{\tau}{\tau_0} = n_{\max} \frac{x_+ - x_n}{1 - x_n},$$

де $n_{\max} \frac{f_0}{F}$ – максимальний номер гармоніки, який відповідає максимальній частоті свіп-генератора.

Для вимірювача:

$$n = n_{\max} \frac{\tau_- + \tau_+}{\tau_1 + \tau_2} = n_{\max} (+x_+ - x_-).$$

Лише теоретично зміна у часі частоти свіп-генератора відбувається за лінійним законом. Тому частота мітки, що знаходиться за вище наведеними рисунками має похибку, яка залежить від коефіцієнта нелінійності реального свіп-генератора [3]. Незважаючи на спеціальні схемні рішення отримати нульовий коефіцієнт нелінійності не вдається, але при використанні цього методу складова похибки визначення частоти свіп-генератора, яка викликана нелінійністю розгортки, зменшується на порядок.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СВІП-ГЕНРАТОРА МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ХВИЛЬ НА ОСНОВІ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

2.1 Запропонована структурна схема свіп-генератора

На рис. 2.1 наведено запропоновану структурну схему свіп-генератора на основі частотного перетворювача.

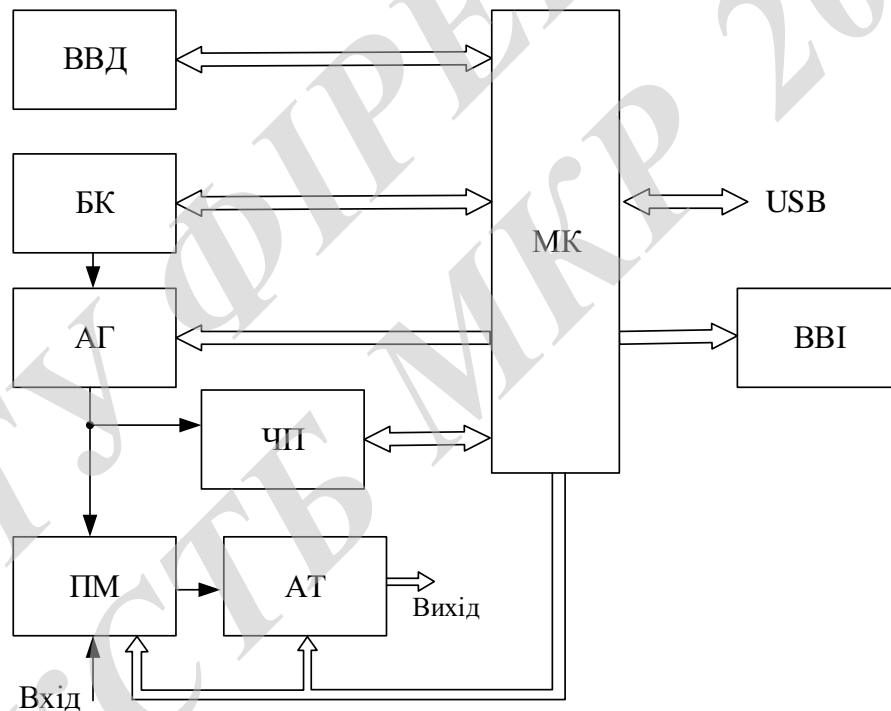


Рисунок 2.1 – Структура свіп-генератора на основі частотного перетворювача

Даний свіп-генератор складається з таких блоків: вузол вводу даних (ВВД), блок керування (БК), автогенератор (АГ), підсилювач-модулятор (ПМ), атенюатор (АТ), частотний перетворювач (ЧП), мікроконтролер (МК), вузол виводу інформації (ВВІ). ВВД може являти собою клавіатуру або сенсорний

екран, який дає змогу задавати необхідні параметри. Інформація з ВВД надходить до МК, який в свою чергу, передає інформацію в БК. БК керує АГ на основі отриманих даних з МК. Для реалізації хитання частоти використовується ЧП. Для отримання на виході сигналу заданої форми та рівня генератор містить ПМ та АТ, що дає змогу підсилити сигнал з генератора і розв'язати його з навантаженням. Модулятор має окремий вхід для подачі зовнішньої напруги. В якості ВВІ може слугувати екран монітору або власний екран пристрою, що слугує для відображення інформації необхідної користувачу. Генератор має USB інтерфейс, що дозволяє ним керувати за допомогою комп'ютера або підключати його до інших пристроїв.

Частотний перетворювач, що використовується в свіп-генераторі базується на основі квадратора, тому більш детально розглянемо його структуру та принцип роботи. Частотний перетворювач на основі квадратора (рис. 2.2) у складі свіп-генератора на ЗПГ-резонаторі працює як в режимі лінійної зміни частоти, але з великим коефіцієнтом нелінійності, так і в режимі нелінійної зміни в часі частоти автогенератора АГ

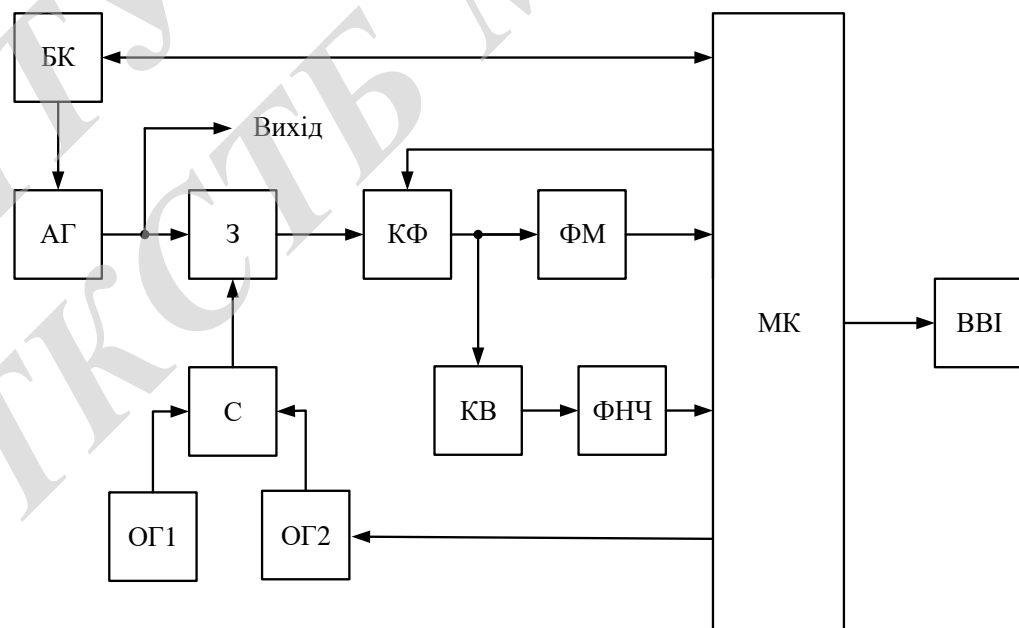


Рисунок 2.2 – Частотний перетворювач на основі квадратора

Принцип його роботи полягає в тому, що мікроконтролер МК подає імпульси на вхід БК (рис. 2.3, а), що формує пилкоподібну напругу. При прямому ході від блоку керування частота автогенератора АГ змінюється лінійно (рис. 2.3, б), при цьому на вхід змішувача З через суматор С надходить напруга у вигляді коротких імпульсів з ОГ1 або одночасно з двох ОГ1 та ОГ2. Ці генератори мають близькі частоти f_1, f_2 [4].

При другому періоді розгортання частоти генератора АГ до змішувача З підключається, крім першого, ще другий генератор ОГ2 з частотою f_2 . Контролер МК змінює режим роботи керованого фільтру (КФ) в режим зі смугою $n_{\text{МАКС}}(f_2 - f_1) \dots \frac{f_1}{2} - n_{\text{МАКС}}(f_2 - f_1)$. Після появи першої координатної мітки (рис. 2.3, г) на виході формувача ФМ з'являється імпульс дозволу (рис. 2.3, в) контролеру визначити частоту $F = n(f_2 - f_1)$ коливання на виході ФНЧ, де n – номер гармоніки першого опорного генератора [7]. ФНЧ має смугу пропускання $n_{\text{МАКС}}(f_2 - f_1)$. На його вхід подається напруга від фільтра КФ піднесена до квадрата квадратором (КВ). За формулою $f_{M1} = \frac{f_1 F}{f_2 - f_1}$ розраховується частота першої координатної мітки [4].

Контролер МК за відомою частотою f_{M1} першої координатної мітки визначає частоти всіх координатних міток в смузі хитання свіп-генератора (рис. 2.3, г).

При досягненні третього і вище періоду розгортання частоти генератора АГ контролер відключає генератор ОГ2. На вході вузла ВВІ формуються імпульси М координатних міток M з відомою частотою (рис. 2.3, г).

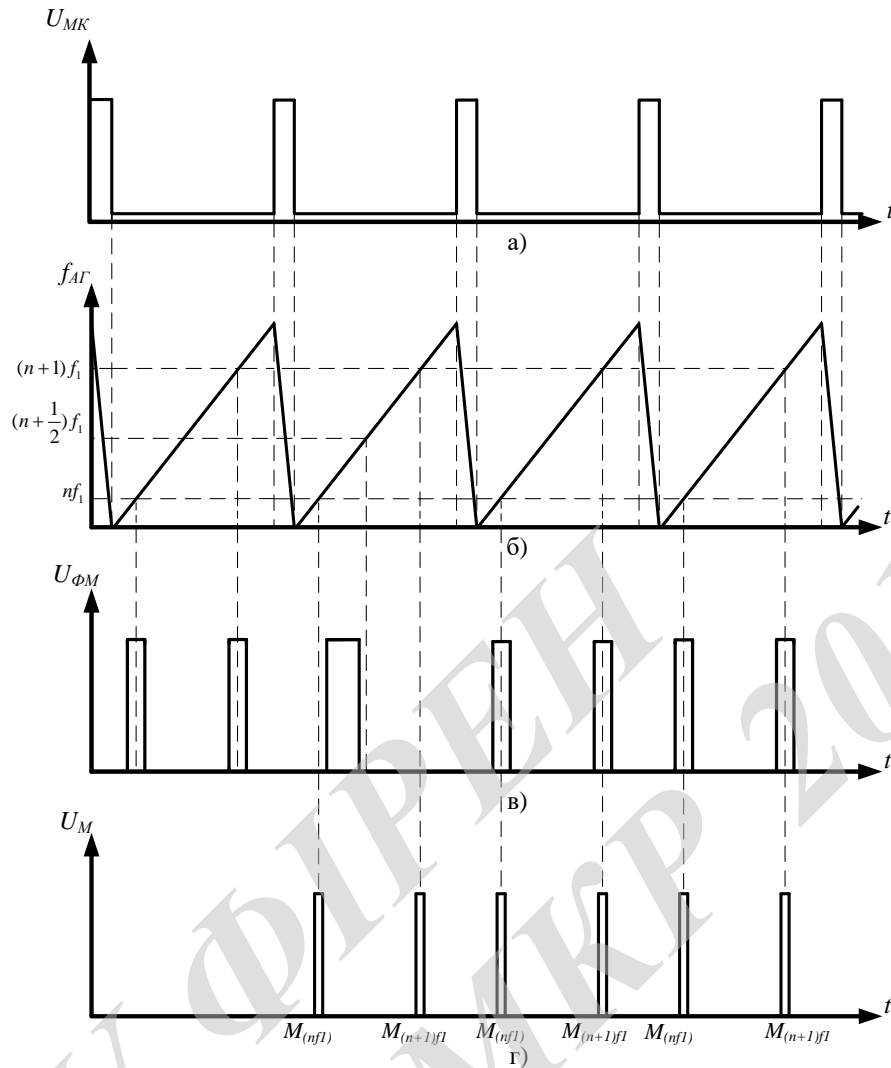


Рисунок 2.3 – Сигнали в перетворювачі на основі квадратора

У вираз визначення частоти першої координатної мітки не входить частота генератора АГ, тому його нелінійність розгортання не впливає на точність визначення частоти координатних міток [4]. Це свідчить, що зміна частоти світл-генератора в часі може бути як лінійною, так і нелінійною.

На рис. 2.4 представлено проміжний варіант схеми світл-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача.

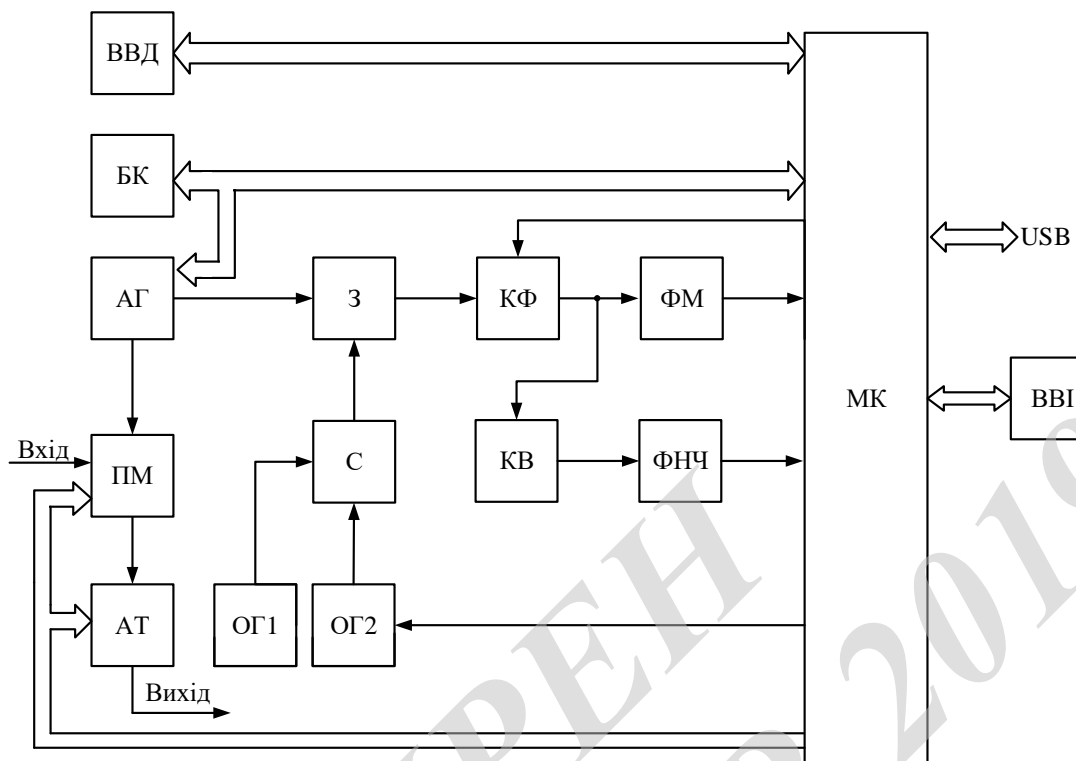


Рисунок 2.4 – Структурна схема свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача

Схема працює наступним чином БК керує АГ на основі отриманих даних з МК. Для реалізації хитання частоти використовується ЧП. Принцип його роботи полягає в тому, що мікроконтролер МК подає імпульси на вхід БК, що формує пилкоподібну напругу. При прямому ході від блоку керування частота автогенератора АГ змінюється лінійно, при цьому на вхід змішувача (З) через суматор (С) надходить напруга у вигляді коротких імпульсів з ОГ1 або одночасно з двох ОГ1 та ОГ2 [4]. Ці генератори мають близькі частоти 100 та 99,99 МГц. МК змінює режим роботи КФ, що працює в двох режимах, як ФНЧ з смугою пропускання 50 МГц та як смуговий фільтр (СФ) з смугою (5 – 45) МГц. Після появи першої координатної мітки на виході ФМ з'являється імпульс дозволу контролеру визначити частоту коливання на виході ФНЧ, що має смугу пропускання 5 МГц. На його вхід подається напруга від фільтра КФ піднесена до квадрата квадратором (КВ). Контролер МК за відомою частотою першої

координатної мітки визначає частоти всіх координатних міток в смузі хитання світ-генератора.

При досягненні третього і вище періоду розгортання частоти генератора АГ контролер відключає генератор ОГ2. На вході вузла ВВІ формуються імпульси координатних міток [4].

Для отримання на виході сигналу заданої форми та рівня генератор містить ПМ та АТ, що дає змогу підсилити сигнал з генератора і розв'язати його з навантаженням. Модулятор формує сигнал амплітудної маніпуляції. В якості ВВІ може слугувати екран монітору або власний екран пристрою, що слугує для відображення інформації необхідної користувачу. Генератор має USB інтерфейс, що дозволяє ним керувати за допомогою комп'ютера або підключати його до інших пристроїв.

2.2 Вибір елементної бази світ-генератора

В якості автогенератора доцільно використовувати ЗІГ-генератор виробництва компанії Micro Lambda Wireless MLOS-2640PA (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – ЗІГ-генератор MLOS-2640PA з блоком керування

Параметри MLOS-2640PA:

- діапазон частот – 26,5-50 ГГц;
- вихідна потужність на активному навантаженні 50 Ом – 13 дБмВт;
- рівень паразитних спектральних складових – -12 дБм;
- струм споживання – 250 мА;
- точність встановлення частоти – ± 40 МГц.

Цей ЗІГ-генератор має в своєму складі драйвер. Це суттєво спрощує завдання проектування, адже ми можемо використати готову конструкцію ЗІГ-резонатора з блоком керування, що дає змогу не розробляти окремо блок керування.

В якості стробоскопічного змішувача можна використати стробоскопічний перетворювач міліметрового діапазону розроблений ННДПІ «Кварц» модель 7026. Варіант схемотехнічної реалізації стробоскопічного вузла та вузла вибірки зображено на рис. 2.6, 2.7. З приходом на вхід пристрою від блоку керування сигналу запуску генератора стробуючих імпульсів формуються короткі імпульси, під дією яких короткочасно відкриваються швидкодіючі ключові схеми стробоскопічного змішувача. В якості вузла вибірки, частіше всього використовують діоди Шотткі. В схемотехнічній реалізації вузла вибірки використовують діод з накопиченням заряду SRD VD1, конденсатори і пара низько бар'єрних діодів Шотткі VD2, VD3 [5].

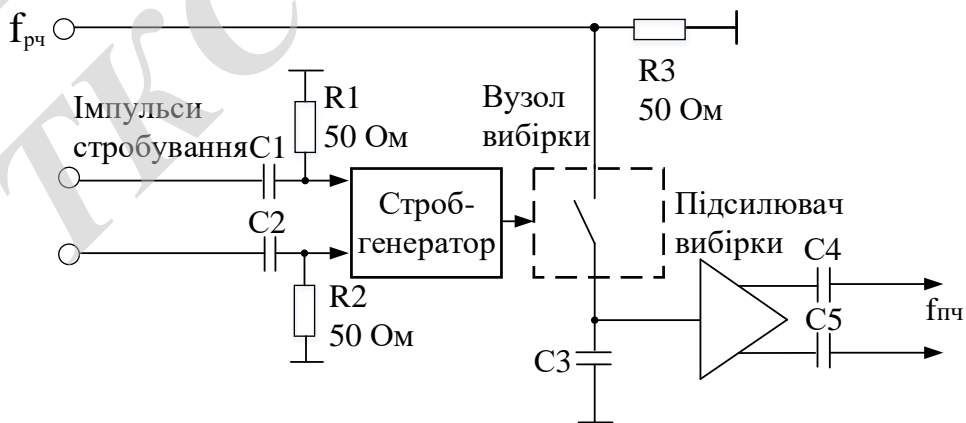


Рисунок 2.6 – Схематехнічна реалізація стробоскопічного вузла

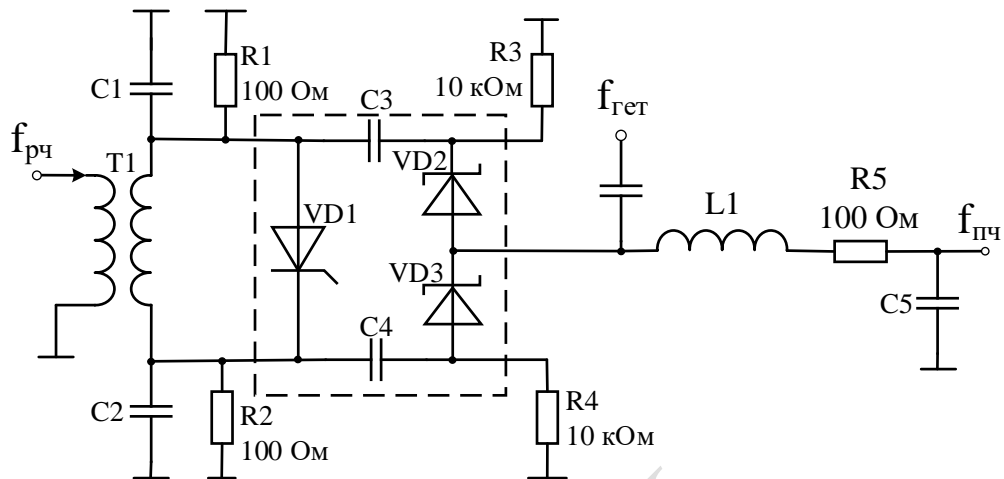


Рисунок 2.7 – Схемотехнічна реалізація вузла вибірки

Технічні характеристики «Кварц» модель 7026:

- діапазон частот сигналу – 33–50 ГГц;
- діапазон частот гетеродину – 1-12 ГГц;
- діапазон частот ПЧ – 1-800 МГц;
- рівень потужності гетеродина – 10 мВт;
- габарити 36x29x29;
- маса 40 г.

Суматор сигналів реалізується на операційному підсилювачі AD811AN за типовою схемою інвертуючого суматора з зворотнім зв'язком (рис 2.8.).

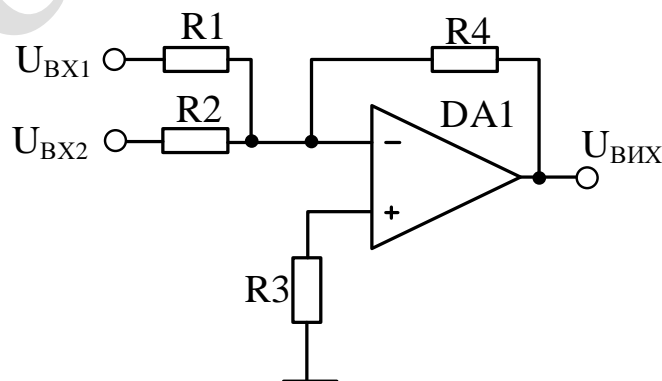


Рисунок 2.8 – Схема інвертуючого суматора з зворотнім зв'язком

Характеристики мікросхеми AD811AN:

- кількість каналів 1;
- струм споживання – 16,5 мА;
- смуга пропускання – 140 МГц;
- діапазон частот – $-55...+125$ °с;
- напруга живлення – $\pm 4,5...18$ В.

Опорні генератори реалізуються за схемою кварцового генератора на біполярному транзисторі. Розрахунок опорного кварцового генератора наведено в 4 розділі. Для даної схеми вибираємо транзистор 2N3904S з наступними параметрами:

- гранична частота підсилення за струмом в схемі с СЕ – 300 МГц;
- крутизна лінії граничного режиму транзистора – 0,05А/В ;
- коефіцієнт передачі за струмом – 100;
- напруга закриття – 0,25 В;
- ємність база-колектор – 4 пФ.

Також в якості опорного генератора може використовуватися кварцовий генератор опорних частот МОХО-100. Цей кварцовий генератор призначений для рішень, де потрібно низький рівень фазових шумів і достатньо висока для генераторів такого класу вихідна потужність [6]. Такі генератори широко використовуються в якості опорних в вимірювальній, зв'язковій і радіолокаційній техніці.

Технічні параметри МОХО-100:

- робоча частота – 100 МГц;
- вихідна потужність – 7 дБ;
- напруга живлення – 12 В;
- струм споживання – 150 мА.

Формувач міток (рис. 2.9) складається із послідовно з'єднаних ФНЧ, детектора та компаратора. В якості ФНЧ використаємо фільтр Баттерворта,

оскільки він забезпечує найбільш плоску характеристику в смузі пропускання, що досягається ціною плавності характеристики.

В якості детектора можна використати просту схему амплітудного детектора наприклад послідовного типу, а як компаратор – LM-111.

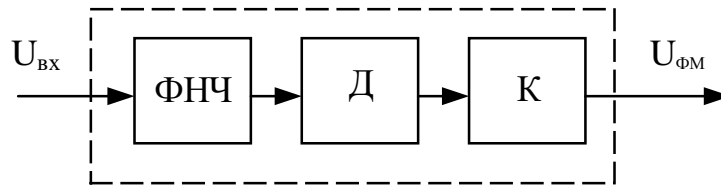


Рисунок 2.9 – Структурна схема формувача міток

Для схеми обираємо атенюатор Anritsu 4612К (рис. 2.10), це програмований атенюатор, що забезпечує діапазон затування в діапазоні (0 – 70) дБ.

Характеристики Anritsu 4612К:

- частотний діапазон – 0 – 40 ГГц;
- діапазон затування – 0 – 70 дБ;
- потужність – 1 Вт.



Рисунок 2.10 – Програмований атенюатор Anritsu 4612К

В якості квадратора використаємо мікросхему фірми Analog Devices AD834, що являється множником чотирьох квадрантів. Для того, щоб реалізувати квадратор, необхідно, об'єднати два входи мікросхеми, що забезпечить її функціонування як квадратора (рис. 2.11). Характеристики наведені в додатку Б.

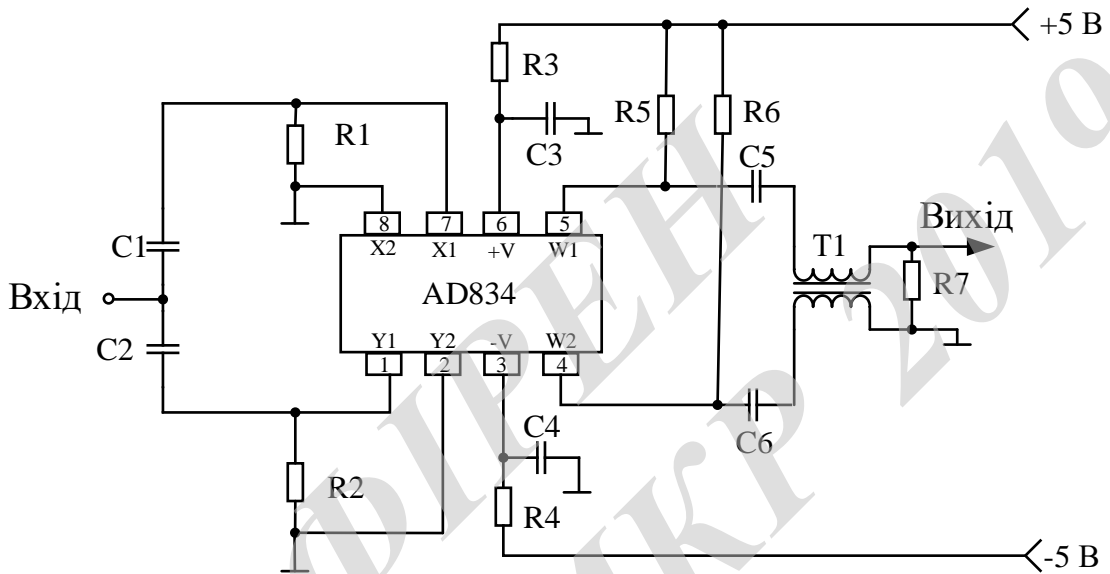


Рисунок 2.11 — Реалізація квадратора на мікросхемі AD834

Керований фільтр в даній схемі має два режими роботи, як ФНЧ з смугою пропускання до 50 МГц та як смуговий фільтр з смугою пропускання 5–45 МГц. Спосіб реалізації керованого фільтру зображено на рис. 2.12.

Він полягає в тому, що схема містить два транзисторних ключа, смуговий фільтр та фільтр низьких частот. Мікроконтролер керує фільтром за допомогою перемикачів К1 та К2 в відповідне положення. При ввімкненні ключів в 1 положення фільтр працює як смуговий, ввімкнувши в 2 положення КФ переходить в режим ФНЧ.

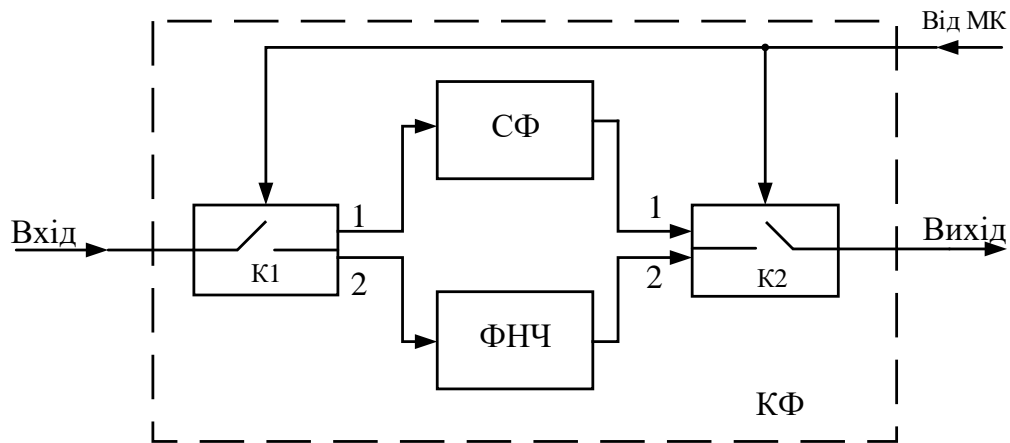


Рисунок 2.12 – Структурна схема керованого фільтра

В якості операційного підсилювача для ФНЧ використовуємо AD811AN, така мікросхема вже використовується в суматорі, її параметри наведено в описі до суматора.

В якості мікроконтролера використовуємо STM32F103ZET6. Він включає в себе високоефективне ARM® Cortex®-M3 32-бітне RISC-ядро, що працює на частоті 72 МГц, вбудована швидкісна пам'ять (флеш-пам'ять до 512 Кбайт і SRAM до 64 Кбайт). Усі пристрої пропонують три 12-бітні АЦП, чотири 16-ти бітові таймери плюс два таймери ШІМ, а також стандартні розширені інтерфейси: два I2C, три SPI, п'ять USART та USB.

Основні параметри STM32F103ZET6:

- ядро ARM Cortex-M3;
- ширина шини даних – 72 МГц;
- кількість входів – 112;
- об'єм пам'яті програм – 512 Кбайт;
- тип пам'яті програм – Flash;
- об'єм RAM – 64к x 8;
- наявність АЦП/ЦАП – АЦП 21x12b/ЦАП 2x12b;
- вбудовані інтерфейси – I2C, SPI, USB, USART, LIN;
- напруга живлення – 2...3,6 В;
- робоча температура – -40...± 85 °С.

2.3 Детальна структурна схема

На основі вибраної елементної бази, розроблено детальну структурну схему свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача (рисунок 2.13).

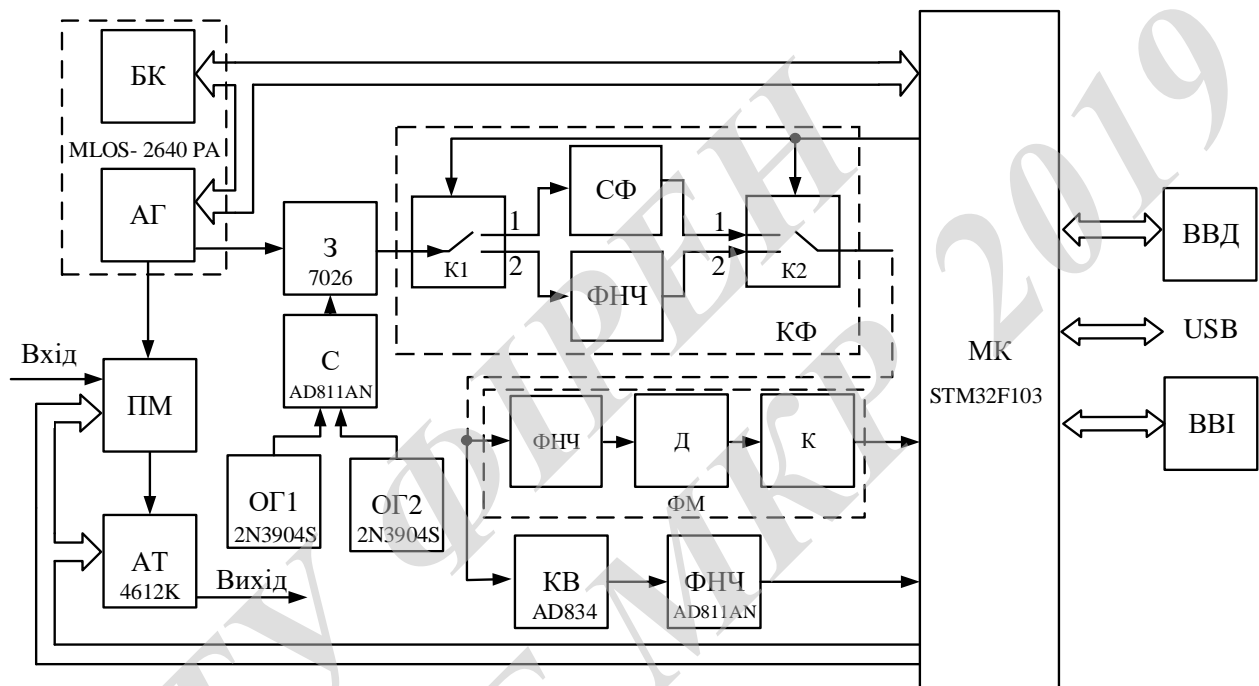


Рисунок 2.13 – Детальна структурна схема свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача

Дана схема працює наступним чином. МК подає імпульси на вхід БК, що формує пилоподібну напругу. При прямому ході від блоку керування частота автогенератора АГ змінюється лінійно, при цьому на вхід змішувача З через суматор С надходить напруга у вигляді коротких імпульсів з ОГ1 або одночасно з двох ОГ1 та ОГ2 [7]. Ці генератори мають близькі частоти 100 та 99,99 МГц. МК змінює режим роботи КФ, що працює в двох режимах, як ФНЧ з смугою пропускання 50 МГц та смугового фільтра (СФ) з смугою (5 – 45) МГц.

Після появи першої координатної мітки на виході формувача ФМ з'являється імпульс дозволу контролеру визначити частоту коливання на виході ФНЧ, що має смугу пропускання 5 МГц. На його вхід подається напруга від фільтра КФ піднесена до квадрата квадратором (КВ). Контролер МК за відомою частотою першої координатної мітки визначає частоти всіх координатних міток в смузі хитання свіп-генератора.

При досягненні третього і вище періоду розгортання частоти генератора АГ контролер відключає генератор ОГ2. На вході вузла ВВІ формуються імпульси координатних міток.

Для отримання на виході сигналу заданої форми та рівня генератор містить ПМ та АТ, що дає змогу підсилити сигнал з генератора і розв'язати його з навантаженням. Модулятор формує сигнал амплітудної маніпуляції.

В якості ВВІ може слугувати екран монітору або власний екран пристрою, що слугує для відображення інформації необхідної користувачу. Генератор має USB інтерфейс, що дозволяє ним керувати за допомогою комп'ютера або підключати його до інших пристроїв.

3 ЕЛЕКТРИЧНІ РОЗРАХУНКИ ВУЗЛІВ СВІП-ГЕНЕРАТОРА

3.1 Фільтр нижніх частот

Для фільтрації сигналів в електрозв'язку, вимірювальні техніці, системах обробки сигналів, системах автоматичного керування широко використовують фільтри різних принципів дії з різними характеристиками. В залежності від діапазону частот, що відносяться до смуги пропускання і смуги подавлення, розрізняють фільтри низькочастотні, високочастотні, смугові, режекторні фільтри.

ФНЧ являє собою схему, яка без зміни передає сигнали низьких частот, а на високих частотах забезпечує затухання сигналів. Сучасні електричні фільтри підрозділяють на пасивні та активні. Пасивні фільтри містять тільки пасивні R-, L-, C- елементи (рис. 3.1). Активні фільтри крім пасивних елементів містять активні електронні прибори: лампи, транзистори, підсилювачі тощо. Широке розповсюдження отримали активні фільтри з використанням операційних підсилювачів.

Пасивні фільтри на відміну від активних фільтрів не підсилюють сигнали та майже завжди є лінійними.

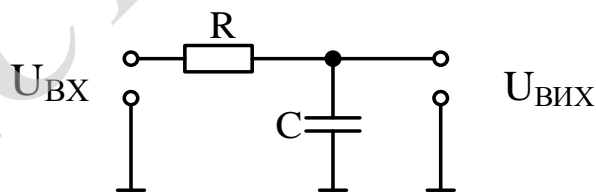


Рисунок 3.1 – Схема пасивного ФНЧ 1-го порядку

На рисунку 1 зображено схему простого RC-фільтра нижніх частот першого порядку. Коефіцієнт передачі в комплексному виді може бути виражено формулою:

$$K(j\omega) = \frac{U_{\text{вих}}(j\omega)}{U_{\text{вх}}(j\omega)} = \frac{1}{\frac{j\omega C}{R+1}} = \frac{1}{1+j\omega RC}.$$

Звідки отримаємо формули АЧХ та ФЧХ:

$$|K| = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}},$$

$$\varphi = -\arctg(\omega RC).$$

Коефіцієнт передачі таких фільтрів є зворотно пропорційний частоті. При збільшенні частоти в 10 разів, коефіцієнт підсилення зменшується в 10 разів, тобто, зменшується на 20 дБ на декаду або на 6 дБ на октаву.

Для більш швидкого зменшення коефіцієнта передачі можна ввімкнути послідовно n -ну кількість ФНЧ. При послідовному з'єднанні декількох фільтрів частота зрізу визначається:

Порядок фільтру визначається максимальною степеню змінної P . Для реалізації фільтра необхідно розкласти поліном знаменника на множники. Якщо серед коренів полінома є комплексні, в цьому випадку необхідно записати поліном в вигляді добутку співмножників другого порядку.

$$K(P) = \frac{K_0}{(1+a_1P+b_1P^2)(1+a_2P+b_2P^2)\dots} = \frac{K_0}{\prod_i (1+a_iP+b_iP^2)},$$

де a_i і b_i – дійсні коефіцієнти. Для непарних порядків полінома $b_l=0$.

Активні фільтри можна розділити на групи за різними признаками: призначення, смугою пропускання, типу підсилювальних елементів, виду зворотного зв'язку та інші. В якості активних елементів для фільтрів використовують транзисторні фільтри, фільтри на операційних підсилювачах,

на повторювачах напруги та інші. Усі активні фільтри мають зворотній зв'язок, тому розрізняють фільтри з одноконтурним і з багатоконтурним зворотним зв'язком.

В якості ФНЧ доцільно використати активний фільтр 4-го порядку. Розглянемо схему ФНЧ з позитивним зворотнім зв'язком (рис. 3.2):

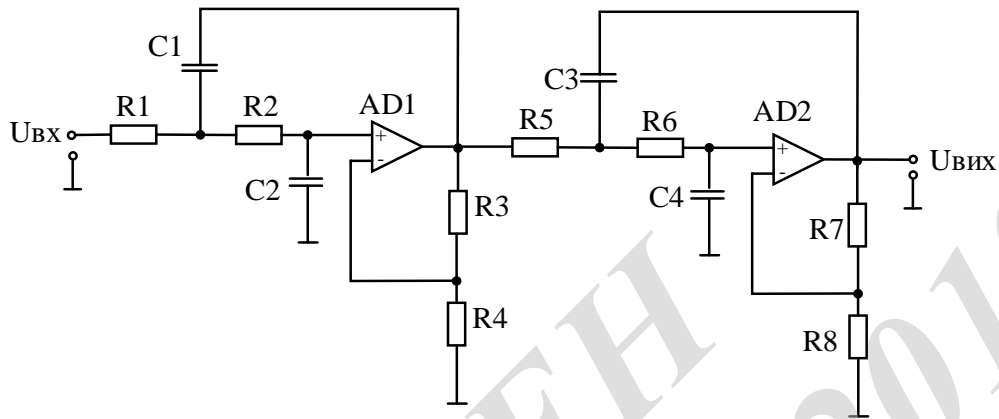


Рисунок 3.2 – ФНЧ 4-го порядку з позитивним зворотнім зв'язком

В даній схемі коефіцієнт підсилення операційного підсилювача має мати строго визначене значення, а коефіцієнт передачі даної схеми буде менше 3, тому дана схема нам не підходить.

Розглянемо схему ФНЧ 4-го порядку з омичним від'ємним зворотнім зв'язком (рис. 3.3).

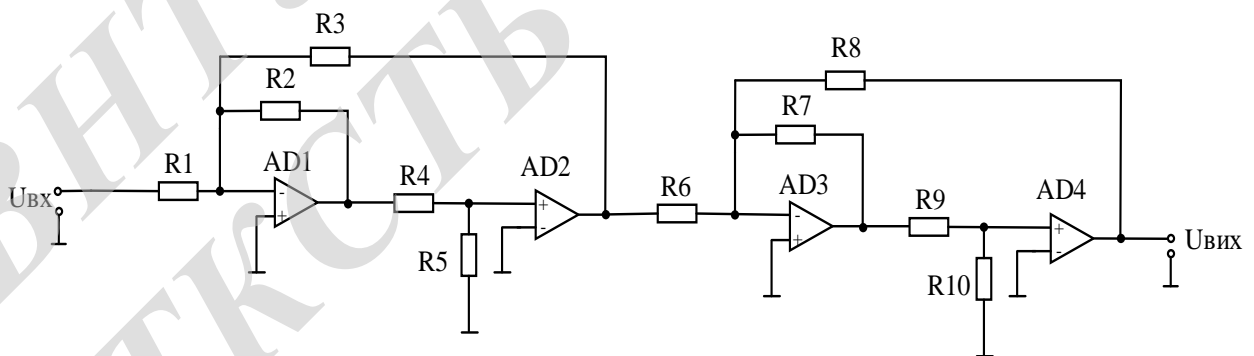


Рисунок 3.3 – ФНЧ 4-го порядку з омичним від'ємним зворотнім зв'язком

Даний фільтр побудований на чотирьох операційних, що збільшує завади і складність розрахунку схеми, тому дана схема нам не підходить.

Розглянемо схему ФНЧ 4-го порядку з омичним від'ємним зворотнім зв'язком (рис. 3.4).

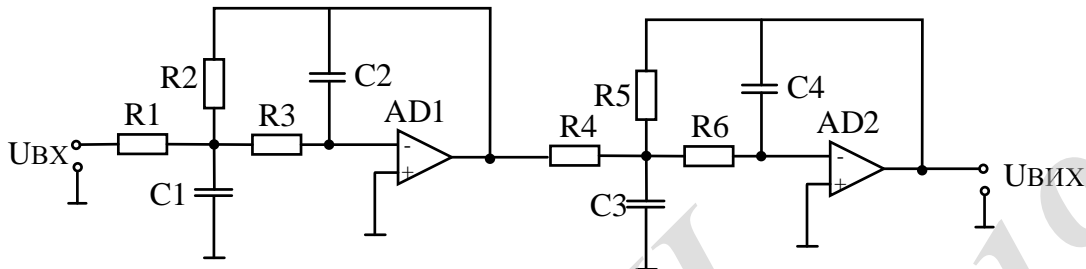


Рисунок 3.4 – ФНЧ 4-го порядку з омичним від'ємним зворотнім зв'язком

Для реалізації ФНЧ, доцільно використати цю схему. Перевагами цієї схеми є її простота, а для отримання бажаної амплітудно-частотної характеристики не потрібно високої точності підбору елементів.

Розрахунок фільтра.

Початкові дані для розрахунку фільтра:

Частота зрізу – 5 МГц;

Коефіцієнт передачі схеми –10.

Визначення передатної функції:

Запишемо табличні значення коефіцієнтів для фільтра Баттерворта четвертого порядку [7]:

$$a_1=1,8478, \quad b_1=1;$$

$$a_2=0,7654, \quad b_2=1.$$

Передатна функція ФНЧ має вигляд:

$$A(p) = \frac{A_0}{(1 + a_1 p + b_1 p^2)(1 + a_2 p + b_2 p^2)}.$$

Передатна функція 1-го ланцюга має вигляд:

$$A(p)_1 = \frac{\frac{R_2}{R_1}}{1 + \omega_c \cdot C_1 \cdot (R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}) \cdot P + (\omega c)^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot P^2}.$$

Передатна функція 2-го ланцюга має вигляд:

$$A(p)_2 = \frac{\frac{R_5}{R_4}}{1 + \omega_c \cdot C_3 \cdot (R_5 + R_6 + \frac{R_5 \cdot R_6}{R_4}) \cdot P + (\omega c)^2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot R_5 \cdot R_6 \cdot P^2},$$

де ω_c – кутова частота зрізу.

Розрахунок номіналів елементів:

Задаємося коефіцієнтами передачі першого і другого каскадів. Виходячи з умов обираємо значення конденсаторів: $C_1 = 68$ пФ, $C_3 = 43$ пФ, $C_2 = 51$ пФ, $C_4 = 180$ пФ.

З ряду стандартних значень обираємо:

C_1 – К10-47-25В-68 пФ $\pm 5\%$.

C_2 – К10-47-25В-51 пФ $\pm 5\%$.

C_3 – К10-47-25В-43 пФ $\pm 5\%$.

C_4 – К10-47-25В-180 пФ $\pm 5\%$.

Розраховуємо значення опорів для першого каскаду:

$$R_2 = \frac{a_1 \cdot C_2 - \sqrt{(a_1 \cdot C_2)^2 - 4 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot b_1(1 - A_{01})}}{2\pi \cdot f_c \cdot C_1 \cdot C_2},$$

$$R_2 = \frac{1,8478 \cdot (51 \cdot 10^{-12}) - \sqrt{(1,8478 \cdot (51 \cdot 10^{-12}))^2 - 4 \cdot (68 \cdot 10^{-12}) \cdot (51 \cdot 10^{-12}) \cdot 1 \cdot (1 + 2)}}{2\pi \cdot (5 \cdot 10^6) \cdot (68 \cdot 10^{-12}) \cdot (51 \cdot 10^{-12})} = 30 \text{ (Ом)}.$$

З ряду стандартних значень обираємо:

R2 – CF-25-0,250-30 Ом ±5%.

$$R1 = \frac{R2}{-A_{01}} = \frac{30}{2} = 15 \text{ (Ом)}.$$

З ряду стандартних значень обираємо:

R1 – CF-25-0,250-15 Ом ±5%.

$$R3 = \frac{b_1}{(2\pi f_c)^2 \cdot C1 \cdot C2 \cdot R2} = \frac{1}{(2\pi \cdot (5 \cdot 10^6))^2 \cdot (68 \cdot 10^{-12})(43 \cdot 10^{-12}) \cdot 30} = 110 \text{ (Ом)}.$$

З ряду стандартних значень обираємо:

R3 – CF-25-0,250-100 Ом ±5%.

Значення опорів другого каскаду:

$$R5 = \frac{a_2 \cdot C4 - \sqrt{(a_2)^2 \cdot (C4)^2 - 4 \cdot C3 \cdot C4 \cdot b_2 (1 - A_{02})}}{4\pi \cdot f_c \cdot C3 \cdot C4}$$

$$R5 = \frac{0,7654 \cdot (180 \cdot 10^{-12}) - \sqrt{(0,7654)^2 \cdot (180 \cdot 10^{-12})^2 - 4 \cdot (51 \cdot 10^{-12}) \cdot (180 \cdot 10^{-12}) \cdot 1 \cdot (1+5)}}{4\pi \cdot (5 \cdot 10^6) \cdot (180 \cdot 10^{-12}) \cdot (51 \cdot 10^{-12})} = 30,8 \text{ (Ом)}.$$

З ряду стандартних значень обираємо:

R5 – CF-25-0,250-33 Ом ±5 %.

$$R4 = \frac{R5}{-A_{02}},$$

$$R4 = \frac{33}{5} = 6,6 \text{ (Ом)}.$$

З ряду стандартних значень обираємо:

R4 – CF-25-0,250-6,8 Ом ±5 %.

$$R6 = \frac{b_2}{4\pi^2 \cdot f_c^2 \cdot C3 \cdot C4 \cdot R5},$$

$$R6 = \frac{1}{(2\pi \cdot (5 \cdot 10^6))^2 \cdot (51 \cdot 10^{-12}) \cdot (180 \cdot 10^{-12}) \cdot 33} = 10,6 \text{ (Ом)}.$$

З ряду стандартних значень обираємо:

R4 – CF-25-0,250-11 Ом $\pm 5\%$.

При виборі ОП необхідно враховувати діапазон частот фільтра, при цьому частота підсилення ОП має бути більше добутку частоти зрізу і коефіцієнта підсилення. Іншим важливим параметром ОП являється вхідний опір, він має бути більшим десятикратно за максимальний опір в схемі.

3.2 Опорний генератор

З розвитком техніки стало можливо формувати коливання будь-якої частоти із однієї вихідної частоти. В результаті з'явилась можливість виділяти додаткові засоби для підвищення стабільності частоти генератора і тим самим отримати цілий ряд частот з дуже високою стабільністю. Такий генератор частот отримав назву опорний генератор.

Для отримання стабільності коливань LC генераторів застосовується особливі конструктивні моделі:

- зміна індуктивності за рахунок розширення металу проволочки компенсували вибір матеріалу сердечника, вплив якого був зворотним по відношенню до впливу провідників індуктивності;

- в контур вмикались конденсатори з різними температурним коефіцієнтом ємності.

Таким чином вдавалося досягти стабільності частоти опорного генератора 10^{-4} (на частоті 10 МГц відхилення по частоті складало 1 кГц).

Одночасно велись роботи по застосуванню нових методів отримання стабільності коливань. Революційним проривом стала розробка генераторів з застосуванням кварцових резонаторів. Кварцові генератори в яких кварцовий резонатор використовується в якості елемента контуру називають осциляторним, а генератори в яких кварцовий резонатор ввімкнений в коло зворотного зв'язку, називають генераторами послідовного резонансу.

Осциляторна схема кварцового генератора з кварцом між колектором і базою, виконана по схемі з заземленим емітером (ємнісна трьохточка) приведена на рис. 3.5.

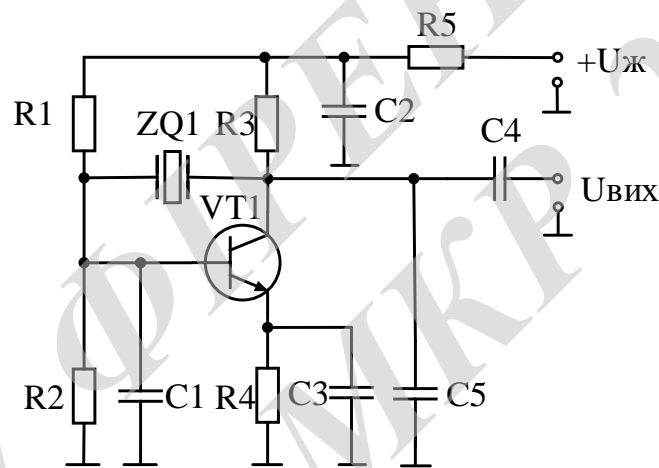


Рисунок 3.5 – Осциляторна схема кварцового генератора

В наш час ємнісна трьохточка знаходить широке застосування в діапазоні частот до 22 МГц при роботі резонатора на основній частоті, і до 66 МГц при збудженні на третій гармоніці.

Автогенератор з кварцовим резонатором між колектором і базою в схемі з заземленням по високій частоті емітером, не схильний до паразитних коливань на ангармонічних обертонах, має хорошу стабільність частоти при зміні напруги живлення і температури.

В осциляторних генераторах, що працюють на частоті вище 22 МГц, резонатор зазвичай збуджують на 3-й або 5-й гармоніці, але не на більш високих, так як сильний вплив паралельної ємності.

В роботі буде використана схема опорного генератора послідовного резонансу (рис. 3.6).

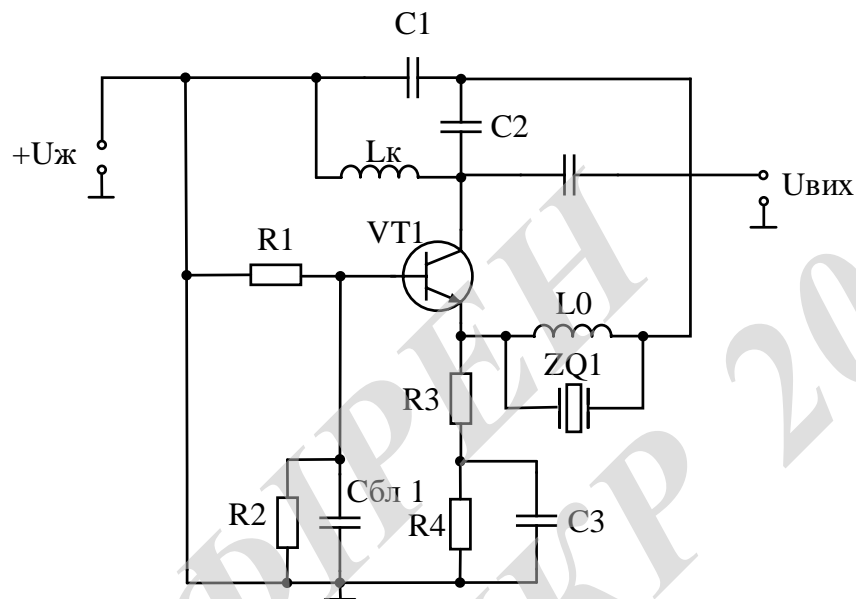


Рисунок 3.6 – Схема кварцового опорного генератора послідовного резонансу

Опорний кварцовий генератор з кварзовим резонатором, який ввімкнений в коло зворотного зв'язку. В такій схемі можливе порушення коливань нестабілізованих кварзовим резонатором за рахунок паразитної ємності, для придушення таких коливань резонатор шунтується індуктивністю L_0 .

Дана схема краще працює на більш високих частотах, та має кращі стабілізаційні властивості на частоті 100 МГц, тому її використання є більш доцільним.

З огляду на те, що максимальна стабільність частоти автогенератора може бути отримана тільки в тому випадку, коли частота генерації збігається з частотою послідовного резонансу кварцового резонатора, доцільно обрати кварцовий резонатор з частотою $f_{кв} = f_r = f = 100\text{МГц}$.

Розрахунок параметрів і режиму роботи кварцового генератора:

Для даної схеми вибираємо транзистор 2N3904S з наступними параметрами:

$f_T = 300$ МГц – гранична частота підсилення за струмом в схемі с СЕ;

$S_{гр} = 0,05$ А/В – крутизна лінії граничного режиму транзистора;

$\beta_0 = 100$ – коефіцієнт передачі за струмом;

$E_{\beta_0} = 0,25$ В – напруга закриття;

$C_k = 4$ пФ – ємність база-колектор;

$r_b = 60$ Ом – опір матеріалу бази;

$\theta = 80^\circ$ – кут відсічки (коефіцієнти Берга $\alpha_1 = 0,472$ і $\alpha_0 = 0,286$).

Параметри кварцового резонатора:

Враховуючи, що максимальна стабільність частоти автогенератора може бути отримана тільки у випадку, коли частота генерації співпадає з частотою послідовного резонансу кварцового резонатора, вибираємо кварцовий резонатор з частотою $f_{кв} = f_T = f_{ОКГ} = 100$ МГц.

Параметри кварцового генератора:

$f_{кв} = 100$ МГц;

$R_{кв} = 150$ Ом;

$Q_{кв} = 32000$;

$C_0 = 5$ пФ;

$P_{кв} = 0,3$ мВт.

3.2.1 Розрахунок параметрів транзистора

1) Максимально можлива амплітуда імпульсу колекторного струму транзистора:

$$i_{km} < \sqrt{\frac{2P_{кв}}{\alpha_1^2 \cdot R_{кв}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (0,3 \cdot 10^{-3})}{0,472^2 \cdot 150}} = 4,23 \cdot 10^{-3} \text{ (А)}.$$

Задаємо значення $i_{km} = 3,5 \text{ мА}$.

2) Визначаємо крутизну транзистора:

$$S_0 = \frac{15\beta_0 i_{km}}{15i_{km}r_{\bar{o}} + \beta_0} = \frac{15 \cdot 100 \cdot (3,5 \cdot 10^{-3})}{15 \cdot (3,5 \cdot 10^{-3}) \cdot 60 + 100} = 0,05 \text{ (A/B)}.$$

Середня крутизна на 1-й гармоніці:

$$S_{10} = S_0 \alpha_1 (1 - \cos \theta) = 0,05 \cdot 0,472 (1 - \cos(-45^\circ)) = 0,26 \text{ (A/B)}.$$

$$S_1 = S_{10} \cos \theta = 0,2 \text{ (A/B)}.$$

$$\theta = -\arctan \frac{f_z}{f_s} = -\arctan \frac{100}{100} = -45^\circ.$$

$$f_s = \frac{f_T}{S_0 r_{\bar{o}}} = \frac{300}{0,05 \cdot 60} = 100 \text{ (МГц)}.$$

3) Перша гармоніка колекторного струму:

$$I_{k1} = \alpha_1 i_{km} = (0,472 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3}) = 1,65 \text{ (мА)}.$$

$$U_{\bar{o}} = \frac{I_{k1}}{S_{10}} = \frac{1,65 \cdot 10^{-3}}{0,26} = 6,2 \text{ (мВ)}.$$

3.2.2. Розрахунок параметрів коливальної системи і кола зворотного зв'язку

1) Опір резистора емітерного кола:

$$R_4 = \frac{U_{\delta}}{\sqrt{2 \frac{P_{кв}}{R_{кв}} - i_{km} \alpha_1}} = \frac{6,2 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2 \frac{0,3 \cdot 10^{-3}}{150} - (3,5 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,472}} = 17,8 \approx 18 \text{ (Ом)}.$$

R_4 – CF-25-0,250-18 Ом ± 5 %.

$$R_{ем} = \frac{R_4}{1 + S_{10} R_4} = \frac{18}{1 + 0,26 \cdot 18} = 3 \text{ (Ом)}.$$

2) Задаємося $R'_{ек}$:

$$R'_{ек} = 0,25 R_{кв} = 0,25 \cdot 100 = 37,5 \text{ (Ом)}.$$

3) Допоміжний параметр:

$$A = \frac{S_{10} R_{ем} R_{ек}}{R_{ем} + R_{ек} + R_{кв}} = \frac{0,26 \cdot 3 \cdot 37,5}{3 + 37,5 + 150} = 0,15.$$

4) Співвідношення ємностей:

$$K = \frac{A}{1 - A} = \frac{0,15}{1 - 0,15} = 0,17.$$

5) Еквівалентний опір контуру:

$$R_{ек} = \frac{R'_{ек} (1 + K^2)}{K^2} = \frac{37,5(1 + 0,17^2)}{0,17^2} = 1335 \text{ (Ом)}.$$

6) Параметри коливної системи:

$$\rho_k = \frac{R_{ек}}{Q_{кв}} = \frac{1335}{32000} = 0,041 \text{ (Ом)};$$

$$C_k = \frac{1}{2\pi f_{кв} \rho_{кв}} = \frac{1}{2\pi(100 \cdot 10^6) \cdot 0,041} = 0,38 \text{ (нФ)};$$

$$L_k = \frac{\rho_k}{2\pi f_{кв}} = \frac{0,041}{2\pi(100 \cdot 10^6)} = 6,5 \cdot 10^{-11} \Rightarrow 68 \text{ (пГн)};$$

$$C_2 = C_k \frac{1 + K}{K} = 0,38 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{1 + 0,17}{0,17} = 2,6 \cdot 10^{-9} \Rightarrow 3,3 \text{ (пФ)};$$

$$C_1 = KC_2 = 0,17 \cdot 3,3 \cdot 10^{-9} \Rightarrow 68 \text{ (нФ)}.$$

З ряду стандартних значень обираємо:

C1 – К10–47–25В–68 нФ±5%.

C2 – К10–47–25В–3,3 пФ±5%.

7) Індуктивність, що нейтралізує ємність кварцотримача:

$$L_0 = \frac{1}{(2\pi f_{кв})^2 C_0} = \frac{1}{(2\pi(100 \cdot 10^6))^2 \cdot (5 \cdot 10^{-12})} = 50 \cdot 10^{-6} \Rightarrow 50 \text{ (мкГн)}.$$

3.2.2 Розрахунок енергетичних параметрів генератора

$$1) \quad \delta_1^2 = \left(\frac{1+K}{K}\right)^2 \frac{R_{кв} + R_{ем}}{R_{ек}} = \left(\frac{1+0,17}{0,17}\right)^2 \frac{150+3}{1335} = 5,42.$$

2) Опір колекторної напруги транзистора:

$$R_{к.н.} = \frac{R_{ек}}{(1+K)^2 \left(1 + \frac{1}{\delta_1^2}\right)} = \frac{1335}{(1+0,17)^2 \left(1 + \frac{1}{5,42}\right)} = 823,32 \text{ (Ом)}.$$

3) Амплітуда напруги на колекторі:

$$U_k = i_{км} \alpha_1 R_{к.н.} = 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,472 \cdot 823,32 = 1,36 \text{ (В)}.$$

2.3.4 Режим роботи транзистора

1) з умови отримання недонапруженого режиму роботи $E_k < (0,3 \dots 0,6) U_{к.доп.}$ оберемо:

$$E_k = 0,3 U_{к.доп.} = 0,3 \cdot 60 = 18 \text{ (В)}.$$

2) Перевірка режиму роботи транзистора:

$$U_{кзр} = E_k - \frac{i_{км}}{S_{зр}} = 18 - \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{0,05} = 17,93 \text{ (В)}.$$

Так як $U_k < U_{кгр}$, це підтверджує роботу генератора в недонапруженому режимі.

3) Розрахунок потужності, що споживається від джерела колекторної напруги:

$$P_0 = E_k i_{km} \alpha_0 = 18 \cdot (3,5 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,286 = 18 \text{ (мВт)}.$$

4) Розрахунок потужності, що розсіюється на колекторі транзистора:

$$P_k = P_0 - P_{кв} = 18 - 0,3 = 17,7 \text{ (мВт)}.$$

5) Розрахунок ККД:

$$\eta = \frac{P_{кв}}{P_0} = \frac{0,3}{18} = 1,6\%$$

2.3.5. Розрахунок кола живлення

1) Розрахунок постійної складової бази:

$$I_{\bar{\sigma}0} = \frac{i_{km} \alpha_0}{\beta_0} = \frac{(3,5 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,286}{100} = 10 \text{ (мкА)}.$$

2) Напруга зміщення на базі:

$$E_{\bar{\sigma}} = -U_{\bar{\sigma}} \cos \theta + E_{\bar{\sigma}0} = -(6,2 \cdot 10^{-3}) \cdot \cos(-45^\circ) + 0,25 = 0,25 \text{ (В)}.$$

3) Вибір значення опору в емітерному колі:

$$R_e = \frac{(50 \dots 100)}{S_0} = \frac{80}{0,05} = 1600 \approx 1,6 \text{ (кОм)}.$$

4) Струм базового дільника:

$$I_{\text{діл}} = (5 \dots 10) I_{\text{б0}} = 8 I_{\text{б0}} = 80 \text{ (мкА)}.$$

5) Напруга джерела колекторного живлення:

$$E_{i_k} = E_{\kappa} + (I_{k0} + I_{\text{б0}}) R_e = E_{\kappa} + (\alpha_0 i_{k_m} + I_{\text{б0}}) R_e,$$

$$E_{i_k} = 18 + ((0,286 \cdot (3,5 \cdot 10^{-3})) + 10^{-5}) 1600 = 19,6 \text{ (В)}.$$

6) Розрахунок R1:

$$R1 = \frac{E_{i_k} - E_{\text{б}}}{I_{\text{діл}}} = \frac{19,6 - 0,25}{80 \cdot 10^{-6}} = 24 \cdot 10^4 \Rightarrow 241 \text{ (кОм)}.$$

З ряду стандартних значень обираємо:

R1 – CF-25-0,250-270 кОм ± 5 %.

7) Розрахунок R2:

$$R2 = \frac{E_{\text{б}}}{I_{\text{діл}}} = \frac{0,25}{80 \cdot 10^{-6}} = 3125 \Rightarrow 3,3 \text{ (кОм)}.$$

З ряду стандартних значень обираємо:

R2 – CF-25-0,250-3,3 кОм ±5 %.

8) Ємність конденсатора C_e , має бути достатньо велика для забезпечення фільтрації змінної складової ($R_e C_e > 1/\omega_T$), але, з іншої сторони, має забезпечувати стаціонарний режим коливань генератора. Ємність C_e може бути визначена при відомих R_e , Q_k и ω_2 з нерівності:

$$\frac{20}{\omega_2} < R_e C_e < \frac{2Q_{кв}}{\omega_2} \Rightarrow \frac{20}{2\pi f_2 C_e} < C_e < \frac{2Q_{кв}}{2\pi f_2 C_e} \Rightarrow 2,526 \cdot 10^{-10} < C_e < 1,263 \cdot 10^{-9}$$

Вибираємо стандартне значення ємності $C_e = 1,2$ нФ.

9) Знайдемо значення опору дільника:

$$R_3 = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2} = \frac{(241 \cdot 10^3)(3,3 \cdot 10^3)}{241 \cdot 10^3 + 3,3 \cdot 10^3} = 3255 \text{ (Ом)} \Rightarrow 3,3 \text{ (кОм)}.$$

З ряду стандартних значень обираємо:

R3 – CF-25-0,250-3,3кОм ±5 %.

10) Для забезпечення високої добротності коливальної системи опір базового дільника R_d має бути суттєво більше опору вітки X_2 між базою і емітером, а з точки зору термостабільності – не має перевищувати $(4 \dots 6)R_e$, тобто:

$$X_2 = \frac{1}{\omega_2 C_{бл1}} \ll R_d \Rightarrow C_{бл1} = 3,3 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} \Rightarrow 3,3 \text{ (нФ)}.$$

З ряду стандартних значень обираємо:

Сбл1 – К10–47-25В-3,3 нФ±5%.

4 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

4.1 Обґрунтування вибору пакету моделюючих програм

У даному розділі магістерської кваліфікаційної роботи буде проведено моделювання роботи схеми суматора сигналів та ФНЧ 4-го порядку.

В якості програми для моделювання обрано програму NI Multisim. MultiSim представляє собою справжню лабораторію схемотехнічного моделювання, яка завдяки простому інтерфейсу дозволяє з легкістю моделювати складні принципові схеми і проектувати багат шарові друковані плати. В розпорядженні користувача широкий набір бібліотек компонентів, параметри і режими роботи яких можна змінювати в широкому діапазоні значень. Дана програма дозволяє підключати до схеми, що розроблена в її середовищі, віртуальні прилади – програмні моделі контрольно-вимірювальних пристроїв, які відповідають реальним. Використання віртуальних пристроїв (осцилографів, генераторів сигналів, частотомірів і т.д.) – це простий і зрозумілий метод взаємодії з схемою, що майже не відрізняється від традиційного при тестуванні або проектуванні пристроїв. Програмне середовище Multisim надає велику кількість віртуальних інструментів, які можна використати для вимірювання і дослідження поведінки розроблених електричних схем. Принцип роботи всіх цих інструментів ідентичний принципу роботи реальних аналогів цих пристроїв.

Важливою особливістю програми є те, що Multisim підтримує взаємодію з графічним середовищем LabVIEW, що призначена для розробки програмно-апаратних засобів вимірювання і керування.

Недоліком цієї програми є невеликий вибір компонентів бібліотеки мікроконтролерів .

4.2 Моделювання суматора

Для проведення моделювання, в середовищі NI Multisim складемо наступну схему суматора (рис. 4.1.) та задаємо параметри елементів схеми.

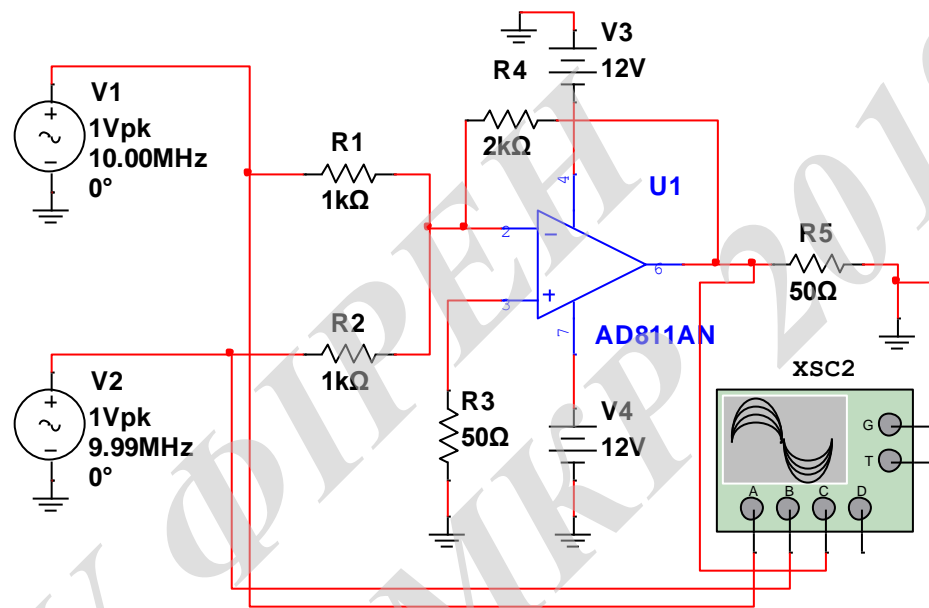


Рисунок 4.1 – Схема суматора для моделювання

Дана схема являє собою інвертувальний суматор що, сумує напруги генераторів V1 та V2 частоти яких є близькими. На входи мікросхеми операційного підсилювача подаються гармонічні коливання з близькими частотами та амплітудами 1 В. Щоб дослідити сигнали на вході та виході суматора використаємо багатоканальний осцилограф. Це дає нам можливість спостерігати на екрані осцилографа усі три сигнали одночасно або перемикати канали та виводити на екран лише один сигнал.

На рис. 4.2 зображено сигнал, що надходить на перший вхід суматора. Амплітуда сигналу 1 В, а частота коливання 10 MHz.



Рисунок 4.2 – Сигнал 1-го джерела сигналу

На рис. 4.3 зображено сигнал, що надходить на другий вхід суматора. Амплітуда сигналу 1 В, а частота коливання 9,99 МГц.

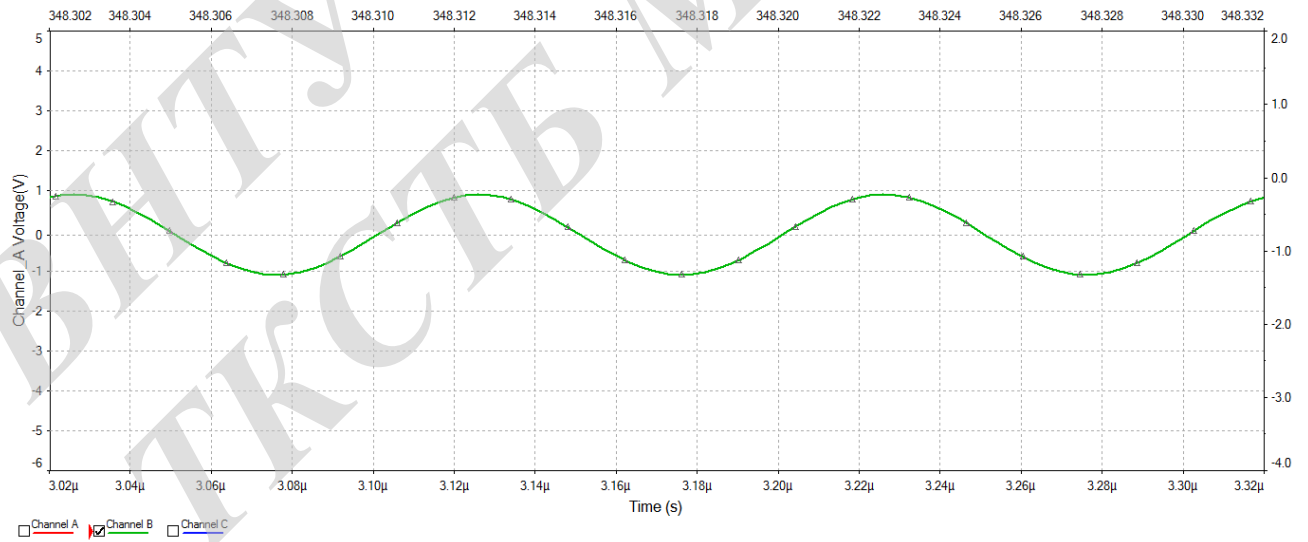


Рисунок 4.3 – Сигнал 2-го джерела сигналу

На рис. 4.4 зображено сигнали, що надходять на вхід суматора.

Даний рисунок дає змогу порівняти сигнали, що надходять на вхід суматора. На рисунку видно, що ці сигнали мають однакову амплітуду, але мають різні частоти.

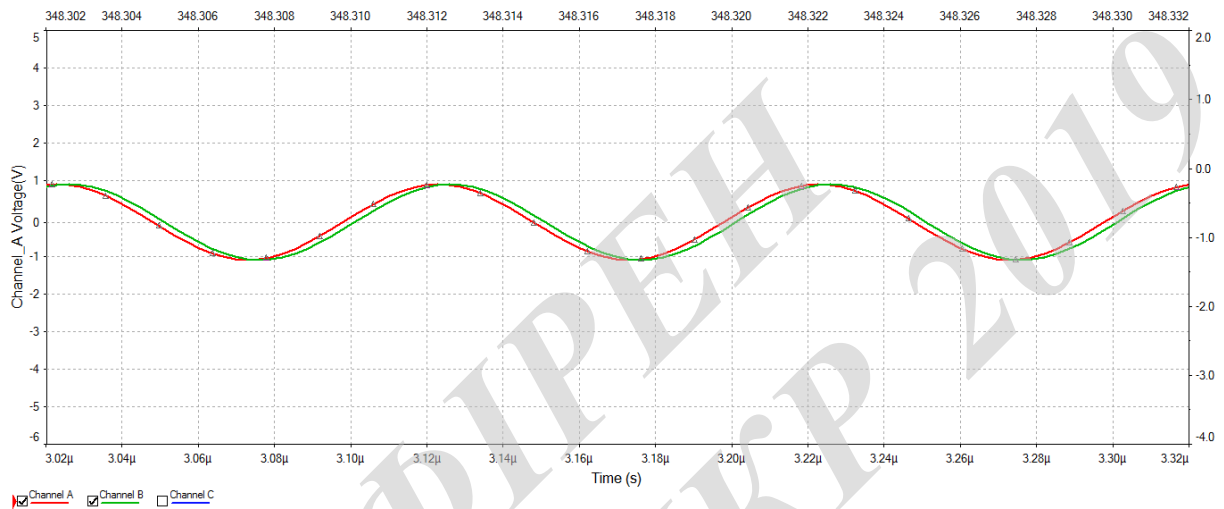


Рисунок 4.4 – Сигнали 1-го та 2-го джерел сигналу

На рис. 4.5 зображено сигнал на виході суматора. Сигнал на виході є інвертованим та підсиленим.

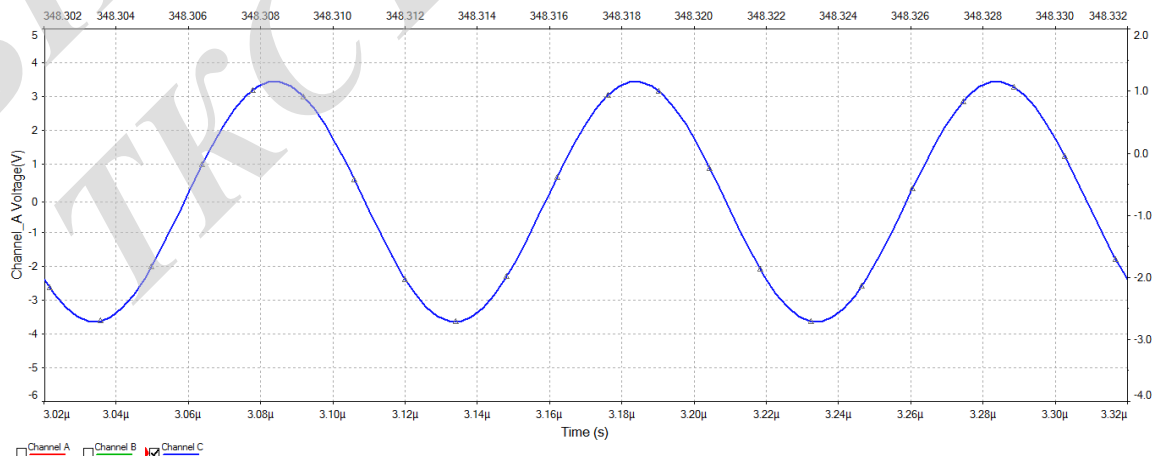


Рисунок 4.5 – Сигнал на виході суматора

Для порівняння виведемо три сигнали на екран осцилографа одночасно. На рис. 4.6 зображено вхідні та вихідний сигнали.

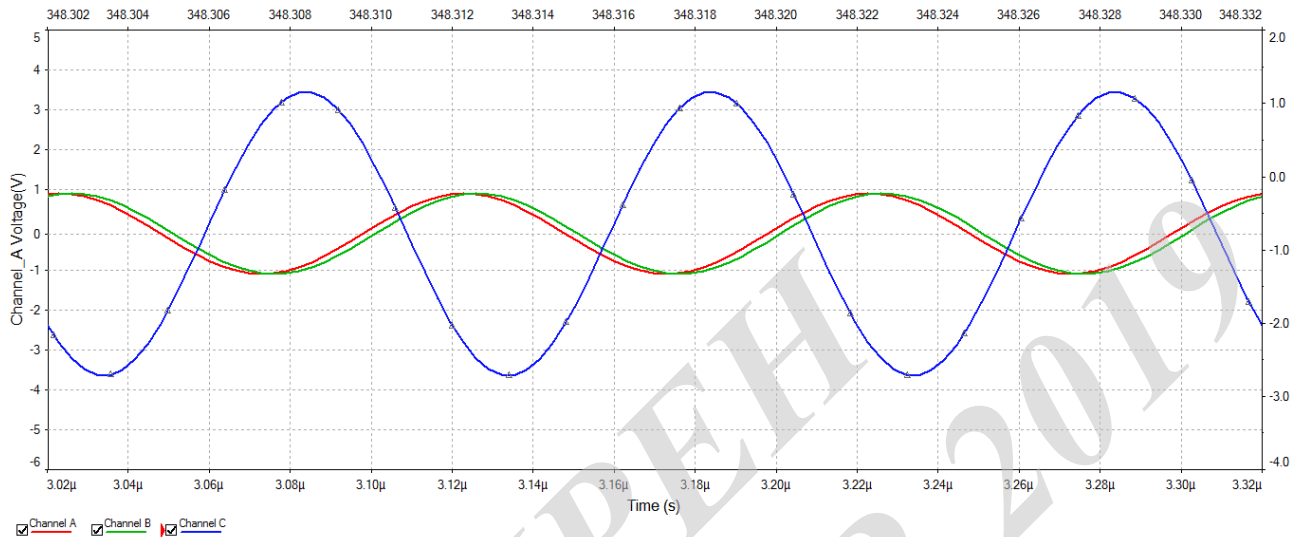


Рисунок 4.6 – Вхідні та вихідний сигнали

Як видно з осцилограми сигнал є підсилений та інвертований, що підтверджує коректність роботи суматора, однак, вихідний сигнал має фазовий зсув відносно вхідних сигналів. Він повинен мати максимальну амплітуду в момент, коли сигнали на вході накладаються один на одного. Цей фазовий зсув можна усунути замінивши операційний підсилювач в схемі.

Так як в схемі розробленого пристрою через суматор подається напруга у вигляді коротких імпульсів, то промодельюємо роботу суматора подавши на вхід імпульсні сигнали.

Для цього в якості джерел сигналів встановлюємо генератори імпульсів та задаємо їх параметри (амплітуда, тривалість, період) (рис. 4.7). Ці генератори мають однакові параметри амплітуди (1 В), тривалості імпульсів (1 мкс), але мають різний період (10 мкс та 11 мкс).

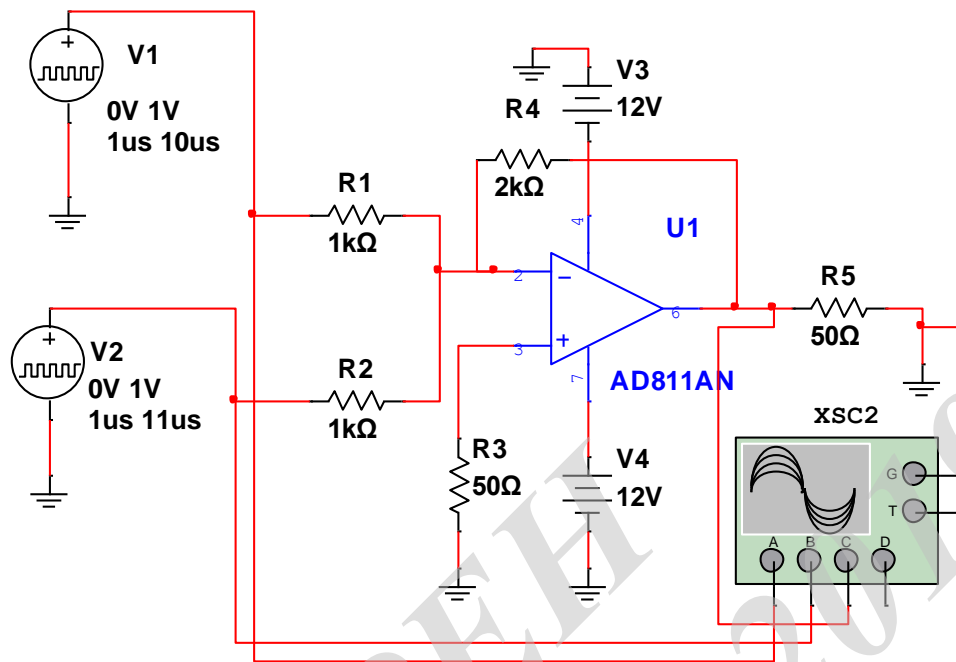


Рисунок 4.7 – Схема суматора для моделювання

На рис. 4.8 зображено сигнал, що надходить на перший вхід суматора з джерела сигналу V1. Амплітуда сигналу 1 В, період імпульсів 10 мкс.

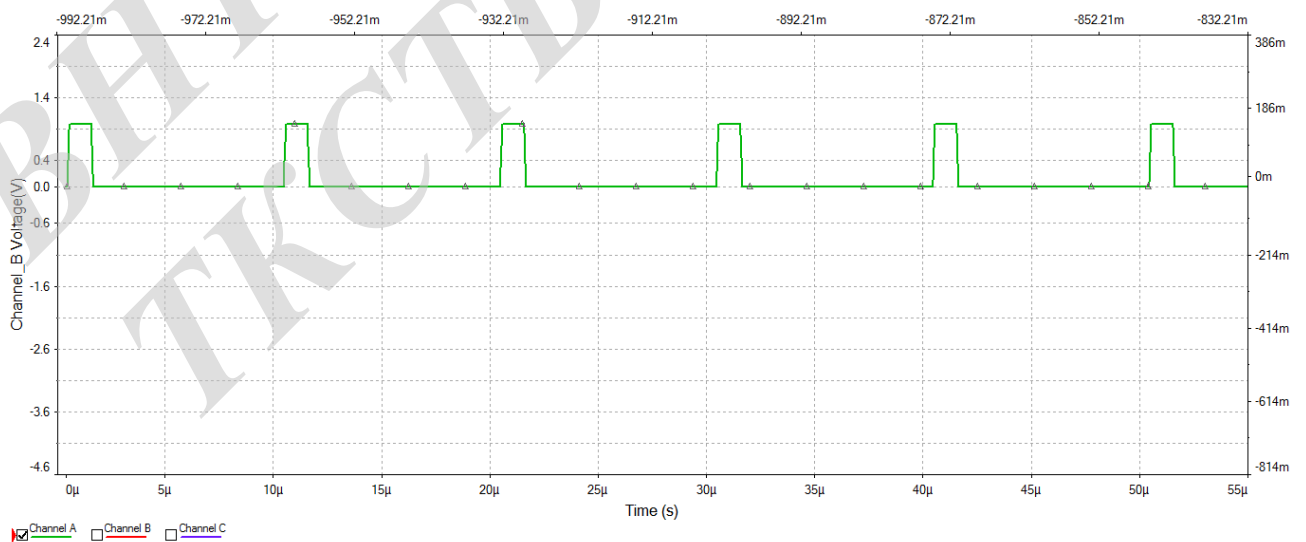


Рисунок 4.8 – Сигнал з джерела сигналу V1

На рис. 4.9 зображено сигнал, що надходить на другий вхід суматора з джерела сигналу V2. Амплітуда сигналу 1 В, період імпульсів 11 мкс.

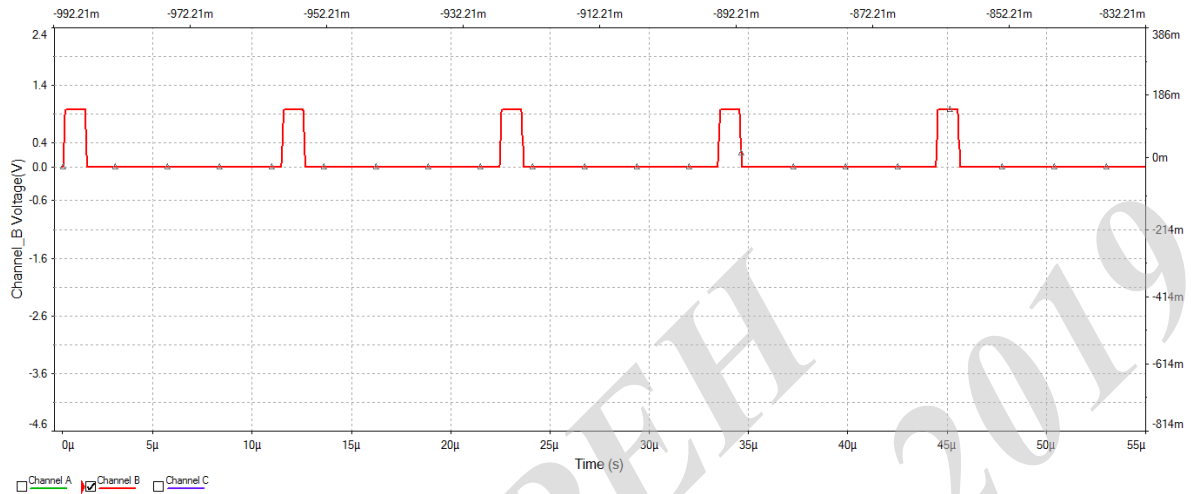


Рисунок 4.9 – Сигнал з джерела сигналу V2

На рис. 4.10 зображено сигнали, що надходять на вхід суматора. На рисунку видно, що ці сигнали мають однакову амплітуду, але мають різну тривалість імпульсів.

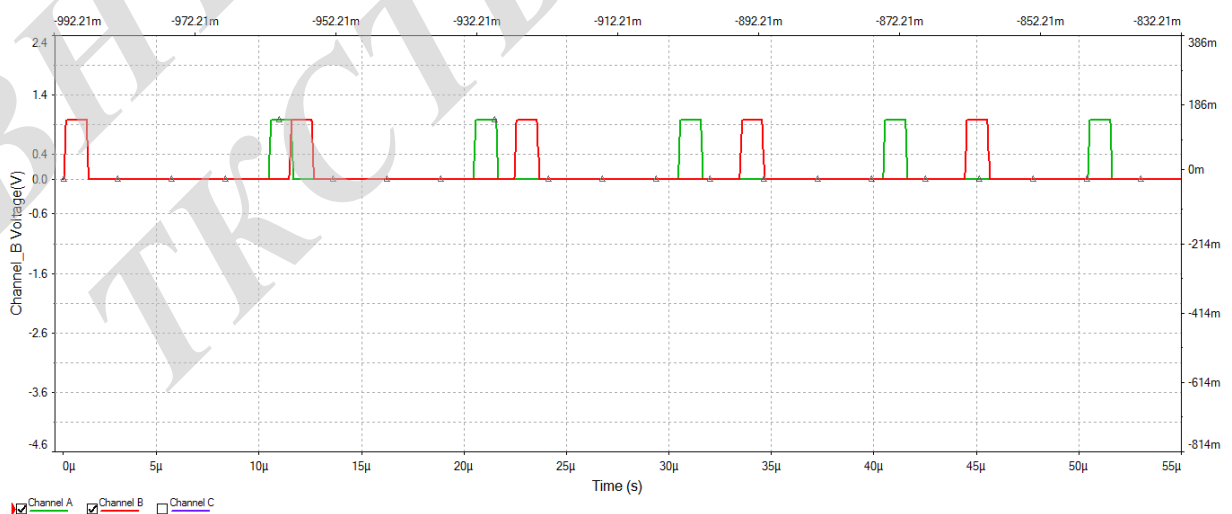


Рисунок 4.10 – Сигнал з джерел сигналу V1 та V2

На рис. 4.11 зображено сигнал на виході суматора. Сигнал на виході є інвертованим та підсиленим.

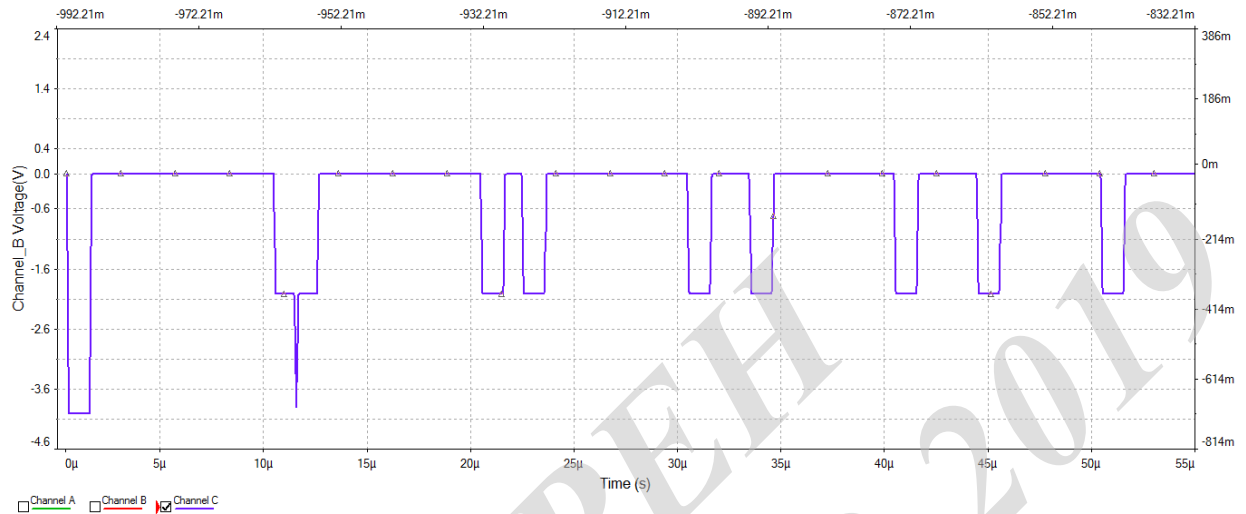


Рисунок 4.11 – Сигнал на виході суматора

Суматор підсилює та інвертує сигнали в моменти часу, коли імпульси з джерел сигналів V1 та V2 не співпадають. У випадку, коли імпульси накладаються суматор сумує амплітуди сигналів та підсилює їх (рис. 4.12).

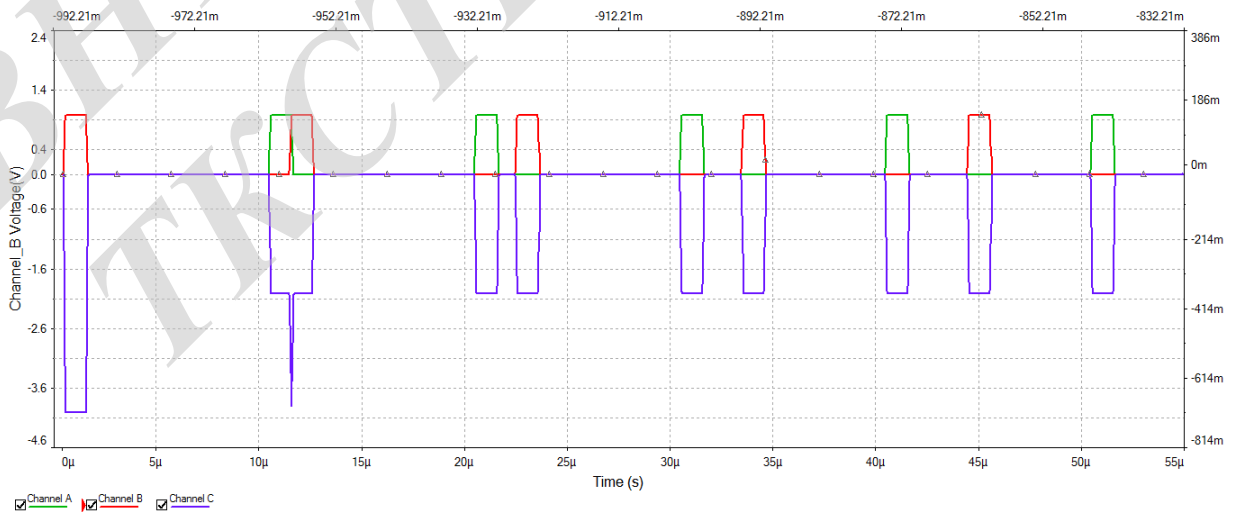


Рисунок 4.12 – Сигнали на вході та виході суматора

Як видно на осцилограмі в момент коли перший імпульс джерел V1 та V2 повністю співпали, на виході суматора ми отримуємо імпульс, що утворився завдяки сумуванню двох сигналів та їх підсиленню. В момент часу, коли співпали задній фронт імпульсу, що надходить від джерела V1 та передній фронт імпульсу, що надходить від джерела V2, ми отримаємо імпульс сигналу, що відповідає сумі сигналів з тривалістю, що рівна тривалості накладання двох імпульсів. В усі інші моменти часу ми отримаємо інвертовані імпульси, що підсилюються мікросхемою.

4.3 Моделювання фільтру нижніх частот

У цьому підрозділі проведемо моделювання схеми фільтру нижніх частот 4-го порядку з смугою пропускання 5 МГц (рис. 4.13).

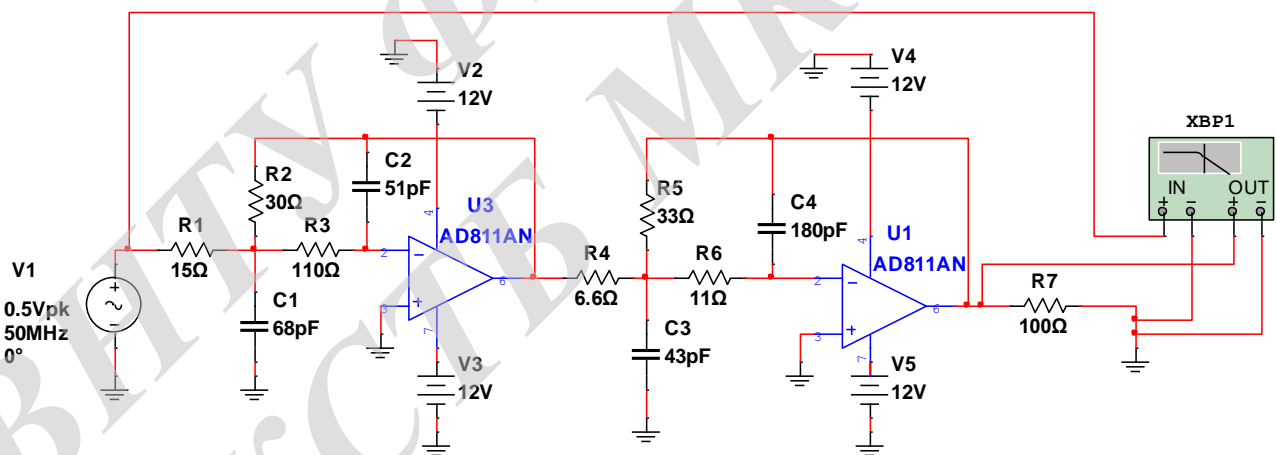


Рисунок 4.13 – Схема ФНЧ 4-го порядку в середовищі Multisim

Фільтр складається з двох послідовно ввімкнених ланок на операційних підсилювачах AD811AN.

Амплітудно- та фазочастотна характеристики фільтра 4-го порядку зображені на рис. 4.14 – 4.16.

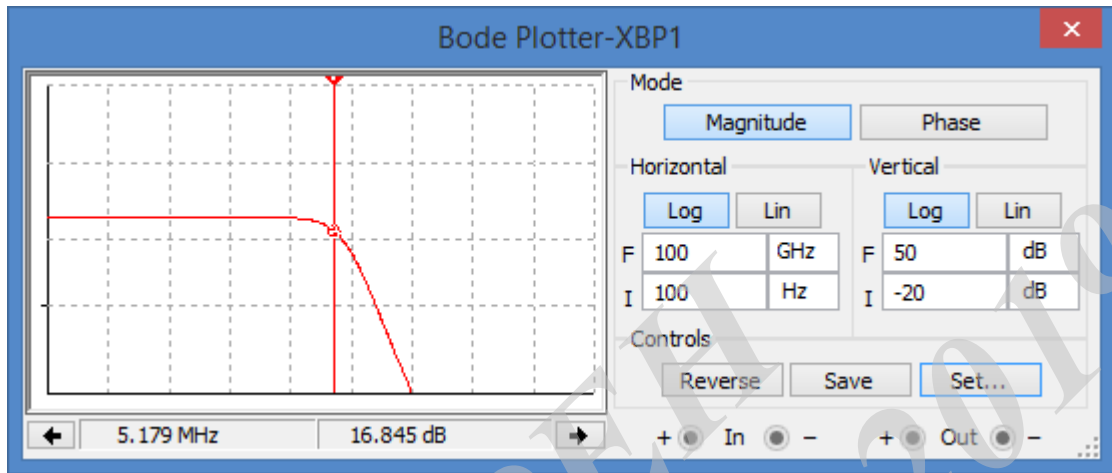


Рисунок 4.14 – АЧХ ФНЧ з точкою, що вказує частоту зрізу 5МГц

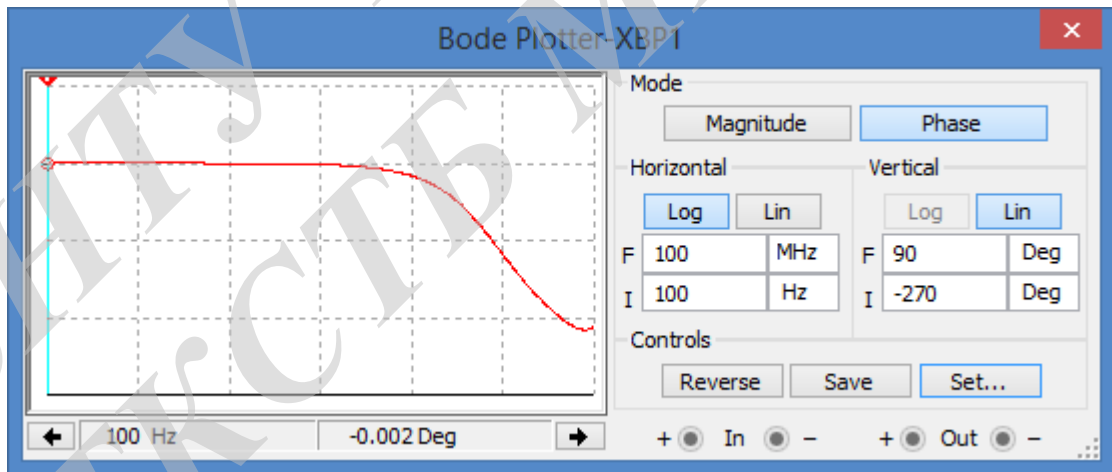


Рисунок 4.15 – ФЧХ ФНЧ

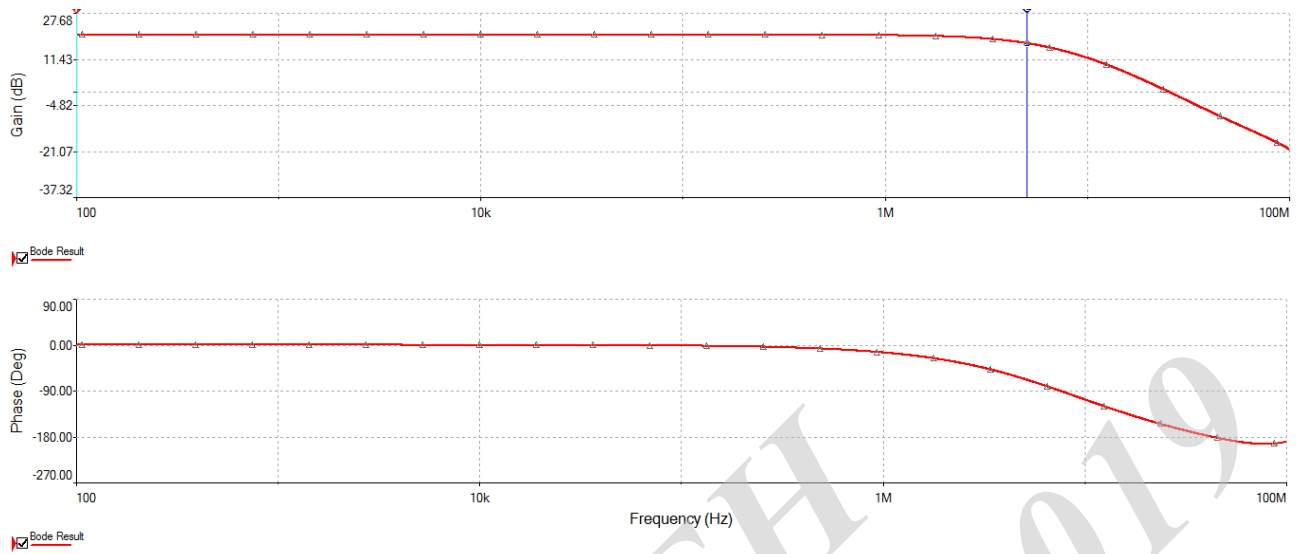


Рисунок 4.16 – АЧХ та ФЧХ фільтру

Як видно з представлених рисунків, АЧХ та ФЧХ фільтру відповідають фільтру нижніх частот, частота зрізу промодельованого фільтру становить 5 МГц. Отже, моделювання фільтру виконано вірно.

ВИСНОВКИ

В даній магістерській кваліфікаційній роботі було проведено розробку свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача. Даний свіп-генератор застосовують в вимірювальній апаратурі для реєстрації амплітудно- і фазочастотних характеристик елементів пристроїв, а також для вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі, хвильового опору.

В роботі в першому розділі проведено огляд методів вимірювання частотних характеристик та способів реалізації свіп-генераторів. Описано використання свіп-генераторів в складі характерографів та розглянуто, на прикладі вимірювання АЧХ, методи вимірювання частотних характеристик.

Розглянуто різні способи реалізації свіп-генераторів, описано принцип роботи свіп-генератора, що реалізований за допомогою поєднання сигналів двох генераторів. Перевагами цієї схеми є зручність керування, висока швидкість перестройки. Недоліками схеми є малий діапазон переналаштування, нелінійність характеристик керування, температурна залежність ємності варикапа. Розглянуто принцип роботи свіп-генератора на основі ЗІГ-резонатора. Вони мають широку смугу переналаштування і низький рівень фазових шумів. Недоліком таких свіп-генераторів є відносно повільне переналаштування частоти через обмеженість швидкості зміни струму в котушці електромагніту, температурна нестабільність і велика споживана потужність електромагнітом.

В другому розділі магістерської кваліфікаційної роботи запропоновано структурну схему свіп-генератора на основі частотного перетворювача, наведено принцип роботи схеми та здійснено вибір елементної бази свіп-генератора.

В третьому розділі проведено обґрунтування вибору схем та електричні розрахунки вузлів свіп-генератора. Розроблено повну структурну схему та описано принцип її роботи.

В четвертому розділі виконано моделювання у програмі NI Multisim. Проведено моделювання роботи суматора сигналів, ФНЧ четвертого порядку та наведено їхні характеристики.

В економічній частині магістерської кваліфікаційної роботи було проведено аудит розробленого свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача, розрахунок витрат на розробку свіп-генератора та розрахунок економічного ефекту від можливої комерціалізації розробки.

В розділі охорони праці та цивільного захисту було опрацьовано такі питання, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення обґрунтування вибору раціонального виду екрану для захисту від ЕМВ, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення розробки свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача, безпека в надзвичайних ситуаціях.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Данилин А.А., Лавренко Н.С. Измерения в радиоэлектронике: учеб.пособие / А. А. Данилин, Н.С. Лавренко. – Спб.: Изд-во «Лань», 2017. –408с.
2. Кувшинов В., Майстренко А. ЖИГ-генераторы и синтезаторы частот компании Micro Lambda Wireless / В. Кувшинов, А. Майстренко // Компоненты и технологии – журнал об электронных компонентах. – 2015. – №9: ВЧ и СВЧ технологи. – с. 34 – 38с.
3. Кононов С. П. Вимірювання частоти міток у пристроях на основі свіп-генератора [Електронний ресурс] / С. П. Кононов, В. Д. Росохай // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2010. – № 4.– Режим доступу : <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/236>.
4. С.П. Кононов, О.Б. Білик. Частотні перетворювачі свіп-генератора на основі ЗІГ-резонатора / С.П. Кононов, О.Б. Білик // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2019. – № 4. – с. 124-131.
5. Дингес С., Кочемасов В. СВЧ-преобразователи частоты. Часть 2. Классификация преобразователей по принципу функционирования / С. Дингес, В. Кочемасов // Компоненты и технологии – журнал об электронных компонентах. – 2018. – №5: ВЧ и СВЧ технологи. – с. 12 – 21.
6. Кандырин Н.П. Выбор генераторов при проектировании СВЧ синтезаторов с ФАПЧ / Н.П. Кандырин // Системи обробки інформації.–2015.– №8: Обробка інформації в складних технічних системах. – с. 25 – 30.
7. Титце У., Шенк К. Полупроводкиновая схемотехника. 12-е изд. Том II: / У. Титце, К. Шенк // Пер. с нем. – М.: ДКМ Пресс, 2008. – 832 с.
8. Методичні рекомендації з комерціалізації розробок, створених в результаті науково-технічної діяльності – К.: Наказ Державного комітету України з питань науки, інновацій та інформатики (Лист № 1/06-4-97 від 13.09.2010 р.).

9. Козловський В. О. Методичні вказівки до виконання студентами-магістрантами економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт. – Вінниця: ВНТУ, 2012.
10. ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
11. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
12. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.
13. Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.
14. ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
15. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.
16. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
17. Березюк О. В. Охорона праці. Підсумкова державна атестація спеціалістів, магістрів в галузях електроніки, радіотехніки, радіоелектронних апаратів та зв'язку : навчальний посібник / О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 104 с.
18. Правила улаштування електроустановок. 2-е вид., перероб. і доп. – Х: "Форт", 2009. – 736 с.
19. ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.
20. ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.
21. НАПБ Б.03.001-2004. Типові норми належності вогнегасників.
22. СНиП 2.09.02-85. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений.
23. Норми радіаційної безпеки України, МОЗ України. – К., 1997.

5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Технологічний аудит розробленого свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача

Як відомо, автоматизація вимірювань частотних характеристик є дуже важливою задачею, якій приділяється дуже велике значення в телекомунікаційних системах радіомовлення і телебачення. Оскільки вимірювання частотних характеристик є відносно складною операцією, то для спрощення вимірювання частотних характеристик використовують панорамні прилади на основі свіп-генераторів, що дає змогу підвищувати точність та швидкість вимірів.

Останнім часом все ширше почали використовуватися мікропроцесорні свіп-генератори, що дозволяє частково або повністю автоматизувати процес роботи з приладами. Перевага таких приладів над традиційними багатофункціональними приладами з жорсткою логікою полягає в тому, що дані пристрої є програмно-керованими і їх функціональні можливості визначаються набором програм, що зберігаються в енергонезалежній пам'яті.

Окрім того, використання в свіп-генераторах мікропроцесорів дозволило не тільки розширити функціональні можливості та підвищити точність встановлення частоти, але і створювати на їх основі інформаційно-вимірювальні комплекси, об'єднуючи в єдину систему засоби вимірювання і електронно-обчислювальні машини.

Разом з тим, на сьогодні загострилась проблема нестачі якісного, точного та сучасного вимірювального обладнання. Апаратура, яка використовується для вимірювання частотних характеристик радіоелектронних пристроїв часто не відповідає сучасним вимогам у точності, економії та швидкодії. По цій причині виникає потреба у розробці нової, економічно вигідної та надійної апаратури. Новий пристрій повинен бути придатний для використання в умовах лабораторій та забезпечувати достатню надійність та ремонтпридатність.

Тому перед нашою магістерською кваліфікаційною роботою було поставлене завдання продовжити дослідження в зазначеному напрямі і розробити більш ефективний свіп-генератор міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача.

Для цього нами було: проаналізовано існуючі методи вимірювання частотних характеристик; зроблено огляд способів реалізації свіп-генераторів; розроблено структурну схему свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача; проведено комп'ютерне моделювання основних вузлів розробленого свіп-генератора тощо.

В підсумку, на основі проведених досліджень нами було обґрунтовано та розроблено структуру більш економного та надійного свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача та виконано розробку його електричної схеми.

Проведемо технологічний аудит нашої розробки. Для проведення технологічного аудиту були запрошені компетентні фахівці: к.т.н., доцент Кононов С.П., к.т.н., доцент Стальченко О.В. та к.т.н., доцент Васильківський М.В.

При проведенні технологічного аудиту використовували рекомендації Державного комітету України з питань науки, інновацій та інформатики [8], наведеними в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Критерії оцінювання для проведення технологічного аудиту

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку

Продовження таблиці 5.1

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Крит.	0	1	2	3	4
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкуренція немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витрачати значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у ВПК	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві

Продовження таблиці 5.1

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Кри-терій	0	1	2	3	4
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

При проведенні технологічного аудиту запрошені експерти виставили оцінки по 12-ти критеріям [9], які зведені в таблицю 5.2.

Таблиця 5.2 – Результати технологічного аудиту нашої розробки

Критерії	Прізвище, ініціали експерта		
	Кононов С.П.	Стальченко О.В.	Васильківський М.В.
Бали, виставлені експертами:			
1	4	4	4
2	4	3	4
3	4	4	4
4	4	4	4
5	4	4	3
6	4	4	3
7	3	4	3
8	3	4	4
9	4	4	3
10	4	4	4
11	4	4	4
12	4	4	4
Сума балів	СБ ₁ = 46	СБ ₂ = 47	СБ ₃ = 44

Середньоарифметична сума балів, що їх виставили експерти, становить:

Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{\sum_{i=1}^3 СБ_i}{3} = \frac{46 + 47 + 44}{3} = \frac{137}{3} = 45,67$
--	--

Керуючись інформацією, наведеною в таблиці 5.3, визначимо технічний рівень та комерційний потенціал нашої розробки [9].

Таблиця 5.3 – Потенційні технічні рівні та комерційний потенціал розробки

Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$, розрахована на основі висновків експертів	Технічний рівень та комерційний потенціал розробки
0 – 10	Низький
11 – 20	Нижче середнього
21 – 30	Середній
31 – 40	Вище середнього
41 – 48	Високий

Оскільки середньоарифметична сума балів, що їх виставили запрошені експерти, дорівнює 45,67 балів, то можна зробити висновок, що розроблений нами свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача має високий технічний рівень та високий рівень комерційного потенціалу.

Це пояснюється тим, що нами вперше запропоновано нове схемне рішення свіп-генератора на основі частотного перетворювача, завдяки якому зменшується похибка встановлення мінімальної та максимальної частоти хитання та частотної смуги хитання, викликаних температурною нестабільністю та нелінійністю розгортання частоти автогенератора.

Окрім того, розроблений нами свіп-генератор дає змогу значно підвищити продуктивність роботи в діапазоні 30- 50 ГГц, підвищити точність вимірювань, автоматизувати процес досліджень частотних характеристик в діапазоні міліметрових хвиль.

5.2 Розрахунок витрат на розробку свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача

Основними витратами є [8]:

5.2.1. Основна заробітна плата Z_o розробників, яку можна розрахувати за формулою (4.1):

$$Z_o = \frac{M}{T_p} \cdot t \text{ грн,} \quad (5.1)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника, грн. У 2019 році величини окладів розробників коливалися в межах (4173...14750) грн/місяць;

T_p – число робочих днів в місяці; прийmemo $T_p = 22$ дні;

t – число робочих днів роботи фахівців.

Зроблені розрахунки основної заробітної плати розробників зведемо до таблиці 5.4:

Таблиця 5.4 – Основна заробітна плата розробників (округлено)

Найменування посади виконавця	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на оплату праці, грн	Примітка
1. Науковий керівник магістерської кваліфікаційної роботи	11379	517	25 годин	2154	При 6-ти годинному робочому дні
2. Фахівець-студент-магістрант	2112	96	68	6528	
3. Консультант (експерт)	9990	454	2,5 години	189	
Всього				$Z_o = 8871$ грн	

5.2.2. Додаткова заробітна плата Z_d розробників розраховується за формулою:

$$Z_d = (0,1...0,12) \cdot Z_o. \quad (5.2)$$

Для нашого випадку отримаємо:

$$Z_d = 0,107 \times 8871 = 949 \text{ грн.}$$

5.2.3. Нарахування на заробітну плату $НАР_{зп}$ розробників розраховуються за формулою:

$$НАР_{зп} = (Z_o + Z_d) \cdot \frac{\beta}{100}, \quad (5.3)$$

де $\beta = 22\%$ – ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування.

Для нашого випадку отримаємо:

$$НАР_{зп} = (8871 + 949) \times 0,22 = 2160 \text{ грн.}$$

5.2.4. Амортизація A основних засобів, обладнання, комп'ютерів тощо, які були використані під час виконання роботи, розраховується за формулою :

$$A = \frac{Ц \cdot H_a}{100} \cdot \frac{T}{12} \text{ грн,} \quad (5.4)$$

де $Ц$ – загальна балансова вартість основних засобів, обладнання, комп'ютерів тощо, які використовувалися під час виконання роботи,

N_a – річна норма амортизаційних відрахувань. Спрощено можна прийняти, що

$$N_a = (5...25)\%;$$

T – термін, використання кожного виду основних засобів, місяці.

Зроблені нами розрахунки зведемо у таблицю 5.5.

Таблиця 5.5 – Розрахунок амортизаційних відрахувань (округлено)

Найменування основних засобів	Балансова вартість, грн.	Норма амортизації, %	Термін використання, міс.	Величина амортизаційних відрахувань, грн.
1. Основні засоби, обладнання, комп'ютер тощо	22500	22,5	2,8	1181
2. Приміщення кафедри та факультету	10800	5,1	2,8	129
Всього				A = 1310

5.2.5. Витрати на матеріали M розраховуються за формулою:

$$M = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i - \sum_1^n V_i \cdot C_v \text{ грн.}, \quad (5.5)$$

де H_i – витрати матеріалу i -го найменування, кг; C_i – вартість матеріалу i -го найменування, грн/кг.; K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1,1...1,15)$; V_i – маса відходів матеріалу i -го найменування, кг; C_v – ціна відходів матеріалу i -го найменування, грн/кг.; n – кількість видів матеріалів.

5.2.6. Витрати на комплектуючі K розраховуються за формулою:

$$K = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i \text{ грн.}, \quad (5.6)$$

де N_i – кількість комплектуючих i -го виду, шт.; C_i – ціна комплектуючих i -го виду, грн; K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1,1 \dots 1,15)$; n – кількість видів комплектуючих.

Загальна вартість основних матеріалів та комплектуючих, які були використані під час виконання даної роботи складає приблизно 15000 грн.

5.2.7. Витрати на силову електроенергію V_e , що була використана при виконанні даної роботи, розраховуються за формулою:

$$V_e = \frac{V \cdot \Pi \cdot \Phi \cdot K_{\Pi}}{K_d}, \quad (5.7)$$

де V – вартість 1 кВт-год. електроенергії, в 2019 р. $V \approx 2,5$ грн/кВт;

Π – установлена потужність обладнання, кВт; $\Pi = 1,9$ кВт;

Φ – фактична кількість годин роботи обладнання, годин.

Прийmemo, що $\Phi = 170$ години;

K_{Π} – коефіцієнт використання потужності; $K_{\Pi} < 1 = 0,84$.

K_d – коефіцієнт корисної дії, $K_d = 0,71$.

Тоді витрати на силову електроенергію складуть:

$$V_e = \frac{V \cdot \Pi \cdot \Phi \cdot K_{\Pi}}{K_d} = \frac{2,5 \cdot 1,9 \cdot 170 \cdot 0,84}{0,71} \approx 955 \text{ грн.}$$

5.2.8. Інші витрати $V_{ін}$ (опалення, освітлення, утримання приміщень тощо) розраховуються як (100...300)% від основної заробітної плати розробників, тобто:

$$V_{ін} = (1..3) \times 3_o. \quad (5.8)$$

Для нашого випадку отримаємо:

$$V_{ін} = 2,55 \times 8871 \approx 22621 \text{ грн.}$$

5.2.9. Сума всіх попередніх статей витрат дає витрати на розробку свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача безпосередньо магістрантом – В.

$$B = 8871 + 949 + 2160 + 1310 + 15000 + 955 + 22621 = 51866 \text{ грн.}$$

5.2.10. Загальні витрати на остаточне завершення нашої розробки та оформлення її результатів розраховуються за формулою:

$$ЗВ = \frac{B}{\beta}, \quad (5.9)$$

де β – коефіцієнт, який характеризує етап виконання даної роботи на шляху до її можливого впровадження.

Якщо розробка знаходиться: на стадії науково-дослідних робіт, то $\beta \approx 0,1$; на стадії технічного проектування, то $\beta \approx 0,2$; на стадії розробки конструкторської документації, то $\beta \approx 0,3$; на стадії розробки технологій, то $\beta \approx 0,4$; на стадії розробки дослідного зразка, то $\beta \approx 0,5$; на стадії розробки промислового зразка, $\beta \approx 0,7$; на стадії впровадження, то $\beta \approx (0,8 - 0,9)$.

Для нашого випадку доцільно прийняти, що $\beta \approx 0,9$.

$$\text{Тоді: } ЗВ = \frac{51866}{0,9} = 57628,88 \text{ грн або приблизно 58 тисяч грн.}$$

Тобто загальні витрати на остаточне завершення нашої розробки та оформлення її результатів становлять приблизно 58 тис. грн.

5.3 Розрахунок економічного ефекту від можливої комерціалізації нашої розробки

Аналіз місткості ринку даної продукції, проведений нами, показав, що в даний час в Україні кількість реальних користувачів нашої розробки складає

приблизно 50 осіб. Оскільки розроблений нами свіп-генератор міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача має значно кращі функціональні характеристики, то він повинна користуватися підвищеним попитом на ринку принаймні протягом 3-х років після впровадження. Тобто наша розробка може бути впроваджена з 1 січня 2020 року, а її результати будуть виявлятися протягом 2020-го, 2021-го та 2022-го років.

Прогноз зростання попиту на нашу розробку складає по роках:

1-й рік після впровадження (2020 р.) – приблизно на + $\Delta 30$ шт.;

2-й рік після впровадження (2021 р.) – приблизно на + $\Delta 60$ шт.;

3-й рік після впровадження (2022 р.) – приблизно на + $\Delta 100$ шт.

Окрім того, розроблений нами свіп-генератор міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача можна реалізовувати на ринку дешевше, ніж аналогічні за функціями генератори, що автоматично суттєво збільшить попит на нашу розробку. Так, якщо подібний генератор Г4-141 Р4-МВМ-57 коштує на ринку приблизно 300 тис. грн, то нашу розробку можна реалізовувати на ринку за 250 тис. грн (приблизно 10 тис. доларів США), тобто на 50 тис. грн дешевше.

Розрахуємо можливе збільшення чистого прибутку $\Delta\Pi_i$, що його можна отримати потенційний інвестор від фінансування та впровадження нашої розробки [9]:

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\nu}{100}\right), \quad (5.10)$$

де ΔC_o – зміна основного якісного показника від впровадження результатів розробки у цьому році. Таким показником є зменшення ціни нової розробки, тобто $\Delta C_o = 250 - 300 = -50$ тис. грн;

N – основний кількісний показник, який визначає обсяг діяльності у році до впровадження результатів розробки; $N = 50$ шт.;

ΔN – покращення основного кількісного показника від впровадження результатів розробки. Таке покращення по роках становитиме, відповідно: +30, +60 та +100 шт.;

C_0 – основний якісний показник, який визначає обсяг діяльності у році після впровадження результатів розробки; для нашого випадку $C_0 = 250$ тис. грн;

n – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки; $n = 3$ роки;

λ – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість; $\lambda = 0,8333$;

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. Рекомендується приймати $\rho = (0,2...0,5)$; візьмемо $\rho = 0,5$;

ν – ставка податку на прибуток. У 2019 році $\nu = 18\%$.

Величина чистого прибутку $\Delta\Pi_1$ для потенційного інвестора протягом першого року від можливого впровадження нашої розробки (2020 р.) складе:

$$\Delta\Pi_1 = [(-50) \cdot 50 + 250 \cdot 30] \cdot 0,8333 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) \approx 2733 \text{ тис. грн.}$$

Величина чистого прибутку $\Delta\Pi_2$ для потенційного інвестора від можливого впровадження нашої розробки протягом другого (2021 р.) року складе:

$$\Delta\Pi_2 = [(-50) \cdot 50 + 250 \cdot 60] \cdot 0,8333 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) \approx 4271 \text{ тис. грн.}$$

Величина чистого прибутку $\Delta\Pi_3$ для потенційного інвестора від можливого впровадження нашої розробки протягом третього (2022 р.) року складе:

$$\Delta\Pi_3 = [(-50) \cdot 50 + 250 \cdot 100] \cdot 0,8333 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) \approx 7687 \text{ тис. грн.}$$

Приведена вартість всіх чистих прибутків ПП, що їх може отримати потенційний інвестор, розраховується за формулою:

$$\text{ПП} = \sum_1^t \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t}, \quad (5.11)$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої роботи, грн;

t – період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої роботи, роки. Для нашого випадку $t = 3$ роки;

τ – ставка дисконтування. Керуючись даними статистики за 2019 рік, прийmemo ставку дисконтування $\tau = 0,06$ (6%);

t – період часу від моменту здійснення тих чи інших платежів (отримання прибутків та вкладення інвестицій) до початку інвестицій..

Тоді приведена вартість всіх можливих чистих прибутків ПП, що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження нашої розробки, складе:

$$\text{ПП} = \frac{2733}{(1+0,06)^1} + \frac{4271}{(1+0,06)^2} + \frac{7687}{(1+0,06)^3} \approx 2578 + 3801 + 6454 = 12833 \text{ тис. грн.}$$

Далі розрахуємо теперішню вартість інвестицій PV, що повинні бути вкладені для реалізації нашої розробки:

$$\text{PV} = [(2...5) \times \text{ЗВ}] + \text{ДВ}, \quad (5.12)$$

де ЗВ – витрати на розробку; ЗВ = 58 тис. грн (див. формулу 4.9);

ДВ – додаткові витрати для інвестора, пов'язані з освоєнням та початком виробництва світл-генераторів міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача тощо.

За рекомендаціями експертів ДВ ≈ 1000 тис. грн.

Тоді для нашого випадку отримаємо:

$$PV = (2 \dots 5) \times 58 = [5 \times 58] + 1000 = 1290 \text{ тис. грн.}$$

Тоді абсолютний ефект від вкладених інвестицій $E_{\text{абс}}$ становитиме:

$$E_{\text{абс}} = \text{ПП} - PV, \quad (5.13)$$

де ПП – приведена вартість всіх можливих чистих прибутків від можливого впровадження нашої розробки, грн;

PV – теперішня вартість інвестицій $PV = 1290$ тис. грн.

Абсолютний ефект від можливого впровадження нашої розробки за три роки складе:

$$E_{\text{абс}} = 12833 - 1290 = 11543 \text{ тис. грн. або приблизно } 3847,67 \text{ тис. грн щорічно.}$$

Далі розрахуємо внутрішню норму дохідності $E_{\text{в}}$ вкладених в реалізацію нашого проекту інвестицій:

$$E_{\text{в}} = \sqrt[T_{\text{ж}}]{1 + \frac{E_{\text{абс}}}{PV}} - 1, \quad (5.14)$$

де $E_{\text{абс}}$ – абсолютний ефект вкладених інвестицій; $E_{\text{абс}} = 11543$ тис. грн;

PV – теперішня вартість початкових інвестицій $PV = 1290$ тис. грн;

$T_{\text{ж}}$ – життєвий цикл розробки, роки. $T_{\text{ж}} = 4$ роки.

Для нашого випадку:

$$E_{\text{в}} = \sqrt[4]{1 + \frac{11543}{1290}} - 1 = \sqrt[4]{1 + 8,948} - 1 = \sqrt[4]{9,948} - 1 = 1,7759 - 1 \approx 0,7759 \approx 77,59 \%.$$

Далі визначимо ту мінімальну дохідність, нижче за яку потенційний інвестор не буде зацікавлений вкладати кошти в нашу розробку. Мінімальна дохідність або мінімальна (бар'єрна) ставка дисконтування $\tau_{\text{мін}}$ визначається за формулою:

$$\tau = d + f, \quad (5.15)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2019 році в Україні $d = (0,10 \dots 0,20)$;

f – показник, що характеризує ризикованість вкладень; зазвичай, величина $f = (0,05 \dots 0,50)$, але може бути і значно більше.

Для нашого випадку отримаємо:

$$\tau_{\text{мін}} = 0,20 + 0,50 = 0,70 \text{ або } \tau_{\text{мін}} = 70\%.$$

Оскільки величина $E_b = 77,59\% > \tau_{\text{мін}} = 70\%$, то потенційний інвестор може бути зацікавлений у комерційному впровадженні нашої розробки.

Далі розраховуємо термін окупності коштів, вкладених у розробку та впровадження розробленого нами свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача.

Термін окупності $T_{\text{ок}}$ можна розрахувати за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{E_b}. \quad (5.16)$$

Для нашого випадку термін окупності $T_{\text{ок}}$ коштів, вкладених у розробку та впровадження розробленого свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача, складе:

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{0,7759} \approx 1,288 \text{ років,}$$

що свідчить про потенційну доцільність комерціалізації нашої розробки.

Результати виконаної економічної частини магістерської кваліфікаційної роботи зведено у таблицю:

Таблиця 5.6 – Результати виконаної економічної частини

Показники	Задані у ТЗ	Досягнуті у магістерській кваліфікаційній роботі	Висновок
1. Витрати на розробку свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача	Не більше 60 тис. грн	58 тис. грн.	Досягнуто
2. Абсолютний щорічний ефект від можливого впровадження розробки, тис. грн	не менше 3500 тис. грн	11543 тис. грн за 3 роки або по 3847,67 тис. грн щороку	Виконано
3. Внутрішня норма дохідності вкладених інвестицій, %	не менше 65%	77,59%	Досягнуто
4. Термін окупності, роки	до 3-х років	1,288 років	Виконано

Таким чином, основні техніко-економічні показники розробленого свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача, визначені у технічному завданні, виконані.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Завдання впровадження системи управління охороною праці – всебічне сприяння виконанню вимог, що цілком ліквідують, нейтралізують чи знижують до допустимих норм вплив на працюючих небезпечних та шкідливих виробничих факторів, гарантують усунення джерел небезпеки, ізолювання від них працівників, використання засобів, що усунуть небезпечні ситуації та підвищують технічну безпеку.

В цьому розділі проводиться розгляд небезпечних, шкідливих та уражаючих для людини і оточуючого середовища чинників, що утворюються під час проведення розробки свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача. В ньому розглядаються, зокрема, технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення обґрунтування вибору раціонального виду екрану для захисту від ЕМВ, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення розробки, безпека у надзвичайних ситуаціях.

Під час розробки даного пристрою на працівників впливають ті або інші небезпечні і шкідливі виробничі фактори (НШВФ) фізичної та психофізіологічної груп згідно [10].

Фізичні НШВФ: підвищена або понижена температура повітря робочої зони, підвищений рівень шуму на робочому місці, підвищений рівень статичної електрики, відсутність або недостатність природного освітлення, недостатня освітленість робочої зони, підвищена яскравість світла, відбита або пряма блискучість.

Психофізіологічні НШВФ: нервово-психічні перевантаження: розумове перенапруження, перенапруження аналізаторів, монотонність праці.

6.1 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

6.1.1 Мікроклімат та склад повітря робочої зони

Вибираємо для приміщення, де проводяться роботи з розробки свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача, категорію важкості робіт за фізичним навантаженням – легка Іб.

У відповідності із [11] допустимі показники мікроклімату у робочій зоні для холодного та теплого періодів року наведені у таблиці 3.1 додатку 3.

Перепад температури повітря за висотою робочої зони для всіх категорій робіт допускається до 3°C. При опроміненні менше 25% поверхні тіла працівника, допустима інтенсивність теплового опромінення – 100 Вт/м².

Вміст шкідливих речовин в повітрі робочої зони не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій (ГДК), які використовуються при проектуванні виробничих приміщень (будівель), обладнання, технологічних процесів, вентиляцій, для контролю за якістю виробничого середовища. ГДК шкідливих речовин, які використовуються в даному виробничому приміщенні наведено в таблиці 3.2 додатку 3.

З метою встановлення нормованих параметрів мікроклімату та чистоти повітря робочої зони передбачено: у приміщенні має бути розміщена система кондиціонування для теплого і опалення для холодного періодів року; здійснювати вологе прибирання кожного дня; застосування витяжної вентиляції, яка видаляє забруднення або нагріте повітря з приміщення, а також за допомогою неї контролюється швидкість руху повітря і вологість.

6.1.2 Виробниче освітлення

Для забезпечення гігієнічних раціональних умов на робочих місцях значні вимоги пред'являються до якісних та кількісних показників освітлення.

З погляду задач зорової роботи в приміщенні, де проводяться роботи з розробки свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача, згідно [12] знаходимо, що вони відповідають III розряду зорових робіт. Вибираємо контраст об'єкта з фоном – середній, а характеристику фону – середню, яким відповідає підрозряд *в*.

Нормативні значення коефіцієнта природного освітлення (КПО) та мінімальні значення освітленості для штучного освітлення наведені в таблиці 3.3 додатку 3.

Оскільки приміщення знаходиться у місті Вінниця (2-га група забезпеченості природним світлом), а світлові пройми орієнтовані за азимутом 135° , то за таких умов КЕО розраховується за формулою [3, 4]

$$e_N = e_n m_N [\%], \quad (6.1)$$

де e_n – табличне значення КЕО, %;

m_N – коефіцієнт світлового клімату;

N – номер групи забезпеченості природним світлом.

Підставляючи відомі значення отримаємо нормовані значення КПО для бокового та суміщеного освітлення:

$$e_{N,6} = 2 \cdot 0,85 = 1,7 (\%);$$

$$e_{N,c} = 1,2 \cdot 0,85 = 1,02 (\%).$$

Для забезпечення нормованих значень параметрів освітлення передбачено:

1) за недостатнього природного освітлення у світлий час доби доповнення штучним за допомогою люмінесцентних ламп з утворенням системи суміщеного освітлення;

2) застосування загального штучного освітлення у темний час доби.

6.1.3 Виробничі віброакустичні коливання

Зважаючи на те, що при експлуатації пристроїв крім усього іншого обладнання застосовується устаткування, робота якого генерує шум та вібрацію, потрібно передбачити шумовий та вібраційний захист.

Визначено, що приміщення, в якому проводиться робота з розробки свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача може мати робочі місця із шумом та вібрацією, який генерується електродвигунами вентиляційної системи.

З метою запобігання травмуванню працівників від дії шуму та вібрації вони підлягає нормуванню. Головним документом стосовно виробничого шуму, що діє в Україні, є [14], згідно з яким нормовані рівні звукового тиску, рівні звуку і еквівалентні рівні шуму на робочих місцях у промислових приміщеннях не мають бути більшими ніж значення, які приведені у таблиці 3.4 додатку 3. Норми виробничих вібрацій наведені в таблиці 3.5 додатку 3 для 3-ї категорії (технологічна) типу "в".

Для забезпечення допустимих показників віброакустичних коливань в приміщенні запропоновано: періодичне змащування підшипників вентиляторів вентиляційної системи; застосування в конструкціях устаткування віброізоляції та акустичних екранів.

6.1.4 Виробничі випромінювання

Аналіз умов праці показав, що приміщення, в якому проводиться робота з розробки свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача може містити електромагнітні випромінювання.

Гранично допустимі рівні електромагнітних полів наведені у таблиці 3.6 додатку 3.

З метою гарантування захисту і досягнення нормативних рівнів випромінювань потрібно використовувати екранування робочого місця і скорочення часу опромінення за рахунок перерв на відпочинок.

Обґрунтуємо вибір раціонального виду екрану для захисту від електромагнітного випромінювання. Товщина суцільного алюмінієвого екрану $\delta = 0,1$ мм, частота поля $f = 30000$ МГц. Крок сітки сітчастого екрану $d = 8$ мм, радіус дроту $r_0 = 7,5$ мм.

Вибір раціонального виду екрану для захисту від електромагнітного випромінювання проведемо серед суцільного та сітчастого за критерієм максимальної ефективності екранування.

Ефективність екранування $L_{суц}$ від електромагнітного випромінювання у випадку використання суцільного екрану можна визначити з формули

$$\delta = \frac{65 L_{суц}}{\sqrt{f \mu \gamma}} \text{ [мм]}, \quad (6.2)$$

звідки

$$L_{суц} = \frac{\delta \sqrt{f \mu \gamma}}{65} \text{ [дБ]}, \quad (6.3)$$

де δ – товщина екрану, мм;

f – частота електромагнітного поля, Гц;

μ – магнітна проникність металу захисного екрану, Г/м;

γ – електрична провідність металу екрану, $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$.

У випадку екранування алюмінієвого екраном $\mu = 4\pi 10^{-7}$ Г/м, $\gamma = 3,54 \cdot 10^7 (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$.

Ефективність екранування від магнітного випромінювання сітчастим екраном можна визначити за формулою

$$L_{\text{сітч}} = 10 \lg \frac{4 \left(\frac{d}{\lambda} \ln \frac{d}{2\pi r_0} \right)^2}{1 + 4 \left(\frac{d}{\lambda} \ln \frac{d}{2\pi r_0} \right)^2} \text{ [дБ]}, \quad (6.4)$$

де d – крок сітки, мм;

λ – довжина хвилі, мм;

r_0 – радіус дроту, мм.

Довжину хвилі можна визначити за формулою

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ [м]}, \quad (6.5)$$

де c – швидкість світла в вакуумі, м/с ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с);

f – частота електромагнітного поля, Гц.

Після підстановки відомих значень у формули (5.3, 5.5, 5.4), отримаємо:

$$L_{\text{суц}} = \frac{0,1 \sqrt{30000 \cdot 10^6 \cdot 4\pi 10^{-7} \cdot 3,54 \cdot 10^7}}{65} = 1776,82 \text{ (дБ)};$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{30000 \cdot 10^6} = 0,01 \text{ (м)} = 10 \text{ (мм)};$$

$$L_{\text{сітч}} = 10 \lg \frac{4 \left(\frac{8}{10} \ln \frac{8}{2 \cdot 3,14 \cdot 7,5} \right)^2}{1 + 4 \left(\frac{8}{10} \ln \frac{8}{2 \cdot 3,14 \cdot 7,5} \right)^2} = 6,0187 \text{ (дБ)}.$$

Оскільки $L_{\text{суц}} = 1776,82$ (дБ) $>$ $L_{\text{сітч}} = 6,0187$ (дБ), то як раціональний вид екрану для захисту від ЕМВ остаточно вибираємо суцільний екран.

6.2 Технічні рішення щодо промислової та пожежної безпеки під час проведення розробки свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача

6.2.1 Безпека щодо організації робочих місць

Конструкція робочого місця, взаємне розташування його елементів та його розміри мають відповідати антропометричним, психофізіологічним та фізіологічним властивостям працівника, а також характеру праці [17].

Площа одного робочого місця має складати не менше $6,0 \text{ м}^2$, об'єм приміщення – не менше ніж 20 м^3 , висота – не менше $3,2 \text{ м}$ [17].

Інтер'єр приміщень потрібно оздоблювати дифузно-віддзеркалювальними матеріалами з коефіцієнтом відбиття: стелі $0,7-0,8$; стін $0,4-0,5$; підлоги $0,2-0,3$. Поверхня підлоги має бути гладкою, не слизькою, без вибоїн, мати антистатичні властивості, зручною для вологого прибирання. Не дозволяється застосовувати для оснащення інтер'єру полімери, які забруднюють повітря шкідливими хімічними речовинами та сполуками.

6.2.2 Електробезпека

В середині приміщення, де здійснюється робота з розробки свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача, значну увагу потрібно приділити запобіганню небезпеки ураження електричним струмом. Згідно [18] дане приміщення належить до приміщень із підвищеною небезпекою ураження електричним струмом в наслідок наявності високої (більше 75%) відносної вологості. Через це безпека експлуатації електрообладнання має забезпечуватись комплексом заходів, які передбачають застосування ізоляції струмовідних елементів, захисних блокувань, захисного заземлення тощо [19].

6.2.3 Пожежна безпека

Згідно [20] приміщення, де проводиться робота з розробки свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача, відноситься до категорії пожежної небезпеки Б. Дане приміщення відноситься до 2-го ступеня вогнестійкості, в якому приміщення знаходяться в будівлі з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням листових і плитних негорючих матеріалів.

Мінімальні межі вогнестійкості конструкцій розглядуваного приміщення наведені в таблиці 3.7. В таблиці 3.8 наведено протипожежні норми проектування будівель і споруд.

Вибираємо, що приміщення, в якому проводиться робота з розробки, має бути оснащено двома вогнегасниками, пожежним щитом, ємністю з піском [21].

6.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Найбільший вплив на стабільність та надійність електронних комплексів таких як свіп-генератор має дія іонізуючих та електромагнітних випромінювань. Дія радіації на матеріали і деталі апаратури залежить від виду випромінювання, дози радіації, природи випромінюваної речовини та умов навколишнього середовища.

В радіоелектронній апаратурі (РЕА) використовуються елементи, до складу яких входять такі матеріали: метали, неорганічні матеріали, напівпровідники та різні органічні сполуки (діелектрики, смоли та ін.). Серед цих матеріалів метали найбільш чутливі до радіації, оскільки їм властива висока концентрація вільних носіїв.

В РЕА радіація викликає оборотні і необоротні процеси, внаслідок яких можуть бути порушення роботи елементів схеми, що приведе до пошкодження апаратури. Якщо потік гамма-опромінення проходить через елементи РЕА, то в

них виникають вільні носії електричних зарядів, внаслідок переміщення яких виникає хибний імпульс, який може призвести до включення пристрою.

Найбільш чутливі до дії радіації напівпровідники, оптичні прилади і фотоматеріали. В елементній базі РЕА внаслідок дії іонізуючого випромінювання можлива зміна майже всіх електричних та експлуатаційних характеристик, залежних від проходження процесів іонізації і порушення структури матеріалів.

Електромагнітний імпульс (ЕМІ) – потужний короткий імпульс, що вражає головним чином електронну апаратуру. Виникає ЕМІ в основному в результаті взаємодії гамма-випромінювання, що утворюються під час вибуху, з атомами навколишнього середовища.

Основні параметри ЕМІ, що визначають вражаючу дію, є характер зміни напруженості електричного та магнітного полів в часі – форма імпульсу і максимальна напруженість поля – амплітуда імпульсу. Діапазон частот електромагнітних імпульсів (ЕМІ) – до 100 МГц, але в основному його енергія розподілена біля середньої частоти (10 – 15 кГц).

Таким чином, в даній частині розділу необхідно виконати дослідження безпеки роботи та розробку заходів по підвищенню стійкості роботи свіп-генератора в умовах дії іонізуючих випромінювань та електромагнітних імпульсів.

6.3.1 Дослідження безпеки роботи свіп-генератора в умовах дії іонізуючого випромінювання

Нормальна робота приладу буде залежати від таких елементів, як транзистори, мікросхеми, резистори, конденсатори, діоди.

За критерій безпеки роботи свіп-генератора в цих умовах приймається таке значення дози опромінення елементної бази ($P_{зв}$, Р) або граничне значення рівня ($P_{зв}$, Р/год), при якому можуть виникнути тимчасові зміни, але пристрій буде працювати з потрібною якістю. Отримані значення занесемо до таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Максимально допустимі дози опромінення світ-генератора

№	Блоки	Елементи світ-генератора	$P_{гр\ i}, P$	$P_{гр}, P$
1	Опорний генератор	Транзистор 2N3904S	10^4	10^5
		Конденсатор	10^4	
		Резистор	10^7	
		Діод	10^5	
2	Квадратор	Мікросхема AD834	10^3	
		Конденсатор	10^5	
		Резистор	10^7	
3	Мікроконтролер	Контролер STM32F103	10^5	

З наведеної таблиці слідує, що мінімальні значення допустимої дози, при яких в елементній базі можливі необоротні зміни мають мікросхема 2N3904S блоку опорного генератора, мікросхема AD834 блоку квадратора та контролер STM32F103 – $P_{гр}=10^5$, $t_k=60000$ год, $k_{посл}=2$.

Визначаємо максимальний рівень радіації:

$$P_{1\ max} = \frac{P_{гр} \cdot k_{посл}}{2 \cdot (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})} \quad (6.1)$$

Підставивши відповідні числові значення в формулу (6.1) отримаємо:

$$P_{1\ max} = \frac{10^5 \cdot 2}{2 \cdot (\sqrt{60000} - \sqrt{1})} = 410 \text{ (P/год)}.$$

Визначаємо допустимий час роботи пристрою:

$$t_{доп} = \left(\frac{P_{гр} \cdot k_{посл} + 2 \cdot P_{1,max} \cdot \sqrt{t_n}}{2 \cdot P_{1,max}} \right)^2 = \left(\frac{10^5 \cdot 2 + 2 \cdot 410 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 410} \right)^2 = 59977 \text{ (год)}.$$

Таким чином, допустимий час роботи свіп-генератора складатиме 59977 годин або 6 років 309 днів 1 годину при максимальному рівні радіації 410 Р/год.

6.3.2 Дослідження безпеки роботи свіп-генератора в умовах дії електромагнітного імпульсу

За критерієм безпеки роботи свіп-генератора в умовах дії електромагнітного імпульсу можна прийняти коефіцієнт безпеки:

$$K_6 = 20 \lg \frac{U_d}{U_r} \geq 40 \text{ [дБ]},$$

де U_d – допустиме коливання напруги живлення, 220 В;

U_r – напруга наведена за рахунок електромагнітного імпульсу у вертикальних (горизонтальних) струмопровідних частинах, В.

Допустимі коливання напруги живлення:

$$U_d = 220 + \frac{220}{100} \cdot 5 = 231 \text{ (В)}.$$

В зв'язку з тим, що окремі елементи приладу можуть мати різні значення коефіцієнтів безпеки, то стійкість роботи свіп-генератора в цілому визначається мінімальним значенням коефіцієнта безпеки.

З рівняння:

$$K_6 = 20 \lg \frac{U_d}{U_r} = 40 \text{ (дБ)}$$

визначаємо:

$$U_r = \frac{U_d}{10^2} = \frac{231}{100} = 2,31 \text{ (В)}.$$

Прийmemo максимальну довжину горизонтальних струмопровідних частин $l_r=0,8$ м. Тоді вертикальна складова напруженості електричного поля визначається за формулою:

$$U_r = E_v \cdot l_r.$$

Звідси:

$$E_v = \frac{U_r}{l_r} = \frac{2,31}{0,8} = 28,98 \text{ (В/м)}.$$

Таким чином, робота свiп-генератора можлива у випадку, якщо не перевищується норма вертикальної напруженості електричного поля 28,98 В/м.

6.4 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи свiп-генератора в умовах надзвичайних ситуацій.

З метою зменшення негативного впливу на розроблюваний свiп-генератор можна використати наступні методи.

Для боротьби з впливом іонізуючого опромінення використовують алюмінієві сплави, леговані елементами з високим атомним номером (лантаноїдами і рідкоземельними елементами), сплави на основі тугоплавких і рідкоземельних елементів і багатошарові матеріали. Також для боротьби з впливом іонізуючого випромінювання можна використати новітній вітчизняний метод, що полягає в захисному покритті радіоелектронної апаратури, що розміщується на поверхнях даних елементів, які піддаються впливу іонізуючого випромінювання, металічної матриці, що утворює її захисний шар.

Для боротьби з електромагнітним імпульсом широко використовують

металеві екрани та струмопровідні сітки, стільникові металічні конструкції для повітрозбірників та вентиляційних отворів і контактні пружинні прокладки, що розміщуються по периметру дверей і люків. Для захисту від проникнення електромагнітного опромінення в апаратуру через різні кабельні вводи використовується перехід від електричних мереж зв'язку до практично нечутливих до ЕМІ. Також для захисту кабельних входів є забезпечення в їх конструкції фільтрів та встановлення вбудованих зенерівських діодів.

Таким чином, нами було приведено основні методи захисту від іонізуючого та електромагнітного випромінювання. Узагальнюючи розділ слід зазначити, що основною метою даної частини розділу було дослідження оцінки безпеки роботи свіп-генератора та розробка заходів по підвищенню стійкості роботи приладу.

В ході виконання було розглянуто вплив іонізуючого та електромагнітного імпульсу на компоненти схеми, виконано розрахунок дози опромінення кожного класу комплектуючих, з результатів чого видно, що ні один з класів елементів схеми не зазнає більшого впливу за граничне значення, також розраховано термін безпечної роботи пристрою 2334 год. Що стосується впливу електромагнітного імпульсу, то з урахуванням необхідного рівня коефіцієнта безпеки було розраховано значення напруженості електричного поля.

З метою підвищення стійкості роботи свіп-генератора наведено основні заходи боротьби з впливом вражаючих факторів, досліджених вище, а свіп-генератор задовольняє всім вимогам цивільного захисту до проектування такого виду систем.

Висновки до розділу

В результаті написання даного розділу було опрацьовано такі питання охорони праці і безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення обґрунтування вибору раціонального виду екрану для захисту від ЕМВ, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення розробки свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача, безпека в надзвичайних ситуаціях.

ВИСНОВКИ

В даній магістерській кваліфікаційній роботі було проведено розробку свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача. Даний свіп-генератор застосовують в вимірювальній апаратурі для реєстрації амплітудно- і фазочастотних характеристик елементів пристроїв, а також для вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі, хвильового опору.

В роботі в першому розділі проведено огляд методів вимірювання частотних характеристик та способів реалізації свіп-генераторів. Описано використання свіп-генераторів в складі характерографів та розглянуто, на прикладі вимірювання АЧХ, методи вимірювання частотних характеристик.

Розглянуто різні способи реалізації свіп-генераторів, описано принцип роботи свіп-генератора, що реалізований за допомогою поєднання сигналів двох генераторів. Перевагами цієї схеми є зручність керування, висока швидкість перестройки. Недоліками схеми є малий діапазон переналаштування, нелінійність характеристик керування, температурна залежність ємності варикапа. Розглянуто принцип роботи свіп-генератора на основі ЗПГ-резонатора. Вони мають широку смугу переналаштування і низький рівень фазових шумів. Недоліком таких свіп-генераторів є відносно повільне переналаштування частоти через обмеженість швидкості зміни струму в котушці електромагніту, температурна нестабільність і велика споживана потужність електромагнітом.

В другому розділі магістерської кваліфікаційної роботи запропоновано структурну схему свіп-генератора на основі частотного перетворювача, наведено принцип роботи схеми та здійснено вибір елементної бази свіп-генератора.

В третьому розділі проведено обґрунтування вибору схем та електричні розрахунки вузлів свіп-генератора. Розроблено повну структурну схему та описано принцип її роботи.

В четвертому розділі виконано моделювання у програмі NI Multisim. Проведено моделювання роботи суматора сигналів, ФНЧ четвертого порядку та наведено їхні характеристики.

В економічній частині магістерської кваліфікаційної роботи було проведено аудит розробленого свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача, розрахунок витрат на розробку свіп-генератора та розрахунок економічного ефекту від можливої комерціалізації розробки.

В розділі охорони праці та цивільного захисту було опрацьовано такі питання, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення обґрунтування вибору раціонального виду екрану для захисту від ЕМВ, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення розробки свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача, безпека в надзвичайних ситуаціях.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Данилин А.А., Лавренко Н.С. Измерения в радиоэлектронике: учеб. пособие / А. А. Данилин, Н.С. Лавренко. – Спб.: Изд-во «Лань», 2017. –408с.
2. Кувшинов В., Майстренко А. ЖИГ-генераторы и синтезаторы частот компании Micro Lambda Wireless / В. Кувшинов, А. Майстренко // Компоненты и технологии – журнал об электронных компонентах. – 2015. – №9: ВЧ и СВЧ технологи. – с. 34 – 38с.
3. Кононов С. П. Вимірювання частоти міток у пристроях на основі світлогенератора [Електронний ресурс] / С. П. Кононов, В. Д. Росохай // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2010. – № 4.– Режим доступу : <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/236>.
4. С.П. Кононов, О.Б. Білик. Частотні перетворювачі світлогенератора на основі ЗП-резонатора / С.П. Кононов, О.Б. Білик // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2019. – № 4. – с. 124-131.
5. Дингес С., Кочемасов В. СВЧ-преобразователи частоты. Часть 2. Классификация преобразователей по принципу функционирования / С. Дингес, В. Кочемасов // Компоненты и технологии – журнал об электронных компонентах. – 2018. – №5: ВЧ и СВЧ технологи. – с. 12 – 21.
6. Кандырин Н.П. Выбор генераторов при проектировании СВЧ синтезаторов с ФАПЧ / Н.П. Кандырин // Системи обробки інформації.–2015.– №8: Обробка інформації в складних технічних системах. – с. 25 – 30.
7. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том II: / У. Титце, К. Шенк // Пер. с нем. – М.: ДКМ Пресс, 2008. – 832 с.
8. Методичні рекомендації з комерціалізації розробок, створених в результаті науково-технічної діяльності – К.: Наказ Державного комітету України з питань науки, інновацій та інформатики (Лист № 1/06-4-97 від 13.09.2010 р.).

9. Козловський В. О. Методичні вказівки до виконання студентами-магістрантами економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт. – Вінниця: ВНТУ, 2012.

10. ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

11. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

12. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.

13. Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.

14. ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

15. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.

16. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

17. Березюк О. В. Охорона праці. Підсумкова державна атестація спеціалістів, магістрів в галузях електроніки, радіотехніки, радіоелектронних апаратів та зв'язку : навчальний посібник / О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 104 с.

18. Правила улаштування електроустановок. 2-е вид., перероб. і доп. – Х: "Форт", 2009. – 736 с.

19. ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.

20. ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.

21. НАПБ Б.03.001-2004. Типові норми належності вогнегасників.

22. СНиП 2.09.02-85. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений.

23. Норми радіаційної безпеки України, МОЗ України. – К., 1997.

Додаток А
(обов'язковий)
ВНТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав.кафедри ТКСТБ ВНТУ,
канд. техн. наук, професор
Г.Г.Бортник
“ ___ ” _____ 2019 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи
**РОЗРОБКА СВІП-ГЕНЕРАТОРА МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ХВИЛЬ
НА ОСНОВІ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА**
08-34.МКР.011.00.000 ТЗ

Керівник роботи
к.т.н., доц. кафедри ТКСТБ ВНТУ
Кононов С.П.

Виконавець: ст. гр. АРЗ-18м
Щепанівський В.Ю.

Вінниця-2019

1 ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету від “02” 10 2019 року № 254 та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: 02.09.2019 р.

Дата закінчення: 09.12.2019 р.

2 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Метою даної магістерської кваліфікаційної роботи є розробка нової схеми свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- розробка технічного завдання;
- огляд методів вимірювання частотних характеристик та способів реалізації свіп-генераторів.
- розробка структурної схеми свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача;
- вибір елементної бази свіп-генератора;
- проведення електричних розрахунків вузлів свіп-генератора.

Об'єкт дослідження свіп-генератор міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача.

Предмет дослідження є способи реалізації свіп-генераторів з використанням частотного перетворювача.

Основними завданнями роботи є:

- аналіз існуючих методів вимірювання частотних характеристик;
- огляд способів реалізації свіп-генераторів;
- розробка структурної схеми свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача;

- розробка електричних схем вузлів свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача;
- виконати електричні розрахунки вузлів свіп-генератора;
- виконати комп'ютерне моделювання вузлів свіп-генератора;
- виконати економічну частину магістерської кваліфікаційної роботи;
- виконати розгляд питань з охорони праці та цивільної оборони.

Розроблений в ході виконання свіп-генератор на основі частотного перетворювача дозволить зменшити похибку встановлення мінімальної та максимальної частоти хитання, частотної смуги хитання, що викликані температурною нестабільністю та нелінійністю розгортання частоти свіп-генератора, завдяки введенню частотного перетворювача в свіп-генератор.

3 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ МКР

Робота базується на результатах переддипломної практики, яка виконувалась у ВНТУ з 02.09.2019 р. по 04.10.2019 р. Під час підготовки магістерської кваліфікаційної роботи будуть використані матеріали, зібрані у процесі цієї практики.

Список використаних джерел розробки:

3.1 Данилин А.А., Лавренко Н.С. Измерения в радиоэлектронике: учеб.пособие / А. А. Данилин, Н.С. Лавренко. – Спб.: Изд-во «Лань», 2017. – 408с.

3.2 Кувшинов В., Майстренко А. ЖИГ-генераторы и синтезаторы частот компании Micro Lambda Wireless / В. Кувшинов, А. Майстренко // Компоненты и технологии – журнал об электронных компонентах. – 2015. – №9: ВЧ и СВЧ технологи. – с. 34 – 38с.

3.3 Кононов С. П. Вимірювання частоти міток у пристроях на основі свіп-генератора [Електронний ресурс] / С. П. Кононов, В. Д. Росохай //

Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2010. – № 4.– Режим доступу : <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/236>.

3.4 С.П. Кононов, О.Б. Білик. Частотні перетворювачі свіп-генератора на основі ЗІГ-резонатора / С.П. Кононов, О.Б. Білик // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2019. – № 4. – с. 124-131.

3.5 Дингес С., Кочемасов В. СВЧ-преобразователи частоты. Часть 2. Классификация преобразователей по принципу функционирования / С. Дингес, В. Кочемасов // Компоненты и технологии – журнал об электронных компонентах. – 2018. – №5: ВЧ и СВЧ технологии. – с. 12 – 21.

3.6 Кандырин Н.П. Выбор генераторов при проектировании СВЧ синтезаторов с ФАПЧ / Н.П. Кандырин // Системи обробки інформації .–2015 .–№8: Обробка інформації в складних технічних системах. – с. 25 – 30.

3.7 Титце У., Шенк К. Полупроводкиновая схемотехника. 12-е изд. Том II: / У. Титце, К. Шенк // Пер. с нем. – М.: ДКМ Пресс, 2008. – 832 с.

3.8 Методичні рекомендації з комерціалізації розробок, створених в результаті науково-технічної діяльності – К.: Наказ Державного комітету України з питань науки, інновацій та інформатики (Лист № 1/06-4-97 від 13.09.2010 р.).

3.9 Козловський В. О. Методичні вказівки до виконання студентами-магістрантами економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт. – Вінниця: ВНТУ, 2012.

3.10 Бортник Г.Г., Васильківський М.В. Методичні вказівки до підготовки магістерських кваліфікаційних робіт для студентів спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка» усіх форм навчання.- Вінниця:ВНТУ, 2018.- 50 с.

3.11 Березюк О. В. Охорона праці. Підсумкова державна атестація спеціалістів, магістрів в галузях електроніки, радіотехніки, радіоелектронних апаратів та зв'язку : навчальний посібник / О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 104 с.

4 ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра телекомунікаційних систем та телебачення, студент групи АРЗ-18м
Щепанівський В.Ю.

5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Технічні вимоги, яким повинна відповідати розробка, наступні:

- діапазон частот – 30 – 50 ГГц;
- мінімальна смуга хитання – 100 МГц;
- максимальна смуга хитання – 1 ГГц;
- тип модуляції – амплітудна маніпуляція 100 кГц;
- рівень вихідної напруги на навантаження (75 Ом) – 0 – (-60) дБ;
- похибка встановлення частоти та смуги хитання – не гірше 0,05%.

6 ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
		початок	закінчення		
1.	Розробка технічного завдання (ТЗ)	02.09.2019р.	06.09.2019р.	Розроблене ТЗ	Додаток А
2.	Огляд методів вимірювання частотних характеристик та способів реалізації свіп-генераторів	09.09.2019р.	13.09.2019р.	Проведено аналіз	Вступ. Розділ 1.
3.	Розробка структурної схеми свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача	16.09.2019р.	04.10.2019р.	Розроблено структуру	Розділ 2

4.	Проведення електричних розрахунки вузлів свіп-генератора	07.10.2019р.	25.10.2019р.	Проведено розрахунки	Розділ 3
5.	Експериментальні дослідження	28.10.2019р.	08.11.2019р.	Характеристики і параметри	Розділ 4
6.	Аналіз економічної ефективності	11.11.2019р.	15.11.2019р.	Економічна частина МКР	Розділ 5
7.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	18.11.2019р.	22.11.2019р.	Частина ОП та БНС	Розділ 6
8.	Оформлення пояснювальної записки (ПЗ) та графічної частини	25.11.2019р.	29.11.2019р.	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
9.	Нормоконтроль, попередній захист, рецензування МКР	02.12.2019р.	06.12.2019р.	Позитивні відзиви	Відзив. рецензія
10.	Захист МКР ЕК		09.12. 2019р.	Позитивний захист	Протокол ЕК

7 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

В результаті виконання роботи будуть розроблені:

- структура свіп-генератора міліметрового діапазону хвиль;
- економічна частина МКР;
- розділ ОП та БНС.

Результати отримані в процесі виконання даної роботи, будуть впроваджені в галузі телекомунікацій в Регіональному Центрі експлуатації телекомунікаційної мережі України.

Очікуваний техніко-економічний ефект. При впровадженні результатів досліджень очікується спрощення будови панорамних приладів, підвищення ККД, та зростання їх точності.

8 МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ПОДАЮТЬ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ ТА ПІД ЧАС ЕТАПІВ

За результатами виконання МКР до ЕК подаються пояснювальна записка, графічна частина МКР, відзив і рецензія.

9 ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ МКР ТА ЇЇ ЕТАПІВ

Поетапно результати виконання МКР розглядаються керівником роботи та обговорюються на засіданні кафедри.

Захист магістерської кваліфікаційної роботи відбувається на відкритому засіданні ЕК.

10 ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Документація, що розробляється в процесі виконання досліджень повинна містити:

- нову структуру свіп-генератора;
- економічну частину та розділ БЖД і ЦЗ.

11 ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

У зв'язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.

ДОДАТКИ

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

Додаток Б
(довідниковий)

Параметри і характеристики елементної бази

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

Додаток В
(обов'язковий)

Свіп-генератор на основі частотного перетворювача.
Структурна електрична схема

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

Додаток Г
(обов'язковий)

Частотний перетворювач на основі квадратора.
Структурна електрична схема

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

Додаток Д
(обов'язковий)

Сигнали в частотному перетворювачі на основі квадратора

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

Додаток Е
(обов'язковий)

Формувач міток та керований фільтр.
Структурна електрична схема

Додаток Є
(обов'язковий)

Світл-генератор міліметрового діапазону хвиль на основі частотного
перетворювача.

Структурна електрична схема

Додаток Ж
(обов'язковий)

Результати комп'ютерного моделювання

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

Додаток 3
(довідниковий)

Допустимі значення виробничих факторів

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019



MICRO LAMBDA WIRELESS, INC.

YIG TUNED OSCILLATORS WITH COMMERCIAL ANALOG DRIVERS PA SERIES

FEATURES

- 700 MHz to 50 GHz
- Compensation for Temperature Drift
- Input Regulators for Improved Stability
 - Versus Power Supply Variations
- 0 to 10 Volt Tuning
- 0° C to +65° C Temperature Range



DESCRIPTION

MICRO LAMBDA YIG Oscillators, model type **MLOS**, **MLXS**, **MLOB** and **MLXB-Series** are available with integrated analog driver circuits.

MICRO LAMBDA drivers eliminate the need for customers to design or develop their own driver circuits and sophisticated test and alignment procedures. Integrating a driver at MICRO LAMBDA's factory ensures that peak performance will be achieved at the time of manufacture. Alignment and compensation with the particular YIG oscillator can be maximized down to the component level.

All drivers in this series provide input voltage regulators, and compensation circuits to improve frequency drift.

COMMERCIAL POSITIVE INPUT ANALOG DRIVER SELECTION GUIDE: PA SERIES

YIG TUNED OSCILLATORS WITH ANALOG DRIVERS

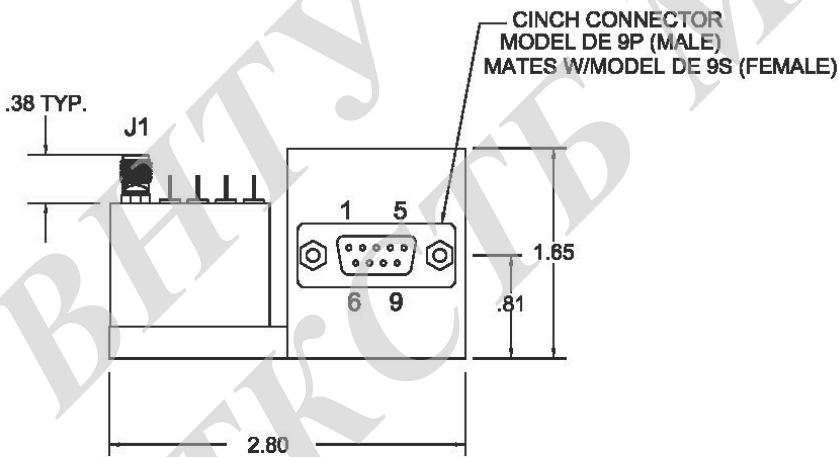
DRIVER INPUT & RESPONSE SPECIFICATION (0 to + 65 deg. C)

Tuning Command	0 Volts = Lowest Frequency 10 Volts = Highest Frequency
Tuning Accuracy (excluding hysteresis)	See Table
Tuning Speed	2 mSec for 1 GHz step to within +/-10 MHz. Residual FM = 50-100 kHz Pk-Pk
Sweep Speed (0 - 10 Volt Ramp)	25 mSec Up / 10 mSec Retrace for 1 GHz, Linearity = 0.1 % Residual FM = 50-100 kHz Pk-Pk

Main Driver Inputs

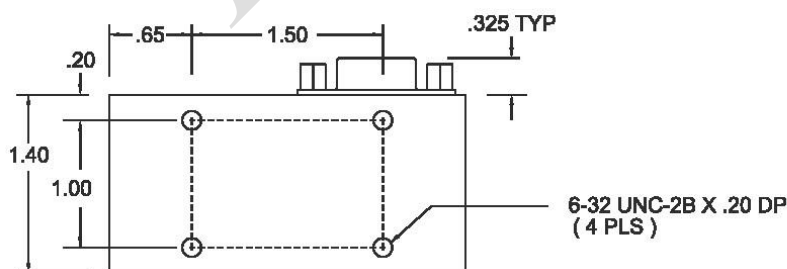
Supply Voltage & Current	+15 V +/- .5 V @ Bias Current + Tuning Current + 50 mA, Max. -15 V +/- .5 V @ 50 mA, (Plus Oscillator -5 Vdc Current if any) Max.
Supply Voltage Pushing	+/- 0.2 MHz Max. @ +/- .5 Vdc
Supply Voltage Ripple	10 mV Ripple Pk-Pk from 2 kHz to 3 MHz
Ground	Chassis Ground
Tuning Input Resistance	> 10 kOhms
Common Mode Rejection	> 40 dB
Heater Voltage Inputs	24 Vdc +/- 4 Vdc @ 300 mA Surge for 2 Sec., 25 mA Steady State Polarity Independent: ±12 Vdc or ±15 Vdc acceptable
FM Coil Driver Option ("PF" Option)	acceptable
Voltage Input	+/- 10 Vdc
Input Impedance	1 kOhms
Sensitivity (Note 1)	+/- 2.5 MHz
Frequency Deviation	+/- 25 MHz
Current Requirements (Max. +/- Deviation)	+/- 100 mA

Note 1: Sensitivity Adjustment Available. Sensitivity Stated is Average Over Frequency Range.



Connector for 11-024

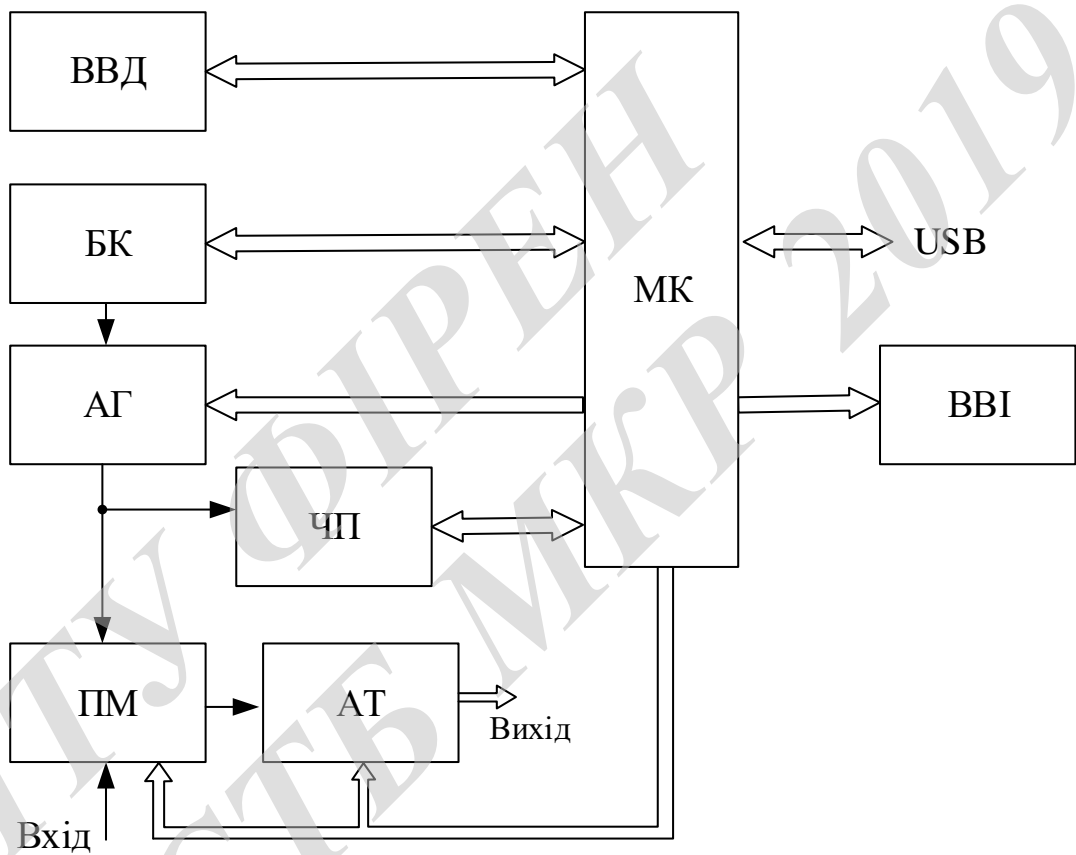
Connector	Functions
1	Driver Control
2	Control Return
3	GND
4	- Supplies Voltage
5	+ Supplies Voltage
6	20-30 V Heater Supply
7	Heater Return
8	+ FM
9	- FM
J1	RF Output



Connector for 11-025

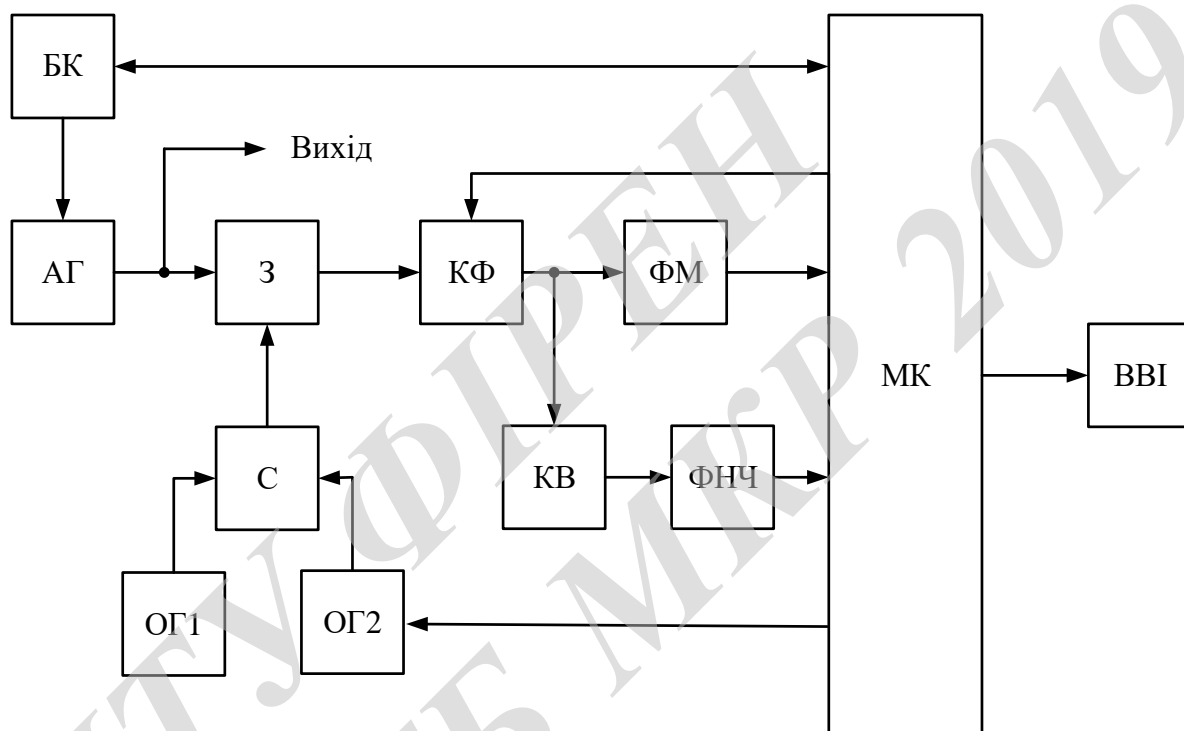
CONN	FUNCTIONS
1	DRIVER CONTROL
2	CONTROL RETURN
3	GND
4	- SUPPLIES VOLTAGE
5	+ SUPPLIES VOLTAGE
6	20-30 V HTR SUPPLY
7	HEATER RETURN
8	FM ± 10V
9	FM GROUND
J1	RF OUTPUT

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019



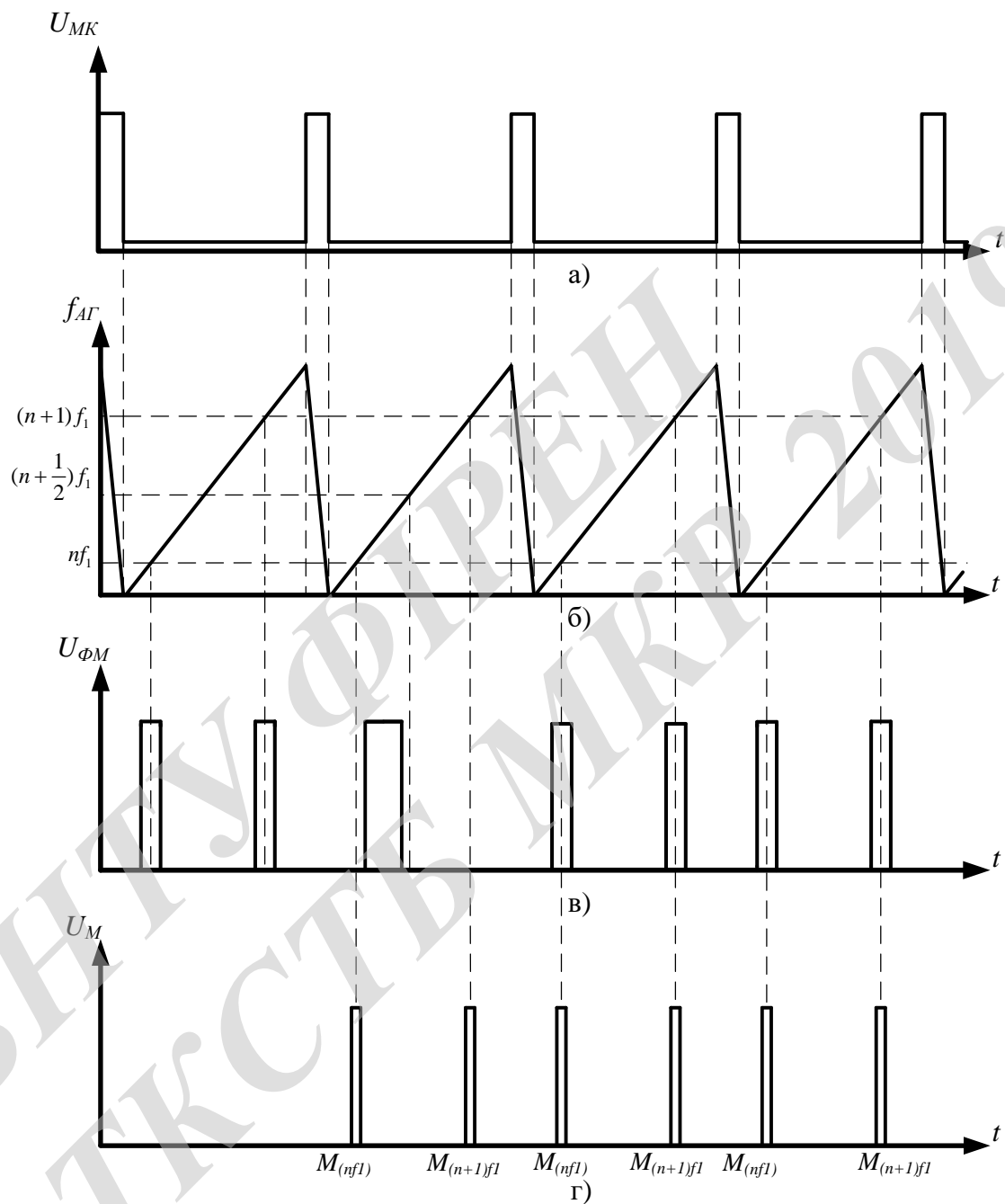
ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

					08-34.МКР.011.00.000.Е1			
					Свіп-генератора на основі частотного перетворювача.	Лім.	Маса	Масштаб
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Щепанівський В.			Структурна електрична схема			
<i>Перевір.</i>		Кононов С.П.						
<i>Т. Контр.</i>						<i>Арк.</i> 1	<i>Аркушіє</i> 1	
<i>Реценз.</i>						ВНТУ, АРЗ-18м		
<i>Н. Контр.</i>		Кононов С.П.						
<i>Затверд.</i>		Бортник Г.Г.						



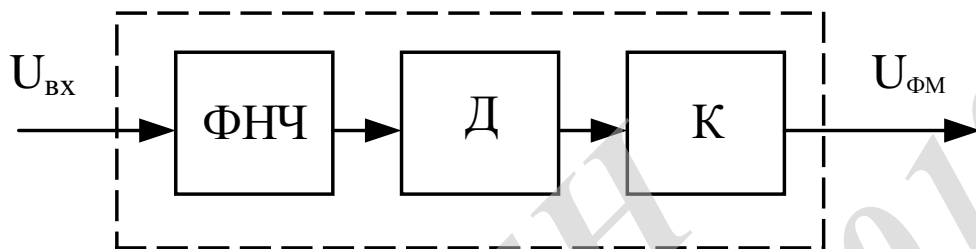
ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

					08-34.МКР.011.00.000.Е1			
					Частотний перетворювач на основі квадратора	Лім.	Маса	Масштаб
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Щепанівський В.			Структурна електрична схема			
<i>Перевір.</i>		Кононов С.П.						
<i>Т. Контр.</i>						Арк. 1	Аркушіє 1	
<i>Реценз.</i>						ВНТУ, АРЗ-18м		
<i>Н. Контр.</i>		Кононов С.П.						
<i>Затверд.</i>		Бортник Г.Г.						

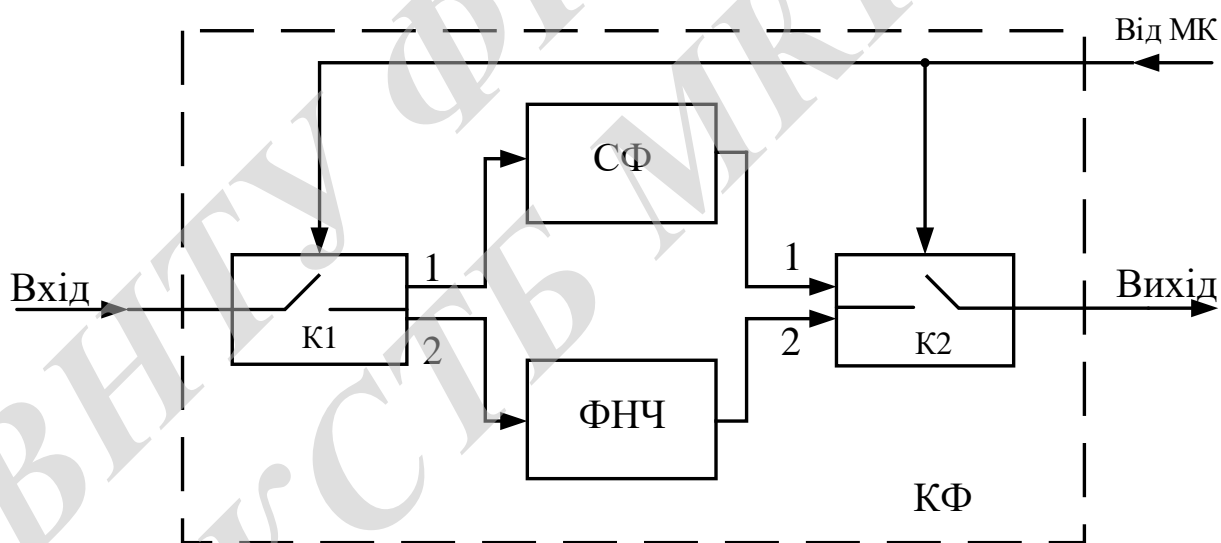


ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

					08-34.МКР.011.00.000.E8					
					Сигнали в частотному перетворювачі на основі квадратора	Лім.		Маса	Масштаб	
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>						
<i>Розроб.</i>		Щепанівський В.								
<i>Перевір.</i>		Кононов С.П.								
<i>Т. Контр.</i>						<i>Арк.</i>	1	<i>Аркушів</i>	1	
<i>Реценз.</i>						ВНТУ, АРЗ-18м				
<i>Н. Контр.</i>		Кононов С.П.								
<i>Затверд.</i>		Бортник Г.Г.								



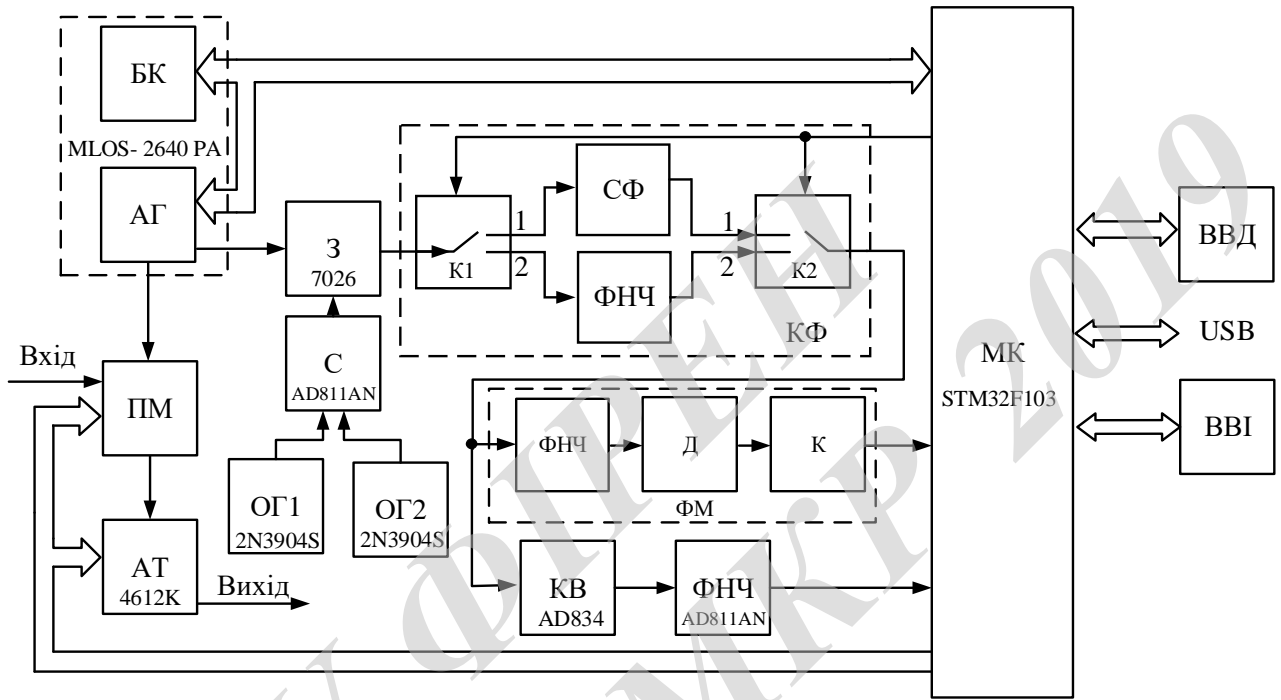
Формувач міток



Керований фільтр

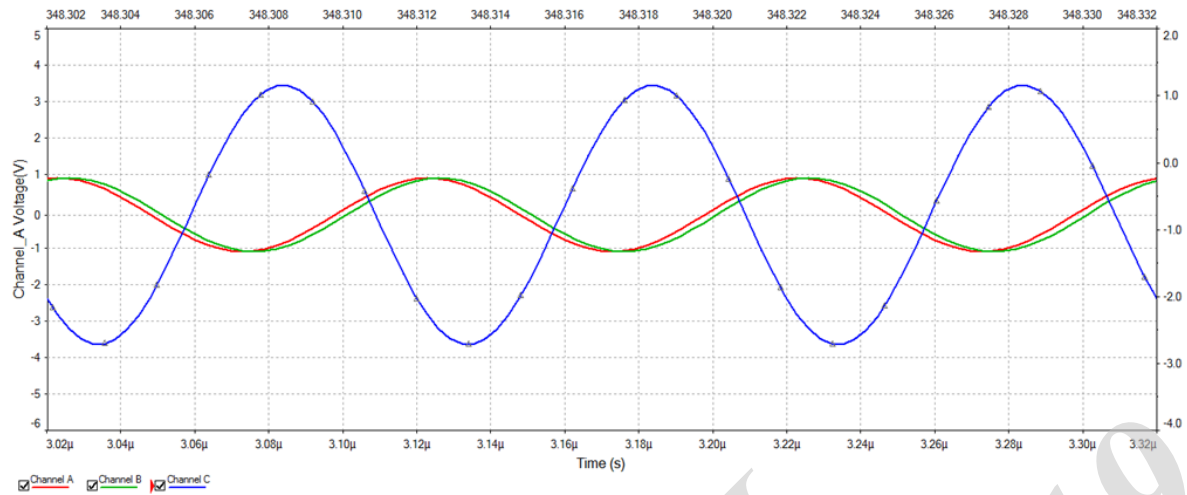
ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

					08-34.МКР.011.00.000.Е1			
					Формувача міток та керований фільтр	<i>Літ.</i>	<i>Маса</i>	<i>Масштаб</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Щепанівський В.			Структурна електрична схема			
<i>Перевір.</i>		Кононов С.П.						
<i>Т. Контр.</i>						<i>Арк.</i> 1	<i>Аркушів</i> 1	
<i>Реценз.</i>						ВНТУ, АРЗ-18м		
<i>Н. Контр.</i>		Кононов С.П.						
<i>Затверд.</i>		Бортник Г.Г.						

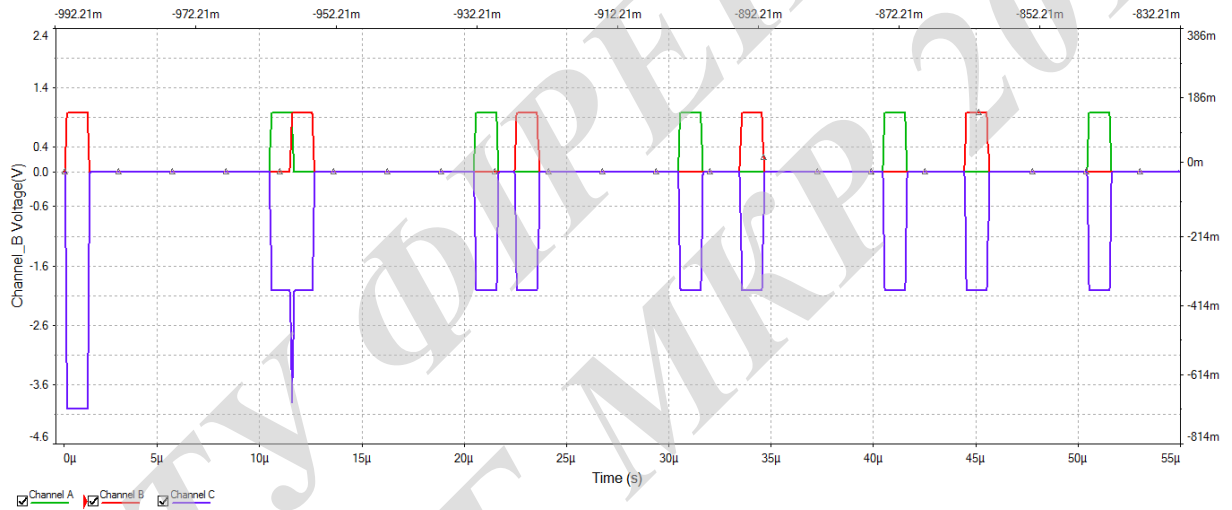


					08-34.МКР.011.00.000 E1			
Зм.	Лист.	№ Докум.	Підп.	Дата				
Розробив	Щепанівський В.Ю.				Свіп-генератор міліметрового діапазону хвиль на основі частотного перетворювача. Структурна електрична схема	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Кононов С.П.						1	1
Т. контр.						ВНТУ, гр. АРЗ-18м		
Реценз.								
Н. контр.	Кононов С.П.							
Затвердж.	Бортник Г.Г.							

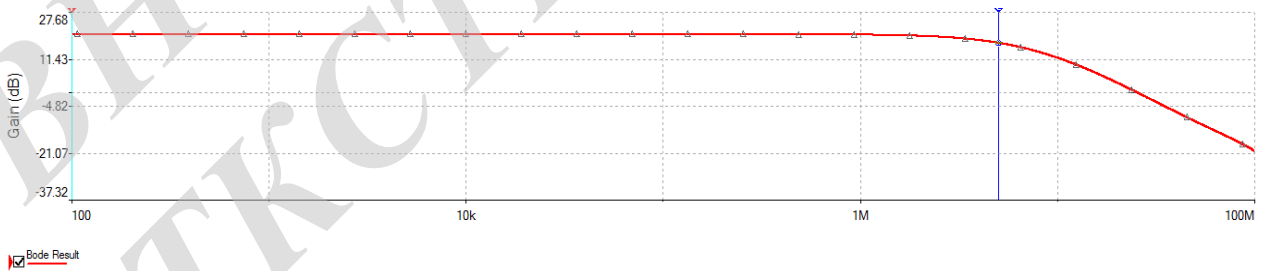
ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019



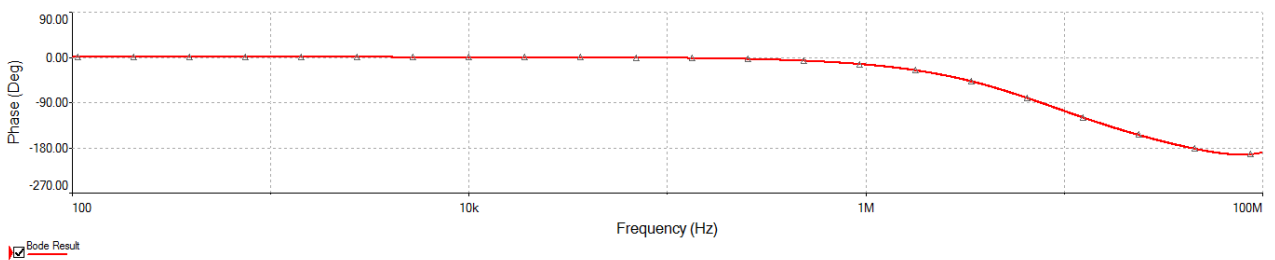
Осцилограми сигналів на вході і виході суматора



Осцилограми сигналів на вході і виході суматора



Амплітудно-частотна характеристика ФНЧ



Фазо-частотна характеристика

ВНТУ ФІРЕН
ТКСТЬ МКР 2019

					08-34.МКР.011.00.000.E8				
					Результати комп'ютерного моделювання	Літ.	Маса	Масштаб	
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>					
<i>Розроб.</i>		Щепанівський В.							
<i>Перевір.</i>		Кононов С.П.							
<i>Т. Контр.</i>						<i>Арк.</i>	1	<i>Аркушів</i>	1
<i>Реценз.</i>						ВНТУ, АРЗ-18м			
<i>Н. Контр.</i>		Кононов С.П.							
<i>Затверд.</i>		Бортник Г.Г.							

Таблиця 3.1 – Нормовані допустимі параметри мікроклімату в приміщенні

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С для робочих місць		Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
		постійних	непостійних		
Холодний	Іб	20-24	17-25	75	≤0,2
Теплий	Іб	21-28	19-30	60 при 27°С	0,1-0,3

Таблиця 3.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони

Назва речовини	Параметр	Значення	Клас небезпеки
Пил нетоксичний	ГДК, мг/м ³	0,15	4
Іони n ⁺ , n ⁻	число іонів в 1 см ³ повітря	50000	–

Таблиця 3.3 – Нормовані значення коефіцієнта природного освітлення і мінімальні освітленості при штучному освітленні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізн., мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фону	Освітленість при штучному освітленні, лк			КПО, %	
						комбіноване		загальне	Природне освітлення (бокове)	Суміщене освітлення (бокове)
						всього	у т. ч. від загальног о			
Високої точності	0,3-0,5	III	в	середній	середній	750	200	300	2	1,2

Таблиця 3.4 – Допустимі рівні шуму і еквівалентні рівні звуку

Рівні звукового тиску в дБ в октавних полосах з середньо-геометричними частотами, Гц									Рівні звуку і еквівалентні рівні звуку, дБА
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Таблиця 3.5 – Допустимі рівні вібрації

Гранично допустимі рівні віброприскорення, дБ, в октавних полосах з середньо-геометричними частотами, Гц						Коректовані рівні віброприскорення, дБА
2	4	8	16	31,5	63	
36	33	33	39	45	51	33

Таблиця 3.6 – Гранично допустимі рівні електромагнітних полів (безперервне випромінювання, амплітудна чи кутова модуляція)

Номер діапазону	Метричний розподіл діапазонів	Частоти	Довжина хвиль, λ	ГДР, В/м
5	Кілометрові хвилі (низькі частоти, НЧ)	30-300 кГц	10-1 км	25
6	Гептаметрові хвилі (середні частоти, СЧ)	0,3-3 МГц	1-0,1 км	15
7	Декаметрові хвилі (високі частоти, ВЧ)	3-30 МГц	100-10 м	$3 \cdot 1g$ λ
8	Метрові хвилі (дуже високі частоти, ДВЧ)	30-300 МГц	10-1 м	3

Таблиця 3.7 – Значення мінімальних меж вогнестійкості приміщення

Ступінь вогнестійкості будівлі	Стіни				Колони	Східчасті майданчики	Плити та інші несучі конструкції	Елементи покриття	
	Несучі та східчасті клітки	Самонесучі	Зовнішні несучі	Перегородки				Плити, прогони	Балки, ферми
2	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	EI 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	REI 15 M0	R 30 M0

Примітка. R – втрати несучої здатності; E – втрати цілісності; I – втрати теплоізолювальної спроможності; M – показник здатності будівельної конструкції поширювати вогонь (межа поширення вогню); M0 – межа поширення вогню дорівнює 0 см.

Таблиця 3.8 – Протипожежні норми проектування будівель і споруд

Об'єм приміщення, тис. м ³	Категорія пожежної безпеки	Ступінь вогнестійкості	Відстань, м, при щільності людського потоку в загальному проході, осіб/м ²			Кількість людей на 1 м ширини евакуаційного ходу	Протипожежні розриви, м, для ступеня їх вогнестійкості			Найбільша кількість поверхів	Максимально допустима площа поверху, м ² , для кількості поверхів		
			до 1	2-3	4-5		I,II	III	IV,V		1	2	3 і більше
до 15	Б	2	40	25	15	45	9	9	12	6	н.о.	–	–

Примітки: н.о. – не обмежується.