

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет Інформаційних електронних систем
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))
Кафедра Інформаційних радіоелектронних технологій і систем
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«РОЗРОБКА ГЕНЕРАТОРА НАДКОРОТКИХ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ»

Виконав: студент 4-го курсу, групи ТКР-216,
спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка,
(шифр і назва спеціальності, освітня програма)
ОП – Радіотехніка

МХ Виходзь М.Я.
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н./ доц., доцент каф. ІРТС
Ф Воловик А.Ю.
(прізвище та ініціали)

«10» 06 2025 р.

Рецензент: к.т.н., доц., доцент каф. ІКСТ
О Семенова О.О.
(прізвище та ініціали)

«11» 06 2025 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ІРТС
д.т.н., проф. Осалчук О.В.
(прізвище та ініціали)

«12» 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет Інформаційних електронних систем
Кафедра Інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 17 Електроніка та телекомунікації
Спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна програма – Радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІРТС
Олександр ОСАДЧУК
22.03. 2025 року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Виходзю Максиму Ярославовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розробка генератора надкоротких імпульсних сигналів»
керівник роботи Воловик Андрій Юрійович, д.т.н., доц., доцент кафедри ІРТС

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “20”03 2025 року № 97

2. Строк подання студентом роботи 10 06 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: напруга живлення – 2.8 В ... 3.3 В; струм споживання до 80 мА; тривалість фронту вихідного імпульсу в діапазоні 20 пс...125 пс; частота сигналу синхронізації у межах 5 МГц...10 МГц; джитер 2 пс...30 пс; частота вихідних імпульсів 1 МГц; ширина спектру сигналу на виході 6 ГГц; елементна база – високошвидкісні логічні елементи, програмуєма інтегральна логіка.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Основні теоретичні відомості про генератори надкоротких імпульсів. Тенденції розвитку генераторів надкоротких імпульсних сигналів. Принципи формування імпульсів короткої тривалості, схемні рішення. Структурна схема генератора на основі обраного способу формування імпульсів. Підбір елементної бази та компонентів пристрою. Проектування макетів з різними способами формування короткотривалих імпульсів. Аналіз спектральних даних вихідного сигналу. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Різновиди електричних схем формування надкоротких імпульсів. Структурна схема генератора надкоротких імпульсів. Схемотехнічні рішення елементів цифрової логіки. Електричні принципові схеми генератора надкоротких імпульсів. Схеми трасування та компонування електричних плат. Результати програмного моделювання спроектованих генераторів надкоротких імпульсів. Спектральні діаграми вихідних сигналів.

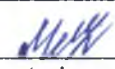
6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	д.т.н., доц, доцент каф. ІРТС Воловик А.Ю.		
Охорона праці	професор кафедри БЖДПБ, професор, д.п.н., Дембіцька С.В.		

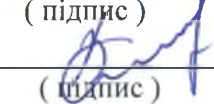
7. Дата видачі завдання 25.03.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження теми БКР	14.02.2025-28.02.2025	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	01.03.2025-19.03.2025	
3.	Розробка завдання на БКР. Затвердження теми.	20.03.2025-25.03.2025	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	27.03.2025-06.05.2025	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки . Експериментальне дослідження.	07.05.2025-18.05.2025	
6.	Розробка ілюстративної частини БКР	19.05.2025-22.05.2025	
7.	Охорона праці (ОП)	23.05.2025-25.05.2025	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини.	26.05.2025-05.06.2025	
9.	Нормоконтроль	07.06.2025-10.06.2025	
10.	Попередній захист БКР, доопрацювання, рецензування БКР	11.06.2025-12.06.2025	
11.	Захист БКР ЕК	13.06.2025-17.06.2025	

Студент  Виходзь М.Я.

(підпис)

Керівник роботи  Воловик А.Ю.

(підпис)

АНОТАЦІЯ

УДК 621.383.9

Виходзь М. Я. Розробка генератора надкоротких імпульсних сигналів. Бакалаврська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 - Телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – Радіотехніка. Вінниця: ВНТУ, 2025. 108 с.

Українською мовою. Рисуноків 51, таблиць 10, бібліографія 40.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи була розробка генератора надкоротких імпульсних сигналів. Здійснено аналіз методів формування фронтів мінімальної тривалості. Вибраний оптимальний варіант структури генератора відповідно до технічних вимог.

На основі методу електричних кіл розроблена структурна схема генератора надкоротких імпульсних сигналів. Здійснена розробка принципових схем пристроїв, заснованих на двох різних логічних елементах: D-тригер та логічний елемент «І». Проведений порівняльний аналіз характеристик спроектованих генераторів. Визначений найкращий варіант. Проведене моделювання спроектованих принципових схем. Отримано результати математичного моделювання у вигляді спектральних характеристик вихідних сигналів.

Також у бакалаврській кваліфікаційній роботі проведено розрахунки розділу охорони праці та безпеки життєдіяльності.

Ключові слова: генератор надкоротких імпульсів, тривалість фронту, програмована інтегральна логіка, D-тригер.

ABSTRACT

Vykhodz M.Ya. Development of a ultrashort pulse signals generator. Bachelor's thesis in the specialty 172 - Telecommunications and Radio Engineering, educational program - Radio Engineering. Vinnytsia: VNTU, 2025. 108 c.

In Ukrainian. Figures 51, tables 10, bibliography 40.

The purpose of the bachelor's qualification work was to develop a generator of ultrashort pulse signals. An analysis of methods for forming fronts of minimum duration was carried out. The optimal variant of the generator structure was selected in accordance with the technical requirements.

Based on the method of electrical circuits, a structural diagram of the ultrashort pulse signal generator is developed. The schematic diagrams of two devices based on two different logic elements were developed: D-trigger and logic element “AND”. A comparative analysis of the characteristics of the designed generators is carried out. The best option is determined. The modeling of the designed schematic diagrams is carried out. The results of mathematical modeling in the form of spectral characteristics of the output signals were obtained.

Also in the bachelor's thesis, the calculations of the section of labor protection and life safety were carried out.

Key words: ultrashort pulse generator, edge duration, programmable integrated logic, D-trigger.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ГЕНЕРАТОРІВ НАДКОРОТКИХ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ	14
1.1 Особливості сигналів малої тривалості	14
1.2 Перспективні напрямки використання надкоротких сигналів	15
1.3 Аналіз сучасного стану генераторів надкоротких імпульсів.....	19
2 ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ НАДКОРОТКИХ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ	23
2.1 Амплітудно-частотні, фазочастотні та перехідні характеристики швидкодіючих пристроїв.....	24
2.2 Особливості спектральних характеристик сигналів надкороткої тривалості ..	28
2.3 Варіанти реалізації генераторів надкоротких імпульсних сигналів	30
2.3.1 Метод оптичної комутації	30
2.3.2 Діоди із накопиченням заряду	31
2.3.3 Нелінійна лінія передачі	32
2.3.4 Резонансно-тунельний діод	32
2.3.5 Транзисторні кола	32
2.3.6 Тунельний діод	35
2.3.7 Лавинний транзистор	38
2.3.8 Діод Ганна	41
2.3.9 Цифрові кола	43
2.4 Використання генератора надкоротких імпульсних сигналів.....	44
3 РОЗРОБКА ГЕНЕРАТОРА НАДКОРОТКИХ ІМПУЛЬСІВ	46
3.1 Визначення структури генератора надкоротких імпульсів	46
3.2 Вибір складових компонентів	47
3.3 Вибір елементної бази	52
3.3.1 D-тригер.....	53
3.3.2 Програмована логічна інтегральна схема.....	54
3.3.3 Компаратор	59

	7
3.3.4 Комутатор.....	62
3.3.5 Схема електроживлення	63
3.4 Генератор прямокутних імпульсів на D-тригері.....	65
3.4.1 САПР Altium Designer	65
3.4.2 Схема електрична принципова	66
3.4.3 Трасування друкованої плати	69
3.4.4 Виготовлення друкованої плати	71
3.4.5 Аналіз характеристик розробленого пристрою	72
3.5 Генератор прямокутних імпульсів на логічному елементі «І»	74
3.5.1 Елементна база	75
3.5.2 Схема електрична принципова	78
3.5.3 Трасування	79
3.5.4 Виготовлення	79
3.5.5 Аналіз характеристик готового пристрою	80
3.6 Висновки до розділ.....	82
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	84
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	85
4.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця	85
4.1.2 Електробезпека приміщення	87
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	88
4.2.1 Мікроклімат	88
4.2.2 Склад повітря робочої зони.....	89
4.2.3 Виробниче освітлення.....	91
4.2.4 Виробничий шум	92
4.2.5 Виробничі випромінювання	93
4.3 Пожежна безпека.....	93
4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі	94
4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту.....	94
4.4 Висновки до розділу.....	96
ВИСНОВКИ	97

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	99
Додаток А (обов'язковий). Ілюстративний матеріал.....	103
Додаток Б (обов'язковий). Протокол перевірки навчальної (бакалаврської кваліфікаційної) роботи.....	107

ВСТУП

Актуальність теми. До швидкоплинних процесів в електроніці, мікро- і нанотехнологіях, у ядерній фізиці, оптоелектроніці, техніці швидкісного зв'язку, у вимірювальних приладах і в інших галузях науки й техніки заведено відносити процеси, які протікають у царині наносекундних, пікосекундних і навіть фемтосекундних діапазонів часів [1].

В другій половині XIX століття з'явилися перші унікальні методи генерації коротких імпульсів і прилади для дослідження процесів, що швидко протікають, у радіолокації, в ядерній і термоядерній техніці, поширенні радіохвиль НВЧ-діапазону, взаємодії елементарних частинок між собою та середовищем та інші. У ті роки надшвидкісні методи і прилади належали до унікальних розробок, що лежали у сфері вирішення першорядних завдань військово-промислового комплексу.

Нині в приладобудуванні, ядерній електроніці, у волоконно-оптичних лініях зв'язку, геодезії та астрономії широко впроваджують субнаносекундні та пікосекундні імпульсні генераторні пристрої. Кількість розробок таких пристроїв і систем, останнім часом різко збільшилася. Переваги подібних систем очевидні: мале енергоспоживання і відповідне зменшення габаритів, висока точність, велика швидкість і обсяг оброблюваної інформації.

Науково-технічні досягнення, що призвели до зменшення тривалості сигналів стали причиною виникнення нових напрямків розвитку імпульсних систем. Як приклад можна навести появу підповерхневої локації (георадари) для спостереження об'єктів під землею і за стінами будівель, ультразвукові вимірювачі рівня різних середовищ тощо [2]. З'явилися імпульсні лазери, високошвидкісна електронно-оптична техніка, а також потужна і надпотужна імпульсна енергетика та електроніка. Особливо великого прогресу було досягнуто у вимірювальній техніці. Були створені електронні цифрові осцилографи з частотами дискретизації сигналів до 100-500 ГГц [2,3] і

генератори імпульсів з перепадами субнаносекундної (менше 10^{-9} с) і навіть пікосекундної (до 10^{-12} с) тривалості.

Ще одним яскравим прикладом використання сигналів надкороткої тривалості стали геодезичні та астрометричні вимірювання з використанням радіоінтерферометрії із наддовгими базами. Точність вказаних систем залежать від абсолютних вимірювань різниці фаз або затримки сигналів від радіоджерела на різних радіотелескопах. Подібні системи повинні мати стабільну фазу та затримку або бути ретельно відкалібровані. Калібрування таких систем здійснюється системою контролю фазової стабільності. Система контролю фазової стабільності складається з генератора надкоротких імпульсних сигналів та вимірювача електричної довжини кабелю та інтервалів часу [2]. Генератор надкоротких імпульсних сигналів формує сигнал фазового калібрування. Вимірювач електричної довжини кабелю забезпечує фазову прив'язку сітки частот щодо фази опорної частоти. Системи вимірювання з використанням радіоінтерферометрії із наддовгими базами спеціально розробляються з хорошою фазовою стабільністю, але їх калібрування з використанням генератор надкоротких імпульсних сигналів ще більше підвищує точність їх характеристик. Цей факт говорить про важливість їх розробки та використання таких генераторів.

За останні десятиліття бурхливий розвиток потужних напівпровідникових приладів, як IGBT і MOSFET транзисторів, транзисторів на основі GaAs, SiC і GaN напівпровідників, вплинув на багато технічних рішень у генераторах надкоротких імпульсів [3]. Механізм швидкого відновлення р-n переходу створив новий клас генераторних пристроїв, що мають унікальні набори параметрів, недсяжних на інших технологіях. Пікосекундні твердотільні генератори є перспективним класом імпульсних пристроїв затребуваним у наукових дослідженнях [4]. За допомогою такого обладнання можна, наприклад, вивчати над швидкі процеси електричного розряду, що протікають в умовах максимально високих електричних полів протягом менш ніж однієї

мільярдної частки секунди - отримані в таких експериментах дані допоможуть вченим створювати технології та пристрої нового покоління.

Швидкодія пристроїв, що випускаються, визначається можливостями застосовуваних технологій, якісна зміна яких обходиться дуже дорого. Тому особливої актуальності набуває реалізація гранично можливої швидкодії основних пристроїв без великих витрат часу і матеріальних ресурсів, у рамках використовуваних технологій.

Усе вищевикладене, по суті, визначає актуальність, новизну і практичну значущість створення спеціалізованих серій генераторів, що враховують особливості їх перспективного застосування. Розроблення подібних генераторів визначило мету цієї роботи.

Аналіз останніх досліджень. Складнощі в розробленні високошвидкісних систем, що використовують надкороткі сигнали відбиваються на кількості та якості публікацій [2-5]. Матеріали, присвячені проектуванню пікосекундних генераторів містяться в розрізних публікаціях у періодичній пресі або у вигляді розділів в окремих книжках і мають різний науковий і технічний рівень. Проектуванням і практичним розробленням швидкодіючих пристроїв займаються приватні фірми і компанії, що також позначилося на кількості та характері інформації у вільній пресі. Вони приділяють особливу увагу найновітнішим розробкам надшвидкісних приладів (Agilent Technologies, Tektronix, LeCroy, IWATSU, R&S, Keithley, RIGOL, Yokogawa та ін.) [6,7]. Так, у [10] уперше описано нові класи вимірювальних приладів - генератори надкоротких імпульсів фірм Picosecond Pulse Lab, ALPHALAS, AVTECH, цифрові осцилографи-реєстратори й аналізатори спектра оптичного випромінювання фірми Yokogawa, імпульсні й оптичні рефлектометри низки фірм тощо [8]. Але публікації в нашій і зарубіжній пресі дедалі частіше мають рекламний характер, відображають досягнення фірм-виробників, містять технічні характеристики окремих елементів і приладів, а теоретичні та прикладні основи проектування пікосекундних генераторів відсутні.

В розрізних роботах розглядаються принципи побудови швидкісних базових вузлів імпульсної техніки, наводяться схемотехнічні реалізації пристроїв посилення, корекції, формування та генерування сигналів [12]. Велика увага в літературі приділяється формам частотних і перехідних характеристик проєктованих пристроїв здатних працювати з надкороткими сигналами [1, 3].

Метою роботи є розробка генератора надкоротких імпульсних сигналів.

Задачі досліджень. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити низку задач:

1. Дослідити існуючі методи формування фронтів мінімальної тривалості;
2. Проаналізувати існуючі сучасні пристрої синтезу надкоротких сигналів, їх технічні та функціональні можливості;
3. Розробити структурну схему на основі сучасних цифрових технологій.
4. Розробити принципову схему пристрою, засновану на двох різних логічних елементах: D-тригер та логічний елемент «І».
5. Виконати конструювання монтажною плати розробленого пристрою.
6. Провести порівняльний аналіз характеристик отриманих пристроїв.

Об'єктом дослідження є процеси генерування сигналів надкороткої тривалості.

Предметом дослідження є параметри та характеристики генераторів надкоротких імпульсних сигналів.

Новизна отриманих результатів. У результаті виконання роботи розв'язано низку практичних завдань з проєктування, виготовлення та дослідження властивостей пристроїв генерації сигналів надкороткої тривалості з характеристиками, що відповідають вимогам технічного завдання.

Розроблений в представленій роботі генератор надкоротких сигналів на логічному елементі «І» є коректно працюючим пристроєм, що реалізує всі необхідні режими і має характеристики кращі за задані при проєктуванні.

Структура представленої роботи. На початку роботи сформульовано технічне завдання. У першому розділі проаналізовано сучасні тенденції розвитку генераторів надкоротких імпульсних сигналів. Принципам формування надкоротких імпульсних сигналів був присвячений другий розділ. У розділі 3, на основі вибраного методу формування імпульсів, розроблено структурну схему, а також підібрано елементну базу та вибрано конкретні компоненти майбутнього пристрою. Вимоги безпеки розглянуті в розділі охорони праці. У висновках подані основні результати щодо виконаної роботи, а також перспективи подальших досліджень.

1 СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ГЕНЕРАТОРІВ НАДКОРОТКИХ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ

Історія радіотехніки починається з дослідів Максвелла, Герца і Попова. Використовуючи метод проб і помилок, вони проводили досліди з електричними імпульсами. Практичне застосування електричних імпульсів як сигналів, що використовуються для зв'язку, почалися після винаходу антен ід осліджень А. С. Попова. Згенеровані сигнали були імпульсами тривалістю від одиниць мілісекунд до одиниць мікросекунд.

Широке використання радіосигналів для зв'язку почалося з появою резонансних коливальних контурів, вперше вивчених Максвеллом, та селективних резонансних систем Марконі. Використання явища резонансу дозволило використовувати одночасну роботу декількох незалежних передавачів і вибіркове приймання потрібного сигналу, що забезпечило в подальшому пріоритетне використання гармонічних сигналів у радіотехніці, які і визначили тривалий час напрям розвитку радіотехніки. В результаті розвиваючи цей напрям, весь спектр частот виявився розподіленим по діапазони для різних сфер застосування, і найзручніші діапазони швидко стали перенасиченими. З часом з'ясувалося, що резонанс існує не тільки для синусоїдальних сигналів, а синусоїдальні сигнали мають ряд істотних недоліків. Багато пристроїв, в яких використовуються дискретні або цифрові сигнали для вирішення різних радіотехнічних завдань, виявляються набагато простішими в реалізації і більш досконаліми в роботі, ніж ті , що використовують гармонічні сигнали.

1.1 Особливості сигналів малої тривалості

Кількісною особливістю сучасної швидкісної техніки є надзвичайно широкий спектр електричних сигналів, що простягається від постійного струму або одиниць - десятки кілогерц до одиниць і десятки гігагерц. Елементна база

використовується на межі частотні властивостей, отже, для того, щоб проаналізувати роботу таких пристроїв потрібно мати досить точні еквівалентні діаграм всіх елементів з урахуванням їх геометричних розмірів і паразитних зв'язків.

Якісні особливості короткотривалих сигналів пов'язані з наступними властивостями[1, 2]:

1. Час затримки сигналу в пасивних і активних елементах пристроїв, співмірний з тривалістю дії сигналів, що створює передумови для розробки нових методів обробки сигналів.

2. Широкий спектр короткотривалих сигналів (одиниці – десятки гігагерц) найкраще підходить для використання в радарних система різноманітного призначення та в телекомунікаціях. Ці частоти найменші згасають у різних середовищах, розташованими нижче резонансної частоти молекул води, що дозволяє уникнути ослаблення сигналів дощем і туманом.

3. Коротка тривалість сигналів у просторі дозволяє отримати високу роздільну здатність в розмірах при локації, визначати форму і внутрішню структуру об'єктів дослідження .

Таким чином підвищення обсягу та швидкості передачі інформації в сучасних радіотехнічних системах приводить до необхідності використання сигналів субнаносекундного та пікосекундного діапазонів тривалостей (10^{-10} - 10^{-12} с), з шириною спектра від десятків та сотень кілогерц до десятків гігагерц. Такі сигнали мають ряд кількісних та якісних особливостей, які зумовили появу специфічних рішень при побудові вузлів та систем, які є перспективними в розвитку нових і модернізації старих розробок.

1.2 Перспективні напрямки використання надкоротких сигналів

Надкороткі сигнали використовуються тоді, коли їх застосування дає переваги перед гармонічними сигналами. Основні напрямки їх застосування впливає з властивостей, розглянутих вище. Застосування надкоротких

сигналів для вирішення різноманітних задач радіотехніки переросли в новий науковий напрямок, що інтенсивно розвивається в останні роки.

Обстеження об'єктів за допомогою надкороткоімпульсних сигналів. Застосування імпульсу короткої тривалості в зондуючих пристроях дозволяє значно підвищити роздільну здатність методу і вивчити не тільки об'єкт в цілому, а й його внутрішню структуру. Взаємодія з внутрішніми неоднорідностями породжує розділені в часі сигнали, що характеризують просторові параметри і властивості об'єкта [2]. Локалізація сигналу в малому обсязі простору визначила використання НКІС в таких системах, як охоронна, надрова локація, в системах, що визначають внутрішню структуру і матеріали, з яких складається об'єкт. Досліджувані об'єкти пов'язані з радіоелектронікою, фізикою, хімією, біологією, медициною та інші галузі науки і техніки.

Існує досить багато компаній які виробляють системи контролю матеріальних середовищ по відношенню до вирішення завдань інженерної геології, контролю дорожнього полотна, археологія та ін. (геолокатор "GEO-1 (2,3)" фірми ZONDAS, Вільнюс, Литва; геолокатор "RAMAC/GPR" фірми MALA GeoScience, Швеція.

Дослідження частотних характеристик. Широкий спектр сигналу використовується для визначення частотних властивостей досліджуваних об'єктів. Чим коротша тривалість імпульсу, тим ширше спектр сигналу, тим він несе в собі більше інформації. Під час зондування об'єктів, збуджуються практично всі можливі типи власних коливань досліджуваного об'єкта, за якими можна визначити характеристика об'єкта. Ідентифікувати об'єкти можна за допомогою резонансів. Порівнюючи спектри вхідних і вихідних сигналів, можна визначити частотні властивості об'єктів. Прикладом таких пристроїв можуть бути 4005 генератор пікосекундних імпульсів фірми Picosecond Pulse Lab, калібратори для осцилографів 5045 (5041) британської компанії Time Electronics та калібратор фірми Fluke «Fluke 5820A»[8].

Сучасні системи передачі інформації. Невелика тривалість і широкий спектр сигналу дозволяють забезпечити висока швидкість передачі інформації,

організують різноманітні незалежні канали передачі інформації. Широкий діапазон НКІС дозволяє розробляти системи зв'язку з шумоподібними дискретними сигналами, забезпечуючи при цьому є високу проникаючу здатність. Ці частоти найменше ослаблені різних середовищ. Спектр сигналу розташований нижче резонансної частоти молекул води, що дозволяє уникнути ослаблення сигналів дощем і туман. Низька спектральна щільність коротких дискретних сигналів дозволяє розробляти системи зв'язку з низьким енергоспоживанням, практично без втручання в роботу звичайних систем безперервної передачі інформації, забезпечити секретність передачі інформації за допомогою простих схемних рішень.

Радіоелектронні пристрої та системи з малими споживанням електроенергії. Дискретність і коротка тривалість сигналів дають можливість організувати накопичення енергії між імпульсами, застосовувати режим очікування, знизити споживання енергії. Це дозволяє різко зменшити габарити приладів, їх вагу розширюючи сферу застосування таких сигналів. Різні датчики були розроблені з використанням коротких Імпульси.

Системи безпеки. Забезпечення безпеки та високої ефективності роботи співробітників спецслужби, які охороняють або контролюють особливо важливі об'єкти, є актуальним завданням. Необхідно безперервно фіксувати місцезнаходження, пересування та фізичний стан кожного працівника, сигналізувати про відхилення маршруту або від допустимого стану. Для цього створені радіолокаційні системи, які здатні створювати тривимірне зображення навколишнього середовища і предметів при відсутності переміщення радіолокатора у просторі. До таких систем відносяться також об'ємні датчики для моніторингу простору та системи комп'ютерного зору.

Ядерна фізика. Ядерна фізика є однією з галузей науки традиційно стимулюючою розвиток високошвидкісної електроніки. До сягнення пікосекундної імпульсної техніки в формуванні, генерації, перетворенні і реєстрації імпульсів призводять до якісно новогорівень розв'язання

експериментальних задач у цій галузі. Основним з них є завданням амплітудного і часового аналізу швидкісних процесів [1].

Комп'ютерна інженерія. Підвищення швидкодії великих електронних обчислювальних систем машин стимулюється необхідністю вирішення складних наукових технічних проблеми. Збільшення швидкості роботи комп'ютерів в останнє десятиліття пов'язане з створення транзисторів (трьохелектродних базових елементів логіки) та інших елементів з максимальними робочими частотами до десятки або сотні гігагерц і з часом перемикання близько 10 пс і менше.

Акустична мікроскопія. Вивчення мікросвіту в даний час здійснюється за допомогою оптичних і електронних випромінювань, що використовуються як основа для побудови оптичних і електронних мікроскопів. Клітинні властивості, що важко доступні для звичайних оптичних приладів, можна вивчати за допомогою мікроскопів де передбачається використання акустичних хвиль, довжина яких в рідкому середовищі порівнюється з довжиною хвилі видимого діапазону. На частоті 3 ГГц, наприклад, довжина акустичної хвилі у воді дорівнює довжині хвилі 0,5 мкм, внаслідок чого акустична мікрофотографія наближається до оптичної.

Фазова калібровка радіотелескопів. У більшості сучасних радіотелескопів використовується радіоінтерферометрія з супердовгими базами. В таких пристроях, в сигнальний тракт, вводиться спеціальний сигнал для калібрування фаз обладнання. Цей сигнал використовується при кореляційній обробці радіоастрономічних спостережень для отримання синтезованого відгуку, коли необхідно узгодити фазові і затримки декількох частотних каналів, а також для контролю працездатності апаратури і фазової стабільності сигнального тракту при підготовці і проведенні спостережень. Цей сигнал є періодичною послідовністю коротких імпульсів, що створюються генератором пікосекундних імпульсів за сигналом опорної частоти, що надходить від атомного годинника радіотелескопа [2, 4].

1.3 Аналіз сучасного стану генераторів надкоротких імпульсів

Бар'єр по часу перемикання в 1 нс виявився практично непереборним для класичної схемотехніки імпульсних пристроїв на основі дискретних активних елементів (вакуумні лампи і транзисторів) [9]. Наприклад, навіть НВЧ-біполярні транзистори з частотою від одиниць до десятків ГГц, що працюють в звичайному ключовому режимі роботи, виявилися неефективними для побудови генераторів з субнаносекундною тривалістю. Висока робоча частота (до 10-20 ГГц) в них реалізована тільки в резонансних контурах, що працюють у відносно вузькому діапазоні частот. При цьому паразитні ємності транзисторів можуть бути компенсовані індуктивними колами.

Але цей метод не підходить для створення генераторів широкосмугових імпульсів, кола яких не резонансні, а аперіодичні. Більш того, наявність резонансних узгоджувальних контурів в НВЧ-транзисторах призводить до сильного спотворення форми коротких перепадів і виникнення в них паразитних коливальних процесів.

Відомо, що мінімальний час наростання імпульсів в імпульсних колах на біполярних транзисторах, таких як тригери або мультівібратори, приблизно дорівнює постійній часу транзистора $\tau_T \approx \tau_a$. Однак ця постійна часу і гранична частота ($f_T = 1/\tau_T$) сильно залежать від струму емітера, так як заряд первинних носіїв, накопичений в базі транзистора, викликає зсув межі колекторного переходу до колекторного контакту. В результаті при великих струмах емітера ширина області бази збільшується, а $f_T(I_e)$ значно падає. Ця залежність наводиться в довідкових даних для більшості транзисторів, а фізичний ефект, який її викликає, називається ефектом Кірка.

Один з перших радянських серійних наносекундних генераторів імпульсів, Г6-22, формував імпульси амплітудою до 15 В з тривалістю імпульсу 5 нс з частотою повторення 10-110 МГц. При цьому апарат мав габарити 496×475×295 мм і вагу 32 кг.

Про труднощі використання звичайної схемотехніки навіть на базі спеціалізованих і ретельно оптимізованих імпульсних інтегральних схем свідчить і більш пізній досвід розробки радянських генераторів імпульсів Г5-78 і Г5-85 з часом наростання імпульсу 1 і 0,25 нс при максимальній амплітуді імпульсу 5 і 2 В відповідно при стандартному навантаженні 50 Ом.

Першими серійними генераторами імпульсів з субнаносекундними гранями стали калібратори осцилографів серії ІІ. Вони були призначені в першу чергу для контролю перехідних характеристик широкосмугових і швидкодіючих електронних осцилографів. Але їх можна використовувати і для інших цілей, наприклад, пускових імпульсних пристроїв.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд генератора імпульсів ІІ-12

Picosecond Pulse Lab (США) вже понад чверть століття займається розробкою та виробництвом метрологічних приладів для вимірювання часової області та тісно співпрацює з Національним інститутом метрології США (NIST). Це дозволило компанії створити і випустити на ринок цілу серію генераторів пікосекундних імпульсів (Таблиця 1). Серед цієї лінійки модель 4050 (рис. 1.2) стала безпосередньою заміною «найшвидшого» серійного побутового генератора [8]. Його вихідний формувач побудований на лавинному транзисторі і дозволяє отримувати двадцятикратну амплітуду вихідного імпульсу (10 В проти 0,5 В у ІІ-12) при тому ж часі наростання 50 пс. Для формування прямокутного імпульсу в такій схемі генератора використовується

відрізок коаксіального кабелю, довжина якого задає тривалість вихідного імпульсу в 10 нс.

Таблиця 1.1 – Технічні параметри генераторів Picosecond Pulse Lab [2, 3]

Тип генератора	Час підйому, п	Амплітуда, В	Максимальна частота	Тривалість імпульсу	Водотоннажність, В	Сигналу
12010	125	2,5	0,8 ГГц	Від 250 ps до 67 ns	–2... 3,3	Імпульс
12020	125	2,5	1,6 ГГц	Від 250 ps до 67 ns	–2... 3,3	Імпульс
4005	5/9	5	1 МГц	16 нс	Ні	Диференціальних
4016	≤5	–5	500 кГц	5 нс	Ні	Диференціальних
10 050A	45	10	100 кГц	Від 100 ps до 10 нс	Ні	Імпульс
10 060A	55	10	100 кГц	Від 100 ps до 10 нс	Ні	Імпульс
10,070A	65	7,5	100 кГц	Від 100 ps до 10 нс	±5	Імпульс
2600C	250	±50	100 кГц	≤1-100 нс	Ні	Імпульс
3500Д	65	±8	1 МГц	65 осіб	±5	Імпульс
3600	70	–7,5	2,5 ГГц	70 з/с	Ні	Імпульс
4015Д	12	–5	500 кГц	5 нс	Ні	Диференціальних
4050Б	45	10	1 МГц	10 нс	Ні	Імпульс
4500Е	100	35	100 кГц	≤1-250 нс	Ні	Диференціальних
TD1107 і TD1110D	20–45	0,23	50 кГц	4 мкс	Ні	Диференціальних



Рисунок 1.2– Зовнішній вигляд диференціального генератора типу 4050 потужністю 45 к.с. від Picosecond Pulse Lab [8]

Калібратори осцилографа Fluke. В останні роки компанія Fluke зробила прорив у розробці калібраторів, як настільних, так і портативних [6]. Його багатофункціональні калібратори часто включають в комплект повірки осцилографа в якості додаткової опції (рис.1.3) [10].



Рисунок 1.3 – Калібратор осцилографа Fluke 5820A

Цей спеціально розроблений калібратор забезпечує повне покриття осцилографів із смугою пропускання до 600 МГц у стандартній комплектації та до 2,1 ГГц як розширений калібратор. Тестування можливе на сигналах постійного струму та імпульсів, а також на синусоїдальному високочастотному сигналі. У калібраторі використовуються головки з часом підйому 300 або навіть 150 к.с. Прилад може працювати із зовнішнім генератором сигналу з частотою до 2,4 ГГц, а також із зовнішнім генератором опорної частоти 10 МГц. Спеціальний модуль розширює число виходів до п'яти, дозволяючи перевірити всі чотири канали чотириканального осцилографа, наприклад (рисунок 18). Точність перевірки розгортки становить 0,33 проміле. Пристрій має габарити 432×178×473 мм, його вага становить 20 кг, а споживана потужність становить 250 В·А.

2 ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ НАДКОРОТКИХ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ

Генератор формування надкоротких імпульсних сигналів – генератор сигналів, також генератор тестових сигналів, на виході якого спостерігається сигнал у вигляді імпульсу з надкороткими фронтами і малою тривалістю. У частотній області спостерігається набір піків, гармонік сигналу, як видно на рисунку 2.1.

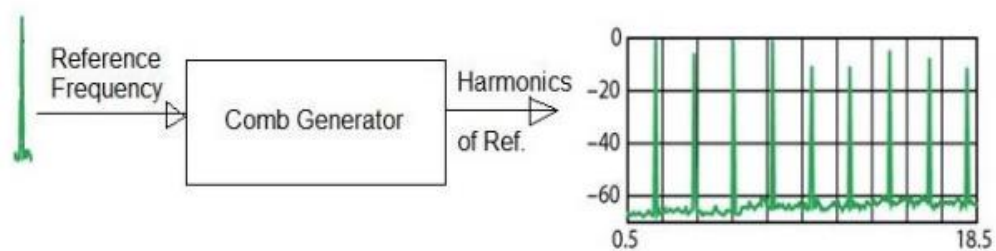


Рисунок 2.1 – Принцип роботи ГНІС і його спектральна характеристика

Це відносно звичайний інструмент, який можна знайти в більшості лабораторій, що займаються електронікою, дослідницьких центрах тощо. Існує безліч застосувань для такого генератора імпульсів, але для різних завдань, важливими є різні характеристики обладнання. В одному випадку зручно використовувати такий пристрій як джерело прямокутного сигналу щодо високої частоти, в іншому потрібна здатність генерувати короткі імпульси, а іноді потрібен малий час наростання/спаду фронтів імпульсу. Проектувати пристрій, що володіє усіма трьома згаданими якостями дуже складне завдання. Тому генератор оптимізують з погляду якоїсь однієї, згаданої раніше, характеристики. Такий варіант реалізації набагато простіше та дешевше.

2.1 Амплітудно-частотні, фазочастотні та перехідні характеристики швидкодіючих пристроїв

У швидкодіючих пристроях сигнали характеризуються широким спектром, що простягається від декількох до десятків гігагерц. Передача і обробка таких сигналів супроводжується неминучою зміною їх форми і пов'язаною з цим втратою частини інформації. Зміни відбуваються через обмеження пропускної здатності та амплітудних і фазових спотворень спектра сигналу. Стає актуальним питання про те, яка форма частотної характеристики (АЧХ), фазочастотної характеристики (ФЧХ) і перехідної характеристики (ПХ) забезпечує мінімальні втрати інформації або є оптимальною для передачі та обробки сигналу в умовах обмежень спектру. При цьому необхідно враховувати реальні умови експлуатації пристрою - пропускна здатність обмежена, а спектр реального вхідного сигналу зменшується зі збільшенням частоти. Ступінь спотворення сигналу в пристрої можна визначити по зміні вихідного сигналу щодо вхідного. В якості об'єктивного критерію ступеня спотворення сигналу з урахуванням фактичних умов експлуатації пристрою використовується критерій мінімального стандартного відхилення нормованого спектра вихідного сигналу від входу.

Для мінімізації середньоквадратичної похибки АЧХ та ФЧХ повинні задовольняти наступним відношенням [11]:

$$\begin{aligned} \varphi(\omega) &= \alpha\omega, \quad \alpha = \text{const}, \quad \omega \in [0, \omega_b] \\ \hat{K}(\omega) &= \begin{cases} 1, & \omega \in I_\omega = [0, \omega_b]; \\ 0, & \omega \notin I_\omega. \end{cases} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Оптимальну перехідну характеристику визначимо як реакцію системи на одиничний ступеньковий вплив $x(t) = 1(t)$, шляхом використання інтегрального перетворення Фур'є.

$$h(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_s} \frac{K(\omega) \sin[\omega t - \varphi(\omega)]}{\omega} d\omega \quad (2.2)$$

Після перетворення 1.2 отримаємо

$$\hat{h}(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \text{si} \left(\frac{t-a}{\omega_{\varepsilon}} \right); \quad (2.3)$$

де, $\text{si}(t)$ – табульована функція – інтегральний синус.

Графіки функцій (2.1), що відповідають оптимальним частотним характеристикам, наведені на рисунку 2.2

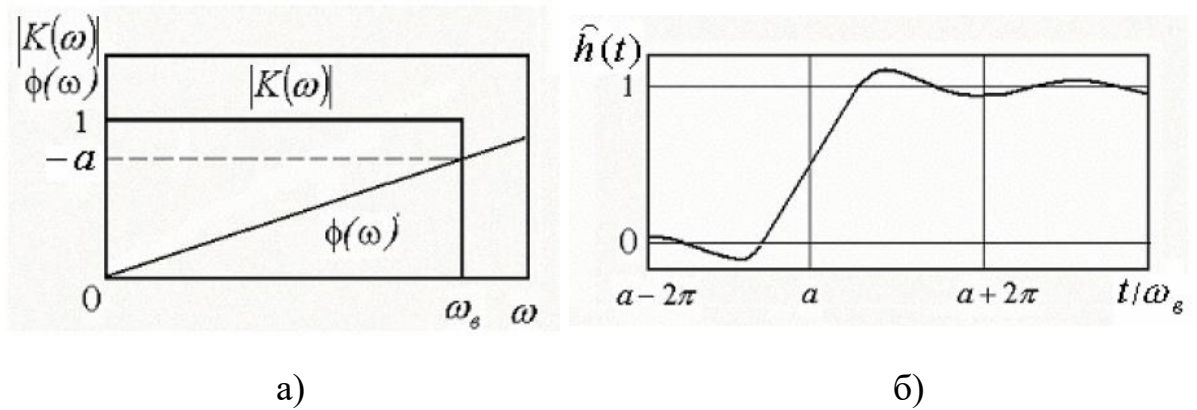


Рисунок 2.2 – Оптимальні характеристики швидкодіючих пристроїв:

а) АЧХ та ФЧХ, б) ПХ

Відомо, що амплітудно-частотна характеристика є парною функцією, тому для її апроксимації використовується парний ряд Фур'є.

$$|\overline{\Delta K(\omega)}| = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos T_n \Omega \quad (2.4)$$

де, a_0, a_n – відповідні коефіцієнти ряду Фур'є.

Тоді перехідна характеристика матиме вигляд:

$$\Delta h_k(t) = \frac{a_0}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin[\Omega + \varphi_0(\Omega)]}{\Omega} d\Omega + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{2\pi} \left\{ \int_0^{\infty} \frac{\sin[(t+T_n)\Omega + \varphi_0(\Omega)]}{\Omega} d\Omega + \int_0^{\infty} \frac{\sin[(t-T_n)\Omega + \varphi_0(\Omega)]}{\Omega} d\Omega \right\}$$

Або після скорочень:

$$\Delta h_k(t) = a_0 h_0(t) + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} a_n [h_0(t+T_n) + h_0(t-T_n)] \quad (2.5)$$

З (2.5) випливає, що зміни ПХ є половинчастою сумою початкового ПХ з ваговими коефіцієнтами a_n , зміщених у часі на інтервал $\pm T_n$ (період гармоніки апроксимуючої функції).

Для прикладу, розглянемо важливий випадок, коли зміни АЧХ зростають з ростом частоти:

$$|\Delta K(\omega)| = \Omega \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin T_n \Omega .$$

Тоді

$$\Delta h_k(t) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} b_n [\cos \Omega(t - T_n) + \cos \Omega(t + T_n)] \quad (2.6)$$

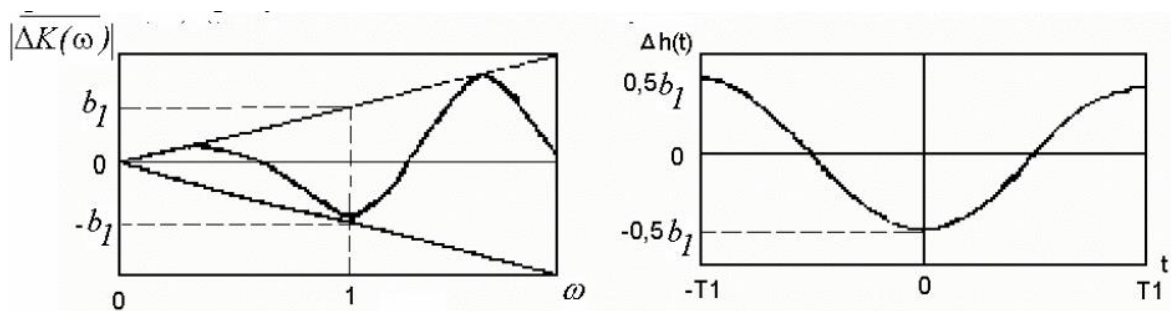


Рисунок 2.3 – Корекція ПХ при АЧХ, що зростає до відповідного зростання частоти

З отриманого виразу (2.6) випливає, що на будь-якому часовому інтервальному зміні ПХ не перевищують $\Delta h_k(t) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} b_n$ і при рівномірному допуску до зміни ПХ, допустимі відхилення частотної характеристики збільшуються від збільшення частоти. Отже, нерівномірність частотної характеристики в області верхніх частот вносить менші зміни в ПХ, ніж спотворення в нижній області частот.

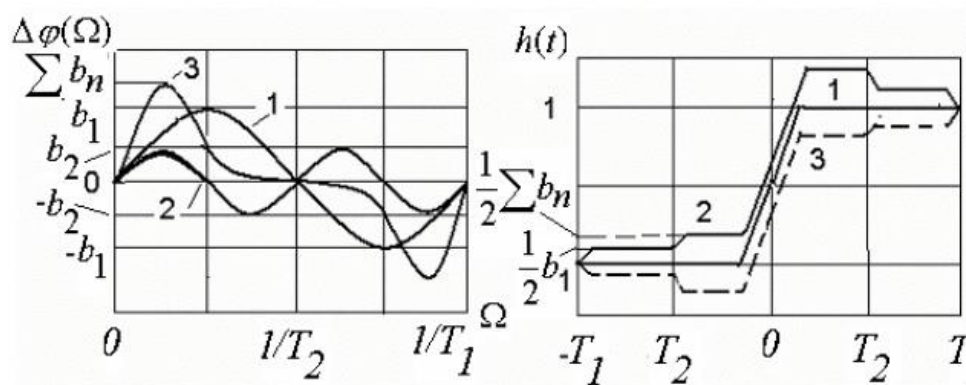
Зміни ФЧХ у силу непарності описуються не парним рядом Фур'є, а відомо, що амплітудно-частотна характеристика є парною функцією, тому для її апроксимації використовується парний ряд Фур'є.

$$\Delta\varphi(\Omega) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin T_n \Omega \quad (2.7)$$

Тоді перехідна характеристика матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta h_{\varphi}(t) &= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} b_n \left[\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin(t + T_n)\Omega}{\Omega} d\Omega - \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin(t - T_n)\Omega}{\Omega} d\Omega \right] = \\ &= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} b_n [h_0(t + T_n) - h_0(t - T_n)] \end{aligned} \quad (2.8)$$

З (2.8) випливає, що зміни ПХ є половинчастою сумою різниць початкового ПХ з ваговими коефіцієнтами b_n , зміщених у часі на інтервал $\pm T_n$ і відрізняється від змін викликаних зміною АЧХ знаком перед другою складовою.



а)

б)

Рисунок 2.4 – Корекція ПХ при змінах ФЧХ:

а) зміна ФЧХ: $1 - b_1 \sin(T_1 \Omega)$, $1 - b_2 \sin(T_2 \Omega)$, $1 - \sum b_n \sin(T_n \Omega)$

б) зміна ПХ: $1 - h_0(t)$, $1 - h_0(t) + \Delta h_{\varphi}(t)$, $1 - h_0(t) - \Delta h_{\varphi}(t)$

Таким чином можна зробити висновок, що відхилення частотної та фазової характеристик від оптимальних по-різному змінюють перехідні характеристики. При незалежній зміні амплітудно-частотних і фазово-частотних характеристик можна довільно управляти формою ПХ.

2.2 Особливості спектральних характеристик сигналів надкороткої тривалості

Для порівняння сигналів один з одним використовуються параметри сигналів і спектрів. Основними параметрами аналогового імпульсного сигналу є його тривалість τ і ширина спектра F . Вони характеризують розміри інтервалів часу та частоти, у межах яких зосереджена основна частина енергії сигналу. Геометричний сенс енергії сигналу полягає у величині площі під квадратом часової функції сигналу [12]

$$E_s = \int_{-\infty}^{+\infty} s^2(t) dt, \quad B^2 \cdot c. \quad (2.9)$$

Відповідно до теореми Парсеваля для аналогових імпульсних сигналів їхню енергію можна також визначити за амплітудно-частотним спектром:

$$E_s = \int_{-\infty}^{+\infty} |S(f)|^2 df. \quad (2.10)$$

У тому випадку, коли сигнал має кінцеву тривалість, обмежену часовим інтервалом $[t_1, t_2]$, тобто тривалість сигналу дорівнює $\tau = t_2 - t_1$, його спектральна функція $S(f)$ не обмежена на осі частот, тому ширину спектра F сигналу $s(t)$ потрібно вибирати, виходячи з обраного критерію. Для цього використовують поняття ефективної ширини спектра як інтервалу частот, у якому зосереджена задана частка загальної енергії сигналу.

Якщо в спектрі сигналу не спостерігається яскраво вираженого максимуму на деякій частоті f_0 або цей максимум розташований поблизу

початку координат, то за початок інтервалу частот, що визначає ефективну ширину спектра, приймають нульову частоту. Такі аналогові сигнали належать до так званих відеосигналів. Іншою характерною властивістю відеосигналів є відсутність гармонійного «заповнення» сигналу, яке спостерігається у модульованих радіосигналів. Якщо задатися часткою енергії в межах ширини спектра

$$M = \frac{E_M}{E_s} \cdot 100\%. \quad (2.11)$$

то ефективну ширину спектра F_M можна побічно визначити зі співвідношення:

$$E_M(F_M) = 2 \int_0^{F_M} |S(f)|^2 df. \quad (2.12)$$

Під час визначення ефективної ширини спектра зручно користуватися графіком залежності частини енергії сигналу в смузі F_M від ширини інтервалу частот $[0, F_M]$. На рис. 2.4 показано приклад такої залежності.

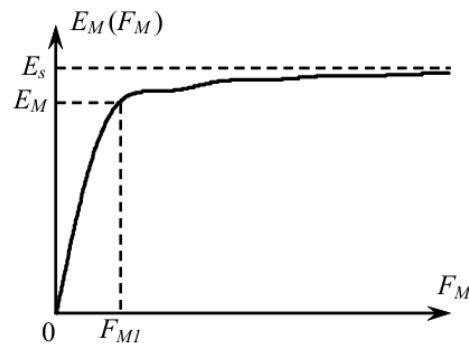


Рисунок 2.5 – Залежність частини енергії сигналу від ширини інтервалу частот

У часовій області імпульсний відеосигнал характеризується ефективною тривалістю τ_M , що визначається як тривалість інтервалу часу в якому зосереджена задана частина загальної енергії сигналу.

У багатьох системах радіозв'язку та радіолокації основні вимоги ставляться не стільки до форми сигналу, скільки до можливості виявити наявність сигналу на тлі інших сигналів і шумів. Це дає змогу користуватися простішими визначеннями тривалості імпульсу і ширини спектра. Сигнали, що

володіють скінченною енергією, мають спадаючий характер часової функції і модуля спектральної функції. Задавшись деяким рівнем відносно максимуму функції, можна безпосередньо за графіком визначити точки перетину цієї інтервалу часу, в якому зосереджена задана частина загальної енергії сигналу. Якщо розташувати початок координат у точці, що забезпечує парну або непарну симетрію часової функції сигналу $s(t)$, ефективна тривалість сигналу τ_M побічно знаходиться з виразу функції із заданим рівнем. Абсциси цих точок (координати горизонтальних осей часу або частоти) дають змогу визначити шукані параметри функцій. Як такі рівні можна використовувати 0,707 від максимуму, 0,5 від максимуму, 0,1 від максимуму тощо.

2.3 Варіанти реалізації генераторів надкоротких імпульсних сигналів

ГНІС можуть бути реалізовані багатьма шляхами, які можна розділити на три основні категорії – електронно-оптичні методи, надпровідникові методи та методи, що базуються на стандартних електронних колах. Ці методи мають безліч різних реалізацій. Найбільш популярні рішення реалізації коротко розглядатимуся нижче.

2.3.1 Метод оптичної комутації

Метод використовує мікросмужкову лінію з малим зазором, розміщену на напівпровідниковій підкладці (Si, GaAs, InP). Де область навколо зазору висвітлюється за допомогою лазерного променя, через що концентрація носіїв різко збільшується. Це призводить до збільшення площі провідності, що означає, що обидва кінці лінії стають замкнутими. Якщо один із кінців лінії підключити до джерела напруги, короткий імпульс утворюється на іншому кінці. Час наростання такого імпульсу залежить від кількох факторів: геометрії зазору, концентрації, мобільності та час релаксації носіїв у напівпровіднику, коефіцієнт абсорбції світла та і т.д. . Завдяки такому процесу отримуємо короткі імпульси (час наростання менше 200 фс).

2.3.2 Діоди із накопиченням заряду

У формувачах швидких імпульсів діод із накопиченням заряду виконує функцію розмикача струму. Обрив струму в ланцюзі діода відбувається при перемиканні ДНЗ з провідного стану у стан з високим зворотнім опором. Тривалість цього процесу може становити від десятків пікосекунд до десятків наносекунд. Фактори, що впливають на тривалість перемикання[11]:

Конструкція діода: Геометрія кристала, глибина дифузії легуючих домішок, площа р-п переходу – всі ці параметри впливають на ємність переходу та час життя неосновних носіїв заряду, а отже, і на швидкість перемикання.

Режими роботи: Величина прямого струму (чим більший струм, тим більше накопичується заряду і тим довше триває процес розсмоктування), швидкість зміни зворотної напруги також впливають на час перемикання.

Зовнішні компоненти кола: Паразитна індуктивність та ємність у колі можуть сповільнювати процес перемикання та впливати на форму імпульсу.

Схема такого формувача зображено на рис.2.6.

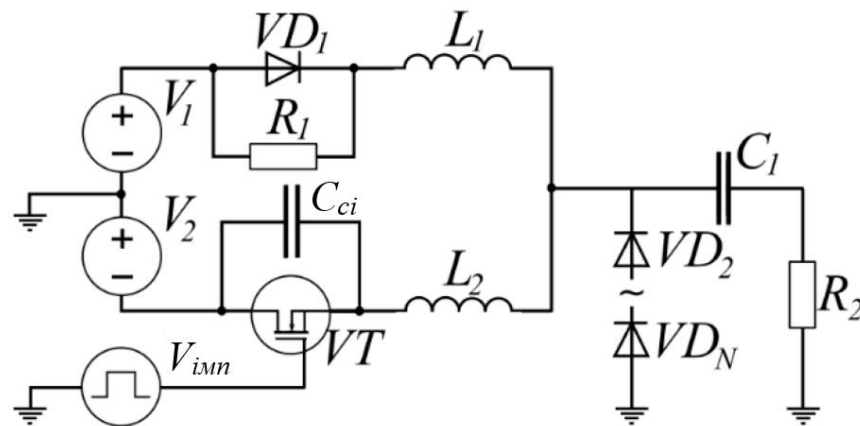


Рисунок 2.6 – Схема генератора імпульсів на ДНЗ

2.3.3 Нелінійна лінія передачі

Основна ідея полягає у тому, що нелінійна лінія передачі служить для подальшого стиснення імпульсу, що генерується звичайною цифровою КМОП схемою. Схема такого генератора зображена на рис.2.7[1].

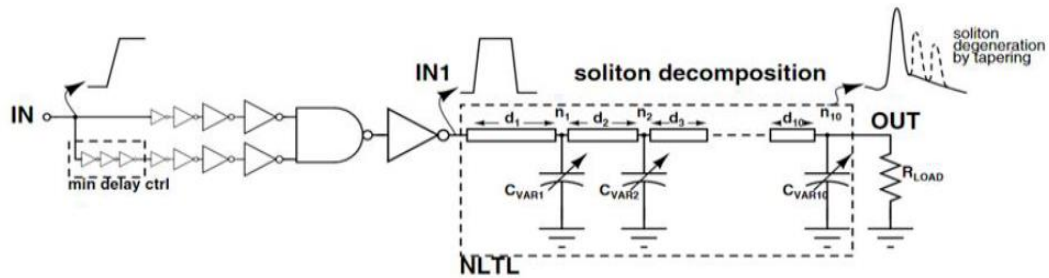


Рисунок 2.7 – Схема генератора імпульсів на NLTLN (нелінійні лінії передачі)

2.3.4 Резонансно-тунельний діод

Використання показано на рисунку 2.8.

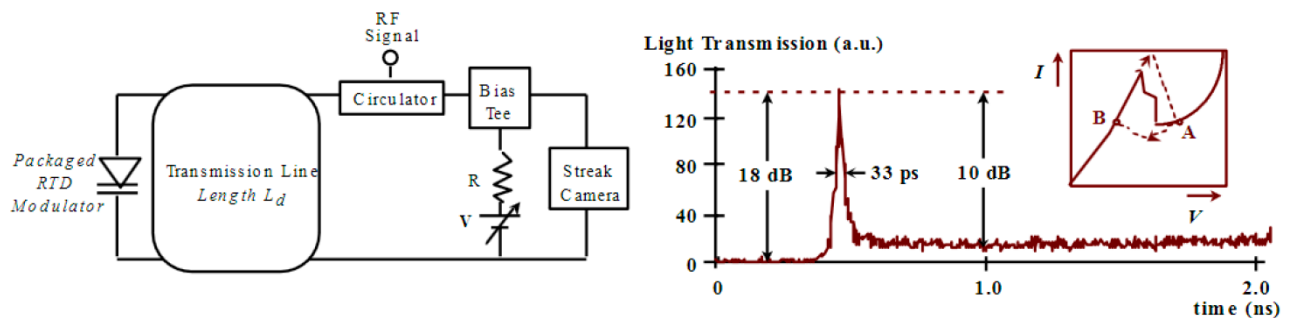


Рисунок 2.8 – Генератор імпульсів на резонансно-тунельному діоді та оптична реакція на прикладений електричний сигнал 0.8 В амплітуди, 1.5 ГГц; оптичний імпульс тривалістю 33 пс[13]

2.3.5 Транзисторні кола

Звичайні, дискретні, кремнієві транзистори почали використовувати з ранніх 60-тих років для виконання функції перемикачів та функції підсилювача. Для генерації стійких наростаючих імпульсів, НВЧ-транзистори

зазвичай використовуються в режимі перемикання (Увімк/Вимк). Щоб уникнути ефектів насичення, які уповільнюють час відновлення та обмежують максимальну частоту повторення імпульсів, найпоширенішою схемою є диференціальна пара з емітерним зв'язком як вихідний каскад генератора імпульсів[9]. Схему такого генератора зображено на рис. 2.9.

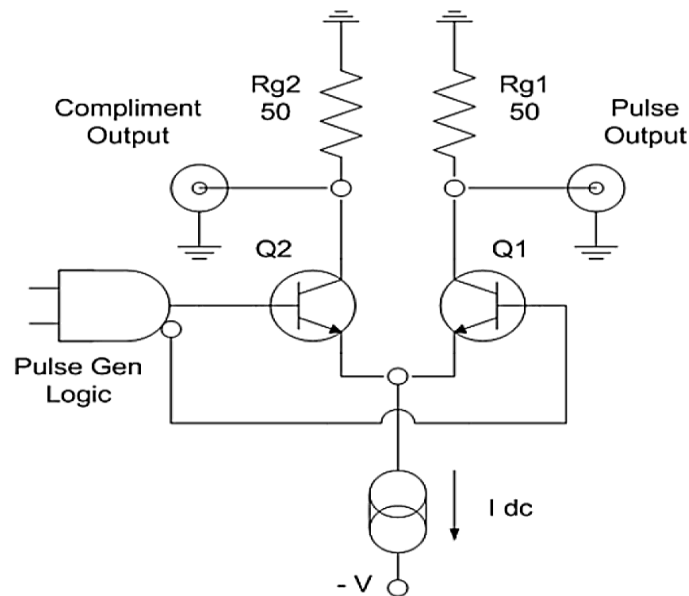


Рисунок 2.9 – Транзистор з емітерним зв'язком в якості вихідного каскаду генератора стійких імпульсів

Транзистори, Q_1 і Q_2 живляться з боку емітера джерелом постійного струму, і вони або включені в лінійній області, або вимкнені. Вони не доступні для насичення у включеному стані

Резистори в колекторі R_{g1} і R_{g2} встановлюють вихідний імпеданс генератора і зазвичай становить 50 Ом. З дискретними, кремнієвими НВЧ транзисторами можна легко отримати імпульси амплітуди 2 В (через 50 Ом) із тривалістю фронтів 1.5 нс.

Для регулювання тривалості фронтів імпульсів (> 2 нс наростання/спад) необхідно використовувати лінійний підсилювач як вихідний каскад генератора імпульсів. Керовані лінійні наростаючі та спадаючі фронти створюються шляхом зарядки та розрядки конденсатора постійним джерелом струму. Схема генератора зображена на рисунку 2.10.

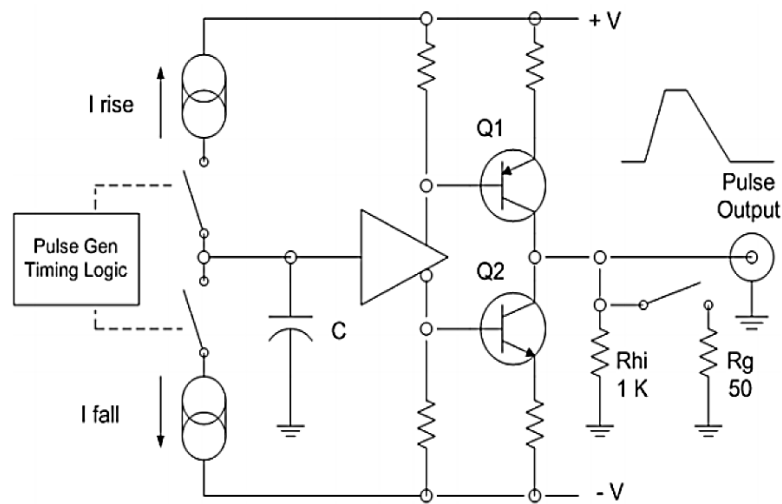


Рисунок 2.10 – Генератор пилкоподібний імпульсів та лінійний підсилювач, керуючий фронтами імпульсів

Малопотужні польові транзистори (навіть інтегральні терагерцові транзистори [3]) не дозволяють створювати вимірювальні імпульсні генератори з амплітудою близько 5 В при навантаженні 50 Ом з часом наростання менше 1 нс. Тим часом для отримання заданих рівнів напруги при стандартному опорі 50 Ом необхідний струм не менше 100 мА.

Ці обмеження поширюються і на інтегральні транзистори SiGe з гетеропереходом, які є рекордсменами за швидкістю перемикавання, впевнено долаючи бар'єр часу перемикавання в 1 пс. У складі монолітних мікросхем вони забезпечують час перемикавання порядку одиниць пс, але зазвичай не забезпечують роботу на реальне навантаження в 50 Ом. Крім того, вони не випускаються промисловістю у вигляді дискретних пристроїв. Це також справедливо для надшвидкісних біполярних транзисторів GaAs (HBT) [14].

Набагато краща ситуація йде при використанні в швидкодіючих комутаційних пристроях потужних кремнієвих польових транзисторів зі струмом понад 0,1 А і робочою напругою в десятки і навіть сотні В. Однак для цього необхідно запускати самі транзистори імпульсами з фронтальною тривалістю одиниць нс і амплітудою близько 10 В. Однак час перемикавання сильноточових (десятки А) і високовольтних (сотні В) потужних польових

транзисторів становить не менше десятків нс, а їх вхідна ємність досягає сотень і навіть тисяч пФ.

Серійні польові транзистори GaAs з вентилем на основі бар'єра Шотткі впевнено забезпечують час перемикання менше 1 нс при робочих струмах в кілька ампер. Але рівень робочих напруг невисокий – менше 10 В. Перешкодою для використання цих пристроїв (як і потужних кремнієвих транзисторів) є необхідність побудови швидкісних пускових ланцюгів і висока вартість пристроїв [15].

У зв'язку з цим традиційно будується імпульсні пристрої з субнаносекундною тривалістю імпульсів на спеціальних активних пристроях на основі нових малоінерційних фізичних явищ, що забезпечують надкороткий час перемикання при досить високих напругах і струмах. Це тунельні діоди, лавинні транзистори, електронно-оптичні перемикачі та ін.

Існує ряд способів, що дозволяють значно скоротити час наростання імпульсів, що генеруються звичайними напівпровідниковими приладами, такими як лавинні транзистори, мікрохвильові біполярні і потужні польові транзистори. Наприклад, давно використовуються диференціальні запалювачі на основі діодів накопичення заряду, які дозволяють формувати імпульси з часом наростання порядку десятків пс [1]. Ще кращі результати були отримані при застосуваннях на основі арсенідних діодів галію. Тут можна отримувати імпульси з часом наростання і спаду до 1 пса з амплітудою від десятків до сотень вольт. У деяких випадках хороші результати дають загострювачі на нелінійних лініях електропередачі.

2.3.6 Тунельний діод

Тунельний діод – спеціалізований діод з дуже незвичайною вольтамперною характеристикою (ВАХ). ВАХ тунельного діода зображено на рисунок 2.11. Явище «тунелювання» відкрито в ранніх 60-тих. Тунельний діод був першим напівпровідниковим пристроєм здатним працювати як підсилювач, генератор, комутатор на НВЧ частотах [14]. У середині 60-тих, Hewlett-Packard

і Tektronix представили генератор імпульсів здатний генерувати наростаючий фронт імпульсу порядку 25 пс, використовуючи германієві тунельні діоди.

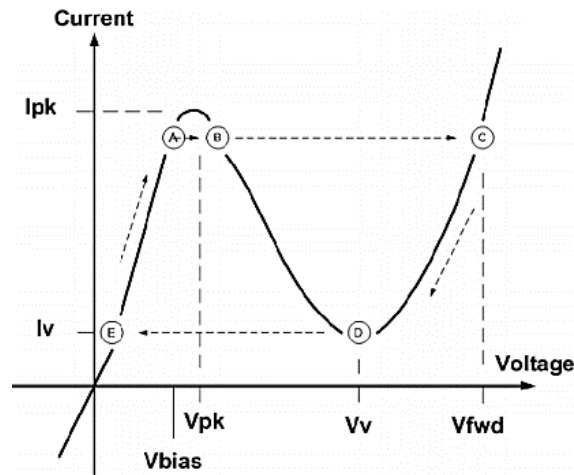


Рисунок 2.11 – Вольт-амперна характеристика тунельного діода

Поведінка тунельного діода схоже зі звичайним діодом з сильною експоненційною ВАХ характеристикою, в області сильного прямого зміщення (I квадрант). В умовах зворотного усунення (квадрант III) у нього немає як у звичайного діода, непровідного стану. Натомість він працює як резистор з малим опором. При низькій напрузі, в області прямого зміщення (I квадрант), являє собою своєрідну «S» криву. У проміжній ділянці — «S», ВАХ кривої, має негативний нахил, який передбачає негативний опір, формула 2.13.

$$R_{td} = \frac{dV}{dI} \quad (2.13)$$

На рисунку 2.12 – зображено генератор імпульсів з ланцюгами на основі тунельного діода

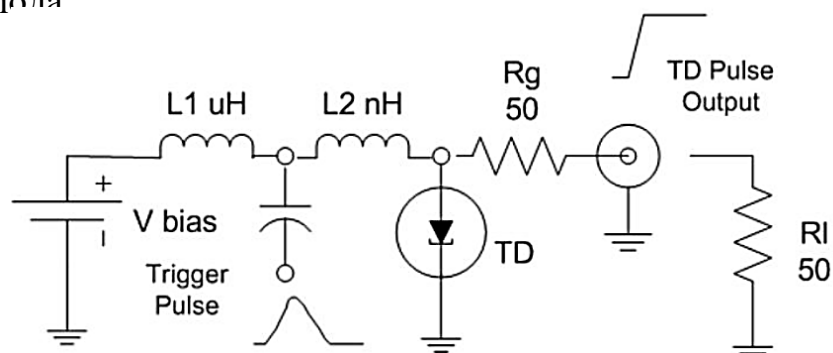


Рисунок 2.12 – Генератор імпульсів на тунельному діоді

Схеми достатньо для опису основних операцій тунельного діода для генерації швидких імпульсів. Дуже стабільне, з низькою напругою, джерело зміщення використовується, щоб змістити ТД в точку «А» на кривій ВАХ. Точка «А» встановлюється, можливо, на 1% нижче поточного значення пікового навантаження, I_{pk} , ТД. Для змінного струму, це напруга усунення, вона ізольована від ТД великою індуктивністю, L_1 . Позитивний імпульс запуску, пов'язаний з ТД через ємність C та невелику індуктивність, L_2 . Додатковий струм запуску викликає перевищення струму ТД, I_{pk} і штовхає робочу точку нагору в точку «В». Крапка «В» це область негативного опору, і вона нестабільна. Таким чином, замість того щоб залишатися в точці «В», тому що діод починає проводити постійний струм (через L_1), робоча точка ТД швидко перемикається в стабільну робочу точку «С». При цьому, напруга на ТД здійснює значний стрибок, dV . Для германієвого ТД, це значення близько $\frac{1}{2}V$. Явище «тунелювання» всередині ТД є по суті миттєвим. мови перехідного процесу напруги на висновках ТД визначаються ємністю переходу діода та його піковим струмом. Досить точно можна визначити час перемикавання діода наступними рівняннями, формула 2.14 та 2.15.

$$dT_{td} = \frac{(C_{td} * dV)}{I_{pk}} \quad (2.14)$$

$$dV = V_c - V_a \quad (2.15)$$

Під час перемикавання ТД, індуктивність порядку наногенрі L_2 , примушує всю енергію імпульсу напруги переміщатися вправо до виходу генератор імпульсів. Ефективний імпеданс ТД досить низький, коли знаходиться в точці «С».

Таким чином, послідовний резистор, R_g , використовується для встановлення вихідного імпедансу генератора рівним 50 Ом. Вихідна напруга на зовнішнє 50 омне навантаження дорівнює близько $\frac{1}{2}dV$. С більшою індуктивністю порядку мікрогенрі, що використовується для L_1 , він буде

продовжувати штовхати постійний струм I_{pk} через ТД на кілька мікросекунд, таким чином створюється довга плоска вершина, ступінчастоподібний пульс.

Однак, L_1 не може підтримувати цей струм нескінченно довго, і робоча точка в кінцевому підсумку починає падати вниз по кривій ВАХ до точки «D». Коли досягається точка «D», ТД знову входить у нестабільну область і швидко перемикається на нову стабільну робочу точку «E». Від «E» Струм через L_1 повільно збільшується. Поки ТД ще раз не досягне стабільної початкової робочої точки «A», встановленої джерелом напруги усунення постійного струму. Якби точка — «A» була зміщена в область від негативного опору, цей ланцюг діяв би як осцилятор, а не як імпульс, що запускається. Період осциляції або час відновлення пульсатора визначаються розміром індукторів L_1 та L_2 . Тунельні діоди здатні коливатися на мікрохвильових частотах у належних умовах електричного кола.

2.3.7 Лавинний транзистор

Лавинний пробій у біполярному транзисторі – явище, яке більшість розробників дійсно хочуть уникнути. Однак якщо правильно використовувати, то його можна використовувати для генерації відносно великих за амплітудою імпульсів порядку 50-100 Вольт з субнаносекундної тривалістю[9].

Лавинне множення у зворотно-зміщеному PN-переході результат іонізації при зіткненні легкокорухливими носіями заряду. Якщо електронне поле в збідненій області PN-переходу досить велике, електрони рухаються крізь кристалічні ґрати, отримують достатньо енергії, щоб вивільнити додатковий електрон і дірку при зіткненні з атомом у решітці. Два вільні електрони можуть потім викликати додаткову іонізацію як лавину, що постійно росте. ВАХ лавинного транзистора зображено на рисунку 2.13.

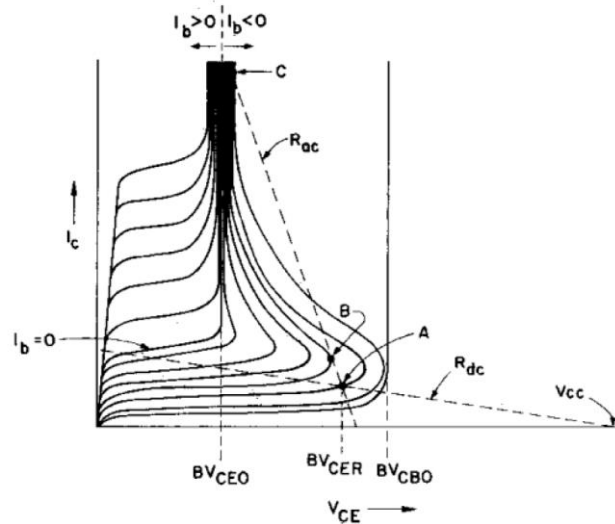


Рисунок 2.13 – Вольт-амперна характеристика лавинного транзистора

У транзисторах лавинний пробій можна контролювати за допомогою інжекції електронів струму бази.

Стандартний транзистор працює в області напруг колектора-емітера між нулем і BV_{ceo} та прямим струмом бази. BV_{ceo} це напруження пробою з колектора до емітера в ланцюзі загальної бази. Якщо прикладається зворотній струм бази, тоді напруга колектор-емітер може бути збільшена понад BV_{ceo} до досягнення лавинного пробою. Верхня межа напруги, BV_{cbo} досягається, коли виконується рівність за формулою 2.14.

$$I_b = I_c \quad (2.16)$$

BV_{cbo} це напруга пробою з колектора до бази в ланцюзі загальний емітер. Область лавини транзистора лежить між BV_{ceo} і BV_{cbo} . Слід зазначити важливу річ на рисунку 2.13. Негативний нахил постійних кривих I_b в області лавини. Негативний нахил означає, що опір малого сигналу, формула 2.16, негативний.

$$r_a = dV/di \quad (2.17)$$

Негативний опір передбачає нестабільну роботу. Таким чином, лавинний транзистор корисний як генератор або елемент перемикування. На основі

лавинного транзистора зображено рисунку 1.10. Величезне напруга живлення, V_{cc} , та резистор як навантаження по постійному струму, R_{dc} встановлює транзистор у стабільну робочу точку «А», рисунок 2.13.

Варто звернути увагу на лінію навантаження постійного струму, яка позначена R_{dc} . Індуктивність забезпечує шунтування по постійному струму між базою та емітером і шлях перебігу негативного струму витoku. У стані спокою по постійному струму, лише кілька мікроампер струму протікає у транзисторі. Заряджаючий конденсатор, C_{chg} , однак, заряджається до напруги BV_{cer} , яка позначена у точці «А»[9].

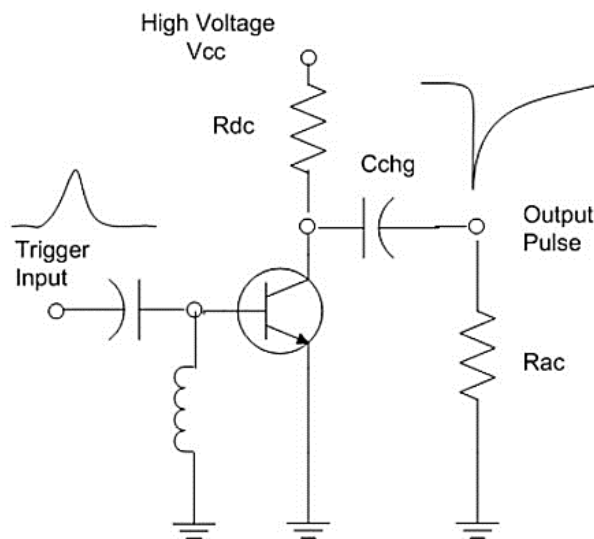


Рисунок 2.14 – Генератор імпульсів на лавинному транзисторі

Позитивна полярність запускаючого імпульсу у зв'язку з змінним струмом в базі збільшує струм бази, що викликає рух струму колектора вздовж лінії навантаження по змінному струму, R_{ac} , в робочій точці и «В». Точка «В» знаходиться в області негативного опору і точки нестабільності.

Таким чином робоча точка швидко перемикається вздовж лінії навантаження змінного струму в наступне стійке положення, точка «С». Найпростіший ланцюг показано рис.2.14.

Схема генерує експоненційний імпульс, негативної полярності, зі швидким часом спаду та повільним експоненційним зростанням на задньому

фронті. Постійна часу заднього фронту регулюється співвідношенням, показаним у формулі 2.18[11, 12].

$$t_p = R_{ac} * C_{chg} \quad (2.18)$$

Амплітуда імпульсу дорівнює, формула 2.19.

$$V_p = BV_{cer} - BV_{ceo} \quad (2.19)$$

Прямокутні імпульси можуть бути згенеровані якщо заряджаючий конденсатор замінити коаксіальною лінією передачі. Максимальна можлива частота повторення імпульсів сильно обмежується двома параметрами. По-перше, вимоги щодо перезарядки конденсатора. Постійна часу перезаряджання набагато більше, ніж постійна часу імпульсу, формула 2.20.

$$T_{chg} = R_{dc} * C_{chg} \quad (2.20)$$

Також, обмеження, пов'язане з можливістю передачі потужності транзистора. Коли відбувається лавинний пробій, напруга колектора не падає до нуля. Натомість напруга падає до нижчого напруги пробою, BV_{ceo} . Таким чином, при пробії з великим струмом, пікова потужність, що розсіюється в транзисторі, є надзвичайно високою. Щоб залишатися в межах середньої потужності транзистора, прогальність імпульсів має бути дуже низькою, а опорний сигнал має бути чітко обмежений кількома кГц.

2.3.8 Діод Ганна

У напівпровідникових матеріалах GaAs електрони перебувають у двох станах, таких як низька масова швидкість і висока швидкість низької маси. Вимога адекватного електричного поля змушує електрони переходити зі стану з низькою масою в стан з високою масою. У цьому конкретному стані електрони можуть утворювати групу і рухатися з постійною швидкістю, що може викликати протікання струму серією імпульсів. Це відомо як ефект Ганна, який використовується діодами Ганна. Ці діоди є найкращими і найбільш часто

доступними пристроями з сімейства TED (пристрої з перенесенням електронів). Ці типи діодів використовуються як перетворювачі постійного струму в мікрохвильові з особливостями негативного опору масивного GaAs (арсенід галію).

Діод Ганна виготовлений з напівпровідника N-типу, оскільки він складається з основних носіїв заряду, таких як електрони. Цей діод використовує властивість негативного опору для створення струму на високих частотах. Цей діод в основному використовується для генерації мікрохвильових сигналів близько 1 ГГц і радіочастот близько 100 ГГц. Незважаючи на те, що це діод, пристрої не мають PN-переходу, але мають ефект, званий ефектом Ганна [1, 14].

Найчастіше використовувані матеріали - GaAs (арсенід галію) і InP (фосфід індію), а також використовували інші матеріали, такі як Ge, ZnSe, InAs, CdTe, InSb. Важливо використовувати матеріал n-типу, оскільки ефект перенесеного електрона просто відповідає електронам, а не діркам, виявленим у матеріалі p-типу. У цьому пристрої є 3 основні області, які називаються верхньою, нижньою і середньою областями.

Принцип роботи діода Ганна в основному залежить від ефекту Ганна. У деяких матеріалах, таких як InP і GaAs, як тільки пороговий рівень досягається через електричне поле всередині матеріалу, рухливість електронів одночасно зменшується.

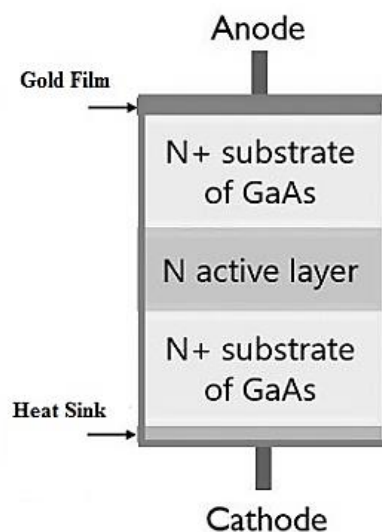


Рисунок 2.15 – Структура діода Ганна

Коли електричне поле посилюється, генерується негативний опір. Як тільки напруженість електричного поля для матеріалу GaAs досягає свого значного значення на негативному електроді, може утворитися область з низькою рухливістю електронів. Ця область переміщується через середню швидкість електронів до електрода $+Ve$. Діод Ганна включає область негативного опору на своїх характеристиках CV . Ця область дає змогу діоду посилювати сигнали, тому його можна використовувати в генераторах і підсилювачах.

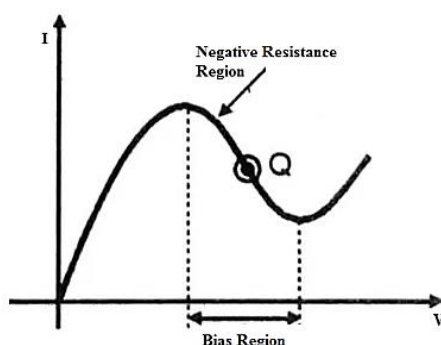


Рисунок 2.16 – ВАХ діода Ганна

Циклічна природа руху електронів в середні кристалу виробляє коливання з частотою аж до 100 ГГц. Ганна показують область негативного опору на його кривій характеристики VI , показаній нижче. Таким чином, ця область дає змогу діоду посилювати сигнали, тому його можна використовувати в генераторах і підсилювачах. Але генератори на діоді Ганна

2.3.9 Цифрові кола

В основі генераторів на цифрових елементах закладено використання високошвидкісних логічних елементів, цифрових комутаторів та різних ПЛІС, мікроконтролерів. Через високу швидкість перемикання логічних елементів можна отримати досить швидкі фронти сигналу на виході, а різноманітність логічних функцій, дозволяють впровадити дані елементи у величезну кількість схем, дані характеристики дозволяють будувати генератори з урахуванням таких логічних елементів. Використання ПЛІС та мікроконтролерів дозволить

швидко змінювати конфігурацію та деякі функції майбутнього пристрою, що додає можливі застосування для такого виду схем. Особливості[9]:

- простота проектування майбутнього пристрою, за рахунок використання логічних мікросхем;
- конфігурація готового пристрою, який миттєво може змінювати параметри, тим самим додавати новий функціонал до пристрою;
- широкий вибір компонентів різних фірм;
- хороші показники наростання/спаду імпульсу аж до 10 пс.

2.4 Використання генератора надкоротких імпульсних сигналів

Генератор надкоротких імпульсів спроектован видавати електричні імпульси. Такий пристрій часто використовують для виявлення несправностей і ремонту інших електронних чи акустичних пристроїв. Вони також іноді використовуються в художніх додатках.

Застосування для виявлення несправностей, у цьому випадку ГНІ використовується як передавач сигналу, з відомими параметрами, крізь досліджувальний ланцюг, для тесту. Зазвичай інші пристрої, такі як осцилограф, спектроаналізатор та ін. підключають до іншого кінця ланцюга, для вимірювань сигналу на виході досліджуваного пристрою.

ГНІ може виступати в ролі генератора гармонік, який, також широко використовується як еталон гармонічної фази для векторного аналізу нелінійних ланцюгів (NVNA) та аналіз сигналів великої амплітуди (LSNA).

У метрології даний генератор використовують для створення годинника, який покращує точність ультрасучасного атомного годинника. Якщо генератор надкоротких імпульсів спроектований електронно-оптичним методом, то годинник, розроблений на основі такого ГНІ, робить похибку менше ніж на секунду за весь час існування Всесвіту. Також дозволяють точно вимірювати оптичні частоти.

В астрономії вони можуть забезпечити високу точність вимірювань та безперервність спостережень для оптичного обладнання протягом десятиліть, що вкрай важливо для довгострокових вимірювань, щоб знайти планети земного типу в інших сонячних системах і не лише.

Деякі з найпростіших застосувань коротких імпульсів це вимірювання:

- Швидких напівпровідникових пристроїв.
- НВЧ підсилювачів.
- З'єднувачів, мікросмужкових ліній передач тощо. (За допомогою рефлектометрії у часовій області)
- Осцилографів із широкою смугою пропускання.

Також, наприклад, можливо визначення коефіцієнтів матриці S (аналізатор кіл) або швидку (надкоротку) спектроскопію хімічних процесів, що, отже, дозволяє контролювати їх у режимі реального часу, що дає можливість рятувати життя.

ЗРОЗРОБКА ГЕНЕРАТОРА НАДКОРОТКИХ ІМПУЛЬСІВ

3.1 Визначення структури генератора надкоротких імпульсів

На основі аналізу існуючих методів генерації імпульсних сигналів короткої тривалості за основу структури майбутнього генератора було обрано метод, що базується на теорії електронних кіл. Це пов'язано з тим, що даний спосіб розробки має деякий ряд особливостей. Складність розробки таких систем набагато менша, ніж у інших методів. Взаємозамінність та великий вибір компонентів, варіація способів формування імпульсу малої тривалості.

Генерація імпульсів згідно з технічним завданням здійснюється у два етапи, як показано на рис.3.1.

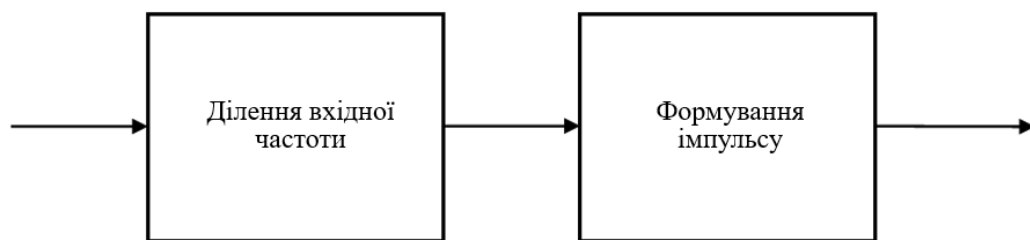


Рисунок 3.1 – Етапи формування послідовності надкоротких імпульсів

За поділ частоти відповідає елемент програмованої інтегральної логіки. На виході подільника частоти, для формування заданих фронтів імпульсних сигналів, запропоновано використати додатковий швидкодіючий логічний цифровий елемент. Формування вихідного імпульсу буде здійснюватися вихідним пристроєм, що працює у ключовому режимі. Ключ регулює тривалість імпульсу, що задається програмованою логічною інтегральною схемою (ПЛІС).

3.2 Вибір складових компонентів

Як відомо елементи програмованої логіки не мають потрібних характеристик для формування крутості фронтів вихідних сигналів [2]. Сигнал на її виході може бути спотворений внаслідок недостатньої швидкодії мікросхеми або, навіть на нього, можуть накладатися внутрішні шуми самої ПЛІС. Оскільки необхідно зберегти характеристики опорного сигналу, спільно з ПЛІС використовується D-тригер (рис.3.2)[9].

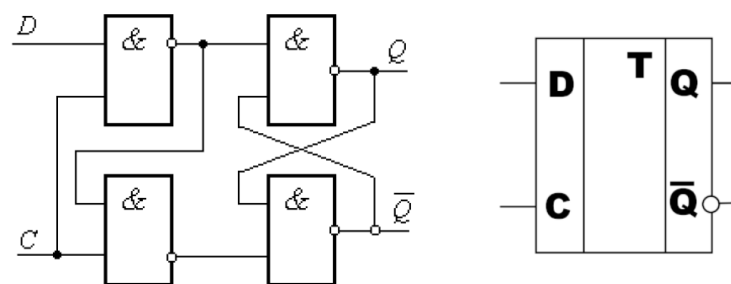


Рисунок 3.2 – D-тригер на логічних елементах «І» та його умовне графічне зображення

D-тригером називається тригер з одним інформаційним входом, який працює так, що сигнал на виході після перемикання дорівнює сигналу на вході D до перемикання, тобто $Q_{n+1} = D_n$ [2]. Основне призначення D-тригерів - затримка сигналу, поданого на вхід D. Він має інформаційний вхід D (вхід даних) і вхід синхронізації C. Вхід синхронізації C може бути статичним (потенційним) і динамічним. У тригерів зі статичним входом C інформація записується протягом часу, за якого рівень сигналу $C=1$. У тригерах із динамічним входом C інформація записується тільки протягом перепаду напруги на вході C. Динамічний вхід зображують на схемах трикутником. Якщо вершина трикутника звернена в бік мікросхеми (прямий динамічний вхід), то тригер спрацьовує за фронтом вхідного імпульсу, якщо від неї (інверсний динамічний вхід) - за зрізом імпульсу. У такому тригері інформація на виході може бути затримана на один такт щодо вхідної інформації.

На вхід D подається опорний зовнішній сигнал. Сигнал завантаження С подається з ПЛІС. Частотою сигналу завантаження визначається з якою частотою D-тригер видаватиме опорний сигнал на вихід. Тим самим, керуючи частотою та шпаруватістю сигналу завантаження, можна досягати необхідної частоти сигналу на виході. Робота D-тригера показано на рисунку 3.3

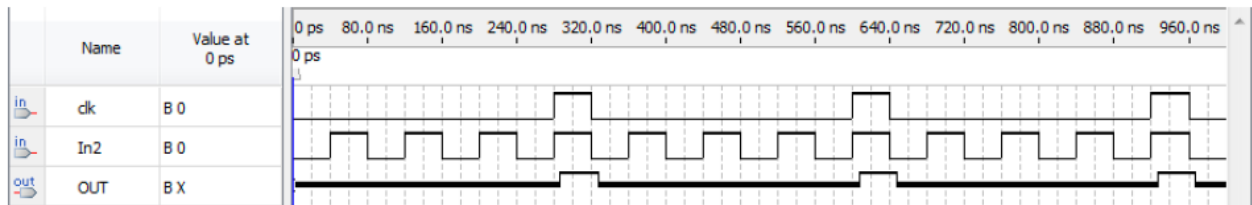


Рисунок 3.3 – Приклад роботи D-тригера як подільника частотиб
(clk – сигнал завантаження, In2 - інформаційний сигнал)

Набуття формикінцевого імпульсу відбувається за допомогою цифрової мікросхеми – високошвидкісного логічного елемента. Така мікросхема дозволяє генерувати імпульси з тривалістю фронтів до десятків пікосекунд, а в залежності від логічної функції, що реалізується цифровою мікросхемою, визначається спосіб зменшення тривалості вихідного імпульсу.

Якщо використати для цієї мети, як логічний елемент, вищевказаний D-тригер, то він буде виконувати функцію формувача крутих фронтів (фронтів малої тривалості) нашого імпульсного сигналу. Для формування тривалості вихідного імпульсу послідовно підключається цифровий ключ, який управляється з ПЛІС. Його функція полягає в тому, щоб вкоротити імпульси шляхом обрізання в певний момент часу. Тим самим, керуючи ключем, ми можемо керувати тривалістю імпульсу на виході пристрою.

Як інший, можливий варіант реалізації форми імпульсів надкороткої тривалості можна використати логічний цифровий елемент «І». Формування тривалості імпульсу, в цьому випадку, відбувається за рахунок особливостей

роботи такого логічного елемента. Елемент «І» має два входи та один вихід (рис. 3.4).

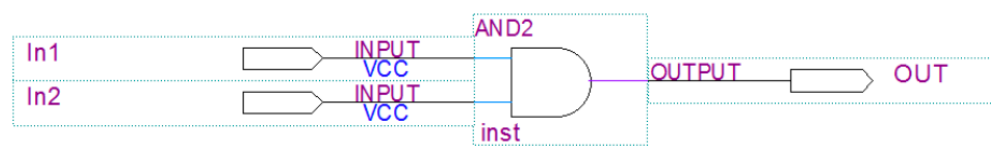


Рисунок 3.4 – Логічний елемент «І»

Таблиця 3.1 – Таблиця істинності логічного елемента «І»[9]

Вхід 1	Вхід 2	Вихід
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	0

В загальному отримаємо, що регулюючи затримку вхідних сигналів, можна регулювати тривалість імпульсу на виході пристрою. Робота елемента «І» для формування імпульсів малої тривалості показано рис.3.5. З рисунка видно, що величина затримки t між сигналами на входах логічного елемента дорівнює тривалості імпульсу на виході елемента «І»

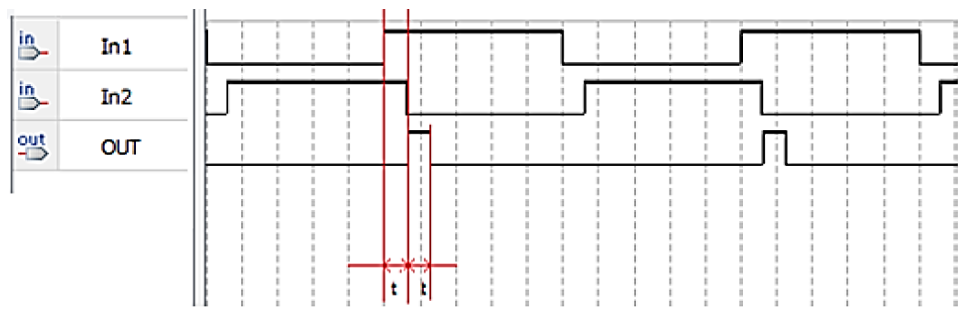


Рисунок 3.5 – Принцип роботи логічного елемента «І» як формувача імпульсів

Дешевизна, простота і доступність - це одні з ключових переваг D-тригера, особливо в контексті практичного застосування. D-тригер має просту схему (менше логічних елементів), а отже його легко реалізувати в інтегральних мікросхемах. Він займає менше місця на кристалі. Він потребує менше енергії. Усе це знижує вартість виробництва, особливо під час масового випуску.

Один вхід даних (D) і один тактовий вхід (CLK) роблять роботу з D-тригером дуже простою, легко проектувати схеми, менша ймовірність помилок під час розроблення. Спрощується налагодження і тестування.

Тригери входять до складу більшості стандартних логічних мікросхем (наприклад, серії 74НС, 4000 та ін.). Їх можна знайти в будь-якому радіомагазині, у наборах Arduino, FPGA, CPLD тощо. Вони підтримуються всіма основними мовами опису апаратури (VHDL, Verilog тощо). Таким чином,

D-тригер - це дешевий, простий і доступний будівельний блок для цифрової логіки, що ідеально підходить для зберігання інформації та синхронізації даних у цифрових схемах. Через доступність, у зв'язку з вартістю та наявності в магазинах, особливості роботи та характеристик за основу було взято D-тригер. Також сформувати необхідні імпульси за допомогою D-тригера простіше ніж елементом «І».

Внаслідок цього кінцева структурна схема генератора надкороткого імпульсу на D-тригері наведена на рис. 3.6.

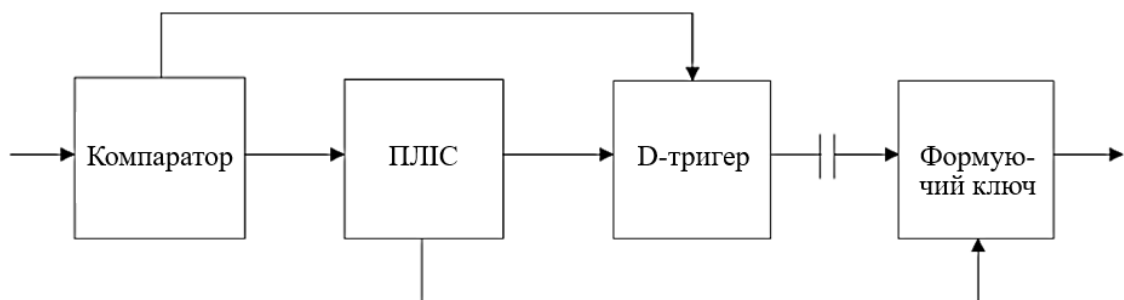


Рисунок 3.6 – Структурна схема генератора надкороткого імпульсу

Сигнал приходить на швидкісний компаратор, після чого поділяється на два, один із сигналів після компаратора йде як тактовий сигнал D-тригера, інший є тактовим сигналом для ПЛІС. У ПЛІС сигнал ділиться на коефіцієнт поділу M і потім подається на інформаційний вхід D-тригера. У даній схемі ПЛІС і D-тригер виступають як подільник частоти.

В класичних схемах формування імпульсних послідовностей, для забезпечення крутих фронтів синхронізуючих імпульсів, використовуються формуючі RC-кола рис. 3.7[12].

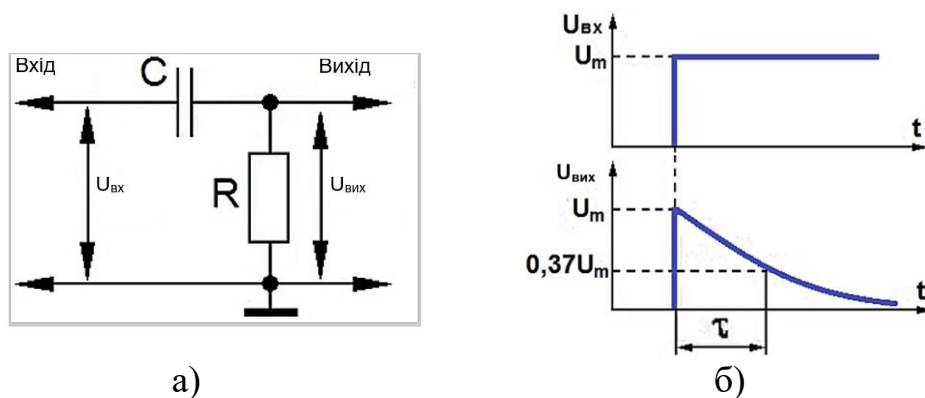


Рисунок 3.7 – Диференціальне RC-коло (а); б) процес диференціювання

Під час подачі на вхід диференціального кола імпульсу напруги конденсатор одразу почне заряджатися струмом, що проходить через нього самого і резистор. Спочатку струм стрибком зростає до максимального значення U_m , потім у міру збільшення заряду конденсатора поступово зменшиться до нуля за експонентою. Коли через резистор проходить струм, на ньому утворюється падіння напруги. Оскільки струм змінюється експоненціально, то й напруга змінюватиметься експоненціально від максимуму до нуля. Падіння напруги на резисторі є вихідною напругою. Його величину можна визначити за формулою

$$U_{вих} = U_m \cdot e^{-t/\tau}.$$

Величина τ називається постійною часу кола і відповідає зміні вихідної напруги на 63% від вихідної ($e^{-1} = 0,37$). Час зміни вихідної напруги залежить від опору резистора і ємності конденсатора і, відповідно, постійна часу ланцюга пропорційна цим значенням, тобто $\tau = RC$. Якщо ємність у Фарадах, опір в Омах, то τ у секундах.

Після D-тригера сигнал проходить на диференціальне RC-коло, яке виконує роль диференціатора, для отримання короткого сигналу з прямокутного імпульсу. По кожному фронту прямокутного імпульсу утворюється пік з експоненціальним підйомом або спадом, як показано на рисунку 3.8[11, 12].

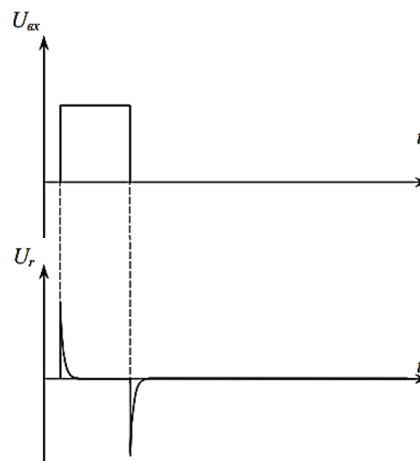


Рисунок 3.8 – Диференціювання прямокутного імпульсу

Як видно з рис.3.8, після диференціювання, з'являється негативний пік від заднього фронту прямокутного імпульсу який, відповідно потрібно прибрати. Для цього використовується цифровий комутатор, керований з ПЛІС. Він відкривається на прохід сигналу у моменти позитивного піку та закритий у моменти негативного піку. Тим самим виходить короткий імпульс з заданою частотою повторення.

3.3 Вибір елементної бази

З урахуванням розробленої структурної схеми рис. 3.6 підберемо необхідні електричні компоненти нашої майбутньої принципової схеми.

3.3.1 D-тригер

Головним елементом генератора, який буде задавати форму вихідного імпульсного сигналу є високошвидкісний логічний елемент – D-тригер. Таким елементом виступила мікросхема фірми ON Semiconductor, модель MC100E431FN [16]. Це 3-розрядний фліп-флоп з диференціальним тактовим генератором, входом і виходом даних. Асинхронні елементи керування встановленням і скиданням керуються фронтом сигналу, а не рівнем. Це дозволяє користувачеві швидко встановлювати або скидати фліп-флоп, а потім продовжувати такт на наступному фронті тактового імпульсу, без необхідності зняття сигналу встановлення/скидання. E431 також спроектовано з більшими внутрішніми коливаннями, що має на меті мінімізувати час, витрачений на перетин порогової області, і таким чином зменшити вікно чутливості до метастабільності. Диференціальні входні структури затиснуті таким чином, що входи невикористовуваних регістрів можна залишати відкритими, не порушуючи мережу зсуву приладу. Через фліп-флоп, що запускається фронтом сигналу, одночасне відкриття входів синхронізації та даних призведе до того, що вихід досягне неідентифікованого, але допустимого стану. Входи спрацьовують лише тоді, коли на обох падає напруга на 2,5 В нижче рівня $V_{CC\max}$. Ця мікросхема містить 3 не пов'язаних між собою D/R-S-тригера. Має диференціальні входи – інформаційний вхід «D» та тактовий вхід «CLK». Входи «R» та «S», для скидання внутрішнього стану та примусової установки внутрішнього стану до рівня логічної одиниці, відповідно. І диференційний вихід «Q». Схема зображена на рисунку 3.9.

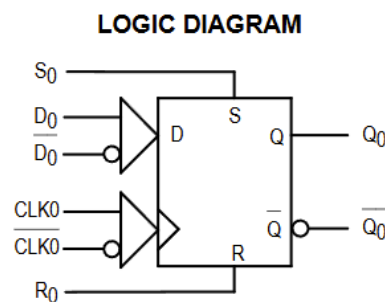


Рисунок 3.9 – Логічна структура мікросхеми MC100E431 (1/3 частка)

До основних параметрів, що необхідні для подальшого проектування можна віднести: напруга живлення - від -5,7 до 5,7 в; струм споживання - 110мА; джіттер – менш 1 пс; час наростання/спаду фронтів імпульсу (рівень 20%-80%) – 450 пс; два режими робіт: а. PECL – напруга живлення від 0 до 5,7 В; б. NECL – напруга живлення від -5,7 до 0 В.

Працює на емітерно-зв'язній логіці (ECL) – перше диференціальне високошвидкісне логічне сімейство і на сьогодні залишається самим швидким сімейством цифрової логіки [17]. Однак істотним недоліком цієї технології є зазвичай негативне напруга джерела живлення, що використовується зазвичай. ECL-виходи – це відкриті емітерні виходи, для яких потрібна негативна напруга живлення, більша, ніж напруга нижнього логічного рівня. PECL на противагу технології ECL вимагає позитивну напругу джерела живлення. Технологія PECL працює з живленням $5\text{ В} \pm 5\%$. Планується працювати з мікросхемою саме в режимі PECL.

RS-тригер відрізняється від D-тригера наявністю двох входів R та S. Якщо на ці входи встановити назавжди логічний рівень «0», то отримаємо D тригер. З трьох RS-тригерів необхідний лише один, тому входи залишкових RS-тригерів необхідно замкнути на землю. Тривалість фронту 450 пс цілком достатньо, щоб забезпечити необхідну ширину спектру. Сигнали подаватимуться на мікросхему в режимі single-ended. Single Ended - режим, коли у диференціальній парі використовується лише один дріт, другий, залежно від логіки, що використовується в мікросхемі, навантажується на землю або живлення.

3.3.2 Програмована логічна інтегральна схема

Центральним елементом нашого генератора є мікросхема ПЛІС. Це пристрій керування периферичною цифровою логікою який задає параметри вихідної послідовності імпульсів. Для цієї мети було обрано сімейство Coolrunner II, фірми Xilinx, модель XC2C32A.

Програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС) сімейства CPLD (Complex Programmable Logic Device) знаходять широке застосування в цифрових пристроях різного призначення завдяки низькій вартості й таким перевагам, як збереження конфігурації під час вимкнення живлення та можливість програмування в системі [18]. Фірма Xilinx, яка є провідним світовим виробником ПЛІС, поряд з розробкою нових сімейств FPGA веде постійну роботу зі створення перспективних мікросхем з архітектурою CPLD, що відповідають сучасним вимогам. При цьому основними напрямками є підвищення продуктивності ПЛІС, зниження споживаної потужності, реалізація можливості підтримки різних цифрових сигнальних стандартів введення/виведення, забезпечення надійного захисту конфігураційних даних від копіювання.

Мікросхеми розглянутого сімейства дають змогу реалізувати на їхній основі проекти із системними частотами до 323 МГц. Мінімальна затримка поширення сигналу від вхідного контакту мікросхеми до вихідного через комбінаційну логіку становить від 3,8 до 7,1 нс. Архітектурні особливості мікросхем ПЛІС сімейства CoolRunner-II надають можливість підвищення продуктивності проєктованих пристроїв без збільшення зовнішньої частоти синхронізації завдяки використанню тригерів, які тактуються фронтом і спадом сигналу синхронізації. При цьому мікросхеми сімейства CoolRunner-II характеризуються ультранизькими значеннями потужності, споживаної як у статичному, так і в динамічному режимі. Значення споживаного струму для статичного режиму не перевищує 100 мкА, що на порядок нижче порівняно з ПЛІС інших серій і виробників. Потужність, споживана в динамічному режимі, також у кілька разів менша, ніж в інших типів мікросхем із відповідним обсягом ресурсів. Такі показники зумовлені насамперед застосуванням технології FZP (Fast Zero Power), що забезпечує досягнення мінімального рівня споживаної потужності в поєднанні з високою швидкодією.

Архітектура. Узагальнена архітектура мікросхем ПЛІС сімейства CoolRunner-II представлена на рис. 3.10. Її основу складають сукупність

функціональних блоків (Function Block, FB), блоків вводу/виводу (Input/Output block, IOB) і швидкодіюча матриця перемикавання AIM. Кількість функціональних блоків і блоків введення/виведення визначається типом мікросхеми ПЛІС. Незважаючи на схожість із типовою архітектурою ПЛІС сімейств CPLD, структура принципово відрізняється способом реалізації її елементів [18].

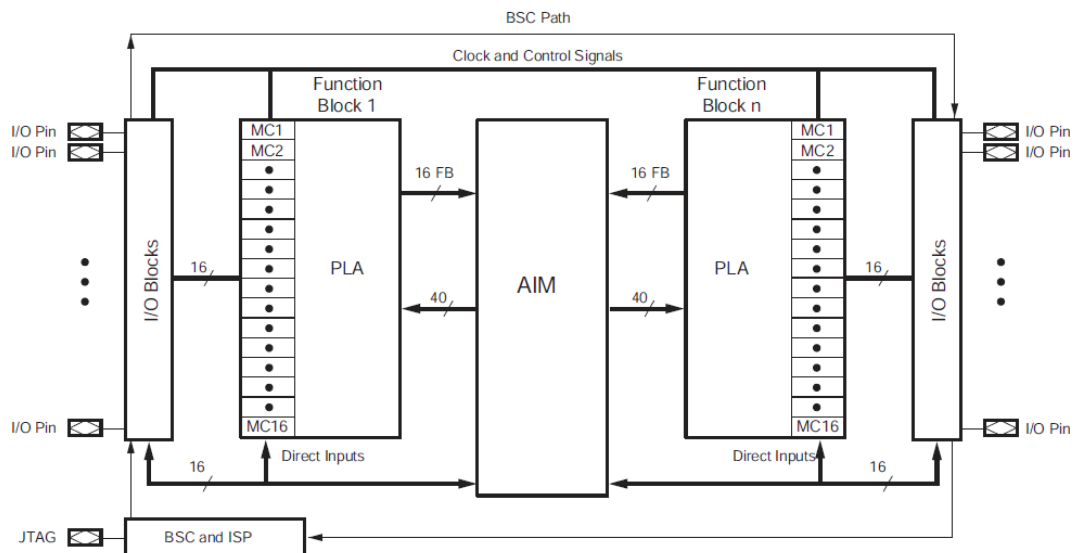


Рисунок 3.10 – Архітектура мікросхем ПЛІС сімейства CoolRunner-II

У функціональних блоках зосереджені основні логічні ресурси мікросхем. Кожен функціональний блок має 40 входів, під'єднаних до виводів матриці перемикавання, і 16 «швидких» входів, які з'єднані безпосередньо з блоками вводу/виводу. Крім того, до функціональних блоків підведено чотири глобальні сигнали: сигнал скидання та встановлення GSR і три тактові сигнали GCK0 - GCK2. Структура функціонального блоку містить програмовану матрицю логічних добутків, яку можна програмувати, і 16 незалежних макроклітинок. Використовується програмована матриця логічних добутків типу PLA (Programmable Logic Array). Застосування PLA-матриці дає змогу оптимізувати поділ і спільне використання ресурсів мікросхеми під час реалізації проєкту. Її 40 прямих та інверсних входів з'єднані безпосередньо з виходами перемикальної матриці. PLA-матриця логічних добутків дає змогу сформувати 56 термів, частину з яких можна використовувати як сигнали керування,

мікросхеми. Крім входів, з'єднаних із виходами PLA-матриці логічних добутків, макроклітинка містить додатковий, так званий «швидкий» вхід, під'єднаний безпосередньо до блоків вводу/виводу. Тим самим надається можливість використання тригера, що входить до складу макрокомірки, як вхідного тригера або засувки. При цьому комбінаторні функції макрокомірки зберігаються.

Кінцеві сигнали з виходів макрокомірок надходять до блоків вводу/виводу та на входи високошвидкісної матриці перемикачів АІМ, яка дає змогу передати їх далі на входи інших функціональних блоків. На інші її входи подаються сигнали, що надходять із блоків введення/виводу, які потім спрямовуються до входів функціональних блоків мікросхеми. Перемикальна матриця АІМ забезпечує необхідну комутацію сигналів, що надходять із блоків введення/виводу, вхідних і вихідних сигналів функціональних блоків, за мінімальної споживаної потужності в поєднанні з високою швидкодією.

Блоки введення/виводу призначені для організації інтерфейсу між внутрішніми сигналами мікросхеми та виводами ПЛІС. Вони виконують функцію буферизації всіх вхідних і вихідних сигналів, керування виходами та формування програмованого «загального» виводу. Структуру блоку вводу/виводу показано на рис. 3.12. нижче [18].

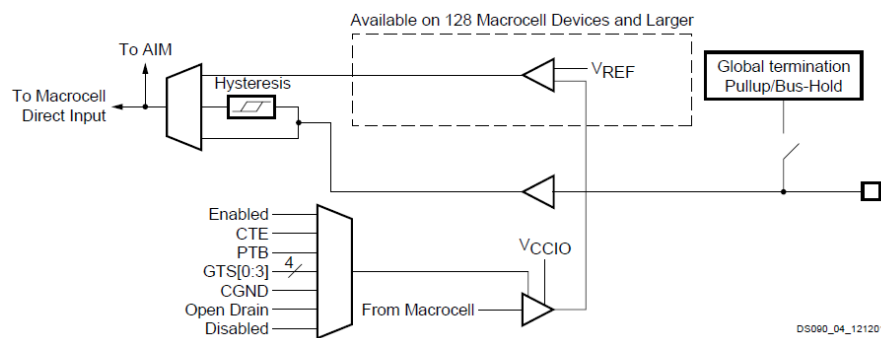


Рисунок 3.12 – Структуру блоку вводу/виводу XC2C32A

Крім вхідного і вихідного буферних елементів до складу блоків введення/виведення входить тригер Шмітта, призначений для вибіркового використання з метою зменшення рівня перешкод на вхідних контактах

мікросхеми. Структура блоків введення/виводу включає також високоомний підтягувальний резистор PullUP і колог утримання останнього стану Bus Hold. Вихідні кола забезпечують можливість формування виходів, що функціонують у звичайному режимі, з відкритим стоком або з трьома станами (високоімпедансний стан). Крім того, вони виконують функцію керування тривалістю фронтів вихідних сигналів.

Характерною особливістю блоків введення/виведення є підтримка низки широко використовуваних стандартів цифрових сигналів, що дають змогу організувати взаємодію із зовнішніми елементами високошвидкісної пам'яті та сполучення з шинними інтерфейсами. Наприклад, стандарт HSTL (High-Speed Transceiver Logic), широко застосовується у високошвидкісних інтерфейсах пам'яті, а SSTL (Stub-Series Terminated Logic) - під час реалізації шинних інтерфейсів. Деякі з підтримуваних стандартів вимагають подання додаткової зовнішньої напруги порогового рівня вхідних каскадів. У таблиці нижче наведено список стандартів цифрових сигналів, які підтримуються блоками введення/виведення, із зазначенням значень напруги живлення вихідних каскадів V_{CCIO} і порогового рівня вхідних каскадів V_{REF} .

3.3.3 Компаратор

Компаратор - прилад для порівняння різних величин. В електроніці компаратори - це мікросхеми, які використовуються для порівняльного аналізу параметрів напруги двох під'єднаних до кола пристроїв. Порівняння характеристик різних електричних імпульсів дає змогу правильно здійснювати налаштування і розгалуження сигналів, забезпечуючи коректну роботу електрообладнання. На виході компаратора виникає дискретний сигнал, який може перебувати в одному з двох станів: увімкнено (1) або вимкнено (0). Яким саме буде стан сигналу на виході у компаратора залежить від співвідношення вимірюваного сигналу на вході компаратора і заданих користувачем порогів (уставок).

Конкретна залежність стану вихідного сигналу компаратора від вимірюваного сигналу в його порівнянні з порогами описується функцією компаратора, яку зручно представляти в графічному вигляді. Приклад функції компаратора показано на рис. 3.13. Він наочно ілюструє принцип роботи компаратора [9].

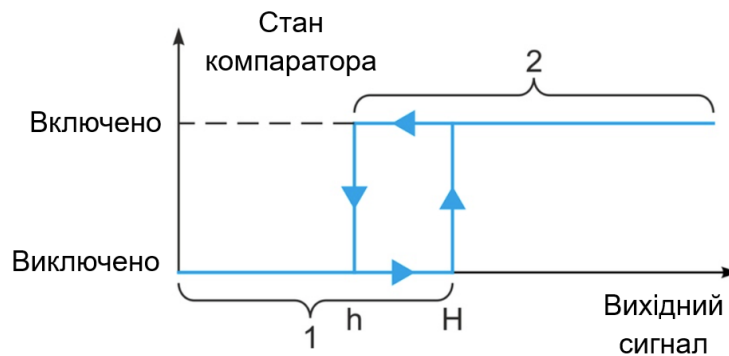


Рисунок 3.13 – Функціонування компаратора

Пороги задаються величинами H і h . Так, якщо вхідний сигнал перебуває в ділянці 1 і збільшується, то після досягнення порога H компаратор переходить зі стану «ВИКЛЮЧЕНО» до стану «ВКЛЮЧЕНО». Якщо ж вхідний сигнал перебуває в ділянці 2 і зменшується, то в разі досягнення порога h компаратор переходить зі стану «ВКЛЮЧЕНО» у стан «ВИКЛЮЧЕНО». Звернемо увагу на те, що в ділянці порогів h і H у поведінці компаратора спостерігається гістерезис, і стан виходу компаратора залежить не тільки від співвідношення вимірюваного сигналу та порогів, а й від попередньої історії, тобто від того, яким шляхом вимірюваний сигнал наближається до порогів.

Виберемо компаратор для нашої принципової схеми. Після огляду множини можливих варіацій зупинимо свій вибір на компараторе LT1719 фірми Linear Technology (рис. 3.14) [19]. Це компаратор UltraFast™, оптимізований для роботи при низькій напрузі. Діапазон вхідної напруги простягається від 100 мВ нижче V_{EE} до 1,2 В нижче V_{CC} . Внутрішній гістерезис робить LT1719 простим у використанні навіть з повільними вхідними сигналами, що повільно

рухаються. Виходи «рейка-рейка» безпосередньо підключаються до TTL і CMOS.

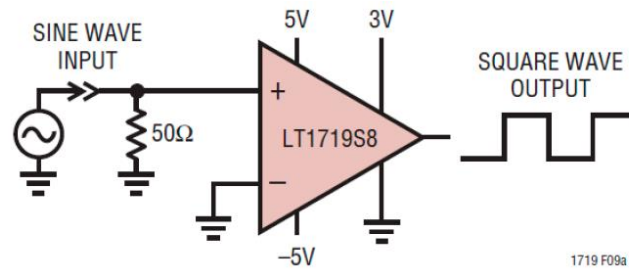


Рисунок 3.14 – Компаратор LT1719 та принцип його роботи

Крім того, симетричний вихідний привід може бути для аналогових застосувань або для легкого переходу на інші рівні логіки з одним джерелом живлення. Контроль вимкнення дозволяє знизити енергоспоживання і продовжити час роботи від батареї в портативних пристроях. LT1719 доступний в корпусах SO-8 і 6-вивідному SOT-23 корпусах SO-8 і SOT-23. Корпус SO-8 має окремі джерела живлення, які забезпечують гнучку роботу, дозволяючи використовувати окремі аналогові діапазони входних сигналів і вихідних логічних рівнів. Цей компаратор має можливість працювати від двох різних напруг живлення 3 та 5 вольт. Має функцію rail-to-rail на виході, це означає, що сигнал на виході змінюється в межах рівнів напруги живлення V_{cc} і GND (живлення та земля). Управління вимкненням дозволяє знизити енергоспоживання та збільшити час автономної роботи в портативних додатках. Його застосування пояснюється тим, що зовнішній опорний сигнал по формі є синусоїдою, тобто аналоговим сигналом. Усі мікросхеми цифрові, тому потрібно оцифрувати опорний сигнал. Основні характеристики: час наростання/спаду вихідного сигналу – 2,5/2,2 нс; джиттер – 15пс.; максимальний споживаний струм: напруга живлення 3В – 7мА, напруга живлення 5В - 9мА

3.3.4 Комутатор

Комутатор кінцевий елемент нашої схеми який відповідає за формування тривалості імпульсу у вихідній послідовності. Так як необхідний цифровий комутатор, що працює на частотах ширини спектра сигналу, тобто 2 ГГц, був обраний комутатор фірми Hittite, HMC197B, функціональна діаграма якого зображена на рис. 3.15 [20].

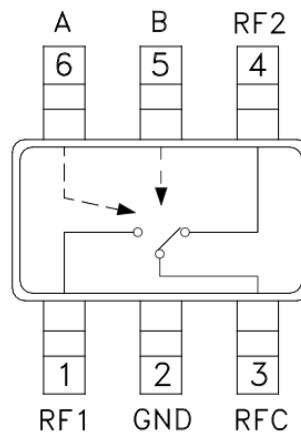


Рисунок 3.15 – Функціональна діаграма цифрового комутатора HMC197B

HMC197BE - це недорогий SPDT-перемикач в 6-вивідному пластиковому корпусі SOT26 для використання в загальних комутаційних системах, які вимагають дуже низьких втрат на введення і дуже малих розмірів. Пристрій може керувати сигналами від постійного струму до 3 ГГц. Конструкція забезпечує виняткові показники вносимих втрат, що ідеально підходить для комутації фільтрів і приймачів. RF1 і RF2 у вимкненому стані є відбивними короткими замиканнями. Дві напруги керування вимагають мінімальної кількості постійного струму і забезпечують сумісність з більшістю сімейств КМОП і ТТЛ-логіки. Це комутатор типу «один полюс, два напрямки». Це означає, що один спільний контакт (полюс), який може бути підключений до одного з двох інших контактів. Особливості HMC197B: напруга керування - 3, 5, 8 В; час наростання/спаду вихідного сигналу (10%-90%) – 3 нс.

Значення втрат, що вносяться на різних частотах зазначено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Втрати цифровим комутатором НМС197В

Частота	Середнє значення втрат, dB	Максимальне значення втрат, dB
DC-1, ГГц	0,4	0,7
DC-2, ГГц	0,4	0,8
DC-2,5, ГГц	0,4	0,9
DC-3, ГГц	0,5	1,1

Управління комутатором здійснюється подачею на входи А та В напруги потрібного рівня, згідно з таблицею 3.3. Комутатор не може перебувати в «середньому» стані, а може займати тільки конкретне положення на один з входів. Факт того, що комутатором можна керувати різною постійною напругою є вагомим плюсом його використання, так як при виборі інших елементів не варто думати про напругу живлення.

Таблиця 3.3 – Таблиця істинності комутатора НМС197В

Керуючі входи	Стан входів		
A(Vdc)	B(Vdc)	RF to RF1	RF to RF2
0	+3	Вкл	Викл
+3	0	Викл	Вкл
0	+5	Вкл	Викл
+5	0	Викл	Вкл
0	+8	Вкл	Викл
+8	0	Викл	Вкл

3.3.5 Схема електроживлення

Різні напруги живлення із загального живлення 5 В будуть отримані за допомогою лінійного регулятора з малим падінням напруги фірми Linear Technology, модель LT3080, рис. 3.16. Лінійний стабілізатор з низьким рівнем викиду 1,1 А, який може бути запаралелений для збільшення вихідного струму або розсіювання для збільшення вихідного струму або розсіювання тепла в платах поверхневого монтажу [19].

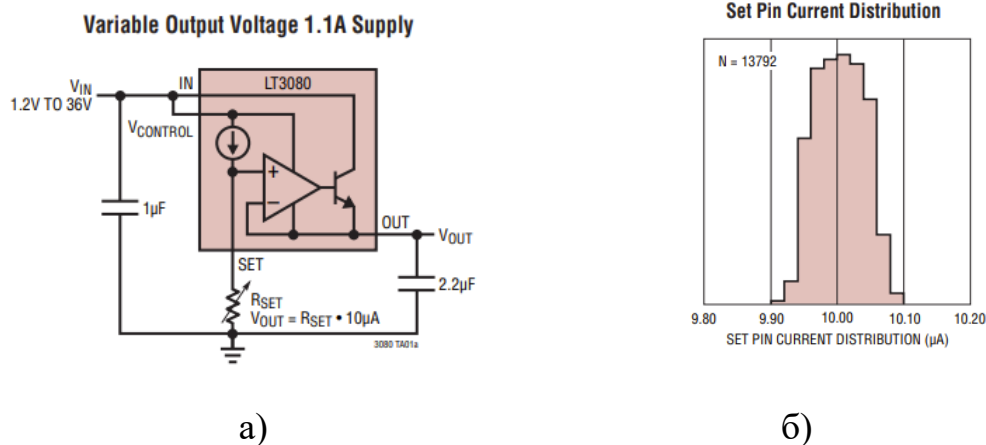


Рисунок 3.16 – Лінійний регулятор LT3080 (а); розподілення струму (б)

Конструкція LT3080, як прецизійного джерела струму і стабілізатора напруги дозволяє використовувати цей новий регулятор в багатьох додатках, що вимагають високого струму, регулювання до нуля і відсутності тепловідводу. Крім того, пристрій виводить колектор транзистора назовні, щоб що дозволяє працювати з низьким падінням напруги - до 350 мілівольт при використанні з декількома джерелами живлення. Ключовою особливістю LT3080 є можливість подачі вихідної напруги в широкому діапазоні. Використовуючи опорний струм через один резистор, вихідну напругу можна запрограмувати на будь-який рівень між нулем і 36 В. LT3080 є високо стабільним лінійним регулятором з ємністю 2,2 мкФ на виході. Мікросхема використовує невеликі керамічні конденсатори, які не потребують додаткового ESR, як це зазвичай буває в інших стабілізаторах. Внутрішня схема захисту включає обмеження струму та термообмеження. Регулятор LT3080 пропонується в 8-вивідному корпусі MSOP (з відкритою контактною площадкою для покращення теплових характеристик).

За допомогою даного лінійного регулятора можна отримати необхідну напругу установкою резистора R_{set} , згідно з наступним рівнянням:

$$V_{out} = R_{set} \cdot 10 \text{ мкА.}$$

Якщо хочемо отримати потрібні нам наприклад 3.3, необхідно поставити резистор R_{set} рівним 330 кОм.

На основі всіх обраних елементів і збудуємо принципову схему майбутнього пристрою. Знання особливостей компонентів елементної бази дозволить дотриматися всіх аспектів на різних етапах розробки, що гарантує працездатність вже готового виробу.

3.4 Генератор прямокутних імпульсів на D-тригері

3.4.1 САПР Altium Designer

Для розробки готового пристрою скористаємося САПР Altium Designer. Розглянемо основні етапи розробки, такі як: електрична принципова схема, компонування елементів на платі, трасування елементів між собою, і навіть особливості реалізації цієї схеми [21]. Altium Designer - комплексна система автоматизованого проектування електронних модулів на базі друкованих плат, що дає змогу виконувати повний спектр проектних завдань: від створення концепції функціонування до випуску повного комплекту конструкторських і виробничих даних. Altium Designer є найпоширенішим засобом проектування друкованих плат для розробників і конструкторів. Це просте, потужне, сучасне рішення, яке містить у собі всі функціональні можливості для створення схем і плат у єдиному інтерфейсі, з простою системою ліцензування.

Уніфікована модель даних в Altium Designer забезпечує швидке ефективне проектування нових електронних виробів завдяки єдиним правилам і синхронізації. Оптимізована однаковість інтерфейсу в усіх редакторах (схемний символ, посадкове місце, схема, плата, вихідний документ тощо) робить процес проектування високопродуктивним і усуває традиційні слабкості та помилки ручної синхронізації даних між різними редакторами. Ключові можливості: схемотехнічне проектування; управління компонентами; змішаний аналіз; проектування топології; розробка гнучко-жорстких друкованих плат і багатомодульних конструкцій; інтерактивне трасування; взаємодія з MCAD (САПР для розроблення механіки); управління даними; формування документації за ЄСКД.

САПР Altium Designer – це система, що дозволяє реалізовувати проекти електронних засобів на рівні схеми або програмного коду з подальшою передачею інформації проектувальнику ПЛІС або друкованої плати. Відмінною особливістю програми є проектна структура та наскрізна цілісність ведення розробки на різних рівнях проектування. Іншими словами, зміни у розробці на рівні плати можуть миттєво бути передані на рівень ПЛІС або схеми і так само назад. Тепер розробка друкованої плати можлива у тривимірному вигляді з двонаправленою передачею інформації в механічні САПР.

3.4.2 Схема електрична принципова

Проектування електричної принципової схеми це фундаментальна частина проектування будь-якого устрою. Правильність виконання електричної принципової схеми є запорука правильної роботи пристрою в майбутньому.

Altium Designer підтримує двоспрямований зв'язок між схемою і платою, що забезпечує уніфікацію інтерфейсу і моделі даних на всьому циклі проектування для підвищення продуктивності [21]. Редактор схем дає змогу створювати плоскі, ієрархічно та змішані проекти, використовувати проектні дані повторно та підвищувати ефективність за допомогою таких інструментів, як розумна вставка Smart Paste™, аркуші пристроїв Device Sheets™, фрагменти Snippets і глобальне редагування. Правила та обмеження проекту можна додавати безпосередньо в схему для отримання правильної конструкції з першого разу. Перехресний перехід і виділення зі схеми в платі (і навпаки) забезпечують швидке вставляння і трасування, а також інтерактивне проектування в 2D- і 3D-режимах. На рисунку 3.17 зображено основну електричну принципову схему.

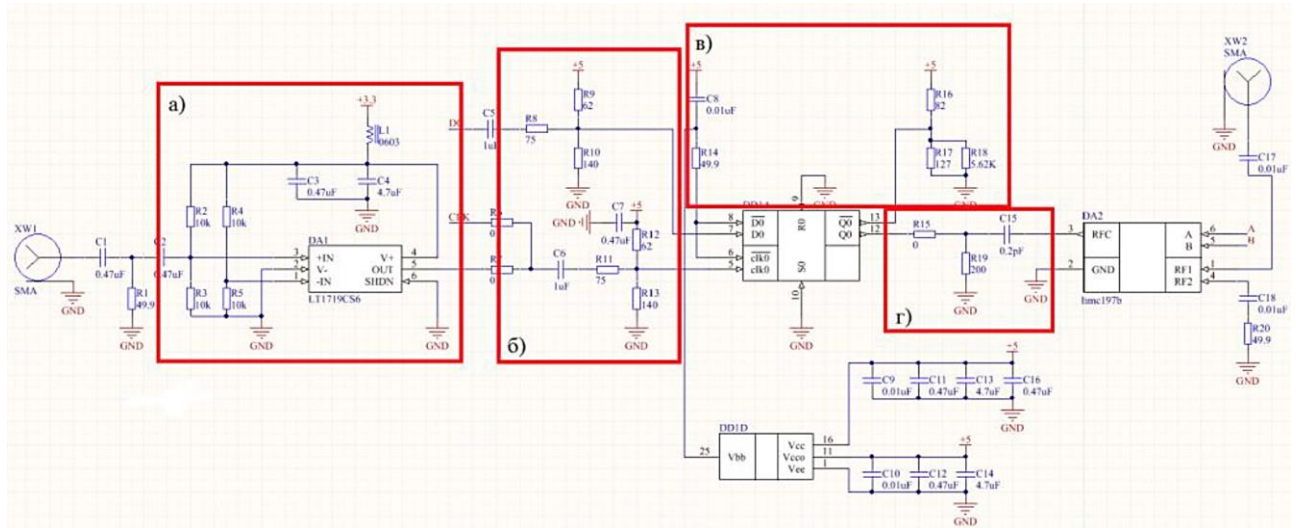


Рисунок 3.17 – Електрична принципова схема генератора надкоротких імпульсів на D-тригері: а) підключення компаратора, б) подільники напруги, в) підключення входів/виходів, що не використовуються, г) диференціатор

Розберемо особливості реалізації, зображеної на рисунку 3.17. Варіант підключення компаратора (рисунок 3.17 а). Резистори R_2 і R_3 використовуються для підтягування постійного рівня, лінії по якій надходить вхідний сигнал на вхід компаратора $+IN$, що дорівнює половині напруги живлення. Аналогічно використовуються резистори R_4 і R_5 , на вході $-IN$, сигнал на цьому вході буде пороговим. Усередині компаратора відбувається порівняння входів $+IN$ та $-IN$ між собою. Оскільки тепер сигнали знаходяться на одному постійному рівні, що дорівнює порогу порівняння компаратора, то відхилення вхідного сигналу на вході $+IN$ буде або вище або нижче за цей поріг. Якщо поріг буде перевищено, то на виході компаратора буде логічний рівень «1», якщо ж поріг не перевищений, то на виході компаратора буде логічний рівень «0». Конденсатори C_3 та C_4 є блокувальними.

Сигнал із виходу компаратора ділиться на два, один на схемі підписано як CLK, надходить як тактовий сигнал в ПЛІС. Інший проходить через дільник напруги і надходить у D-тригер. Дільник напруги (рисунок 3.17 б). Компаратор та D-тригер мають різний тип логіки мікросхеми – компаратор має логіку CMOS, D-тригер має логіку ECL, різниця напруг показана на рис. 3.18. Для

узгоджень рівнів напруги між елементами використовується якраз подільник напруги.

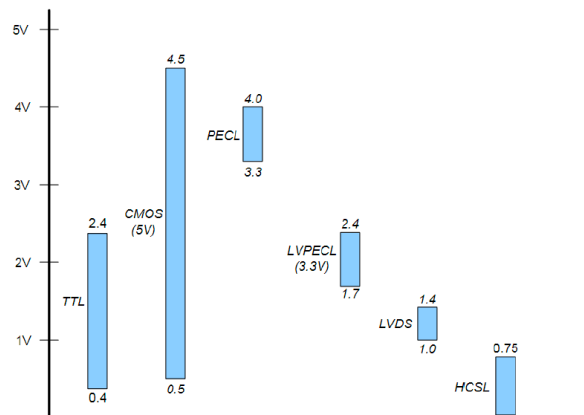


Рисунок 3.18 – Апроксимовані значення вихідної напруги для основних типів логіки

Як видно з рисунку 3.18, необхідно зменшити розмах сигналу та змістити постійний рівень вгору. Резистори R_{12} та R_{13} дозволяють змістити постійний рівень значення 3.65 В. Застосування послідовного резистора R_{11} дозволяє зменшити розмах до 0.7.

Деякі типи логіки є диференціальними та використовують два входи/виходи. Робота здійснюється в режимі single-ended, коли з двох входів/виходів використовується лише один. Вхід/вихід, що не використовується, залежно від логіки або роботи самої мікросхеми, необхідно або навантажити на джерело живлення або землю, як показано малюнку 3.17 в. Це потрібно для коректної роботи мікросхеми. Входи що не використовуються, за допомогою подільників напруги підключають до живлення, щоб задати постійний рівень, який буде порогом для іншого входу, що використовується.

Рисунок 3.17г – диференціатор. Основна особливість даної схеми, використання диференціатора для формування імпульсу малої тривалості. При проходженні прямокутного сигналу через диференціатор, тим самим виходить два пікоподібні імпульси, позитивний та негативний. Значення ємності

необхідно брати дуже мале з метою зменшити постійну часу даного кола. У цій схемі використовувався конденсатор ємністю 0.2 пФ.

Для забезпечення цілісності сигналу від перешкод та забезпечення захисту від відображень у тракці лінії передачі необхідно узгодити елементи між собою. Сумарне значення резисторів у лінії передачі повинне дорівнювати хвильовому опору лінії передачі і в різних лініях має становити приблизно від 50 до 120 Ом. Також необхідно використовувати блокувальні конденсатори живлення для всіх мікросхем, які використовуваних на платі. Все це обумовлено робочим частотним діапазоном майбутнього пристрою. На даних частотах необхідно зменшити вплив будь-яких паразитних явищ, відбиття, паразитних ємностей та індуктивностей, шумів по живленню. Результатом є готова електрична принципова схема. Далі здійснюється компонування та трасування елементів між собою.

3.4.3 Трасування друкованої плати

Компонування та трасування елементів на платі важлива та заключна складова проектування майбутнього пристрою. Це найбільш складне та трудомістке завдання для розробника при проектуванні пристроїв. З однієї з точок зору трасування – вибір найбільше раціонального рішення з безлічі варіантів.

Уніфікована модель компонента, що використовується в САПР Altium Designer [21] означає, що кожен компонент містить схемний символ, варіанти виконання, посадкові місця, 3D-моделі та моделі для математичного аналізу. Компоненти можна створювати швидко і точно за допомогою майстра схемних символів і майстра суміжних зі стандартами IPC посадкових місць. Також доступне підключення моделей IBIS і SPICE для розрахунків. Понад 200 тисяч компонентів доступні для отримання з Altium Content Vault безкоштовно. Крім понад 200 дистриб'юторів даних про компоненти доступне отримання даних із власних баз підприємства.

Готовий варіант трасування ГНІ показано рисунку 3.19. Червоним показаний верхній шар друкованої плати, синім – нижній.

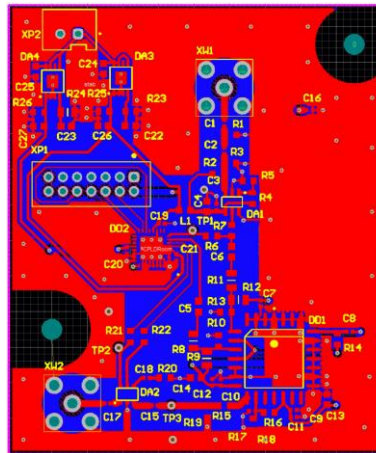


Рисунок 3.19 – Готовий варіант трасування ГНІ на D-тригері

Усі елементи знаходяться на верхньому шарі друкованої плати, що можна віднести до особливості даного трасування. Для зв'язку елементів використовуються друковані доріжки різної ширини. Де не критично і не важливо хвильовий опір лінії, лінії для передачі сигналу управління на ключ, лінії живлення, входи/виходи мікросхем, що не використовуються, ширина друкованої доріжки менша, що дозволяє простіше трасувати елементи між собою та зосередитися на зв'язку головних елементів. Найбільшу площу становлять полігони на обох шарах друкованої плати.

Полігони є землями для забезпечення гарного електричного з'єднання по землі. Також полігони «прошиті» наскрізними отворами для з'єднання земляних шарів між собою. Все це необхідно для зменшення зворотного шляху струму сигналів. Блокуючі конденсатори стоять як можна ближче до ніжок живлення мікросхем, щоб також зменшити контур зворотного струму.

Додатково додано тестові точки, на рис. 3.19 підписано як TP, для підключення щупа осцилографа та спостереження за сигналом, що протікає в лінії передачі. TP1 – тактовий сигнал на ПЛІС, TP2 – сигнал керування з ПЛІС на ключ, TP3 – сигнал з виходу D-тригера.

При трасуванні даної схеми головним завданням є зберегти цілісність основного цифрового сигналу. Всі друковані доріжки, всі полігони та можливі паразитні елементи розміщені на певній віддалі від електричної лінії передачі, по якій протікає основний сигнал.

В результаті маємо готовий варіант трасування майбутньої друкованої плати генератора надкоротких імпульсів.

3.4.4 Виготовлення друкованої плати

На рис.3.19 зображено готову друковану плату, верхній та нижній шари плати відповідно та монтаж елементів.

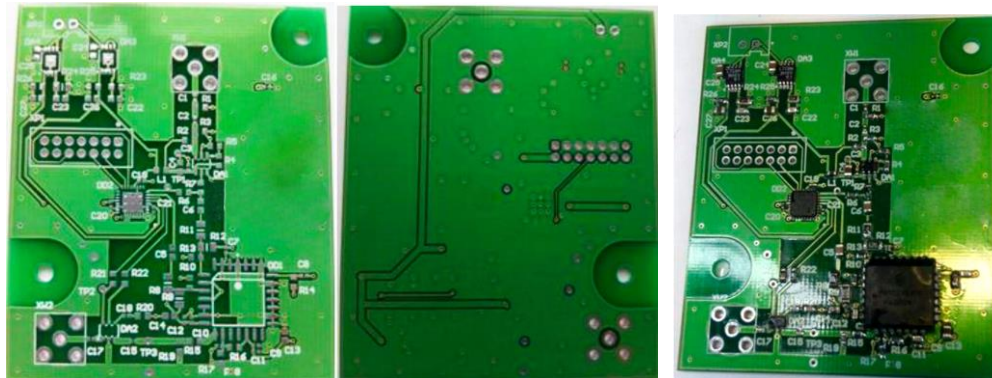


Рисунок 3.19 – Верхній та нижній шари друкованої плати та монтаж елементів на платі

Основні параметри друкованої плати: матеріал плати FR4; товщина 1.5 мм; двохшарова (є маска зеленого кольору з обох боків).

Після монтажу необхідно «защити» у ПЛІС програмне забезпечення. Підключення до ПЛІС здійснюється за допомогою роз'єму для програматора JTAG безпосередньо на друкованій платі.

Програмою є блок подільника частоти, сформований мовою опису апаратури Verilog, який заснований на лічильнику на 5, лічильник по кожному такту вхідного сигналу додає до свого внутрішнього стану одиницю, коли досягається необхідне значення внутрішнього стану, лічильник видає один

імпульс на вихід ПЛІС. У результаті отримуємо пристрій, що готовий до подальшого тестування та зняття характеристик.

3.4.5 Аналіз характеристик розробленого пристрою

За підсумками попередніх підрозділів маємо готовий, налагоджений зразок, який необхідно протестувати на відповідність технічним завданням. Потрібно розглянути діапазон, також тривалість імпульсу на виході. Для вимірювання вихідного імпульсу ГНІ використовується осцилограф і блок НСІ-2, який видає на вихід сигнал 10 МГц. Сигнал 10 МГц з блоку НСІ-2 подається на вхід ГНІ, вихід ГНІ підключається до осцилографа. На рис. 3.20 спостерігається вихідний сигнал ГНІ. ГНІ живиться від блоку живлення 5, споживаючи 225 мА, що в реаліях сучасних цифрових пристроїв не так багато.

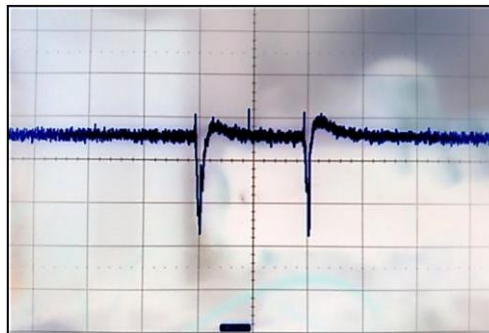


Рисунок 3.20 – Вихідний сигнал ГНІ. Тривалість імпульсу становить 744 пс.

Масштаб - 50 нс/поділ.

На рисунку 3.20 можна побачити квазідельта-імпульс. Також спостерігаються з обох сторін негативні викиди, що в 5 разів перевищують по амплітуді необхідний імпульс. Ці викиди є наслідком накладання перехідного процесу цифрового комутатора при його перемиканні. Викиди відповідають включенню та вимкненню цифрового комутатора, оскільки при послідовному тестуванні схеми до комутуючого пристрою їх не спостерігалось. Для усунення викидів було прийняте рішення яке полягало у відфільтруванні небажаних викиди. Тому на виході комутатора був поставлений конденсатор меншої

ємності, порядку 0.3 пФ. На рисунку 3.21 більш точно показано корисний імпульс.

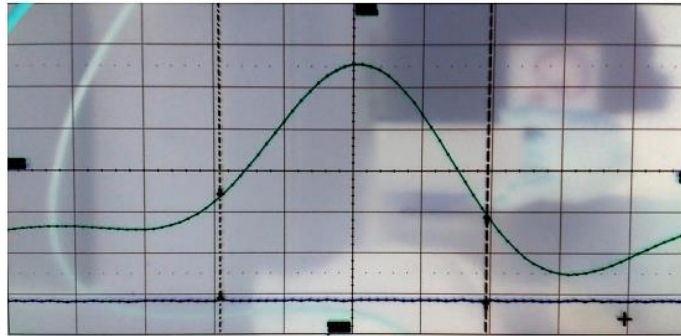


Рисунок 3.21 – Короткий імпульс на виході ГНІ. Масштаб – 5 мВ/поділ та 200 пс/поділ

Його тривалість становить 744 пс, амплітуда становить 25 мВ. Кожен фронт становить приблизно 300 пс за рівнем 10%-90%

Розглянемо спектр вихідного сигналу із ГПІ. Спектр показаний на рисунку 3.22.

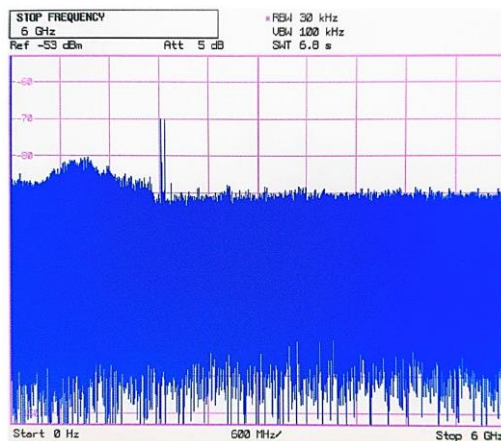


Рисунок 3.22– Спектр вихідного сигналу ГПІ.

Спектр вимірювався у смузі 6ГГц. Так як ГНІ використовуватиметься в як генератор тестових сигналів, необхідна рівномірна огинаюча спектра і не повинні спостерігатися різного роду викиди. На рис.3.21 можна спостерігати, як і викиди так і відсутність рівномірності спектра, що говорить про неякісність ГНІ та неможливість його використання як генератор тестового сигналу.

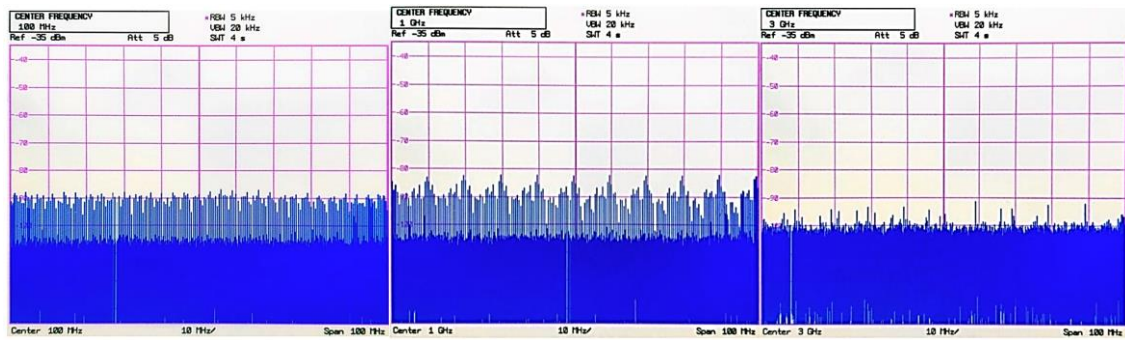


Рисунок 3.23 – Спектр вихідного сигналу ГНІ,
центральна частота 100 МГц, 1 та 3 ГГц.

Особливістю цього типу генераторів є те, що спектр сигналу являє собою набір дельта-функцій, гармонік. Важлива їхня лінійність і рівень. Тому необхідно розглянути спектр за меншої смуги пропускання спектроаналізатора, щоб помітити потрібні піки. Оскільки згідно з технічним завданням необхідно, щоб ширина спектра відповідала 2 ГГц, тому розглянемо спектр за малої смуги пропускання, що дорівнює 10 МГц, на центральних частотах 100 МГц, 1 ГГц і 3 ГГц, рис.3.23. Як видно, спостерігаються піки порядку -90 дБ. Вони рівномірні і мають різну амплітуду. Через малу амплітуду вихідних імпульсів, до 3 ГГц спектр корисного сигналу неможливо розрізнити на фоні шумів.

3.5 Генератор прямокутних імпульсів на логічному елементі «І»

Спробуємо спроектувати новий ГНІ, виправивши недоліки, які виникли при попередньому проектуванні. Основними відмінності від попередньої розробки є:

- прибраний диференціатор, а короткий імпульс формується лише за рахунок швидкісного логічного елемента;
- прибрано компаратор та замінено розгалужувачем у вигляді буфера;
- ключ використовується як дільник частоти;
- використовується лінія затримки.

3.5.1 Елементна база

Ядром генератора є формувач імпульсів у вигляді високошвидкісного логічного елемента. Ядром було обрано – мікросхема фірми Hittite, HMC746. Ця мікросхема I/НІ/АБО/АБО/НІ, що працює за схемою АБО-НІ і призначена для підтримки швидкості передачі даних до 14 Гбіт/с і тактову частоту до до 14 ГГц. HMC746LC3C може бути легко сконфігурований для забезпечення будь-якої з наступних логічних функцій: AND, NAND, OR і NOR. Всі диференціальні входи HMC746LC3C є CML і виведені на кристалі з опором 50 Ом з позитивним живленням, V_{CC} , і можуть бути підключені до змінного або постійного струму. Диференціальні диференціальні виходи CML мають вихідний опір 50 Ом і також можуть бути підключені до змінного або постійного струму. Виходи можуть бути підключені безпосередньо до 50-омного джерела сигналу в той час як блокуючі конденсатори постійного струму можуть бути використані якщо система заземлення має 50 Ом на землю. HMC746LC3C також має вивід для регулювання вихідного рівня, VR, який дозволяє компенсувати втрати або оптимізувати рівень сигналу. HMC746LC3C працює від одного 3,3 В і доступний в 3х3 мм SMT корпусі 3х3, що відповідає вимогам директиви ROHS[22, 23].

Принцип роботи логічного елемента "І", таблиця істинності та робота даного логічного елемента як формувача імпульсів описано у підрозділі 3.1. Функціональна діаграма зображена на рис.3.24.

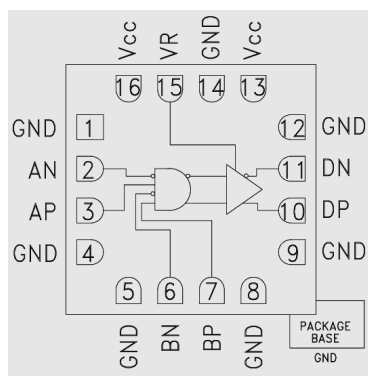


Рисунок 3.24 – Функціональна схема HMC746

Основні параметри: напруга живлення – 3.3В; час наростання/спаду фронтів імпульсу (рівень 20%-80%) – 22/21 пс; джиттер – 0.2 пс; споживаний струм - 70 мА;- функція регулювання розмаху амплітуди вихідного сигналу.

Як розгалужувач був обраний fanout buffer фірми IDT – ICS853S011. Його завдання в тому, щоб роз'єднати зовнішній вхідний сигнал дільник частоти та формувач імпульсу. ICS853S011CI - це високопродуктивний диференціальний буфер 1 до 2 з низьким коефіцієнтом несиметрії. Диференціальний буфер з диференціалом до 2,5В/3,3В LVPECL/ECL. Буфер ICS853S011CI може працювати від джерела живлення 2,5 В або 3,3 В. Гарантований вихід і перекіс між деталями характеристики роблять ICS853S011CI ідеальним рішенням для розподілу синхронізації, що вимагають чітко визначеної продуктивності і повторюваності. Блок-діаграма розгалужувача показано малюнку рис.3.25. Як видно з рисунку 4.2, розгалужувач має один вхід та два виходи. Усі вони є диференціальними. Тип логіки - LVPECL/ECL[24].

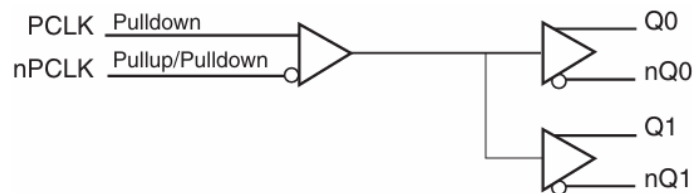


Рисунок 3.25 – Блок-діаграма диференціального буфера

Основні, необхідні для проектування, параметри: два режими роботи :LVPECL – напруга живлення від 2.375 до 3.8 В; ECL – напруга живлення від - 3.8 до -2.375 В; час наростання/спаду фронтів імпульсу (рівень 20%-80%) – 125 пс.; джиттер – 35 фс.; струм споживання 35 мА.

Ці два елементи є ключовими пристроями у майбутньому пристрою. Інші елементи схеми залишилися без зміни.

Лінія затримки. У розділі 2.1. був представлений варіант формування імпульсів малої тривалості з використанням логічного елемента «І», головною особливістю якого є те, що тривалість вихідного імпульсу пропорційна тимчасовому зсуву вхідних сигналів елемента «І». Створюється необхідність забезпечити часовий зсув вхідних сигналів щодо один одного на друкованій платі. Для цього використовується лінія затримки.

Лінію затримки може бути двох типів, елементи фіксованої затримки і елементи затримки, що настраюються. Приклади та величина затримки вказані у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Елементи фіксованої затримки

	Реалізована величина затримки, пс.	Гранична похибка затримки (у відсотках)
Друкована доріжка	10-1000	+10%
Звичайний логічний елемент (для кожного вентиля)	100-10000	+50% і більше
Коло із зосередженими параметрами	1000-1000000	Від +5 до +20 залежно від якості компонентів

Оскільки значення мінімальної затримки між сигналами, як параметр спрацювання логічного елемента невідомий, було вирішено використовувати лінію затримки, що налаштовується. Для цього на платі було передбачено кілька друкованих доріжок різної довжини з перемичками, рис.3.26.

Лінія затримки такого типу буде реалізована на етапі трасування майбутнього пристрою.

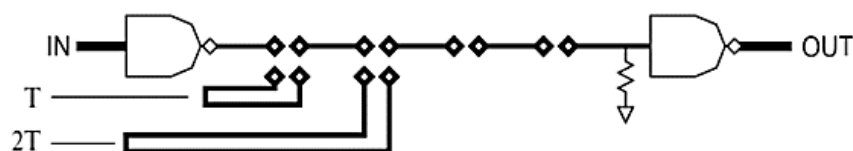


Рисунок 3.26 – Лінія затримки, що настраюється,
на друкованих доріжках різної довжини

3.5.2 Схема електрична принципова

Початковим етапом розробки є проектування електричної принципової схеми. Електрична принципова схема ГНІ зображена на рис.3.27.

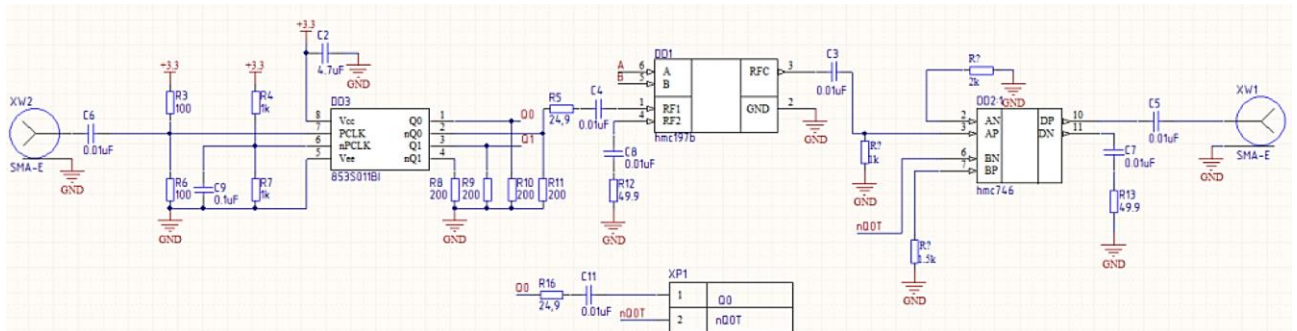


Рисунок 3.27 – Схема електрична принципова ГНІ на логічному елементі «І»

Принцип роботи схеми. Зовнішній опорний сигнал частотою 10 МГц надходить на вхід розгалужувача, сигнал поділяється на два виходи. Оскільки розгалужувач має диференціальні виходи, фактично, ключ відкривається та закривається з періодом поділеного сигналу. При проходженні сигналу з другого входу розгалужувача через ключ пройдуть на вихід тільки імпульси, що збігаються з періодом поділеного сигналу, тим самим на виході ключа буде сигнал з меншою частотою. За формування імпульсу відповідає логічний елемент «І», на вхід якого надходять сигнали з ключа та затриманий сигнал. Детальний опис формування імпульсу даним способом описано у розділі 2.1. На виході ми отримуємо короткий імпульс з необхідною частотою.

Резистори R_3 - R_6 використовуються, щоб підтягнути сигнал на постійний рівень, який дорівнює половині напруги живлення. Усі диференціальні мікросхеми працюють у режимі single-ended. Узгодження між логічними рівнями LVPECL і CML здійснюється використанням резисторів R_5 , R_{10} , R_{11} , R_{16} . За рахунок резисторів R_5 і R_{16} розмах амплітуди сигналу зменшується до 0,4 В. У результаті маємо готову електричну принципову схему і можна приступати до подальших етапів розробки.

3.5.3 Трасування

На даному етапі розробки, крім компонування елементів та з'єднання, необхідно було реалізувати лінію затримки. Готовий варіант трасування зображено рис. 3.28. Темно-блакитним виділено реалізовані на друкованій платі доріжки лінії затримки. Лінія затримки складається з трьох елементів, які можна підключати та відключати до кола. Залежно від довжини друкованої доріжки збільшується затримка, яку здатний дати елемент. Дані елементи реалізують затримку приблизно 25, 50 і 75 пс. Можна увімкнути як один елемент, так і всі три. Сумарна затримка, яку можна забезпечити такою лінією – 150 пс. Також, на основі попередньої розробки, було прийнято рішення створювати полігони живлення для цілісності полігонів землі, а не лінії.

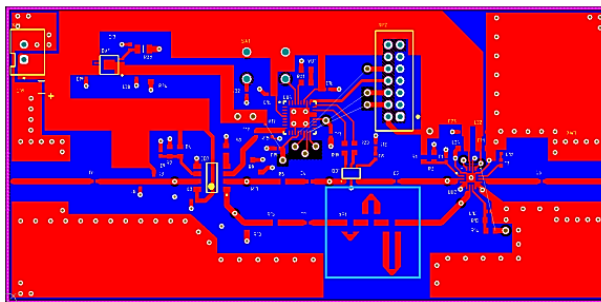


Рисунок 3.28 – Готовий варіант трасування ГНІ на логічному елементі «І»

Існують недоліки цього варіанта трасування. Оскільки розроблявся дослідний зразок, то через неможливість підвести живлення до деяких ніжок мікросхем, прийнято рішення «прокинути» за допомогою додаткових проводів напругу живлення до ніжок.

3.5.4 Виготовлення

На рис.3.29 зображено: знизу виготовлена друкована плата; зверху зібрана плата. Основні параметри друкованої плати: матеріал плати FR4; товщина 1.5 мм; двошарова.

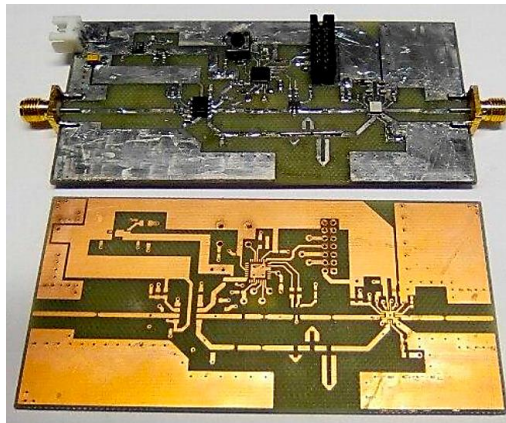


Рисунок 3.29 – Виготовлена і зібрана друкована плата

У цій схемі вирішено було реалізувати можливість змінювати коефіцієнт розподілу подільника частоти. Для цього, за допомогою мови опису апаратури Verilog, був описаний лічильник, максимальний внутрішній стан якого залежить від коефіцієнта поділу, що вибирається користувачем і вводиться з клавіатури. У результаті маємо готовий робочий зразок, який може працювати від зовнішнього вхідного сигналу із частотою 5 МГц або 10 МГц, при цьому видаючи на вихід завжди 1 МГц.

3.5.5 Аналіз характеристик готового пристрою

Задача яка вирішувалася в цьому розділі – це перевірка характеристик спроектованого ГНІ на відповідність технічному завданню, а також порівняти з попереднім розробленим пристроєм на основі D тригера. Для цього необхідно порівняти тривалість імпульсу на виході пристрою, а також спектр вихідного сигналу. Для перевірки необхідно було переконатися, що лінія затримки забезпечує необхідну затримку для спрацювання високошвидкісного логічного елемента. Перевіряючи по черзі від найбільшої затримки, коли включені всі елементи, до варіанта, коли лінія затримки прибрана, простежити, як змінюється тривалість вихідного сигналу. Висновком цього дослідження є те, що зі зменшенням затримки до одного елемента, пропорційно змінюється тривалість вихідного імпульсу.

Формування імпульсу, що описано в підрозділ 2.1. відбувається наростаючим фронтом одного сигналу і спадаючим фронтом другого, затриманого сигналу. Існує інший варіант формування імпульсу потрібної тривалості. Для цього потрібно без затримки керувати лише крутістю фронтів вхідних сигналів. В той час, коли відбувається перетин фронтів буде формуватися вихідний імпульс, таким чином його тривалість буде залежати від моменту перетину. Перетин фронтів можливо регулювати змінюючи постійну складову, або сигнальні постійну підложку. Для цього в лініях, що передають основний та затриманий сигнал, додаються резистори, щоб зменшити постійний рівень сигналу. Результатом цього рішення є вихідний імпульс, зображений на рис. 3.30. Тривалість імпульсу дорівнює 76 пс, а амплітуда імпульсу дорівнює 150 мВ.

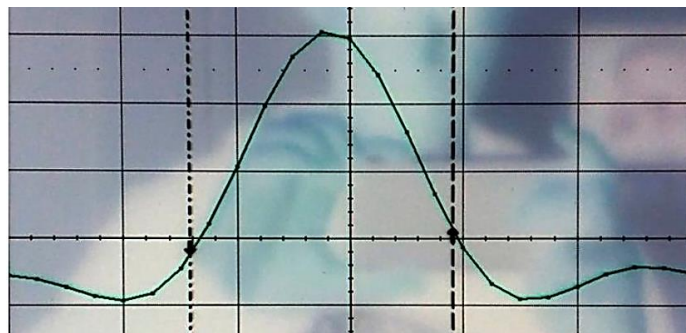


Рисунок 3.30 – Вихідний імпульс ГНІ. Масштаб – 100 мВ та 100 пс у клітинці

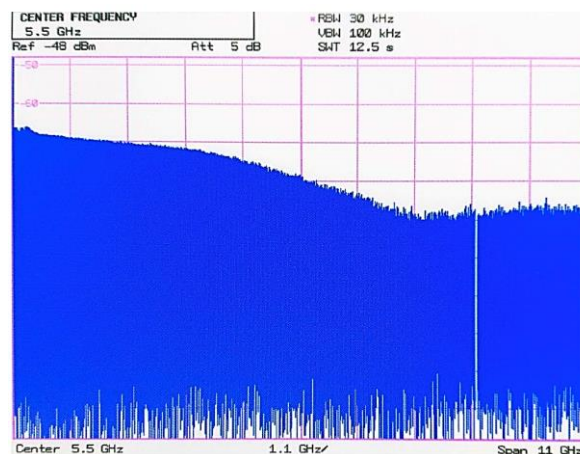


Рисунок 3.31 – Спектр сигналу при повній смузі пропускання

При смузі пропускання 100 МГц на частотах 1 ГГц, 3 ГГц, 5 ГГц та 7 ГГц
 рисунок 3.32.

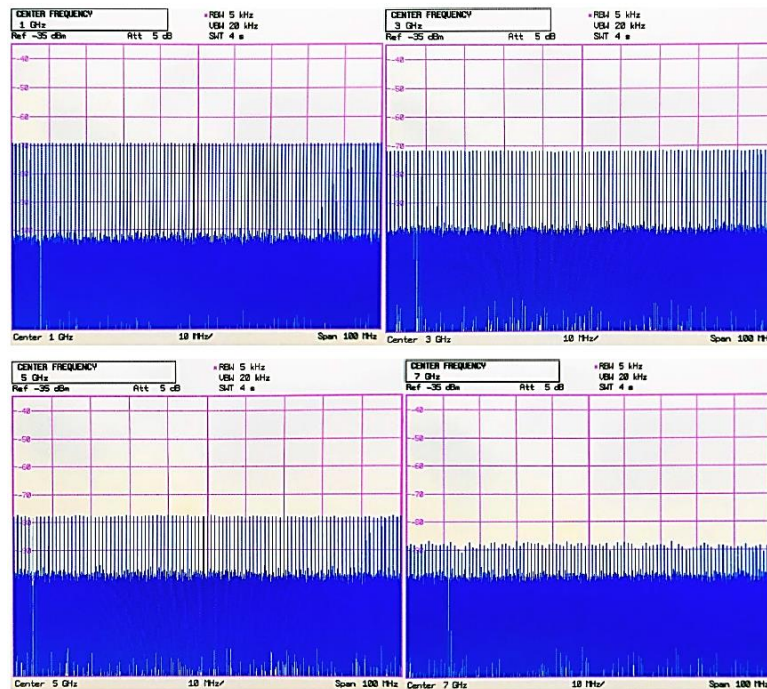


Рисунок 3.32 – Спектр вихідного сигналу ГНІ, центральні частоти 1, 3, 5, 7 ГГц

З рисунків видно, що ГНІ видає рівномірний спектр вихідного сигналу, це зберігається до 7-7,5 ГГц. Визначення ширини спектра відбувається за першим нулем спектра, дана точка спостерігається в районі 7,5 ГГц. Рівень вихідного сигналу змінюється від -70 дБ до -90 дБ. Слід зазначити, що споживаний струм, при цьому, дорівнює 190 мА.

3.6 Висновки до розділу

В даному розділі було спроектовано та розроблено пристрій генерації надкоротких імпульсів двох типів. Генератор на основі формуючого елемента у вигляді D-тригера розглядався у підрозділі 3.3. Він спроможний генерувати короткі імпульси тривалістю близько 700 пс. Згідно з спектрограмами на рис. 3.22 і 3.23, сигнал не має потрібних характеристик спектральної рівномірності уздовж всієї ширини спектра, що не відповідає технічному завданню.

Потужність сигналу на частотах спектра 1.5 ГГц та вище помітно слабшає, і губиться основна енергія сигналу. В результаті розробки було отримано реальний працюючий екземпляр генератора з технічними характеристиками, що не відповідають вимогам технічного завдання. Для подолання зазначених недоліків було вирішено вжити наступних технічних рішень: змінено спосіб зменшення тривалість імпульсу; використані іншу високошвидкісні інтегральні мікросхеми мікросхему з метою забезпечення більш високої амплітуди сигналу на виході та зменшення тривалості фронтів імпульсу на виході; використати спеціальні розв'язуючі пристрої у вигляді цифрових інтегральних схем для розгалуження сигналу.

Результатом технічних вдосконалень став генератор надкоротких імпульсів на основі цифрової логіки «І». Цей генератор було розглянуто в підрозділі 3.4. В результаті проектування цього типу генератора була отримана вихідна послідовність яка складається з імпульсів дуже малої тривалості, що дорівнює 76 пс і відповідно досить широким спектром.

Порівняно з генератором розробленим в підрозділі 3.3, тривалість імпульсу зменшилася в 10 разів. Амплітуда імпульсу зросла в 6 разів. Зменшився споживаний пристроєм струм на 30 мА. Були реалізовані деякі додаткові функції. З'явилася можливість програмно змінювати коефіцієнт ділення подільника частоти. Додано клавіатуру, додано світлодіод для індикації роботи пристрою.

Безперечно, пристрій вимагає деякої доопрацювання такої як: корекція трасування, з метою прибирання «прокидів» живлення та змінити спосіб поділу частоти. Не зайвим буде провести узгодження між елементами для кращого захисту сигналу.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Основоположна ідея охорони праці полягає в її визначальній ролі як головної умови для забезпечення здоров'я та запобігання шкідливому впливу небезпечних виробничих факторів на людину. Охорона праці, будучи невід'ємною складовою системи безпеки життєдіяльності в умовах виробництва, є обов'язковою для всіх підприємств, установ та організацій, незалежно від їхньої юридичної форми та сфери діяльності, а також охоплює всіх громадян, залучених до трудової та іншої діяльності. Відповідно, недотримання встановлених норм організації охорони праці тягне за собою однакову юридичну відповідальність як для керівника (власника), так і для працівника (виконавця).

Розробка генератора надкоротких імпульсних сигналів відбувалося в приміщенні, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. На розробника, згідно з Гігієнічною класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу, можуть мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [25]:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; пряма і відбита близькість; підвищена яскравість; понижена контрастність; недостатня освітленість робочої зони.

2. Психофізіологічні: розумове перевантаження; перенапруга аналізаторів; статичне перевантаження.

У відповідності до визначених факторів розробляємо технічні рішення щодо безпечного виконання роботи, а також з гігієни праці та виробничої санітарії.

4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

4.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця

Дотримання встановлених стандартів і нормативів є ключовим фактором у забезпеченні безпеки та збереженні здоров'я працівників, а також у підвищенні загальної ефективності їхньої праці. Належним чином обладнане та ергономічно організоване робоче місце є важливим превентивним заходом, що мінімізує ймовірність травматизму та розвитку професійних захворювань. Організація робочого місця для виконання завдань у сидячому положенні повинна відповідати вимогам численних нормативних документів, включаючи НПАОП 0.00-7.15-18, ДСТУ 8604:2015, ДСанПіН 3.3.2.007-98, ДСТУ ISO 45001:2019, Директиву № 90/270/ЄЕС та інші галузеві стандарти, а також принципам технічної естетики та ергономіки, спрямованим на створення комфортного, безпечного та сприятливого для здоров'я робочого середовища.

Основні вимоги до умов праці розробника включають [26]:

- забезпечення площі приміщення не менше 6,0 м² на 1 робоче місце, з урахуванням правил розташування робочих місць: не менше 1 м від стіни з вікном і 1,4 м від звичайної стіни, а також мінімальна відстань між боковими поверхнями комп'ютерів не менше 1,2 м та між тильною поверхнею одного комп'ютера та екраном іншого не менше 2,5 м;
- заборона розміщення робочих місць у підвальних або цокольних приміщеннях. Вимога до матеріалів внутрішньої обробки приміщень забороняє використовувати полімерні матеріали, що виділяють шкідливі хімічні речовини, та вимагає матового та антистатичного покриття підлоги;
- забезпечення щоденного вологого прибирання в приміщеннях, де розвивається робота з комп'ютерами, забезпечується збереження оптимального

рівня чистоти та обладнання кімнати психологічного розвантаження;

- розробка робочих столів та крісел так, щоб забезпечити оптимальну робочу позицію, зручне розташування обладнання та документів;
- забезпечення опалення, кондиціонування повітря або припливно-втяжної вентиляції в приміщеннях для роботи з персональними комп'ютерами.

Робоче приміщення розробника, загальною площею 15,45 м², обладнане двома робочими місцями з персональними комп'ютерами. Площа, що припадає на одного працівника, становить 7,4 м², що відповідає встановленим нормативам безпеки та організації робочих місць. Об'єм даного приміщення складає 47,89 м³, що в перерахунку на одного працівника становить 23,9 м³, що також відповідає чинним вимогам.

Ключові ергономічні вимоги до робочої пози працівника за екраном візуального дисплейного терміналу включають:

- 1) підтримання оптимальної дистанції між очима та екраном монітора в діапазоні 45-60 см, при цьому верхня межа екрана повинна розташовуватися на 15-20 см вище горизонтального рівня очей;
- 2) розміщення кистей рук таким чином, щоб пальці знаходилися нижче рівня зап'ястя, а зап'ястя, своєю чергою, було нижче рівня ліктя, що забезпечує максимальну амплітуду рухів пальців;
- 3) утримання плечей у розслабленому та опущеному стані для мінімізації напруження м'язів верхніх кінцівок;
- 4) забезпечення вертикального положення хребта з опорою на спинку робочого крісла, форма якої повинна анатомічно відповідати природним вигинам хребетного стовпа та поперекової області.

Оптимізація режиму праці шляхом інтеграції регламентованих перерв сприяє зниженню рівня фізичного та психоемоційного навантаження, підвищенню концентрації уваги та загальної продуктивності працівника. Систематичний моніторинг та періодична оцінка робочого місця на предмет відповідності чинним нормам і стандартам безпеки є критично важливими для

своєчасного виявлення та усунення потенційних небезпек і запобігання негативним наслідкам для здоров'я.

4.1.2 Електробезпека приміщення

Приміщення, де проводилися роботи з розробки генератора надкоротких імпульсних сигналів, забезпечене трифазною чотирипровідною електричною мережею із заземленою нейтраллю, що функціонує при номінальній напрузі 380/220 В. Відповідно до класифікації Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), дане виробниче середовище належить до категорії приміщень без підвищеної небезпеки ураження електричним струмом. Характерними особливостями мікроклімату є низький рівень вологості, мінімальна концентрація пилу, температура повітря в межах нормативних значень, а також наявність ізольованих підлогових покриттів та обмежена кількість заземлених електроприладів.

Електротехнічне обладнання, включаючи апаратуру, кабелі та розподільні пристрої різних видів і напруг, відповідає всім вимогам для безпечної роботи як при звичайних умовах експлуатації, так і при аварійних ситуаціях, таких як короткі замикання, перенапруги та перевантаження. Це забезпечує надійність та безпеку електричних систем у даному приміщенні, знижує ризик виникнення небезпечних ситуацій та забезпечує нормальну експлуатацію обладнання та освітлення.

З метою гарантування електробезпеки в даному робочому просторі реалізовано наступний комплекс технічних заходів [27]:

1. Струмопровідні елементи електромережі унеможливлені для випадкового контакту шляхом застосування прихованої електропроводки та прокладання кабельних ліній у спеціалізованих захисних коробах (ринвах).

2. Електрична ізоляція струмопровідних частин відповідає встановленим нормативам опору. Впроваджено систему регулярного контролю та профілактичного обслуговування ізоляції для підтримання її експлуатаційної надійності.

3. Система загального освітлення функціонує при напрузі 220 В із заземленою нейтраллю.

Відповідальність за організацію безпечної експлуатації електроустановок покладена на роботодавця, який повинен:

- призначити відповідального за справний стан і безпечну експлуатацію електроустановок; створити та укомплектувати електротехнічну службу з числа осіб, які досягли 18-річного віку, які мають відповідну освіту, пройшли медичний огляд і не мають протипоказань;
- розробити і затвердити посадові інструкції працівників та інструкції з безпечного виконання робіт;
- забезпечити навчання і перевірку знань працівників, своєчасний огляд електроустановок та проведення профілактичних, протиаварійних та приймально-здавальних випробувань.

Для безпосереднього виконання функцій з організації експлуатації електроустановок призначається особа, відповідальна за електрогосподарство.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Метеорологічні параметри, що формують мікроклімат виробничого середовища, суттєво впливають на фізіологічний стан та рівень працездатності працівника протягом робочої зміни. Температура, відносна вологість і швидкість руху повітря, а також інтенсивність теплового випромінювання від нагрітих поверхонь є ключовими характеристиками внутрішнього клімату виробничих приміщень. У процесі трудової діяльності людина перебуває в безперервному теплообміні з навколишнім виробничим середовищем.

Розробка генератора надкоротких імпульсних сигналів належить до категорії І б за Гігієнічною класифікацією праці. Нормовані значення параметрів мікроклімату для цієї категорії під час теплого періоду року наведені в таблиці 4.1, відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 [29].

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	40-60	0,1-0,3
Холодний	20-24	75	0,2

Для підтримання оптимальних мікрокліматичних умов у робочому приміщенні впроваджено такі заходи:

1. Функціонує централізована парова система опалення, призначена для забезпечення стабільного температурного режиму в будівлі, що відповідає встановленим гігієнічним нормативам та критеріям комфорту для працівників.
2. Застосовується система припливно-витяжної вентиляції, яка забезпечує належний повітрообмін та підтримання якості повітря в приміщенні, створюючи сприятливе та безпечне для дихання середовище.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Атмосферне повітря має складну гетерогенну структуру, основними компонентами якої є азот (близько 78%), кисень (приблизно 21%) та вуглекислий газ (близько 0,03%), а також незначна кількість інших речовин, включаючи вуглець та озон. Однак, у замкнутих просторах склад повітря може зазнавати значних змін під впливом різноманітних факторів антропогенного та технологічного походження. Повітря внутрішніх приміщень може містити тисячі різноманітних хімічних сполук, що перебувають у дисперсному стані (аерозолі, представлені твердими частинками або рідиною) або в газоподібній фазі. Для забезпечення безпечних умов праці регулюється забруднення повітряного середовища. Основними джерелами забруднення повітря в робочій зоні в процесі розробки генератора надкоротких імпульсних сигналів є комп'ютери та інша офісна техніка. В таблиці 4.2 наведені ГДК шкідливих речовин в повітрі робочої зони [28].

Таблиця 4.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони.

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Озон	0,16	0,03	1
Вуглекислий газ (CO ₂)	3	1	4
Формальдегід	0,35	0,03	2
Пил нетоксичний	25	10	4

Санітарні правила і нормативи, визначені у СанПіН 2.2.4.1294-03 [36], встановлюють стандарти для іонізації повітря в промислових та громадських приміщеннях. Цей документ регулює такі параметри, як мінімально допустимий рівень іонізації, максимально допустимий рівень і коефіцієнт уніполярності. Це означає, що він визначає оптимальні та безпечні концентрації іонів в повітрі, які забезпечують комфорт та безпеку для людей, які перебувають в цих приміщеннях. В таблиці 4.3 наведені числові значення для цих параметрів.

Таблиця 4.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Для підтримання безпечного та сприятливого для здоров'я повітряного середовища в робочій зоні застосовується система механічної вентиляції, що ефективно видаляє потенційні шкідливі домішки, які можуть потрапляти в повітря. Одночасно, низький рівень запиленості приміщення забезпечується шляхом регулярного проведення вологого прибирання. Зазначені заходи спрямовані на створення оптимальних гігієнічних умов праці, що сприяють збереженню здоров'я працівників.

4.2.3 Виробниче освітлення

Оптимальне освітлення робочої зони та індивідуальних робочих місць є визначальною передумовою для формування комфортного та продуктивного робочого середовища. Зазначений фактор безпосередньо впливає на зниження ризику виробничого травматизму та розвитку професійних захворювань органів зору. Проте, важливо зазначити, що джерела світла, такі як світильники та вікна, можуть створювати віддзеркалення на поверхні екрану, що негативно позначається на точності відображення знаків та може призвести до фізіологічних проблем для працівників. Особливо це стає актуальним при тривалій роботі. Тому важливо мінімізувати віддзеркалення, включаючи віддзеркалення від вторинних джерел світла, щоб забезпечити комфортні та ефективні умови праці.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО при природному та сумісному освітленні (згідно ДБН В.2.5-28:2018п [38]) зазначені у таблиці 4.4:

Таблиця 4.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фону	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє бокове	Бокове	Верхнє або верхнє бокове	Бокове
Високої точності	0,3 - 0,5	III	I	великий	світлий	700	300	5	2	3	1,2

З метою оптимізації виробничого освітлення та формування ергономічних умов праці доцільні такі заходи:

1. Пріоритетне використання природного освітлення шляхом раціонального розташування робочих місць та забезпечення безперешкодного проникнення сонячного світла до внутрішніх приміщень.

2. Впровадження світлодіодних (LED) освітлювальних приладів, які характеризуються високою ефективністю, тривалим терміном служби, низьким

енергоспоживанням та забезпечують якісне освітлення. Доцільним є також встановлення автоматизованих систем керування освітленням, що динамічно регулюють інтенсивність світлового потоку залежно від рівня природного освітлення та часу доби.

3. Забезпечення регулярного технічного огляду та обслуговування системи освітлення з метою усунення виявлених несправностей.

4.2.4 Виробничий шум

Виробничий шум – це акустичне явище, що характеризується сукупністю звуків різної амплітуди та частотного спектра, які поширюються в повітряному середовищі та мають істотний вплив на функціональний стан працівників. Джерелами цього шумового забруднення можуть виступати різноманітні об'єкти та процеси, включаючи транспортні засоби, насосне обладнання, промислові агрегати, пневматичні та електричні інструменти, металообробні верстати, будівельну техніку та інше. Значні рівні шуму також супроводжують певні технологічні операції, такі як klepanня, чеканка, обрубкування, вибивання виливків, штампування, функціонування ткацьких верстатів, стендові випробування авіаційних двигунів тощо.

Регульовані нормами рівні звукового тиску та рівні звуку (позначені як LA) визначені для приміщень, де проводиться розробка генератора надкоротких імпульсних сигналів наведені у таблиці 4.5 відповідно до ДСН 3.3.6.037-99 [29].

Таблиця 4.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для досягнення прийнятних рівнів шуму у приміщенні видається доцільним використання акустично-поглинаючих матеріалів та раціональне розташування виробничого устаткування.

4.2.5 Виробничі випромінювання

Функціонування комп'ютерного обладнання супроводжується утворенням електромагнітного поля (ЕМП) в зоні робочого місця. Величина напруженості цього поля в конкретній точці простору визначається низкою взаємопов'язаних параметрів, включаючи характеристики джерела електромагнітного випромінювання (його потужність, довжину хвилі, відстань до точки вимірювання, напрямок емісії), властивості середовища, через яке відбувається поширення, а також просторовий розподіл поля, зумовлений наявністю навколишніх об'єктів. Санітарні норми СанПіН 2.2.4.1191-03 [36] встановлюють гранично допустимі значення напруженості електричного і магнітного полів промислової частоти в залежності від тривалості опромінення. Згідно з цими нормами, при напруженості ЕМП до 5 кВ/м протягом усього робочого дня вплив на працівника є допустимим. Гранично допустимі рівні для радіочастотного діапазону становлять 25 В/м для електричного поля та 250 нТл для магнітного поля.

З метою мінімізації впливу електромагнітного випромінювання на організм розробника, першочерговим є дотримання оптимального балансу між робочим часом та періодами відпочинку.

4.3 Пожежна безпека

Неконтрольоване горіння поза спеціальним вогнищем, що завдає матеріальних збитків, називають пожежею. Запобігання пожеж здійснюється головним чином шляхом виключення можливості утворення горючих або вибухонебезпечних середовищ і джерел запалювання. На випадок пожежі на

підприємстві повинна бути пожежний захист для запобігання впливу на людей небезпечних факторів пожежі та обмеження матеріальних збитків від нього. Відповідно до нормативних документів, пожежна безпека об'єкта повинна забезпечуватися системою запобігання пожежі, системою протипожежного захисту і системою організаційно-технічних заходів.

Метою пожежної безпеки об'єкта є попередження виникнення пожежі на визначеному чинними нормативами рівні, а у випадку виникнення пожежі – обмеження її розповсюдження, своєчасне виявлення, гасіння пожежі, захист людей і матеріальних цінностей.

4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

До причин, що можуть спричинити пожежу в приміщенні, відносяться перевантаження електромережі і перегріву струму несучих частин та з'єднань та порушення правил експлуатації техніки.

Система запобігання пожежі передбачає:

- періодичний контроль цілісності ізоляції;
- наявність спеціальних місць для куріння;
- періодичне проведення інструктажів з протипожежної безпеки;
- незахащення приміщення горючими матеріалами;
- наявність системи захисту від атмосферної електрики.

4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Приміщення оснащене вуглекислотними вогнегасниками – на території 300 м² вогнегасника (в кожному відділі і на сходовому марші). Також у коридорі встановлений пожежний гідрант з рукавом, який підключений до системи водопостачання. Вогнегасники слід встановлювати у легкодоступних та помітних місцях (коридорах, біля входів або виходів з приміщень тощо), а також у пожежонебезпечних місцях, де найбільш вірогідна поява осередків пожежі. При цьому необхідно забезпечити їх захист від попадання прямих

сонячних променів і безпосередньої (без загороджувальних щитків) дії опалювальних та нагрівальних приладів.

Використані вогнегасники, а також вогнегасники із зірваними пломбами необхідно негайно направляти на перезарядження або перевірку. Вогнегасники, відправлені з об'єкта на перезарядження, повинні бути замінені відповідною кількістю заряджених вогнегасників.

Пожежні щити (стенди) повинні забезпечувати:

- захист вогнегасників від потрапляння прямих сонячних променів, а також захист знімних комплектуючих виробів від використання сторонніми особами не за призначенням (для щитів та стендів, установлюваних поза приміщеннями);

- зручність та оперативність зняття (витягання) закріплених на щиті (стенді) комплектуючих виробів.

Для зазначення місця розміщення первинних засобів пожежогасіння слід встановлювати вказівні знаки згідно з чинними державними стандартами. Знаки повинні бути розміщені на видних місцях на висоті стандартами. Знаки повинні бути розміщені на видних місцях на висоті 2–2,5 м від рівня підлоги як всередині, так і поза приміщеннями (за потреби).

Власники підприємств, установ та організацій або уповноважені ними органи, а також орендарі зобов'язані:

- розробляти комплексні заходи щодо забезпечення пожежної безпеки, впроваджувати передові досягнення науки;

- забезпечувати дотримання протипожежних вимог стандартів, норм, правил, а також виконання вимог приписів і постанов органів державного пожежного нагляду;

- організовувати навчання працівників правилам пожежної безпеки та пропаганду заходів щодо їх забезпечення;

- у разі відсутності нормативних актів вимог, необхідних для забезпечення пожежної безпеки, вживати відповідні заходи, погоджуючи їх з органами державного нагляду;

- утримувати в справному стані засоби протипожежного захисту і зв'язку, пожежну техніку, обладнання та інвентар, не допускати їх використання не за призначенням;

- створювати, у разі потреби, відповідно до встановленого порядку, підрозділи пожежної охорони та необхідну для їх функціонування матеріально-технічну базу;

- подавати на вимогу державної пожежної охорони відомості та документи про стан пожежної безпеки об'єктів і продукції, що ними виробляється;

- здійснювати заходи щодо впровадження автоматичних засобів виявлення та гасіння пожеж і використання з цією метою виробничої автоматики;

- своєчасно інформувати пожежну охорону про несправність пожежної техніки, систем протипожежного захисту, водопостачання, а також про закриття доріг і проїздів на своїй території;

- проводити службове розслідування випадків пожеж.

4.4 Висновки до розділу

В результаті виконання цього розділу було опрацьовано такі питання охорони праці, як технічні рішення стосовно: щодо безпечного виконання роботи, гігієни праці та виробничої санітарії, мікроклімат приміщень, склад повітря робочої зони, виробниче освітлення, виробничий шум та випромінювання. Також розглянуто пожежна безпека у виробничих приміщеннях та технічні рішення системи запобігання пожежі та систем протипожежного захисту.

ВИСНОВКИ

У рамках випускної кваліфікаційної роботи було розроблено генератор надкоротких імпульсних сигналів, що відповідає заданим технічним характеристикам (тривалість імпульсу, амплітуда, форма, частота повторення). Враховуючи це, можна стверджувати, що задекларована мета даної роботи досягнута в повному обсязі.

Проведено аналіз існуючих сучасних формувачів імпульсів малої тривалості. По результатах, розроблено алгоритм формування імпульсів потрібної форми, що використовувався в даній роботі.

На основі проведеного теоретичного аналізу розроблена структурна схема генератора надкоротких імпульсних сигналів. За основу був взятий метод електронних кіл, що суттєво спрощує процес розробки пристроїв, а також передбачає достатню варіацію способів формування імпульсів малої тривалості.

Розроблено два типу пристроїв генерації: генератор на D-тригері та генератор на логічному елементі «І». Розглянуто особливості реалізації кожного з пристроїв, описано недоліки та можливі варіанти виправлення. Обидва пристрої є працюючими.

Теоретичну частину підтверджено експериментом. Зібрано макет пристрою. За допомогою осцилографа візуально підтверджено параметри сформованих імпульсів, вони відповідають очікуваним параметрам: форма, тривалість, амплітуда. Розроблені схеми підтвердили свою працездатність як під час моделювання, так і під час досліджень реальних фізичних зразків. Проектування та аналіз роботи схем проведено в середовищі моделювання Altium Designer. Отримані імпульси відповідають очікуваним параметрам: форма, тривалість, амплітуда.

Проведено порівняльний аналіз розроблених генераторів. Генератор на логічному елементі «І» має кращі характеристики ніж генератор на D-тригері: тривалість імпульсу зменшилася в 10 разів; амплітуда імпульсу зросла в 6 разів. Додатково зменшився споживаний пристроєм струм на 30 мА, та реалізовані

деякі додаткові функції – можна змінювати коефіцієнт ділення дільника частоти. Додано клавіатуру, додано світлодіод для індикації роботи пристрої.

Зазначено напрямки модернізації пристрою: ліквідація «просадки» живлення, змінення способу поділу частоти; оптимізація узгодження елементів схеми між собою; застосуванням мікроконтролерного керування.

Розроблений пристрій може бути використано в радіотехніці, цифрових системах, лабораторних вимірюваннях, генерації керуючих або тестових сигналів для електричних кіл різноманітного призначення. Макети розроблених генераторів можливо також використовувати у навчальному процесі для набуття практичних навичок.

У розділі «Охорона праці» було опрацьовано такі питання охорони праці, як технічні рішення стосовно: щодо безпечного виконання роботи, гігієни праці та виробничої санітарії, мікроклімат приміщень, склад повітря робочої зони, виробниче освітлення, виробничий шум та випромінювання. Також розглянуто пожежна безпека у виробничих приміщеннях та технічні рішення системи запобігання пожежі та систем протипожежного захисту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. U. Karrenberg Signals, Processes, and Systems. An Interactive Multimedia Introduction to Signal Processing. Springer Heidelberg Dordrecht London New York 2013. — 537 p.
2. The new Phase-Calibration system of the Geodetic Observatory Wettzell / Kodet J. Schreiber K.U. Ch. Plotz, и др. // IVS 2014 General Meeting Proceedings "VGOS: The New VLBI Network". 2014, С. 122–125.
3. H.C. Reader., D.F. Williams, P.D. Hale, T.S. Clement. Comb-Generator Characterization // IEEE TRANSACTIONS ON MI-CROWAVE THEORY AND TECHNIQUES. 2008, vol. № 56. PP 515–521.
4. P. Indirayanti, W. Volkaerts, P. Reynaert. Picosecond Pulse Generation with Nonlinear Transmission Lines in 90-nm CMOS for mm-Wave Imaging Applications / 19th IEEE In-ternational Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS 2012), 2012 (№) 17. P. 467–469.
5. L. Zou, S. Gupta, C. Caloz. A Simple Picosecond Pulse Generator Based ona Pair of Step Recovery Diodes // IEEE Micro-wave and Wireless Components Letters. 2017, vol. № 27. P. 467–469.
6. Agilent Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements. ApplicationNote 1449-1 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.home.agilent.com> (дата звернення 12.05.2025).
7. Fast. Accurate. USB-capable. PowersensorsfromRohde&Schwarz [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.rohde-schwarz.com>, (дата звернення 12.05.2025)
8. Picosecond Pulse Labs. Signal Pulse Generators [Електронний ресурс] – URL: <https://www.tek.com/en/signal-pulse-generators> (дата звернення 12.05.2025)
9. В.І. Бойко, А.М. Гуржій, В.Я. Жуйков та інші // Аналогова схемотехніта та імпульсні пристрої. К. “Вища школа”. 2004. Розділ 13. С.240-256.

10. Калібратор осцилографа Fluke 5820A. [Електронний ресурс] – URL:<https://www.fluke.com/en-us> (дата звернення 12.05.2025)
11. Б. Мандзий, Р. Желяк Основи теорії сигналів. Львівська політехніка: 2019. –240 с.
12. Ніколаєнко Б.А., Рома О.М., Самборський І.І., Шолохов С.М., Юрченко О.В. Основи цифрової обробки сигналів: навчальний посібник. Київ: ІСЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 171 с..
13. B.P. Lathi, R. Green Linear Systems and Signals. Oxford University Press 2017. - 1008p.
14. Jonathan Bartlett. Electronics for Beginners: A Practical Introduction to Schematics, Circuits, and Microcontrollers, 2022.- 530 p.
15. Schottky barrier video detectors. Hewlett-Packard application note № 923. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.home.agilent.com>, (дата звернення 7.05.2025).
16. MC100E431FN Datasheet (PDF)-ON Semiconductor [Електронний ресурс] <https://www.alldatasheet.com/datasheetpdf/view/11825/ONSEMI/MC100E431FN.html> (дата звернення: 15.05.2025).
17. Interfacing Between LVDS and ECL [Электронный ресурс] – URL: [Електронний ресурс] <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AN1568-D.PDF> (дата звернення: 15.05.2025).
18. XC2C32A CoolRunner-II CPLD Data Sheet (DS310) [Електронний ресурс] <https://docs.amd.com/v/u/en-US/ds310> (дата звернення: 15.05.2025).
19. LT1719 Datasheet (PDF) - Linear Technology[Електронний ресурс] <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/258800/LINER/LT1719.html> (дата звернення: 15.05.2025)
20. HMC746LC3C Electrical Specifications [Електронний ресурс] <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc746.pdf> (дата звернення: 15.21.2025).
21. Altium Designer - PCB Design Software. [Електронний ресурс] <https://www.altium.com/altium-designer> (дата звернення: 15.21.2025).

22. Introduction to LVDS, PECL, and CML [Електронний ресурс] – URL: <http://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN291.pdf> (дата звернення: 15.05.2025).

23. Interfacing Between LVDS and ECL [Электронный ресурс] – URL: [Електронний ресурс] <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AN1568-D.PDF> (дата звернення: 15.05.2025).

24. ICS853S011CI DATA SHEET [Електронний ресурс] <https://www.renesas.com/en/document/dst/ics853s011cidatasheet?srsId=AfmBOoqTp1mKEquKlIPbMJYA5667T3Jd4sjinb3JOhCN9waiWtjdVEiH> (дата звернення: 15.21.2025).

25. ДБН В.2.5-28-2018 "Природне і штучне освітлення". https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074958732556240833?doc_type=2

26. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», затверджених [наказом](#) Міністерства охорони здоров'я України від 08 квітня 2014 року № 248.

27. Директива № 90/270/ЄЕС «Про мінімум вимог безпеки і гігієни праці при роботі з екранними пристроями. Режим доступу: <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/provisions-on-workload-ergonomical-and-psychosocial-risks/osh-directives/5>

28. ДСан ПіН 3.3.2.007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ЕОМ. Режим доступу: <http://document.ua/derz-nor4881.html>

29. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

30. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Режим доступу до сторінки: http://hrliga.com/index.php?module=norm_base&op=view&id=819

31. ДСНіПЗ.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>.

32. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028.

33. ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88004.

34. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=77160

35. НПАОП 40.1-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

36. СанПіН 2.2.4.1294-03 «Фізичні фактори виробничого середовища. Гігієнічні вимоги до аероіонного складу повітря виробничих і громадських приміщень». Режим доступу: <http://www.ionization.ru/issue/iss5.htm>

37. НАПБ Б.01.008-2018 Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників - [Електронний ресурс] - Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82176

38. ДБН В.2.5-56:2014 Системи протипожежного захисту. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: - [Електронний ресурс] - https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=59526

39. НАПБ А.01.001-14 Правила пожежної безпеки в Україні [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon.nau.ua/doc/?code=z1410-04>

40. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

РОЗРОБКА ГЕНЕРАТОРА НАДКОРОТКИХ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ

Виконав: студент 4-го курсу, групи ТКР-216,
спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка,
(шифр і назва спеціальності, освітня програма)

О.П – Радіотехніка

ММ Виходзь М.Я.
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., доц., доцент каф. ІРТС

Воловик А.Ю.
(прізвище та ініціали)

« 10 » 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

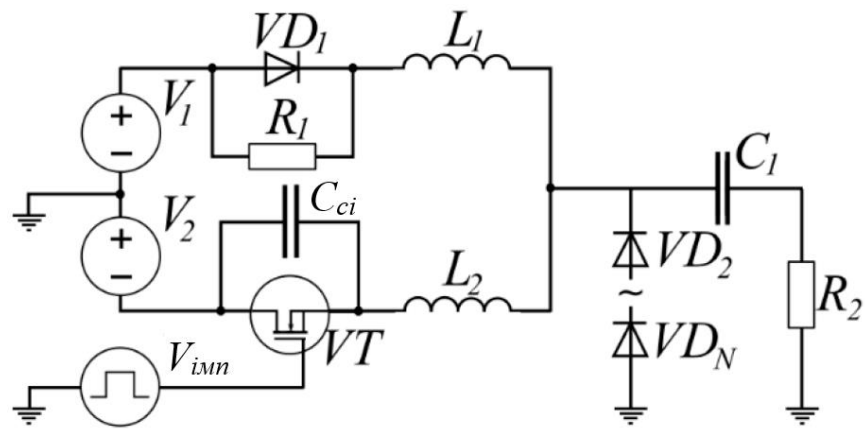


Рисунок 1 – Схема генератора імпульсів на ДНЗ

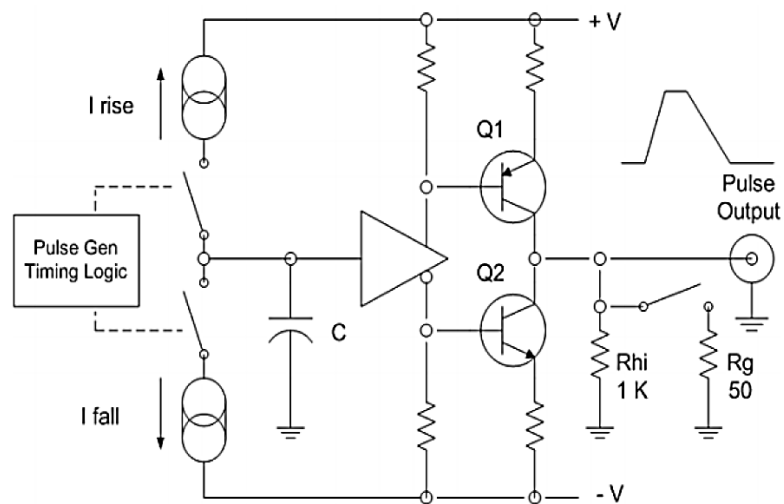


Рисунок 2 – Генератор пилоподібний імпульсів та лінійний підсилювач, керуючий фронтами імпульсів

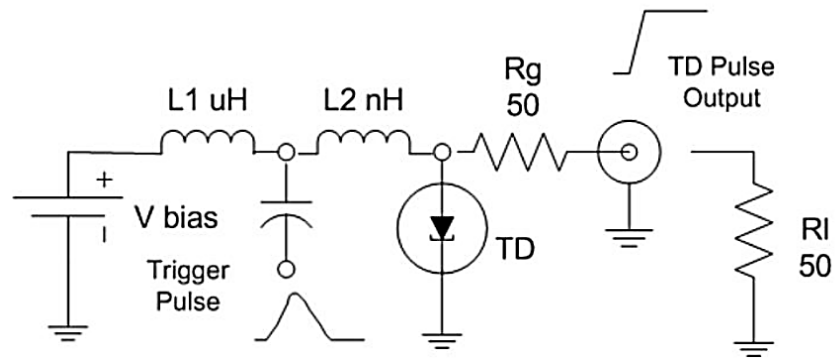


Рисунок 3 – Генератор імпульсів на тунельному діоді

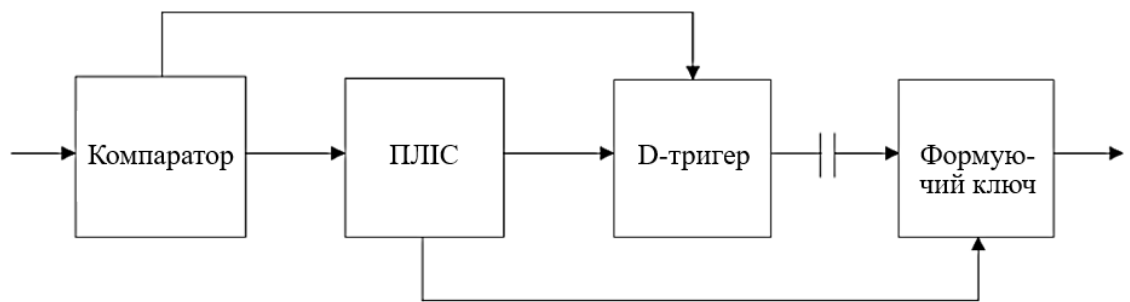


Рисунок 4– Структурна схема генератора надкороткого імпульсу

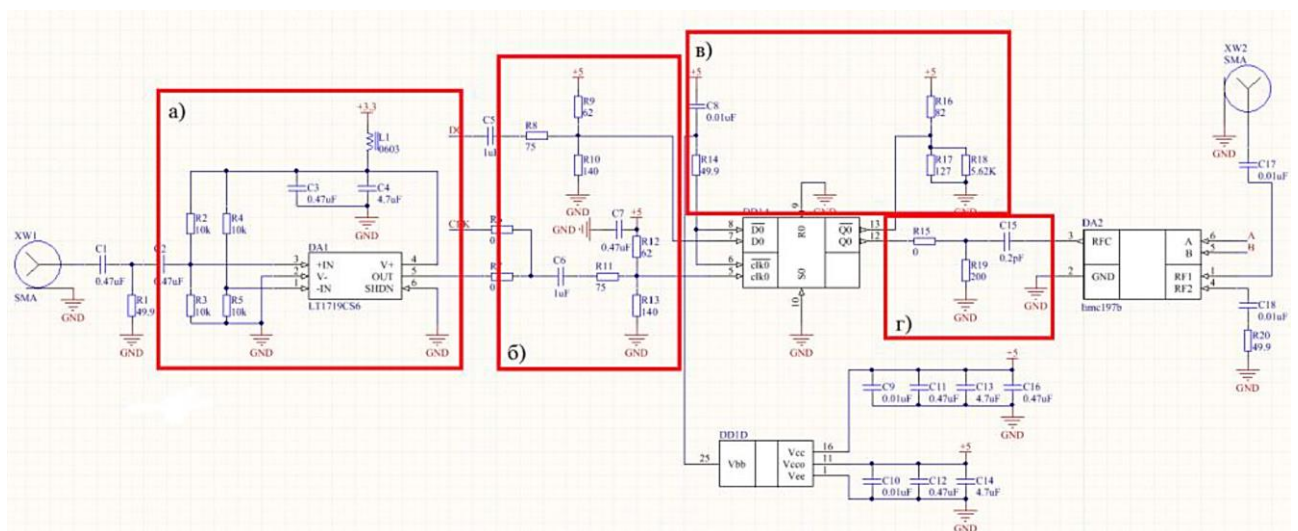


Рисунок 5 – Електрична принципова схема генератора надкоротких імпульсів на D-тригері: а) підключення компаратора, б) подільники напруги, в) підключення входів/виходів, що не використовуються, г) диференціатор

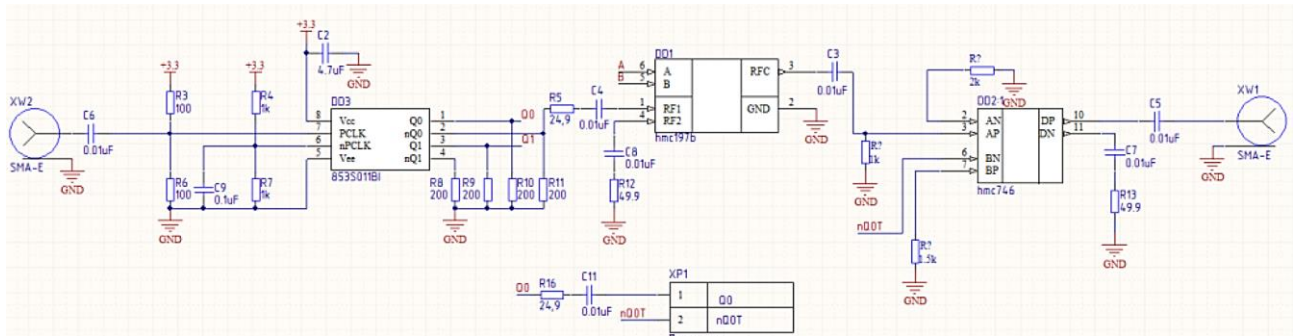


Рисунок 6 – Схема електрична принципова ГНІ на логічному елементі «І»

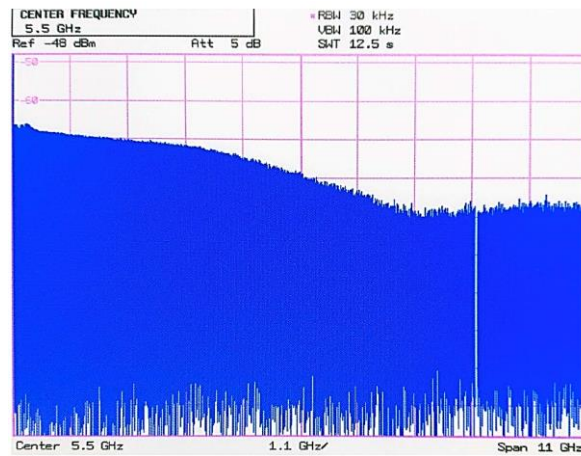


Рисунок 7 – Спектр сигналу при повній смузі пропускання

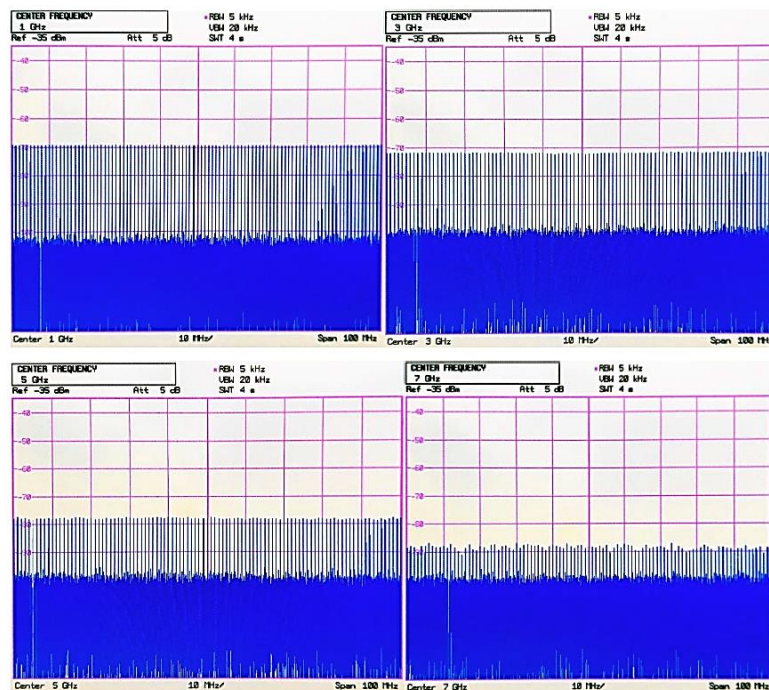


Рисунок 8 – Спектр вихідного сигналу ГНІ, центральні частоти 1, 3, 5, 7 ГГц

Додаток Б
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (БАКАЛАВРСЬКОЇ)
КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

**РОЗРОБКА ГЕНЕРАТОРА НАДКОРОТКИХ ІМПУЛЬСНИХ
СИГНАЛІВ**

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Розробка генератора надкоротких імпульсних сигналів»

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ Кафедра ІРТС
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism 2,0%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Воловик А.Ю. – д.т.н., доцент каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

Осадчук О.В. – д.т.н., професор, зав. каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Семенов А.О.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник 
(підпис)

Воловик А.Ю. – д.т.н., доцент каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач 
(підпис)

Виходзь М.Я.
(прізвище, ініціали)