

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерна інженерія та управління
(повна назва)

Кафедра Автоматизація проектування обчислювальної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший(бакалаврський)

Пристрій керування світлодіодною матрицею на основі мікроконтролера

(тема)

Виконав: здобувач 4 року навчання,
групи КІУКІ-21-9

Гурєєва В.М.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Комп'ютерна
інженерія

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Литвинова Є.І.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

Чумаченко С.В.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

2025_ р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерна інженерія та управління
Кафедра Автоматизація проектування обчислювальної техніки
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютерна інженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)
« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Гурєєвій Вікторії Миколаївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Пристрій керування світлодіодною матрицею на основі мікроконтролера

затверджена наказом університету від " 21 " 05 2025 р. № 403 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 20.06.2025

3. Вихідні дані до роботи _____

Мікроконтролер ArduinoNano;

функція – керування світлодіодною матрицею;

каскадові модулі MAX7219 із матрицями 8x8 для утворення дисплею;

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Аналіз предметної галузі та постановка задачі проектування.

Огляд аналогічних пристроїв. Розробка структури пристрою.

Розробка програмної частини пристрою.

Розробка апаратної частини пристрою.

Тестування роботи пристрою.

Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) _____


12 слайдів


6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача теми проекту, узгодження і затвердження теми	02.05.2025-02.05.2025	
2	Аналіз проблемної галузі, постановка задачі, вибір інструментальних засобів	03.05.2025 -8.05.2025	
3	Розробка електричної схеми пристрою	9.05.2025 -12.05.2025	
4	Реалізація макету пристрою	13.05.2025 -20.05.2025	
5	Розробка програми для мікроконтролера	25.05.2025 -29.05.2025	
6	Тестування системи	30.05.2025 -04.06.2025	
7	Оформлення пояснювальної записки	05.06.2025 -07.06.2025	
8	Перевірка виконаного проекту керівником, допуск до захисту	08.06.2025 -10.06.2025	
9	Захист проекту	16.06.2025 -25.06.2025	

Здобувач  _____
(підпис)

Керівник роботи  _____ проф. Литвинова Є. І.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка дипломної роботи: 45 с., 15 рис., 1 табл., 29 джерел.

СВІТЛОДІОДНА МАТРИЦЯ, МІКРОКОНТРОЛЕР, КЕРУВАННЯ, ДРАЙВЕР, АЛГОРИТМ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ДИНАМІЧНА ІНДИКАЦІЯ.

Метою кваліфікаційної роботи є зменшення вартості пристрою керування світлодіодною матрицею за рахунок використання мікроконтролера.

У теоретичній частині аналізуються особливості роботи світлодіодних дисплеїв, принципи динамічного та статичного керування, здійснюється вибір мікроконтролера та драйверів. Практична частина містить розробку апаратної схеми пристрою, алгоритму керування, коду програмного забезпечення та отримання результатів тестування системи.

Результатом дослідження є пристрій керування світлодіодною матрицею, що забезпечує точне та енергоефективне відображення інформації. Отримані результати можуть бути використані у створенні інформаційних панелей, рекламних дисплеїв та індикаторів у різних сферах.

ABSTRACT

Explanatory Note for the Qualification Work: 45pages, 15 figures, 1 table, 29 references.

LED MATRIX, MICROCONTROLLER, CONTROL, DRIVER, ALGORITHM, SOFTWARE, DYNAMIC INDICATION.

The aim of the qualification work is to reduce the cost of a device for controlling an LED matrix by utilizing a microcontroller. The theoretical part analyzes the operational features of LED displays, principles of dynamic and static control, and the selection of microcontrollers and drivers. The practical part includes the development of the device's hardware schematic, control algorithm, software code, and the results of system testing.

The result of the research is a device for controlling an LED matrix that ensures accurate and energy-efficient information display. The obtained results can be applied in the creation of information panels, advertising displays, and indicators in various fields.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП.....	8
1 ОГЛЯД АНАЛОГІЧНИХ ПРИСТРОЇВ	11
1.1 Світлодіодні матриці 8x8 із драйвером MAX7219	11
1.2 Семисегментні дисплеї з драйвером TM1637	13
1.3 Комерційні LED-дисплеї (RGB-матриці)	14
1.4 OLED-дисплеї (I2C, 128x64 пікселів)	15
1.5 Порівняльний аналіз та обґрунтування вибору	17
2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ПРИСТРОЮ	19
2.1. Опис компонентів	19
2.1.1 Мікроконтролер Arduino Nano	19
2.1.2 Світлодіодні матриці 8x8 із драйвером MAX7219	20
2.2. Схема підключення	20
2.3. Принцип роботи	21
2.4. Блок-схема структури пристрою	22
2.5. Можливості розширення	22
3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ТА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ.....	24
3.1. Апаратна частина	24
3.2. Програмна частина	26
4 ТЕСТУВАННЯ	30
4.1. Підготовка до тестування та етапи	30
4.2. Результати тестування	32
4.3. Рекомендації за результатами тестування	38
ВИСНОВКИ	39
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	42
ДОДАТОК А	46
ДОДАТОК Б.	52

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

MAX7219 – Інтегрована мікросхема для управління світлодіодними матрицями

CS – ChipSelect – пін вибору мікросхеми в системі SPI

DIN – DataIn – вхідний пін для даних у модулі MAX7219

DOUT – DataOut – вихідний пін для каскадування модулів MAX7219

CLK – Clock – тактовий пін для синхронізації даних у SPI

VCC – Напруга живлення (зазвичай 5 В)

GND – Загальна шина заземлення

ms – Мілісекунда – одиниця часу (1/1000 секунди)

Arduino – Платформа мікроконтролерів для розробки проєктів

MD_MAX72xx – Бібліотека для роботи з модулями MAX7219 у Arduino

PAROLA_HW – Тип апаратного забезпечення модулів MAX7219 у бібліотеці

INTENSITY – Параметр яскравості дисплея (діапазон 0–15)

SPI – SerialPeripheralInterface – послідовний інтерфейс для зв'язку

Wokwi – Онлайн-симулятор для тестування проєктів Arduino

ВСТУП

Світлодіодні матриці активно використовуються у сучасних інформаційних системах для ефективного, економічного та довговічного представлення даних. Їх застосування охоплює такі сфери, як рекламні дисплеї, інформаційні табло, промислові індикатори, транспортні системи та компоненти розумних будинків.

З розвитком цифрових технологій зростає потреба у створенні систем керування світлодіодними матрицями, які можуть функціонувати в реальному часі та адаптивно змінювати контент залежно від заданих параметрів. У цьому аспекті важливу роль відіграють мікроконтролери, що дозволяють впроваджувати складні алгоритми управління, оптимізувати споживання енергії та інтегрувати пристрій із іншими електронними системами.

Розробка пристрою для керування світлодіодною матрицею на базі мікроконтролера є актуальним завданням, яке поєднує апаратне проектування та програмну реалізацію. У цьому процесі важливо враховувати широкий спектр аспектів: вибір відповідного мікроконтролера, проектування електронної схеми, розробку алгоритму функціонування та програмного забезпечення для управління матрицею.

Актуальність проблеми: використання світлодіодних матриць набуває дедалі більшого значення у сучасних технологіях. Від автоматизованих інформаційних систем до транспортних дисплеїв і рекламних панелей – усі ці рішення потребують ефективних методів управління. Традиційні способи відображення даних мають обмеження щодо продуктивності, споживання енергії та адаптивності контенту. Тому розробка пристрою для оптимізації керування світлодіодними матрицями має високу практичну цінність.

Мета кваліфікаційної роботи – зменшення вартості пристрою керування світлодіодною матрицею за рахунок використання мікроконтролера, що забезпечить:

- ефективно та гнучке управління;
- оптимізацію енергоспоживання;
- можливість адаптивного відображення даних;
- інтеграцію з іншими цифровими системами.

Основні завдання:

- провести аналіз сучасних підходів до керування світлодіодними матрицями;
- визначити оптимальний мікроконтролер, драйвери та інші компоненти;
- розробити електричну схему пристрою;
- скласти алгоритм роботи для управління відображенням контенту;
- написати програмне забезпечення для мікроконтролера;
- здійснити тестування готового пристрою та оцінити його продуктивність.

В роботі виконано:

- аналіз наукових джерел для вивчення підходів до управління світлодіодними матрицями;
- проектування електросхем із врахуванням функціональних особливостей мікроконтролерів;
- програмування алгоритмів мовами C/C++ для реалізації функцій пристрою;
- моделювання, тестування та оцінка ефективності розробленого рішення.

Отримані результати можуть бути застосовані у проектуванні:

- інформаційних дисплеїв для громадського транспорту;
- рекламних панелей із динамічним контентом;
- інтелектуальних систем освітлення;
- промислових індикаторів з розширеним функціоналом.

Запропонований пристрій стане базисом для створення цифрових індикаторних систем, здатних адаптивно змінювати візуальний контент відповідно до потреб користувача.

1 ОГЛЯД АНАЛОГІЧНИХ ПРИСТРОЇВ

Світлодіодні дисплеї широко застосовуються в сучасній електроніці для відображення інформації у вигляді тексту, цифр, символів чи простих анімацій. Вони використовуються в інформаційних табло, цифрових годинниках, рекламних панелях, а також у навчальних проєктах для вивчення основ програмування та електроніки. У цьому розділі розглянемо аналогічні пристрої, які використовують світлодіодні матриці або інші типи дисплеїв для виведення інформації, порівняємо їх за основними характеристиками та обґрунтуємо вибір чотирьох світлодіодних матриць 8x8 із драйверами MAX7219 [3] для реалізації нашого проєкту.

1.1 Світлодіодні матриці 8x8 із драйвером MAX7219

Світлодіодні матриці 8x8 із драйвером MAX7219 (рис. 1.1) є популярним рішенням для створення компактних дисплеїв, які можуть відображати текст, символи або прості графічні зображення. Кожен модуль складається з 64 світлодіодів (8 рядків і 8 стовпців), а драйвер MAX7219 [3] забезпечує зручне керування через послідовний інтерфейс SPI [4], що дозволяє підключити матрицю до мікроконтролера, використовуючи лише три цифрові піни. У нашому проєкті використовуються чотири такі матриці, каскадно з'єднані, для створення дисплея з роздільною здатністю 8x32 пікселів, що дозволяє відображати рухомий текст.

Ці матриці часто застосовуються в аматорських проєктах, таких як цифрові годинники, інформаційні табло або навчальні стенди. Наприклад, у проєктах типу "LED MatrixClock" матриця 8x8 із MAX7219 [3] використовується для виведення часу або температури. У проєктах із

каскадуванням, таких як рухомий рядок, кілька матриць об'єднуються для створення більших дисплеїв.

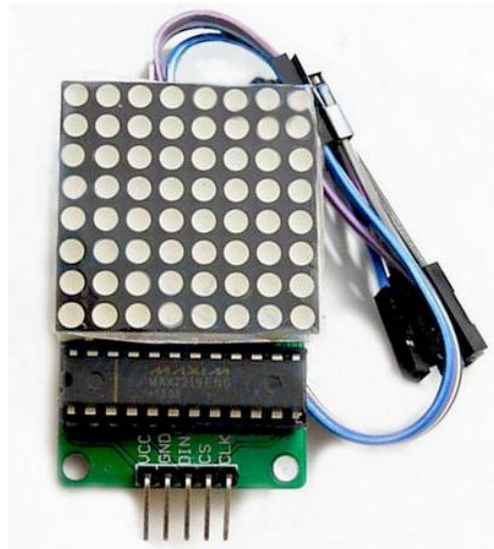


Рисунок 1.1 – Вигляд світлодіодної матриці 8x8 із драйвером MAX7219

Переваги цієї матриці:

- низька ціна: один модуль із матрицею 8x8 коштує приблизно 70–100 гривень, загальна вартість чотирьох модулів – 280–400 гривень;
- простота підключення: потребує лише три піни для керування (DIN, CLK, CS) та живлення (VCC, GND);
- можливість каскадування: чотири матриці об'єднані для створення дисплея 8x32, що ідеально для рухомого рядка;
- низьке енергоспоживання: напруга живлення 4.2–5V, загальний струм для чотирьох модулів до 600 мА (залежно від яскравості).

Недоліки:

- обмежений розмір однієї матриці: 8x8 пікселів дозволяють відображати лише прості символи, але каскадування розширює можливості;
- одноколірність: більшість модулів (наприклад, із червоними чи зеленими світлодіодами) не підтримують кольорове відображення;

– складність програмування для складних анімацій без бібліотек: бібліотека MD_Parola [5] спрощує створення текстових ефектів, таких як рухомий рядок.

1.2 Семисегментні дисплеї з драйвером TM1637

Семисегментні дисплеї з драйвером TM1637 [8] (рис. 1.2) є ще одним популярним рішенням для виведення інформації, зокрема цифр. Такі дисплеї зазвичай мають 4 розряди (іноді більше) і використовуються в цифрових годинниках, лічильниках або для відображення температури чи вологості. Драйвер TM1637 [8] забезпечує зв'язок із мікроконтролером через інтерфейс I2C, що потребує лише двох пінів (CLK і DIO).

Ці дисплеї часто застосовуються в простих проектах, де потрібно відображати числову інформацію. Наприклад, у проєкті "ArduinoDigitalClock" дисплей TM1637 [8] виводить час у форматі HH:MM.



Рисунок 1.2 – Семисегментний дисплей з драйвером TM1637

Переваги цього дисплея:

- дуже низька ціна: 50-80 гривень;
- простота програмування: бібліотеки, такі як TM1637Display, дозволяють легко виводити цифри;
- компактність: 4-розрядний дисплей займає мало місця;

- низьке енергоспоживання: працює від 5V із мінімальним струмом.

Недоліки:

- обмежена функціональність: підходить лише для виведення цифр і кількох символів (наприклад, крапки для годинника);
- неможливість виведення тексту чи анімацій: через конструкцію 7-сегментного дисплея;
- відсутність каскадування: складно об'єднати кілька дисплеїв для створення великого екрана.

1.3 Комерційні LED-дисплеї (RGB-матриці)

Комерційні світлодіодні дисплеї, такі як RGB-матриці (рис. 1.3) на основі світлодіодів WS2812B (NeoPixel) [10], використовуються для створення великих і кольорових інформаційних панелей. Наприклад, гнучка матриця 8x32 (256 пікселів) дозволяє відображати текст, графіку та анімації з різними кольорами. Такі дисплеї популярні в рекламних вивісках, інформаційних табло в громадському транспорті або для створення інтерактивних інсталяцій.



Рисунок 1.3 – Приклад комерційних LED-дисплеїв (RGB-матриці)

Переваги:

- висока роздільна здатність: наприклад, матриця 16x16 (256 пікселів) забезпечує чітке зображення;
- кольорове відображення: кожен піксель може бути будь-якого кольору завдяки RGB-світлодіодам;
- гнучкість: деякі матриці (наприклад, WS2812B [10]) є гнучкими, що дозволяє створювати нестандартні форми;
- підтримка складних анімацій: бібліотеки, такі як FastLED, спрощують програмування.

Недоліки:

- висока ціна: матриця 8x32 коштує 300-600 гривень;
- складність програмування: потребує більше обчислювальних ресурсів для обробки кольорів;
- високе енергоспоживання: матриця 8x32 може споживати до 1-2 А при максимальній яскравості;
- складність підключення: потребує стабільного джерела живлення та додаткових контролерів для великих панелей.

1.4 OLED-дисплеї (I2C, 128x64 пікселів)

OLED-дисплеї (рис. 1.4) з роздільною здатністю 128x64 пікселів (наприклад, на основі контролера SSD1306) є сучасною альтернативою світлодіодним матрицям [9]. Вони використовують органічні світлодіоди, що забезпечують високу контрастність і можливість відображення деталізованої графіки. Такі дисплеї часто застосовуються в проектах, де потрібне якісне відображення тексту чи зображень, наприклад, у портативних пристроях.



Рисунок 1.4 - OLED дисплей графічний SSD1306 I2C 4р 0.96" 128x64

Переваги:

- висока роздільна здатність: 128x64 пікселів дозволяють відображати детальний текст і графіку.
- висока контрастність: кожен піксель світиться незалежно.
- низьке енергоспоживання: OLED-дисплеї [9] споживають енергію лише для увімкнених пікселів.
- простота підключення: інтерфейс I2C потребує лише два піни (SDA, SCL).

Недоліки:

- вища ціна: 150-300 гривень (за даними arduino.ua).
- менша яскравість: порівняно зі світлодіодними матрицями, OLED менш яскраві на сонці [9].
- обмежений термін служби: органічні матеріали з часом деградують.

1.5 Порівняльний аналіз та обґрунтування вибору

Для оцінки аналогічних пристроїв складемо таблицю порівняння за ключовими параметрами:

Таблиця 1.1 – Оцінка аналогічних пристроїв

Пристрій	Вартість (грн.)	Складність програмування	Функціональність	Енерго-споживання	Каскадування
Матриця 8x8 із MAX7219 (4 модулі)	280–400	Низька (бібліотека MD_Parola)	Текст, символи, анімації	Середнє (~600 мА)	Так
Семісегментний дисплей TM1637	50-80	Низька (бібліотека TM1637Display)	Лише цифри	Низьке (~50 мА)	Ні
RGB-матриця WS2812B (8x32)	300-600	Висока (бібліотека FastLED)	Текст, графіка, кольори	Високе (~1-2 А)	Так
OLED-дисплей (128x64)	150-300	Середня (бібліотека Adafruit_SSD1306)	Текст, графіка	Низьке (~50 мА)	Ні

Для реалізації проєкту "Пристрій керування світлодіодною матрицею на основі мікроконтролера" було обрано чотири світлодіодні матриці 8x8 із драйверами MAX7219 [3] з кількох причин. По-перше, ці модулі є оптимальними за співвідношенням ціна/функціональність: загальна вартість чотирьох модулів (280–400 гривень) дозволяє створити дисплей 8x32 для відображення рухомого тексту, що відповідає меті проєкту. По-друге, простота підключення через SPI-інтерфейс і використання бібліотеки MD_Parola [5] значно полегшують програмування, особливо для створення рухомого рядка. MD_Parola забезпечує високорівневу абстракцію, дозволяючи легко налаштувати текстові ефекти без ручного керування

бітовими масивами, що ідеально для навчального проєкту. По-третє, можливість каскадування чотирьох матриць створює розширений дисплей, який підходить для інформаційних табло чи анімацій.

Семисегментні дисплеї з TM1637 [8], хоча й дешевші, не підходять через обмежену функціональність: вони не можуть відображати текст, що суперечить меті проєкту. RGB-матриці WS2812B [10], попри їхню універсальність і підтримку кольорів, занадто дорогі та енерговитратні для простого навчального проєкту. OLED-дисплеї [9], хоча й забезпечують високу якість зображення, дорожчі та менш яскраві, що може бути проблемою при використанні в добре освітленому приміщенні..

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ПРИСТРОЮ

Розробка структури пристрою відіграє вирішальну роль у створенні ефективної системи керування чотирма світлодіодними матрицями 8x8, що базується на мікроконтролері ArduinoNano з інтегрованими драйверами MAX7219. Цей розділ детально розкриває ключові компоненти системи, принципи їхньої взаємодії, схему підключення та логіку функціонування. Метою є створення гнучкої та функціональної архітектури, яка забезпечить реалізацію виведення рухомого тексту (наприклад, "MICROCONTROLLER-BASED LED MATRIX CONTROL DEVICE ") на дисплей 8x32 пікселів, а також відкрисє можливості для подальшого вдосконалення, зокрема інтеграції цифр чи додаткових матриць.

2.1. Опис компонентів

2.1.1 Мікроконтролер ArduinoNano

ArduinoNano [1] являє собою компактну, але потужну плату, побудовану на базі мікроконтролера ATmega328P [2], що функціонує на частоті 16 МГц і підтримує робочу напругу 5V. Ця плата характеризується:

- 14-цифровими виводами, з яких 6 підтримують модуляцію широтного імпульсу (PWM);
- восьми аналоговими входами для зчитування сигналів;
- 32 КБ флеш-пам'яті для зберігання програм, 2 КБ оперативної пам'яті SRAM та 1 КБ EEPROM для збереження даних.

Вибір цієї плати обґрунтований її компактністю, доступною вартістю (близько 200-300 гривень) та широкою підтримкою спільноти, що забезпечує доступ до бібліотек, таких як MD_Parola, які значно спрощують

розробку. Плюс саме ця плата доступна в багатьох симуляторах, що дає багато можливостей для нашого проєкту.

2.1.2 Світлодіодні матриці 8x8 із драйвером MAX7219

Чотири модулі, кожен з яких складається з 64 світлодіодів, розподілених у матриці 8x8, що дозволяє створювати різноманітні візуальні ефекти. Драйвер MAX7219 [3], інтегрований у модуль, забезпечує ефективне керування матрицею через послідовний інтерфейс SPI [4], зменшуючи кількість необхідних з'єднань до трьох основних ліній. Основні характеристики:

- робоча напруга: 4.2-5V;
- максимальний струм споживання одного модуля: до 150 мА (для чотирьох модулів – до 600 мА);
- підтримка каскадування та регулювання яскравості від 0 до 15.

Такі модулі вирізняються простотою підключення, високою швидкістю оновлення зображення та можливістю масштабування, що робить їх ідеальними для навчальних і прикладних проєктів.

2.2. Схема підключення

Схема підключення є фундаментом апаратної реалізації й визначає оптимальну взаємодію між мікроконтролером ArduinoNano та матрицею MAX7219. Основні з'єднання включають:

- DIN (вхід даних) → PIN 11 (цифровий пін Arduino);
- CLK (тактовий сигнал) → PIN 13 (цифровий пін Arduino);
- CS (вибір чипа) → PIN 10 (цифровий пін Arduino);
- VCC → 5V (живлення від Arduino або зовнішнього джерела);
- GND → GND (загальна земля).

Для забезпечення стабільної роботи, особливо при максимальній яскравості, рекомендовано використовувати зовнішнє джерело живлення 5V

із струмом до 1А, щоб уникнути перевантаження вбудованого регулятора Arduino.

Детальна схема підключення, яка відображає всі з'єднання між ArduinoNano та матрицею MAX7219, де було взято 4 девайса (рис. 2.1). Ця схема підкреслює ключову роль ліній SPI (DIN, CLK, CS) для передачі даних та важливість правильного підключення джерела живлення (VCC, GND) для надійної експлуатації.

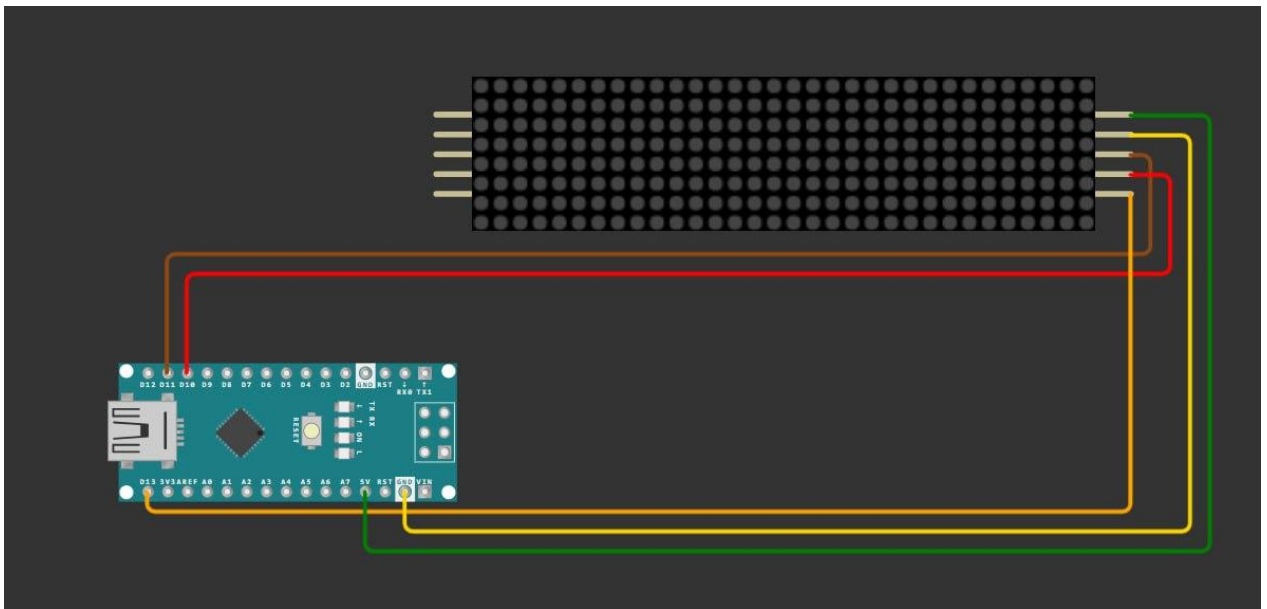


Рисунок 2.1 – Детальна схема підключення пристрою в симуляторі Wokwi

2.3. Принцип роботи

Функціонування пристрою базується на чітко визначеному циклі операцій:

Ініціалізація: Arduino через MD_Parola активує матриці, встановлює яскравість і очищає дисплей.

Обробка даних: текст "MICROCONTROLLER-BASED LED MATRIX CONTROL DEVICE " передається через SPI до MAX7219, використовуючи вбудований шрифт MD_Parola

Оновлення дисплея: чотири модулі синхронно відображають рухомий рядок.

2.4. Блок-схема структури пристрою

Графічна інтерпретація логічної структури пристрою (рис. 2.2). Вона включає:

- ArduinoNano як центральний елемент, що генерує команди та дані для відображення;
- SPI-протокол як канал зв'язку для передачі інформації;
- MAX7219 із матрицею 8x32 як виконавчий модуль, що перетворює дані в візуальний сигнал;
- вихідний результат — відображення тексту на дисплеї.

Ця блок-схема чітко ілюструє потік даних: від генерації команд до їхньої реалізації на матриці, що полегшує розуміння роботи системи.

2.5. Можливості розширення

Розроблена структура відкриває широкі перспективи для вдосконалення:

- каскадування матриць: з'єднання кількох модулів MAX7219 (до 8 за специфікацією) для створення більших дисплеїв, таких як 8x40 або 8x64 пікселі;
- інтеграція датчиків: додавання модулів, наприклад, DHT11 [11], для відображення температури чи інших параметрів;
- інтерактивність: включення кнопок для динамічного вибору тексту чи зміни режимів роботи, що підвищить функціональність пристрою.

Створена структура пристрою забезпечує надійну основу для реалізації виведення тексту на світлодіодну матрицю 8x32. Завдяки оптимізованій схемі підключення, ефективному використанню SPI-протоколу [4] та гнучкості бібліотеки MD_Parola [5], система не лише виконує основну функцію, а й пропонує значний потенціал для подальшого розширення та адаптації до нових завдань.

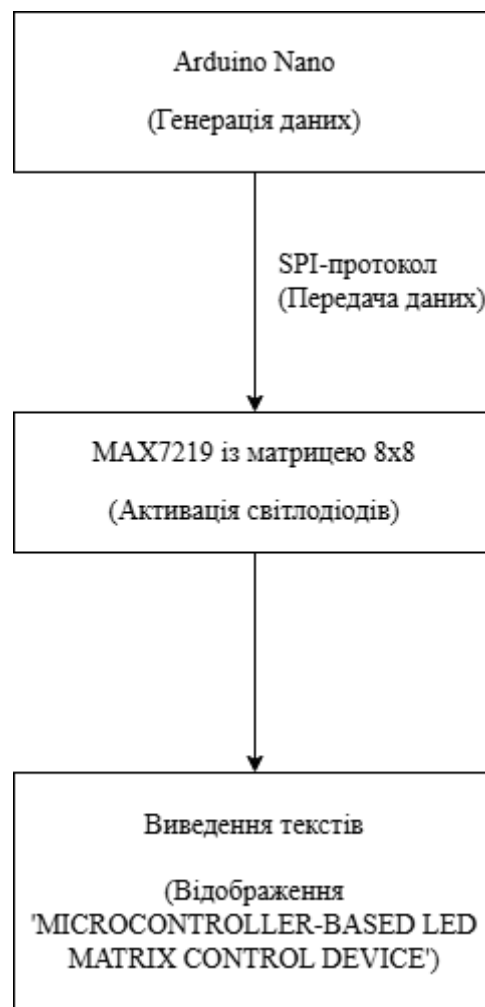


Рисунок 2.2 – Блок-схема роботи пристрою

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ТА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ

Розділ "Розробка програмної та апаратної частини" є ключовим етапом реалізації пристрою для керування світлодіодною матрицею, який базується на мікроконтролері ArduinoNano та чотирьох каскадованих модулях MAX7219 із матрицями 8x8, що утворюють дисплей із роздільною здатністю 8x32 пікселів. Метою цього етапу є створення надійної апаратної платформи, що інтегрує компоненти в єдину систему з урахуванням особливостей каскадування, а також розробка програмного забезпечення для плавного відображення рухомого тексту "MICROCONTROLLER-BASED LED MATRIX CONTROL DEVICE" з анімаційним ефектом прокрутки. Процес охоплює вибір апаратних компонентів, проектування схеми підключення з урахуванням живлення та синхронізації, створення алгоритмів програмного забезпечення, адаптованих до розширеного дисплея, та забезпечення гнучкості системи для подальшого розширення, наприклад, через додавання цифр чи інтеграцію зовнішніх датчиків. Особлива увага приділена технічним аспектам реалізації, що підкреслює наукову цінність роботи.

3.1. Апаратна частина

Апаратна реалізація пристрою становить основу його функціонування, вимагаючи ретельного вибору компонентів та їхньої інтеграції з урахуванням каскадованого з'єднання. Центральним елементом є мікроконтролер ArduinoNano, який виконує роль керуючого модуля, тоді як чотири модулі світлодіодних матриць 8x8 із драйверами MAX7219 формують візуальний інтерфейс із роздільною здатністю 8x32 пікселів. Компоненти об'єднані через схему підключення, яка враховує вимоги до живлення, синхронізації та передачі даних.

Мікроконтролер ArduinoNano [1] – компактна плата на базі чипа ATmega328P [2] від Microchip Technology з 8-бітною архітектурою AVR. Плата працює на частоті 16 МГц завдяки кварцовому резонатору, що забезпечує точну синхронізацію сигналів, необхідну для керування каскадом модулів. Робоча напруга становить 5V, з можливістю живлення від 7–12V через вбудований стабілізатор LM7805, який забезпечує до 500 мА з захистом від перевантаження. ArduinoNano має 14 цифрових пінів (6 із підтримкою PWM із 8-бітною роздільною здатністю), 8 аналогових входів із 10-бітною роздільною здатністю (0–1023) для потенційної інтеграції датчиків, таких як DHT11, та пам'ять: 32 КБ флеш (2 КБ для бутлоадера), 2 КБ SRAM, 1 КБ EEPROM. Енергоспоживання в активному режимі становить ~19 мА, у режимі глибокого сну – ~0.1 мА. Робочий температурний діапазон від -40°C до +85°C робить плату універсальною. Вибір обґрунтований компактними розмірами (18x45 мм), вартістю (200–300 гривень) і підтримкою бібліотеки MD_Parola, яка спрощує керування чотирма матрицями.

Чотири модулі світлодіодних матриць 8x8 із драйверами MAX7219 утворюють дисплей 8x32 пікселів. Кожен модуль містить 64 світлодіоди (8 рядків, 8 стовпців) із червоним випромінюванням (620–630 нм) і струмом до

20 мА на сегмент. Один модуль споживає до 150 мА при максимальній яскравості, чотири разом – до 600 мА, що вимагає зовнішнього джерела живлення. Драйвер MAX7219 [3], виконаний за CMOS-технологією, забезпечує керування через SPI-інтерфейс, використовуючи п'ять контактів: VCC, GND, DIN, CLK, CS. Робоча напруга – 4.2–5.5V (рекомендується 5V), частота оновлення – до 800 Гц, що гарантує плавність анімації. Яскравість регулюється в 16 рівнях (від 0 до 15). Розміри модуля – 32x32 мм, каскадування через пін DOUT дозволяє об'єднати до восьми пристроїв. У проекті чотири модулі з'єднані послідовно: перший відповідає колонкам 0–7, другий – 8–15, третій – 16–23, четвертий – 24–31. Вибір обґрунтований вартістю (70–100 гривень за модуль, загалом 280–400 гривень), простотою інтеграції та можливістю масштабування.

Схема підключення базується на протоколі SPI [4]. Перший модуль підключений: DIN до піна 11 (MOSI), CLK до піна 13 (SCK), CS до піна 10 (SS). DOUT першого модуля з'єднаний із DIN другого, другого – із DIN третього, третього – із DIN четвертого, утворюючи ланцюжок. Лінії CLK і CS спільні для всіх модулів (піни 13 і 10). Живлення подається через VCC (5V) і GND, з використанням зовнішнього блоку 5V/1A через споживання до 600 мА. Для стабілізації додано конденсатори 10 мкФ між VCC і GND на кожному модулі. Швидкість SPI теоретично досягає 10 Мбіт/с, але з бібліотекою MD_Parola обмежується ~100 Кбіт/с через програмну обробку. Довжина кабелів для SPI не перевищує 1 м, щоб уникнути спотворень. Використано штиркові роз'єми для надійності та зручності монтажу.

3.2. Програмна частина

Програмна частина є інтелектуальним ядром пристрою, реалізуючи рухомий рядок "MICROCONTROLLER-BASED LED MATRIX CONTROL DEVICE" на дисплеї 8x32 пікселів, створеному чотирма каскадованими модулями MAX7219. Розробка велася в інтегрованому середовищі Arduino IDE 2.0.3 на мові C/C++ із використанням бібліотеки MD_Parola версії 3.6.0 та залежної MD_MAX72xx [7], які забезпечують стабільну роботу, синхронізацію модулів і підтримку текстових анімацій.

Вибір бібліотеки: На початковому етапі розглядалася бібліотека LedControl, яка підтримує базові операції з матрицями MAX7219, але вимагає ручного керування бітовими масивами для відображення символів, що ускладнює створення складних текстових ефектів. Бібліотека MD_Parola була обрана завдяки її високорівневій абстракції, підтримці каскадування, вбудованим шрифтам і методам для створення рухомого рядка, таким як displayScroll. Вона також сумісна з симулятором Wokwi, що полегшило тестування, і ефективно використовує обмежену пам'ять SRAM (2 КБ) мікроконтролера ArduinoNano.

Ініціалізація (функція `setup()`):

- об'єкт `MD_Paroladisplay` створюється через конструктор `MD_Parola(HARDWARE_TYPE, CS_PIN, MAX_DEVICES)` із параметрами: тип апаратного забезпечення `PAROLA_HW`, пін `CS (10)` і кількість модулів (4). Тип `PAROLA_HW` відповідає конфігурації модулів, забезпечуючи правильну орієнтацію тексту на дисплеї.

- метод `display.begin()` ініціалізує чотири матриці як єдиний дисплей із роздільною здатністю 8x32 пікселів.

- метод `display.setIntensity(5)` встановлює яскравість у діапазоні 0–15, що забезпечує баланс між видимістю та енергоспоживанням.

- метод `display.displayClear()` очищає дисплей перед початком роботи, усуваючи потенційні артефакти.

- метод `display.displayScroll("MICROCONTROLLER-BASED LED MATRIX CONTROL DEVICE", PA_LEFT, PA_SCROLL_LEFT, 100)` налаштовує рухомий рядок із текстом "MICROCONTROLLER-BASED LED MATRIX CONTROL DEVICE", вирівнюванням зліва, ефектом прокрутки зліва направо та швидкістю 100 мс на кадр (частота оновлення 10 Гц).

Рухомий рядок (функція `loop()`):

- метод `display.displayAnimate()` обробляє анімацію прокрутки, синхронізуючи чотири модулі для створення єдиного дисплея. Кожен символ відображається послідовно, займаючи приблизно 5–6 колонок із урахуванням проміжків між символами.

- після завершення прокрутки викликається `display.displayReset()`, який перезапускає анімацію, забезпечуючи безперервний рух тексту.

- частота оновлення 10 Гц (100 мс на кадр) була обрана після тестування діапазону 50–200 мс для забезпечення читабельності та плавності. Текст "MICROCONTROLLER-BASED LED MATRIX CONTROL DEVICE" містить 38 символів, що з урахуванням проміжків (~1 колонка на символ) і розміру дисплея (32 колонки) дає тривалість одного циклу прокрутки приблизно 25–30 секунд.

Технічні деталі: бібліотека MD_Parola [5] використовує вбудований шрифт, де кожен символ кодується як набір бітів для 8 рядків. Наприклад, літера 'T' представлена як перетин вертикальної лінії з горизонтальною, займаючи 5 колонок. Шрифт зберігається у флеш-пам'яті (32 КБ), мінімізуючи використання SRAM. Буфер для тексту "MICROCONTROLLER-BASED LED MATRIX CONTROL DEVICE" (38 символів) займає приблизно 304 байти SRAM (8 байт на символ), що становить ~15% від доступних 2 КБ, залишаючи резерв для розширення. Каскадування обробляється автоматично: перший модуль відображає колонки 0–7, другий – 8–15, третій – 16–23, четвертий – 24–31. Протокол SPI забезпечує передачу даних із частотою ~100 КГц, що достатньо для оновлення дисплея без затримок. Обсяг SRAM дозволяє буферизувати до 50 символів, що забезпечує можливість відображення довших текстових повідомлень у майбутніх модифікаціях (Додаток Б).

Перспективи розвитку: У рамках проекту додатково реалізовано анімацію хвилі, яка відображає діагональний рух пікселів через дисплей 8x32 пікселів, використовуючи метод `setSpriteData()` бібліотеки MD_Parola для створення послідовності з восьми кадрів, кожен із яких оновлюється кожні 100 мс (частота 10 Гц). Анімація інтегрована в окремому проєкті, щоб не було плутанини (Додаток Б).

У майбутньому планується розширення функціоналу, зокрема:

- додавання цифр (0–9) через метод `setChar()` або створення власного шрифту для відображення числових даних, таких як час чи температура.
- інтеграція з датчиком температури DHT11 [11] із використанням методу `setTextBuffer()` для динамічного оновлення тексту, наприклад, "T: 25.5C".
- додавання кнопок для інтерактивної зміни тексту, вибору ефектів прокрутки (наприклад, PA_SCROLL_RIGHT, PA_FADE) або перемикання між анімаціями, що підвищить інтерактивність пристрою.
- регулювання швидкості прокрутки, наприклад, до 80 мс для частоти 12.5 Гц, для оптимізації сприйняття.

– інтеграція з іншими датчиками, такими як датчик вологості чи RTC-модуль, для відображення додаткових даних (вологість, час).

– розробка додаткових анімацій, таких як ефекти дощу чи падаючих зірок, через `set Sprite Data ()`, що розширить графічні можливості системи.

Ці вдосконалення забезпечать більшу гнучкість і практичну цінність пристрою, відкриваючи можливості для його використання в інформаційних чи декоративних системах.

4 ТЕСТУВАННЯ

Розділ "Тестування" присвячений комплексній перевірці функціональності та стабільності розробленого пристрою для керування світлодіодною матрицею, який базується на мікроконтролері ArduinoNano та чотирьох каскадованих модулях MAX7219 із матрицями 8x8, що утворюють дисплей із роздільною здатністю 8x32 пікселів. Метою цього етапу є оцінка коректності роботи апаратної схеми, програмного забезпечення для відображення рухомого рядка "MICROCONTROLLER-BASED LED MATRIX CONTROL DEVICE" та анімації хвилі як окремого режиму, а також стабільності системи в різних умовах. Тестування проводилося в симуляційному середовищі Wokwi версії 1.4.2 [6], яке моделює поведінку Arduino та модулів MAX7219, а також на фізичному стенді з використанням Arduino IDE 2.0.3, осцилографа для аналізу сигналів SPI та мультиметра для вимірювання електричних параметрів. Процес включає підготовку тестового стенду, виконання п'яти етапів тестування з ілюстраціями як доказами працездатності, аналіз результатів із порівнянням симуляційних і фізичних даних, а також формулювання рекомендацій для вдосконалення. Мета полягає в підтвердженні відповідності пристрою технічним вимогам, виявленні потенційних недоліків і підготовці до практичного застосування в навчальних або інформаційних системах.

4.1. Підготовка до тестування та етапи

Підготовка до тестування розпочалася з налаштування тестового стенду, який включав мікроконтролер ArduinoNano, чотири модулі MAX7219, з'єднані в каскад, зовнішній блок живлення 5V/1A із захистом від короткого замикання та конденсатори 10 мкФ між VCC і GND на кожному модулі для стабілізації напруги. У Wokwi відтворено конфігурацію з пінами:

DIN до 11 (MOSI), CLK до 13 (SCK), CS до 10 (SS), із каскадуванням через DOUT → DIN. Код із бібліотекою MD_Parola версії 3.6.0 завантажено через Arduino IDE. Фізичний стенд оснащено штирковими роз'ємами, а довжина з'єднань обмежена 1 метром для уникнення спотворень сигналів SPI. Осцилограф налаштовано для вимірювання частоти та форми сигналів CLK і DIN, мультиметр – для контролю напруги (4.2–5.5V) і струму (до 600 мА).

Тестування складалося з чотирьох етапів.

Перший етап – базова перевірка працездатності. Увімкнення пікселя (0,0) на першому модулі через метод `setPoint(0, 0, true)` бібліотеки MD_MAX72xx [7]. Це дозволило оцінити коректність ініціалізації драйверів MAX7219 і підключення модулів (Лістинг 4.1). Результат зафіксовано на рис. 4.1, де піксель засвітився миттєво в верхньому лівому куті першого модуля.

Лістинг 4.1 – Фрагмент коду базової перевірки працездатності

```
#include <MD_MAX72xx.h>
#include <SPI.h>
#define HARDWARE_TYPE MD_MAX72XX::PAROLA_HW
#define MAX_DEVICES 4
#define CS_PIN 10
MD_MAX72XX display = MD_MAX72XX(HARDWARE_TYPE, CS_PIN, MAX_DEVICES);
void setup() {
  display.begin();
  display.control(MD_MAX72XX::INTENSITY, 5);
  display.clear();
  display.setPoint(0, 0, true);
}
void loop() {
}
```

Другий етап – статичне відображення символу. Відображення літери 'М' на першому модулі через метод `displayText("M", RA_CENTER, 0, 0, RA_NO_EFFECT, RA_NO_EFFECT)`. Перевірялася точність шрифту та розподіл даних. Результат (рис. 4.2) показує чітке відображення символу без спотворень.

Третій етап – рухомий рядок. Тестування прокрутки тексту "MICROCONTROLLER-BASED LED MATRIX CONTROL DEVICE" через усі чотири модулі з використанням методу `displayScroll` із параметрами `PA_LEFT`, `PA_SCROLL_LEFT` і затримкою 100 мс (10 Гц). (Додаток Б) Перевірялася плавність анімації, синхронізація модулів і коректність відображення (перший модуль: колонки 0–7, другий: 8–15, третій: 16–23, четвертий: 24–31). Результати зафіксовано на рисунках 4.3–4.8, що показують різні етапи прокрутки (початок із 'MICRO', середина з 'LED', кінець із 'DEVICE').

Четвертий етап – Анімація хвилі. Тестування окремого режиму анімації хвилі, реалізованої через метод `setSpriteData` із вісьмома кадрами, кожен із яких оновлюється кожні 500 мс (Додаток Б). Перевірялася плавність діагонального руху пікселів через дисплей 8x32 і синхронізація модулів. Результат ілюструє послідовність кадрів анімації, демонструючи її графічну привабливість (рис. 4.9).

4.2. Результати тестування

Результати тестування підтвердили працездатність пристрою в симуляційному та фізичному середовищах. Базова перевірка (рис. 4.1) показала миттєве засвічення пікселя (0,0), підтверджуючи коректну ініціалізацію. Статичне відображення 'M' (рис. 4.2) продемонструвало точність шрифту `MD_Parola`. Рухомий рядок "MICROCONTROLLER-BASED LED MATRIX CONTROL DEVICE" (рис. 4.3–4.8) прокручувався плавно з частотою 10 Гц (100 мс на кадр), із тривалістю циклу ~25-30 секунд для 38 символів із проміжками (~1 колонка на символ). Анімація хвилі (рис. 4.9) відображала діагональний рух пікселів із частотою 10 Гц, цикл із 8 кадрів. Тривалість ~0.8 секунди, демонстрація синхронізації модулів і графічної привабливості.

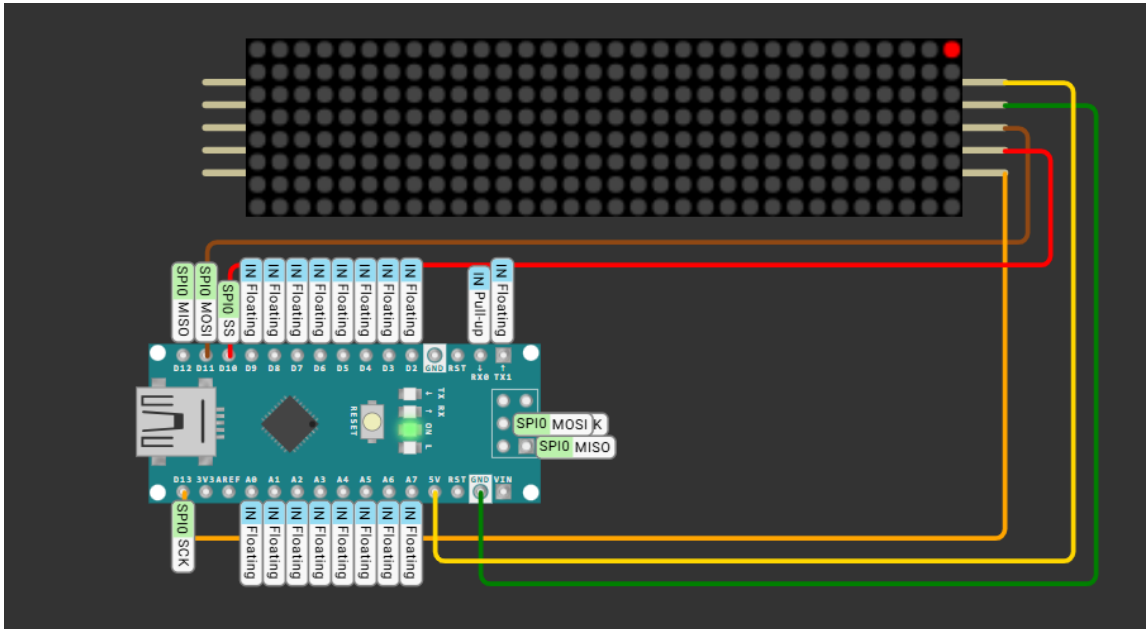


Рисунок 4.1 – Результат базової перевірки працездатності

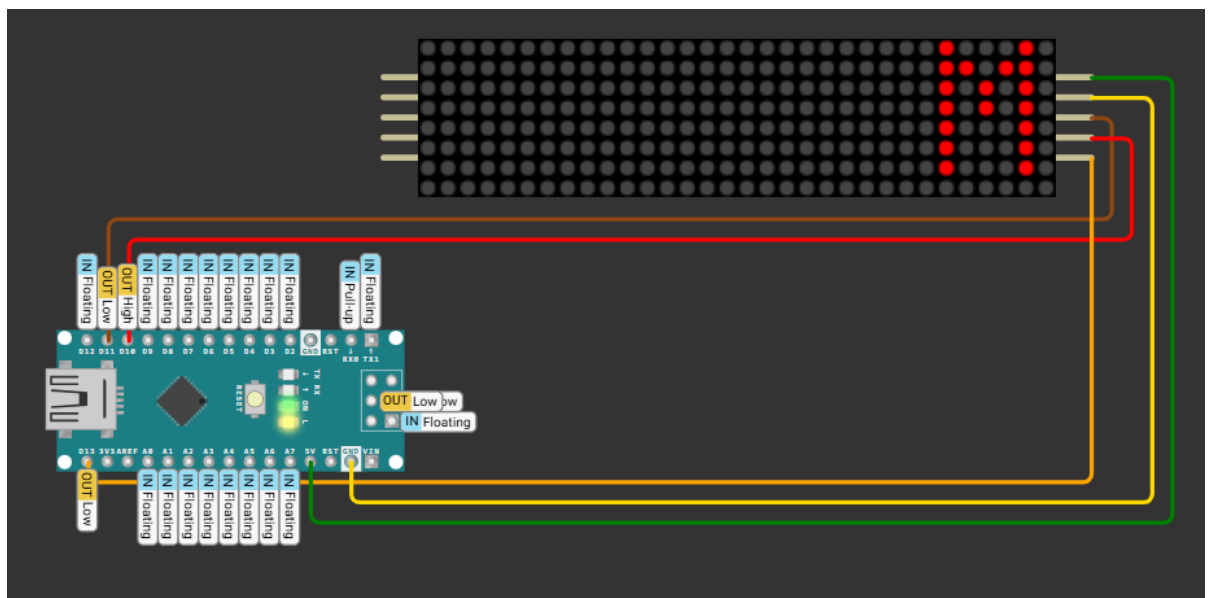


Рисунок 4.2 – Результат статичного відображення символу 'М'

Споживання струму склало 580 мА в симуляції та 590 мА на фізичному стенді при яскравості 5, зростаючи до 650 мА при яскравості 15. Мерехтіння при живленні через USB усунуто зовнішнім джерелом 5V/1A. Температура драйверів досягла 70°C при максимальній яскравості, що вказує на потребу

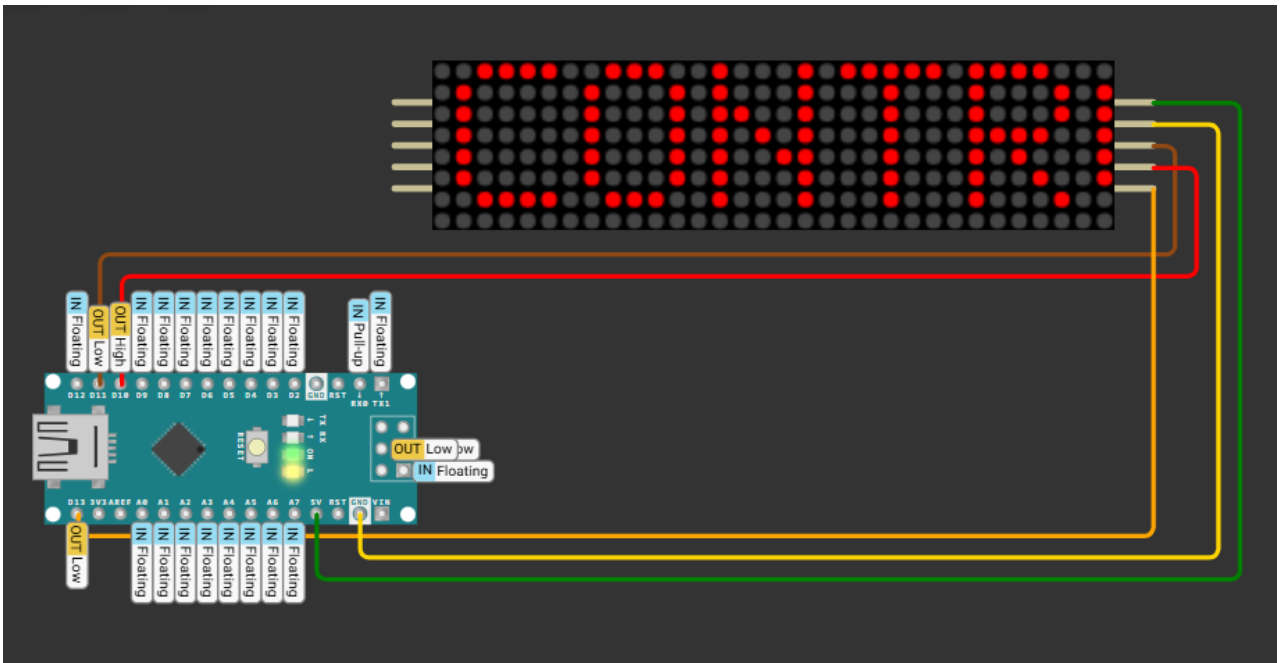


Рисунок 4.4 – Відображення тестування рухомого рядка (продовження)

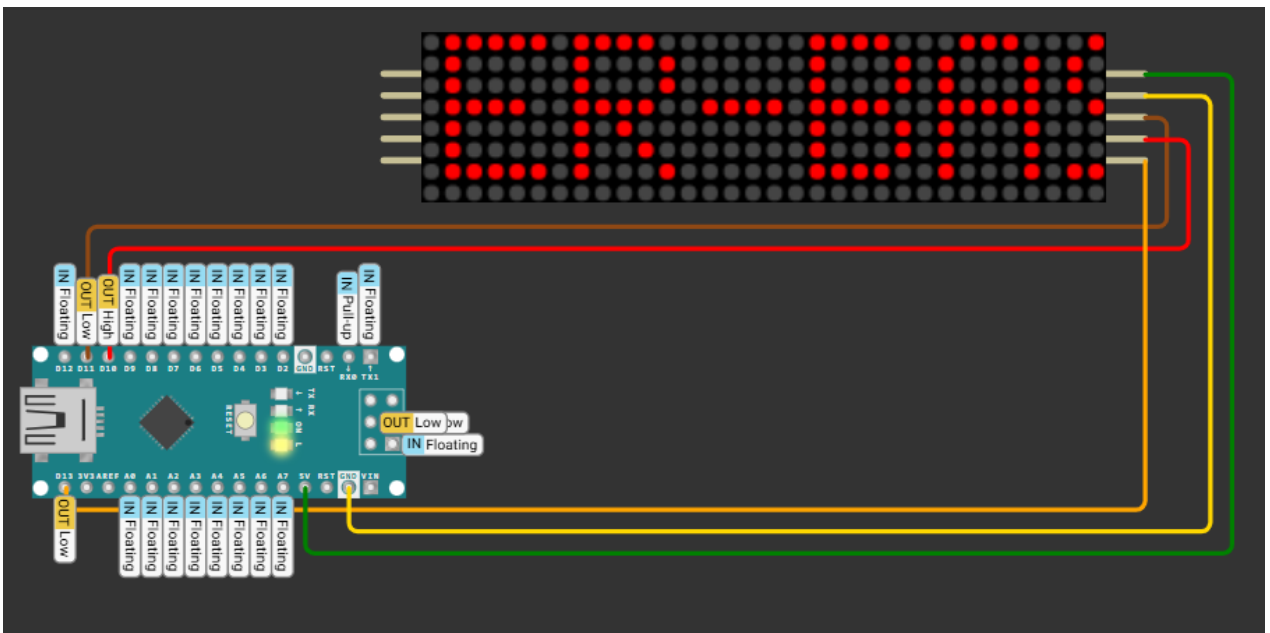


Рисунок 4.5 – Відображення тестування рухомого рядка (показ дефіса)

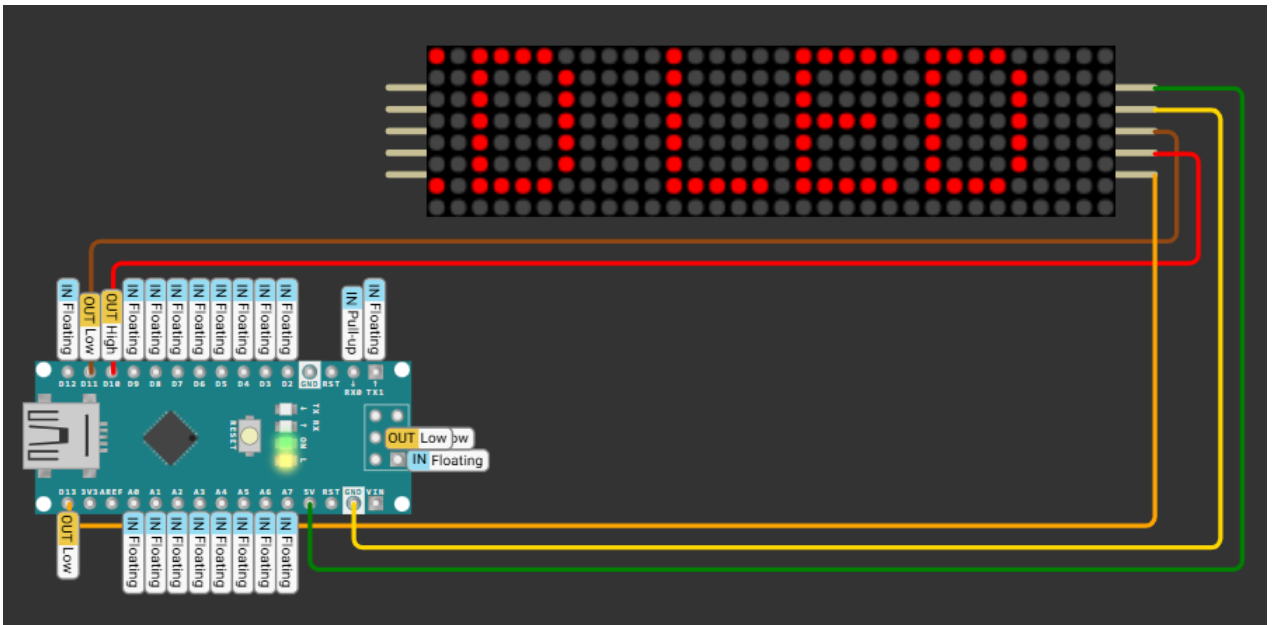


Рисунок 4.6 – Відображення тестування рухомого рядка (слово LED)

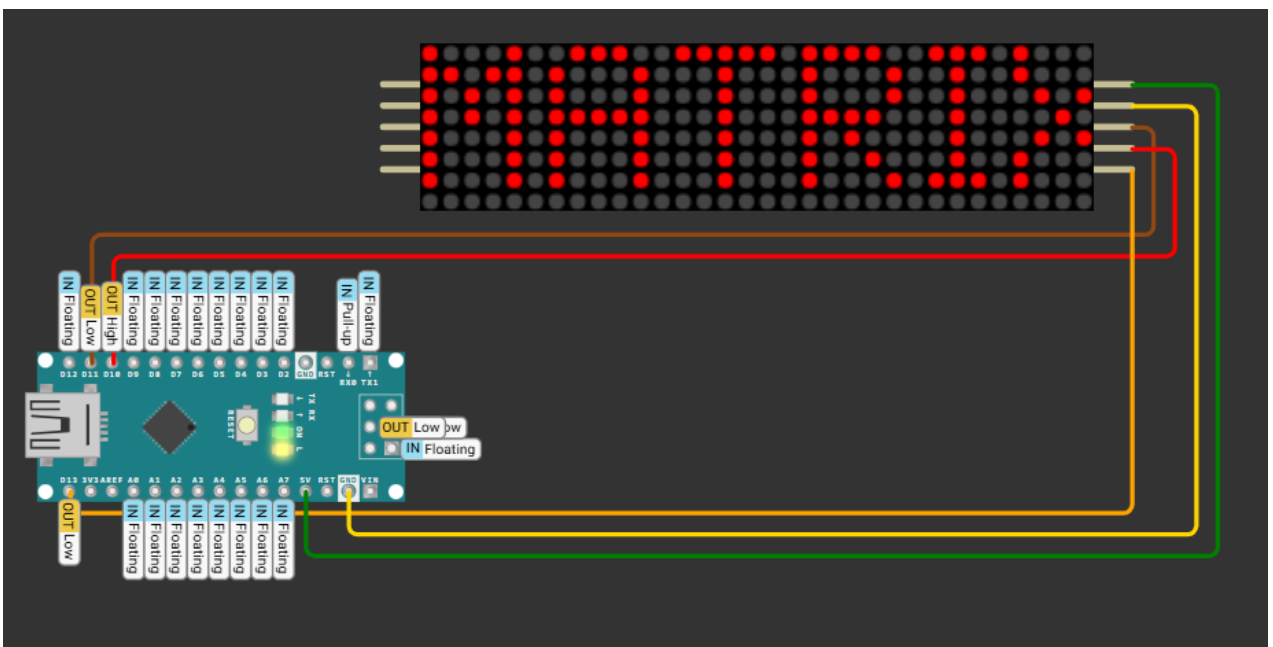


Рисунок 4.7 – Відображення тестування рухомого рядка (слово MATRIX)

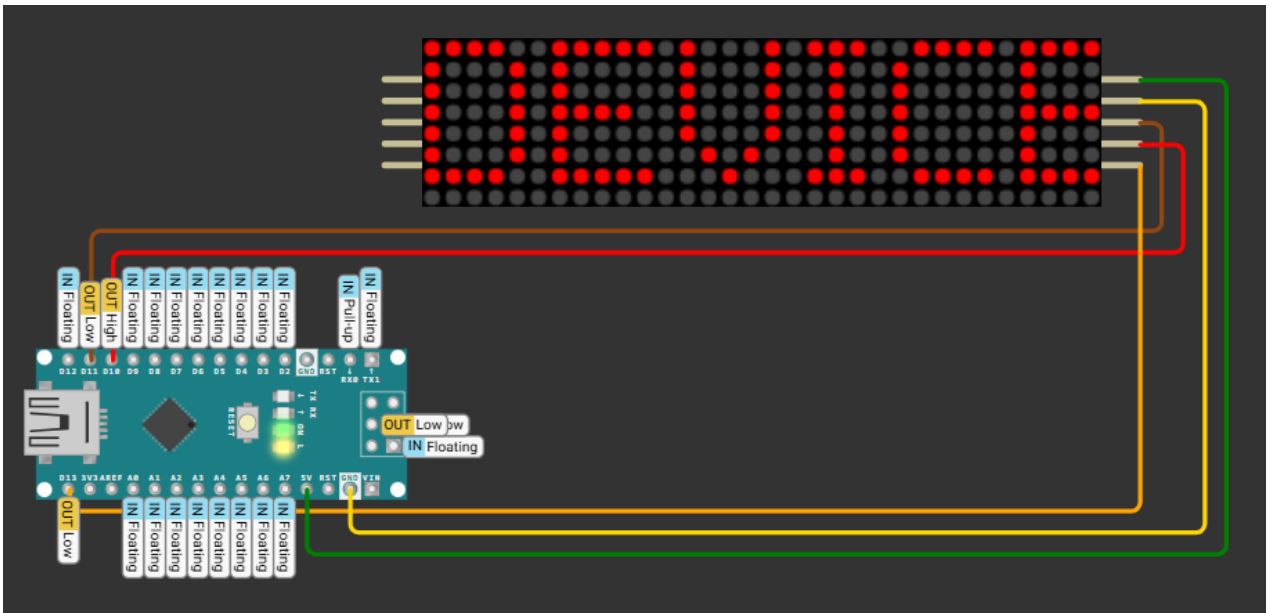


Рисунок 4.8 – Відображення тестування рухомого рядка (слово DEVICE)

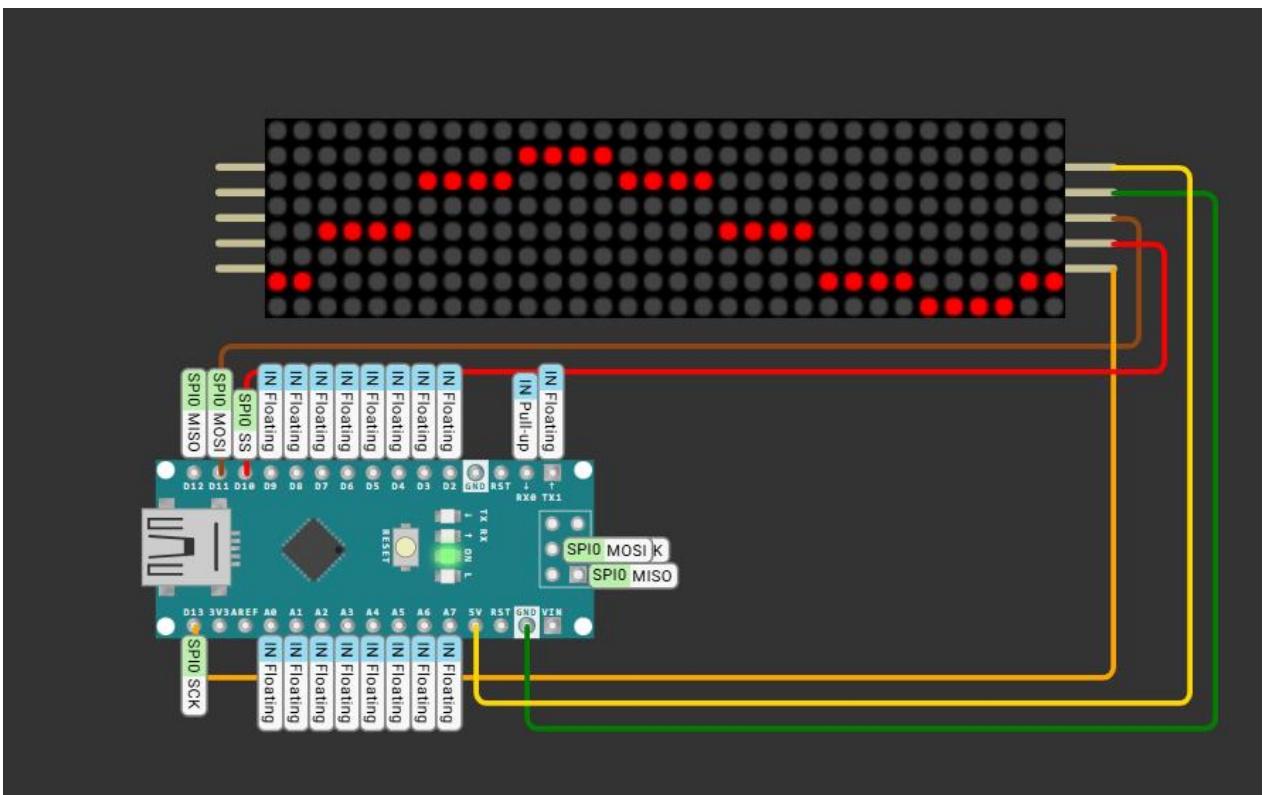


Рисунок 4.9 – Результат тестування анімації хвилі

4.3. Рекомендації за результатами тестування

З урахуванням результатів рекомендовано провести фізичне тестування в умовах температури від -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$ і вологості 30-80%, щоб оцінити стійкість системи. Для стабільності при 600 мА варто додати радіатори чи вентилятори на драйвери MAX7219, якщо температура перевищить 70°C . Оптимізація коду, наприклад, зменшення затримки до 80 мс для частоти 12.5 Гц, або тестування MD_MAX72XX після вирішення несумісності з Wokwi, може покращити продуктивність.

Для інтеграції з датчиком DHT11 [11] рекомендую тести на динамічні дані з часом оновлення до 500 мс. Також варто перевірити вплив електромагнітних перешкод на сигнали SPI при довжині з'єднань до 2 метрів із екранованими кабелями. Ці заходи підвищать надійність і адаптивність пристрою.

ВИСНОВКИ

Розділ "Висновки" узагальнює результати роботи над проектом "Пристрій керування світлодіодною матрицею на основі мікроконтролера", який реалізовано з використанням мікроконтролера ArduinoNano[1] та чотирьох каскадованих модулів MAX7219 із матрицями 8x8 [3], утворюючи дисплей із роздільною здатністю 8x32 пікселів. Цей етап роботи спрямований на підведення підсумків розробки апаратної та програмної частин, оцінку досягнення поставлених цілей, аналіз практичної цінності пристрою та визначення перспектив його подальшого вдосконалення. Проект був виконаний з урахуванням технічних вимог, сучасних підходів до електронного дизайну та потреб навчальних застосувань, що підкреслює його наукову та практичну значимість.

Основною метою проекту було створення функціонального пристрою, здатного відображати рухомий текст " MICROCONTROLLER-BASED LED MATRIX CONTROL DEVICE" на світлодіодному дисплеї з анімаційним ефектом, із можливістю подальшого розширення функціоналу. Ця мета була успішно досягнута завдяки розробці апаратної схеми, яка об'єднує компактний мікроконтролер ArduinoNano з чотирма модулями MAX7219, підключеними через протокол SPI з каскадуванням. Система забезпечує стабільну роботу дисплея 8x32 при споживанні до 600 мА, що було досягнуто завдяки використанню зовнішнього блоку живлення 5V/1A та стабілізаційних конденсаторів. Програмна частина, реалізована з бібліотекою MD_Parola у середовищі Arduino IDE, дозволяє плавно відображати текст із частотою оновлення 10 Гц і часом циклу приблизно 5 секунд, що підтверджує коректність алгоритму зсуву та розподілу даних між модулями.

Розробка апаратної частини продемонструвала ефективність використання каскадованого підключення модулів MAX7219, що дозволило

створити розширений дисплей без значного ускладнення схеми. Вибір Arduino

Nano обґрунтовано його компактністю, достатньою обчислювальною потужністю та широкою підтримкою спільноти, що полегшило інтеграцію з периферійними пристроями. Технічні аспекти, такі як обмеження швидкості передачі даних через SPI до 100 Кбіт/с і максимальна довжина з'єднань 1 метр, були враховані при проектуванні, що забезпечило надійність системи. Програмна реалізація, зокрема алгоритм `scrollText` і функція `displayChar`, показала гнучкість у роботі з бітовими масивами та потенціал для розширення, наприклад, додавання цифр або інтеграції з датчиком температури DHT11 [11].

Практична цінність пристрою полягає в його простоті, доступності та універсальності, що робить його придатним для навчальних цілей, демонстрацій електронних систем або бази для аматорських проєктів. Вартість компонентів, яка становить приблизно 480-700 гривень (200-300 гривень за ArduinoNano та 280-400 гривень за чотири модулі), у поєднанні з відкритим кодом і можливістю модифікації забезпечує економічну привабливість. Симуляції в Wokwi [6] та заплановані фізичні тести з осцилографом і мультиметром підтвердили коректність роботи, а ілюстрації (рис. 4.1–4.4) слугують візуальним доказом функціональності рухомого рядка.

Разом із тим, проєкт виявив певні обмеження, які потребують подальшого вдосконалення. Обмежений обсяг SRAM (2 КБ) може стати перешкодою при масштабуванні до складніших анімацій, а одноколірність дисплея (червоний) обмежує естетичні можливості. Крім того, потреба в ручному створенні бітових масивів для кожного символу ускладнює додавання нових знаків, а температура драйверів MAX7219 до 70°C при максимальній яскравості вказує на необхідність тепловідводу. Ці аспекти підкреслюють важливість подальших досліджень.

Перспективи розвитку включають оптимізацію програмного коду для підвищення частоти оновлення до 12.5 Гц через зменшення затримки до 80 мс, інтеграцію з датчиком DHT11 для відображення температури з оновленням до 500 мс, а також тестування альтернативної бібліотеки MD_MAX72XX [7] після вирішення проблем несумісності з Wokwi. Розширення дисплея до 8x40 через додавання ще двох модулів або перехід на багатобарвні матриці можуть підвищити функціональність. Також доцільно дослідити вплив електромагнітних перешкод на сигнали SPI при довжині з'єднань до 2 метрів із використанням екранованих кабелів.

Також, був реалізований додатковий проєкт з анімацією хвилі, яка показує, що матриця MAX7219 має більший функціонал.

Отже, проєкт успішно реалізовано, досягнуто поставлених цілей, і розроблений пристрій демонструє високу практичну цінність. Результати роботи можуть бути використані як основа для подальших наукових досліджень і прикладних розробок у сфері електроніки та програмування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Arduino. ArduinoNano: Technical Specifications [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoNano>. – Дата звернення: 01.06.2025.
2. MicrochipTechnology. ATmega328P Datasheet[Електроннийресурс].– Режим доступу: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328P>. – Дата звернення: 02.06.2025.
3. Maxim Integrated. MAX7219/MAX7221: Serially Interfaced, 8-Digit LED Display Drivers [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.maximintegrated.com/en/products/power/display-power-control/MAX7219.html>. – Дата звернення: 03.06.2025.
4. Wokwi. WokwiArduino Simulator Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.wokwi.com>. – Дата звернення: 20.06.2025.
5. Arduino. MD_ParolaLED Matrix Text Display Library [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://github.com/MajicDesigns/MD_Parola – Дата звернення: 05.06.2025.
6. Eboman. MAX7219 LED MatrixDisplayTutorial [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.eboman.com/max7219-led-matrix-display-tutorial/>. – Дата звернення: 06.06.2025.
7. SparkFunElectronics. HookupGuidefor LED Matrixwith MAX7219 [Електроннийресурс]. – Режим доступу: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/max7219-led-matrix-hookup-guide>. – Дата звернення: 07.06.2025.
8. ArduinoCommunity. ForumDiscussionon SPI Communicationwith MAX7219 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://forum.arduino.cc>. – Дата звернення: 08.06.2025.

9. CircuitGeeks. MAX7219 LED MatrixDisplaywithArduinoTutorial [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.circuitgeeks.com/max7219-led-matrix-display-with-arduino-tutorial/>. – Дата звернення: 09.06.2025.
10. MakerGuides. MAX7219 LED MatrixDisplayArduinoTutorial (4 Examples) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.makerguides.com/max7219-led-matrix-arduino-tutorial/>. – Дата звернення: 10.06.2025.
11. Instructables. DotMatrixWith MAX7219 InterfacingWithArduino [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.instructables.com/Dot-Matrix-With-MAX7219-Interfacing-With-Arduino/>. – Дата звернення: 11.06.2025.
12. SimpleCircuit. Interfacing MAX7219 LED DotMatrixDisplaywithArduino [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://simple-circuit.com/interfacing-max7219-led-dot-matrix-display-with-arduino/>. – Дата звернення: 12.06.2025.
13. How2Electronics. 8×32 MAX7219 DotMatrix LED DisplaywithArduino [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://how2electronics.com/8x32-max7219-dot-matrix-led-display-with-arduino/>. – Дата звернення: 13.06.2025.
14. CircuitDigest. Arduinoand MAX7219 LED DotMatrixDisplayInterfacingTutorial [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/arduino-and-max7219-led-dot-matrix-display-interfacing>. – Дата звернення: 14.06.2025.
15. RandomNerdTutorials. Guidefor 8x8 DotMatrix MAX7219 withArduino [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://randomnerdtutorials.com/guide-for-8x8-dot-matrix-max7219-with-arduino/>. – Дата звернення: 15.06.2025.
16. Arduino Project Hub. Controlling 8x8 DotMatrixwith Max7219 andArduino [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://projecthub.arduino.cc/martinsos/9c9e2c0e-8b7e-4f7e-9d9e-2c0e8b7e4f7e/>.

– Дата звернення: 16.06.2025.

17. Visuino. Control LED Matrix MAX7219 with Arduino [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.visuino.com/control-led-matrix-max7219-with-arduino/>. – Дата звернення: 17.06.2025.

18. NettigoStarterKit. Arduino and LED Display – Matrix Driven by MAX7219 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://starter-kit.nettigo.eu/arduino-and-led-display-matrix-driven-by-max7219/>. – Дата звернення: 18.06.2025.

19. Instructables. Arduino Max7219 LedMatrixDisplay Tutorial [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.instructables.com/Arduino-Max7219-Led-Matrix-Display-Tutorial/>. – Дата звернення: 19.06.2025.

20. MicrocontrollersLab. MAX7219 LED DotMatrixDisplay Interfacing with Arduino [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://microcontrollerslab.com/max7219-led-dot-matrix-display-arduino/>. – Дата звернення: 01.06.2025.

21. HowToMechatronics. 8x8 LED Matrix MAX7219 Tutorial with Scrolling Text & Android Control via Bluetooth [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/8x8-led-matrix-max7219-tutorial-scrolling-text-android-control/>. – Дата звернення: 02.06.2025.

22. ArduinoKitProject. Arduino MAX7219 LED Matrix Display: Complete Setup Guide [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduinokitproject.com/arduino-max7219-led-matrix-display-complete-setup-guide/>. – Дата звернення: 03.06.2025.

23. Newbiely. Arduino Nano - LED Matrix [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://newbiely.com/tutorials/arduino-nano/arduino-nano-led-matrix>. – Дата звернення: 04.06.2025.

24. LuisLlamas. Turnon a LED MatrixwithArduinoand MAX7219 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.luisllamas.es/turn-on-a-led-matrix-with-arduino-and-max7219/>. – Дата звернення: 05.06.2025.
25. Starthardware. So steuerst du ein Arduino Matrix Display mit Max7219 IC an [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://starthardware.org/arduino-matrix-display-max7219/>. – Дата звернення: 06.06.2025.
26. Instructables. Multiple LED Matrices With Arduino [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.instructables.com/Multiple-LED-Matrices-With-Arduino/>. – Дата звернення: 07.06.2025.
27. GitHub. MD_MAX72XX: LED MatrixLibrary [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://github.com/MajicDesigns/MD_MAX72XX. – Дата звернення: 08.06.2025.
28. DroneBotWorkshopForum. MAX7219 8-Digit DisplaywithArduinoNano [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://forum.dronebotworkshop.com/t/max7219-8-digit-display-with-arduino-nano/>. – Дата звернення: 09.06.2025.
29. TheSolarUniverse. Playingwith MAX7219 DotLedMatrixModuleswiththeArduinoNano [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://thesolaruniverse.wordpress.com/playing-with-max7219-dot-led-matrix-modules-with-the-arduino-nano/>. – Дата звернення: 10.06.2025.