

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний

(повна назва інституту/факультету)

Оптичних та оптико-електронних приладів

(повна назва кафедри)

УДК 004.032.26

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

В. Г. Колобродов

(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” 2021р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації):

151 Автоматизація та комп'ютерно інтегровані системи

(код і назва спеціальності)

на тему: Фотонна інтегральна схема для систем з штучним інтелектом

Виконала: студентка 6 курсу, групи ПО-91 мн

(шифр групи)

Авдейонок Ірина Ігорівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник проф., д.т.н. Боровицький В.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант стартап-проект к.е.н., доцент, Бояринова К.О.

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент доцент, Безугла Н. В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2021 року

					<i>ПО91мн.000001.000 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Відм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докцм.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		1

Реферат

Авдейонок І.І. Фотонна інтегральна схема для систем з штучним інтелектом-наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня магістра за спеціальністю –Фотонна інтегральна схема для систем з штучним інтелектом Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» , Київ, 2021

Дисертаційна робота присвячена розробці фотонної інтегральної схеми для нейронної мережі.

Інтегральні схеми являє собою невід'ємну частину сучасних технологій. Більша частина функціональних одиниць можливо замінити фотонним компонентом (діоди, хвилеводи, фільтри та підсилювач) для створення фотонної інтегральної схеми. Фотонні інтегральні схеми мають декілька переваг: мають більшу швидкість обробки та передачі інформації, велику зону пропускання та мають менші втрати енергії. Найбільш розповсюдженим є використання гібридних схем, тобто частина елементів інтегральної системи інтегрується фотонними елементами.

Перший розділ присвячений дослідженню сучасному розвитку нейронних мереж. Розглянуто апаратні реалізації нейрону та нейронних мереж. Також був проведений патентний пошук моделювання нейрону.

У другому розділі розглянуті сучасні архітектури фотонно інтегральної схеми. Була запропонована нова структура інтегральної схеми, та її технологія виготовлення.

Для цього була запропонована структура літографічної установки та сформульоване технічне завдання

Третій розділ присвячений проектуванню літографічної системи. Були проведенні габаритні розрахунки, розрахунок структури оптичної системи. Після проектування провели аналіз системи, а саме проведена оптимізація розрахованої системи, енергетичний розрахунок, та абераційний аналіз.

						ПО91МН.000001.000 ПЗ	Лист
Відм.	Лист	№ докum.	Підпис	Дата			2

У четвертому розділі оглянуто нейронна мережа Хопфілда, її математична модель. На основі якої була розроблена програма для моделювання мережи Хопфілда та розрахунку вагових коефіцієнтів.

П'ятий розділ присвячений експериментальним дослідженням. Був розроблений прототип фотонної інтегральної системи. Були проведені експерименти: дослідження хвилеводів системи для їх подальшого впровадження та дослідження діючого прототипу.

Шостий розділ присвячений розробці стартап проекту.

В процесі розробки проекту було написано наступні роботи:

- - Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні 2020
- the 21st International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science - SPO 2020
- - Двадцята Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи” 2021

Ключові слова: нейронна мережа, фотонна інтегральна схема, моделювання нейрону, літографічна система

Abstract

Avdieionok I.I. Photonic integrated circuit for systems with artificial intelligence - scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the master on a specialty - the Photonic integrated circuit for systems with artificial intelligence National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky», Kiev, 2021

The dissertation is devoted to the development of a photonic integrated circuit for a neural network.

Integrated circuits are an integral part of modern technology. Most of the functional units can be replaced by a photonic component (diodes, waveguides, filters and amplifier) to create a photonic integrated circuit. Photonic integrated circuits have several advantages: they have a higher speed of processing and transmission of information, a larger bandwidth and less energy loss. The most common is the use of hybrid circuits, namely part of the elements of the integrated system is integrated by photonic elements.

The first section is devoted to the study of modern development of neural networks. Hardware implementations of neurons and neural networks are considered. A patent search for neuronal modeling was also performed.

The second section considers modern architectures of the photon integrated circuit. A new structure of the integrated circuit and its manufacturing technology were proposed. For this purpose, the structure of the lithographic installation was proposed and the technical task was formulated.

The third section is devoted to the design of the lithographic system. Dimensional calculations, calculation of structure of optical system were carried out. After the design, the system was analyzed, namely the optimization of the calculated system, energy calculation, and aberration analysis.

								<i>П091МН.000001.000 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Відм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>					4

The fourth section examines the Hopfield neural network, its mathematical model.

Based on which a program was developed to model the Hopfield network and calculate weights.

The fifth section is devoted to experimental research. A prototype of a photonic integrated system was developed. Experiments were performed: the study of the waveguides of the system for their further implementation and the study of the current prototype.

The sixth section is devoted to the development of a startup project.

The following works were written during the project development:

- - Efficiency and automation of engineering solutions in instrument making 2020
- the 21st International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science - SPO 2020
- - Twentieth International Scientific and Technical Conference "INSTRUMENT MANUFACTURING: Status and Prospects" 2021

Keywords: neural network, photon integrated circuit, neuron modeling, lithographic system

						ПО91МН.000001.000 ПЗ	Лист
Відм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			5

Зміст

Вступ.....	9
1. Сучасний стан розвитку апаратних реалізацій нейронних мереж.....	11
1.1 Модель біологічного нейрону.....	11
1.2 Цифрові, імпульсні та аналогові нейрочипи	13
HiCANN	13
Neurogrid	16
SpiNNaker.....	17
TrueNorth.....	19
1.3 Фотонні нейрочипи	22
Enlight256	23
1.4 Класифікація та апаратні реалізації моделей нейрона	25
За елементною базою.....	25
За апаратною складністю	27
За наявності зворотного зв'язку	33
За технологією.....	34
1.5 Патентний пошук	35
Патент на корисну модель u200607119 [22].....	35
Патент на корисну модель u201002058 [23].....	36
Патент на корисну модель u201008531 [24].....	37
Патент на корисну модель u 2011 15358 [25].....	39
Патент на корисну модель u 2011 15321 [26].....	41
Патент на корисну модель u 2011 15359 [27].....	42
Патент на корисну модель u 2012 07181 [28].....	43
Патент на корисну модель u 2012 04433 [29].....	43
Патент на корисну модель u 2012 04480 [30].....	45
Висновок до розділу 1.....	45
2. Фотонна інтегральна схема.....	47
2.1 Побудова фотонної інтегральної схеми.....	47
2.2 Технологія виробництва фотонних інтегральних схем.....	50

2.3	Оптична літографічна система для виробництва фотонних інтегральних схем.	54
2.4	Технічне завдання	55
	Висновок до розділу 2	56
3.	Оптична літографічна система для виготовлення фотонних інтегральних схем	57
3.1	Габаритний розрахунок	57
3.2	Пошук варіантів структури ОС	58
3.3	Розрахунок дволінзової системи	58
3.4	Оптимізація системи	59
3.5	Визначення освітленості у площині оптичної інтегральної схеми в оптичній літографічній системі.	67
	Розрахунок діаметра напівсфери	67
3.6	Енергетичний розрахунок	68
	Визначення коефіцієнта пропускання оптичної системи.	69
	Розрахуємо світловий потік від одного світлодіоду	70
3.7	Математична модель формування зображення у оптичній літографічній системі	71
	Висновок до розділу 3	73
4.	Програмна та апаратна реалізації нейронної мережі Хопфілда.	74
4.1	Математична модель нейронної мережі Хопфілда	74
4.2	Програма для моделювання нейронної мережі Хопфілда	76
4.3	Розрахунок маски з апертурами для апаратної реалізації нейронної мережі Хопфілда.	79
	Висновки до розділу 4	81
5.	Експериментальна частина	82
5.1.	Дослідження хвилеводів оптичної інтегральної схеми.	82
	Проведення експерименту	82
	Експериментальна установка	82
	Виконання експерименту	83
	Обробка результатів	87

5.2 Розробка діючого прототипу фотонної інтегральної схеми.....	88
Структура прототипу	88
Випромінювальний/Приймальний блок	89
Блок з діафрагмами	92
Збірка	93
5.3 Оптична частина.....	94
5.4 Прототип	95
5.5 Дослідження діючого прототипу фотонної інтегральної схеми.	98
Постановка завдання.....	98
Алгоритм вирішення завдання	99
Опис програми.....	100
Текст програми.....	101
Результати експерименту	102
Висновки до розділу 5.	104
6. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «ФОТОННА ІНТЕГРАЛЬНА СХЕМА ДЛЯ СИСТЕМ З ШТУЧНИМ ІНТЕЛЕКТОМ»	105
6.1 Опис ідеї проекту	105
6.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	107
6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту	108
6.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	115
6.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	118
6. Організація реалізації стартап-	121
6.7 Висновки до розділу 6	124
Список літератури	126

Вступ

Актуальність:

Розвиток сучасних технологій з кожним роком вимагають збільшення швидкості і якості обчислень. Вирішення цієї проблеми за рахунок збільшення частоти, обсягу пам'яті та розробка нових математичних методів обробки вже не задовольняє потреби. Необхідно принципово новий підхід для обробки даних.

Нейронні мережі являють собою нову та перспективну обчислювальну технологію. Вона дає нові підходи до дослідження динамічних завдань. Можливість нейронні мережі до моделювання нелінійних процесів, працездатність з зашумленими даними та адаптивність, дає можливість використовувати їх для рішення великого спектру задач. Вони можуть застосовуватися для розпізнавання зорових та звукових образів, конструювання гнучких обчислювальних машин, діагностики стану технічних об'єктів, навчання роботів та багато іншого.

Технологія створення кремнієвих інтегральних схем з дуже малими розмірами та великою швидкістю наближається до своєї межі. Тому зараз набуває все більшої популярності фотонні інтегральні схеми. На їх основі можливо створити терагерцові обчислювальні пристрої.

Заміна металевих хвилеводів на оптичне волокно в обчислювальній техніці та використання оптичного транзистору дає можливість працювати на терагерцовій частоті що дає наступні переваги

- дозволяє збільшити швидкість обробки та передачі даних приблизно на три порядки
- система стійка до радіоперешкод
- дозволяє передавати складний мультиплексований сигнал
- дає переваги у КПД та у кількості операцій на джоуль

Об'єкт дослідження. процес формування вихідного сигналу в оптичному тракті некогерентної ФІС з лінійними оптичними хвилеводами та матрицею апертур

Предмет дослідження. оптичний метод отримання добутку вектору на матрицю коефіцієнтів нейронної мережі або матрицю коефіцієнтів інтегральних перетворень

Мета Метою роботи є створення економічного нейрочипу у вигляді фотонної інтегральної схеми для систем з штучним інтелектом.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано наступні завдання:

1. Виконати критичний огляд існуючих нейронних мереж, особливо з оптичними елементами
2. Розробити нову структуру інтегральної схеми та дослідити технології її виготовлення
3. Спроекувати компактну фотонну інтегральну схему
4. Експериментальне дослідження прототипу

					<i>П091мн.000001.000 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Відм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		10

1. Сучасний стан розвитку апаратних реалізацій нейронних мереж

1.1 Модель біологічного нейрону

Біологічний нейрон [1] або нервова клітина має два стани – збудження та гальмування.

Нейрон складається з трьох частин [2]: тіло клітини(сом), дендрит та аксон (нейрити).

Сома нейрона відповідає за витрати енергії, оновлення ресурсів та інше.

Дендрити – це відростки через які надходять дратувальні імпульси. Їх кількість може досягати сотень, а їх довжина може бути до десятків сантиметрів. Вони утворюють дендритне дерево.

Аксон – це вихід збудження з клітини. Може досягати до 1,5м. Він передає сигнал до інших дендритів нейрона.

Синапс- це місце дотикання нервових клітин. Збудження проходить лише від аксона до дендрита іншого нейрон. Великий нейрон може мати тисячу синапсів.

Передача збудження проходить через синапс. По типу передачі сигналу виділяють два типу: хімічний та електричний. Електричний імпульс передає нервовий імпульс через місце контакту. Хімічні синапси передають нервовий імпульс за допомогою спеціальної речовини медіатора.

Нейрон має важливу здатність до просторового та часовому підсумовування подразнень. Це надає їх логічним можливостям складності та гнучкості.

Збудження через просторове підсумовування відбувається через одночасне подразнення декількома синапсами, хоча рівні окремих подразнень недостатні для збудження нейрона.

Збудження через часове підсумовування відбувається за рахунок надходження слабких імпульсів за досить короткі проміжки часу.

Нейромережі мають наступні властивості:

- Однорідність системи (елементи мережі однакові і прості, функція визначається структурою зв'язків)
- Надійність мережі, побудованої на ненадійних елементах.
- «Голографічність», забезпечує збереження властивостей системи при руйнуванні її частини

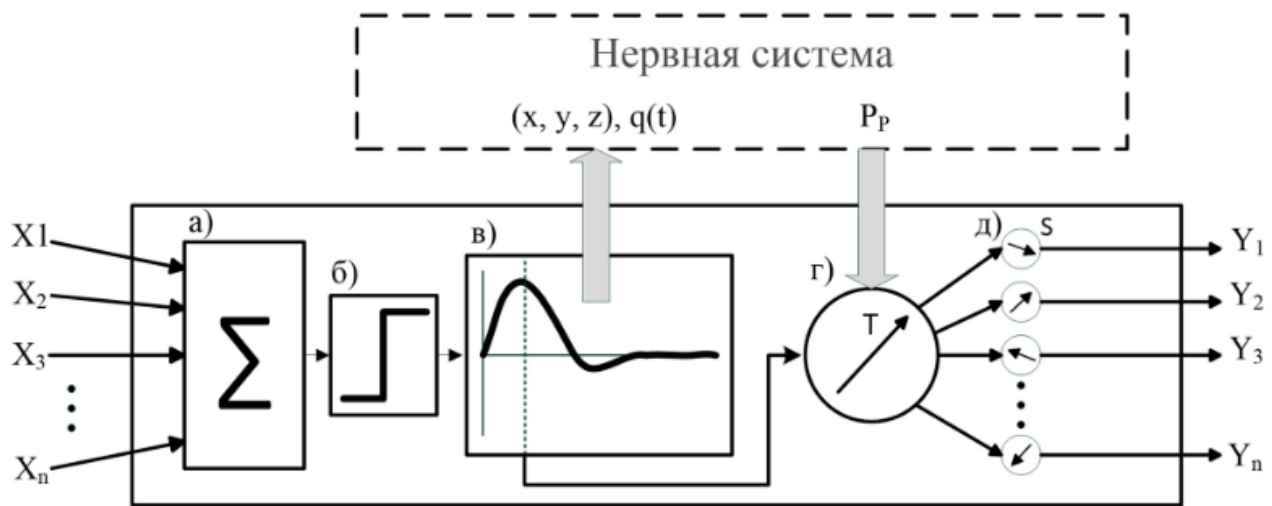


Рис. 1.1 Математична модель нейрона

На нейрон впливає сила синапсів нейрона [3]. Силу синапсів характеризує вхідний сигнал у вигляді речових чисел (x_1, x_2, \dots, x_n). Значення вхідного сигналу визначає вид впливу на нейрон, при позитивному значенні відбувається стимулювання нейрона, при негативному – гальмування. Біологічний нейрон активується, коли сигнал перевищує порогового значення в незалежності від того, звідки він надійшов. Всі вхідні сигнали надходять до суматора(а). Вплив входів оцінюється короткий проміжок часу, оскільки система працює у реальному часі.

Результат дії суматора надходить до порогової функції (б). При перевищенні порогового значення нейрон збуджується й передає інформацію

системі. Цей сигнал характеризує активність нейрона, передаючи інформацію в просторі нервової системи і заряду, змінюваному в часі (в). Перераховуючи силу, нейрон подає збудження по всі наявним синапсам. На період активації та відновлення нейрон ігнорує вплив інших синапсів. Далі відбувається корегування вектору Т (г). Та в останній етап відбувається переоцінка сил синапсів. Слід зауважити, що блок (в) працює паралельно з (г) і (д).

1.2 Цифрові, імпульсні та аналогові нейрочипи

HICANN

Проект FACETS розробив прототип HICANN [4]

Ядро аналогової мережі(АНК) – це схема нейронів інтегровані разом із відповідними синапсами в структурі. Рис1.2.

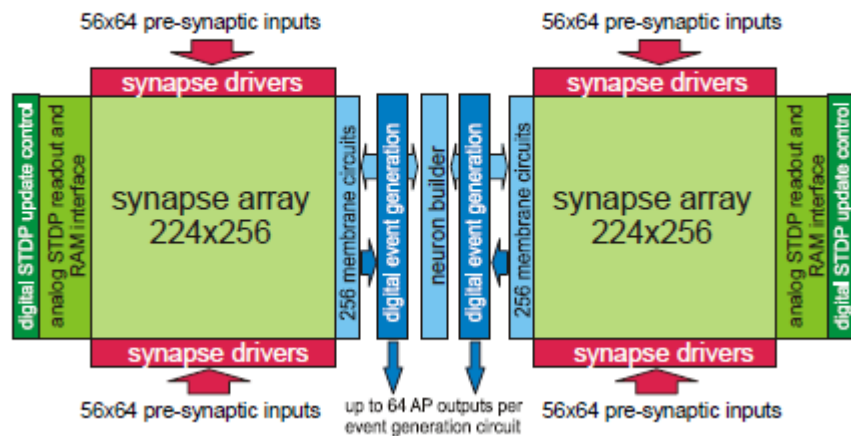


Рис. 1.2 Схематична діаграма ядра аналогової системи

Нейрон побудований з декількох частин називається дендритні мембрани схеми (ДенМен). Кожна схема ДенМен підключена до 224 синапсів. У середині ЯАМ знаходиться нерон будівельник, що поєднує групи ланцюгів ДенМена з нейронами, й програмується. Налаштовують ДенМен за допомогою 3 окремі

аналогові входи параметрів, які генеруються аналогові клітини аналогової пам'яті з плаваючими воротами, розташовані між ланцюгами DenMem та нейроном.

Чотирибітовий множувальний ЦАП генерує вагу синапсів представлену струмом. Він зберігає вагу окремого синапсу, а максимальна провідність стовпця синапсів контролюється аналоговим входом. Синапси передають сигнал до нейрона з використанням двох спільних входів на схему ДенМен Сигнал кодується як імпульс струму визначеної довжини та амплітуди, що пропорційна вазі синапсу. Вхідний синаптичний ланцюг, використовуючи інтеграл синаптичних струмів, генерує експонційно затухаючу синаптичну провідність, яка згодом заряджає або розряджає мембрани.

На Рис.1.3 показано перший прототип НІСАНН.

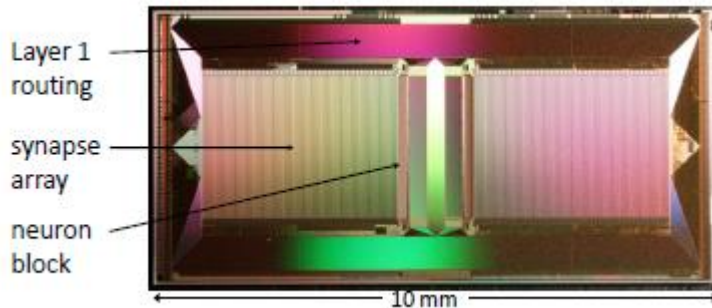


Рис. 1.3 Фотографія прототипу НІСАНН

На пластині розміром 20см вміщується 44 сітки, що містить 352 чіпси НІСАНН.

Усередині сітчастої мережі з'єднуються горизонтальний і вертикальний канали маршрутизації рівня (L1)- це Асинхронний послідовний протокол подій використовується для взаємозв'язку ЯАМ. На нього наноситься додатковий шар металу, що дозволяє взаємозв'язок окремих сіток з металевою свердловиною. Ця сітка використовується для перерозподілу панелей зв'язку чіпів НІСАНН у ряди з рівномірно розташованим прямокутником 200*100 м² прокладками. Ці

прокладки з'єднують пластину з системою плати масивом еластомерних смугових з'єднувачів.

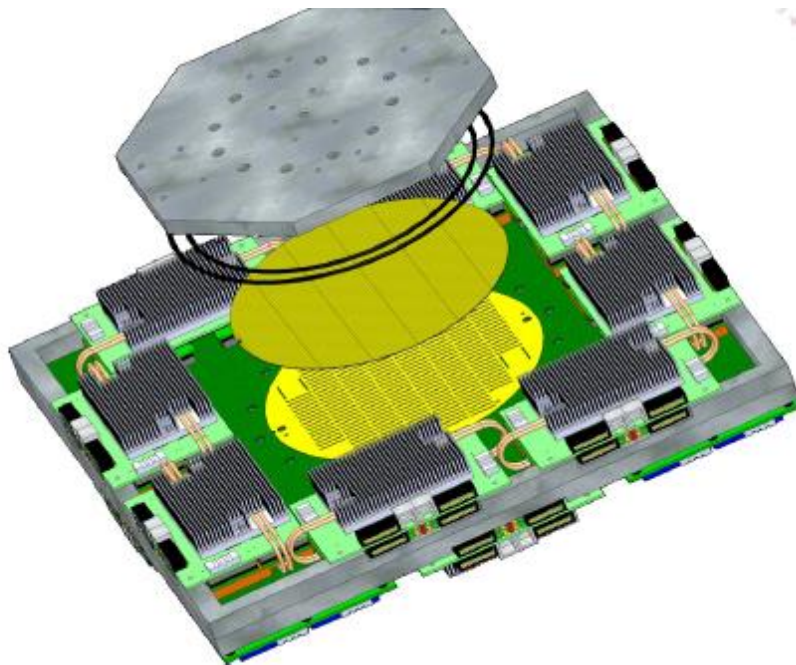


Рис. 1.4 Креслення повного вафельного модуля

Рис.1.4 показує розташування пластини та оточуючих її апаратних засобів цифрового зв'язку. Хост-зв'язок використовує спеціалізовані пакети з нижчим пріоритетом, спільно використовуючи з'єднання L2. Завдяки стандартному протоколу Ethernet, що використовується в процесі обміну пластинами, будь-яка обчислювальна потужність, необхідна для управління системою, може бути включена в мережу.

Проект FACETS успішно вирішив такі передумови для цього:

- програмованість топології та параметрів моделі,
- гнучка і біологічно реалістична модель нейронів,
- малопотужна технологія зв'язку для нейронних подій,
- масштабована комунікація між пластинами та хостом на основі пакетів, що включає можливість інтерактивного моделювання для закриття циклу сенсор-актор,

Neurogrid

Також був розроблений Neurogrid [5], що включає два компонента:

- Програмне забезпечення для виконання інтерактивної візуалізації

Програмний стек складається з інтерфейсу для користувача, апаратного рівня абстракції та компонентів драйвера. Користувач може вказати моделі нейронних мереж для моделювання, взаємодії з моделюванням та візуалізацією результатів у реальному часі.

- Апаратне забезпечення для роботи в режимі реального часу моделювання.

Складається з Cypress EZ-USB FX2LP, решітки ispMACH CPLD, дочірньої плати та 16 нейроядр, з'єднані в бінарному дереві. Дочірня плата розуміє первинне розгалуження аксонів за допомогою Xilinx Spartan-3E FPGA та вісім Cypress 4MB SRAMs. Neurocore (рис 1.5) має 256*256 кремній нейронний масив, передавач, приймач, маршрутизатор та дві оперативні пам'яті.

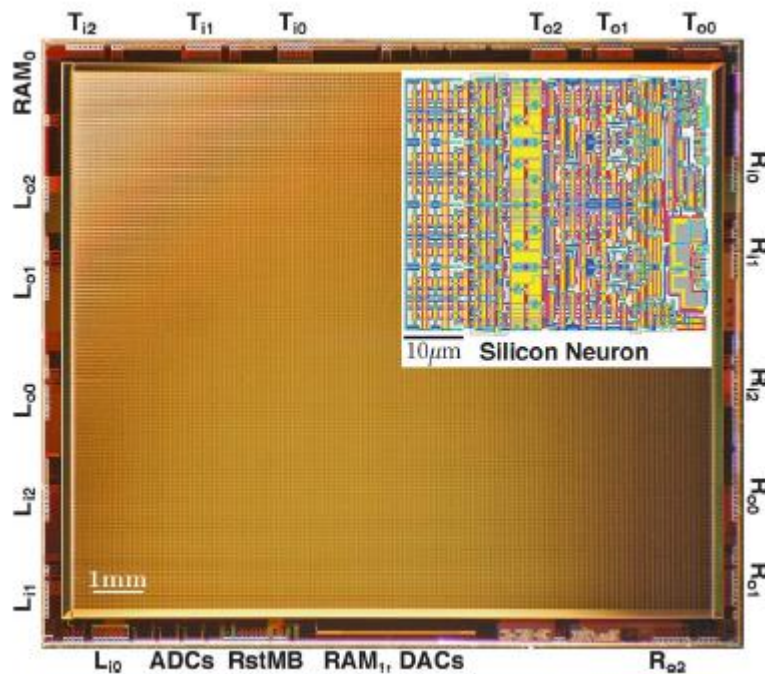


Рис. 1.5 Neurocore.

Neurocore (рис.5). RAM0 надає 256 розташувань для цільових типів синапсів. RAM1 зберігає 18 бітів конфігурації та 61 аналоговий зсув. ЦАП виробляють аналогові упередження. АЦП цифрує чотири аналогові сигнали від обраного нейрона.

У Neurogrid схеми соми, дендриту, популяції синапсів та іонних каналів нейромережевого нейрона реалізують безрозмірну форму загальних біологічних моделей нейронів з MOS-пристроями. Безрозмірні моделі мають менше вільних параметрів і можуть бути реалізовані на найрізноманітніших апаратних платформах.

Архітектура спільного дендриту (SD) Neurogrid досягла найнижчої вартості АЕТ за допомогою багаторівневого аксона розгалуженого для збільшення синаптичного зв'язку.

SpiNNaker

Розроблений пристрій SpiNNaker [6] базується на масово паралельних обчислень. В її архітектурі може бути задіяні до мільйону мікропроцесорних ядер, межа визначається лише бюджетом та зручністю, а не чимось принциповим. Досягнення цієї розробки в зв'язку інфраструктури. За звичай кластери та високопродуктивні комп'ютерні системи зв'язку оптимізовані для великих пакетних даних, а у даному пристрої оптимізовані для перенесення великої кількості дуже малих пакетів. Кожен пакет містить одну нейрону подію або «спайку»

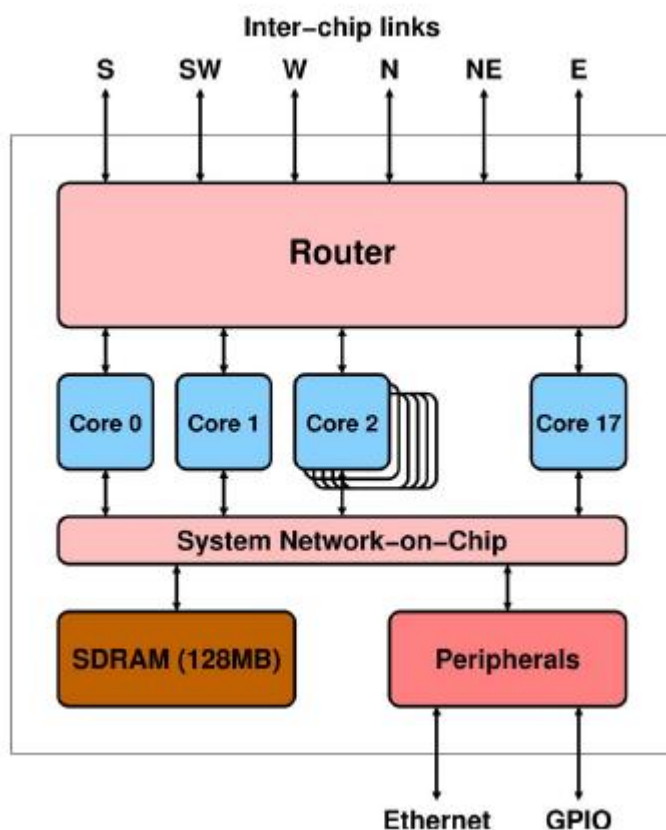


Рис. 1.6 Основні архітектурні складові SpiNNaker

Асинхронний характер зв'язку система призводить до недетермінованого впорядкування прийому пакетів, і іноді пакети можуть скидатися, щоб уникнути глухого кута зв'язку.

SpiNNaker – це двовимірна множина інструкцій, що містить безліч вузлів. Кожен вузол включає 15 процесорних ядер ARM968 з 96 кБ локальної пам'яті, 128 МБ спільної пам'яті, пакетний маршрутизатор та загальні системи, що підтримують периферію.

Ключовим нововведенням є легкий багатоадресний механізм маршрутизації пакетів, який підтримує дуже високі зв'язки, виявлені в біологічному мозку. Програмне забезпечення визначає, що нейрон повинен випромінювати спайк, він просто видає пакет, який ідентифікує спайковий нейрон.



Рис. 1.7 Вузлова друкована плата SpiNNaker

Вузлова друкована плата SpiNNaker (Рис.1.7) містить 48 пакетів SpiNNaker (в центрі) із загальною кількістю 864 процесорних ядер ARM968, три FPGA (вгорі) для високошвидкісного зв'язку між друкованими платами через послідовні роз'єми для кріплення передових технологій (вгорі ліворуч та праворуч) з вбудованим регулюванням потужності (знизу).

Пакети збирають на друкованій платі. Підключення між мікросхемами на платі є прямими дротовими з'єднаннями з використанням синхронізації, протоколом повернення до нуля для передачі символів, та одним дротовим переходом для підтвердження відповіді.

TrueNorth

Мікросхема TrueNorth [7] містить 4096 ядер, кожна з яких має 256 входів, 256 нейронів та синаптичний масив 256×256 . Та складається з мережі нейросинаптичних ядер із програмованим зв'язком, синапсами та параметрами нейронів.

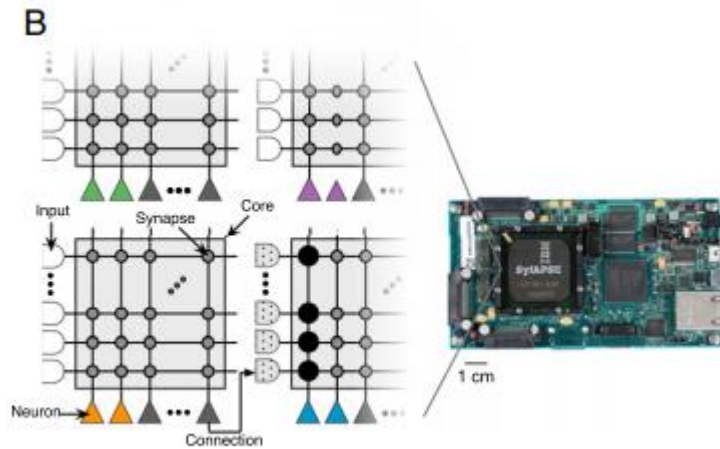


Рис. 1.8 Зворотні мережеві нейрони TrueNorth

Зворотні мережеві нейрони для однієї групи в одному топографічному розташуванні реалізовані з використанням нейронів на тому самому ядрі TrueNorth, з відповідною областю підтримки фільтра, реалізованою за допомогою входів ядра, і фільтра ваги, реалізовані за допомогою синаптичного масиву ядра

Кожен нейрон може під'єднатися до однієї входної лінії будь-якого ядра в системі, а звідти - до будь-якого нейрона на цьому ядрі через місцеві синапси. Всі спілкування до, від- і всередині чіпа виконуються за допомогою спайків. Синапси мають індивідуально налаштовувальні стани ввімкнення / вимкнення та силу.

Структура мережі відображається шляхом розділення кожного шару на 1 або більше однаково великих груп уздовж розмірного елемента. Шари розроблені такі, що загальний розмір фільтра (рядки \times стовпці \times елементи) кожної групи становить менше або дорівнює кількості входних рядків, доступних на ядро, а кількість вихідних ознак менше або дорівнює кількості нейронів на ядро. Ця схема дозволяє використовувати функції, фільтри та область підтримки фільтрів однієї групи за допомогою нейрони, синапси та входні лінії одного ядра відповідно.

Ця робота демонструє, що структурні та операційні відмінності між нейроморфними обчисленнями та глибоким навчанням не є принциповими та вказує на багатство конструкцій нейронних мереж та пристосованість зворотного розповсюдження.

Чіпи	Швидкість MAC / процесор ¹	Енергія MAC ²	вбудований процесор	Площа MAC ³	точність синапсів (біт)
Sub-λ photonics ⁴	200ГГц	0,0007	200	20	8
HICANN	22,4МГц	198,4	224	780	4
True North	2,5кГц	0,27	256	4,9	5
Neurogrid	40,1кГц	119	4096	7,1	13
SpiNNaker ⁵	3,2кГц	6*10 ⁵	320	217	16

Таблиця 1. Порівняння різних технологій [8]

¹Подія MAC відбувається кожного разу, коли нейрон інтегрує імпульс. Розгалуження нейронів відноситься до числа можливих зв'язків з одним нейроном.

²Енергія на MAC для HICANN, TrueNorth, Neurogrid і SpiNNaker була розрахована шляхом ділення потужності від розетки до кількості нейронів і до робочої швидкості MAC на процесор

³Площа на MAC оцінювалася шляхом ділення розміру чіпу / плати на кількість одиниць MAC (кількість нейронів, помножене на розгалуження).

⁴Sub-λ позначає оціночні показники для платформи, що використовує оптимізовані субхвильові структури, такі як фотонні кристали.

⁵ Нейрони, синапси і піки кодуються в цифровому вигляді в заголовках подій, які переміщуються по спільно інтегрованим ядрам процесора

1.3 Фотонні нейрочипи

Більшість реалізацій для «фотонного нейрона» або «оптичного нейрона» чи «лазерного нейрона» засновані на лазерах, що працюють у збудливому режимі

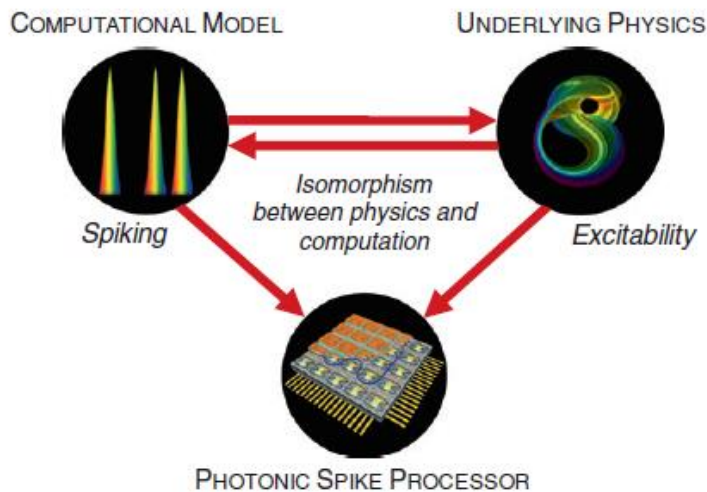


Рис. 1.9 Аналогії між обробкою спайків та фотонікою можуть бути використані для створення обчислювальної парадигми, яка виконує більше суми її частин. Зменшуючи абстракцію між процесом (стрибкоподібність) та фізикою (збудливість), що може мати значну перевагу щодо швидкості, використання енергії, масштабованості

Різниця у часових шкалах обробки, тобто тривалість імпульсу та рефрактивного періоду. Тимчасова роздільна здатність прив'язана до ширини піку та швидкість обробки прив'язана до рефрактивного періоду.

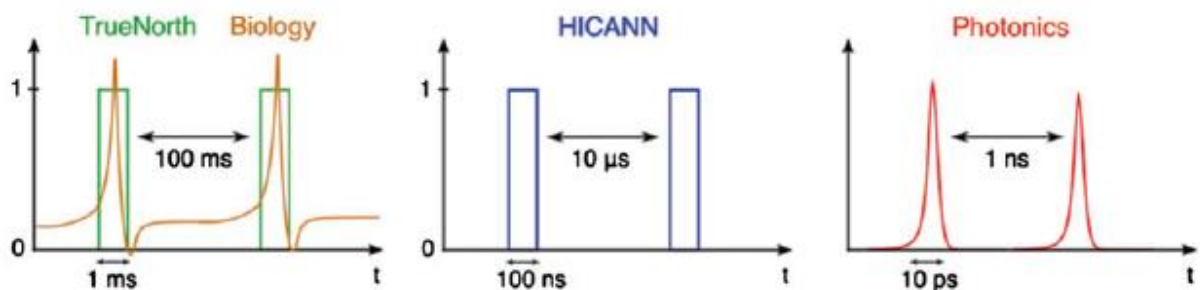


Рис. 1.10 Ліворуч біологічний нейрон, електронний нейрон посередині, фотонний нейрон праворуч.

Ретрансляція сигналу від воріт до воріт, особливо до використання тактової схеми, приводить до зниження затримки та пропускнуою здібності порівняно з оптичним хвильоводом, який пасивно переносить мультиплексовані сигнали. Це говорить про те, що запуск нової архітектури з фотонної комутаційної фабрики, яка підтримує нелінійний оптоелектронний пристрій, може бути унікально вигідним з точки зору енергоефективності, пропускну здібність та затримка, дозволяє уникнути багатьох фундаментальних компромісів у цифровій та аналоговій електроніці. Це може бути один з небагатьох практичних здібностей для досягнення надшвидкої та складної обробки на кристалі без непрактичного споживання енергії

Enlight256

Розроблений оптичний процесор Enlight256 [9], що має електричний вхідний і вихідний сигнал та оптичне ядро. За один так тривалістю 8нс він перемножую вектор з 256 елементів на матрицю 256*256.

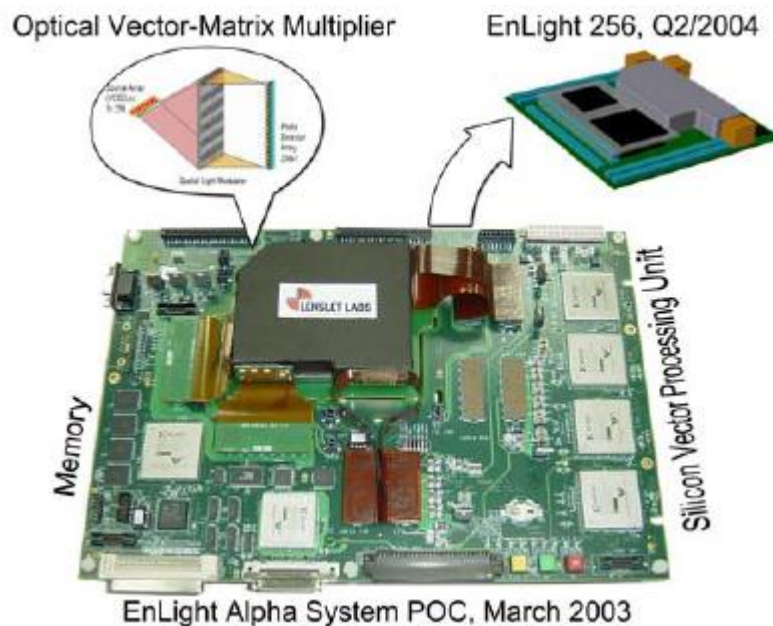


Рис. 1.11 Оптичний процесор Enlight256

Реалізовано за допомогою елементів

1) VCSEL- лазерів, що утворюють вектор з 256 елементів

2) Інтегрально-оптичний пристрій, що складається з матриці 256×256 просторових модуляторів світла, які працюють на відбиття.

3) Лінійка з 256 фотоприймачами випромінювання просторового модулятора світла, набір лінз та приймач випромінювання, які утворюють оптичну матрицю.

					ПО91МН.000001.000 ПЗ	Лист
Відм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		24

1.4 Класифікація та апаратні реалізації моделей нейрона

Вже зараз існує декілька класифікацій для моделювання нейрона. А саме класифікують по наступним ознакам [10]:

- За формою представлення інформації (цифрова чи аналогова);
- Тип елементної бази (електронна, гібридні та оптико-електронна);
характер настроювання синапсів(постійні або змінні);
- Час передачі сигналів(синхронні або асинхронні);
- По характеру настроювання синапсів (фіксованим або настроюваними ваговими коефіцієнтами);

За елементною базою

Серед оптико-електронної елементної бази можна виділити такі групи:

- На основі фотодіодів та операційних підсилювачів;
- На основі керованих транспарантів;
- На основі оптичних бістабільних SEED-приладів;
- На основі просторово-часових модуляторів;

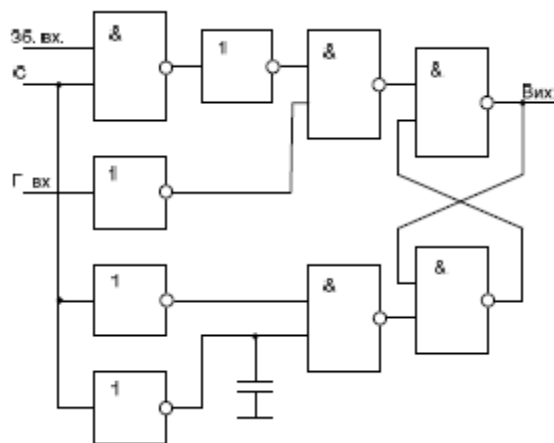


Рис. 1.12 Модель формального нейрона

Прикладом цифрової одно розрядної моделі є модель формального нейрона (рис.1.12) [11]. В основі моделі -звичайний R-S-тригер. Також використовуються логічні елементи І-Ні, транзистори, а інколи іонотронний

транзистор. Ця модель є дуже спрощена, оскільки вхідні та вихідні сигнали в них бінарні.

Більш складними та перспективними є цифрові багаторозрядні пристрої моделювання нейрона (ПМН). Типовий представник [12] містить (рис.1.13) дві групи інформаційних входів $11 \dots 1n$ і $21 \dots 2n$, n блоків $31 \dots 3n$ зміни синаптичних ваг, установчі входи $41 \dots 4n$, суматор 5, перший 6 і другий 7 елементи І, перший 8 і другий 9 реєстри, логічний блок 10, керуючі входи 11 – 16, інформаційні виходи 17 – 20 з відповідними зв'язками. За допомогою входів 15 і 16 задають режим роботи. В блоках $31 \dots 3n$ змінюються синаптичні ваги, відбувається множення вхідних сигналів на поточні значення. На виході 20 формується вихідний сигнал.

Перевага цього метода є висока точність моделювання, але за рахунок великих апаратних витрат.

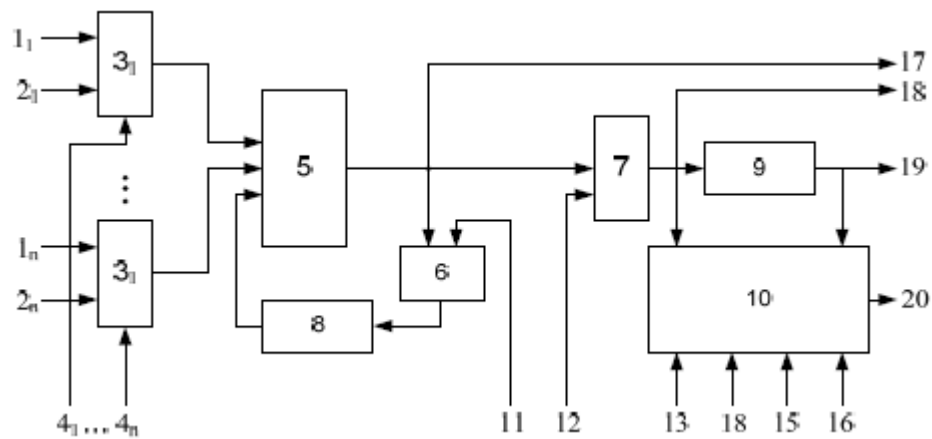


Рис. 1.13 Багаторозрядний цифровий пристрій для моделювання нейрона

В аналогових ПМН інформація представляється у вигляді рівня напруги. Таким представником слугує пристрій для відтворення передатної функції

нервової клітини(рис.1.14) [13] .

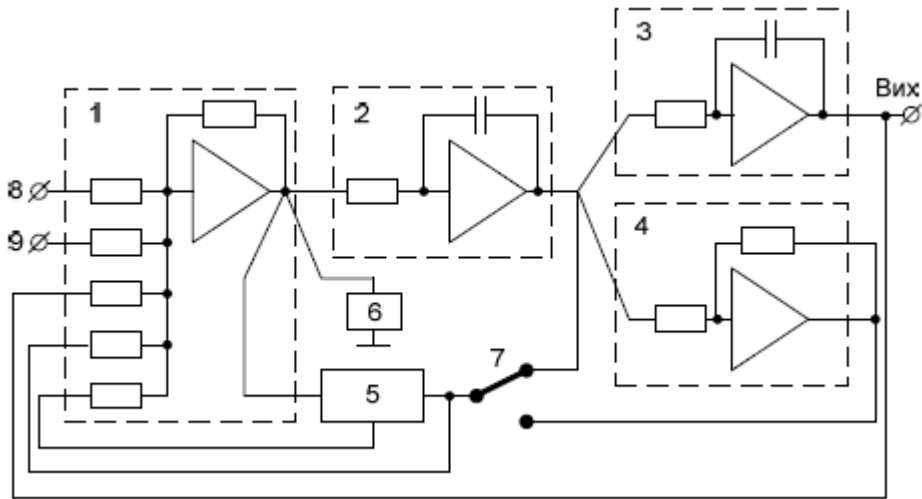


Рис. 1.14 Пристрій для відтворення передатної функції нервової клітини

Він включає в себе суматора 1, інтеграторів 2 і 3, інвертора 4, блока 5 множення, реле 6 з контактною групою 7, входів 8 і 9 та виходу. Основний елемент є операційний підсилювач, через це мають меншу точність, проте апаратно простіші за багаторозрядні цифрові. Незважаючи на це неможливо за рахунок аналогових ПМН будувати великомасштабні нейронні мережі.

За апаратною складністю

Найбільш поширеними є ПМН з частотно-імпульсною формою представлення інформації. Так як подібно до біологічних нейронів, інформація представлена імпульсами, а рівнем збудженості визначається частота. Їх класифікують за апаратною складністю на такі групи:

- Найскладніші – використовується цифрова елементна база (лічильник, тригери та ін.)
- Середньої складності – використовується аналогова елементна база (операційні підсилювачі компаратори тощо)
- Найпростіші – використовується нелінійні електроні чи оптоелектронні елементи (одно перехідний транзистор [14], лавинний

транзистор [15], тиристор [16], біспін-прилад [17], тригер Шмідта на МДН-транзисторах [18]).

Розглянемо ПМН [8], , що складається (рис. 1.5) одно перехідний транзистор 1, біполярний транзистор 2, резистори 3-6, резистор навантаження 7, конденсатори 8-10, діоди 11-12. Активним елементом є одно перехідний транзистор 1, резистори 3, 5 і 7 забезпечують заданий режим роботи, збуджувальний 13 і гальмівний 14 входи містять діоди 11, 12 і ланцюги часового підсумовування, які складаються з резисторів 6, 4 і конденсаторів 10,9. .

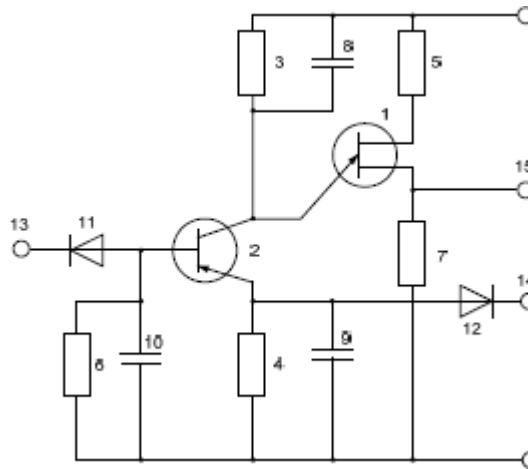


Рис. 1.15 Пристрій для моделювання нейрона на одноперехідному транзисторі

Недоліком цього класу пристроїв є використання електричних входів та виходів та низька навантажувальна спроможність.

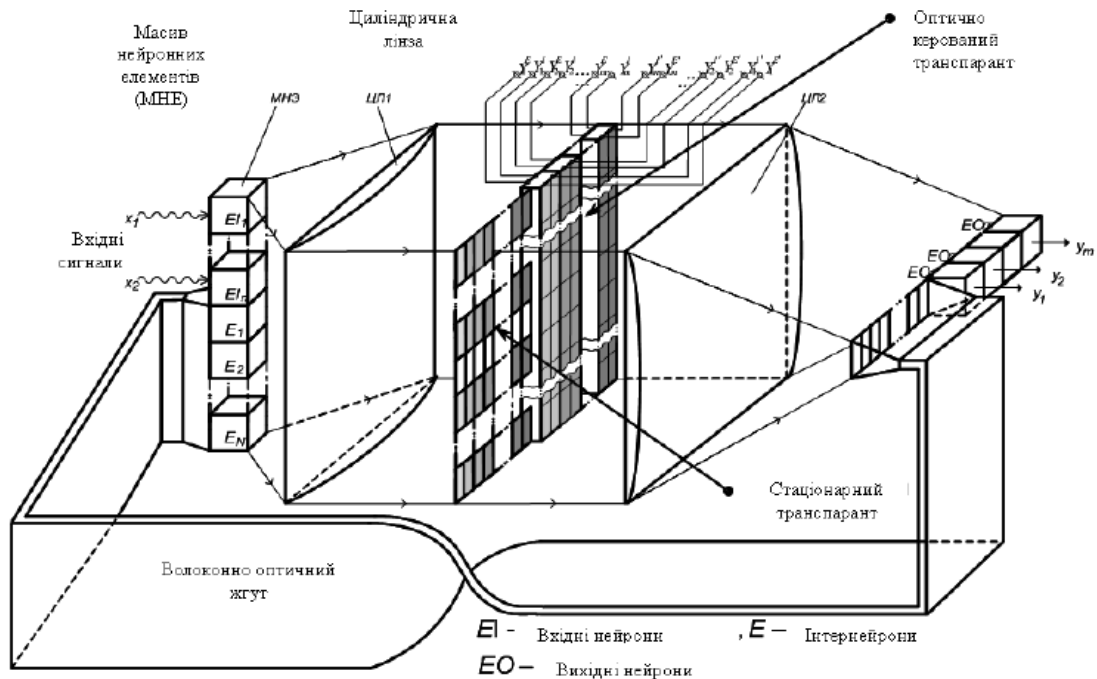


Рис. 1.16 Структура імпульсної мережі на основі оптоелектронної елементної бази

Також є більш вдосконалена схема імпульсної нейронної мережі [19] з використанням оптоелектронної елементної бази (рис.1.16). Вона складається з n вхідних нейронних елементів $EI_1 \dots EI_n$, на які поступають вхідні сигнали $x_1 \dots x_n$, N інтернейронів $E_1 \dots E_N$, двох циліндрових лінз ЦЛ1 і ЦЛ2, транспаранта T (виконаного, наприклад, у вигляді фотопластини, коефіцієнти прозорості локальних ділянок якої відповідають значенням вагових коефіцієнтів зв'язку інтернейронів), оптично керованого транспаранту ОКТ із системою з $2m$ пар смугових вертикальних електродів, m вихідних нейронних елементів $EO_1 \dots EO_m$, волоконно-оптичного джгута ВОЖ з фоконами Φ_1 і Φ_2 . Транспарант T і ОКТ утворюють загальну матрицю вагів зв'язків всіх нейронів ІНМ.

Перевагою є використовується оптичний сигнал для організації зв'язків між сигналами, які можуть розташовуватись у трьох вимірах та працювати одночасно. А також за допомогою апаратних засобів без обчислювальних процедур можливе навчання і перенавчання.

Недоліком системи є наявність оптичних елементів, що значно збільшують вагу пристрою. А наявність циліндричних лінз збільшують об'єм та потребують потужного джерела випромінювання (лазер).

Необхідно враховувати декілька вимог при розробці імпульсної моделі нейрона:

- 1) Має бути функціонально адекватною біологічному нейрону;
- 2) Мати оптичні входи і виходи в разі використання оптичних вузлів;
- 3) Доцільно використати електричну ємність для інтегрування сигналів у нейроні;
- 4) Необхідно застосовувати пороговий пристрій
- 5) Має бути коло розряду ємності для формування вхідного імпульсу.

Імпульсна модель нейрона (рис.1.7) має фотоприймачі які використовуються в якості оптичних входів (збуджувальні та гальмівні). На ємності C інтегрується струм з оптичних входів. Передній фронт вихідного сигналу формуються при досяганні різниці потенціалів на пороговому пристрої. Тоді включається коло розряду ємності. Тривалість цього імпульсу залежить від параметрів розряду ємності. Світловипромінювач слугує оптичним виходом.

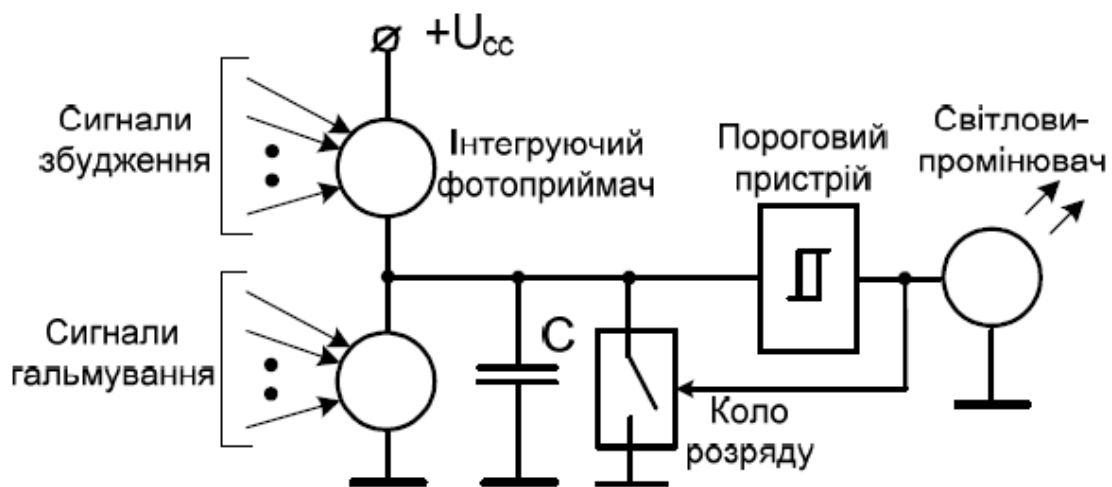


Рис. 1.17 Структурна схема реалізації імпульсної моделі нейрона

В якості порогового пристрою можна використати: напівпровідникові прилади з ділянкою від'ємного опору(тиристри, тунельні діоди біспін прилади) [20], та напівпровідникові прилади з пороговими властивостями (лавинний транзистор, стабілітрон).

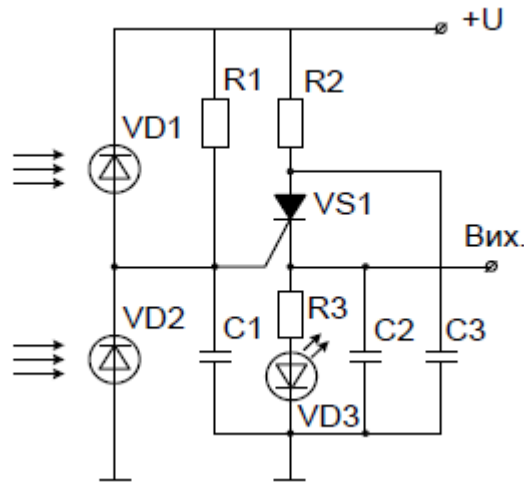


Рис. 1.18 Оптоелектронний імпульсний нейронний елемент на тиристорі

На рис.1.8 наведено схему пристрою. Пристрій працює таким чином [20]. Перший фотодіод VD1 приймає збуджувальні входні оптичні сигнали, які перетворюються фотодіодом в струм, що заряджає конденсатор C1, а гальмівні входні оптичні сигнали перетворюються фотодіодом VD2 в струм, що розряджає конденсатор C1. Напруга живлення тиристора менша напруги перемикавання при струмі керуючого електрода, що регулюється резистором R1 (в режимі очікування). Коли напруга на керуючому електроді тиристора під дією входних імпульсів досягне порогового значення (при даній напрузі живлення), тиристор відкривається, на резисторі R3 і світловиpromiнювачі VD3 створюється вихідний позитивний імпульс напруги, який надходить на вихід (світловиpromiнювач VD3 формує в цей час вихідний оптичний імпульс). Конденсатор C3 розряджається через відкритий тиристор, резистор R3 і світловиpromiнювач VD3, напруга на аноді тиристора зменшується і він закривається. Конденсатор C2, що зарядився

під час відкритого стану тиристора, розряджається через резистор R3 і світловипромінювач VD3, формуючи задній фронт вихідного імпульсу. Після замикання тиристора конденсатор C3 заряджається від джерела напруги через резистор R2 до початкового значення, моделюючи фазу пониження збудження (відносна рефрактерність).

Завдяки наявності оптичних входів та виходів даний нейроелемент може легко використовуватись при побудові імпульсних нейронних мереж з великою кількістю елементів та зв'язків між ними. Організація великої кількості оптичних зв'язків реалізується набагато простіше, ніж електричних зв'язків за допомогою оптичних та голографічних засобів. Крім того, завдяки тому, що тиристор може перемикати великі струми, як світловипромінювач VD3 може використовуватись кілька паралельно з'єднаних світлодіодів або напівпровідникових лазерів. Це дає змогу навантажувати нейроелемент на цілий рядок або стовпчик матриці світлодіодів або напівпровідникових лазерів, що спрощує структуру побудови великих нейронних мереж, де один нейрон повинен передавати свій вихідний сигнал на всі інші нейрони. Наявність в запропонованому нейроелементі крім збуджувальних також і гальмівних входів підвищує адекватність нейроелемента своєму біологічному прототипу та дозволяє організовувати нейронні мережі як з додатними, так і з від'ємними коефіцієнтами синаптичних зв'язків (що розширює функціональні можливості). Можливості даної моделі представлено в табл 1 [21]

Назва параметра	Позначення	Значення параметра
Діапазон вхідних оптичних потужностей [мВт]	$P_{min} \dots P_{max}$	0...20
Діапазон вихідних частот [кГц]	$f_{min} \dots f_{max}$	0...10
Тривалість переднього фронту вихідного імпульсу [мкс]	t_{01}	0,5
Тривалість заднього фронту вихідного імпульсу [мкс]	t_{10}	800
Тривалість вихідного імпульсу по рівню 0,1 [мкс]	τ_{90}	850...900
Тривалість вихідного імпульсу по рівню 0,5 [мкс]	τ_{50}	250
Питома споживана потужність [мВт]	$P_{C_{max}}$	360
Комутаційні втрати [мВт]	ΔP_K	155

Таблиця 2. Числові значення основних параметрів нейроелемента на тиристорі

Недоліки даної моделі:

1. Відмінність імпульсу від біологічного через наявність затягнутого заднього фронту
2. Особливо при великих значеннях сигналу виникає погана лінійність передатної характеристики
3. Нечутливість до низьких навантажень через появу паразитного струму
4. Великі комутаційні втрати
5. Великий час вимикання тиристора.

За наявності зворотного зв'язку

Більш узагальнена класифікація ІНС ділить їх на два класи (рис.1.19) в залежності від наявності зворотного зв'язку [1]. За відсутності зворотного зв'язку називають статичною, а при її наявності – динамічною (рекурентною).

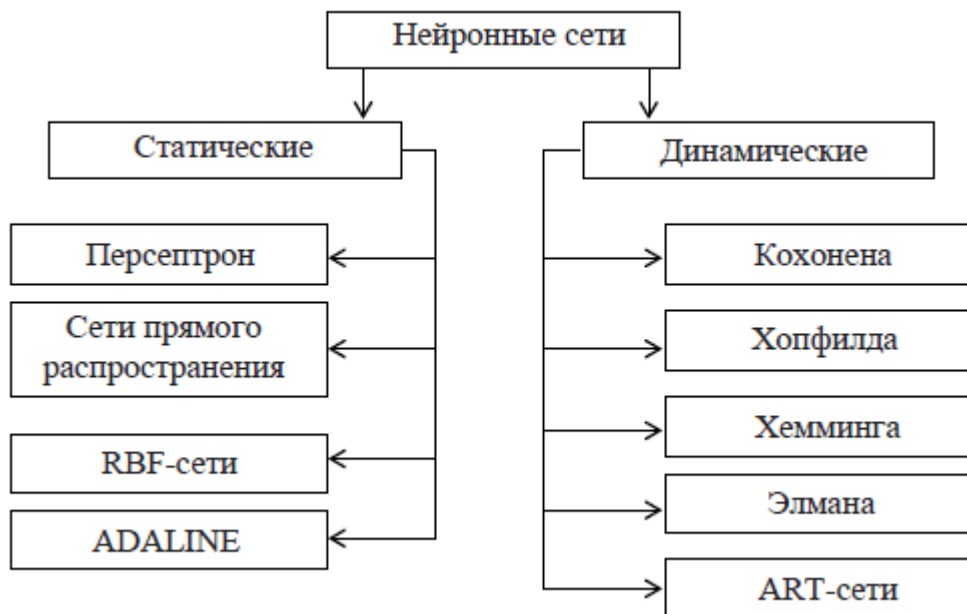


Рис. 1.19 Класифікація нейронних мереж

За технологією

Ще один принцип класифікації заснований на технології:

- Повноsv'язні: - кожен нейрон передає вихідний сигнал іншим нейронам та собі. Прикладом є мережа Хопфилда;
- Багатослойні – нейрони згрупповують у шари. Шар має нейрони з одним вхідним сигналом;
- Малопов'язані – нейрони розташовуються у прямокутних вузлах або гексальній решітці. Кожен нейрон пов'язані з декількома ближніми;
- Модульні (ядерні) – відносяться до класу прямого розповсюдження. Кожен нейрон наступного шару отримую сигнал від частини нейронів попереднього. Таким чином утворюються нейроні ядра.

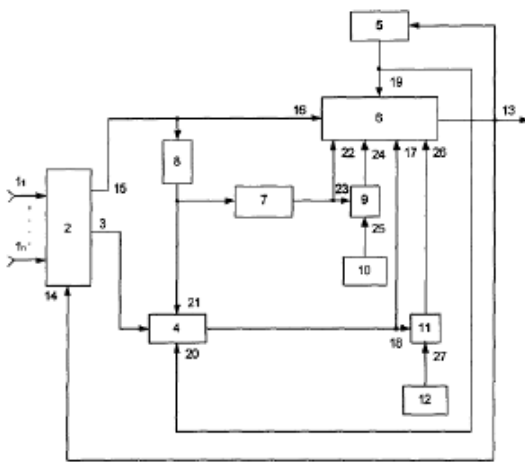
.

1.5 Патентний пошук

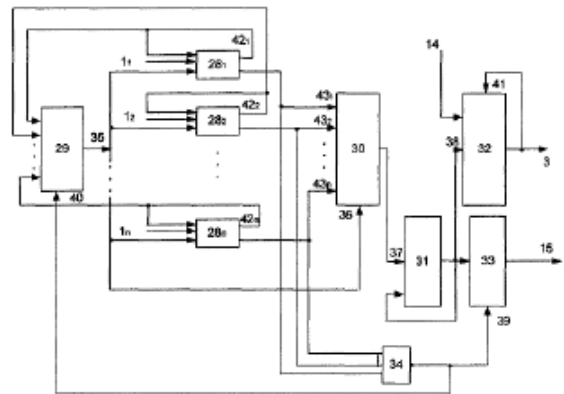
Розглянемо патенти на пристрої для моделювання нейрона України за останні 10 років.

Патент на корисну модель u200607119 [22]

У патенті наведено структурну схему (рис.1.13 а) пристрою для моделювання адаптивного нейрона, який містить n входів $1_1, \dots, 1_n$. Вони підключені до відповідних блоків:



Фіг. 1



Фіг. 2

Рис. 1.20 Пристрій для моделювання адаптивного нейрона

Блок 2 – просторово-часовий підсумовувач. Його вихід з'єднаний з блоком 4 – екстремального регулювання. Блок 5 – регульоване джерело енергії. Блок 6, 7 – функціональні перетворювачі. Блок 8 формує рівень дисбалансу енергії. Блок 9 – обчислює різницю. Блок 10 – задає діаметр аксонного горбика нейрона.

У блоці 2 (рис.1.12 б) блоки 28₁, ..., 28_n віднімання, блок 29 - порівняння, блок 30 - накопичення, суматор 31, блок 32 - порогового оброблення, селектор 33 та елемент АБО-НІ 34.

Пристрій працює наступним чином:

У блоці 2 підсумовуються вхідні сигнали з входів $11, \dots, 1n$ пристрою. Величина сумарної вхідної дії $x_{вх}$. Тоді рівень сигналу на його виході 3 характеризує рівень дисбалансу енергії. Блок 4 виконує пошук мінімум функції Q . У блоці джерела енергії 5 виробляються нейрони. Від рівень енергетичних витрат у цьому блоці залежить мінімум функції. Рівень дисбалансу енергії, обумовлений швидкістю зміни вхідної дії, впливає на блок. 4 та 7. Він впливає на функція Q та є параметром налаштування пошукового алгоритму.

Цей пристрій дозволяє відтворити вплив структурно-метаболических процесів у сомі нейрона на його функціональну активність. Що проявляється у вигляді функціональної зміни розмірів соми та аксонного горбика нейрона.

Патент на корисну модель u201002058 [23]

Пропонується функціональна схема моделювання нейрона.

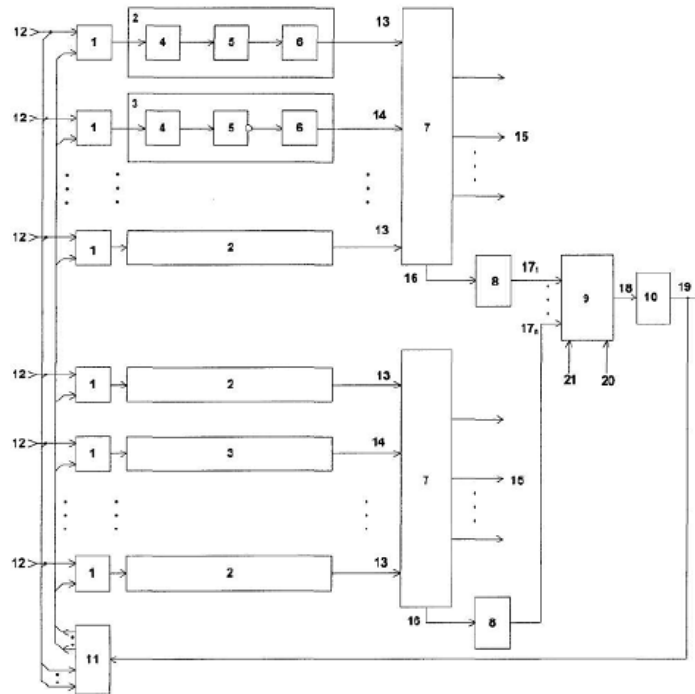


Рис. 1.21 Функціональна схема

Він містить керовані резисторні елементи 1, блок 2 – моделювання збуджуючих, а блок 3 – гальмівних синапсів. Ці блоки складаються з узгоджуючого підсилювача 4. Блок 5 накопичувальний елемент. Блок 6 – елемент синаптичної затримки. Блок 7 – моделювання дендритів. Блок 8- перетворювачі напруги в код. Блок 8 – перетворювач напруги в код. Блок 9 адаптивний суматор. Блок 10 формує вихідні імпульси. Блок 11 здійснює синхронізацію.

Працює наступним чином

На входи керованого резистора 1 подається сигнал у вигляді спайкової послідовності. У блоці сигнал масштабується за амплітудою в залежності від ваги синаптичного контакту. Далі передаються на входи блоків 2 і 3. Після цього подаються до блоку 5 через підсилювач 4. Таким чином змінюється форма, тривалість та знак і перетворюються в локальні постсинаптичні потенціали (ЛПСП). Проходячи через блок 6, затримуються на час синаптичної затримки. І надходять до блоку 7 моделювання дендритів. Переходять на перетворювач напруги 8 в код. Після чого подається у блок 9 адаптивного суматора. Після порогового підсумовування надходить до формувача вихідних імпульсів 10. У блоці 11 відбувається синхронізація разом з вхідними сигналами пристрою. Виходячи з співвідношення цих сигналів, керуючі сигнали змінюють опір керованих резисторів блока 1.

Патент на корисну модель u201008531 [24]

В даній моделі використовується:

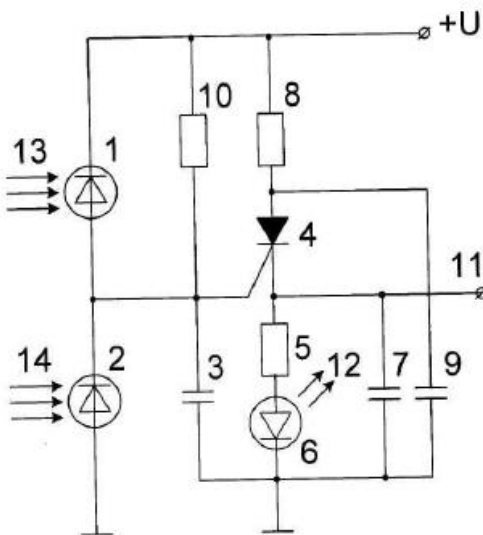


Рис. 1.22 Функціональна схема

Блок 1-2 фотодіоди, конденсатор 3 для просторово-часового підсумовування. Генератор імпульсів, що складається з блоку 4 тиристора та блоку 5 резистора. Блок 6 світловипромінювач. Блок 7 конденсатор в катодному ланцюзі. Блок 8 резистор. Блок 9 конденсатор в анодному ланцюгу. Блок 9 резистор для встановлення режиму роботи пристрою (очікування або фонові активності). Блок 11 та 12 слугують електричним та оптичним виходами відповідно. Блок 13 та 14 є збуджувальним та гальмівним входами пристрою.

Працює наступним чином.

З входу 13 приймаються збуджувальні сигнали фотодіодом 1, який перетворює сигнал у струм. Струм заряджає конденсатор 3. Фотодіод 2 приймає гальмівні сигнали й розряджає конденсатор 3. Резистор 10 регулює керуючий електрод. При досягненні порогового значення напруги тиристор 4 відкривається на резистор 5. Світловипромінювач 6 створює вихідний позитивний імпульс напруги на вихід 11 та оптичний імпульс на вихід 12. Конденсатор розряджається через блоки 4-6. Через зменшення напруги, тиристор 4 закривається. Конденсатор 7 за цей час зарядився і починає розряджатися через блок 5-6, що формує задній фронт вихідного імпульсу. Після замикання тиристора 4

конденсатор 9 заряджається від джерела напруги через резистор 8 до початкового значення, моделюючи фазу пониження збудження (відносна рефрактерність).

Преваги даної моделі:

- Наявність оптичних входів та виходів дає змогу використовувати велику кількість елементів та зв'язків між ними.
- В якості джерела світла 6 можна використовувати декілька паралельно з'єднаних світлодіодів або напівпровідникових лазерів.
- Наявність збуджувальних та гальмівних входів підвищує адекватність пристрою відносно свого біологічного прототипу та дають змогу розширити функціональні можливості.

Патент на корисну модель у 2011 15358 [25]

Запропонована схема на негатроні, що містить наступні блоки.

Блок 1 програмований одноперехідний транзистор. Катодний вихід якого з'єднаний з першим резистором 8 та світлодіодом 2. Блок 2 з'єднаний з джерелом живлення 7. Другий вихід блока 1 з'єднаний з джерелом живлення 6 через резистор 10 та з джерелом живлення 7 через підстроюваний резистор 9. Анодний вихід блока 1 з'єднаний з джерелом живлення 7 через конденсатор 3 та з фотодіодами 4 та 5. Блок 5 підключений до джерела живлення 7. Блок 4 5 підключений до джерела живлення 6.

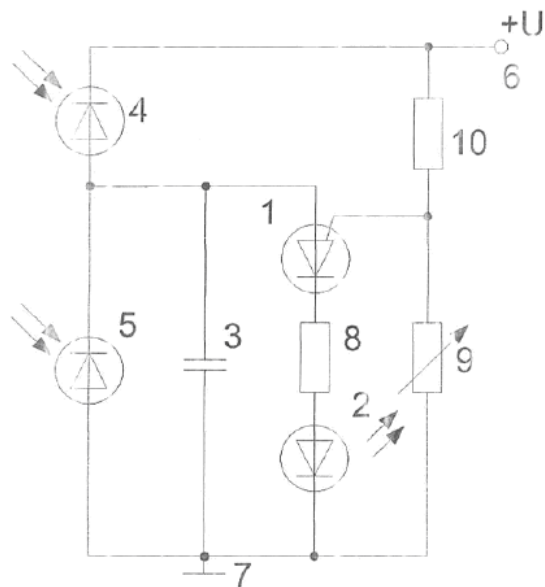


Рис. 1.23 Нейронний елемент на негатроні

Працює таким чином

Збуджувальні оптичні сигнали перетворюються фотодіодом 4 у струм. Таким чином заряджається конденсатор 3. Гальмівні оптичні сигнали перетворюються фотодіодом 5 у струм. Таким чином розряджається конденсатор 3. Транзистор 1 відкривається, коли напруга на аноді досягне порогового значення. Тоді конденсатор 3 розрядиться через транзистор 1. Резистор 8 та світлодіод 2 формує імпульс струму. Який світлодіод 2 формує в імпульс оптичного випромінювання. Після розряду конденсатора 3, транзистор 1 закривається.

Перевагами моделі є

- Можливість збільшити максимальну робочу частоту нейронного елемента
- Спрощення схема за рахунок меншої кількості елементів схеми
- Дозволяє керувати активацією нейрон змінюючи напругу

Патент на корисну модель и 2011 15321 [26]

У даному патенті наведено схему на негатроні.

Блок 1 одноперехідний транзистор. Він з'єднаний через світлодіод 2 з джерелом живлення 7 та з джерелом живлення 6. Його емітер поєднано через конденсатор 3 з живленням 7 та з фотодіодом 4 і 5. Блок 5 підключений до джерела живлення 7. Блок 4 підключений до живлення.

Пристрій працює так

Збуджувальні входні сигнали надходять до фотодіода 4 та перетворюються у струм, що заряджає конденсатор 3. Гальмівні сигнали перетворюються фотодіодом 5 та розряджає конденсатор. Одноперехідний транзистор відкривається, коли напруга досягає порогового значення на керуючому емітері. Конденсатор 3 розряджається через блок 1 та світлодіод 2. Так світлодіод 2 створює імпульс оптичного випромінювання. Після розряду конденсатора 3 транзистор 1 закривається й нейронний елемент повертається у режим очікування.

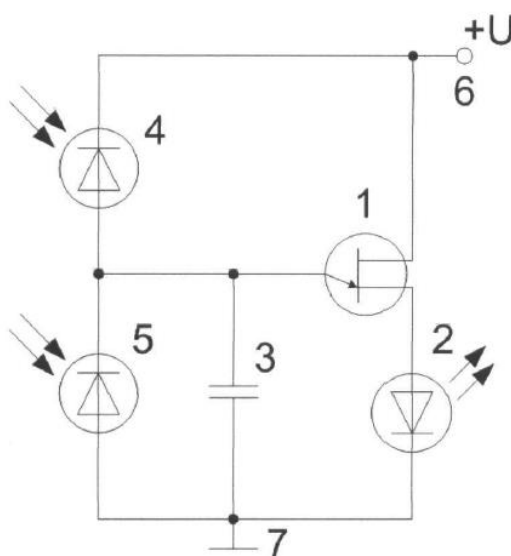


Рис. 1.24 Нейронний елемент на негатроні

У даному патенті пропонується схема на С-негатроні.

Блок 1 – конденсатор з'єднаний з джерелом живлення 6, другий вивід з клемою 2 та з негатроном 3, та з фотодіодами 4,5. Блок 5 підключений до негативного полюсу живлення 7. Блок 4 підключений до живлення 6. Інший вивід негатрона підключено до живлення 7.

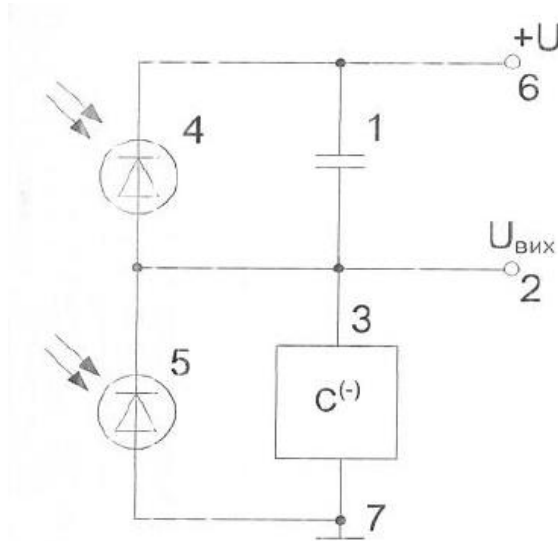


Рис. 1.25 Нейронний елемент на С-негатроні

Працює наступним чином

Збуджувальні вхідні сигнали надходять до фотодіода 4 та перетворюються у струм, що заряджає С-негатрон 3. Гальмівні сигнали перетворюються фотодіодом 5 й розряджають С-негатрон 3. Таким чином на клемі 2 відбудеться стрибкоподібна зміна потенціалу. Конденсатор 1 буде визначати нахил прямої навантаження.

Переваги наведеної схеми:

- Збільшення робочої частоти до 1 ТГц
- Спрощення схемотехнічної реалізації за рахунок меншої кількості елементів схеми

- Зменшення електроспоживання

Патент на корисну модель и 2012 07181 [28]

На Рис.1.26 зображено функціональну схему моделі нейрона.

Блок 1 конденсатор, Блок 2 стабілітрон, блок 3 резистор, Блоки 4 та 5 фотодіоди, та блок 6 світловипромінювач.

Працює наступним чином

Фотодіод 4 приймаю збуджувальні сигнали а фотодіод 5 гальмівні. Конденсатор 1 заряджається від блока 4 та розряджається блоком 5. Коли напруга досягає значення достатнього для збудження в стабілітроні 2 процесу лавинного множення Вихідний електричний імпульс формується на резисторі 3, а вихідний оптичний імпульс світловипромінювачем 6.

Коли досягається поріг провідності блоку2 виникає імпульс напруги, який затухає при розряді блоку 1. Розрядження конденсатора 1 викликає запирання стабілітрона 2 і процес повторюється знов.

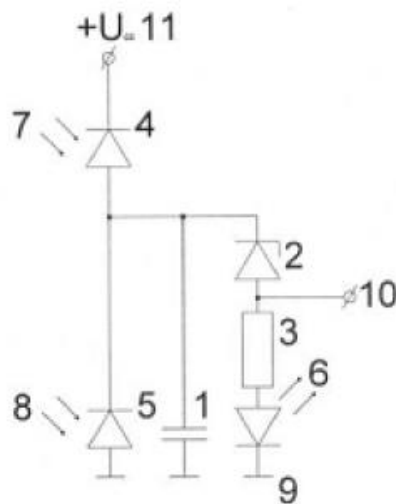


Рис. 1.26 Функціональну схему моделі нейрона

Патент на корисну модель и 2012 04433 [29]

В даному патенті наведено схему нейроелемента на R-негатроні.

Він містить блок 1 – фотодіод, що з’єднаний з блоком 2 фотодіодом та з джерелом живлення 7. Блок 2 з’єднано з джерелом живлення 8. До блоку 7 живлення підключено стік блоків 3 та 4 -польові транзистори (ПТ).

Витік блоку 3 з’єднано з витіком другого ПТ 4, а затвор транзистора з’єднаний зі стокам другого ПТ 4 та зі стоком третього ПТ 5. Витік блоку 5 підключено до витіка блока 6. Затвор блоку ПТ5 з’єднано з фотодіодом 2. До блоку 8 джерела живлення підключено стік блоку ПТ6. Затвор блоку ПТ6 з’єднано з стоком ПТ4. Блок 1 з’єднаний зі стоком третього ПТ 5 та з потенціальним виходом 9.

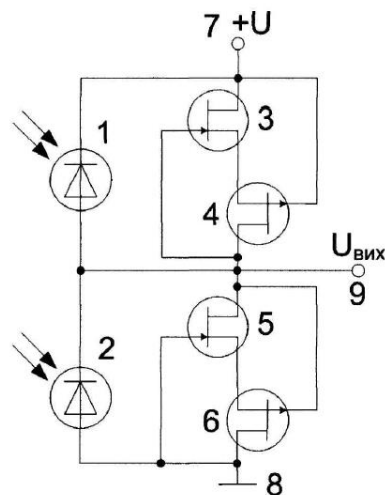


Рис. 1.27 Схему нейроелемента на R-негатроні.

Працює наступним чином.

Перший R-негатрон побудованому на блоках ПТ 5 та ПТ 6, другий R-негатрон побудованому на блоках ПТ 3 та ПТ 4.

Збуджувальні сигнали надходять до фотодіода 1. При досягнені порогового значення перший R-негатрон переходить у стан відсічки, що спричинить появу високого потенціалу. Гальмівні оптичні сигнали надходять до фотодіода 2. . При досягнені порогового значення другого R-негатрон переходить у стан відсічки, що спричинить появу низького потенціалу.

Даний патент описує схему нейроелемента на R-негатроні.

Пристрій містить блок 1 – фотодіод, з'єднаний з блоком 2 фотодіод та з блоком 7 джерело живлення. Блок 2 з'єднаний з блоком 8 – джерело живлення. Перший R-негатрон побудований на блоках 3,4, другий на блоках 5,6. Чотири польові транзистори об'єднані попарно, та кожна пара з'єднана з джерелом живлення(блок 7 та 8) та потенціальним виходом 9.

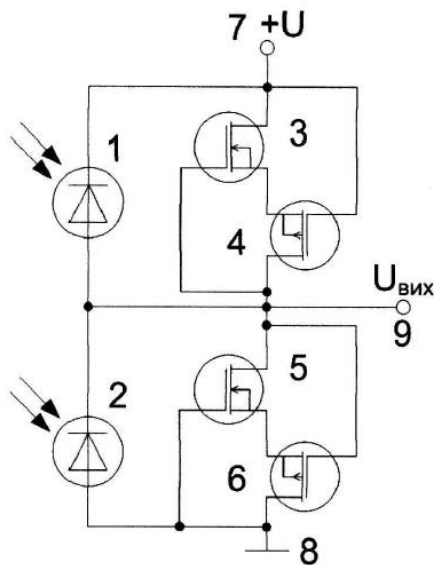


Рис. 1.28 Схему нейроелемента на R-негатроні.

Працює наступним чином:

Фотодіод 1 перетворює входні оптичні сигнали у струм. Коли струм досягає порогового значення, перший R-негатрон переходить у стан відсічки й з'являється високий потенціал на виході - блок 9. Аналогічно працює фотодіод 2 з гальмівним сигналом, в результаті утворюється низький потенціал в блоці 9.

Висновок до розділу 1

Висновки до розділу 1

1. Дослідження апаратних реалізацій показав, що сучасні нейрочипи досягли високої обчислювальної потужності та мають широкі перспективи

застосування у роботах, дронах, системах керування та у системах обробки інформації.

2. Найбільш розповсюдженими є електронні цифрові та аналогові нейрочипи компаній SpiNNaker . Головними недоліками цифрових нейрочипів є висока вартість та високе енергоспоживання, що зумовлене паралельною роботою великої кількості спеціалізованих цифрових процесорних ядер. Головними недоліками аналогових нейрочипів є обмежений діапазон сигналів, обмежена швидкість обробки даних та чутливість до електромагнітних завад.

3. Найбільш перспективними є фотонні нейрочипи або фотонні інтегральні схеми для реалізації нейронних мереж. Сучасні фотонні нейрочипи такі як Enlight256 мають високу ціну, складну конструкцію з використанням електронних компонентів. Тому вони не отримали широкого розповсюдження. Отже виникає потреба у створенні фотонної інтегральної схеми, яка має просту конструкцію, низку ціну та може бути застосована для апаратної реалізації нейронних мереж різного типу.

						<i>П091мн.000001.000 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Відм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			46

2. Фотонна інтегральна схема

2.1 Побудова фотонної інтегральної схеми

У програмованих фотонних інтегральних мікросхемах потік світла контролюється хвилеводами, з'єднаними в сітку за допомогою блоків 2×2 , або «аналоговими воротами». Мережеве підключення визначає можливі функції програмованої схеми та спосіб її налаштування. Деякі архітектури дозволяють довільні матричні операції і навіть можуть автоматично адаптуватися до мінливих проблем.

Така схема можна розділити на два класи: сітки прямого розповсюдження (світло перетікає з одного боку сітки на іншу), рециркулююча, де світло направляється петлями і навіть на вхідні порти.

В обох архітектурах використовуються однакові будівельні блоки: хвилеводи, з'єднувачі 2×2 та оптичні фазоперетворювачі, які утворюють аналогові оптичні затвори.

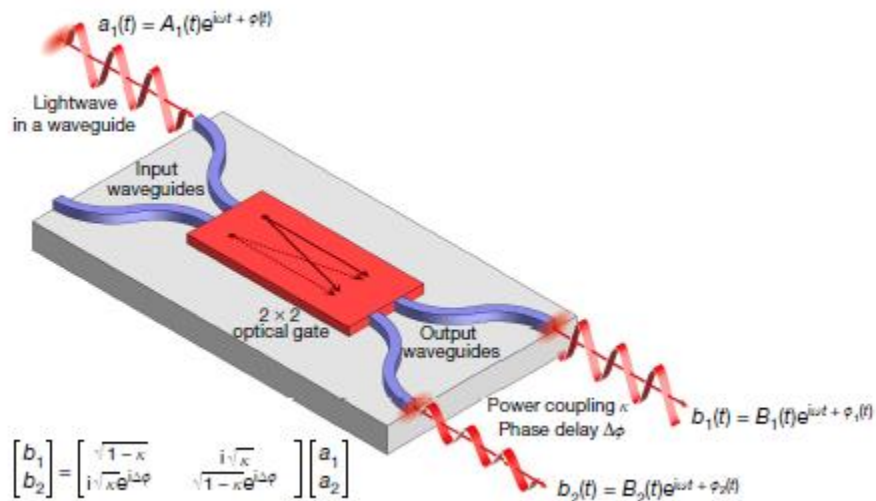


Рис. 2.1 оптичний затвор 2×2 зміщує модульовані оптичні хвилі a_1 і a_2 від двох вхідних хвилеводів, керуючи як силовою зв'язкою k , так і фазовою затримкою $\Delta\phi$ вихідних хвиль b_1 і b_2



Рис. 2.2 Альтернативний затвор

Оптичний затвор 2×2 проектує світло від двох вхідних хвилеводів на два вихідних хвилеводи як лінійну комбінацію, як показано на рис. 1. Альтернативний затвор 2×2 поєднує в собі керовану муфту і один фазозмінний

механізм (рис. 2). Ці ворота працюють для потоків світла як вперед, так і назад. Воріт 2×2 є ключовим будівельним блоком для різних архітектур сіток.

Розглянемо найбільш розповсюджену архітектуру сітки

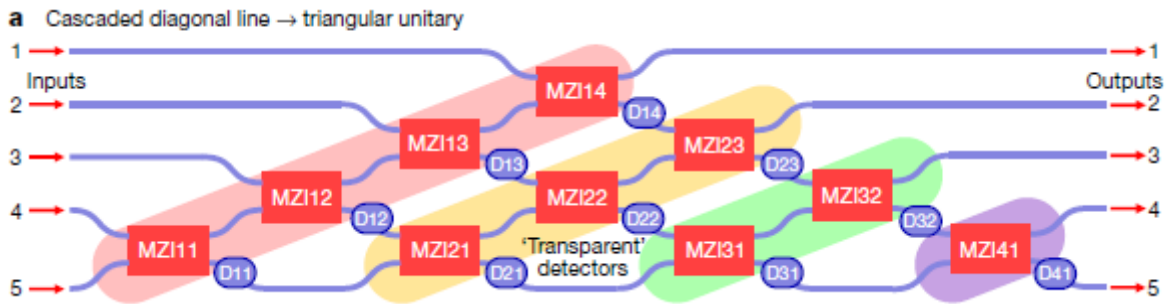


Рис. 2.3 Трикутні унітарні схеми 5×5 , що складаються з чотирьох діагональних ліній оптичних затворів 2×2 (MZI11 – MZI41) з прозорими фотодетекторами (D11 – D41) та одним вихідним хвилеводом.

У сітчастих мережах, де світло розповсюджується лише в одному напрямку, втручається у ворота 2×2 на кожному етапі. Ця архітектура дозволяє просте прогресивне налаштування - наприклад, засноване на мінімізації або максимізації потужності на фотодетекторах - і в деяких випадках самостійно налаштовується на конкретні проблеми та самостабілізує свою роботу.

На малюнку 3 показаний приклад простої сітки з п'ятьма хвилеводами, що входять у трикутну сітку з «діагональними лініями». Коли когерентне світло вводиться у вхідні хвилеводи, p_1 і p_2 можна послідовно регулювати так, що пучки в нижньому вихідному хвилеводі повністю відключаються.

На рис. 3 ми налаштовуємо MZI11, щоб мінімізувати потужність детектора D11, направляючи все світло у верхній вихідний хвилевід. Ми повторюємо це для MZI12, MZI13 та MZI14, таким чином поєднуючи все світло від хвилеводів 1–5 у вихід 1. Цей самоконфігуруючий алгоритм працює для будь-якої комбінації амплітуд та фаз у вхідних хвилеводах, і його можна запускати у повторюваному циклі для адаптації в режимі реального часу до різних входів.

Серцем програмованої схеми є фотонний чіп, який може бути виготовлений на різних технологічних платформах. Для розміщення великої кількості будівельних блоків вони повинні бути компактними, тому найбільш перспективними є платформи, що мають високий коефіцієнт заломлення. Наприклад, фотоніка кремнію^{1,46}, фотоніка нітриду кремнію⁴⁷ та фосфід індію PICs². Втрати оптичного хвилеводу складають близько 50% загасання на 3–30 см залежно від матеріалів та якості обробки.

В даний час більшість технологій РІС підтримують лише один шар оптичних хвилеводів, обмежуючи з'єднання в одній площині і даючи за своєю суттю двовимірні архітектури.

Програмовані хвилеводні сітки можуть бути сконфігуровані для виконання будь-якого лінійного перетворення, виконуючи роль оператора матриці, який виконує обчислення в режимі реального часу за короткий час, необхідний світлу для проходження ланцюга. Такі операції є ключовими у штучних нейронних мережах, тому програмований ПІК може діяти як прискорювач для штучного інтелекту та глибокого навчальні програми.

Розроблено апаратний прискорювач фотон (який ми називаємо "ядром фотонного тензора"), здатний виконувати багато паралельних операцій матрично-векторного множення при оптичних швидкостях передачі даних для обробки зображень із використанням фільтрів згортки. Відхиляючись від електронних прискорювачів (див. Рис. 4), фотонний процесор реалізує вбудований в мікросхему матричний механізм множення. Також здатний виконувати паралельні операції множення-накопичення з використанням ількох довжин хвиль.

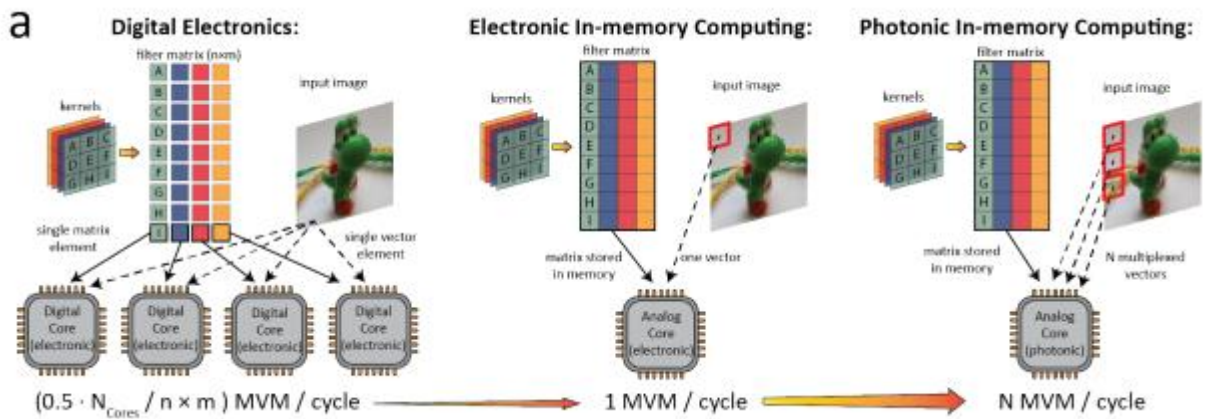


Рис. 2.4 Порівняння цифрової та аналогової електронних архітектур з архітектурою ядра фотонного тензора. Цифрова електроніка (ліворуч) вимагає безлічі послідовних кроків обробки, розподілених між кількома ядрами для обчислення операцій згортки зображення, тоді як ціле матрично-векторне множення може бути виконане за один крок, використовуючи аналогові електронні обчислення в пам'яті (в центрі). Фотонні обчислення в пам'яті приносять мультиплексування довжини хвилі як додатковий ступінь свободи, що дозволяє здійснювати кілька операцій матрично-векторне множення за один часовий крок.

Ключовим для цього підходу є кодування даних зображення на окремі зубці гребінця частотної гребінця на мікросхемі, а потім кодування фіксованих згорткових ядер в енергонезалежній конфігурації (тобто аморфної або кристалічної фази)

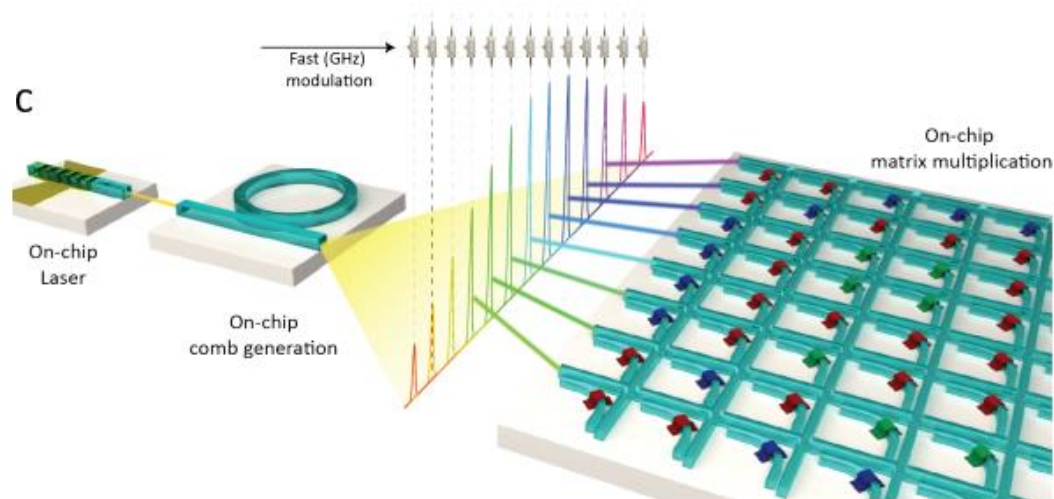


Рис. 2.5 Концептуальна ілюстрація повністю інтегрованої фотонної архітектури для обчислення операцій згортки. Вбудований лазерний насос прокачує вбудований солітонний мікрокомбінат SiN для створення ширококутової частотної гребінця. Окремі гребінчасті зубці, які утворюють вхідні вектори, модулюються на високих швидкостях, помножуються на матрицю енергонезалежних комірок пам'яті із фазовою зміною і підсумовуються вздовж кожної колонки на фотодетекторі.

Цей підхід мінімізує як затримку, так і переміщення даних, використовуючи енергонезалежні фотонні MAC-операції в пам'яті, і значно зменшує вартість фотоніки шляхом мультиплексування обчислень в одному і тому ж фотонному ядрі

2.2 Технологія виробництва фотонних інтегральних схем

Так як розміри елементів в проекті малі, було прийнято рішення використовувати літографію при виготовленні пластин для приймального, випромінювального блоків та для блоку з діафрагмами.

На Рис.2 показано етапи процесу створення чіпу.

Перш за все для створення будь-якого блоку необхідно мати основу. В нашому випадку для виготовлення приймального та випромінювального блоків будемо використовувати кремнієву основу. (Рис.2.7 п.1)

Наступним кроком треба нанести певний шар скла (SiO_2), яке і буде виконувати роль пластин. Для цього будемо використовувати вакуумне напилення (приклад приладу наведено на Рис.2.6 (Рис.2.7 п.2))



Рис. 2.6 Пристрій вакуумного напилення

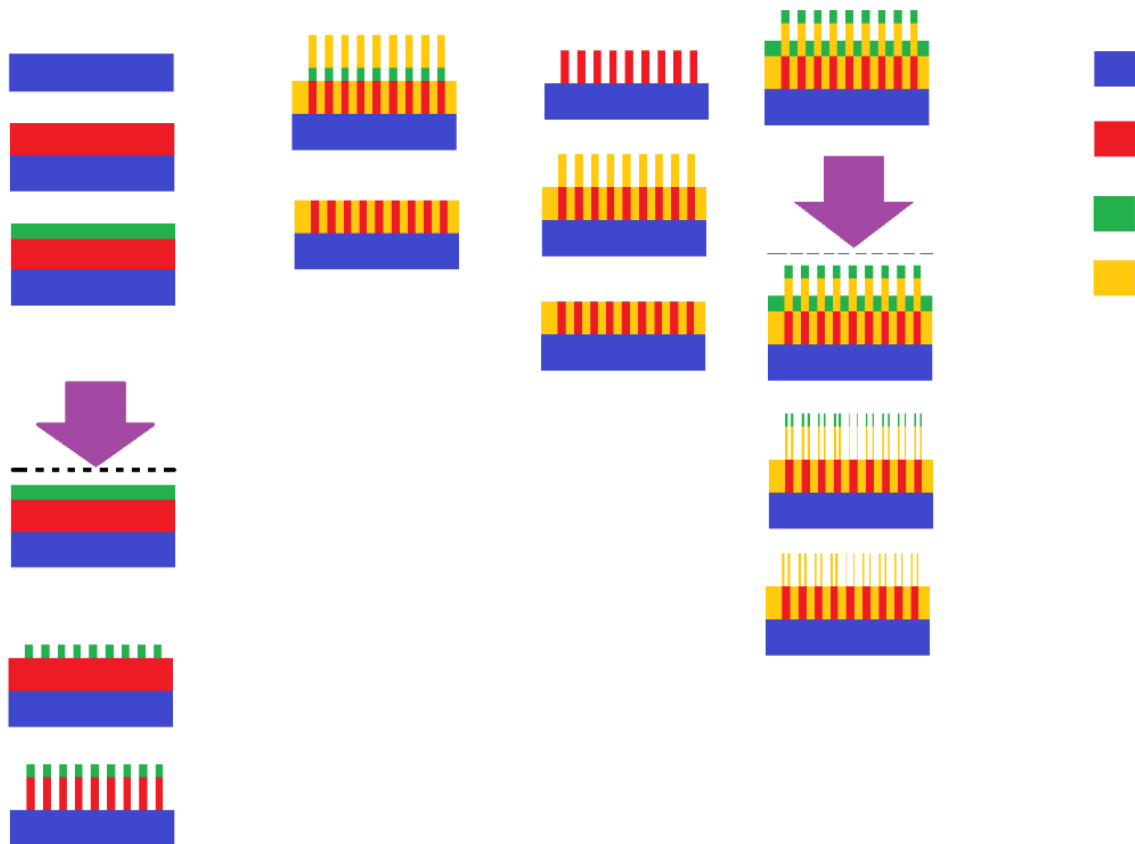


Рис. 2.7 Етапи процесу створення чіпу

Далі за допомогою спін-коатера (Рис.2.8) нанесемо праймер та фоторезист. Фоторезист буває двох видів: позитивний (при прояві залишається та частина, яка була засвічена) та негативний (при прояві залишається те, що було не засвічено). (Рис.2.7 п.3)



Рис. 2.8 Спін-коатер для нанесення плівок

Далі необхідно освітити необхідні частини. (Рис.2.7 п.4) Для цього треба використати літографічну установку.

Після експонування необхідно проявити фоторезист. Для цього використовують спеціальні хімічні рідини для певного фоторезисту. (Рис.2.7 п.5)

Наступним кроком треба протравити зайве скло за допомогою плазми (Рис.2.7 п.6). Прилад за допомогою якого можна це зробити показаний на Рис.2.9



Рис. 2.9 Прилад для плазмо-хімічного травлення

Далі розділимо процес на дві частини: перша – для створення пластин, а друга – для створення пластин і діафрагм.

Розглянемо перш частину. Для створення пластин можна іти двома шляхами. Перши шлях: за допомогою приладу вакуумного напилення (Рис.1) наносимо шар металу (наприклад, алюмінію) (як показано на Рис.2.7 п.7). Далі прибираємо фоторезист з алюмінієм поверх нього за допомогою ацетону або проявника, поклавши зразок на декілька хвилин у розчин (Рис.2.7 п.8).

Другий шлях: Прибираємо фоторезист, який залишився, за допомогою ацетону або того ж самого проявника, залишивши наш зразок на декілька хвилин у розчині (Рис.2.7 п.9). Наносимо шар металу (Рис.2.7 п.10) і за допомогою шліфування отримаємо результат який показаний на Рис.2.7 п.11

Частина два. Повторюємо п.9 та п.10. Поверх металу наносимо фоторезист негативний (Рис.2.7 п.12)

Використовуючи запроповану літографічну установку, проекспонуємо фоторезист використавши шаблон з діафрагмами. (Рис.2.7 п.13)

Наступний крок проявка (Рис.2.7 п.14) та травлення металу за допомогою приладу показаного на Рис.2.9 Результат показаний на Рис.2.7 п.15

Отже, в результаті виконання всіх показаних кроків, можна отримати два блоки: один з пластинами для приймального блоку, а інший з пластинами для випромінювального блоку з нанесеними діафрагмами.

2.3 Оптична літографічна система для виробництва фотонних інтегральних схем.

Одна з найскладніших технологічних задач у створенні нейроморфних чипів є створення матриці діафрагм, для задання вагових коефіцієнтів. Оскільки кожна з діафрагм має не перевищувати 120мкм. Для цієї задачі необхідно розробити літографічну установку.

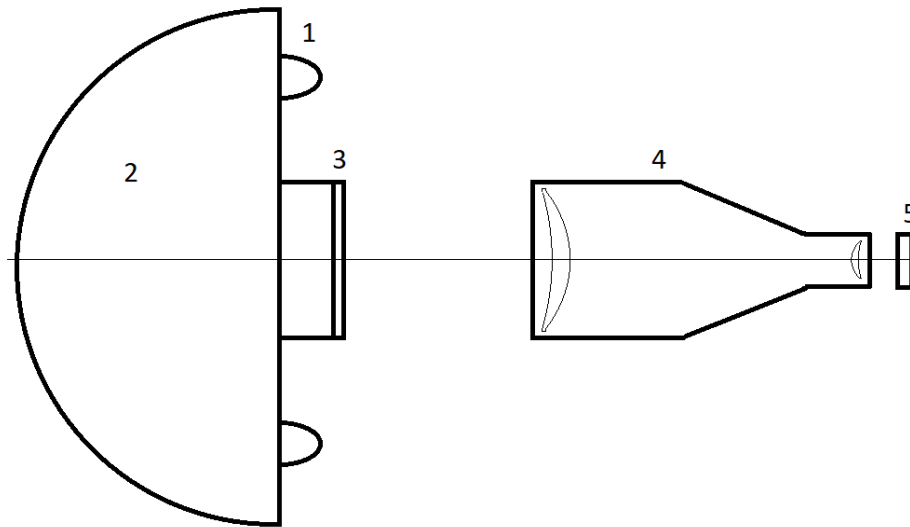


Рис. 2.10 Схема літографічної установки

Система складається з наступних елементів:

- Джерела випромінювання – 1
- Напівсфера – 2
- Стійка з шаблоном – 3
- Телецентрична система – 4
- Стійка з опромінювальним зразком – 5

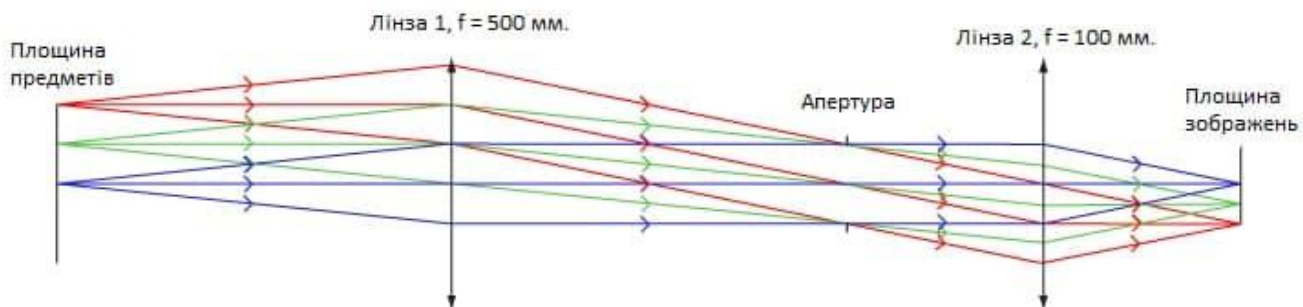


Рис. 2.11 Оптична схема літографічної установки

Принцип роботи полягає в наступному: Світло від джерел випромінювання (1) надходить в напівсферу (2), де багато разів відбивається від внутрішньої поверхні напівсфери. Потім світло виходить рівномірним потоком через вихідну зіницю напівсфери (3). Шаблон знаходиться у вихідній зіниці, який заходиться в передній вокальній площині першої лінзи телецентричного об'єктива (4). Після проходження через цю лінзу промені ідуть паралельно. В задній фокальній площині першої лінзи та передній фокальній площині другої лінзи знаходиться діафрагма, яка обмежує проходження кутових променів в системі. Після проходження другої лінзи об'єктива, промені фокусуються у задній фокальній площині цієї лінзи, де знаходиться опромінюваний зразок (5).

Перевагою такої установки є її ціна та швидкість експонування (якщо використовувати лазерний станок для експонування, процес експозиції може зайняти декілька годин, а то і днів, в залежності від кількості необхідних засвітів та якості експозиції).

2.4 Технічне завдання

Необхідно проаналізувати вихідні дані вказані у технічному завданні:

Кількість нейронів	128
Матриця ШИН	256×256
Ширини робочої області шин	120 мкм
Ширина шин	140 мкм
Відстані між шин	10 мкм
Період шин	150мкм=0,15нм

Розмір ФІС	256×0,15=38,4мм
	Розмір 40×40 мм
	Діагональ 58мм=D`
видиме або кутове збільшення	0,2х
межа дифракційного просторового розділення	2 мкм
Необхідні габарити ОС	2000мм
	L=1200мм
Телецентрична система	
Довжина хвилі	470 мкм

Висновок до розділу 2

Головний висновок – для виготовлення фотонної інтегральної схеми (ФІС) необхідна оптична літографічна система (ОЛС). Сформульоване технічне завдання для ОЛС.

3. Оптична літографічна система для виготовлення фотонних інтегральних схем

3.1 Габаритний розрахунок

1.1 Розрахунок фокусних відстаней об'єктива - f'_1 та окуляра - f'_2

Для розрахунку фокусних відстаней використовують систему рівнянь :

$$\begin{cases} f'_2 + f'_1 = L; \\ \frac{f'_1}{f'_2} = |\beta|. \end{cases} \quad \begin{cases} f'_2 + f'_1 = 600; \\ f'_2 = 0,2 \cdot f'_1 \end{cases} \quad \begin{cases} f'_1 = 500; \\ f'_2 = 100 \end{cases}$$

1.2 Знайдемо діаметр польової діафрагми D_{no} , скориставшись наступною формулою

$$D_{no} = 2f'_1 \operatorname{tg}(G')$$

G' - половина кута поля зору, знаходимо через числову апертуру NA'

$$NA = n_1 \times \sin(G')$$

Числова апертура в свою чергу знаходиться через роздільну здатність d

$$d = \frac{\lambda}{2n \cdot \sin(G')}$$

$$\sin(G) = \frac{\lambda}{2nd} = \frac{0.47}{2 \cdot 2}$$

$$NA = 0.1175$$

$$\tan(G') = \frac{\sin G'}{\cos G'} = \frac{\sin G'}{\sqrt{1 - \sin^2 G'}} = \frac{0.1175}{\sqrt{1 - 0.1175^2}} = 0.1183$$

1.3 Знаючи NA' знайдемо NA

$$NA = \beta \times NA' = 0.0235$$

1.4 Розрахунок світлового діаметра

$$D_1 = D' + 2 \times f'_1 \times \tan(G') = 58 + 2 \times 100 \times 0.1183 = 81.66 \approx 82 \text{ мм}$$

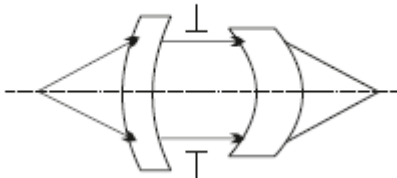
$$D_2 = D' / \beta + 2 \times f_2 \times \tan(G) = 5.58 + 2 \times 500 \times \tan(G) = 290 + 23.66 = 313.66 \approx 314 \text{ мм}$$

3.2 Пошук варіантів структури ОС

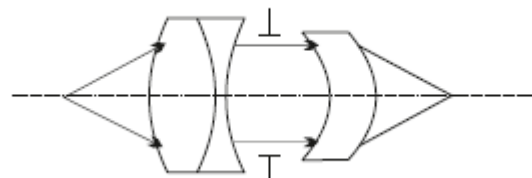
Розглянемо декілька варіантів:

Лінзові системи

Дволінзова система



Трьохлінзова система



Дослідимо найпростішу структурну запропоновану систему, проведемо абераційний аналіз. У випадку не виконання технічного завдання розглянемо наступну схему.

3.3 Розрахунок дволінзової системи

Візьмемо скло ТФ5. Для розрахунку радіусів використаємо наступну формулу:

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

Звідси виразимо r_2

$$r_2 = \frac{(n-1)f r_1}{(n-1)f - r_1}$$

Для лінзи1 задамо $r_1 = 350$ мм, тоді $r_2=4321$

Для лінзи2 задамо $r_1 = -1000$ мм, тоді $r_2=-70,78$

Для лінзи1 задамо $r_1 = 350$ мм, тоді $r_2=4321$

3.4 Оптимізація системи

Так як розміри вхідної зіниці великі (314мм), то було прийнято рішення зробити абераційний аналіз та оптимізацію спочатку кожного компонента окремо, а потім їх поєднати.

Лінза 1

Так як предмет знаходиться в передньому фокусі лінзи 1, то для аналізу перевернемо систему.

Параметри системи, оптична схема та точкова діаграма до оптимізації показані на рис.1, рис.2, рис.3

№ пов.	Тип поверхні	Радус X	Радус Y	Товщина	Середовище	Висота	Конічний коеф. X	Конічний кс
Предмет	<input type="checkbox"/> Стандартна		Нескінчен.	Нескінчен.		0,000000		0,000
1(АД)	<input type="checkbox"/> Стандартна		Нескінчен.	0,000000		157,000000		0,000
2	<input checked="" type="checkbox"/> Стандартна		-4321,000000	35,000000	ТФ5	157,000000		0,000
3	<input type="checkbox"/> Стандартна		-350,000000	488,546252 M		157,010498		0,000
Зображ.	<input type="checkbox"/> Стандартна		Нескінчен.	0,000000		76,521519		0,000

Задня фокусна відстань: 486,819 Діаметр вхідної зіниці: 314 Збільшення: 0 Загальна товщина: 523,55 Помилки немає.

Рис. 3.1 Параметри системи до оптимізації

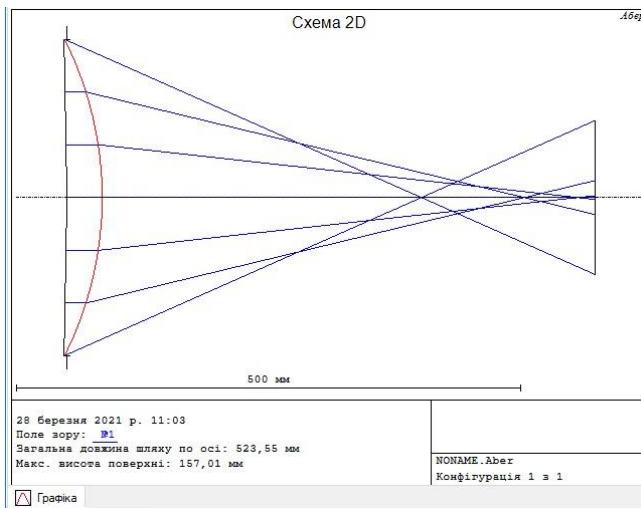


Рис. 3.2 Оптична схема до оптимізації

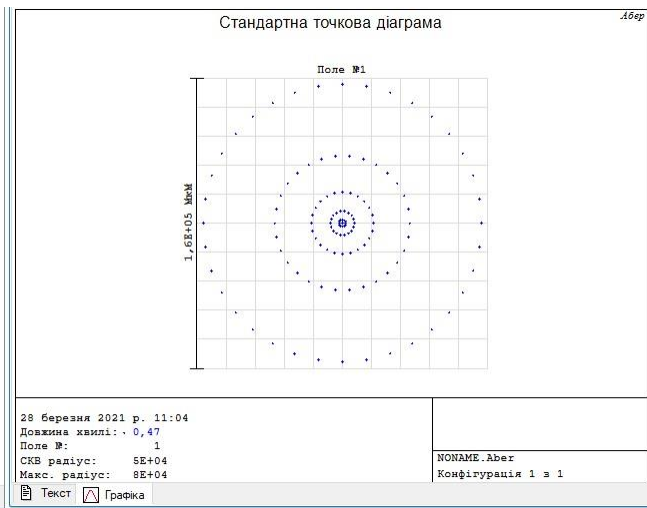


Рис. 3.3 Точкова діаграма до оптимізації

Для оптимізації зробимо перший радіус змінним, другий прив'яжемо до оптичної сили компоненту для того, щоб фокус був не змінним, також, дистанцію від лінзи до об'єкту прив'яжемо до фокальної відстані. Зробимо оптимізацію.

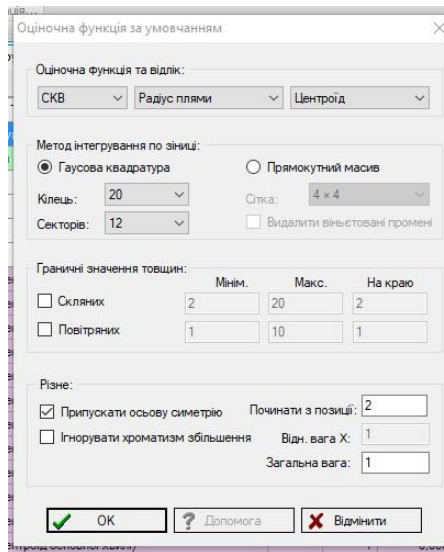


Рис. 3.4 Параметри оптимізації

Редагувати		Регулятор						
№ пов.	Тип поверхні	Радіус X	Радіус Y	Товщина	Середовище	Висота	Кінчний коеф. X	Кінчний коеф. Y
Предмет	<input type="checkbox"/> Стандартна		Нескінчен.	Нескінчен.		0,000000		0,000000
1(АД)	<input type="checkbox"/> Стандартна		Нескінчен.	0,000000		157,000000		0,000000
2	<input checked="" type="checkbox"/> Стандартна		370,793587 V	35,000000	ТФ5	157,000000		0,000000
3	<input type="checkbox"/> Стандартна		7343,081938 X	479,328826 M		156,642378		0,000000
Зображ.	<input type="checkbox"/> Стандартна		Нескінчен.	0,000000		10,942383		0,000000

Рис. 3.5 Параметри оптичної системи після першої оптимізації

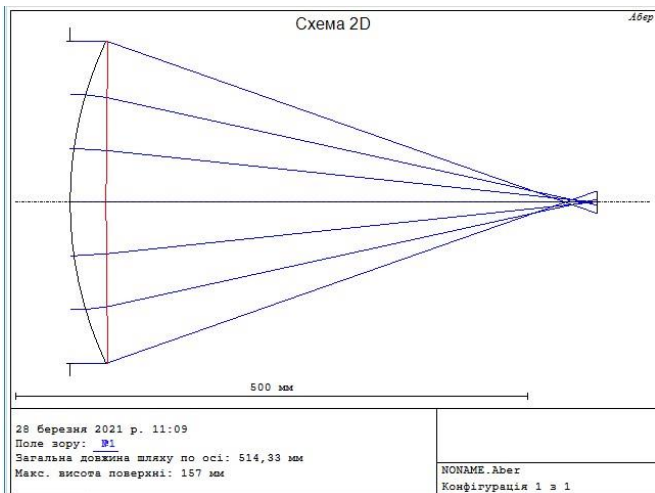


Рис. 3.6 Оптична система після першої оптимізації

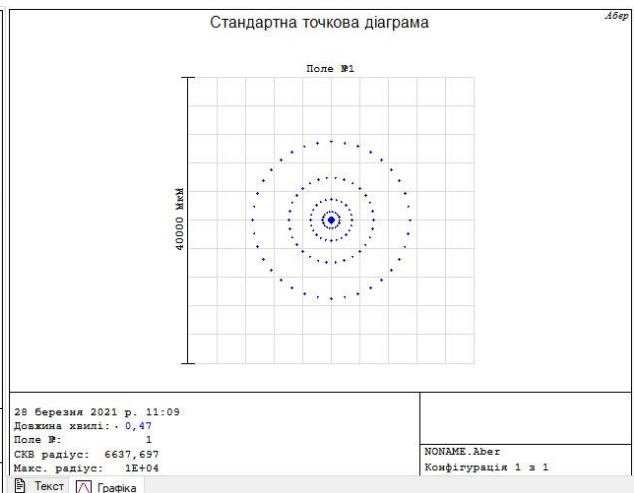


Рис. 3.7 Точкова діаграма після першої оптимізації

Введемо змінні кінчні коефіцієнти для двох радіусів та проведемо ще один крок оптимізації. Параметри оптимізації залишимо не змінними.

Редагувати		Регулятор						
№ пов.	Тип поверхні	Радіус X	Радіус Y	Товщина	Середовище	Висота	Кінчний коеф. X	Кінчний коеф. Y
Предмет	<input type="checkbox"/> Стандартна		Нескінчен.	Нескінчен.		0,000000		0,000000
1(АД)	<input type="checkbox"/> Стандартна		Нескінчен.	0,000000		157,000000		0,000000
2	<input checked="" type="checkbox"/> Стандартна		233,549810 V	40,000000	ТФ5	157,000000		-0,316096 V
3	<input type="checkbox"/> Стандартна		539,232441 X	462,493220 M		155,278575		0,015545 V
Зображ.	<input type="checkbox"/> Стандартна		Нескінчен.	0,000000		6,2883E-006		0,000000

Рис. 3.8 Параметри оптичної системи після другої оптимізації

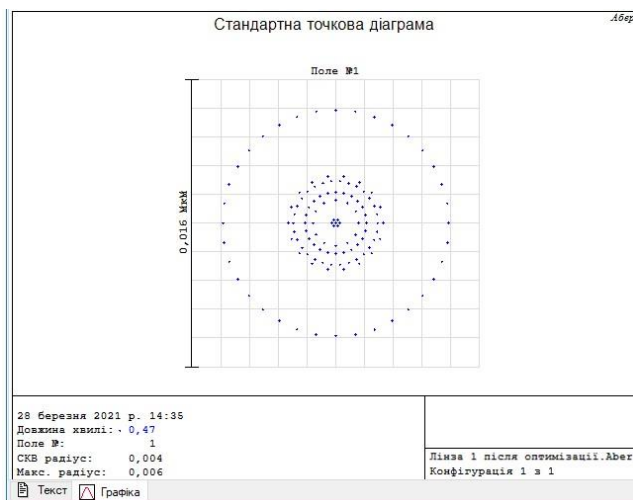


Рис. 3.9 Оптична система після другої оптимізації

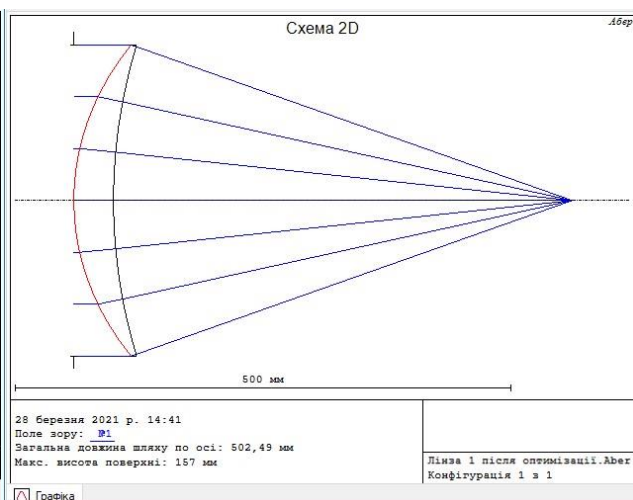


Рис. 3.10 Точкова діаграма після другої оптимізації

Отримані параксіальні параметри лінзи 1 показані на рис. 3.11

Кардинальні параметри:

Довжина хвилі, [мм]	F, [мм]	F', [мм]	Sf, [мм]	S'f', [мм]	Sh, [мм]	S'h', [мм]
0,47000	-500,00000	500,00000	-516,24476	462,49322	-16,24476	-37,50678

Рис. 3.11 Параксіальні параметри лінзи 1

Лінза 2

Тепер перейдемо до аналізу

Параметри системи, оптична схема та точкова діаграма до оптимізації показані на рис.12, рис.13, рис.14

Редагувати		Регулятор							
№ пов.	Тип поверхні	Радіус X	Радіус Y	Товщина	Середовище	Висота	Конічний коеф. X	Конічний кс	
Предмет	<input type="checkbox"/> Стандартна		Нескінчен.	Нескінчен.		0,000000		0,000	
1(АД)	<input type="checkbox"/> Стандартна		Нескінчен.	0,000000		41,000000		0,000	
2	<input checked="" type="checkbox"/> Стандартна		-1000,000000	20,000000	ТФ5	41,000000		0,000	
▶ 3	<input type="checkbox"/> Стандартна		-70,780000	97,677245	M	0,000000		0,000	
Зображ.	<input type="checkbox"/> Стандартна		Нескінчен.	0,000000		0,000000		0,000	

Задня фокусна відстань: 96,8291 Діаметр вхідної зіниці: 82 Збільшення: 0 Загальна товщина: 117,68 Помилки немає

Рис. 3.12 Параметри системи до оптимізації

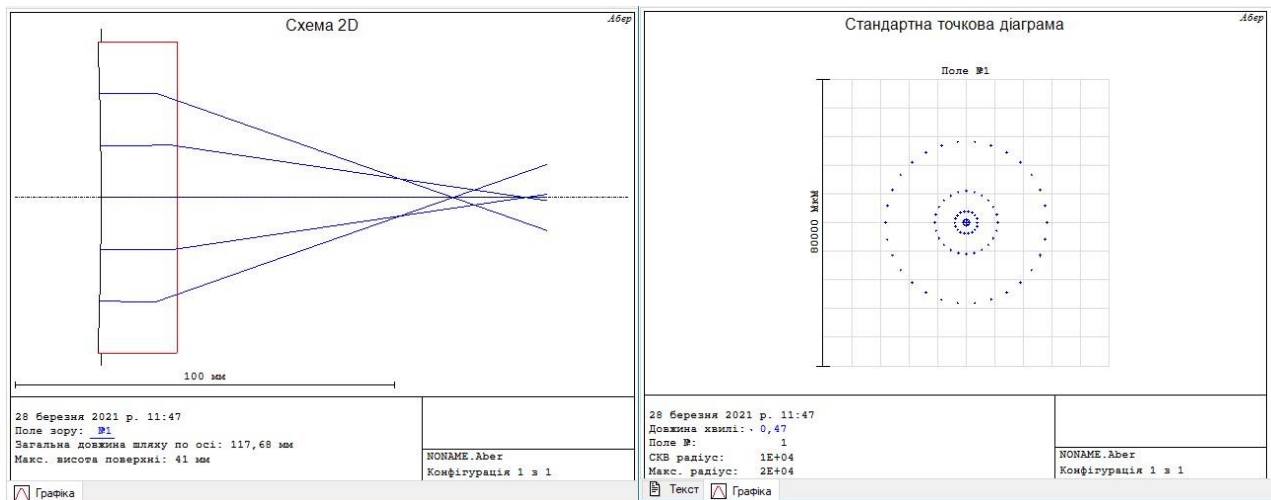


Рис. 3.13 Оптична схема до оптимізації

Рис. 3.14 Точкова діаграма до оптимізації

Для оптимізації зробимо перший радіус змінним, другий прив'яжемо до оптичної сили компоненту для того, щоб фокус був не змінним, також, дистанцію від лінзи до об'єкту прив'яжемо до фокальної відстані. Зробимо оптимізацію.

Оціночна функція за умовчанням

Оціночна функція та відлік:
 СКВ | Радіус плями | Центроїд

Метод інтегрування по знічці:
 Гаусова квадратура | Прямокутний масив

Кільць: 3 | Стка: 4 x 4

Секторів: 6 | Видалити вильєтовані промені

Граничні значення товщин:
 Скляних | Міним. 2 | Макс. 20 | На краю 2
 Повітряних | 1 | 10 | 1

Різане:
 Припускати осьову симетрію | Починати з позиції: 2
 Ігнорувати хроматизм збільшення | Відн. вага X: 1
 Загальна вага: 1

OK | ? Допомога | X Відмінити

Рис. 3.15 Параметри оптимізації

Редагувати		Регулятор							
№ пов.	Тип поверхні	Радіус X	Радіус Y	Товщина	Середовище	Висота	Кіничний коеф. X	Кіничний коеф. Y	
Предмет	<input type="checkbox"/> Стандартна		Нескінчен.	Нескінчен.		0,000000		0,000000	
1(АД)	<input type="checkbox"/> Стандартна		Нескінчен.	0,000000		41,000000		0,000000	
2	<input checked="" type="checkbox"/> Стандартна		76,110005 V	20,000000	ТФ5	41,000000		0,000000	
3	<input type="checkbox"/> Стандартна		2881,982059 X	88,490736 M		38,787420		0,000000	
Зображ.	<input type="checkbox"/> Стандартна		Нескінчен.	0,000000		5,494119		0,000000	

Рис. 3.16 Параметри оптичної системи після першої оптимізації

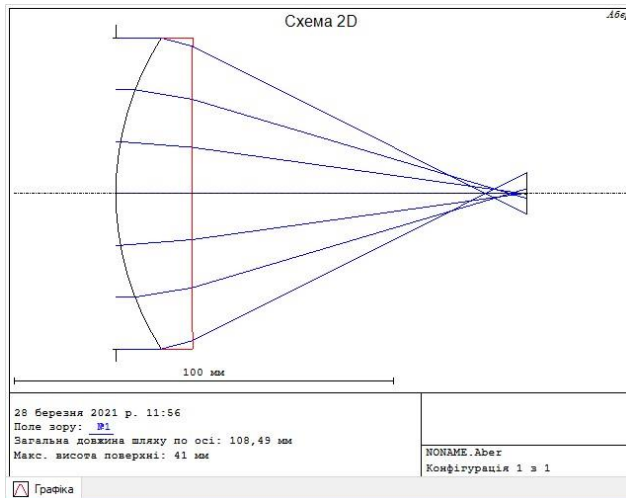


Рис. 3.17 Оптична система після першої оптимізації

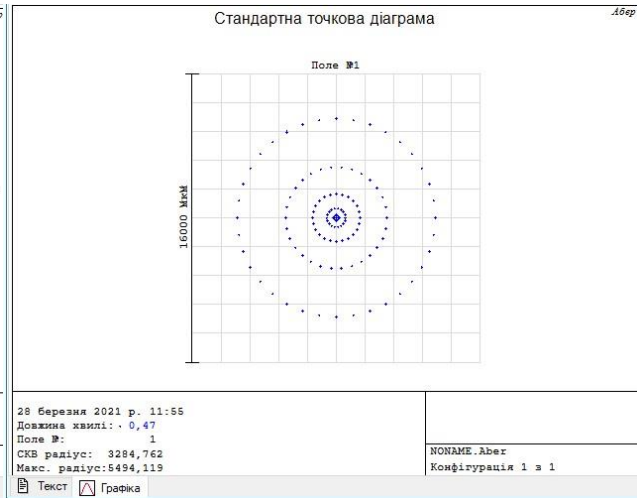


Рис. 3.18 Точкова діаграма після першої оптимізації

Введемо змінні кінчні коефіцієнти для двох радіусів та проведемо ще один крок оптимізації. Параметри оптимізації замінемо.

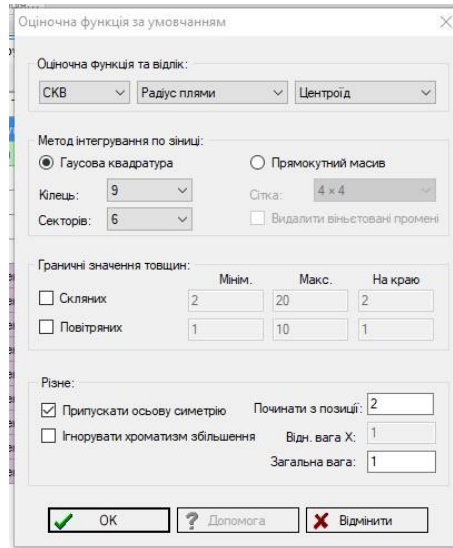


Рис. 3.19 Параметри оптимізації

№ пов.	Тип поверхні	Радіус X	Радіус Y	Товщина	Середовище	Висота	Кінчний коеф. X	Кінчний коеф. Y
Предмет	<input type="checkbox"/> Стандартна		Нескінчен.	Нескінчен.		0,000000		0,000000
1(АД)	<input type="checkbox"/> Стандартна		Нескінчен.	0,000000		41,000000		0,000000
2	<input type="checkbox"/> Стандартна		51,135893 V	15,002681 V	ТФ5	41,000000		-0,319829 V
3	<input type="checkbox"/> Стандартна		129,612188 X	87,150024 M		39,936322		0,123815 V
Зображ.	<input type="checkbox"/> Стандартна		Нескінчен.	0,000000		7,3921E-005		0,000000

Рис. 3.20 Параметри оптичної системи після другої оптимізації

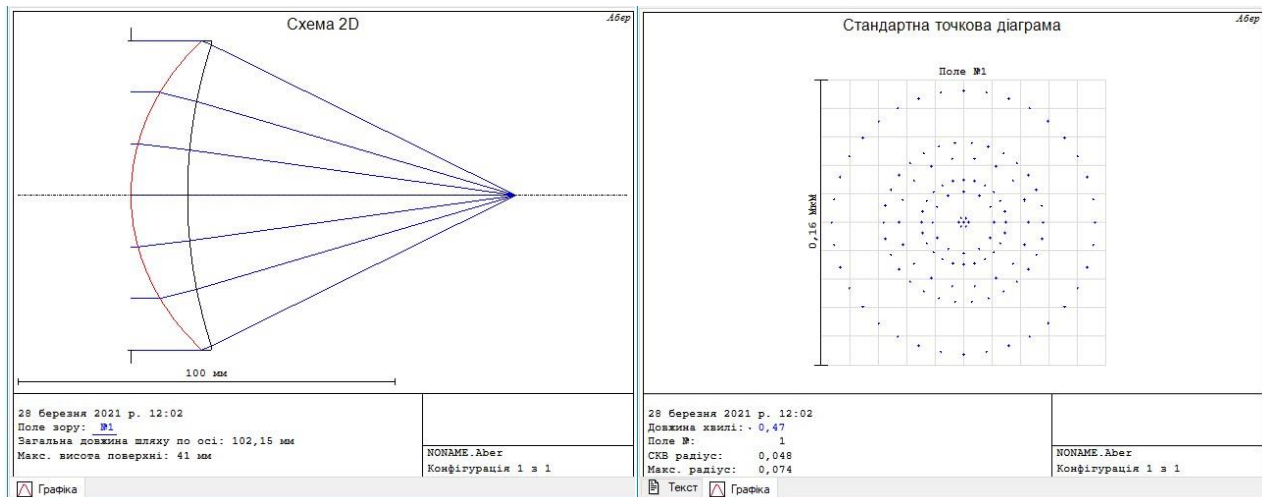


Рис. 3.21 Оптична система
після другої оптимізації

Рис. 3.22 Точкова діаграма
після другої оптимізації

Отримані параксіальні параметри лінзи 2 показані на Рис.2.23

Кардинальні параметри:						
Довжина хвилі, [мкм]	F, [мм]	F', [мм]	Sf, [мм]	S' f', [мм]	Sh, [мм]	S' h', [мм]
0,47000	-100,00000	100,00000	-105,06970	87,15002	-5,06970	-12,84998

Рис. 3.23 Параксіальні параметри лінзи 2

Компонування

Скомпонуємо систему.

Редагувати		Регулятор							
№ пов.		Тип поверхні	Радіус X	Радіус Y	Товщина	Середовище	Висота	Конічний коеф. X	Конічний коеф. Y
Предмет	<input type="checkbox"/>	Стандартна		Нескінчен.	462,493220		0,000000		0,000000
1(АД)	<input type="checkbox"/>	Стандартна		Нескінчен.	0,000000		157,000000		0,000000
▶ 2	<input type="checkbox"/>	Стандартна		-539,232441	40,000000	ТФ5	157,000000	U	0,015545
3	<input type="checkbox"/>	Стандартна		-233,549810	516,244760		152,151309		-0,316096
4a	<input type="checkbox"/>	Стандартна		Нескінчен.	105,069700		12,000000	U	0,000000
5	<input type="checkbox"/>	Стандартна		51,135893	15,002681	ТФ5	41,000000	U	-0,319829
6	<input type="checkbox"/>	Стандартна		129,612188	87,150024		41,000000	U	0,123815
Зображ.	<input type="checkbox"/>	Стандартна		Нескінчен.	0,000000		0,000000		0,000000

Рис. 3.24 Параметри об'єктива

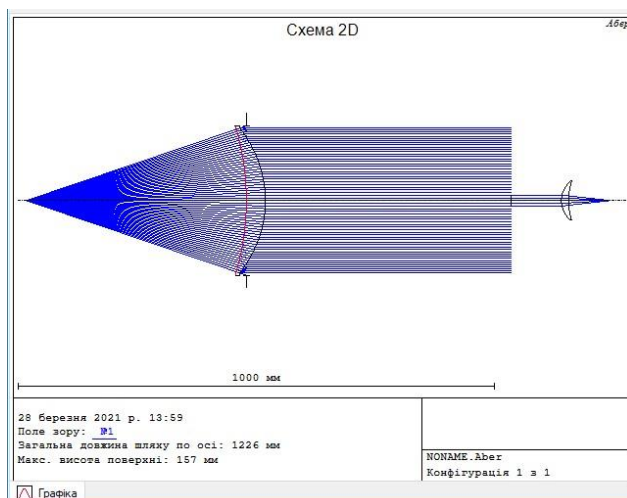


Рис. 3.25 Оптична схема
об'єктива

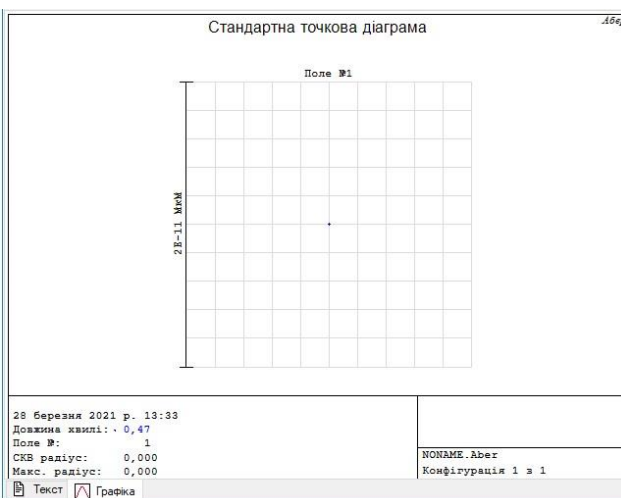


Рис. 3.26 Точкова діаграма

Отже як бачимо з графіку, після оптимізації ми значно покращили систему, зменшивши скв від 3284,762 до майже 0.

3.5 Визначення освітленості у площині оптичної інтегральної схеми в оптичній літографічній системі.

Розрахунок діаметра напівсфери.

Напівсфера формує рівномірний вхідний потік. Тому, вихідний діаметр напівсфери повинен бути рівним або більшим за діаметр вхідної зіниці об'єктива. Тому, використовуючи [13] можна порахувати діаметр внутрішньої поверхні напівсфери:

$$\frac{D_A}{D} = 0.2 \div 0.3 \quad (3.1)$$

де D_A – вихідний діаметр напівсфери;

D – внутрішній діаметр напівсфери.

З (3.1) знайдемо діаметр напівсфери:

$$D = \frac{D_A}{0.2} = \frac{314}{0.2} = 1570 \text{ (мм)}$$

Кількість джерел випромінювання повинна бути не парною та не меншою за 3. В цій роботі будемо використовувати 3 джерела випромінювання.

3.6 Енергетичний розрахунок

Вихідні параметри:

- Коефіцієнт відбиття поверхні сфери: $\rho = 0,9$;
- Розміри матриці: 4,608 x 3,84 мм;
- $\Delta t = 0,02$.

Led параметри

- Марка: GN1-50BUBC-50
- λ : 470нм
- 2θ : 30°
- I: 2500-3000 мКд

Розрахуємо яка освітленість формується на виході з напівсфери. Для цього скористаємося [13, 14].

Розглянемо формування освітленості внутрішньої поверхні інтегральної поверхні. Нехай від джерела випромінювання у сферу попадає елементарний монохроматичний потік $d\Phi_0$, який у точці М освітлює деяку область dA_M (Рис.3.16).

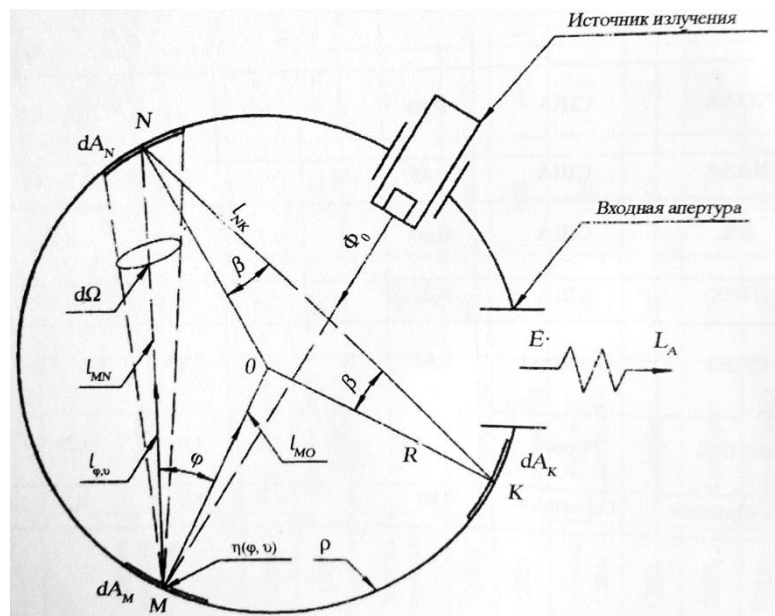


Рис. 3.27 Формування вихідного яскравісного поля дифузного випромінювача

Використаємо формулу для розрахунку освітленості інтегруючої сфери:

$$E_{\Sigma} = \frac{\rho \Phi_0}{4\pi R^2} \cdot \frac{1}{1-\rho} = \frac{\Phi_0}{A} \cdot \frac{\rho}{1-\rho}$$

Для напівсфери формула набуде вигляду:

$$E_{\Sigma} = \frac{2\Phi_0}{A} \cdot \frac{\rho}{1-\rho}$$

Визначення коефіцієнта пропускання оптичної системи.

При проходженні світлового потоку через оптичну систему, частина світла витрачається на відбивання, поглинання та розсіювання. Кількість світла, що пройшло через систему, характеризується коефіцієнтом пропускання. Для непросвітлених поверхонь, його визначають за формулою:

$$\tau = 0,99^d \cdot 0,96^{Kp} \cdot 0,95^{\Phi_l} \cdot 0,93^{3k}$$

де d – сумарна товщина оптичних деталей вздовж оптичної осі ; K_p и Φ_l - число поверхонь, із крона і флінта відповідно; Z_k - кількість дзеркальних поверхонь Для просвітлених поверхонь:

$$\tau = 0,99^d \cdot 0,98^{Z_{вн}} \cdot 0,99^{Z_{вн}} \cdot 0,93^{Z_k}$$

де $Z_{вн}$ - кількість зовнішніх поверхонь, $Z_{вн}$ - кількість внутрішніх поверхонь

Відповідно до оптичної системи об'єктива $d = 55 \text{ мм}$, $\Phi_l = 2$. Тоді отримаємо :

$$\tau = 0,99^{5,5} \cdot 0,96^0 \cdot 0,95^2 \cdot 0,93^0 = 0,853$$

Приймаємо $\tau = 85\%$.

Визначимо коефіцієнт пропускання оптичної схеми об'єктива τ_{np} з просвітленими поверхнями: зовнішні поверхні – одношарове 43Р і внутрішні – багатошарове 44Р.43Р. В цьому випадку, якщо кількість зовнішніх поверхонь дорівнює 2, а внутрішніх 2

$$\tau_{np} = 0,99^{5,5} \cdot 0,98^2 \cdot 0,99^2 \cdot 0,93^0 = 0,89$$

Приймаємо, $\tau = 89\%$.. Це говорить про те, що просвітлення поверхонь деталей оптичної схеми збільшило пропускання світла на 4%.

Розрахуємо світловий потік від одного світлодіоду

Для знаходження Φ_0 скористаємось наступною формулою:

$$\Phi_0 = I_e \times \Omega$$

Щоб знайти I_e треба перейти від

$$I_e = I_v / (K \times V) \quad K = 683$$

V з графіку дорівнює 0,1

$$I_e = 2,5 / (683 \times 0,1) = 0,037 \text{ Вт/ср}$$

Знайдемо тілесний кут

$$\Omega = S / R^2$$

S - площа сфери $S = 2\pi Rh$

$$\Omega = 2\pi h/R$$

Розглянутий прямокутний прямокутник ΔOAB

Знайдемо OB

$$OB = OA \times \cos\theta = R \times \cos\theta$$

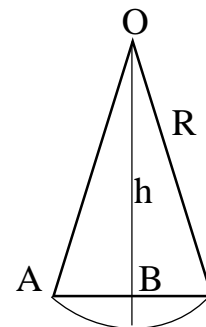
$$OC = R = OB + BC = OB + h$$

$$h = R - OB = R - R \times \cos\theta = R(1 - \cos\theta)$$

Підставимо в h

$$\Omega = \frac{2\pi R(1 - \cos\theta)}{R} = 2\pi(1 - \cos\theta)$$

$$\Phi_0 = I_e \times 2\pi(1 - \cos\theta) = 683 \times 2\pi(1 - \cos 30) = 537$$



Далі розрахуємо який потік буде на виході з системи:

$$E_{\text{вих}} = E_{\text{вх}} \cdot \tau = E_{\Sigma} \cdot \tau = \frac{2n\Phi_0}{A} \cdot \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \tau \quad (3.21)$$

n -кількість світлодіодів

Підставимо вихідні дані та отримаємо освітленість на виході з системи:

$$\lambda = 470 \text{ нм} \quad E_{\text{вих}} = \frac{2n\Phi_0}{A} \cdot \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \tau = \frac{2n \cdot 537}{\pi \cdot 0,01} \cdot \frac{0,9}{1-0,9} \cdot 0,89 = 2\,729,65n$$

3.7 Математична модель формування зображення у оптичній літографічній системі

Проаналізуємо зображення, яке дає запропонована літографічна установка, за допомогою графіків ФРЛ та МПФ.

Розподіл інтенсивності в площині зображень від квазіодновимірного предмету можна записати так:

$$S(\eta'_x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\eta_x) \cdot h(\eta'_x - \eta_x, \eta'_y - \eta_y) d\eta'_x d\eta'_y = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\eta'_x, \eta'_y) d\eta'_y \cdot$$

Зображення квазіодновимірного предмету може бути знайдено з наступного виразу:

$$I'(\eta'_x) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\eta_x) \cdot S(\eta'_x - \eta_x) d\eta_x = I(\eta_x) \otimes S(\eta_x).$$

На рис. приведені зображення ФРЛ запропонованої літографічної установки.

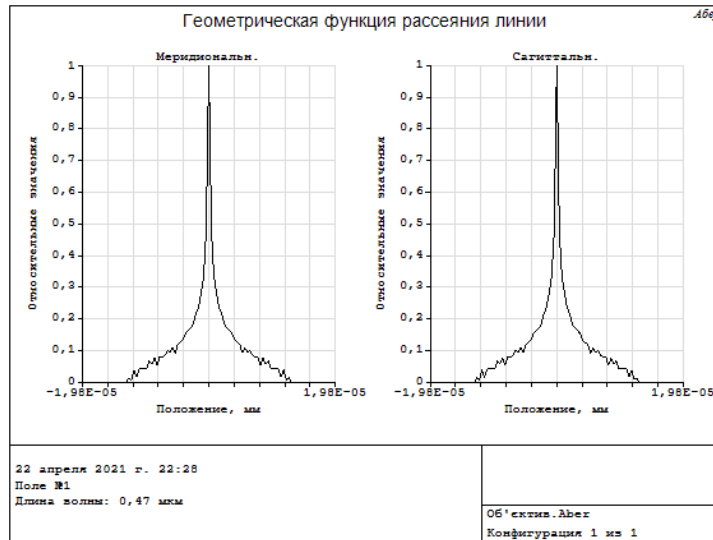


Рис. 3.28 ФРЛ запропонованої літографічної установки

З форми графіку видно, що аберації майже відсутні.

Оптическая передаточная функция (ОПФ) является комплексной и может выражаться через две вещественные функции:

- модуляционную передаточную функцию (МПФ)

$$M(s_x, s_y) = |D(s_x, s_y)|$$

- фазовую передаточную функцию (ФПФ)

$$\Phi(s_x, s_y) = \arg[D(s_x, s_y)]$$

На Рис.3.29 показана МПФ запропонованої літографічної установки

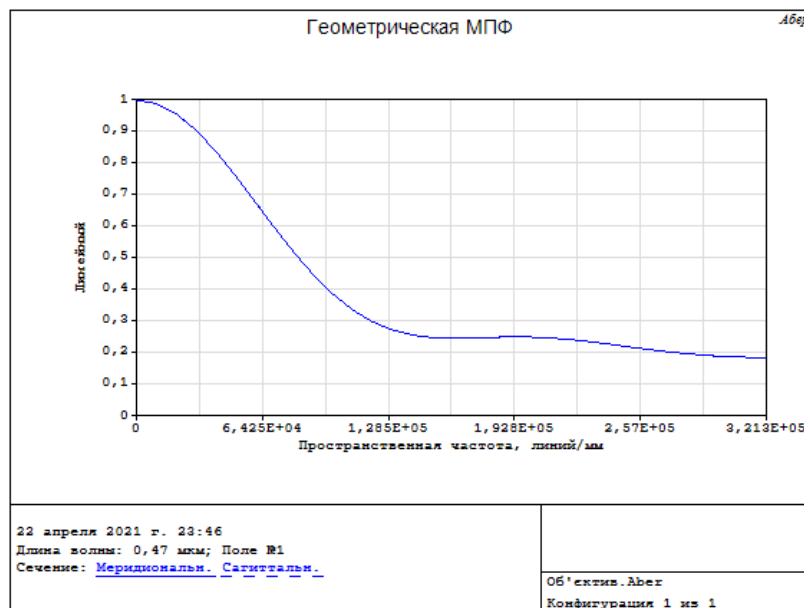


Рис. 3.29 МПФ запропонованої літографічної установки

Як видно з графіку, аберації присутні, але не дуже суттєво впливають на зображення, оскільки частота, яку оптична система передає з контрастом більше 0 є більшою за $3 \cdot 10^5$ ліній на мм.

Висновок до розділу 3

У даному розділі розглянуто габаритний розрахунок, синтезовано телецентричну систему та розраховані енергетичні показники системи, яка відповідає технічному завданню. Також була проведена оптимізація системи, що значно покращило систему. Розроблена літографічна установка відповідає технічному завданню та може бути використана для виробництва фотонних інтегральних схем.

4. Програмна та апаратна реалізації нейронної мережі

Хопфілда.

4.1 Математична модель нейронної мережі Хопфілда

Розглянемо мережу Хопфілда(рис.4.1). Вона має лише один шар нейронів, число яких є числом входів і виходів одночасно. Кожен нейрон пов'язаний синапсами з іншими нейронами та маю власний синапс для вводу сигналу. Вихідні сигнали утворюються на аксонах.

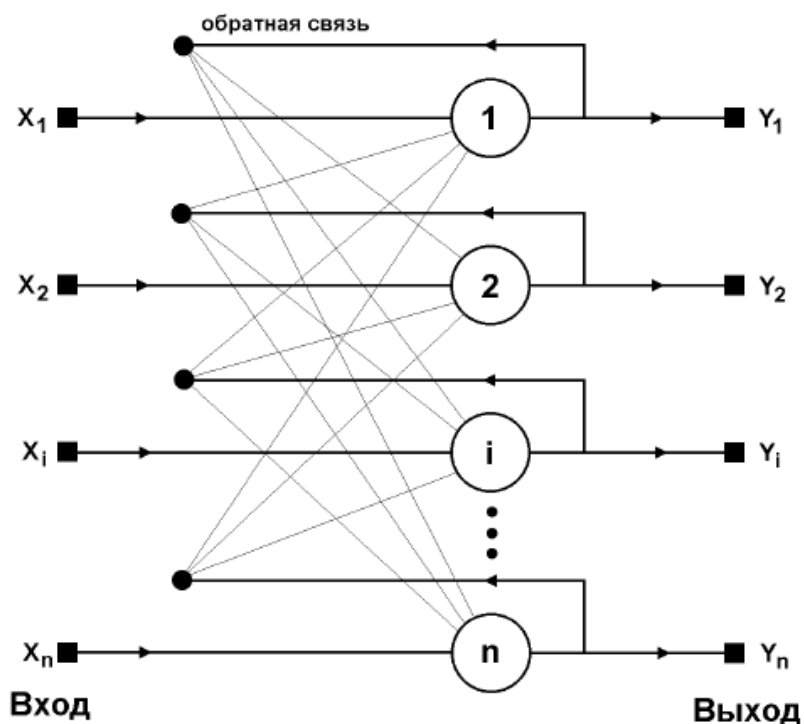


Рис. 4.1 Структурна схема мережі Хопфілда

Основною задачею для цієї мережі сформулюється так:

Данно набір двійкових сигналів, що описують предмет та вважаються зразковими. Мережа має з довільних неідеальних сигналів виокремити відповідний зразок або заключити про не відповідність.

На стадії ініціалізації мережі вагові коефіцієнти синапсів встановлюється як [31]:

$$w_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=0}^{m-1} x_i^k x_j^k, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases}$$

де i та j – індекси синапса що розташовуються позаду та попереду нейрона

x - i -ий і j -ий елементи вектору k -ого зразка.

Алгоритм функціонування мережі:

1. Вхід сигнали відбувається завдяки безпосередньої установці значень аксона

$$y_i(0) = x_i, \quad i = 0 \dots n-1$$

$y(0)$ тут 0 позначає нульову ітерацію у циклі роботи. Тому позначення вхідних синапсів у явному вигляді має умовний характер.

2. Розраховується стан нейронів

$$s_j(p+1) = \sum_{i=0}^{n-1} w_{ij} y_i(p)$$

$$j=0 \dots n-1$$

та нові значення аксонів

$$y_j(p+1) = f[s_j(p+1)]$$

де f – активаційна функція у вигляді стрибка (рис. 4.2.а)

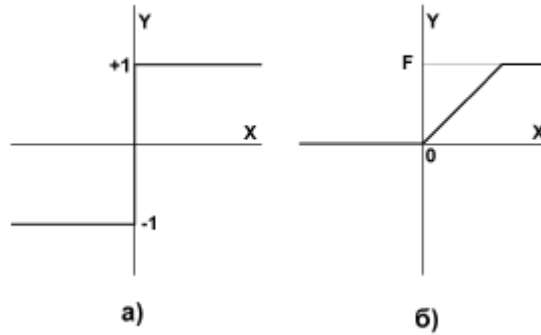


Рис. 4.2 Активаційна функція

3. Перевіряємо чи змінились вхідні значення аксонів за останню ітерацію. Якщо так тоді переходимо до пункту 2, в іншому випадку кінець. При цьому отримуємо вихідний вектор, що являє собою зразковим та найкращим чином поєднується з вхідними даними.

Через проблему обмеженості мережі, вона іноді на вихід видає неіснуючий образ. Для мережі Хопфілда число запам'ятовуючих образів m не перевищує $0.15 \cdot n$.

Для більш простих задач доцільно використати мережу Хеммінга. Ця мережа характеризується меншими затратами на пам'ять та об'ємом розрахунків

4.2 Програма для моделювання нейронної мережі Хопфілда

Для виготовлення фотонних інтегральних схем треба обчислити геометричні параметри, такі як розміри та координати усіх її топологічних елементів – оптичних хвилеводів та апертур між ними

Перелік вхідних даних:

1 Параметри нейронних мереж:

- кількість пар хвилеводів уздовж осі ОХ та ОУ
- матриця коефіцієнтів нейронної мережі:

$c[kx; ky]$

$$k_x=0..N_x-1, \quad k_y=0..N_y-1$$

2. Геометричні параметри:

- ширина хвилеводів W_1 [мкм]
- ширина зазорів між хвилеводами W_2 [мкм]
- ширина крайової зони W_3 [мкм]
- максимальний радіус апертур R_{\max} [мкм]

Відомо: $W_1 > W_2$, $W_1 < W_3$, $W_1 > 2 * R_{\max}$

3. Оптичні параметри:

- нормування розповсюдження яскравості вздовж довжини хвилеводу:

$$L_{NX}(x_N) = 1 - a_x * \cos \gamma_x * (\pi(x_N - 0.5))$$

де $L_{NX} = L(X_N) / L_{\max}$ – нормована яскравість $0 \leq X_N \leq 1$

X_N – нормована координата $X_N = x / x_{\max}$

$a_x, \gamma_x, a_y, \gamma_y$ – константи: $0 < a < 1$ $0 \leq y_N \leq 1$

$$L_{NX}(y_N) = 1 - a_y * \cos \gamma_y * (\pi(y_N - 0.5))$$

Послідовність розрахунків:

1. Розрахунок розмірів ФІС

$$L_{px} = 2 * W_3 + 2N_x * W_1 + (2 * N_x + 1) * W_2$$

$$L_{py} = 2 * W_3 + 2N_y * W_1 + (2 * N_y + 1) * W_2$$

2. Розрахунок нормованих коефіцієнтів нейронних систем з

урахуванням оптичних властивостей хвилеводів.

Для початку розрахуємо максимальне значення модуля коефіцієнтів

$$C_N[k_x, k_y] = C[k_x, k_y] / (C_{\max} * L_{NX}(k_x / (N_x - 1)) * L_{NY}(k_y / (N_y - 1)))$$

Визначимо максимальне значення модуля нормованих коефіцієнтів

$$C_{N\max} = \max(|C_N[k_x, k_y]|)$$

3. Відповідно до обраної системи координат розраховуємо координати

хвилеводів нижнього (горизонтального) шару

$$x_1 = 0$$

$$y_1 = (W_1 + W_2) * m_y, \quad m_y = 0..2N_x - 1$$

$$x_2 = L_{px}$$

$$y_2 = y_1 + W_1$$

Координати нижньої та верхньої крайової зони

$$x_1 = 0$$

$$x_2 = L_{px}$$

$$x_1 = 0$$

$$x_2 = L_{px}$$

$$y_1 = -W_2$$

$$y_2 = y_1 + W_3$$

$$y_1 = L_{py}$$

$$y_2 = L_{py}$$

$$W_3$$

$$W_3$$

4. Аналогічно визначимо координати верхнього (вертикального) слоя

$$x_1 = (W_1 + W_2) * m_x, \quad m_x = 0..2N_x$$

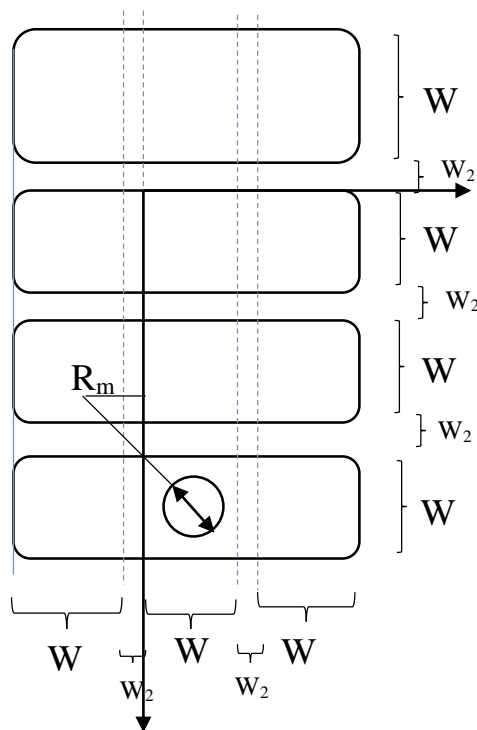
$$y_1=0$$

$$x_2= x_1+ W_1$$

$$y_2= L_{py}$$

Координати «лівої» та «правої» крайових зон:

$y_1=0$	$y_2=L_{py}$	$y_1=0$	$y_2=L_{py}$
$x_1=-W_2-$	$x_2=x_1+W_3$	$x_1=L_{px}-$	$x_2= L_{py}$
W_3		W_3	



5. Розрахуємо діаметр та координати апертур : площа апертури повинна бути пропорційний нормований коефіцієнт

$$A=A_{max} * C_N[k_x, k_y] = \pi R_{max}^2 * C_N[k_x, k_y]$$

Радіус кола з площиною А буде дорівнювати:

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{\pi \cdot R_{max}^2 |C_N[k_x, k_y]|}{\pi}}$$

$$R = R_{max} \cdot \sqrt{|C_N[k_x, k_y]|} - \text{радіус апертури у вузлі } [k_x, k_y]$$

Координати апертури залежить від знаку нормованого коефіцієнту:

- Якщо $C_N[k_x, k_y]=0$ – апертура відсутня
- якщо $C_N[k_x, k_y]>0$, то 2 апертури круглої форми з радіусом R має

координати центрів

$$x_1=(w_1+w_2)(2k_x)+0.5W_1$$

$$y_1 = (w_1 + w_2)(2k_y) + 0.5W_1$$

$$x_2 = x_1 + (w_1 + w_2) \quad k_x = 0..N_x - 1$$

$$y_2 = y_1 + (w_1 + w_2) \quad k_y = 0..N_y - 1$$

- якщо $C_N[k_x, k_y] < 0$, то

$$x_1 = (w_1 + w_2)(2k_x + 1) + 0.5W_1$$

$$y_1 = (w_1 + w_2)(2k_x) + 0.5W_1$$

$$x_2 = x_1 - (w_1 + w_2)$$

$$y_2 = y_1 + (w_1 + w_2)$$

4.3 Розрахунок маски з апертурами для апаратної реалізації нейронної мережі Хопфілда.

Для моделювання нейронної мережі використовуємо програму “Magic Memory”

Для цього необхідно створити еталоне зображення та спотворенні зображення еталонів, для розрахування ваговий коефіцієнтів системи та перевірки можливості розпізнавання зображень.

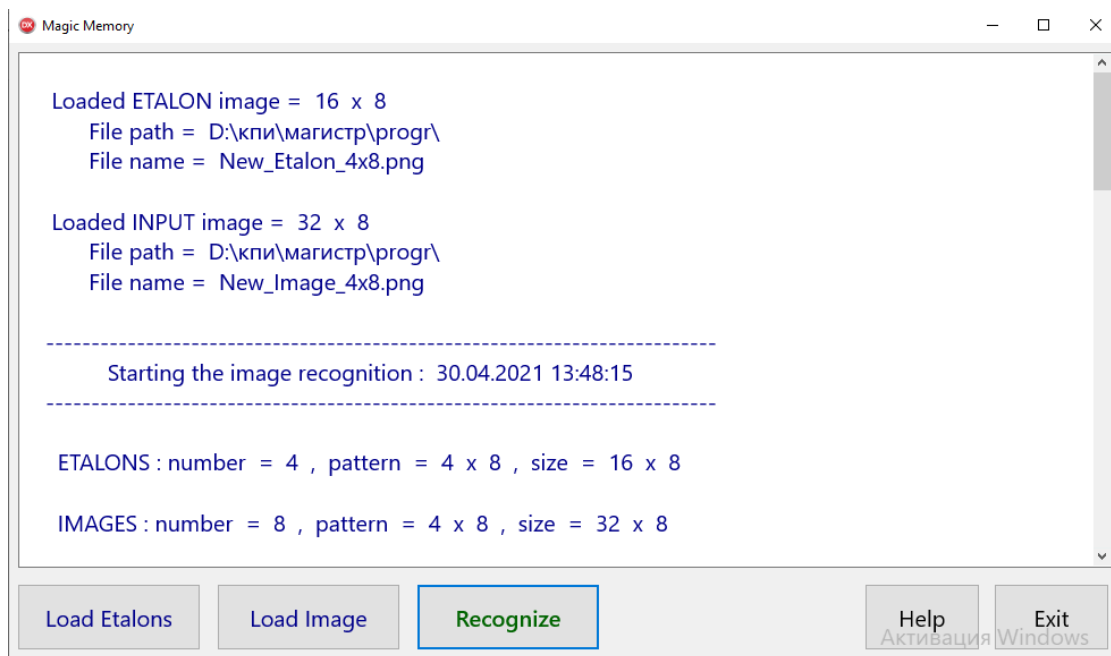


Рис. 4.3 Програма програму “Magic Memory”
Створюємо еталоне зображення розміром 16*8 пікселей

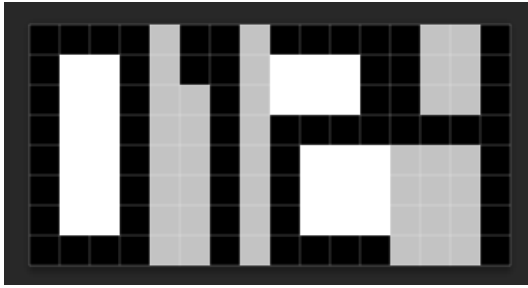


Рис. 4.4 Еталоне зображення

Створюємо спотворене еталоне зображення розміром 32*8 пікселей

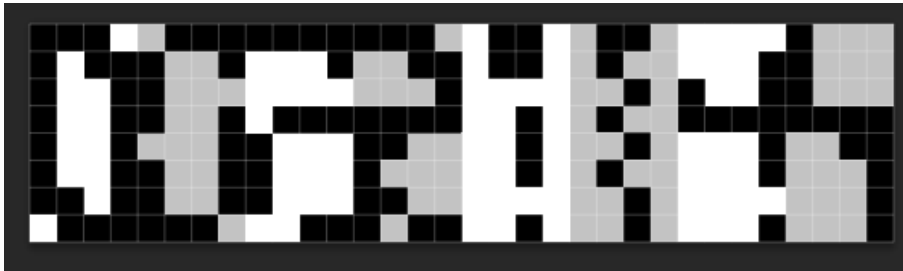


Рис. 4.5 Спотворене еталоне зображення

Завантажуємо зображення до програми та отримуємо розрахунок коефіцієнтів.

Coefficient matrix = 32 x 32

```

Coeff [ 0 ] = 0,1, 0,1, 0,1, 0,1, 0,1, 0,0, -0,1, 0,0, 0,1, 0,0, -0,1, 0,0, 0,1, 0,0, -0,1, 0,0, ...
Coeff [ 1 ] = 0,1, 0,1, 0,1, 0,1, 0,1, 0,0, -0,1, 0,0, 0,1, 0,0, -0,1, 0,0, 0,1, 0,0, -0,1, 0,0, ...
Coeff [ 2 ] = 0,1, 0,1, 0,1, 0,0, 0,1, -0,1, 0,0, -0,1, 0,1, -0,1, 0,0, -0,1, 0,1, -0,1, 0,0, -0,1, ...
Coeff [ 3 ] = 0,1, 0,1, 0,0, 0,1, 0,1, -0,1, -0,1, 0,1, 0,1, -0,1, -0,1, 0,1, 0,1, -0,1, -0,1, 0,1, ...
Coeff [ 4 ] = 0,1, 0,1, 0,1, 0,1, 0,1, 0,0, -0,1, 0,0, 0,1, 0,0, -0,1, 0,0, 0,1, 0,0, -0,1, 0,0, ...
Coeff [ 5 ] = 0,0, 0,0, -0,1, -0,1, 0,0, 0,1, 0,1, 0,0, 0,0, 0,1, 0,1, 0,0, 0,0, 0,1, 0,1, 0,0, ...
Coeff [ 6 ] = -0,1, -0,1, 0,0, -0,1, -0,1, 0,1, 0,1, -0,1, -0,1, 0,1, 0,1, -0,1, -0,1, 0,1, 0,1, -0,1, ...
Coeff [ 7 ] = 0,0, 0,0, -0,1, 0,1, 0,0, 0,0, -0,1, 0,1, 0,0, 0,0, -0,1, 0,1, 0,0, 0,0, -0,1, 0,1, ...
Coeff [ 8 ] = 0,1, 0,1, 0,1, 0,1, 0,1, 0,0, -0,1, 0,0, 0,1, 0,0, -0,1, 0,0, 0,1, 0,0, -0,1, 0,0, ...
Coeff [ 9 ] = 0,0, 0,0, -0,1, -0,1, 0,0, 0,1, 0,1, 0,0, 0,0, 0,1, 0,1, 0,0, 0,0, 0,1, 0,1, 0,0, ...
Coeff [ 10 ] = -0,1, -0,1, 0,0, -0,1, -0,1, 0,1, 0,1, -0,1, -0,1, 0,1, 0,1, -0,1, -0,1, 0,1, 0,1, -0,1, ...
Coeff [ 11 ] = 0,0, 0,0, -0,1, 0,1, 0,0, 0,0, -0,1, 0,1, 0,0, 0,0, -0,1, 0,1, 0,0, 0,0, -0,1, 0,1, ...
Coeff [ 12 ] = 0,1, 0,1, 0,1, 0,1, 0,1, 0,0, -0,1, 0,0, 0,1, 0,0, -0,1, 0,0, 0,1, 0,0, -0,1, 0,0, ...
Coeff [ 13 ] = 0,0, 0,0, -0,1, -0,1, 0,0, 0,1, 0,1, 0,0, 0,0, 0,1, 0,1, 0,0, 0,0, 0,1, 0,1, 0,0, ...
Coeff [ 14 ] = -0,1, -0,1, 0,0, -0,1, -0,1, 0,1, 0,1, -0,1, -0,1, 0,1, 0,1, -0,1, -0,1, 0,1, 0,1, -0,1, ...
Coeff [ 15 ] = 0,0, 0,0, -0,1, 0,1, 0,0, 0,0, -0,1, 0,1, 0,0, 0,0, -0,1, 0,1, 0,0, 0,0, -0,1, 0,1, ...

```

Отримуємо результат розпізнавання зображень. Як бачимо 4 об'єкта розпізнано без помилок, і лише 2 об'єкта з помилкою розпізнавання 0,063.

----- Recognition results -----
Image = 0 --> 0 , Err = 0,063 , step = 2
Image = 1 --> 0 , Err = 0,063 , step = 2
Image = 2 --> 2 , Err = 0,000 , step = 2
Image = 3 --> 2 , Err = 0,000 , step = 2
Image = 4 --> 1 , Err = 0,250 , step = 3
Image = 5 --> 1 , Err = 0,250 , step = 2
Image = 6 --> 3 , Err = 0,000 , step = 2
Image = 7 --> 3 , Err = 0,000 , step = 2

Рис. 4.6 Результат розпізнавання

Висновки до розділу 4.

Розроблений математичний апарат дозволяє розрахувати головний елемент ФІС – матрицю апертур для апаратної реалізації нейронної мережі Хопфілда.

5. Експериментальна частина

5.1. Дослідження хвилеводів оптичної інтегральної схеми.

Проведення експерименту

Мета експерименту:

- дослідити рівномірність освітлення
- провести спостереження освітленості на різних поверхнях
- експериментально визначити найкращу рівномірність на різних

поверхнях

Завдання експерименту:

- виміряти рівномірність освітленості
- експериментально дослідити залежність освітлення від типу поверхні
- побудувати графік освітленості для кожної поверхні
- зробити висновок про рівномірність освітлення в залежності від типу

пластини

Експериментальна установка

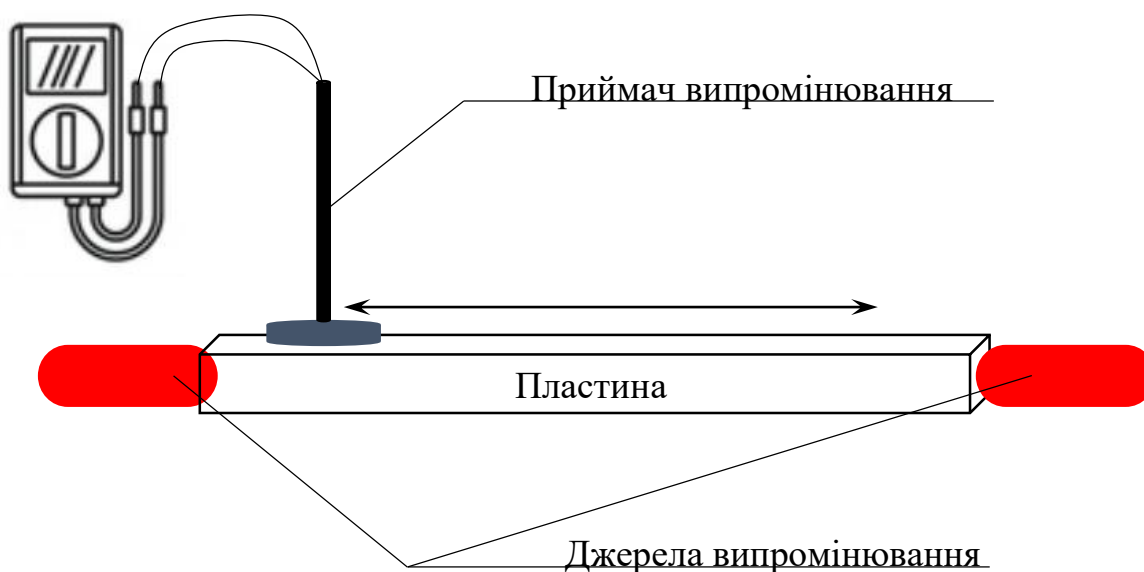


Рис. 5.1 Експериментальна установка

У дана установка складається з блоку випромінювання та блоку приймача. У якості джерела випромінювання використовуємо червоний світлодіод. У якості приймального блоку використовуємо приймач випромінювання, який під'єднаний щупами до мультиметру.

Вхідний оптичний сигнал формується червоним світлодіодом, що світить у торець пластини. З інших боків пластина покрита чорним лаком, знизу укрита фольгою. Таким чином досягається зменшення світловтрат. До верхньої робочої поверхні підводиться приймач, який захоплює вхідний сигнал й перетворює сигнал у струм. Для виміру вихідного електричного сигналу підводимо мультиметр.

Порядок виконання

1. По черзі встановлюємо пластину на робочу установку
2. Готуємо до роботи приймач.

Приєднуємо щупи до мультиметру та до приймача. Перемикаємо мультиметр у необхідний робочий режим

3. Через кожні 5мм робимо заміри та записуємо у таблицю
4. Розраховуємо похибки
5. Будуємо графік на основі отриманих даних
6. Робимо висновок

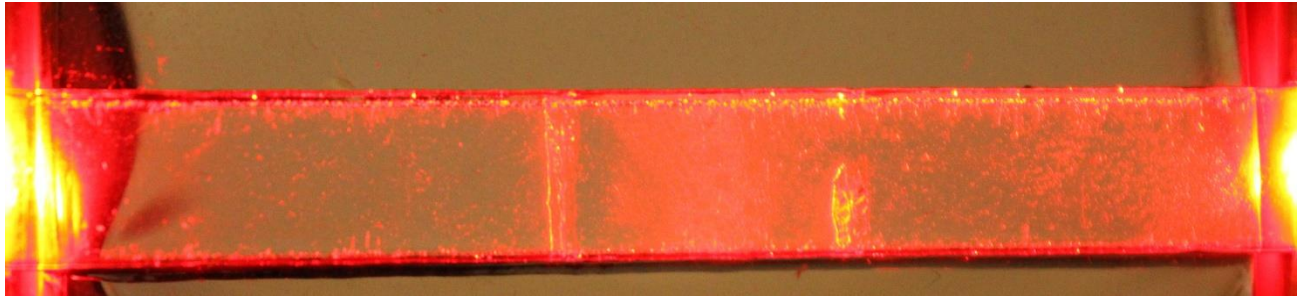
Виконання експерименту

Для перевірки обираємо декілька вид пластин:

Матова пластина



Прозора пластина



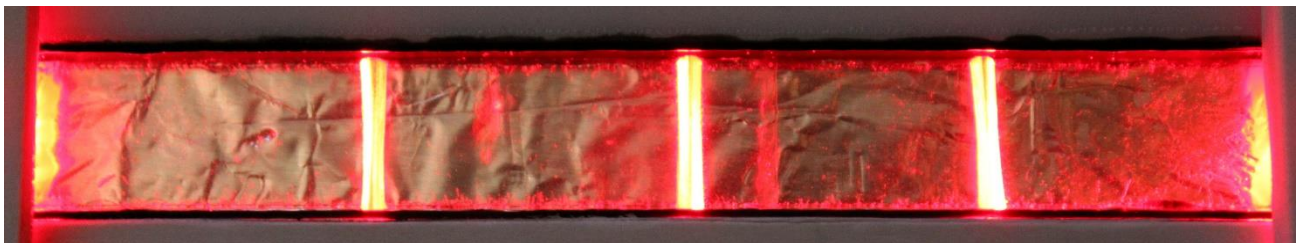
Прозора пластина з шліфуванням великим зерном



Прозора пластина з шліфуванням малим зерном



Прозора пластина з трьома борознами поперек



Прозора пластина з двома борознами вздовж



За допомогою приймача замірюємо освітленість вздовж пластини через кожні 50 мм. Повторюємо замір чотири рази та обраховуємо середня значення. Заносимо результати у таблицю

Прозора					Матова				
1	2	3	4	Середнє	1	2	3	4	Середнє
246	238	230	218	233	234	232	230	232	232
214	195	170	168	187	105	52	42	51	63
185	135	144	150	154	13	7	9	6	9
130	87	105	82	101	3	2	2	2	2
100	99	93	70	91	2	2	1	2	2
139	140	139	116	134	1	2	1	1	1
178	177	177	167	175	1	2	1	1	1
170	167	175	165	169	1	1	2	1	1
110	120	120	110	115	2	2	2	2	2
76	79	74	74	76	3	4	3	4	4
90	82	70	99	85	4	9	7	14	9
114	124	107	130	119	23	40	24	40	32
168	161	150	184	166	141	190	158	158	162
214	215	214	215	215	224	226	219	220	222
Шліфування поперек грубе					Шліфування поперек мале				
1	2	3	4	Середнє	1	2	3	4	Середнє
250	256	254	256	254	245	246	247	244	246
242	249	249	250	248	240	242	240	239	240
235	239	241	242	239	230	227	228	230	229
230	230	233	232	231	220	218	215	219	218
228	224	228	227	227	215	212	212	212	213

222	219	222	220	221	208	208	205	208	207
220	219	219	219	219	204	200	203	200	202
222	221	218	221	221	206	203	205	199	203
227	228	227	227	227	210	210	210	205	209
236	235	235	233	235	219	217	217	213	217
247	242	245	240	244	226	224	225	220	224
258	253	257	252	255	238	235	236	230	235
268	264	270	265	267	242	245	244	240	243
274	278	274	274	275	250	250	249	244	248

Борозди вздовж					Прозора с 3мя поперечними бороздами				
1	2	3	4	Середнє	1	2	3	4	Середнє
257	256	258	257	257	240	234	238	221	233
240	253	253	256	251	226	205	214	201	212
230	248	242	237	239	269	254	280	264	267
225	238	230	224	229	209	204	198	183	199
211	222	220	211	216	160	153	184	150	162
210	216	219	210	214	226	243	244	232	236
219	219	220	204	216	218	216	215	211	215
221	220	222	210	218	167	162	170	153	163
227	224	226	217	224	162	162	159	159	161
236	230	234	236	234	207	200	209	223	210
248	236	243	241	242	244	250	242	233	242
262	248	258	250	255	179	167	171	163	170
275	268	268	260	268	194	200	191	180	191
296	281	280	286	286	217	215	203	206	210

Обробка результатів

Розрахуємо середнє квадратичне відхилення

Шлифование вдоль на нижней стороне	Шлифование поперек грубые	Шлифование поперек мелкие	Прозрачная	Прозрачная с поперечними бороздами	Матовая
0,8	2,8	1,3	11,9	8,5	1,6
7,1	1,7	1,3	21,9	11,1	21,3
7,6	3,1	1,5	21,9	10,8	3,1
6,4	1,5	2,2	21,7	11,3	0,5
5,8	1,9	1,5	14,0	15,4	0,5
4,5	1,5	1,5	11,7	8,7	0,5
7,7	0,5	2,1	5,2	2,9	0,5
5,6	1,7	2,6	4,3	7,4	0,5
4,5	0,5	2,5	5,8	1,7	0,0
2,8	1,3	2,5	2,4	9,6	0,6
5,0	3,1	2,6	12,3	7,0	4,2
6,6	2,9	1,7	10,2	6,8	9,5
6,1	2,8	2,2	14,2	8,4	11,9
7,3	2,0	1,9	0,6	6,8	3,3

Побудуємо графік отриманих результатів для порівняння результатів

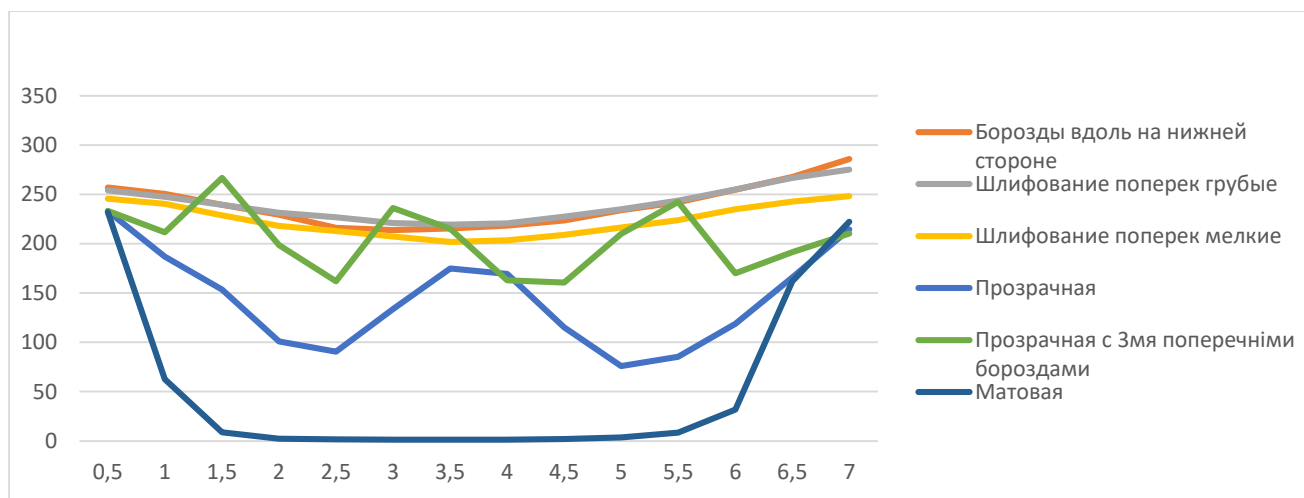


Рис. 5.2 Графік рівномірності освітленості

Висновок

Найбільш рівномірне освітлення вздовж пластини спостерігається у прозорій пластині з шліфуванням. У прозорій та матовій пластинках спостерігається значне спадання освітленості у середині.

У пластині з борознами вздовж результати на рівні з пластинами шліфування.

У пластині з борознами у поперек більш рівномірне освітлення по відношенню до прозорі, проте є значний спад між борознами.

5.2 Розробка діючого прототипу фотонної інтегральної схеми.

Структура прототипу

Пропонується схема для проекту "AI", що складається з 4 частин:

1. Випромінювальний блок (Рис. 5.3 Випромінювальна/Приймальна частина у розборі (Рис. 5.3; Рис. 5.4; Рис. 5.5; Рис. 5.6;))
2. Приймальний блок (Рис. 5.3; Рис. 5.4; Рис. 5.5; Рис. 5.6;))
3. Блок з діафрагмами (Рис. 5.8; Рис. 5.9)
4. Основний блок(Рис. 5.10; Рис. 5.11; Рис. 5.12)

На рисунках нижче показані всі частини у розборі і в збірці

Випромінювальний/Приймальний блок

Блок складається з корпусу, пластини з фольгою, прозорими пластинами (товщина 3 мм) з пластинами з фольги, друкованими платами з джерелами випромінювання / приймачами випромінювання і кришки.

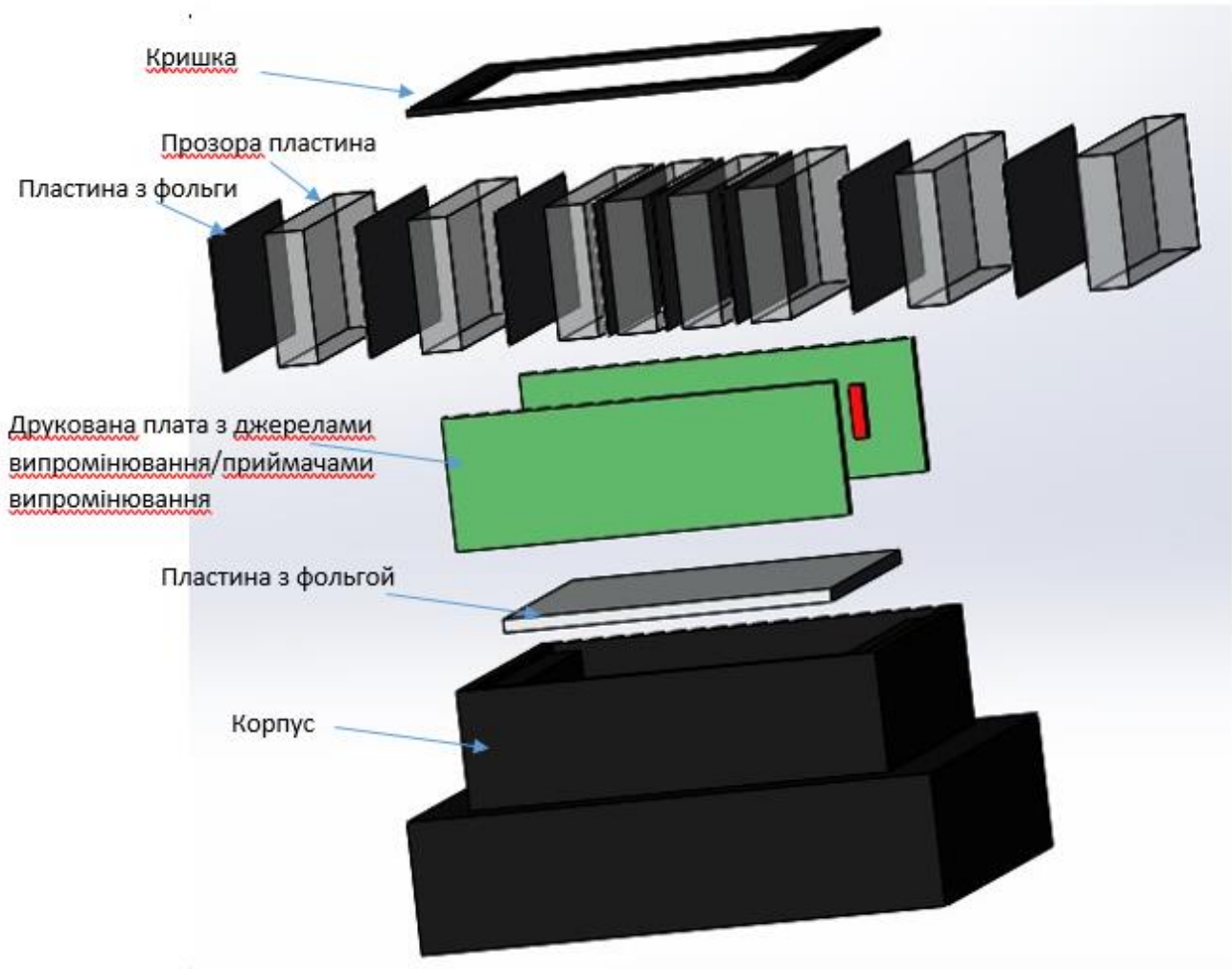


Рис. 5.3 Випромінювальна/Приймальна частина у розборі

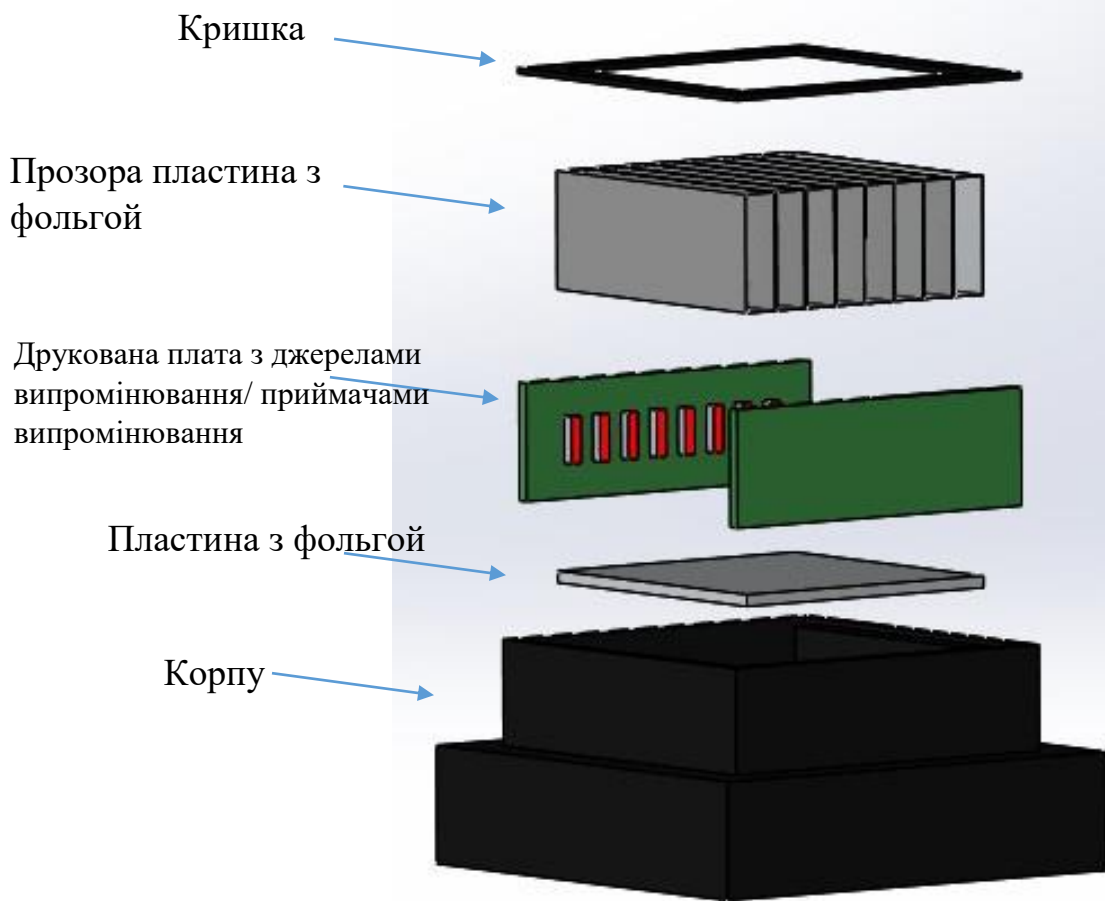


Рис. 5.4 Випромінювальна/Приймальна частина у розборі

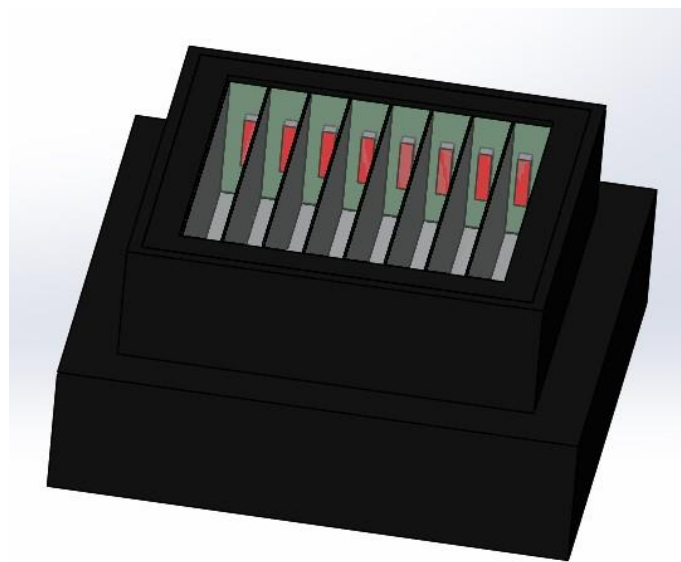


Рис. 5.5 Випромінювальна/Приймальна частина у збірці

На Рис. 5.5 показана задня сторона блоку, в якій знаходиться посадкова частина для роз'єму (Рис. 5.6) у який буде під'єднано шлейф від блоку управління.

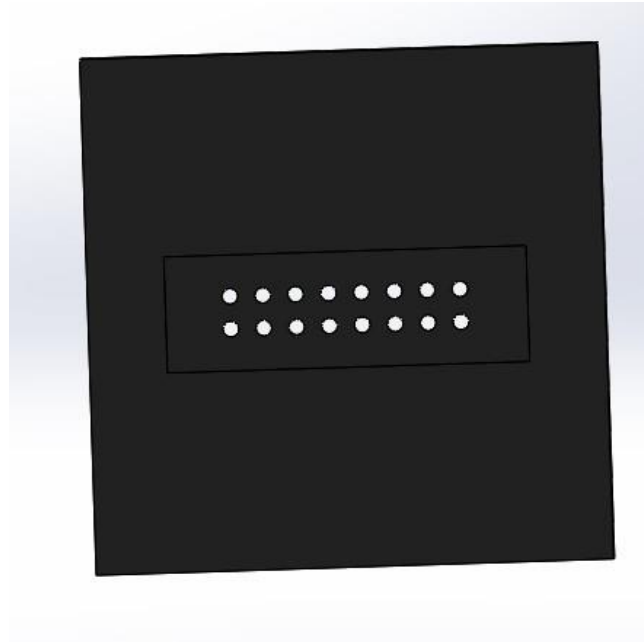


Рис. 5.6 Випромінювальна/Приймальна частина у збірці з задньої сторони



Рис. 5.7 Роз'єм на плату

Блок з діафрагмами

Блок складається з трьох частин дві кришки та діафрагма

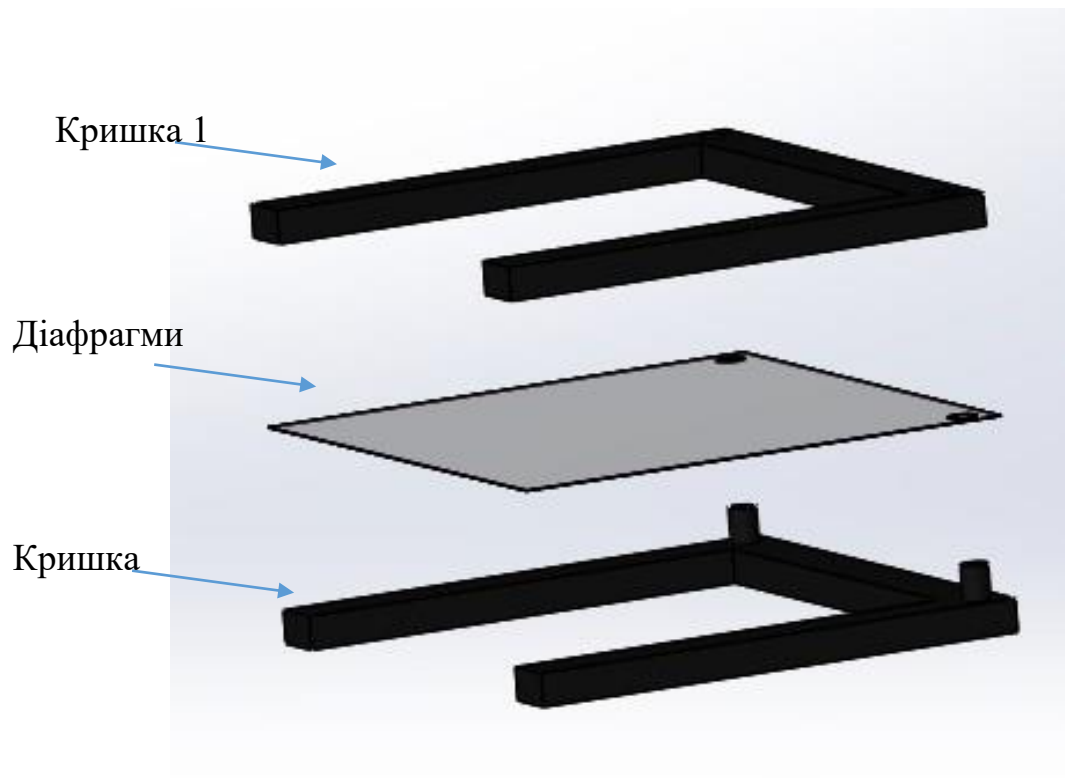


Рис. 5.8 Блок з діафрагмами у розборі

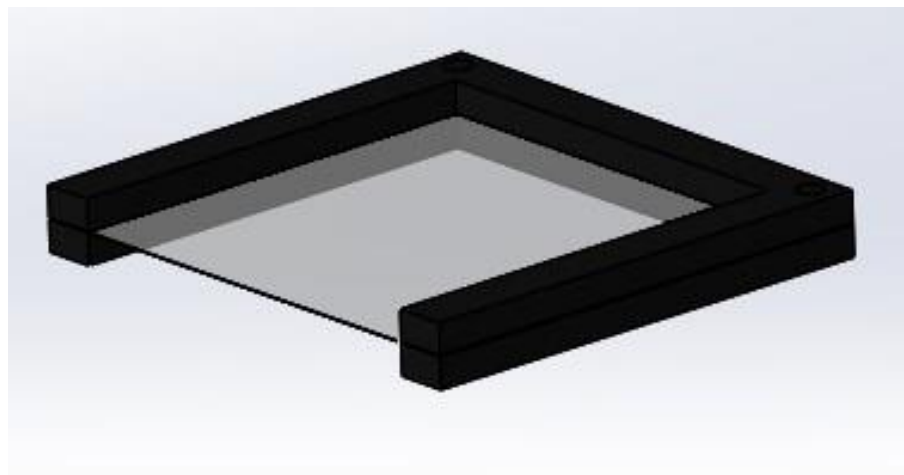


Рис. 5.9 Блок з діафрагмами у збірці

Збірка

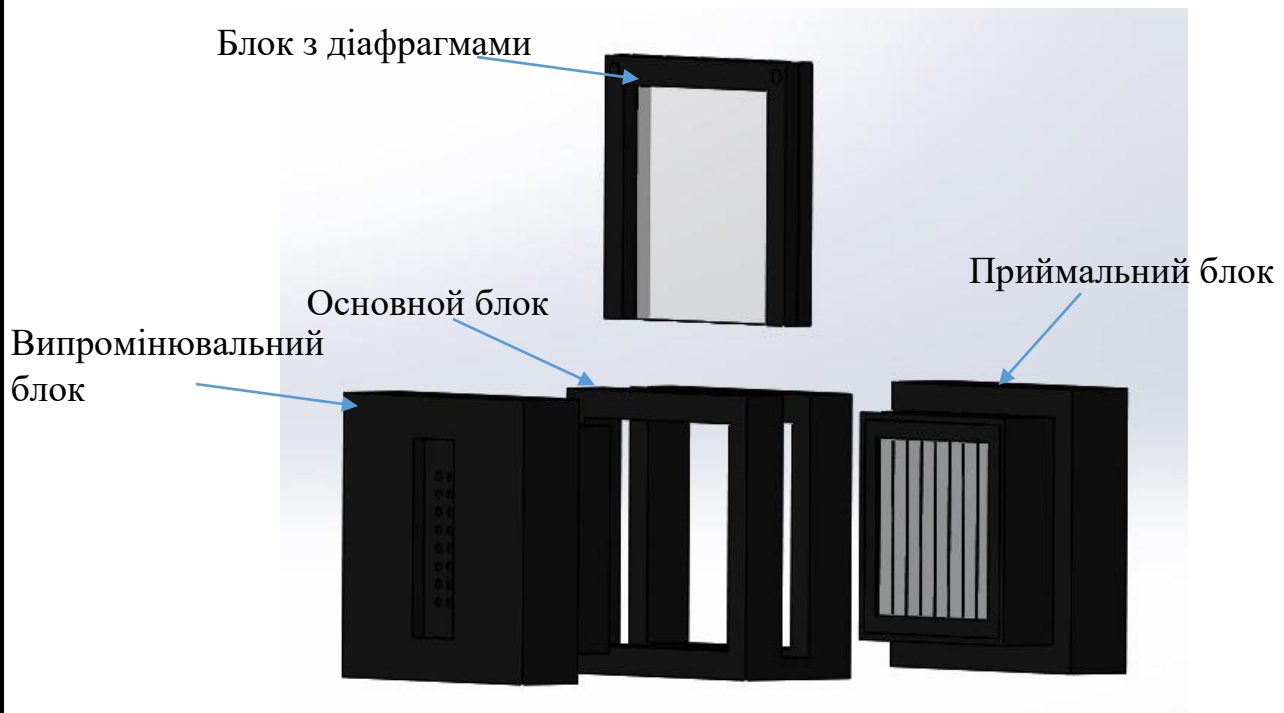


Рис. 5.10 Розібраний вид збірки

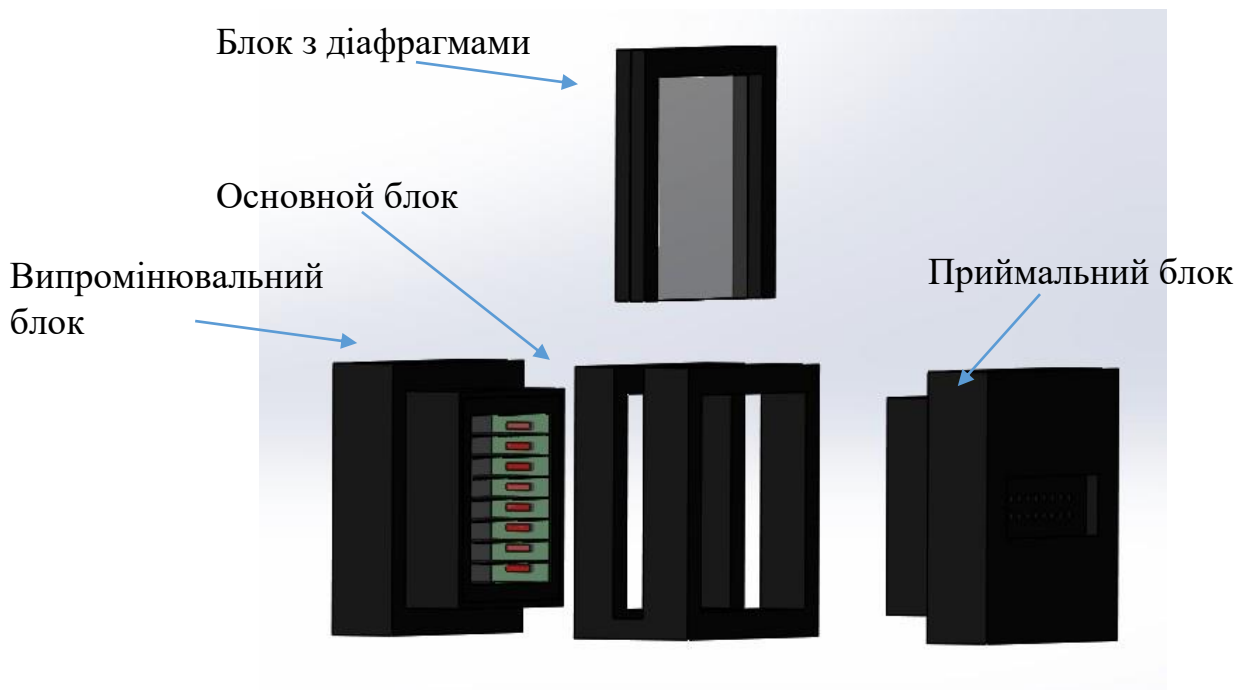


Рис. 5.11 Розібраний вид збірки

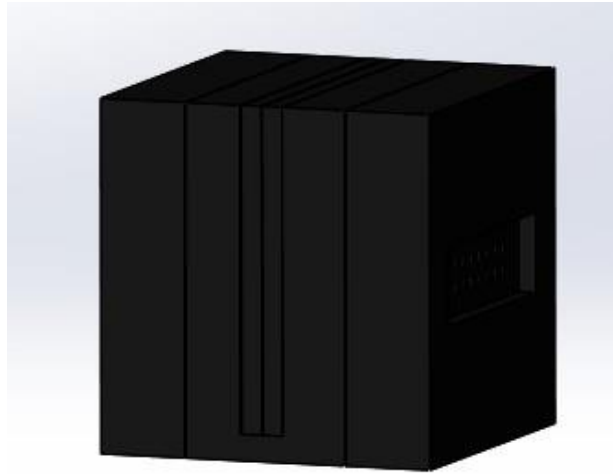


Рис. 5.12 Фінальна збірка

Розмір фінальної збірки 4x4x4 см.

5.3 Оптична частина

Склад з трьох частин: верхня пластина з випромінювачем, нижня пластина з приймачами та діафрагма, яка надає вагові коефіцієнти сигналам.

Вхідний оптичний сигнал формується світлодіодом. Світловий потік направляєється з торців пластини й переходить у робочу поверхню нижньої групи пластини. Кожна пластина має поглинаючий шар, для перешкодженню впливу на сусідні сигнали. Для зменшення світловтрат пластини покриті дзеркальною поверхнею. Приймальна частина аналогічна випромінювальній. Для реєстрації сигналу використовуємо приймачі, розташовані у торцях нижньої групи пластин

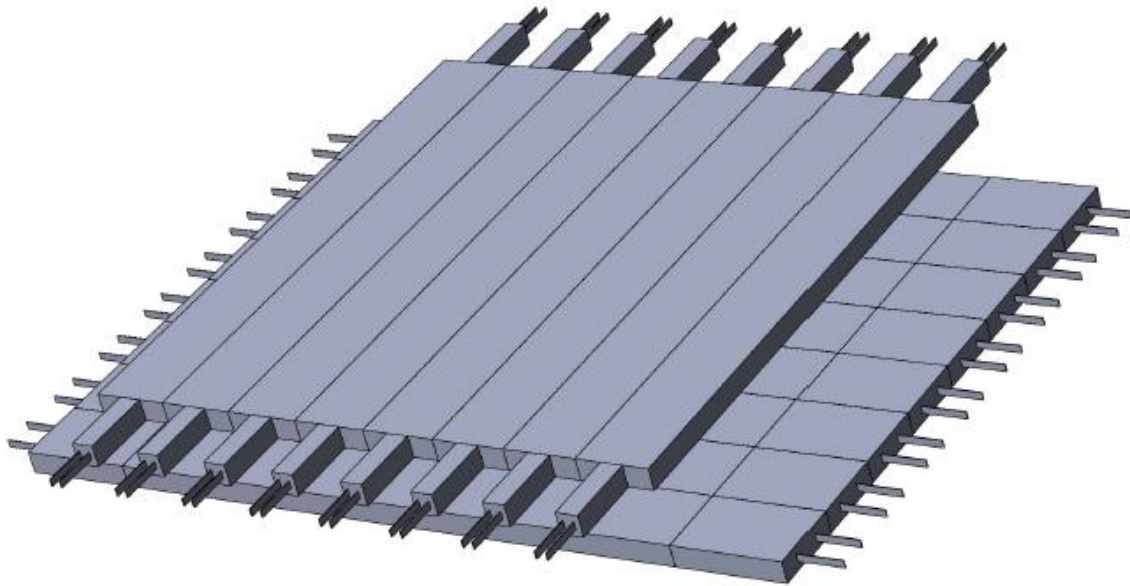


Рис. 5.13 Оптична схема

За допомогою такої конструкції можливо повторити повністю функціонування нейрону.

5.4 Прототип

Після синтезу та прототипу отримали наступне:

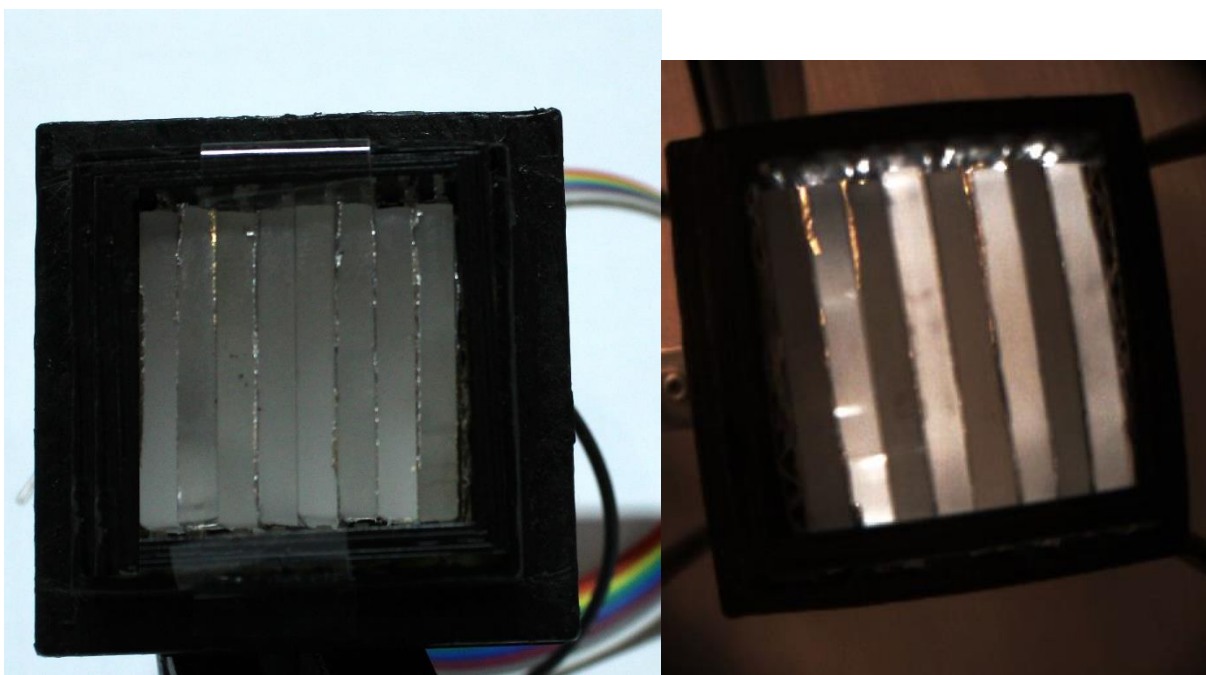


Рис. 5.14 Блок прийому/випромінювання

Блок прийому/випромінювання. По периметру знаходяться приймачі випромінювання/джерело випромінювання. Між ними становляться світловолокно, обмежене між собою дзеркальною поверхнею.

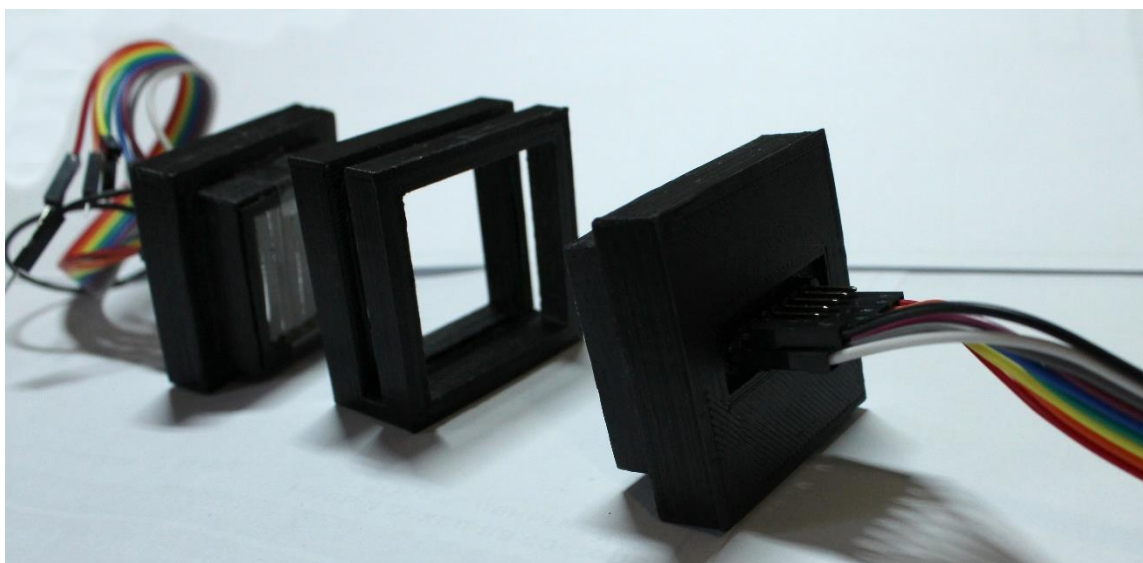


Рис. 5.15 Збір блоків прийому/випромінювання

Збір випромінювального блоку та блоку приймача.

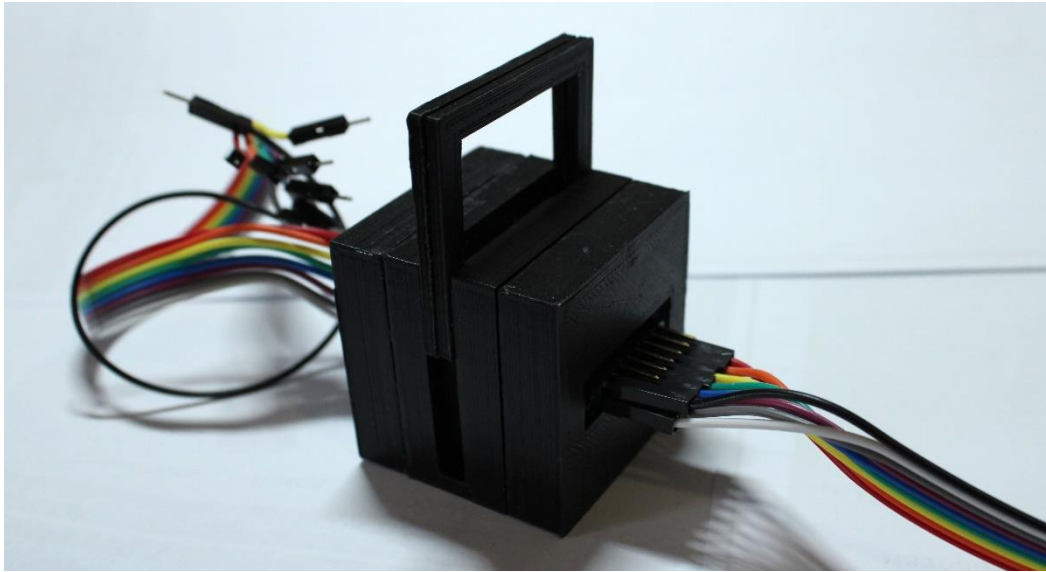


Рис. 5.16 Збір блоків разом з діафрагмою

Між цими блоками встановлюється діафрагма, для встановлення вагових коефіцієнтів для кожного сигналу.

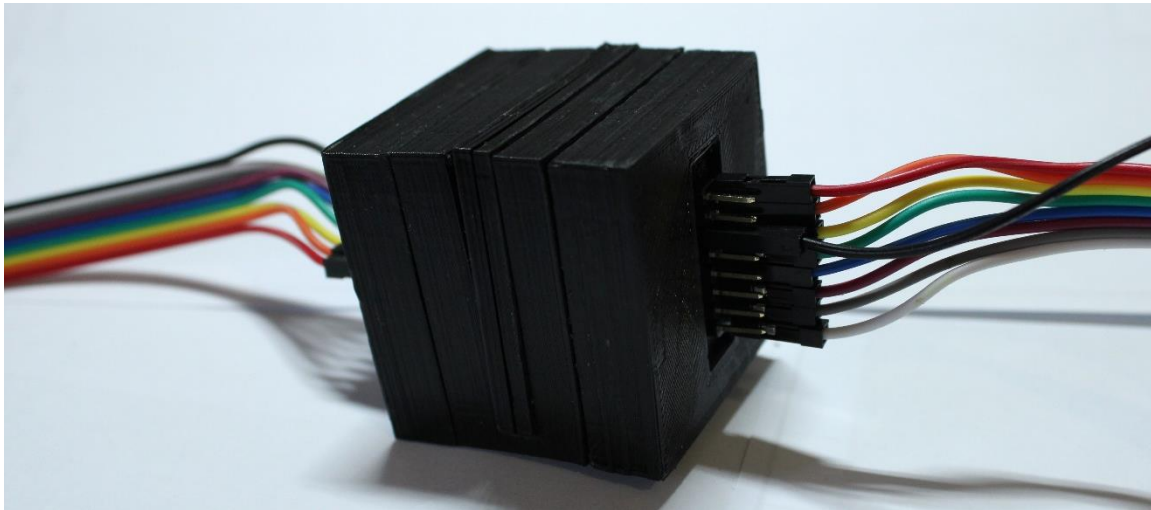
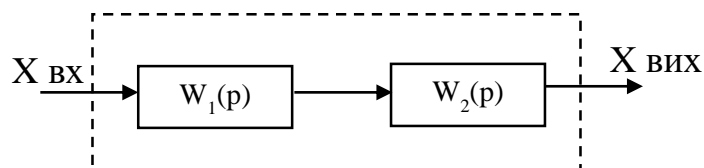


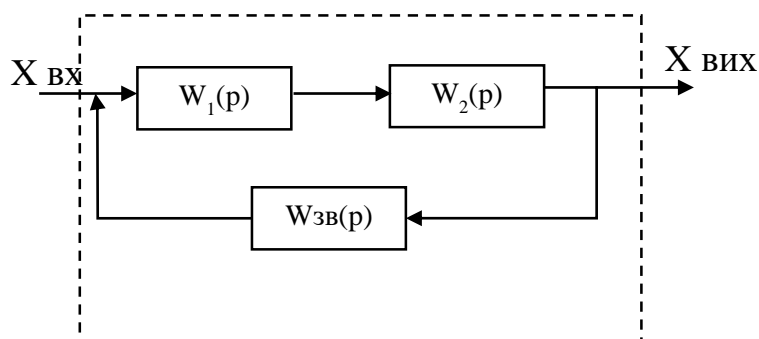
Рис. 5.17 Зібраний прототип

Зібраний прототип являє собою куб розміром 4x4x4 см

У даній схемі ланки поєднуються послідовно, отже передавальна функція загальної ланки (системи) дорівнює добутку передавальних функцій елементарних ланок.



Для покращення системи вводять ланку зворотного зв'язку. Вона утворює замкнутий контур передачі сигналів керування.



5.5 Дослідження діючого прототипу фотонної інтегральної схеми.

Постановка завдання

Розробити апаратно-програмний комплекс для тестування та вимірювання характеристик ФІС, який є аналогом проб-станції у мікроелектронній промисловості. Необхідно створити зворотній зв'язок для керування яскравість світлодіодів в залежності від вихідного сигналу. Та передавати сигнал з приймача для зібрання статичних даних, за допомогою яких можливо оцінити втрати у системі.

В якості чутливого елемента використати фоторезистор.

Необхідні компоненти

- Плата Arduino Uno.
- Фоторезистор (LDR).
- Транзистор 2N2222.
- Резистор 510 Ом .
- Резистор 100 кОм.

- Конденсатор 0,1 мкФ .
- Світлодіод потужністю 1 Вт.

Алгоритм вирішення завдання

У експерименті використовуємо дільник навантаження, який складається з фоторезистора та резистора 100 кОм. Вихід дільника напруги під'єднано до аналогового входу. Значення напруги зчитуємо з виходу АЦП. Через зміну освітленості опір фоторезистора зменшується, тому змінюється напруга на аналоговому вході. Тобто якщо у навколишньому середовищі темно, опір фоторезистора великий, у результаті на аналогову вході навантаження мале.

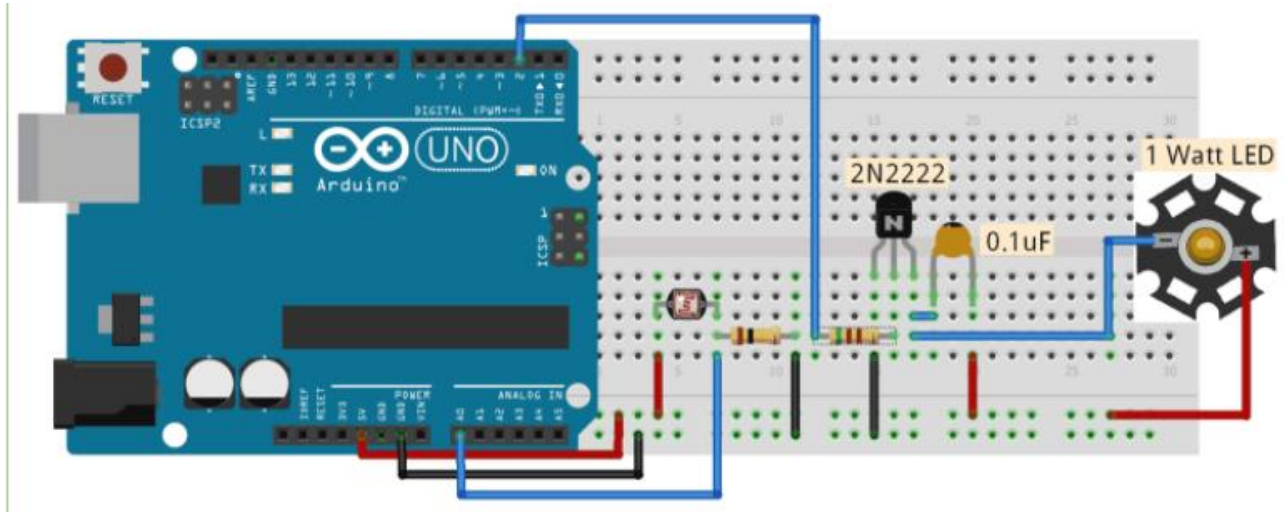


Рис. 5.18 Схема підключення

Отримане значення навантаження перетворюємо на коефіцієнт заповнення ШИМ. Цей коефіцієнт на пряму впливає на яскравість світлодіода.

Отримаємо наступний взаємозв'язок



Опис програми

Для спрощення написання програми беремо до уваги лише одну ланку – світлодіод, приймач.

У цій програмі регулюємо яскравість джерела випромінювання в залежності від вихідного сигналу. У якості джерела випромінювання використовуємо світлодіод, керувати ним будемо за допомогою Arduino та транзистора.

Для керування яскравості світлодіоду використовуємо широтно-імпульсну модуляцію (ШИМ). Змінюючи коефіцієнт заповнення можна змінювати яскравість.

Для використання ШИМу необхідно ініціалізувати pin 12. Аналогове значення напруги зчитуємо з A0 за допомогою команди “analogRead(LDR)”. Якщо значення з виходу АЦП менше 500, тоді адаптивно змінюємо яскравість

світлодіоду. Якщо значення дорівнює або більше 500, тоді вмикаємо світлодіод на повну потужність.

Текст програми

```
int pwmPin = 2; // на pin 2 будемо формувати ШИМ сигнал
int pot = A0; // с контакта A0 будемо зчитувати аналогове значення
напруги
```

```
int c1 = 0;
int c2 = 0;
void setup()
{
  pinMode(pwmPin, OUTPUT);
  pinMode(pot, INPUT);
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  int value = analogRead(pot);

  Serial.println(value);
  c1= value;
  c2= 500-c1;    // віднімаємо c1 з 500 і результат зберігаємо в c2

  if (value < 500)
  {
    digitalWrite(pwmPin, HIGH);
    delayMicroseconds(c2);
    digitalWrite(pwmPin, LOW);
    delayMicroseconds(c1);
```

						ПО91МН.000001.000 ПЗ	Лист
Відм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			

```

}
if (value > 500) // якщо світло – вимикаємо світлодіод
{
  digitalWrite(2,LOW);
}
}
}

```

Результати експерименту

Програмуємо Arduino за допомогою програми Arduino.

```

shim2 | Arduino 1.8.13
Файл Правка Скетч Інструменти Помощь
shim2
int pwmPin = 2; // на pin 2 мы будем формировать ШИМ сигнал
int pot = A0; // с контакта A0 мы будем считывать аналоговое значение
int c1 = 0; // объявляем переменную c1
int c2 = 0; // объявляем переменную c2
void setup() // setup loop
{
  pinMode(pwmPin, OUTPUT);
  pinMode(pot, INPUT);
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  int value = analogRead(pot);
  Serial.println(value);
  c1= value;
  c2= 1000-c1; // вычитаем c1 из 500 и результат сохраняем
  if (value < 1000)
  {

```

Рис. 5.19 програма Arduino

З'єднаємо усі елементи як показано вище. Та перевіримо роботу програми.

Отож як бачимо зворотній зв'язок створено.

У темноті світлодіод працює на повну потужність. Та чим більше світла потрапляє на фоторезистор тим менш яскраво світить світлодіод.

Таким чином створений зворотній зв'язок , що збільшує яскравість світлодіода при недостатній освітленості. За допомогою програми Arduino вмикаємо монітор порту.



Рис. 5.20 Проведення експерименту

На початку світлодіод вимкнений, а далі він поступово розгорається, як бачимо у зібраній статистиці

0	56	208	912
15	61	224	930
19	75	307	940
21	81	460	962
29	88	610	990
33	95	716	1000
39	103	778	1015
43	127	816	
46	170	890	
51	193	896	

Висновок

У цій роботі ми довели актуальність роботи з нейронними мережами. Та створили зворотній зв'язок, що дає змогу регулювати яскравістю в залежності від освітлення. Та отримали дані з приймача для збору статистичних даних.

Висновки до розділу 5.

1. Запропонована конструкція оптичних хвилеводів забезпечує малі втрати оптичного випромінювання. Так хвилеводи можуть бути застосовані для побудови ФІС.

2. Розроблений, зібраний та перевірений діючий прототип ФІС – апаратна реалізація 8 нейронів з 8 оптичними входами та 8 оптичними виходами розміром 40 x 40 x 40 мм.

3. Розроблений апаратно-програмний стенд для тестування та автоматичного вимірювання характеристик ФІС. За допомогою цього стенду перевірена робота діючого прототипу ФІС та доведено, що запропонована ФІС обробляє сигнали у повній відповідності до технічного завдання. Це означає, що ФІС запропонованої конструкції можуть бути використані для апаратної реалізації нейронних мереж у системах з штучним інтелектом.

					<i>П091мн.000001.000 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Відм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

6. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «ФОТОННА ІНТЕГРАЛЬНА СХЕМА ДЛЯ СИСТЕМ З ШТУЧНИМ ІНТЕЛЕКТОМ»

6.1 Опис ідеї проекту

В попередніх розділах було розглянуто існуючі методи та чіпи для моделювання нейронів, було запропоновано нову модель фотонної інтегральної схеми для моделювання нейрону, проведені розрахунки вагових коефіцієнтів, запропоновано літографічну установку для створення нашого чіпу, описано результати експериментів з розробленого прототипу. В цьому розділі буде проведено аналіз стартап проекту запропонованої архітектури фотонної інтегральної схеми.

Ідея проекту полягає у використанні оптичних елементів для нейронної мереж, що дозволить робити нейроморфні розрахунки у пасивному режимі. Тобто використання оптичних елементів значно підвищить швидкість, точність розрахунків при менших затрат енергоспоживання.

У таблиці 5.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 6.1. Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створити економічну та компактну фотонно-інтегральну систему з штучним інтелектом для розпізнавання об'єктів та моделювання нейроморфних розрахунків	1. Обчислювальна техніка	Збільшення швидкості обробки та передачі інформації, збільшення кпд, зменшення затухання сигналів.
	2. Обробка зображень	
	3. Розпізнавання об'єктів	
	4 Нейроморфне моделювання	

Отже, пропонується нова архітектура нейронної мережі з використанням фотонної інтегральної схеми, яка може бути використана для моделювання

нейроморфного розрахунку, розпізнавання об'єкту, обробки зображень, створення фільтрів.

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

– визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;

– визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

– проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 5.2).

Таблиця 6.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристик и ідеї	(Потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабк а стор.)	N (нейтр . стор.)	S (сильн а стор.)
		Мій проект	Intel	SpiNNake r	Neurogr id			
1	Вартість програмного забезпечення (економічні)	\$60.	\$100	–	–			+
2	Кількість розробників (технологічні)	10-15	60-70	45-55	20 – 30		+	
3	Швидкість	До 1,5 мільйона нейронів	До 5000 нейронів	До 10000 нейронів	До 1 мільйон нейронів			+
4	Компактність	10 x 10 мм	13 x 10.1 мм	10,386 x 9,786 мм	11,9 x 13,9 мм			+

Сильними сторонами ідеї проекту є низька ціна на програмне забезпечення, швидкість роботи (так як система використовує оптичні компоненти, розрахунок відбувається майже зі швидкістю світла), компактність (кількість нейроморфних елементів буде набагато більшою за конкурентів). Нейтральною стороною є кількість розробників.

6.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводимо аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею створення проекту.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 5.3.

Таблиця 6.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Створити економічну, компактну, побудовано виключно на оптичних компонентах систему, яка забезпечує швидку обробку даних для застосування в нейронних комп'ютерах, для обробки зображень, розпізнавання об'єктів, моделювання нейроморфних систем.	Оптичні системи	Наявні	Важко-доступні
		Аналогові системи	Наявні	Доступні
		Цифрові системи	Наявні	Доступні
		Комбіновані системи	Наявні	Доступні
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: оптична технологія				

Проаналізувавши таблицю можна зробити висновок що наш проект буде реалізовуватися оптичною системою. Цей метод мало використовується, оскільки моделювання оптичних систем є важкою та дорогою задачею, мало кому вдається використати оптичні компоненти для створення таких систем. Технології обраного методу не є легкою, але реальна. Для цього ми створюємо ще один прилад (літографічну установку), яке здешевить та прискорить розробку таких систем.

Проаналізувавши обраний метод, та зробивши певні доповнення в технології, можна зробити висновок, що реалізація проекту можлива.

6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

Визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 5.4).

Таблиця 6.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од.	10
2	Загальний обсяг продаж, грн./ум.од.	Відсутня інформація.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає (10%/рік)
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та специфікації	Відсутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	20%

Зробивши попередній аналіз ринку, можна зробити висновок, що потенційний ринок є привабливим для входження, оскільки динаміка ринку є позитивною, немає специфічних вимог до стандартизації та специфікації та немає обмежень для виходу на ринок.

Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5.5).

Таблиця 6.5 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Необхідність у швидкій обробці даних безпечних та швидких доставках товарів	Компанії які займаються обробкою зображень	Ціна, Результативність, Швидкість компактність	Низька ціна, висока швидкість інформації, компактність, універсальність використання.
2	Необхідність у зменшенні енергоспоживання (здійснення обчислень у пасивному режимі)	Компанії які розробляють обчислювальні машини	Ціна, Результативність, Швидкість компактність	Низька ціна, висока швидкість інформації, компактність, універсальність використання.

Цільовою аудиторією є компанії, які розробляють обчислювальні машини та займаються обробкою зображень. Різна поведінка споживачів спричинена ціною, швидкодією, результативністю методів, компактністю та універсальністю використання. Різницею у поведінці компаній є ціна, результативність та швидкість.

					1091мн.000001.000 ПЗ	Лист
Відм.	Лист	№ докum.	Підпис	Дата		

Таблиця 6.6 Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Створення нових економічних та швидких методів обробки даних	Створення нових методів обробки, які будуть більш точними, швидкими та економічними	Оптимізація запропонованого методу, освоєння нових методів з використанням штучного інтелекту
2	Оптимізація існуючих методів	Вдосконалення існуючих методів обробки	Оптимізація запропонованого методу, освоєння нових методів з використанням штучного інтелекту
3	Вихід на ринок більш відомих компаній	Вихід на ринок компаній, які більш відомі і яким клієнти більше довіряють	Ошук методів співпраці з компаніями, які є їх конкурентами, але які не вийшли на ринок, в якому є ваша компанія
4	Використання квантових ефектів штучного інтелекту	Використання в нейронних мережах технології квантових ефектів	Освоєння нових методів з використанням квантових ефектів
5	Використання нових більш швидких методів обробки зображень	Використання нових технологій задля обробки зображень	Вихід на інший ринок, який потребує обробки інформації, огляд можливих методів для забезпечення швидкодії в нових методах

Аналіз факторів загроз показав, що поведінка конкурентів може завадити виходу на ринок, або може спричинити вихід з нього. Конкуренти можуть створити новий метод, або вдосконалити свої існуючі методи. Також, компанії можуть використовувати нові методи обробки даних. Тому основними реакціями компанії є оптимізація запропонованого методу та пошук нових результативніших рішень.

Таблиця 6.7 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Потреба клієнтів в результативнішому методі	Клієнти хочуть отримати більш результативні методи	Вдосконалення запропонованого методу
2	Винайдення простого та результативного методу	При оптимізації та аналізу методів можливе винайдення нового методу обробки даних	Оптимізація запропонованого методу та аналіз існуючих
3	Можливість здешевлення методу	Нові технології можуть сприяти зменшенню ціни	Впровадження нових технологій
4	Вихід на міжнародний ринок	Можливість виходу на міжнародний ринок	Впровадження нових технологій, вдосконалення запропонованого методу

Аналіз факторів можливостей показав, що поведінка споживачів може призвести до вдосконалення методу, виходу на міжнародний ринок, можливості використання новітніх технологій. Тому, є необхідність в подальшому шукати методи вдосконалення методу, аналіз існуючих та впровадження нових технологій.

Таблиця 6.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Монополістична конкуренція	Галузь в основному є конкурентоспроможною, проте існує декілька явних лідерів	Щоб вийти на ринок необхідно мати конкурентний чіп
2. Глобальний рівень конкурентної боротьби	Закордонні та Українські конкуренти	Вихід на Український ринок не передбачає ніяких проблем, оскільки в Україні не має подібних систем, проте вихід на міжнародну арену може бути складним
4. Товарно-видова конкуренція	Конкуренція між товарами одного виду	Оптимізація запропонованого чіпу та його оптимізація
5. Ціновий характер	Продукція дуже дорога	Зменшити вартість розробки, впровадити нові технології

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку показав, що конкуренція в Україні відсутня, але конкуренція на світовому ринку дуже суттєва, що ускладнює вихід на ринок, тому необхідно створити якісний чіп. Але, наш метод є недорогим, більш швидким та не потребує багато енергії, тому може конкурувати з існуючими компаніями. Для впровадження методу за кордон, необхідно впроваджувати нові технології.

Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі.

Таблиця 6.9 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	HICANN Neurogrid SpiNNaker TrueNorth Enlight256 Intel	Наявність товарних знаків, розмір капіталовкладень, доступ до ресурсів, можливість використання новітніх технологій	Значення розміру поставок для постачальників, налагоджені поставки	Торгівельні знаки, прибутки, система інформації	Електроні схеми для створення нейронної мережі
Висновки:	В межах України конкурентна боротьба неінтенсивна	Є можливості входу на ринок в Україні за рахунок неявної конкуренції, на міжнародний ринок – за рахунок новітнього чіпу	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Клієнти диктують певні умови: впізнавальності продукту, ціна, реклама, якість	Товари-замінники є

Аналіз конкурентного ринку показав, що в Україні не існує конкуренції, тому вихід на ринок спрощений. На погляд нашої команди, вихід на міжнародний ринок можливий, не дивлячись на важку конкуренцію та наявність товарів-замінників, оскільки технологія є новою, економічною, енергоекономічною та швидкою.

Після всіх аналізів визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності.

Таблиця 6.10 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Потреби споживачів	Потреби споживачів обумовлюють необхідність розробки проекту
2	Ціна та собівартість продукції	Рівень цін повинен бути менший ніж ціни конкурентів
3	Швидкість	Швидкість обробки інформації повинна на порядок бути більшою ніж у конкурентів
4	Маркетинговий потенціал	Створити гарний імідж компанії
5	Простота експлуатації	Метод повинен бути простим у використанні для будь-яких користувачів
6	Технічне обслуговування	Міжнародна технічна допомога та обслуговування клієнтів
7	Енергоспоживання	Рівень виористованої енергії повинен бути нижчим.

Результат обґрунтування факторів конкурентоспроможності показав, що існує фактор потреби споживачів, який обумовлює необхідність розробки проекту. Цей проект повинен конкурувати в ціні, швидкодії, енергоспоживанні.

Таблиця 6.11 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Вибір та обґрунтування оптико-електронної системи позиціонування безпілотних літальних апаратів»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з «ФІС»						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Потреби споживачів	5					+		
2	Ціна та собівартість продукції	20							+
3	Швидкодія	8							+
4	Маркетинговий потенціал	4			+				
5	Простота експлуатації	18				+			
6	Технічне обслуговування	6				+			
7	Енергоспоживання	7							+

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «фотонною інтегральною схемою» показав, що в цілому маркетинговий потенціал запропонованого проекту є дещо слабкою стороною у порівнянні з конкурентами, тому необхідно покращувати позиції в цьому напрямку. До сильних факторів конкурентоспроможності можна віднести ціну, швидкодію та енергоспоживання.

Таблиця 6.12 SWOT-аналіз стартап-проекту

<u>Сильні сторони:</u> низька ціна на товар, що дає переваги перед конкурентами, висока швидкодія, низьке енергоспоживання.	<u>Слабкі сторони:</u> слабкий імідж продукції – на ринку певний час компанія буде маловідомою, велика конкуренція.
<u>Можливості:</u> можливість створення нового методу, вдосконалення запропонованого методу; вихід на міжнародний ринок	<u>Загрози:</u> Активність конкурентів – конкуренти можуть запропонувати нові методи; нові потреби споживачів

SWOT-аналіз стартап проекту дає зрозуміти, що сильними сторонами проекту є низька ціна на товар, що дає переваги перед конкурентами, висока швидкодія, низьке енергоспоживання. До слабких сторін належать слабкий імідж продукції – на ринку певний час компанія буде маловідомою, велика конкуренція. Ринкові загрози: активність конкурентів – конкуренти можуть запропонувати нові

					ПО91МН.000001.000 ПЗ	Лист
Відм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

методи; нові потреби споживачів. Ринкові можливості: можливість створення нового методу, вдосконалення запропонованого методу; вихід на міжнародний ринок.

Таблиця 6.13 Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Проведення робіт по підвищенню кваліфікації робітників компанії	60%	1-4 міс.
2	Приймати участь в міжнародних конференціях	45%	3-12 міс.
3	Запросити професійних інженерів в цій галузі	20%	2-6 міс.

На основі SWOT-аналізу було розроблено альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. З усіх альтернатив було обрано проведення робіт по підвищенню кваліфікації робітників компанії – 60%, а строки реалізації – найменшими 1-4 міс. Але не виключається дві інші альтернативи, оскільки вони можуть підвищити імідж серед міжнародних користувачів.

6.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 6.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
	Компанії які займаються обробкою зображень	Готові	1000 копій	Середня	Складно
	Компанії які розробляють обчислювальні машини	Готові	10000 копій	Значна	Складно

Які цільові групи обрано:

Під час аналізу потенційних груп споживачів було прийнято рішення що компанія буде працювати з компаніями, які розробляють обчислювальні машини

Цільовою групою потенційних клієнтів було обрано компанії, які розробляють обчислювальні машини, оскільки ринок в цій аудиторії більший. Всі групи готові сприйняти продукт, але і конкуренція дуже серйозна.

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку.

Таблиця 6.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Проведення робіт по підвищенню кваліфікації робітників компанії	Ексклюзивний розподіл	Підвищення рівня кваліфікації сприятиме оптимізації запропонованого методу, а також винайдення нових.	Стратегія диференціації
2	Запрошення іноземних спеціалістів	Ексклюзивний розподіл	Запрошення іноземних спеціалістів сприятиме розвитку компанії та можливість виходу на міжнародний ринок	Стратегія диференціації

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 6.16).

Таблиця 6.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки?
1	Ні, оскільки у конкурентів реалізовані подібні методи	Компанія буде забирати існуючих споживачів у конкурентів і шукати нових	Ні	Стратегія позиціонування

Найбільш доцільною стратегією конкурентної поведінки в нашому випадку є стратегія позиціонування. Компанія показує чим продукт унікальний, чим корисний споживачу. Тому відбувається позиціонування на особливостях технології, що є важливим для споживачів. Також, з таблиці видно, що товар не є "першопрохідцем", але компанія не буде копіювати основні характеристики товарів у конкурентів.

На основі вимог споживачів з обраного сегменту було розроблено стратегію позиціонування яка визначається у формування ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект

Таблиця 6.17. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Швидкодія	Стратегія диференціації	Використання сучасного методів та підходів для вирішення поставлених задач	Швидкодія, низька ціна, технічне обслуговування
2	Технічне обслуговування			
3	Ціна			

Результатом даного підрозділу є система рішень щодо ринкової поведінки компанії, вона визначає в якому напрямі буде працювати компанія на ринку

6.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Нами було зроблено аналіз конкурентоспроможності товару, висновки по якому представлені у таблиці 6.18.

Таблиця 6.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Компактність	В чіп можна вмістити багато елементів	Товар є компактним, що дає змогу в одному чіпі розмістити дуже велику кількість однакових компонентів для швидкої обробки даних.
2	Економічність	Може придбати більше людей та компаній	Придбати запропонований товар може більша кількість людей і компаній
3	Швидкодія	Майже миттєва обробка великої кількості інформації	Завдяки використанню оптичних компонентів, швидкість обробки даних буде майже миттєва.

З таблиці видно, що товар, який отримають споживачі, задовільнить всі потреби, оскільки ціна буде нижчою, елементи дуже малі, а значить в одному чіпі розміститься більша кількість елементів, що є однією з причин підвищення швидкодії, іншою причиною є використання тільки оптичних елементів.

Таблиця 6.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Фотонна інтегральна схема		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Е/Ор
	1. Компактність	М	Тх
	2. Швидкодія	Нм	Тх
	3. Економічність	М	Е
	4. Потребує менше енергії	Нм	Тх
	Якість: стандарти, нормативи, швидкість, енергоспоживання		
	Пакування: Коробка зі спеціальним роз'ємом під чіп.		
Марка: "АІ"			
III. Товар із підкріпленням	До продажу: вміння проектувати мікро- та нано- технології, проектування оптичних систем		
	Після продажу: не потребує особливих навичок		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патенту на корисну модель, комерційної таємниці			

Опис трьох рівнів моделі товару показав, що ідеєю стартап-проекту є створення фотонної інтегральної схеми. Перевагами проекту є швидкодія, економічність, споживання меншої кількості енергії, компактність одного елемента.. До продажу виробникам потрібно мати особливі навички для створення приладу, а саме вміння проектувати мікро- та нано- технології, проектування оптичних систем. Після продажу клієнти зможуть користуватися без спеціальних навичок, що робить прилад простим у використанні. Проект буде захищено від копіювання за рахунок патенту на корисну модель та комерційної таємниці.

Наступним кроком, визначимо цінові межі, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар. (табл. 6.20).

Таблиця 6.20. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	500 – 3000 \$	500 – 3000 \$	500 – 20000\$	200 – 250\$

З таблиці видно, що встановлений рівень ціни на потенційний товар менший за конкурентів, що дає перевагу перед ними.

Наступним кроком сформуємо систему збуту.

Таблиця 6.21. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна систему збуту
1	На сьогоднішній день клієнти купують продукцію у компанії розробника або у магазинах техніки	- встановлення контактів зі споживачами, їх підтримка; - встановлення контактів з компаніями дистриб'юторами; - розробка і реалізація програм з підтримки лояльності клієнтів; - дослідницька робота зі збору маркетингової інформації.	Дворівневий (між виробником і покупцем послідовно існують гуртовий та роздрібний продавці)	Збут продукції відбуватиметься: 1. безпосередньо через сайт виробника; 2. через фірмові магазини; 3. через дистриб'юторів

Збут товару відбуватиметься декількома шляхами: безпосередньо через сайт виробника; через фірмові магазини; через дистриб'юторів. Завдяки цьому збут товару проходить дуже просто, можна легко встановлювати контакти зі споживачами та їх подальшу підтримку, організувати дослідницьку роботу зі збору маркетингової інформації та розробку і реалізацію програм підтримки лояльності клієнтів

						1091мн.000001.000 ПЗ	Лист
Відм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			

Таблиця 6.22. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного повідомлення
1	Клієнти дізнаються про нові продукти з сайтів компаній, реклами в інтернеті, за рекомендаціями інших людей соціальних мереж,	Соціальні мережі, публікації, інтернет	SMM, контент-маркетинг	Представлення товару з метою залучення та зацікавлення клієнтів	«Фотонна інтегральна схема»

Основний канал інформації про нові технології у клієнтів є інтернет, тому, ключовим було обрано SMM та контент-маркетинг. Основним завданням реклами є привернути увагу до товару нових клієнтів.

6. Організація реалізації стартап-

Мета: довести можливості ефективного організаційного та ресурсного забезпечення проекту; продемонструвати, що запропоновані організаційні рішення дозволять ефективно реалізувати стартап-проект.

Скласти календарний план-графік реалізації проекту за формою, наведеною в табл.

Таблиця 6.23

Календарний план-графік реалізації стартап-проекту

№ з/п	Етапи реалізації	Період реалізації проекту						
		0-й рік ¹				1-й рік	2-й рік	3-й рік
		1-й кв.	2-й кв.	3-й кв.	4-й кв.			
1.	Проведення НДДКР							
2.	Розробка проектних матеріалів і ТЕО							
3.	Робоче проектування і прив'язка проекту							
4.	Створення компанії							
5.	Придбання нематеріальних активів, отримання дозвільних документів тощо							

¹ Тут і далі в стовпці «0-й рік» відображаються види діяльності та (або) витрати, що мають бути понесені до початку основної діяльності за проектом

					ПО91МН.000001.000 ПЗ		Лист
Відм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			

6.	придбання й оренда земельних ділянок, будівель, приміщень, споруд						
7.	Придбання обладнання, устаткування та пристроїв						
8.	Передвиробничі маркетингові дослідження						
9.	Приймально-здавальні випробування						
10	Пусконаладжувальні роботи						
.							
11	Освоєння проектних потужностей						
.							
13	Придбання матеріальних ресурсів						
.							
13	Запуск виробництва						
.							
14	Продаж продукції						
.							

5.2. Визначити потребу у основних засобах (земельних ділянках, будівлях, приміщеннях, спорудах, передавальних пристроях, обладнанні), необхідних для реалізації проекту, та умови їх використання за формою, наведеною в табл. 5.2-5.3.

Таблиця 6.24

Планова потреба у виробничому обладнанні та устаткуванні

№ з/п	Вид обладнання (устаткування, пристрою)	Тип (модель)	Виробник обладнання (устаткування, пристрою)	Терміни постачання	Вартість, тис. грн.
1.	Літографічна установка	FPX-25E	Власне виробництво	2 – 3 дні	26
2.	Компьютери	Vivo AiO V2211CGK-BA011D Black (90PT01U1-M01720)	ASUS	2 – 3 дні	19
3.	Паяльна станція	BK-878L	BAKU	2 – 3 дні	1.668
	Разом:	—	—	—	46.668

Таблиця 6.25

Планова вартість нематеріальних активів

№ з/п	Вид активів	Активи, що можуть бути віднесені до даного виду	Вартість, тис. грн.
1.	Права користування природними ресурсами	(право користування надрами, іншими ресурсами природного середовища, геологічною та іншою інформацією про природне середовище)	-
2.	Права користування майном	(право користування земельною ділянкою відповідно до земельного законодавства, право користування будівлею, право на оренду приміщень тощо)	2

№ з/п	Вид активів	Активи, що можуть бути віднесені до даного виду	Вартість, тис. грн.
3.	Права на комерційні позначення	(права на торговельні марки (знаки для товарів і послуг), комерційні (фірмові) найменування тощо)	-
4.	Права на об'єкти промислової власності	(право на винаходи, корисні моделі, промислові зразки, сорти рослин, породи тварин, компонування інтегральних мікросхем, комерційні таємниці, у тому числі ноу-хау, захист від недобросовісної конкуренції)	15
5.	Авторське право та суміжні з ним права	(право на літературні, художні, музичні твори, комп'ютерні програми, фонограми, відеограми, передачі (програми) тощо)	15
6.	Інші активи	(право на провадження діяльності, використання економічних та інших привілеїв тощо)	-

Таблиця 6.26

Плановий обсяг виробництва продукції стартап-проекту

Вид продукції	Одиниця виміру	Обсяги виробництва за період		
		1-й рік	2-й рік	3-й рік
Фотонна інтегральна схема	тис.шт.	200	500	1000

Таблиця 6.27

Сукупні інвестиційні витрати на реалізацію стартап-проекту

№ з/п	Стаття витрат	Сукупні витрати за період, тис. грн.			
		0-й рік	1-й рік	2-й рік	3-й рік
1.	Загальні початкові витрати (табл. 3.8)	524	-	-	-
2.	Загальногосподарські витрати (табл. 3.9)	1425	1425	1625	1725
3.	Витрати на оплату праці (табл. 3.7)				
3.1.	адміністративного персоналу	248	248	248	248
3.2.	промислово-виробничого персоналу	1088	1088	1248	1348
	<i>Разом:</i>	1950	1425	1625	1725

Таблиця 6.28

Визначення основних фінансово-економічних показників проекту

№ з/п	Показник	Значення по роках		
		1-й рік	2-й рік	3-й рік
1.	Обсяг виробництва продукції в натуральних показниках	200000	300000	500000
2.	Собівартість одиниці продукції, тис. грн.	0.00975	0.00475	0.00285
3.	Собівартість виробництва продукції, тис. грн. ($3 = 1 \cdot 2$)	1950	1625	1725
4.	Обсяг реалізації продукції в натуральних показниках	200000	300000	500000
5.	Ціна реалізації продукції без ПДВ, тис. грн.	0.025	0.02	0.02
6.	Виручка від реалізації продукції без ПДВ, тис. грн. ($6 = 4 \cdot 5$)	5000	6000	10000
7.	Податок на додану вартість (ПДВ), тис. грн.	1985	2382	3970

П091МН.000001.000 ПЗ

Лист

Відм. Лист № докум. Підпис Дата

8.	Валовий прибуток ($8 = 6 - 3$)	4025	4575	8575
9.	Податок на прибуток	724.5	823.5	1543.5
10.	Чистий прибуток ($10 = 8 - 9$)	3300.5	3751.5	7031.5

Таблиця 6.29

Розрахунок безбитковості і запасу фінансової міцності

№ з/п	Назва показника	Одиниця виміру	Значення
1.	Рівень безбитковості	<i>тис. грн.</i>	1500
3.	Запас фінансової міцності	<i>тис. грн.</i>	3050
3.	Рентабельність продажів	%	66
4.	Період окупності проекту	<i>роки</i>	0.6
5.	Рентабельність (окупність) інвестицій	%	100

6.7 Висновки до розділу 6

Узагальнюючи проведений аналіз стартап проекту можна зробити висновок.

Попит на продукцію є, що підтверджується позитивною динамікою ринку та потребі в створенні нових технологій та методів для нейронної мережі.

Інтенсивність конкуренції в сегменті в рамках України не значна, а вхід у сегмент є простим, але ускладнюється якщо виходити на міжнародний ринок.

Цільовою групою потенційних клієнтів є компанії, які розробляють обчислювальні машини та компанії, що використовують обробку зображень (автомобільні компанії, аерокосмічні компанії).

В якості альтернативи впровадження проекту доцільно обрати проведення робіт по підвищенню кваліфікації робітників компанії. За межами України є необхідність у виступах на конференціях та примати участь у міжнародних виставках.

Перевагою даного проекту є підвищення швидкодії, результативності та компактності в порівнянні з нижчим рівнем ціни на проект. Проект буде захищено від копіювання за рахунок патенту на корисну модель та комерційної таємниці.

Оскільки цільова аудиторія дізнається про нову продукцію переважно через мережу інтернет, спеціальних видань, профільних сайтів та публікацій, було вирішено, що найдоцільнішим шляхом розповсюдження продукції є сайт

виробника. Також, необхідним є створювати наукові публікації та виступи на наукових конференціях.

Здійснення (імплементация) запропонованого проекту є доцільною, оскільки технології та проекти зі створення нейроморфної мережі залишаються та будуть актуальними у майбутньому.

					<i>ПО91МН.000001.000 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Відм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Список літератури

- [1] М.В.Бураков, Нейронные сети и нейроконтроллеры, 2013.
- [2] Л. Наука, Общая физиология нервной системы., 1979.
- [3] Хабр, «Как работает наш мозг или как смоделировать душу?,» [Онлайновый]. Available: <https://habr.com/ru/post/383753/>.
- [4] D. B. A. G. M. H. K. M. a. S. M. Johannes Schemmel, «A Wafer-Scale Neuromorphic Hardware System for,» 2010.
- [5] P. G. E. M. S. C. A. R. C. J.-M. B. M. I. R. A.-I. J. V. A. P. A. M. a. K. B. Ben Varkey Benjamin, «Neurogrid: A Mixed-Analog-Digital Multichip System for Large-Scale Neural Simulations,» 2014.
- [6] F. I. F. G. S. T. a. L. A. P. Steve B. Furber, «The SpiNNaker Project,» 2014.
- [7] I. P. A. M. J. V. A. A. S. C. R. A. A. A. D. J. B. J. L. M. T. M. D. R. B. C. d. N. Steven K. Essera, «Convolutional networks for fast, energy-efficient,» 2016.
- [8] A. T. T. F. d. L. M. A. N. Bhavin J. Shastri, «Principles of Neuromorphic Photonics: A Volume in the Encyclopedia of Complexity and Systems Science, Second Edition,» 2018.
- [9] H. P. Lenslet Ltd Galgalei Naplada St, « EnLight256 8000 Giga MAC / sec fixed point DSP,» 2003. [Онлайновый]. Available: www.lenslet.com.
- [10] І. Б. С. Я. О.Л. Колесницький, Пристрої для моделювання нейрона. Аналітичний огляд винаходів та патентів.
- [11] Г. И. Фурсин, Модель формального нейрона.
- [12] Ю. В. Ч. Ю. А. Б. Г. А. Г. А. В. Каляев, «Устройство для моделирования нейрона».
- [13] А. А. Кирин, «Устройство для воспроизведения передаточной функции нервной клетки».
- [14] Б. А. С. Ю. Ф. Т. М. М. Кряхтунова, « Устройство для моделирования нейрона».

ПО91мн.000001.000 ПЗ

Лист

Відм. Лист № докум. Підпис Дата

- [15] Е. Д. Ц. В. Г. Иващенко, Модель нейрона.
- [16] Е. М. Снежко, «Устройство для моделирования нейрона».
- [17] В. П. К. М. Б. Н. С. А. В. О. К. Колесницький, «Пат. 22956 Україна, МПК G 06 F 7/50. Модель нейрона».
- [18] Т. Thomas, «Biomorphic analog pulse – coupled neural circuits,» 2001.
- [19] К. О. К., «Optoelectronic Implementation of Pulsed Neurons and Neural Networks Using Bispin-Devices,» 2010.
- [20] І. Б. О.К. Колесницький, «компактна оптоелектронна реалізація імпульсної нейронної мережі,» 2010.
- [21] С. П. І. Б. Г. К. Колесницький, «експериментальні дослідження імпульсного нейроелемента на тиристорі,» 2010.
- [22] Г. О. Л. А. Мартинюк Т.Б., «Пристрій для моделювання адаптивного нейрона». Україна Патент u200607119, 2006.
- [23] Х. І. К. Л. С. Л. Мартинюк Т.Б., «ПРИСТРІЙ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЙРОНА». Україна Патент u201002058, 2010.
- [24] Б. І. П. С. К. Г. Колесницький О.К., «ПРИСТРІЙ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЙРОНА». Україна Патент u201008531, 2010.
- [25] Л. О. П. А. Б. Д. Філинюк М.А., «НЕЙРОННИЙ ЕЛЕМЕНТ НА НЕГАТРОНІ». Україна Патент u 2011 15358, 2012.
- [26] Л. О. П. А. Б. Д. Філинюк М.А., «НЕЙРОННИЙ ЕЛЕМЕНТ НА НЕГАТРОНІ». Україна Патент u 2011 15321, 2011.
- [27] Л. О. П. А. Б. Д. Філинюк М.А., « НЕЙРОННИЙ ЕЛЕМЕНТ НА С-НЕГАТРОНІ». Україна Патент u 2011 15359, 2012.
- [28] Л. Ю. К. Г. Колесницький О.К., «МОДЕЛЬ НЕЙРОНА». Україна Патент u 2012 07181, 2012.
- [29] П. А. Б. Д. Лазарєв О.О., «НЕЙРОННИЙ ЕЛЕМЕНТ НА R-НЕГАТРОНАХ». Україна Патент u 2012 04433, 2012.

- [30] П. А. Б. Д. О. К. Лазарев О.О., «НЕЙРОННИЙ ЕЛЕМЕНТ НА R-НЕГАТРОНАХ». Україна Патент u 2012 04480, 2013.
- [31] С.Короткий, «Нейронные сети Хопфилда и Хэмминга».

					ПО91МН.000001.000 ПЗ	Лист
Відм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		