

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВНУТРІШНІХ СПРАВ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ УПРАВЛІННЯ, ПСИХОЛОГІЇ  
ТА БЕЗПЕКИ**

**Кафедра інформаційних технологій**

**РОЗРОБЛЕННЯ НАДІЙНОГО ІНВЕРТОРА ЧИСТИЙ СИНУС  
ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ЧУТЛИВОЇ АПАРАТУРИ В ПОЛЬОВИХ УМОВАХ**

**Кваліфікаційна робота**  
здобувача вищої освіти  
4 курсу денної форми навчання  
**Дмитро СЕМЕНЮК**

**Науковий керівник:**  
доцент, кандидат технічних наук\_  
**Ігор ФАРМАГА**

**Рецензент:**  
доцент, кандидат технічних наук\_  
\_\_\_\_\_

*Кваліфікаційна робота допущена до захисту*  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р., протокол № \_\_\_\_\_

Завідувач кафедри інформаційних технологій  
\_\_\_\_\_ **Олег ЗАЧЕК**  
(підпис)

Львів  
2026

## СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

МК (Мікроконтролер) компактна обчислювальна система на одній мікросхемі

АЦП (ADC) пристрій для перетворення аналогових сигналів у цифровий формат

АЗ та ПЗ апаратна частина (залізо) та програмна частина системи

ВС (Вбудована система) спеціалізована система керування, інтегрована безпосередньо в об'єкт керування.

ЦП (Цифровий пристрій) система для обробки інформації у дискретному вигляді

САПР комплекс програмних інструментів для автоматизації інженерного проектування

AVR лінійка 8-бітних мікроконтролерів, розроблена компанією Atmel

Arduino Uno популярний модуль для розробки на базі ATmega328P-PU

Arduino IDE спеціалізоване середовище для написання програмного коду та його подальшого завантаження в пам'ять контролерів Arduino

РКД (LCD) екран на основі рідких кристалів для візуалізації даних

SPI високошвидкісний синхронний протокол для повнодуплексної передачі даних між МК та периферійними модулями

MOSFET тип польового транзистора, де затвор ізольований діелектриком (напівпровідникова структура метал-окисел)

ШИМ (PWM) метод керування потужністю шляхом зміни тривалості імпульсів при постійній частоті

СПШИМ (SPWM) різновид модуляції, де ширина імпульсів змінюється за синусоїдальним законом

DC (Direct Current) постійний струм або напруга, що не змінює полярності

AC (Alternating Current) змінний струм або напруга, типові для загальних електромереж

## АНОТАЦІЯ

**Семенюк Д., Головатий А. (керівник).** Розроблення надійного інвертора чистий синус для живлення чутливої апаратури в польових умовах. Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Львівський державний університет внутрішніх справ, Львів, 2026.

У дипломній роботі розроблено апаратне та програмне забезпечення надійного інвертора чистий синус для живлення чутливої апаратури.

Система керування інвертором здійснює безперервний контроль робочих показників: величини споживаного струму, рівня заряду батареї та термічного стану силових транзисторів. За умови відповідності цих даних встановленим нормам, пристрій генерує вихідну синусоїдальну напругу 230 В із частотою 50 Гц, що за характеристиками ідентична стандартній електромережі. Система візуалізації на базі РКД забезпечує відображення ключових робочих показників: поточного енергоспоживання (струму та потужності), рівня напруги на клеммах акумулятора, а також температурного стану силових транзисторів. Додатково програмно реалізовано виведення спеціальних графічних символів (пиктограм), що сигналізують про критичні відхилення параметрів або аварійні режими роботи.

Система оповіщення пристрою реалізована за допомогою світлової та звукової сигналізації (світлодіодних індикаторів і п'єзовипромінювача). З метою зниження енергоспоживання в конструкції передбачена функція деактивації рідкокристалічного дисплея. Даний пристрій спроектований як малопотужне джерело змінного струму (100 Вт), що формує на виході чисту синусоїду. Його компактні габарити та мала вага роблять інвертор оптимальним рішенням для забезпечення автономного живлення чутливої мікропроцесорної техніки та іншої малопотужної електроніки.

**Ключові слова:** інвертор з чистою синусоїдою, синусоїдальна ШІМ (SPWM), мікроконтролер ATmega328P, екосистема Arduino, термодатчик DS18B20, сенсор струму ACS712, символічний РК-дисплей, моделювання в Proteus VSM, розробка на C/C++, середовище Arduino IDE.

## ABSTRACT

**Semenyuk D., Holovatyy A.** (supervisor). Development of a reliable pure sine inverter for powering sensitive equipment in the field. Bachelor's thesis. – Lviv State University of Internal Affairs, Lviv, 2026.

The inverter control system continuously monitors operating parameters: the amount of current consumed, the battery charge level and the thermal state of the power transistors. Provided that these data comply with the established standards, the device generates an output sinusoidal voltage of 230 V with a frequency of 50 Hz, which is identical in characteristics to a standard electrical network.

The LCD-based visualization system provides display of key operating indicators: current energy consumption (current and power), voltage level at the battery terminals, as well as the temperature state of power transistors. Additionally, the software implements the display of special graphic symbols (pictograms) that signal critical deviations of parameters or emergency operating modes.

The device notification system is implemented using light and sound signaling (LED indicators and a piezo emitter). In order to reduce energy consumption, the design provides a function to deactivate the liquid crystal display. This device is designed as a low-power alternating current source (100 W), which forms a pure sine wave at the output. Its compact dimensions and low weight make the inverter an optimal solution for providing autonomous power supply for sensitive microprocessor equipment and other low-power electronics.

The inverter design with a pure sinusoidal output voltage is implemented on the basis of the Arduino Uno controller. Monitoring of operating parameters is provided by a DS18B20 digital temperature sensor and an ACS712 Hall effect current sensor. Power switching is carried out using power MOSFET transistors, and data visualization is displayed on a 16x2 character LCD display.

**Keywords:** pure sine wave inverter, sinusoidal PWM (SPWM), ATmega328P microcontroller, Arduino ecosystem, DS18B20 temperature sensor, ACS712 current sensor, character LCD display, Proteus VSM simulation, C/C++ development, Arduino IDE environment.

## Зміст

<b>ВСТУП</b> .....	<b>6</b>
<b>РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМНОЇ ОБЛАСТІ</b> .....	<b>9</b>
1.1. Класифікація інверторів та архітектурні особливості їх побудови.....	9
1.2. Огляд підходів проектування різних типів інверторів.....	20
<b>РОЗДІЛ 2. ЗАСОБИ РОЗРОБКИ АПАРАТНОГО І ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОГО ІНВЕРТОРА ЧИСТИЙ СИНУС ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ЧУТЛИВОЇ АПАРАТУРИ</b> .....	<b>25</b>
2.1. Система автоматизованого проектування та симуляції електронних систем Proteus.....	25
2.2. Характеристика інтегрованого середовища розробки Arduino IDE.....	27
<b>РОЗДІЛ 3. АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОГО ІНВЕРТОРА ЧИСТИЙ СИНУС ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ЧУТЛИВОЇ АПАРАТУРИ</b> .....	<b>31</b>
3.1. Формування елементної бази надійного інвертора з чистим синусом.....	31
3.2. Проектування надійного інвертора чистий синус в САПР Proteus VSM.....	54
<b>РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОГО ІНВЕРТОРА З ЧИСТОЮ СИНУСОЇДОЮ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ЧУТЛИВОЇ АПАРАТУРИ</b> .....	<b>60</b>
4.1. Алгоритм роботи надійного інвертора з чистою синусоїдою.....	60
4.2. Розроблення драйвера для взаємодії з сенсором температури DS18B20.....	63
4.3. Програмна реалізація алгоритму формування SPWM-сигналу.....	64
4.4. Програмна реалізація інтерфейсу взаємодії з сенсором струму ACS712.....	65
4.5. Програмна реалізація керуючого алгоритму надійного інвертора чистий синус з багаторівневою системою захисту.....	65
4.6. Дослідження характеристик та верифікація роботи інвертора з інтегрованими системами захисту в середовищі Proteus ISIS.....	66
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	<b>72</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	<b>74</b>

## ВСТУП

У сучасних реаліях ефективність роботи поліції в польових умовах – на місцях подій, блокпостах чи під час рятувальних операцій – прямо залежить від надійності енергозабезпечення. Більшість спецзасобів (Starlink, системи РЕБ, БПЛА та криміналістичні лабораторії) є чутливою апаратурою, яка потребує ідеальної синусоїдальної напруги для запобігання збоєм та виходу з ладу. Існує широка номенклатура рішень для забезпечення електроживлення в умовах дефіциту потужності або повної відсутності мережі. Окрім традиційних паливних генераторів, вагому нішу займають перетворювачі постійної напруги в змінну – інвертори. Ці пристрої є критично важливими для створення систем автономного енергопостачання.

Інвертор – це електротехнічний вузол, призначений для трансформації енергії постійного струму в змінний із можливістю регулювання параметрів вихідної напруги. Інвертор використовується як проміжна ланка для живлення обладнання, чий вхідні електричні параметри не узгоджуються з характеристиками первинного джерела енергії (наприклад, акумуляторної батареї). Інвертори, відомі також як силові перетворювачі, виконують функцію адаптації параметрів напруги та струму до рівнів, необхідних для коректної роботи споживача. Ключовою вимогою до процесу трансформації є забезпечення максимального коефіцієнта корисної дії (ККД) шляхом мінімізації енергетичних втрат у силових колах.

Прогрес у сфері силових електроніки та широке розповсюдження мікроконтролерних систем відкрили шлях до проектування доступних та інтелектуальних систем енергозабезпечення. Яскравим прикладом такого рішення є інвертор із чистою синусоїдальною формою вихідного сигналу, що оснащений інтегрованими контурами захисту від теплового перевантаження та перевищення допустимих струмів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасна література та реалізовані інженерні проєкти демонструють широкі перспективи

використання мікропроцесорної техніки для побудови силової електроніки. Вивчення цих матеріалів дозволяє оптимізувати архітектуру інверторів напруги для отримання чистого синусоїдального сигналу. Це, у свою чергу, гарантує надійне функціонування чутливого обладнання під час експлуатації у складних польових умовах.

Актуальність теми зумовлена необхідністю забезпечення надійного енергопостачання чутливої криміналістичної та тактичної апаратури працівників поліції в умовах відсутності стаціонарних мереж. Розробка інтелектуального інвертора з чистим синусом на базі мікроконтролера AVR дозволяє поєднати високу якість вихідної напруги з мобільністю та надійним захистом, що є критично важливим для безперебійного виконання службових обов'язків у польових умовах.

У зв'язку зі сказаним можемо сформулювати мету та завдання кваліфікаційної роботи.

**Метою** роботи є проектування надійного інвертора з чистою синусоїдальною формою сигналу для енергозабезпечення спеціалізованого обладнання в польових умовах. Розробка спрямована на створення автономного джерела живлення, здатного підтримувати стабільну роботу засобів телекомунікації (від радіостанцій до терміналів Starlink), мобільних систем спостереження, криміналістичного інструментарію та комплексів радіоелектронної боротьби, забезпечуючи при цьому безпечну експлуатацію та швидке відновлення заряду їхніх акумуляторних батарей.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

- спроектувати електричну схему інвертора чистий синус з функціями захисту засобами САПР Proteus.
- описати алгоритм стабільної роботи системи та взаємодії з датчиками.
- написати драйвери для датчиків, системи охолодження та алгоритм формування синуса.
- Зібрати програмний код у фінальну прошивку.

- провести тестування віртуальної моделі пристрою у Proteus, перевірити відпрацювання захисту при перевантаженні.

**Об'єкт дослідження** – процеси перетворення електричної енергії постійного струму в змінну напругу з чистою синусоїдальною формою для автономних систем живлення.

**Предмет дослідження** – методи та алгоритми мікроконтролерного керування інвертором, що забезпечують стабільність вихідних параметрів та захист чутливої апаратури в нестабільних польових умовах.

**Методи досліджень.** Для досягнення поставленої мети та розв'язання визначених завдань було використано аналітичний метод для вивчення принципів побудови інверторів із чистим синусом та специфікацій апаратної бази (Arduino UNO, ACS712, DS18B20); чисельні методи для розрахунку таблиці синусів для генерації сигналів керування ключами інвертора; методи схемотехнічного проектування для розробки принципової електричної схеми пристрою, включаючи силову частину (трансформатор 100 Вт) та інформаційну частину (ПКД 16x2); метод віртуального інструментарію для тестування та налагодження роботи системи в реальному часі за допомогою симулятора Proteus ISIS для виявлення можливих критичних режимів роботи в польових умовах.

**Структура роботи.** Кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Обсяг основного тексту роботи складає 73 сторінки, 49 рисунків, 5 таблиць, 2 додатки і 19 бібліографічних джерел. Загальний обсяг роботи – 80 сторінок.

## РОЗДІЛ 1

### СТАН ПРОБЛЕМНОЇ ОБЛАСТІ

#### 1.1. Класифікація інверторів та архітектурні особливості їх побудови

Сучасний етап розвитку технологій характеризується підвищенням вимог до систем енергозабезпечення електронного та електротехнічного обладнання.

Інвертор (від латинського *inverto* – “змінювати”, “перетворювати”) являє собою електротехнічний пристрій, призначений для трансформації постійної напруги в одно- або багатофазний змінний струм. У технічній літературі його також часто класифікують як силовий генератор змінного струму. Інвертор функціонує як генератор періодичної напруги, форма якої зазвичай наближена до синусоїдальної або має вигляд дискретного сигналу. Такі пристрої можуть працювати як самостійні вузли або інтегруватися в системи безперебійного живлення для забезпечення енергією споживачів змінного струму. За принципом функціонування їх поділяють на два основні типи: автономні та залежні (що керуються параметрами зовнішньої мережі).

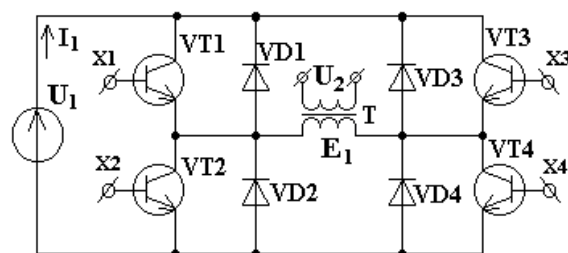
Автономний інвертор – це пристрій для трансформації постійної напруги в змінну, що функціонує в межах мережі без сторонніх генераторів енергії. Комутація його вентилів базується на використанні повністю керованих напівпровідникових ключів або спеціальних вузлів штучного перемикачів. При цьому вихідна частота приладу задається безпосередньо сигналами керування, тоді як амплітуда напруги залежить від параметрів підключеного навантаження та алгоритмів регулювання.

Автономним інвертором вважається перетворювач, що забезпечує живлення споживачів у мережах, де відсутні інші джерела електричної енергії. Процес комутації струму в таких пристроях реалізується за допомогою спеціальних вузлів, при цьому частотні характеристики вихідного сигналу (напруги чи струму) суворо задаються внутрішньою частотою імпульсів керування.

Автономні інвертори виконують функцію перетворення енергії для живлення споживачів змінного струму в системах, що базуються на використанні акумуляторів або фотоелектричних панелей. Окрім цього, такі пристрої інтегруються у частотно-регульовані електроприводи як ланки постійного струму, застосовуються в індукційних та електротехнологічних установках високої частоти, а також слугують засобом підвищення якості електроенергії (активна фільтрація, компенсація реактивної складової та спотворень). Класифікація інверторів за схемотехнічним виконанням передбачає їх поділ на одно-, дво-, три- та багатофазні пристрої. Крім того, ці перетворювачі диференціюють за кількістю рівнів вихідної напруги відносно джерела постійного струму, виділяючи дворівневі та багаторівневі топології.

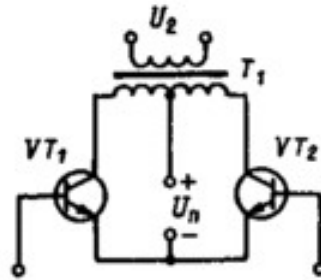
Автономний інвертор напруги (АІН) призначений для формування напруги безпосередньо на навантаженні. Мостова топологія АІН є оптимальною для роботи з великими потужностями та високим рівнем вхідної напруги. Алгоритм роботи базується на подачі керуючих сигналів  $X_1 \dots X_4$  таким чином, щоб протягом кожного півперіоду одна пара транзисторів перебувала у провідному стані, тоді як інша була надійно закрита (Рис.1.1).

Призначення автономного інвертора напруги (АІН) полягає у формуванні змінного потенціалу безпосередньо на навантаженні. Для систем високої потужності та значної вхідної напруги зазвичай обирають мостову топологію. Процес комутації регулюється сигналами керування  $X_1 \dots X_4$ : вони подаються в такий спосіб, щоб протягом кожного півперіоду одна пара напівпровідникових ключів була відкритою, а протилежна – закритою.



*Рис. 1.1. Схемотехнічна реалізація мостового інвертора на базі транзисторних ключів*

Найбільш вживаним рішенням у сегменті низьковольтних перетворювачів є топологія транзисторного інвертора з нульовим виводом (Рис.1.2). Ключова конструктивна специфіка цієї архітектури полягає у використанні вихідного трансформатора, первинна обмотка якого має відвід від геометричного центру (середню точку).



*Рис. 1.2. Схема двотактного транзисторного інвертора з нульовим виводом трансформатора*

Протягом кожного напівциклу напруги в роботі задіяні лише одна секція первинної обмотки та відповідний їй силовий ключ. Така конфігурація забезпечує максимальні показники ККД. Висока ефективність досягається шляхом мінімізації амплітуди струму в первинному колі, що, своєю чергою, знижує теплові втрати на транзисторах і зменшує рівень вихідних пульсацій.

Незважаючи на конструктивну необхідність використання трансформатора з відводом від центральної точки та виникнення подвійної напруги на силових ключах, дана топологія має низку переваг у порівнянні з мостовими та напівмостовими конфігураціями. Це робить її конкурентоспроможною для специфічних завдань перетворення енергії.

На відміну від обраного рішення, мостова топологія потребує подвоєної кількості силових транзисторів. Водночас у напівмостових схемах ключі піддаються впливу вдвічі більших струмів навантаження. Фундаментальним компонентом даної архітектури залишається трансформатор, конструкція якого передбачає наявність центрального виводу в первинному контурі.

Основним технологічним викликом при конструюванні такого трансформатора є досягнення високої магнітної взаємодії між секціями

первинної обмотки. Це необхідно для мінімізації індуктивності розсіювання, яка критично впливає на стабільність роботи схеми.

У малопотужних пристроях зазвичай використовують тороїдальні осердя, де обидві частини первинної обмотки намотуються одночасно у два дрти (біфілярно). Проте для потужних трансформаторів, де такий підхід технічно неможливий, застосовують секційну намотку, чергуючи окремі фрагменти обох півобмоток між собою.

Завдяки використанню зазначених методик намотування вдається мінімізувати індуктивність розсіювання між секціями первинного кола до прийнятних значень. Проте навіть за такої умови відсутність додаткових захисних рішень призводить до появи критичних перенапруг на силових ключах, що створює ризик пробою напівпровідникових елементів.

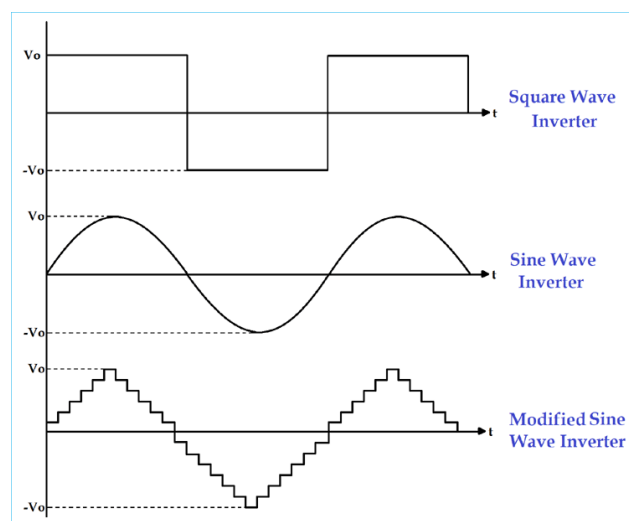
Амплітуда імпульсів напруги на кожній із секцій первинної обмотки може досягати рівня  $U_{живл}$ , тоді як сумарна напруга на закритому силовому ключі ( $U_{ек}$  або  $U_{св}$ ) нерідко сягає подвоєного значення напруги живлення ( $2 * U_{живл}$ ). Це зумовлено додаванням ЕРС самоіндукції до потенціалу джерела живлення. При цьому середнє значення струму, що проходить через окремих транзистор, відповідає половині загального струму споживання від мережі.

Системи автономної генерації є критично важливими компонентами для відновлюваної енергетики, а також для роботи паливних електростанцій (бензинових та дизельних). Основна функціональна відмінність автономних інверторів від мережевих (on-grid) полягає в їхній здатності працювати в парі з акумуляторними батареями, що забезпечує незалежність системи.

*Однофазні інвертори.* Однофазні перетворювачі призначені для трансформації енергії постійного струму в однофазний змінний сигнал. Як правило, такі пристрої застосовуються в системах малої та середньої потужності, що не перевищує 5 кВт. Крім функціональних особливостей, інвертори класифікують за сферами використання: виділяють побутові моделі, перетворювачі для фотоелектричних систем, автомобільні адаптери, а також спеціалізовані модулі для зварювального обладнання. Як приклад можна

навести автомобільні перетворювачі, які трансформують постійну напругу бортової мережі транспортного засобу у змінну. Це обладнання дозволяє користувачам забезпечувати живленням та заряджати мобільні пристрої, ноутбуки та іншу персональну електроніку безпосередньо в салоні авто. Домашні інвертори здатні підтримувати стабільну роботу критично важливих побутових споживачів, таких як опалювальні котли, холодильні установки та інші електроприлади. Впровадження таких систем є ефективним рішенням для забезпечення енергетичної стійкості приватних домогосподарств у періоди планових або непередбачених відключень живлення. Залежно від геометрії вихідної напруги, інвертори поділяють на три ключові категорії:

- З чистою синусоїдою (pure sine wave): формують сигнал, що ідентичний напрузі в централізованій мережі.
- З модифікованою синусоїдою (квазісинусоїда): видають апроксимований ступінчастий сигнал, який є спрощеною імітацією синуса.
- З прямокутною формою виходу (меандр): генерують імпульси з частотою 50 (60) Гц, що є найпростішим і найдешевшим технічним рішенням.



*Рис. 1.3. Порівняльна характеристика геометрії вихідного сигналу різних типів інверторів*

Інвертори з апроксимованою синусоїдою базуються на спрощеній топології перетворення, що зумовлює їхню низьку вартість. Проте сфера їх застосування обмежена лише певними категоріями побутової техніки. Обладнання, що містить асинхронні електродвигуни або класичні

трансформаторні блоки живлення (зокрема, компресорні установки), функціонуватиме некоректно, зі значними втратами енергії або може зовсім не запуснитися через невідповідність форми сигналу.

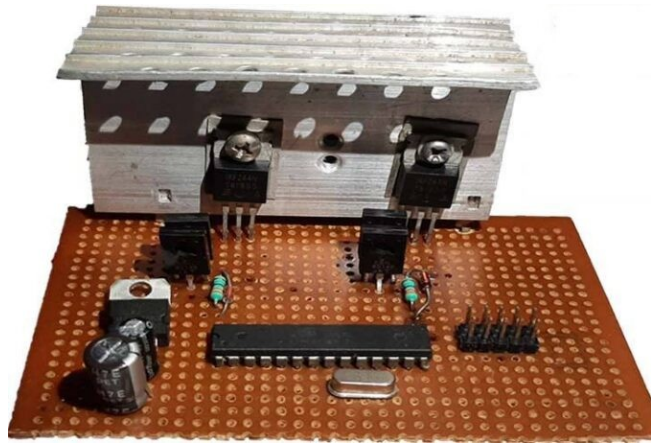
Найвищу якість вихідної напруги, що за своїми характеристиками максимально наближена до показників стаціонарної електромережі, забезпечують інвертори з чистою синусоїдою. Даний тип пристроїв належить до вищого цінового сегмента через використання складних багаторівневих топологій перетворення та прецизійних систем керування.

Використання інверторів із чистою синусоїдою забезпечує низку експлуатаційних переваг:

- Стабільність вихідних параметрів: Форма та характеристики генерованої напруги максимально наближені до показників стаціонарної електромережі, що мінімізує амплітудні коливання.
- Універсальність та безпека: Забезпечується коректна робота високочутливого обладнання (циркуляційних насосів, газових котлів, медичної техніки), яке критичне до гармонійного складу напруги.
- Оптимізація режиму роботи: Зниження рівня електромагнітних шумів та гармонічних спотворень позитивно впливає на роботу споживачів.
- Подовження ресурсу: Завдяки стабільній формі сигналу зменшується тепловий та механічний знос компонентів приладів, що суттєво збільшує термін їхньої експлуатації.

Обидві розглянуті схемотехнічні реалізації демонструють високу експлуатаційну надійність та є безпечними для кінцевих споживачів. Остаточний вибір конкретної конфігурації інвертора має базуватися на аналізі технічних характеристик навантаження, що планується до підключення, зокрема його чутливості до форми кривої вихідної напруги.

На Рис. 1.4 зображено інвертор чистий синус на платформі Arduino.



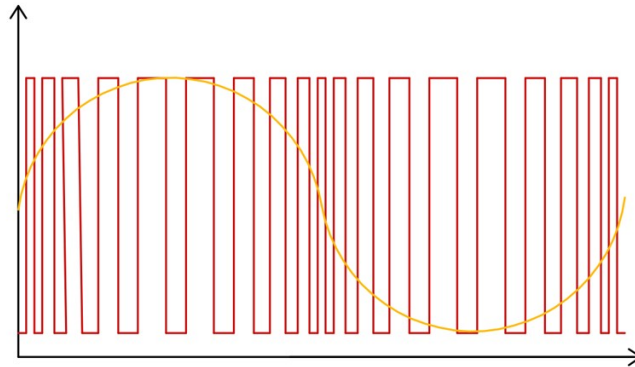
*Рис. 1.4. Реалізація інвертора з чистим синусоїдальним сигналом на МК AVR*

Застосування інверторів стає актуальним у випадках відсутності стабільного електропостачання з параметрами 230 В/50 Гц. Функціональне призначення цих пристроїв полягає у перетворенні постійного струму низької напруги (DC) у змінний високоствольтний струм (AC) заданої частоти. Залежно від форми вихідного сигналу, інвертори класифікують на два основні типи: пристрої з чистою синусоїдою (Pure Sine Wave), що відрізняються вищою вартістю та якістю сигналу, та бюджетні моделі з модифікованою синусоїдою. Основним методом формування апроксимованої синусоїди в сучасних системах є синусоїдальна широтно-імпульсна модуляція (SPWM).

Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) базується на зміні коефіцієнта заповнення (шпаруватості) імпульсної послідовності при збереженні сталого значення частоти. Регулювання тривалості імпульсу дозволяє змінювати середнє значення вихідної напруги на навантаженні, що є основою для формування необхідної форми сигналу.

Розглянемо цей механізм на прикладі сигналу з амплітудою 5 В. При коефіцієнті заповнення 100% середній рівень вихідної напруги еквівалентний амплітудному значенню (5 В). Відповідно, при скороченні робочого циклу до 50%, середнє значення напруги пропорційно знижується до 2,5 В. Таким чином, варіювання шпаруватості сигналу виступає інструментом прецизійного регулювання вихідної напруги, що є фундаментальним принципом алгоритму SPWM.

Синусоїдальний сигнал є аналоговою величиною, амплітуда якої безперервно змінюється в часі. У цифрових системах керування таку форму сигналу можна апроксимувати за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Процес відтворення синусоїди базується на динамічній зміні коефіцієнта заповнення імпульсів, що наочно продемонстровано на графіку нижче.



*Рис. 1.5. Принцип апроксимації синусоїдального сигналу методом широтно-імпульсної модуляції*

На Рис. 1.5 продемонстровано механізм синтезу синусоїдального сигналу за допомогою ШІМ. Сформована послідовність імпульсів надходить на ємнісний елемент, який виконує функцію інтегруючої ланки. Завдяки згладжуванню високочастотних пульсацій конденсатором, на виході отримуємо апроксимовану синусоїдальну напругу.

Застосування високочастотної модуляції SPWM дозволяє формувати імпульси з мінімальною тривалістю (до 1% від періоду). Процес побудови позитивної напівхвилі синусоїди базується на поступовому заряді конденсатора: кожен наступний імпульс підвищує потенціал на ємності, досягаючи максимуму при 100% заповненні, після чого ширина імпульсів симетрично зменшується до нуля. Детальна архітектура та принципи функціонування SPWM-інвертора наведені на схемі нижче.

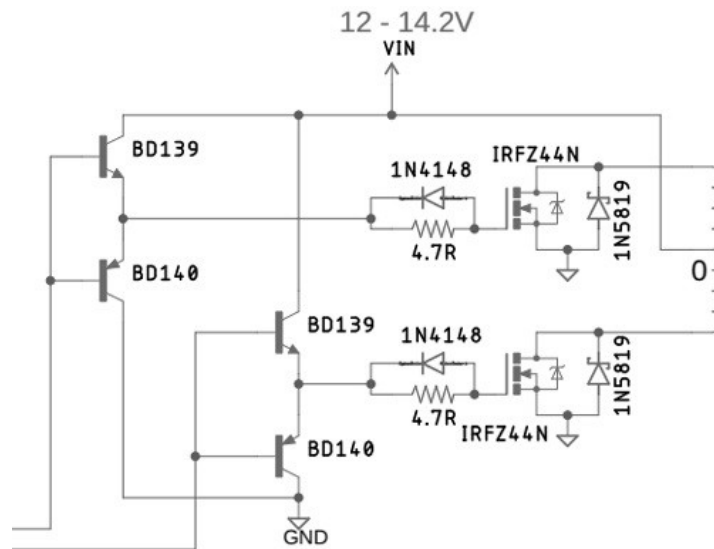


Рис. 1.6. Принципова схема інвертора з синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією (SPWM).

На Рис.1.6 відображено архітектуру перетворювача, що використовує алгоритм SPWM для формування вихідної напруги заданої

Силова частина пристрою побудована на базі N-канальних MOSFET-транзисторів, увімкнених за півмостовою топологією. Для забезпечення коректного перемикання силових ключів застосовано драйверний каскад на комплементарних парах транзисторів BD139 та BD140. З метою детального аналізу функціонування системи доцільно розглянути алгоритм роботи окремого польового транзистора, як показано на наступній схемі.

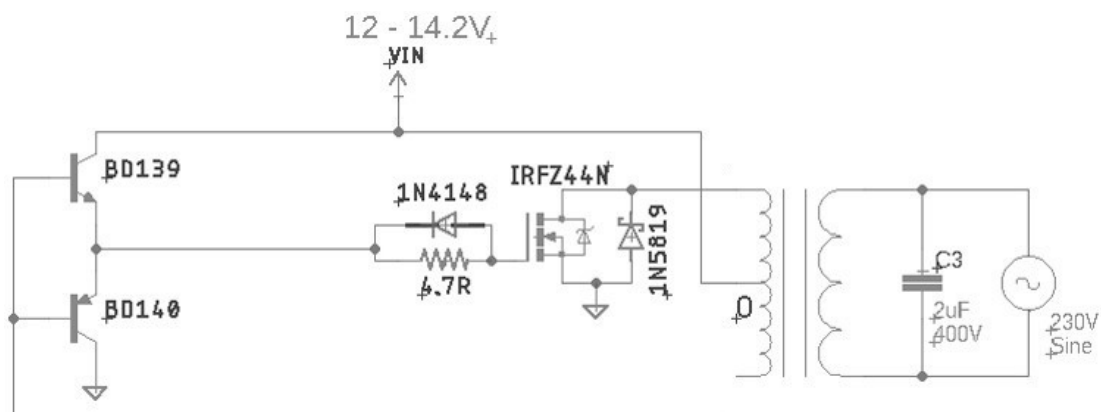
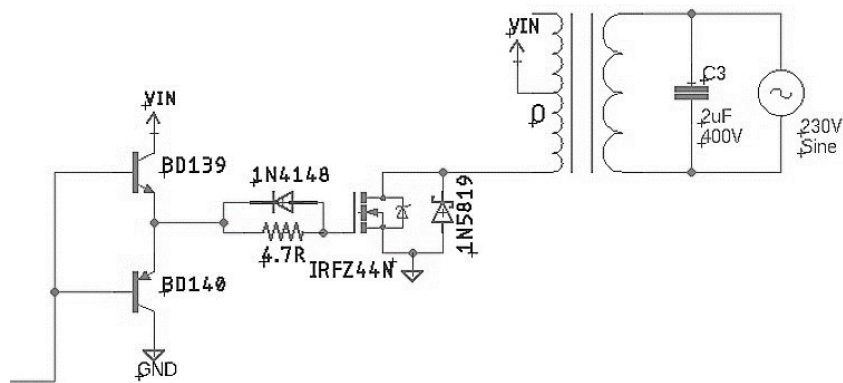


Рис. 1.7. Схематичне представлення роботи верхнього каскаду інвертора на MOSFET-транзисторі для формування позитивного півперіоду синусоїди.

Схема на Рис.1.7 відображає конфігурацію силових ключів та шлях проходження струму через навантаження під час генерування позитивної напівхвилі вихідної напруги

У стані провідності MOSFET-транзистора електричний струм проходить крізь первинну обмотку трансформатора на шину заземлення. Створений при цьому змінний магнітний потік зчеплюється з вторинною обмоткою, індукуючи в ній ЕРС, що відповідає позитивній напівхвилі синусоїдального сигналу.

Протягом наступного напівперіоду активується нижня частина силового каскаду. Відкритий стан нижнього MOSFET-транзистора забезпечує проходження струму через первинну обмотку трансформатора у зворотному напрямку. Зміна напрямку магнітного потоку спричиняє індукцію ЕРС у вторинній обмотці, що формує від'ємну напівхвилю синусоїдального сигналу.



*Рис. 1.8. Схема активації нижнього плеча інвертора на базі MOSFET для формування негативного півперіоду сигналу*

На схемі (Рис.1.8) показано конфігурацію силового каскаду в момент провідності нижнього транзистора, що забезпечує реверс струму в обмотці трансформатора

Отже, шляхом почергової комутації силових MOSFET-транзисторів із частотою 50 Гц, у вторинній обмотці трансформатора формується змінна синусоїдальна напруга амплітудою 230 В. Даний алгоритм циклічного перемикавання плечей силового каскаду є базовим принципом функціонування більшості сучасних інверторних перетворювачів.

Нижче представлена повна принципова електрична схема розробленого SPWM-інвертора, реалізованого на базі платформи Arduino. Дана схема

об'єднує керуючий мікроконтролер, драйверні каскади та силову частину перетворювача.

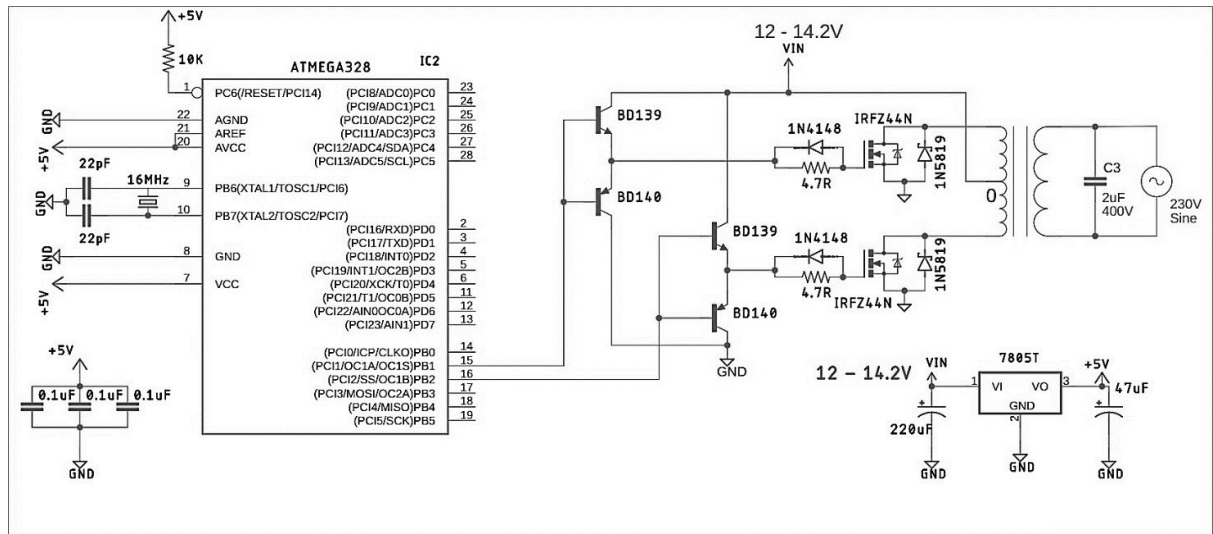


Рис. 1.9. Повна принципова електрична схема SPWM-інвертора на базі мікроконтролера ATmega328 (платформа Arduino Uno).

На схемі (Рис.1.9) представлено інтегровану архітектуру пристрою, що включає систему керування, драйвери затворів та силовий каскад перетворювача.

Для генерації ШІМ-сигналу застосовано 16-бітний таймер мікроконтролера з коефіцієнтом попереднього ділення (prescaler), що дорівнює одиниці. При тактовій частоті процесора 16 МГц це дозволяє отримати період дискретизації кожного імпульсу тривалістю 0,1 мс (на основі розрахунку  $1600/16000000$ ). Відповідно, для синтезу однієї напівхвилі синусоїдального сигналу використовується послідовність зі 100 імпульсів, а повний період коливання (цикл) формується з 200 кроків ШІМ.

Алгоритм визначення коефіцієнта заповнення (duty cycle) для кожного кроку ШІМ передбачає дискретизацію синусоїдальної функції на 200 рівних інтервалів. На основі заданої амплітуди обчислюються миттєві значення напруги, які згодом трансформуються у відповідну тривалість імпульсів. Для оптимізації швидкодії мікроконтролера отримані дані кешуються у вигляді двох статичних масивів – lookUp1 та lookUp2, кожен з яких відповідає за формування окремої півхвилі вихідного сигналу.

## 1.2. Огляд підходів проєктування різних типів інверторів

Аналіз науково-технічної літератури та актуальних інтернет-ресурсів дозволив сформулювати цілісне уявлення про сучасні підходи до проєктування різних типів інверторних перетворювачів. Опрацьований масив даних є достатньою базою для подальшої розробки власного технічного рішення.

Сучасний сегмент пристроїв керування стабілізаторами представлений переважно стандартними архітектурами. Основним функціональним вузлом у таких системах виступає автотрансформатор, що працює за принципом ступеневого регулювання. Комутація ланцюгів у цих випадках реалізується або на базі симісторних модулів, або через релейні схеми з механічними контактами.

Використання інвертора дозволяє забезпечити автономне живлення широкого спектра споживачів від бортової мережі автомобіля. До них належать засоби обчислювальної техніки та мультимедіа (ноутбуки, телевізори, аудіосистеми), побутові електроприлади, а також освітлювальне обладнання. Крім того, пристрій є критично важливим для підтримки роботи систем безпеки, включаючи відеоспостереження та охоронно-пожежну сигналізацію.

Одним із ключових критеріїв вибору перетворювача є його номінальна потужність, яка повинна відповідати сумарному енергоспоживанню підключеного обладнання. Недотримання цієї вимоги призводить до спрацювання систем захисту або термічного пошкодження компонентів пристрою. Окрему увагу слід приділити алгоритму введення в роботу: спочатку здійснюється комутація до джерела постійного струму (АКБ), після чого під'єднується навантаження, і лише на фінальному етапі активується сам інвертор та безпосередньо споживачі енергії.

На Рис. 1.10 представлено зовнішній вигляд автомобільного перетворювача напруги (інвертора) номінальною потужністю 300 Вт. Пристрій інтегрується в бортову електромережу транспортного засобу (12 В)

для забезпечення стабільного живлення споживачів, що розраховані на роботу в мережі змінного струму 220 В, за умови тривалого режиму експлуатації.



*Рис. 1.10. Зовнішній вигляд мобільного перетворювача напруги (інвертора) для бортової мережі автомобіля*

*Таблиця 1.1. Технічні характеристики автомобільного інвертора UKC 300W*

Параметр	Значення/Опис
Номінальна вихідна напруга	220 В (змінний струм)
Максимальна потужність навантаження	300 Вт
Поріг захисного відключення (LVP)	9,5 – 10,3 В (при розряді АКБ)

На Рис. 1.11 представлено інвертор UKC KC-1000D, що здатний видавати до 1000 Вт вихідної потужності. Пристрій працює від джерел живлення з напругою 12 В (наприклад, стандартних АКБ).

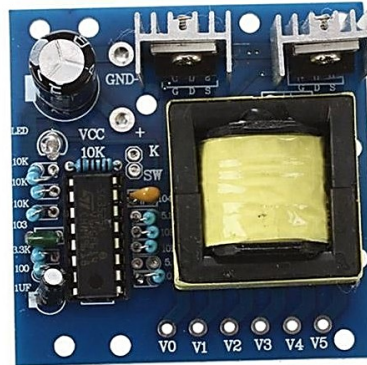


*Рис. 1.11. Перетворювач напруги (інвертор) моделі UKC KC-1000D*

Функціонування більшості бюджетних інверторів базується на формуванні вихідної напруги у вигляді прямокутних коливань (меандру) частотою 50 Гц замість чистої синусоїди. Використання такої форми сигналу є неприпустимим для пристроїв з індуктивним характером опору.

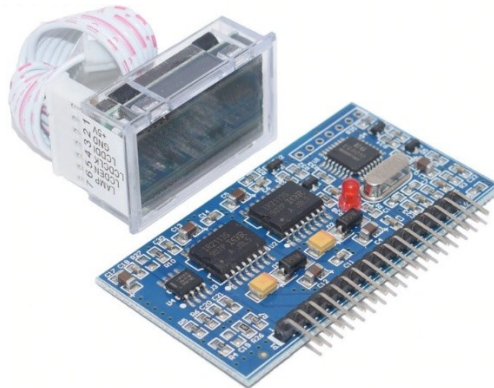
На Рис. 1.12 зображено малопотужний інвертор (150 Вт), що трансформує постійну напругу 12 В у змінну 220 В. Вихідна напруга має

форму квазісинусу, що слід враховувати при підключенні чутливої електроніки.



*Рис. 1.12. Бюджетний автомобільний інвертор DC 12V – AC 220V потужністю 150 Вт. Дана модель генерує вихідний сигнал у формі модифікованої синусоїди (квазісинусоїди)*

На Рис. 1.13 представлено блок управління EGS002 (EG8010 + IR2113) з LCD-екраном. Модуль призначений для формування сигналу із синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією (SPWM). Це інтелектуальна частина інвертора, яка потребує доукомплектування силовими ключами та трансформатором для повноцінної роботи.



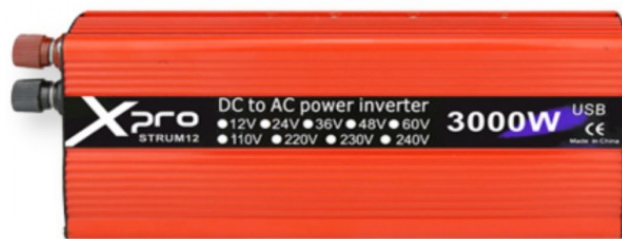
*Рис. 1.13. Спеціалізований модуль керування EGS002 для побудови інверторів із чистою синусоїдою*

На Рис. 1.14 представлено джерело автономного живлення, що перетворює 12 В на 220 В. Ключовою перевагою є формування чистого синуса, що дозволяє підключати чутливе обладнання. Апарат має робочу потужність 600 Вт (пікова – 1200 Вт).



*Рис. 1.14. Високоякісний інвертор AC/DC 12V–220V із чистою синусоїдою*

На Рис.1.5 представлено мобільний автомобільний інвертор моделі XPRO STRUM12 AR. Пристрій потужністю 3000 Вт забезпечує трансформацію напруги 12В у 220В. Конструкцією передбачено багаторівневу систему захисту від термічного перегріву, перевантаження по струму, а також критичних коливань вхідної напруги.



*Рис. 1.15. Зовнішній вигляд мобільного автомобільного перетворювача серії XPRO STRUM12 AR*

Енергоспоживання стаціонарних обчислювальних систем варіюється в межах 65–250 Вт для системного блоку та 20–80 Вт для монітора. Портативні комп'ютери (ноутбуки) демонструють значно вищу енергоефективність, споживаючи лише 15–60 Вт. На прикладі телевізорів із діагоналлю 32 дюйми спостерігається витрата енергії на рівні 45–55 Вт·год в активному режимі та близько 0,5 Вт·год у стані очікування. Слід зауважити, що на підсумкові показники потужності суттєво впливають експлуатаційні налаштування, зокрема рівень яскравості підсвітки та гучність аудіосистеми.

На ринку електроніки спостерігається дефіцит доступних інверторів малої потужності (від 100 до 200 Вт). Розробка таких пристроїв є перспективною, оскільки вони ідеально підходять для живлення портативної

спецапаратури, малопотужних підсилювачів та іншого похідного обладнання, що потребує стабільного енергозабезпечення в польових умовах.

На сьогодні в сегменті перетворювачів напруги спостерігається дефіцит доступних та відмовостійких рішень з вихідним сигналом у формі чистої синусоїди малої потужності (100–200 Вт). Створення такого пристрою є актуальним для забезпечення стабільної роботи високочутливого обладнання підрозділів поліції під час виконання завдань у польових умовах. Зокрема, впровадження подібних інверторів дозволить надійно жити таку спецтехніку, як системи зв'язку та передачі даних (термінали Starlink (V2/Gen 3) 50-100 Вт; радіорелейні станції та репітери; зарядні станції для портативних рацій (60-120 Вт)), криміналістична та цифрова техніка (ноутбуки криміналістів (45-90 Вт); портативні освітлювальні системи (світлодіодні прожектори на штативах для огляду місця події (30-50 Вт); спеціалізовані сканери та принтери (мобільні пристрої для друку протоколів або сканування відбитків пальців)), оптичні та розвідувальні засоби (зарядні пристрої для дронів: зарядка акумуляторів для популярних моделей (на кшталт DJI Mavic) споживає близько 65-100 Вт); монітори систем відеоспостереження: невеликі польові монітори (15-21 дюйм) споживають лише 20-40 Вт), тепловізори та прилади нічного бачення (їхні док-станції для підзарядки в польових умовах), медичне обладнання для парамедиків поліції (портативні холодильники для медикаментів: компактні термоелектричні контейнери для перевезення специфічних препаратів (40–60 Вт), пульсоксиметри та портативні ЕКГ:

## **РОЗДІЛ 2. ЗАСОБИ РОЗРОБКИ АПАРАТНОГО І ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОГО ІНВЕРТОРА ЧИСТИЙ СИНУС ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ЧУТЛИВОЇ АПАРАТУРИ**

### **2.1. Система автоматизованого проєктування та симуляції електронних систем Proteus**

Використання передового спеціалізованого софту дає змогу повністю автоматизувати цикл розробки електронних модулів. Це охоплює не лише створення принципів електричних схем, а й комплексне симулювання аналогово-цифрових процесів, розміщення елементів на друкованій платі (трасування), а також менеджмент і розширення баз даних електронних компонентів.

Сучасний ринок засобів автоматизації проєктування (EDA) представлений десятками спеціалізованих рішень для розробки електронних схем та систем. Серед них особливе місце посідає програмний комплекс Proteus від розробника Labcenter Electronics, який реалізує концепцію наскрізного проєктування – від створення ідеї до підготовки виробничих файлів.

Proteus забезпечує повноцінне віртуальне середовище для розробки електроніки, поєднуючи в собі потужні бібліотеки елементів та інструменти аналізу. Архітектура системи складається з двох основних модулів: графічного редактора ISIS, призначеного для візуалізації та тестування логіки роботи схем у реальному часі, а також модуля ARES, який відповідає за підготовку конструкторської документації та розробку плат.

Функціонал Proteus охоплює розробку широкого спектра пристроїв — від елементарних аналогових вузлів до інтелектуальних систем на базі мікроконтролерів. Програмний комплекс володіє масштабною базою компонентів, яка є відкритою для модифікації: за потреби користувач може самостійно створювати та інтегрувати нові моделі елементів, розширюючи стандартні бібліотеки.

Ключовою перевагою Proteus над іншими програмними комплексами (зокрема Multisim) є потужний функціонал для симуляції мікроконтролерних систем. Програма дозволяє здійснювати інтерактивне налагодження в реальному часі та покрокове виконання алгоритмів для широкого переліку архітектур, серед яких AVR, ARM7, Cortex-M3, PIC та інші популярні сімейства МК.

Система Proteus вирізняється масштабною базою інтегрованих компонентів, що включає широкий спектр периферійного обладнання. Програма пропонує готові моделі РК-дисплеїв, світлодіодних індикаторів, сенсорів температури та модулів реального часу (RTC). Особливістю пакету є наявність інтерактивних засобів керування (кнопок, комутаторів) та віртуальних вимірювальних інструментів, що разом із функцією побудови динамічних графіків забезпечує вищий рівень візуалізації порівняно з аналогами.

Завдяки широкому арсеналу інтегрованих інструментів — зокрема віртуальних осцилографів, вольтметрів, амперметрів та функціональних генераторів – Proteus дозволяє створити повноцінне цифрове лабораторне середовище. Можливість суміщення симуляції апаратної частини з відладкою програмного коду мікроконтролерів максимально наближає віртуальні випробування до реальних умов експлуатації. У сучасній інженерній практиці використання таких засобів автоматизації є невід’ємним етапом, без якого швидка та якісна розробка електронних систем стає практично неможливою.

Серед ключових переваг Proteus варто виділити високу зручність графічного редактора та наявність відкритої бібліотеки, яку інженер може доповнювати самостійно. Програма пропонує потужний вибір моделей мікроконтролерів та набір типових схем, що слугують наочними прикладами для модифікації під конкретні технічні завдання. Важливою особливістю є використання віртуальних вимірювальних пристроїв, органи керування якими максимально наближені до промислових аналогів. Окрім того, система

забезпечує повний цикл виробництва: від отримання результатів досліджень до трасування друкованої плати з її подальшою 3D-візуалізацією.

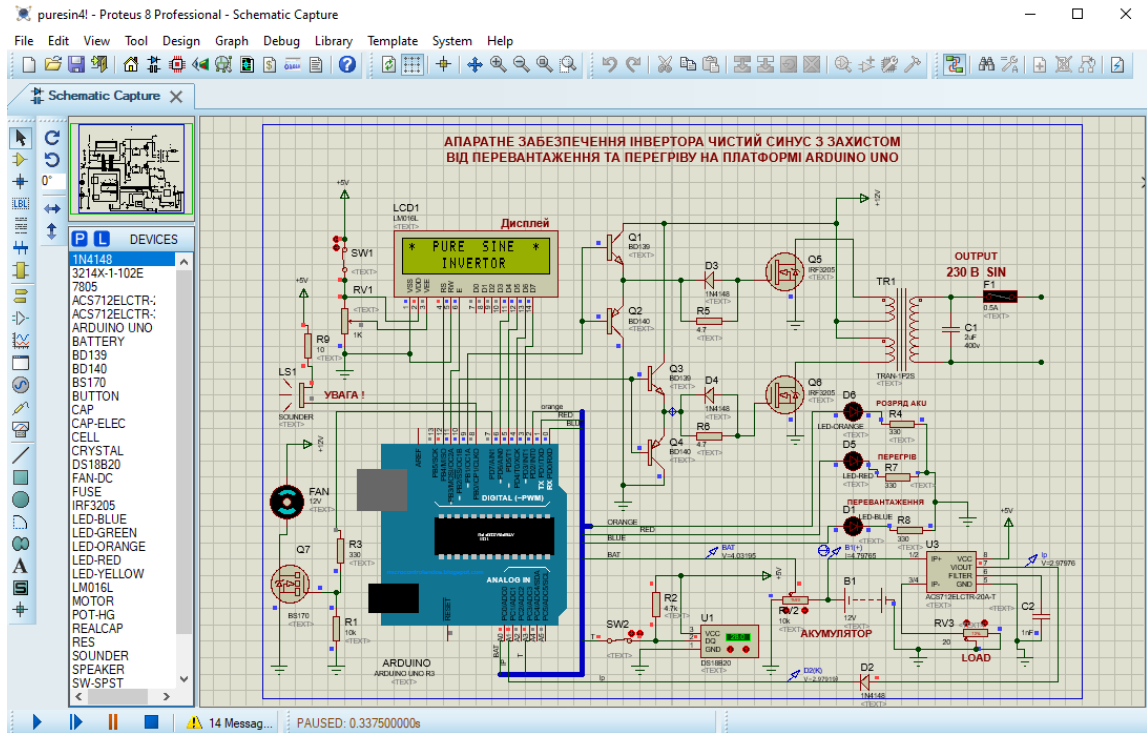


Рис. 2.1. Робоча область модуля Proteus ISIS для розробки та інтерактивної відладки електронних схем

## 2.2. Характеристика інтегрованого середовища розробки Arduino IDE

Arduino IDE – це спеціалізоване інтегроване середовище розробки, призначене для створення прикладного програмного забезпечення (так званих “скетчів”) для мікроконтролерних модулів сімейства Arduino. Дана апаратно-програмна платформа орієнтована на інженерів та розробників, які спеціалізуються на проектуванні компактних систем автоматизації, робототехнічних комплексів та засобів інтелектуального керування. В основі програмування пристроїв Arduino лежить об’єктно-орієнтована мова C++. Завдяки інструментарію AVR-GCC код оптимізується під конкретне залізо. Специфіка Arduino полягає у використанні спрощеного каркаса (framework), який приховує складні налаштування регістрів та периферії за інтуїтивно зрозумілими функціями, що значно прискорює написання прикладного ПЗ. Популярність Arduino IDE зумовлена низкою значних переваг. По-перше,

середовище є максимально доступним та має лаконічний інтерфейс, що полегшує поріг входження. По-друге, програмний комплекс забезпечує стабільну роботу в середовищі Windows та містить повний набір інструментів для відладки. Важливою особливістю є можливість вдосконалення навичок володіння мовою C++ через використання вбудованих прикладів та бібліотек. Крім того, функціонал програми дозволяє ефективно керувати проектами завдяки інструментам експорту, пошуку та автоматичної перевірки синтаксису. Підготовчий етап розробки передбачає інсталяцію інтегрованого середовища Arduino IDE на робочу станцію. Дистрибутив програми доступний для завантаження на офіційному веб-ресурсі розробника. Лаконічна архітектура інтерфейсу є вагомою перевагою цього ПЗ, оскільки вона дозволяє мінімізувати час на освоєння інструментарію та оперативно перейти до етапу безпосереднього написання програмного коду для мікроконтролерних систем.

Робочий простір середовища розробки після запуску розділений на чотири основні функціональні зони: 1. Головне меню: забезпечує повний доступ до інструментів керування файлами, налаштувань середовища та бібліотек. 2. Панель інструментів швидкого доступу: містить піктограми для оперативного виконання пріоритетних команд (компіляція, завантаження, створення та збереження скетчів). 3. Текстовий редактор: інтерактивна область, призначена для написання та редагування програмного коду пристрою. 4. Інформаційна панель (консоль): відображає службові повідомлення, статус компіляції, помилки синтаксису та обсяг пам'яті мікроконтролера, задіяний програмою.

Програмне меню містить інструменти для створення, збереження проєктів та друку коду. Особливу цінність становить вбудована база прикладів, які можна оперативно завантажувати в мікроконтролер для налагодження. Будь-який базовий приклад можна адаптувати та зберегти як власну розробку. При цьому структура вкладок “File” та “Edit” залишається стандартною, що полегшує освоєння програми.

Вкладка "Sketch" відповідає за компіляцію та підключення необхідних бібліотек. Додаткові можливості середовища зосереджені в меню "Tools", де користувач може скористатися автоформатуванням коду або монітором послідовного порту. Останній дозволяє переглядати дані, що передаються через USB, який система розпізнає як звичайний послідовний інтерфейс.

Меню "Tools" відіграє вирішальну роль у налаштуванні взаємодії з Arduino, дозволяючи обрати потрібну модель плати. Цей перелік можна розширити, внісши зміни до програмних файлів середовища. Додатково в цьому розділі вказується порт підключення. Незважаючи на те, що система здатна самостійно визначати активне з'єднання, опція ручного вибору порту залишається доступною для точного налаштування параметрів зв'язку.

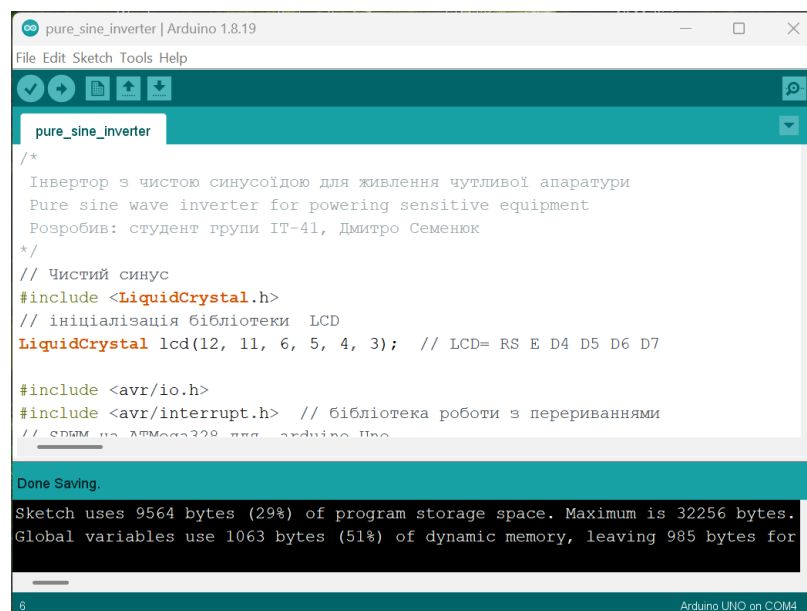
Середовище розробки Arduino IDE надає інструментарій для запису завантажувача (Bootloader) у "чисті" мікроконтролери серії ATmega. Ця функція є критично важливою для підготовки нових чіпів до роботи в екосистемі Arduino, дозволяючи як тиражувати власні пристрої, так і здійснювати ремонт шляхом заміни пошкодженого контролера на справний з подальшою прошивкою. Для оптимізації поточної розробки в середовищі Arduino IDE передбачено панель швидкого доступу, на якій зосереджено ключові елементи керування. Таке компонування інтерфейсу значно спрощує взаємодію з програмою, забезпечуючи розробнику оперативний доступ до основних інструментів, необхідних на етапах написання, відлагодження та тестування програмного забезпечення.

Інструментальна панель містить набір піктограм, що (у порядку зліва направо) забезпечують виконання таких операцій: 1. Верифікація – запуск процесу компіляції для перевірки коду на наявність синтаксичних помилок. 2. Прошивка – завантаження відкомпільованого бінарного файлу в пам'ять мікроконтролера. 3. Ініціалізація – створення нового робочого простору для розробки проєкту. 4. Імпорт – відкриття раніше збереженого файлу або проєкту з носія інформації. 5. Експорт/Збереження – запис поточної версії коду

на жорсткий диск. 6. Діагностика – активація монітора послідовного порту для моніторингу даних та налагодження системи.

Кожна функція, представлена на панелі швидкого доступу, має свій аналог у головному меню середовища розробки. Безпосередньо під кнопкою активації монітора послідовного інтерфейсу розташований ще один функціональний елемент – меню керування вкладками. Цей інструмент дозволяє ефективно організовувати структуру проєкту, розділяючи код на кілька логічних частин або модулів. Система вкладок в Arduino IDE призначена для організації масштабних проєктів та одночасної взаємодії з декількома файлами. Більшу частину робочого простору займає поле редактора, який підтримує ключові функції для полегшення програмування: кольорову підсвітку коду та маркування відповідних одна одній дужок.

Вікно повідомлень та статусний рядок слугують для візуалізації результатів компіляції та сповіщення про успішну прошивку чіпа. Це дозволяє користувачу вчасно виявляти дефекти у програмному коді. Загалом, Arduino IDE – це доступний та функціональний пакет, який дозволяє ефективно керувати розробкою, програмувати різноманітні плати Arduino та здійснювати комунікацію з пристроями через послідовне з'єднання.



```
pure_sine_inverter | Arduino 1.8.19
File Edit Sketch Tools Help
pure_sine_inverter
/*
  Інвертор з чистою синусоїдою для живлення чутливої апаратури
  Pure sine wave inverter for powering sensitive equipment
  Розробив: студент групи IT-41, Дмитро Семенюк
*/
// Чистий синус
#include <LiquidCrystal.h>
// ініціалізація бібліотеки LCD
LiquidCrystal lcd(12, 11, 6, 5, 4, 3); // LCD= RS E D4 D5 D6 D7

#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h> // бібліотека роботи з перериваннями
// спам на ATmega328 при запуску про...
```

Done Saving.

Sketch uses 9564 bytes (29%) of program storage space. Maximum is 32256 bytes.  
Global variables use 1063 bytes (51%) of dynamic memory, leaving 985 bytes for

8 Arduino UNO on COM4

Рис. 2.2. Загальний вигляд інтерфейсу середовища розробки Arduino IDE

## РОЗДІЛ 3

### АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОГО ІНВЕРТОРА ЧИСТИЙ СИНУС ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ЧУТЛИВОЇ АПАРАТУРИ

#### 3.1. Формування елементної бази надійного інвертора з чистим синусом

При виборі елементної бази для проектування інвертора пріоритет надавався надійності та точності вимірювальних компонентів. До складу пристрою увійшли:

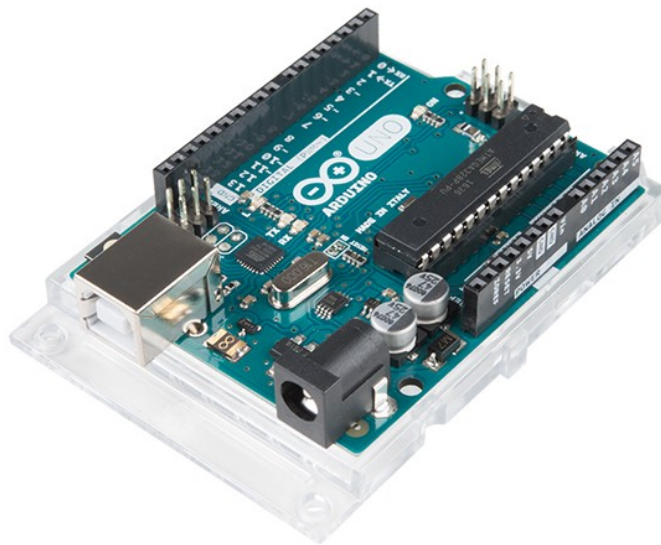
1. Платформа Arduino Uno (на базі ATmega328), що забезпечує формування SPWM-сигналу.
2. ПК-модуль WH1602B-YGK-СТК для виведення даних про стан системи.
3. Цифровий термометр DS18B20 та вимірювач струму ACS712 (20 A), що забезпечують зворотний зв'язок для алгоритмів захисту.
4. Низькочастотний трансформатор потужністю 100 Вт із симетричними первинними обмотками (10 A) та коефіцієнтом підвищення напруги 1:20.

*Опис плати Arduino Uno з МК ATmega328.* Апаратною основою модуля Arduino Uno є 8-бітний мікроконтролер ATmega328. Конструктивно плата оснащена 14 цифровими портами введення-виведення, шість із яких підтримують генерацію широтно-імпульсної модуляції (ШИМ). Для обробки сигналів із датчиків передбачено 6 аналогових входів. Стабільну тактову частоту 16 МГц забезпечує кварцовий резонатор. Комунікаційні та сервісні можливості реалізовані через інтерфейс USB, окремий роз'єм живлення, порт для внутрішньосхемного програмування (ICSP) та механічну клавішу скидання (Reset). Живлення плати здійснюється через USB-порт або зовнішній роз'єм (AC/DC адаптер, батарея). На відміну від ранніх версій, де за USB-з'єднання відповідав чіп FTDI, у новій ревізії Arduino Uno цей функціонал реалізовано на базі програмованого контролера ATmega8U2.

*Таблиця 3.1. Технічні характеристики плати Arduino Uno*

Параметр	Технічні показники
Керуючий контролер	ATmega328P
Логічна напруга живлення	5 В

Діапазон вхідної напруги	Рекомендовано: 7–12 В (допустимо: 6–20 В)
Інтерфейси вводу/виводу	14 цифрових портів (включаючи 6 каналів ШІМ)
Аналого-цифрове перетворення	6 аналогових входів
Навантажувальна здатність	До 40 мА на лінію I/O; 50 мА для виходу 3,3 В
Об'єм Flash-пам'яті	32 Кб (0,5 Кб зарезервовано під завантажувач)
Оперативна пам'ять (SRAM)	2 Кб
Енергонезалежна пам'ять (EEPROM)	1 Кб
Тактування системи	Резонатор на 16 МГц



*Рис. 3.1. Загальний вигляд Arduino Uno*

Система живлення Arduino Uno розроблена з підтримкою автоматичного перемикання між USB-інтерфейсом та зовнішнім джерелом. У разі використання зовнішнього живлення енергія може надходити від мережевого адаптера (перетворювача AC/DC) або від акумулятора. Для стаціонарного підключення передбачено стандартний роз'єм живлення діаметром 2,1 мм (з позитивним контактом у центрі). При використанні автономних джерел живлення, наприклад батарей, підключення здійснюється безпосередньо до контактів Vin та Gnd на колодці живлення платформи.

Плата підтримує зовнішнє живлення в межах 6–20 В, проте для надійної роботи рекомендується дотримуватися інтервалу 7–12 В. Нижча напруга (до 7 В) спричиняє просідання лінії 5 В та нестабільність контролера. Напруга понад 12 В є небезпечною через ризик перегріву регулятора, що може пошкодити апаратну частину.

*Виводи живлення.* Для організації системи живлення на платі передбачено групу спеціалізованих виводів. Зовнішня напруга подається через контакт VIN, що є альтернативою USB-підключенню. Внутрішня шина 5V відповідає за енергопостачання мікроконтролера і може живитися від вбудованого стабілізатора або зовнішнього джерела 5 В. Для периферії, що потребує нижчої напруги, передбачено вивід 3V3 з обмеженням по струму до 50 мА. Замикання кола здійснюється через виводи заземлення GND.

Призначення силових виводів плати:

1. VIN: Вхід для подачі зовнішньої напруги (альтернатива USB-живленню).
2. 5V: Основна лінія живлення логіки та компонентів. Джерелом може слугувати USB-роз'єм або внутрішній стабілізатор напруги.
3. 3V3: Вихід вбудованого регулятора на 3,3 В із обмеженням по струму до 50 мА.
4. GND: Контакти для підключення до спільного проводу (маси).

*Пам'ять в Arduino.* Апаратна частина популярних плат Arduino базується на чіпах Atmel AVR (зокрема моделей 168, 328, 1280 та 2560), де розподіл ресурсів пам'яті реалізовано наступним чином: 1. Програмна пам'ять (Flash): Використовується виключно для зберігання прошивки. 2. Оперативна пам'ять (SRAM): Тимчасове сховище для стеків та поточних значень змінних. 3. Постійна пам'ять (EEPROM): Надає можливість довгострокового збереження невеликих обсягів інформації.

Флеш-пам'ять та EEPROM належать до енергонезалежних типів пам'яті, що дозволяє їм зберігати записану інформацію після вимкнення живлення. Натомість оперативна пам'ять (ОЗП) є енергозалежною, тому дані в ній втрачаються при припиненні електроживлення.

Архітектура мікроконтролера ATmega328, що лежить в основі плати Arduino Uno, передбачає наявність 32 Кбайт флеш-пам'яті, при цьому 512 байт зарезервовано під завантажувач (bootloader). Об'єм оперативної пам'яті (SRAM) становить 2 Кбайт, а для тривалого зберігання даних передбачено 1

Кбайт енергонезалежної пам'яті EEPROM, робота з якою в середовищі Arduino здійснюється через однойменну стандартну бібліотеку.

*Виводи плати Arduino Uno.* Для взаємодії з периферією мікроконтролер Arduino Uno має 14 цифрових каналів. Кожен з них підтримує три базові операції керування: встановлення режиму роботи, запис логічного стану та зчитування сигналу. Робоча напруга інтерфейсів складає 5 В. Важливою особливістю є наявність вбудованих резисторів навантаження (20–50 кОм), які можна активувати програмно. Навантажувальна здатність кожного виводу обмежена значенням 40 мА, що необхідно враховувати при підключенні зовнішніх компонентів.

Окремі порти Arduino Uno мають розширений функціонал:

- Послідовний інтерфейс (UART): контакти 0 (RX) та 1 (TX). Дана пара виводів призначена для прийому (RX) та передачі (TX) цифрових даних за протоколом TTL. Електрично ці порти сполучені з відповідними лініями мікросхеми-конвертера ATmega8U2, яка забезпечує перетворення сигналів USB у формат TTL для зв'язку з комп'ютером.
- Зовнішні переривання (піни 2 і 3): можуть ініціювати виконання переривань за певними умовами. Доступні режими спрацьовування включають моніторинг низького рівня, детектування фронтів (позитивного чи негативного) або фіксацію будь-якої зміни логічного значення. Більш розгорнуті відомості щодо налаштування наведено в документації до функції `attachInterrupt()`.
- Виводи з підтримкою ШІМ (PWM): 3, 5, 6, 9, 10, 11. Кожен із цих цифрових виходів здатний генерувати 8-бітний сигнал широтно-імпульсної модуляції. Для активації та налаштування роботи цих пінів використовується команда `analogWrite()`.
- Шина SPI: представлена портами 10 (вибір підлеглого), 11 (вихід головного), 12 (вхід головного) та 13 (тактування). Ці виводи забезпечують апаратну підтримку синхронного послідовного зв'язку.

Комунікація та налаштування параметрів шини здійснюються за допомогою спеціалізованої бібліотеки SPI.

- Вивід 13 (Built-in LED): задіяний для керування вбудованим світлодіодом. Стан індикатора залежить від рівня сигналу на піні: при високому потенціалі світлодіод вмикається, при низькому – вимикається.

Для роботи з аналоговими сигналами на платі Uno виділено 6 спеціальних пінів. Завдяки 10-бітній архітектурі, вони здатні розрізняти понад тисячу градацій вхідної напруги. Хоча зазвичай вимірювання проводиться в межах 5 вольт, розробник може гнучко налаштувати ці межі, підключивши власне джерело опорної напруги до контакту AREF.

Окремі піни платформи мають розширений функціонал. Зокрема, для реалізації послідовного інтерфейсу I2C (TWI) задіяні виводи 4 (лінія даних SDA) та 5 (лінія синхронізації SCL). Програмна підтримка цього протоколу обміну даними здійснюється через стандартну бібліотеку Wire.

Окрім основних пінів, на платі доступні:

1. AREF – спеціальний порт, що дозволяє користувачеві самостійно задати шкалу для аналогових вимірювань замість стандартних 5 В.
2. Reset – контакт, що відповідає за програмне “обнулення” стану системи. Він стає незамінним, коли стандартна кнопка на Arduino Uno виявляється недоступною через встановлені зверху компоненти.

*Комунікації.* Взаємодія Arduino Uno з комп’ютером або іншими мікроконтролерами відбувається за допомогою вбудованих засобів зв’язку.

Основним інструментом є послідовна шина UART, закріплена за виводами 0 і

1. Щоб спростити процес розробки, на платі встановлено перетворювач ATmega8U2, який адаптує TTL-сигнали для передачі через стандартний USB-кабель. Це створює на комп’ютері ілюзію підключення через звичайний COM-порт, що значно полегшує налагодження програм.

Завдяки використанню стандартних протоколів USB COM у прошивці ATmega8U2, плата Uno підтримує технологію Plug-and-Play. Незважаючи на

відсутність потреби у зовнішніх драйверах, підключення до ОС Windows потребує використання файлу опису пристрою ArduinoUNO.inf для завершення інсталяції віртуального порту.

Взаємодія з Arduino Uno через USB-з'єднання дозволяє відправляти та отримувати повідомлення за допомогою монітора порту. Цей процес візуально підтверджується роботою світлодіодів RX та TX. Важливо враховувати, що при прямій комунікації через виводи 0 і 1 світлодіодна індикація не задіюється. Для створення додаткових каналів зв'язку на базі звичайних цифрових входів/виходів рекомендується використовувати бібліотеку SoftwareSerial.

В архітектурі МК ATmega328, що є основою платформи, реалізовано підтримку інтерфейсів SPI та I2C. Зокрема, робота з протоколом I2C значно спрощується завдяки наявності вбудованої бібліотеки Wire, що дозволяє швидко організувати зв'язок між контролером та різними сенсорами чи модулями.

*Струмовий захист порта USB.* Для забезпечення безпеки апаратної частини Arduino Uno оснащена інтегрованим самовідновлювальним запобіжником. Його основне призначення – захист USB-інтерфейсу комп'ютера від перевантажень та коротких замикань. Попри наявність власних систем захисту в сучасних ПК, цей елемент створює додатковий рівень безпеки. У разі виникнення надструму понад 500 мА, запобіжник автоматично розриває з'єднання, відновлюючи провідність ланцюга лише після нормалізації показників струму.

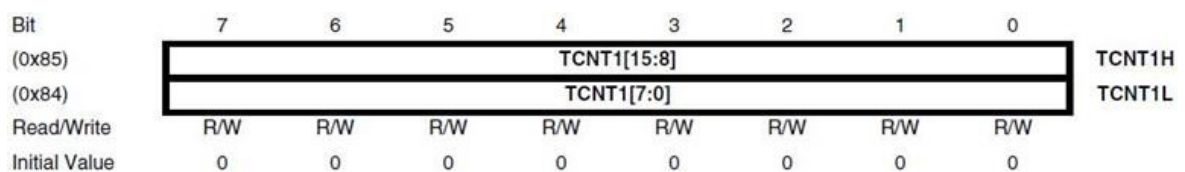
*Фізичні характеристики.* Друкована плата Uno має компактний форм-фактор із розмірами 6,9 на 5,3 см. При проектуванні корпусів слід брати до уваги виступаючі частини роз'ємів живлення та USB. Надійне закріплення модуля забезпечується за допомогою чотирьох монтажних отворів. Особливу увагу варто звернути на нерівномірний крок між роз'ємами: між 7-м та 8-м цифровими виводами відстань складає 4 мм, тоді як між рештою — стандартні 2,5 мм.

Архітектура мікроконтролера ATmega328P включає три апаратні модулі таймерів: два 8-розрядні та один 16-розрядний. Функціональні можливості цих блоків дозволяють формувати імпульсні сигнали прямокутної форми з прецизійним налаштуванням часових характеристик — частоти та коефіцієнта заповнення. Зокрема, ці ресурси використовуються для реалізації широтно-імпульсної модуляції (ШИМ), що є критично важливим для керування швидкістю приводів постійного струму (DC-моторів).

Формування імпульсів синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції (SPWM), що є основою для генерації чистого синусоїдального сигналу, реалізується шляхом налаштування 16-розрядного таймера, особливості роботи якого розглянуто нижче.

Архітектура Timer1 в ATmega328P базується на взаємодії ряду службових регістрів. Зокрема, лічильне значення накопичується в TCNT1, тоді як за логіку порівняння та генерацію вихідних сигналів відповідають регістри OCR1A/B. Для детермінації режимів функціонування (наприклад, Fast PWM або Phase Correct PWM) застосовуються байти керування TCCR1A та TCCR1B. Обробка подій у реальному часі координується через прапорці стану в TIFR1 та відповідні маски в TIMSK1, що дозволяє гнучко налаштовувати систему переривань. Вхідний потік даних для таймера може фіксуватися за допомогою регістру захоплення ICR1.

*Регістр таймера/лічильника TCNT1 (Timer/Counter 1)*



*Рис.3.2. Регістр лічильника TCNT1 (Timer/Counter) (16 p.)*

Регістр таймера складається з двох частин: старшого (TCNT1H) та молодшого (TCNT1L) байтів. Процес інкременту або декременту значення регістра відбувається з певною частотою в межах встановлених діапазонів: BOTTOM: Мінімальна межа, що відповідає значенню 0x0000. MAX: Максимальна фізична місткість регістра, яка становить 0xFFFF (65535 у

десятковій системі). TOP: Порогове значення, при досягненні якого логіка роботи лічильника змінюється. Залежно від обраного режиму, цим показником може бути: Фіксовані значення: 0x00FF, 0x01FF або 0x03FF. Значення, записані в регістрах порівняння OCR1A/B або в регістрі захоплення ICR1.

### Регістри порівняння OCR1A та OCR1B (Output Compare Registers)

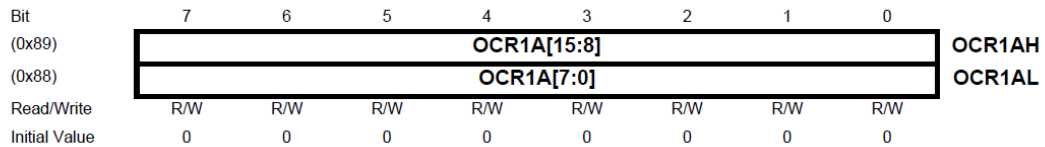


Рис. 3.3. Структура 16-бітного регістра порівняння OCR1A

У структурі 16-бітного регістра виділяють дві складові: OCR1AH, що відповідає за старші 8 розрядів (High Byte), та OCR1AL, яка містить молодші 8 розрядів (Low Byte).

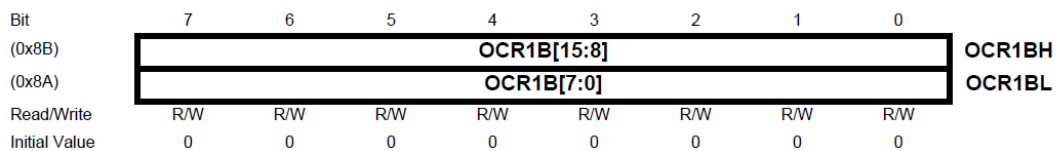


Рис. 3.4. Організація 16-бітного регістра зіставлення OCR1B

У складі 16-бітного регістра виділяють два сегменти: OCR1BH, що відповідає за старші 8 розрядів (High Byte), та OCR1BL, який містить молодші 8 розрядів (Low Byte).

Регістри OCR1A та OCR1B виступають еталонами для порівняння з поточним станом лічильного регістра TCNT1. Мікроконтролер у реальному часі зіставляє ці значення, і у момент їхньої рівності ініціюється подія «Збіг при порівнянні» (Output Compare Match). Результатом цієї події може бути як формування апаратного переривання, так і зміна логічного рівня на відповідних фізичних виводах OC1A або OC1B.

Регістри OCR1A/B слугують для задання значення TOP лічильника TCNT1. Регламент доступу до них наступний: Запис: старший байт (High) -> молодший байт (Low). Читання: молодший байт (Low) -> старший байт (High).

### Функціональне призначення та структура регістра ICR1

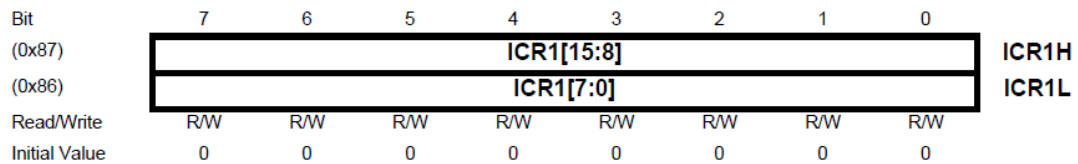


Рис. 3.5. Структура 16-бітного регістра захоплення ICR1

Дані в регістрі ICR1 автоматично оновлюються поточним станом лічильника TCNT1 щоразу, коли на фізичному виводі ICP1 фіксується відповідний сигнал. Крім основної функції захоплення, ICR1 може застосовуватися для визначення верхньої межі рахунку (TOP) таймера-лічильника 1.

#### Призначення та архітектура керуючого регістра TCCR1A

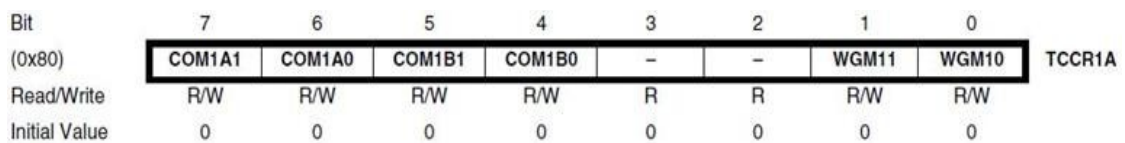


Рис. 3.6. Структура 8-бітного регістра керування TCCR1A

Функціональне призначення розрядів регістра TCCR1A:

- Біти 7:6 – COM1A1:0: Визначають алгоритм роботи виходу порівняння каналу А (Compare Output Mode). Ці біти керують поведінкою виводу OC1A при збігу значень лічильника та регістра порівняння.
- Біти 5:4 – COM1B1:0: Задають конфігурацію виходу порівняння каналу В. Аналогічно до каналу А, вони визначають стан виводу OC1B у моменти спрацьовування компаратора.

Біти COM1A1:0 та COM1B1:0 відповідають за конфігурацію функціонування виводів OC1A і OC1B. Взаємозв'язок між логічними рівнями цих розрядів та поведінкою виходів у режимах ШІМ з фазовою та частотною корекцією представлено в наведеній нижче Табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Конфігурація виходів у режимах ШІМ із корекцією фази та частоти

COM1A1/ COM1B1	COM1A0/ COM1B0	Опис функціонування
0	0	Звичайний режим роботи порту; виводи OC1A/OC1B від'єднані від модуля таймера.
0	1	Якщо WGM1[3:0] дорівнює 9 або 11: інвертування стану OC1A при збігу, OC1B працює як стандартний порт. В інших

		випадках — робота як звичайний ввід/вивід.
1	0	Неінвертований режим: скидання (Low) виходу OC1A/OC1B при інкременті (прямому рахунку) та встановлення (High) при декременті (зворотному рахунку).
1	1	Інвертований режим: встановлення (High) виходу OC1A/OC1B при інкременті та скидання (Low) при зворотному рахунку.

Біти 1:0 – WGM11:10: Спільно з відповідними розрядами регістра TCCR1B, ці біти визначають режим генерації сигналу (Waveform Generation Mode) для першого таймера. Повна конфігурація можливих режимів функціонування представлена у Табл. 3.3.

Таблиця 3.3. Режими формування вихідних сигналів (WGM) таймера 1

№	WGM1 [3:0]	Режим функціонування таймера	Межа рахунку (TOP)	Оновлення OCR1x	Спрацювання TOV1
0	0000	Нормальний (Normal)	0xFFFF	Негайно	MAX
1	0001	Phase Correct PWM, 8-біт	0x00FF	TOP	BOTTOM
2	0010	Phase Correct PWM, 9-біт	0x01FF	TOP	BOTTOM
3	0011	Phase Correct PWM, 10-біт	0x03FF	TOP	BOTTOM
4	0100	Скидання при збігу (CTC)	OCR1A	Негайно	MAX
5	0101	Fast PWM, 8-біт	0x00FF	BOTTOM	TOP
6	0110	Fast PWM, 9-біт	0x01FF	BOTTOM	TOP
7	0111	Fast PWM, 10-біт	0x03FF	BOTTOM	TOP
8	1000	PWM з корекцією фази та частоти	ICR1	BOTTOM	BOTTOM
9	1001	PWM з корекцією фази та частоти	OCR1A	BOTTOM	BOTTOM
10	1010	PWM з корекцією фази	ICR1	TOP	BOTTOM
11	1011	PWM з корекцією фази	OCR1A	TOP	BOTTOM
12	1100	Скидання при збігу (CTC)	ICR1	Негайно	MAX
13	1101	Резерв	—	—	—
14	1110	Швидкий ШІМ (Fast PWM)	ICR1	BOTTOM	TOP
15	1111	Швидкий ШІМ (Fast PWM)	OCR1A	BOTTOM	TOP

Конфігураційний регістр В керування таймером/лічильником 1 (TCCR1B)

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0x81)	ICNC1	ICES1	—	WGM13	WGM12	CS12	CS11	CS10	TCCR1B
Read/Write	R/W	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Рис. 3.7. Структура 8-розрядного регістра керування TCCR1B для Таймера 1

У Табл. 3.4 наведено комбінації керуючих бітів 2:0 регістра TCCR1B, які визначають коефіцієнт ділення вхідного сигналу для таймера TCNT1. Система підтримує п'ять стандартних значень подільника: 1, 8, 64, 256 та 1024.

Таблиця 3.4. Режими вибору частоти синхронізації таймера/лічильника 1

CS12	CS11	CS10	Опис (Джерело тактування/Коефіцієнт ділення)
0	0	0	Таймер зупинено (немає тактування)
0	0	1	Системна частота $f_{clk\ I/O}$ (без ділення)
0	1	0	$f_{clk\ I/O}/8$ (Поділ на 8)
0	1	1	$f_{clk\ I/O}/64$ (Поділ на 64)
1	0	0	$f_{clk\ I/O}/256$ (Поділ на 256)
1	0	1	$f_{clk\ I/O}/1024$ (Поділ на 1024)
1	1	0	Зовнішнє тактування (вхід T1), за спадним фронтом
1	1	1	Зовнішнє тактування (вхід T1), за висхідним фронтом

Регістри управління TCCR1A і TCCR1B визначають алгоритм функціонування Таймера 1. Стан “000” для групи бітів вибору тактування (біти 2:0 регістра TCCR1B) вимикає подачу імпульсів на лічильник TCNT1, фактично зупиняючи його роботу.

TIFR1 (Timer/Counter1 Interrupt Flag Register) являє собою восьмирозрядний регістр, який слугує для індикації подій, що генерують переривання в роботі першого таймера.

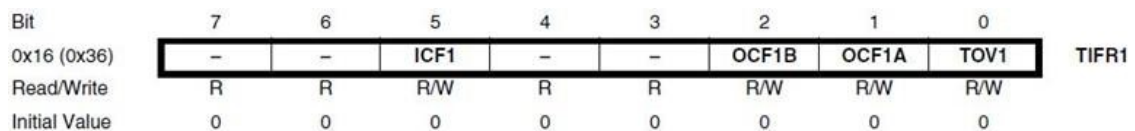


Рис. 3.8. Структура восьмирозрядного регістра прапорців переривань TIFR1 для Таймера 1

Призначення бітів регістра TIFR1:

ICF1 (Input Capture Flag 1): Реєструє факт спрацювання входу захоплення ICP1. У режимах, де ICR1 виступає як регістр межі рахунку (TOP), встановлення цього прапорця свідчить про завершення повного циклу лічення до заданого пікового значення.

Прапорець події захоплення (ICF1) деактивується в момент передачі управління вектору переривання. Крім того, для скидання даного індикатора в початковий стан (логічний “0”) використовується метод запису логічної одиниці в цей розряд.

OCF1B (прапорець порівняння B): Реєструє факт досягнення лічильником значення, заданого в регістрі OCR1B. Після того, як переривання за цією подією буде оброблене, прапорець апаратно повертається в нульовий стан. Крім того, розряд можна обнулити вручну, записавши в нього одиницю.

OCF1A (прапорець порівняння каналу A): Реєструє факт досягнення лічильником встановленого порогу в OCR1A. Процес очищення прапорця ініціюється або автоматично (під час виклику процедури переривання), або через запис логічної “1” у відповідну позицію регістра статусу.

TOV1 (прапорець переповнення): Реєструє подію проходження лічильником точки нуля. В архітектурі таймера цей прапорець може розглядатися як віртуальний 17-й розряд регістра TCNT1 (Рис. 3.9), забезпечуючи розширення діапазону відстеження подій.

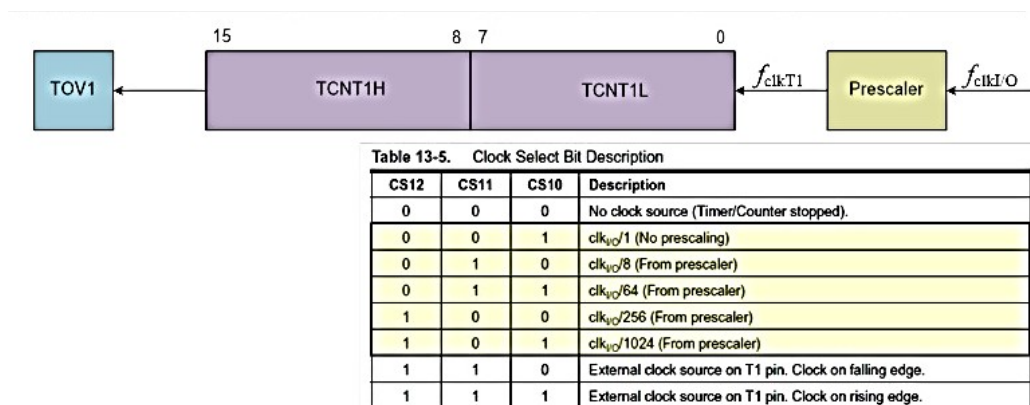


Рис. 3.9. Схема формування сигналу переповнення TOV1 для Timer1

де  $f_{clk\_I/O}$  – частота тактування таймера Timer1 мікроконтролера AVR, що надходить від системного генератора.

TIMSK1 являє собою восьмибітний регістр, призначений для керування (дозволу або заборони) локальними перериваннями таймера/лічильника 1.

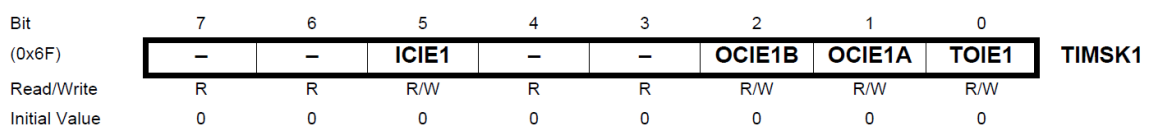


Рис. 3.10. Структура 8-бітного регістра масок переривань TIMSK1

Функціональне призначення розрядів регістра TIMSK1 полягає у програмному керуванні відповідними джерелами переривань таймера 1.

Встановлення або скидання цих бітів дозволяє гнучко активувати або деактивувати реакцію мікроконтролера на події модуля Timer/Counter1.

ICIE1 – дозвіл переривання захоплення Timer1. Коли біт дорівнює “1”, мікроконтролер реагує на події на піні ICP1, якщо встановлено прапорець I у регістрі SREG.

OCIE1B – розряд дозволу переривання за результатами порівняння “B” першого таймера. Логічна одиниця в цьому біті дозволяє системі реагувати на рівність значень TCNT1 та OCR1B, що необхідно для точної синхронізації керуючих імпульсів.

Розряд OCIE1A керує маскою переривання за збігом каналу A таймера 1. Якщо даний біт активний, то рівність значень у реєстрах TCNT1 та OCR1A призведе до переходу на відповідний вектор переривання, за умови наявності глобального дозволу в системі.

TOIE1 – біт дозволу переривання за переповненням першого таймера. Його активація дозволяє мікроконтролеру реагувати на встановлення прапорця TOV1, що є критично важливим для циклічних процесів та коректного відліку

Для формування високоякісного сигналу SPWM (чиста синусоїда) перший таймер мікроконтролера налаштовується на режим Phase and Frequency Correct PWM (режим 8, WGM13:0=1000<sub>2</sub>). Даний режим забезпечує симетричність імпульсів відносно центру періоду, що мінімізує гармонійні

Використання реверсивного режиму лічби (від BOTTOM до TOP і назад) забезпечує формування симетричних імпульсів відносно центру періоду. Такий підхід є найбільш обґрунтованим для систем керування електроприводами та інверторами SPWM, оскільки дозволяє значно знизити рівень гармонійних спотворень у вихідному сигналі.

У даній конфігурації верхня межа рахунку визначається вмістом регістра ICR1, після досягнення якого напрямок лічби змінюється на зворотний. Регістри порівняння OCR1A та OCR1B відповідають за регулювання коефіцієнта заповнення (шпаруватості), що дозволяє генерувати

на відповідних виводах (OC1A, OC1B) сигнали з синусоїдальною модуляцією (SPWM).

Налаштування бітів COM1x1:0 у стан “2” забезпечує формування неінвертованого ШІМ-сигналу на відповідних виходах. Натомість встановлення комбінації “3” переводить вихідні каскади в інверсний режим роботи, де логічні рівні сигналу змінюються на протилежні відносно базового алгоритму порівняння.

Розрахунок частоти вихідних імпульсів ШІМ для обраного режиму роботи таймера здійснюється за наступною математичною залежністю (для режиму Phase and Frequency Correct PWM):

$$f_{PWM} = \frac{f_{clk\_I/O}}{2 \cdot N \cdot TOP} \quad (3.1)$$

Де:  $f_{clk\_I/O}$  – тактова частота мікроконтролера (для Arduino Uno вона становить 16 МГц);  $N$  – коефіцієнт попереднього дільника (prescaler), що може приймати значення {1, 8, 64, 256, 1024};  $TOP$  – граничне значення лічильника, яке визначається вмістом регістра ICR1.

Для реалізації алгоритму SPWM із частотою несучої 10 кГц та дискретизацією у 200 відліків на один період синусоїди, регістр ICR1 встановлюється у значення 800. Це визначає амплітуду рахунку таймера при тактовій частоті мікроконтролера 16 МГц. Конфігурація регістра TCCR1B (значення 0x11) активує 8-й режим роботи таймера (Phase and Frequency Correct PWM) та забезпечує тактування без попереднього поділу частоти.

**Огляд символного LCD-модуля на контролері HD44780.** Розробка компанії Hitachi — контролер HD44780 — набула статусу загальноприйнятого індустріального стандарту. Його архітектура лежить в основі більшості сучасних символних рідкокристалічних (LCD) дисплеїв.

Даний мікроконтролер має низку аналогів, що повністю підтримують його систему команд та інтерфейс взаємодії. Виробництвом таких сумісних рішень займаються провідні технологічні компанії, серед яких Samsung, Philips, Epson та Sanyo. Крім того, на ринку представлена значна кількість

виробників, які використовують ці чипи як апаратну основу для своїх готових рідкокристалічних модулів. Сфера застосування LCD-модулів охоплює широкий спектр обладнання: від контрольно-вимірювальних систем та медичної техніки до засобів промислової автоматизації. Крім того, вони є невід'ємною частиною офісної периферії, зокрема факсимільних апаратів, копіювальних пристроїв та телекомунікаційного устаткування.

Символьні РК-модулі вирізняються низькою собівартістю та енергоефективністю, забезпечуючи при цьому високу чіткість відображення значних масивів даних. Впровадження таких індикаторів дозволяє суттєво оптимізувати витрати часу та коштів у процесі проектування нових мікропроцесорних систем.

Наявність системи заднього підсвічування в модулях на базі HD44780 забезпечує комфортну роботу з інтерфейсом навіть за умови недостатньої видимості або повної відсутності зовнішнього світла. Завдяки широкому температурному діапазону (від  $-20$  до  $+70$  °C), ці компоненти демонструють стабільну роботу в складі бортового, польового чи портативного обладнання, що експлуатується у складних кліматичних умовах.



*Рис. 3.11. Зовнішній вигляд знакосинтезуючого РК-модуля конфігурації 16x2 (модель WH1602B-YGK-CTK)*

Можливості контролера HD44780 дозволяють обслуговувати до 80 знаків, розподілених у два рядки по 40 символів, при стандартному розмірі знакомісця 5x7 точок. Для дисплеїв більшої ємності (наприклад, конфігурації 4x40) архітектура передбачає об'єднання двох ідентичних мікросхем керування. Крім стандартної матриці, пристрій підтримує відображення символів підвищеної деталізації з розмірністю 5x10 пікселів.

Номенклатура символьних дисплеїв охоплює значний діапазон форматів виводу даних. Стандартна низка пристроїв включає такі популярні моделі, як

16x2, 20x2 та 20x4, а також допоміжні формати (8x2, 16x4, 24x2, 40x4 тощо). Поряд із цим, виробники випускають і менш тиражовані модифікації, до яких можна віднести дисплеї типів 8x1, 32x2 чи 12x2.

Архітектура вбудованого контролера не створює жорстких лімітів щодо кількості або варіантів розміщення знаків на екрані. Технічно дисплей може містити від 10 до 80 символів, проте специфіка певних конфігурацій здатна ускладнити процес програмного керування адресацією пам'яті.

Навіть за умови ідентичного формату відображення символів, РК-модулі можуть суттєво відрізнятися за конструктивним виконанням. Це стосується як габаритних розмірів самого екрана, так і конфігурації друкованої плати чи схеми монтажних отворів. Зокрема, модельний ряд компанії Powertip налічує 37 варіацій конструктивів для 11 базових знакосинтезуючих форматів (від 8x2 до 40x4).

Аналіз асортименту провідних постачальників РК-дисплеїв свідчить про наявність як унікальних розробок, так і уніфікованих рішень. Певні формати й конструктивні виконання є ексклюзивними продуктами окремих брендів, тоді як інші набули статусу індустріальних стандартів і масово випускаються більшістю учасників ринку. Прикладом високого ступеня стандартизації є LCD-модулі формату 24x2, що випускаються різними виробниками. Зокрема, моделі PC2402-A (Powertip), ED24200 (EDT), DMC-24227 (Optrex), SC2402A (Bolymin), а також вироби від Veritronix (MDI-S-24265) та Pievue (PVC240202) мають ідентичні геометричні параметри. Це забезпечує їхню повну конструктивну сумісність та взаємозамінність у процесі проектування та ремонту електронних пристроїв.

Конструктивне виконання конкретного LCD-модуля допускає низку модифікацій, зокрема застосування різних типів рідкокристалічних панелей, що визначають колірну гаму фону та символів. Окрім візуальних відмінностей, дисплеї класифікують за структурою РК-матеріалу на три основні типи: TN, STN та FSTN. Моделі на базі STN та FSTN технологій характеризуються вищою вартістю, проте забезпечують покращену

контрастність та ширші кути огляду порівняно з базовими TN-матрицями. При цьому структури типу FSTN мають найвищі експлуатаційні показники серед зазначених варіантів. Конструктивна особливість LCD-модулів передбачає розміщення блоку фонового підсвічування безпосередньо між рідкокристалічною панеллю та контролером керування. Така архітектура вимагає використання РК-матриць із прозорою або напівпрозорою структурою заднього шару. Слід зазначити, що у випадку повністю прозорої підкладки візуалізація даних стає неможливою без активації внутрішнього джерела світла. Існує три основні підходи до реалізації системи фонового підсвічування LCD-модулів: 1. Електролюмінесцентні панелі (EL): базуються на використанні тонкоплівкового елемента, що активується під дією змінної напруги високої амплітуди (в межах 100–150 В). 2. Люмінесцентні лампи з холодним катодом (CCFL): забезпечують рівномірний розподіл світлового потоку по всій площі екрана завдяки інтегрованим відбивачам або плоским оптичним світловодам. 3. Світлодіодні матриці (LED): сучасний метод, за якого освітлення формується масивом напівпровідникових випромінювачів.

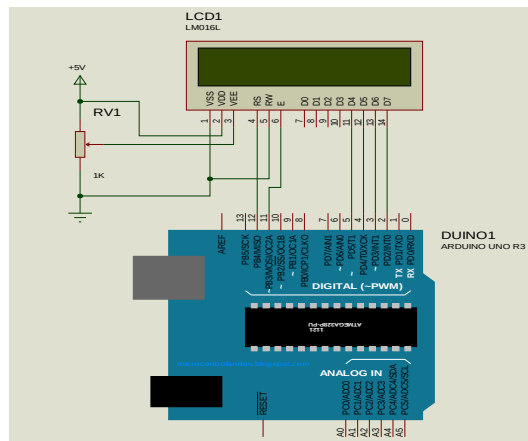
Застосування електролюмінесцентних та газорозрядних систем дозволяє досягти високої інтенсивності світіння та чистого білого спектра за умови мінімальних витрат енергії. Проте суттєвим недоліком цих технологій є потреба у високовольтному живленні, що створює додаткові труднощі при проектуванні автономних пристроїв. На противагу їм, світлодіодна (LED) підсвітка є значно практичнішою: для її роботи достатньо напруги 5 В (при падінні на самому діоді близько 4,2 В). Окрім спрощення схемотехніки, LED-технологія вирізняється колосальним ресурсом експлуатації та стабільністю роботи у широкому температурному коридорі — від  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що робить її незамінною для промислових та польових умов.

Інтерфейс взаємодії LCD з мікроконтролером базується на паралельній синхронній шині та включає такі групи виводів:

1. Шина даних: 4 або 8 біт (D0 – D7).

2. Керуючі сигнали: вибір регістра (RS), читання/запис (R/W) та стробування (E).
3. Електроживлення: лінії VCC/VDD (+5 V) та GND.
4. Корекція зображення: вивід VEE (Vo) для налаштування контрастності.

Схема з'єднання LCD-модуля з мікроконтролерною платформою Arduino Uno наведена на Рис. 3.12.



*Рис. 3.12. Схема електричних з'єднань LCD-модуля з мікроконтролерною платформою Arduino Uno*

**Опис цифрового датчика температури DS18B20.** Серед сучасних засобів вимірювання температури провідні позиції посідає розробка компанії Dallas Semiconductor – сенсор моделі DS18B20. Даний пристрій являє собою цифровий перетворювач, характерною особливістю якого є можливість програмного налаштування точності (роздільної здатності) вимірювань.

Для моніторингу термічних показників широко застосовується інтелектуальний датчик DS18B20. Він забезпечує передачу даних у цифровому форматі та дозволяє розробнику гнучко встановлювати необхідну розрядність перетворення залежно від вимог до швидкодії та прецизійності системи. Цифровий термометр DS18B20 виробництва Dallas Semiconductor є одним із найбільш затребуваних рішень у сучасній електроніці. Функціонал пристрою передбачає змінну роздільну здатність перетворення, що керується на програмному рівні. Ключові технічні та експлуатаційні параметри цифрового термометра DS18B20 включають:

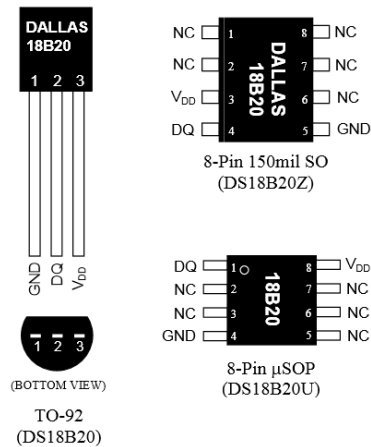
- Інтерфейс передачі даних: Обмін інформацією з головним контролером реалізовано через протокол 1-Wire, що мінімізує кількість необхідних ліній зв'язку.
- Адресація пристроїв: Кожен екземпляр датчика має зашитий на виробництві унікальний 64-бітний серійний номер. Це дозволяє створювати розгалужені мережі моніторингу, де декілька сенсорів підключаються до однієї лінії з індивідуальним зверненням до кожного.
- Електрична сумісність: Завдяки робочому діапазону напруг 3,0–5,5 В, пристрій є універсальним для інтеграції як у класичні 5-вольтові системи, так і в сучасні низьковольтні (3,3 В) рішення.
- Метрологічні характеристики: Датчик працює в широкому температурному вікні від  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ . У найбільш критичному діапазоні ( $-10\dots+85^{\circ}\text{C}$ ) похибка вимірювання не перевищує  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .
- Гнучкість налаштувань: Користувач може програмно обирати розрядність перетворення (від 9 до 12 біт), балансуючи між швидкістю отримання даних та їх точністю.
- Апаратна логіка тривоги: Наявність енергонезалежних регістрів для встановлення температурних порогів дозволяє використовувати сенсор у схемах термостатування, де він самостійно генерує сигнал тривоги при виході за задані межі.

Завдяки програмній ідентичності з моделлю DS1822, дані датчики знаходять широке застосування в автоматизованих терморегуляторах, промислових комплексах, а також у побутових приладах та інших пристроях, що потребують точного моніторингу температури.

Виробник пропонує датчик DS18B20 у трьох конструктивних виконаннях: компактних 8-вивідних SO (150 mils) та uSOP, а також у найбільш розповсюдженому 3-контактному корпусі TO-92. Взаємодія даного сенсора з керуючим мікроконтролером реалізується за допомогою спеціалізованого протоколу 1-Wire. Важливою функціональною перевагою DS18B20 є робота в режимі паразитного живлення. Іншими словами, сенсор здатний

функціонувати, споживаючи енергію від самої комунікаційної шини, що мінімізує кількість необхідних дротів у системі.

Наявність індивідуального 64-розрядного ідентифікатора в кожному сенсорі дозволяє створювати розгалужені мережі температурного моніторингу на обмеженому просторі. При цьому для обміну даними з контролером задіюється лише один загальний комунікаційний провід.



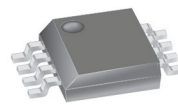
*Рис. 3.13. Варіанти конструктивного виконання датчика температури DS18B20 (корпуси TO-92, SOIC та uSOP)*


**Опис аналогового давача струму ACS712.** Для моніторингу електричних показників часто обирають давач ACS712, що функціонує на базі ефекту Холла. Даний компонент є універсальним рішенням для вимірювання АС/DC струмів у промисловості та автомобілебудуванні. Модельний ряд включає варіанти, розраховані на максимальні навантаження 5 А, 20 А та 30 А, що дозволяє підібрати оптимальний датчик під конкретні завдання проекту. В основі сенсора лежить мікросхема Холла, розміщена над мідним провідним шаром. Коли по мідному шляху проходить струм, він генерує відповідне магнітне поле. Датчик фіксує ці зміни та генерує аналогову напругу, що лінійно залежить від потужності поля, дозволяючи точно визначити силу струму в ланцюзі. Вихідна напруга сенсора змінюється пропорційно напрямку проходження струму: вона збільшується при прямому протіканні та зменшується, якщо струм змінює свій напрямок на протилежний.

Низький внутрішній опір мідного провідника, що становить лише 1,2 мОм, забезпечує мінімальне падіння напруги. Завдяки цьому вплив на загальну похибку вимірювання сили струму є практично несуттєвим.

Конструктивною перевагою пристрою є наявність гальванічної розв'язки між силовою лінією та вимірювальним контуром мікроконтролера. Це забезпечує надійну електричну ізоляцію, що дозволяє безпечно проводити моніторинг струму в колах з високим рівнем напруги. Зовнішній вигляд датчика струму ACS712 в корпусі SOIC наведено на Рис.3.14:

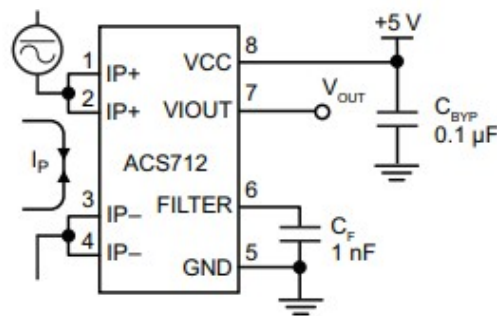
Package: 8 pin SOIC (suffix LC)



Approximate Scale 1:1 

*Рис. 3.14. Зовнішній вигляд вимірювального датчика ACS712 у конструктивному виконанні SOIC-8*

На Рис.3.15 зображено схему підключення мікросхеми датчика струму ACS712.



*Рис. 3.15. Принципова електрична схема інтеграції датчика струму в систему моніторингу*

Напруга живлення +5 В подається на 8-й вивід мікросхеми, тоді як 5-й вивід з'єднується із загальною шиною (GND). Вимірюваний струм пропускається через входні контакти 1, 2 та 3, 4. Інформаційний сигнал знімається з виходу 7, де формується напруга, прямо пропорційна силі струму. Залежно від напрямку потоку часток, рівень вихідного сигналу змінюється в діапазоні від 2,5 В до 5 В або до 0 В. При цьому показник чутливості сенсора визначається його номінальним робочим діапазоном.

Модель ACS712ELCTR-05B-T призначена для детектування струму в межах  $\pm 5$  А. Показник чутливості становить 185 мВ/А, що забезпечує відповідну точність перетворення сили струму в аналогову напругу.

Модель ACS712ELCTR-20A-T розрахована на детектування сили струму в межах  $\pm 20$  А. Характерною особливістю цієї версії є чутливість, що становить 100 мВ/А, що дозволяє лінійно перетворювати вимірювану величину в електричний сигнал.

Для вимірювання струмів у межах  $\pm 30$  А застосовується інтегральна схема ACS712ELCTR-30A-T. Ця модифікація характеризується чутливістю на рівні 66 мВ/А, що визначає крок зміни вихідної напруги залежно від сили протікаючого струму.

Графічна залежність, представлена на Рис.3.16, ілюструє зміну вихідної напруги компонента відповідно до вхідного струму при напрузі живлення 5 В.

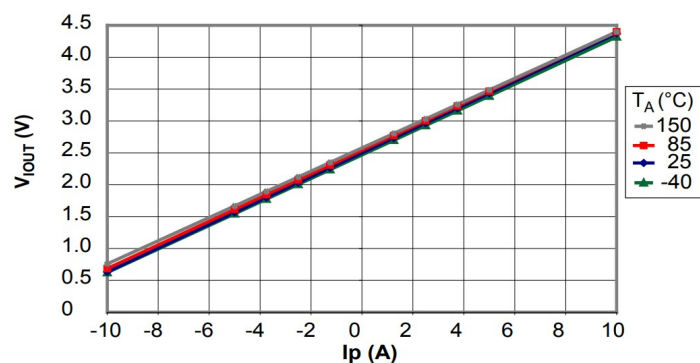


Рис. 3.16. Графічна залежність вихідного сигналу напруги від значення вхідного струму мікросхеми

На сучасному ринку представлені готові функціональні модулі на базі мікросхеми ACS712, зовнішній вигляд яких наведено на Рис. 3.17.

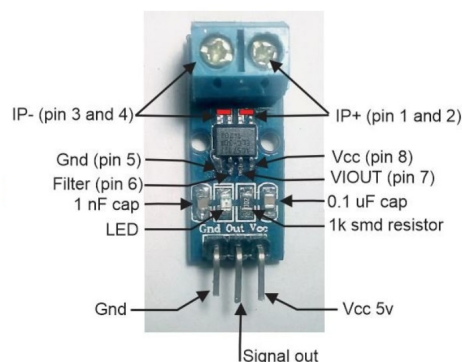


Рис. 3.17. Зовнішній вигляд вимірювального модуля на базі сенсора ACS712

Принципова електрична схема вимірювального модуля представлена на Рис. 3.18.

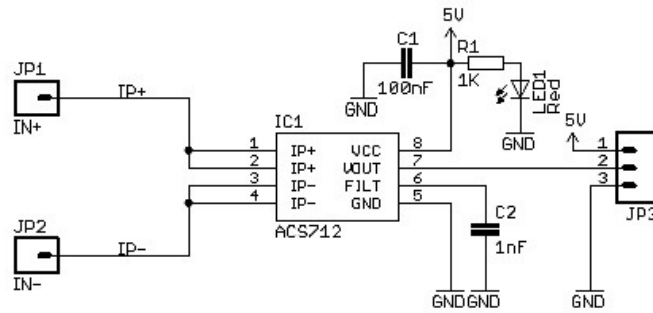


Рис. 3.18. Принципова електрична схема модуля вимірювання струму на базі мікросхеми ACS712

На Рис.3.19 представлена принципова схема вузла для вимірювання змінного струму, реалізованого на базі сенсора ACS712 та мікроконтролера Arduino Uno.

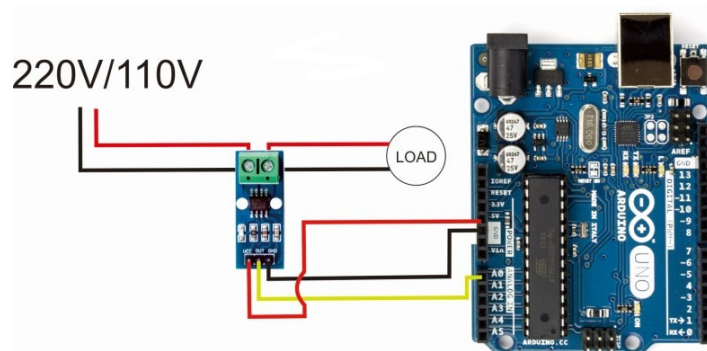


Рис. 3.19. Схема електрична підключення сенсора ACS712 до мікроконтролера Arduino Uno для моніторингу змінного струму

Аналоговий сигнал з виходу датчика надходить на вхід A0 мікроконтролера. Для верифікації функціонування вимірювального модуля у зв'язці з платформою Arduino Uno можна скористатися наведеним нижче програмним кодом (скетчем):

```

/* Демонстраційна програма для роботи з датчиком струму ACS712 */
#include "ACS712.h"
// Ініціалізація сенсора: модель на 5А, підключена до входу A0
ACS712 sensor(ACS712_05B, A0);
void setup() {
  Serial.begin(9600); // Встановлення зв'язку з ПК
  // Автоматичне калібрування (визначення нульової точки)
  sensor.calibrate();
}
void loop() {
  // Зчитування середньоквадратичного значення змінного струму

```

```
float I = sensor.getCurrentAC();
// Програмне відсікання шумів: ігнорування значень нижче 0.09 A
if (I < 0.09) { I = 0; }
// Виведення результату в послідовний порт
Serial.print("Current: "); Serial.print(I); Serial.println(" A"); delay(300); }
```

**Опис силового трансформатора.** Параметри силового трансформатора безпосередньо визначаються розрахунковою потужністю інвертора. Конструкція передбачає наявність двох ідентичних первинних обмоток, на які надходить напруга, модульована за законом SPWM. Завдяки коефіцієнту трансформації 1:20, на вторинній обмотці формується вихідна синусоїдальна напруга амплітудою 220 В.

### 3.2. Проєктування надійного інвертора чистий синус в САПР Proteus VSM

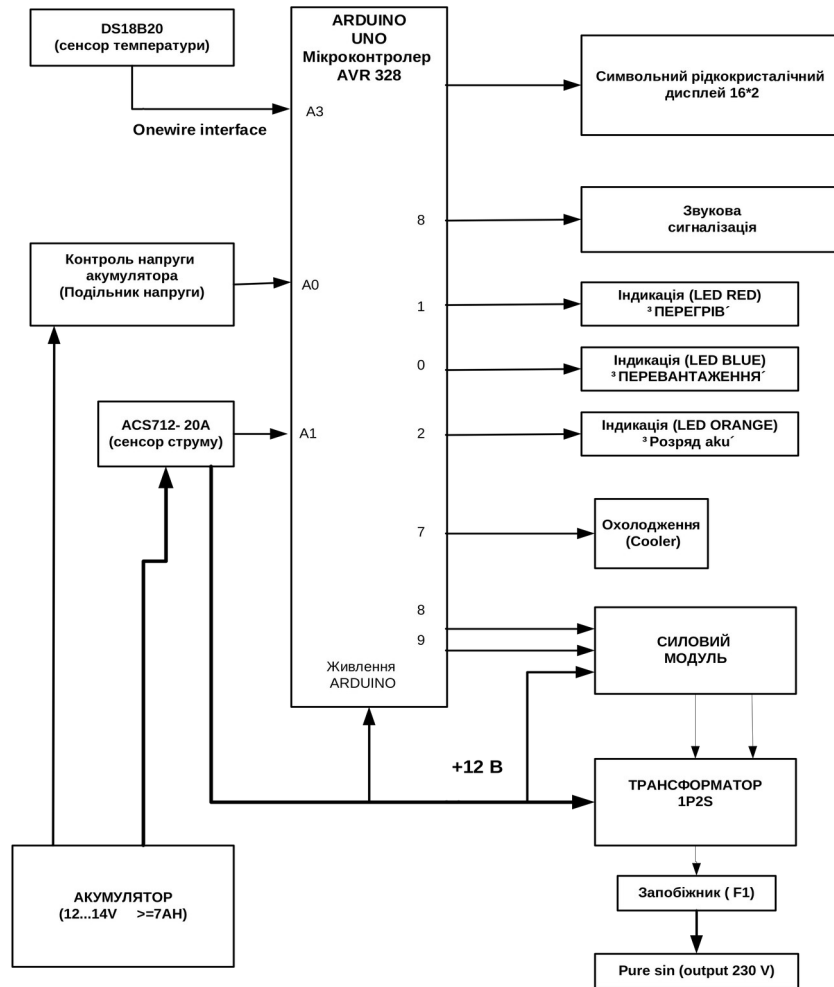
Основним завданням інвертора з чистою синусоїдою є перетворення постійної напруги акумуляторної батареї (12 В) у змінну напругу величиною 230 В з частотою 50 Гц. Форма вихідного сигналу має бути ідентичною параметрам промислової електромережі, що забезпечує стабільну роботу чутливого обладнання. У конструкції інвертора реалізовано багаторівневу систему безпеки, що включає вузли захисту від струмового перевантаження, глибокого розряду акумуляторної батареї, а також тепловий захист силових транзисторів (моніторинг температури радіатора). Для підтримки оптимального температурного режиму пристрій оснащено системою примусового охолодження з використанням вентилятора. Візуалізація ключових параметрів роботи – вхідного струму, напруги акумуляторної батареї, температури охолоджувача силових ключів та поточної потужності навантаження – реалізована за допомогою рідкокристалічного дисплея, що забезпечує зручність оперативного контролю. З метою оптимізації енергоспоживання пристрою передбачено можливість деактивації рідкокристалічного дисплея (РКД) за допомогою перемикача SW1. Для оперативного сповіщення користувача про виникнення аварійних режимів роботи застосовано комбіновану систему сигналізації, що складається зі світлових індикаторів та звукового випромінювача. Система керування

інвертором базується на комплексному поєднанні апаратних засобів та програмного забезпечення. Така структура дозволяє гнучко налаштовувати режими роботи перетворювача та забезпечує високу точність формування вихідного сигналу. Апаратна частина розробленого пристрою базується на наступних компонентах:

- Керуючий вузол: мікроконтролер ATmega328, інтегрований у платформу Arduino Uno.
- Засоби моніторингу та сенсори: система оснащена термодатчиком DS18B20 для контролю температури та аналоговим модулем ACS712 для вимірювання сили струму (до 20А).
- Силовий блок: включає трансформатор потужністю 100 Вт (коефіцієнт трансформації 1:20) з двома первинними обмотками на 10А та силовими ключами для комутації.
- Інтерфейс та індикація: візуалізація даних здійснюється через символічний РК-дисплей (модель WH1602B-YGK-CTK), а також за допомогою світлодіодів та звукового випромінювача (зумера).
- Терморегуляція: для запобігання перегріву передбачено активне охолодження вентилятором.

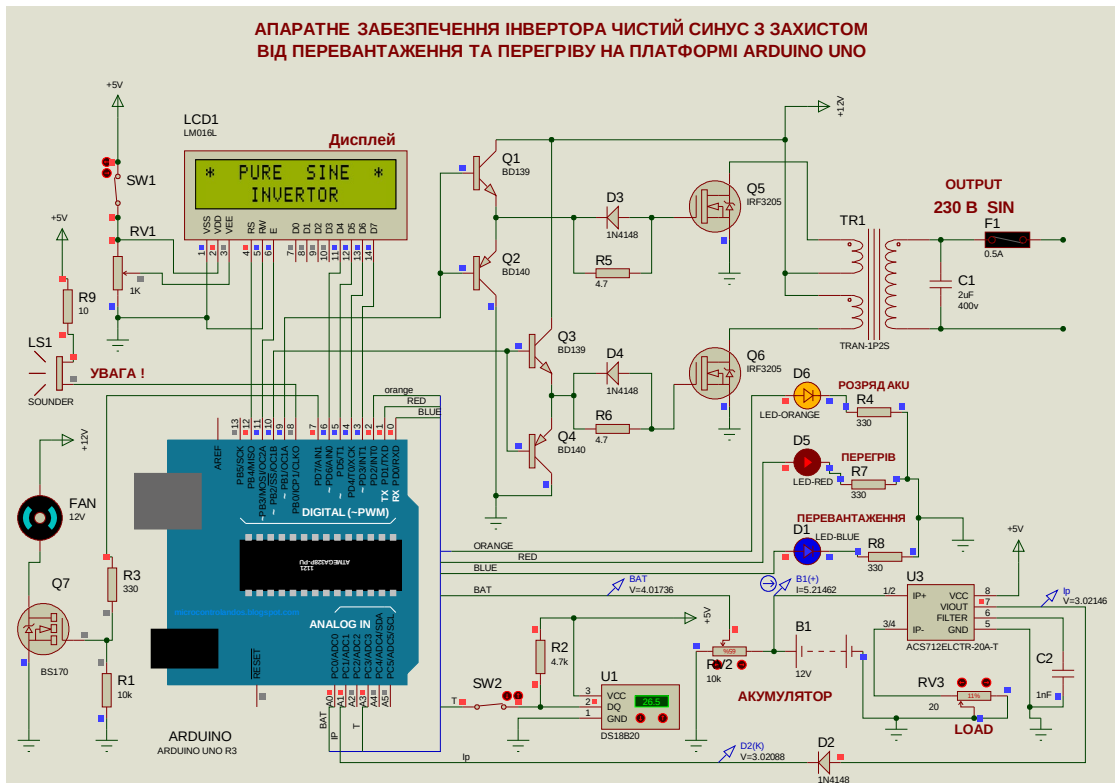
На Рис. 3.20 представлено архітектуру розробленого інвертора з чистою синусоїдою. Система, побудована на базі мікроконтролера Arduino Uno, реалізує функції активного захисту від теплового перегріву та критичних перевантажень по струму.

**СТРУКТУРА**  
інвертора чистий синус для живлення чутливої апаратури  
в польових умовах



*Рис. 3.20. Структурна схема надійного інвертора чистий синус для живлення чутливої апаратури*

Центральним вузлом керування є мікроконтролер ATmega328 (платформа Arduino Uno), який здійснює збір та аналіз сигналів з вимірювальних датчиків. На основі отриманих даних обчислювальний блок формує інформаційні потоки для виводу на РК-дисплей, генерує сигнали оповіщення про критичні стани та реалізує алгоритм активації або деактивації SPWM-модуляції. Результатом функціонування системи є формування стабільної синусоїдальної напруги на виході або повне припинення генерації у разі спрацювання захисту.



*Рис. 3.21. Принципова електрична схема апаратної частини надійного інвертора з чистою синусоїдою в Proteus ISIS*

Графічне представлення принципової електричної схеми інвертора наведено на Рис. 3.21. Дана конфігурація апаратного забезпечення базується на мікроконтролері Arduino Uno та реалізує алгоритми формування синусоїдального сигналу з інтегрованими контурами захисту від термічного перегріву та струмового перевантаження.

Для забезпечення безаварійної роботи пристрою реалізовано алгоритм постійного контролю вхідної напруги АКБ, вихідного навантаження через датчик струму, а також температурного режиму напівпровідникових компонентів силового каскаду.

Поточна інформація виводиться на дисплей і паралельно обробляється алгоритмом керування інвертором. Якщо параметри системи знаходяться в межах норми, мікроконтролер активує функцію формування SPWM. У будь-якій позаштатній ситуації формування синусоїди переривається, і напруга на виході інвертора зникає, що запобігає виходу обладнання з ладу.

Алгоритм захисту автоматично блокує вихідну напругу інвертора при досягненні таких критичних порогів: зниження напруги акумуляторної батареї

за межу 10,5 В (захист від глибокого розряду), перевищення струму навантаження понад 10 А, а також при нагріванні радіаторів силових транзисторів понад 60 °С. Таке програмне обмеження гарантує збереження цілісності як джерела живлення, так і напівпровідникових компонентів схеми.

Вихідна напруга інвертора відновлюється автоматично, якщо одночасно виконуються такі умови: температура впала нижче 40 °С, споживання струму не перевищує 9 А, а рівень заряду АКБ становить понад 11,5 В. Функція активного охолодження за допомогою вентилятора запускається при нагріванні системи понад 30 °С.

Для зменшення власного споживання струму користувач може вимкнути підсвітку та індикацію РКД за допомогою тумблера SW1. Ця дія є незалежною

Під час запуску інвертора здійснюється налаштування периферії: РК-дисплея, звукового оповіщувача та світлових індикаторів тривоги. Система автоматично перевіряє зв'язок із температурним сенсором DS18B20. У разі невдалої ініціалізації датчика на екрані з'являється напис "T: ERROR", активується червоний індикатор перегріву, а генерація SPWM блокується. При успішному підключенні на дисплей виводиться вітання "PURE SINE INVERTOR".

Процес триває переходом до вимірювальних процедур: контролер оцінює стан акумулятора та температуру силових компонентів. У разі успішної верифікації даних інвертор вводиться в експлуатацію. Початок роботи характеризується появою синусоїдальної напруги на виході та стартом фіксації значень струму споживання.

Візуалізація робочих параметрів здійснюється за допомогою РК-дисплея. У верхньому рядку індикатора відображаються поточні значення споживаного струму (в амперах) та температура охолоджувального радіатора (у градусах Цельсія).

Нижній рядок дисплея містить відомості про вольтаж акумулятора та рівень енергоспоживання у ватах. Додатково програмний інтерфейс виводить

спеціальні символи (іконки) у разі активації систем захисту або виявлення помилок у роботі пристрою.

Розробка програмного забезпечення здійснювалася в інтегрованому середовищі Arduino IDE з використанням стандартних бібліотек та вбудованих інструментів компіляції. Для відладки та перевірки працездатності коду застосовувалася плата Arduino Uno, а також програмний комплекс Proteus ISIS, що дозволив провести детальну симуляцію та аналіз роботи схеми.

## РОЗДІЛ 4

### ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОГО ІНВЕРТОРА З ЧИСТОЮ СИНУСОЇДОЮ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ЧУТЛИВОЇ АПАРАТУРИ

#### 4.1. Алгоритм роботи надійного інвертора з чистою синусоїдою

Після подачі напруги на мікроконтролер AVR активується його вбудоване програмне забезпечення. На початковому етапі прошивка здійснює ініціалізацію внутрішніх змінних, після чого переходить до конфігурування сенсорів та периферійних модулів. Зокрема, налаштовуються параметри АЦП, вихід ШІМ для керування звуковим випромінювачем (LS1), а також порти керування силовими ключами. Для взаємодії з рідкокристалічним дисплеєм використовується 4-бітна шина даних (D4...D7). Фінальним етапом завантаження є виведення вітального напису “\* PURE SINE \* INVERTOR” на екран РКД.

Процес функціонування пристрою базується на циклічному опитуванні входів АЦП, до яких підключено органи керування (потенціометри). Отримані дані зчитуються мікроконтролером для подальшої математичної обробки та формування відповідних керуючих впливів. Паралельно з цим система виконує моніторинг стану клавіш меню, здійснює візуалізацію вимірних параметрів на рідкокристалічному дисплеї та генерує звукові сигнали сповіщення згідно з заданим алгоритмом.

Під час створення програмного забезпечення ключовий пріоритет було надано розробці алгоритмів комутації силових транзисторів. Процес конфігурування системи та корекція робочих параметрів здійснюється за допомогою мінімальної кількості органів управління — лише двох потенціометрів. Детальна логіка функціонування інвертора з чистою синусоїдальною формою вихідної напруги наведена у графічній частині на Рис. 4.1 – 4.3.

Алгоритм роботи надійного інвертора чистий синус для живлення чутливої апаратури в польових умовах (початок)

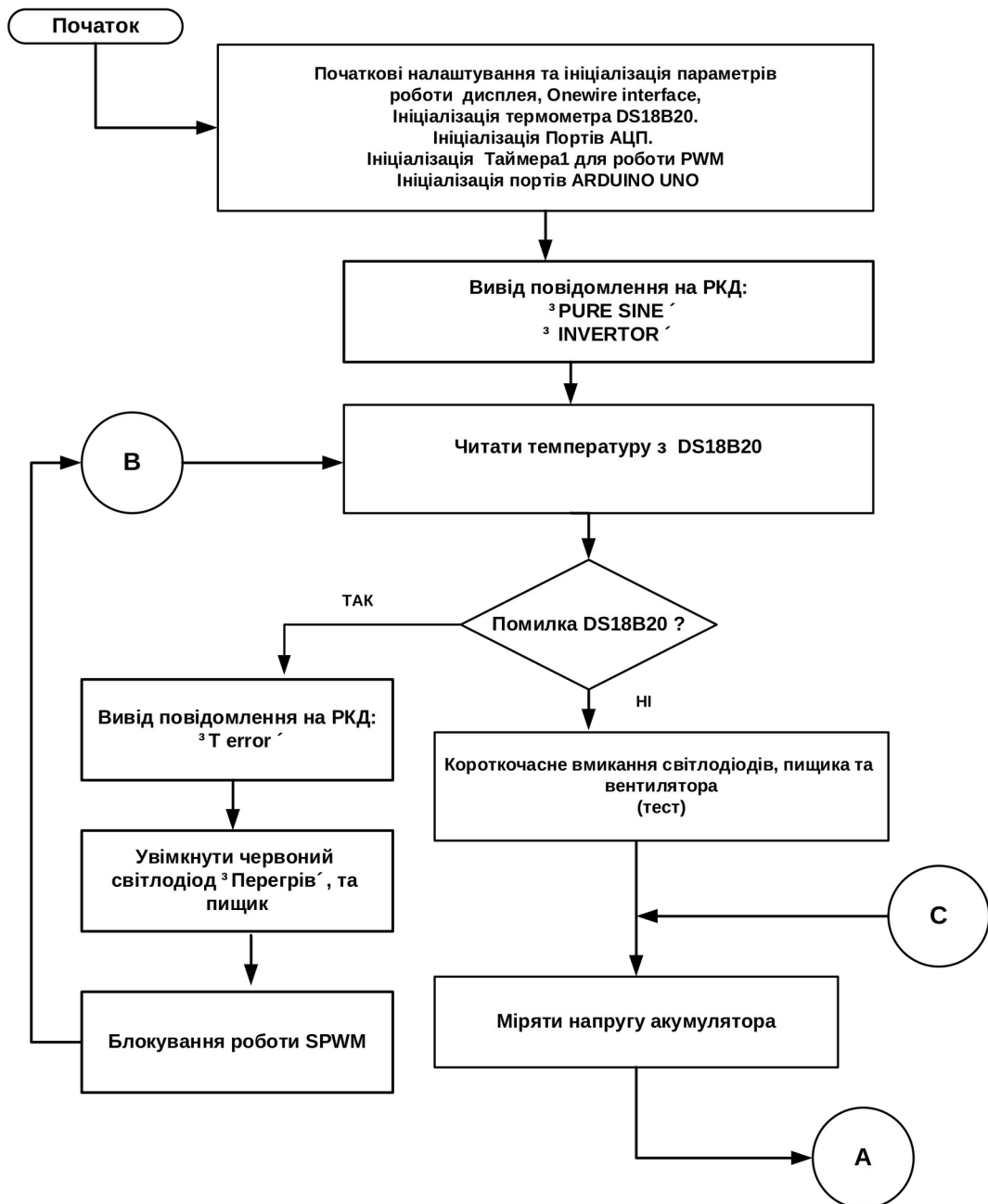


Рис.4.1. Блок-схема алгоритму функціонування інвертора (початковий етап)

Алгоритм роботи надійного інвертора чистий синус для живлення чутливої апаратури в польових умовах (продовження)

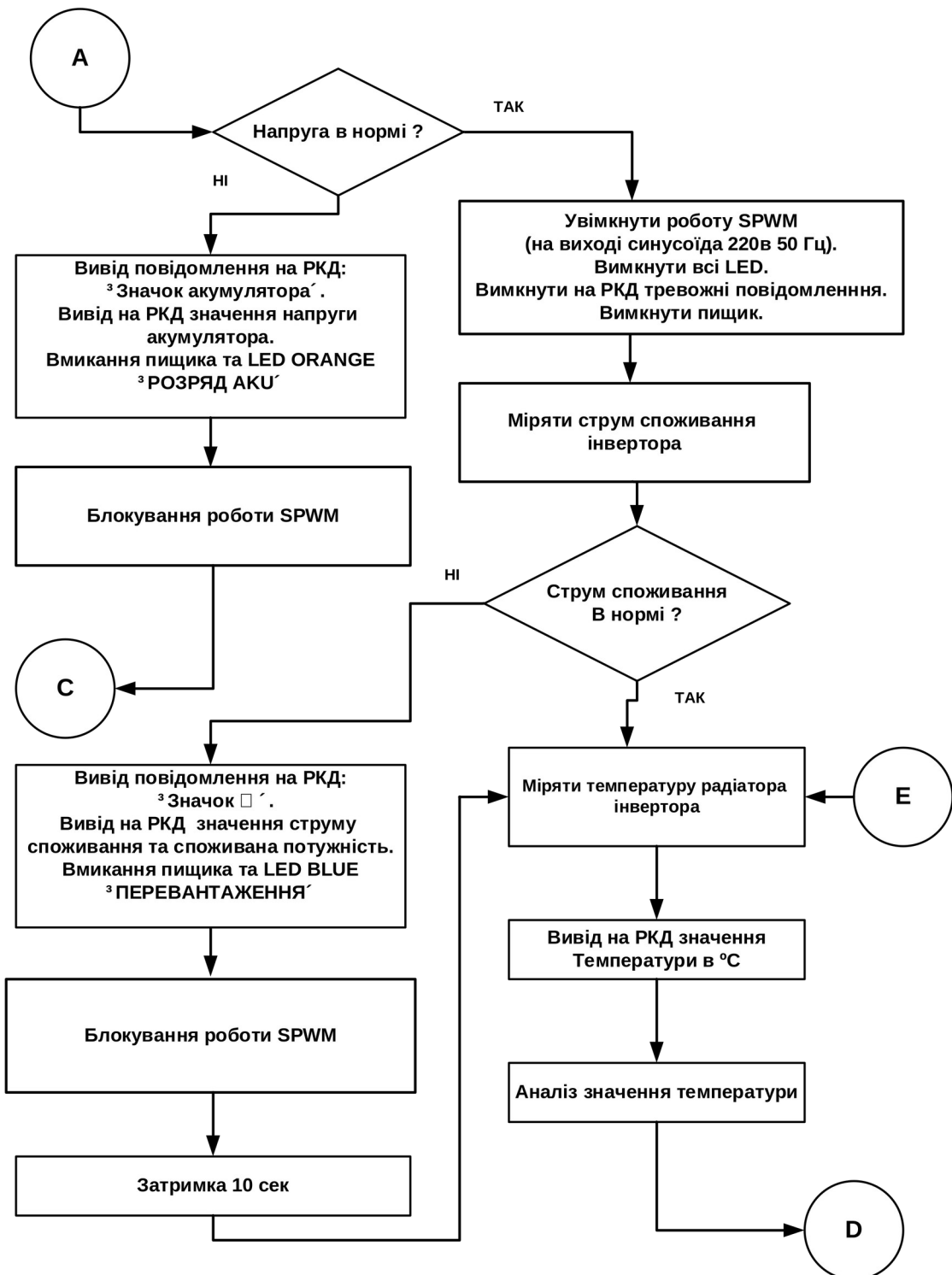


Рис.4.2. Блок-схема алгоритму функціонування інвертора (продовження)

Алгоритм роботи надійного інвертора чистий синус для живлення чутливої апаратури в польових умовах (продовження 2)

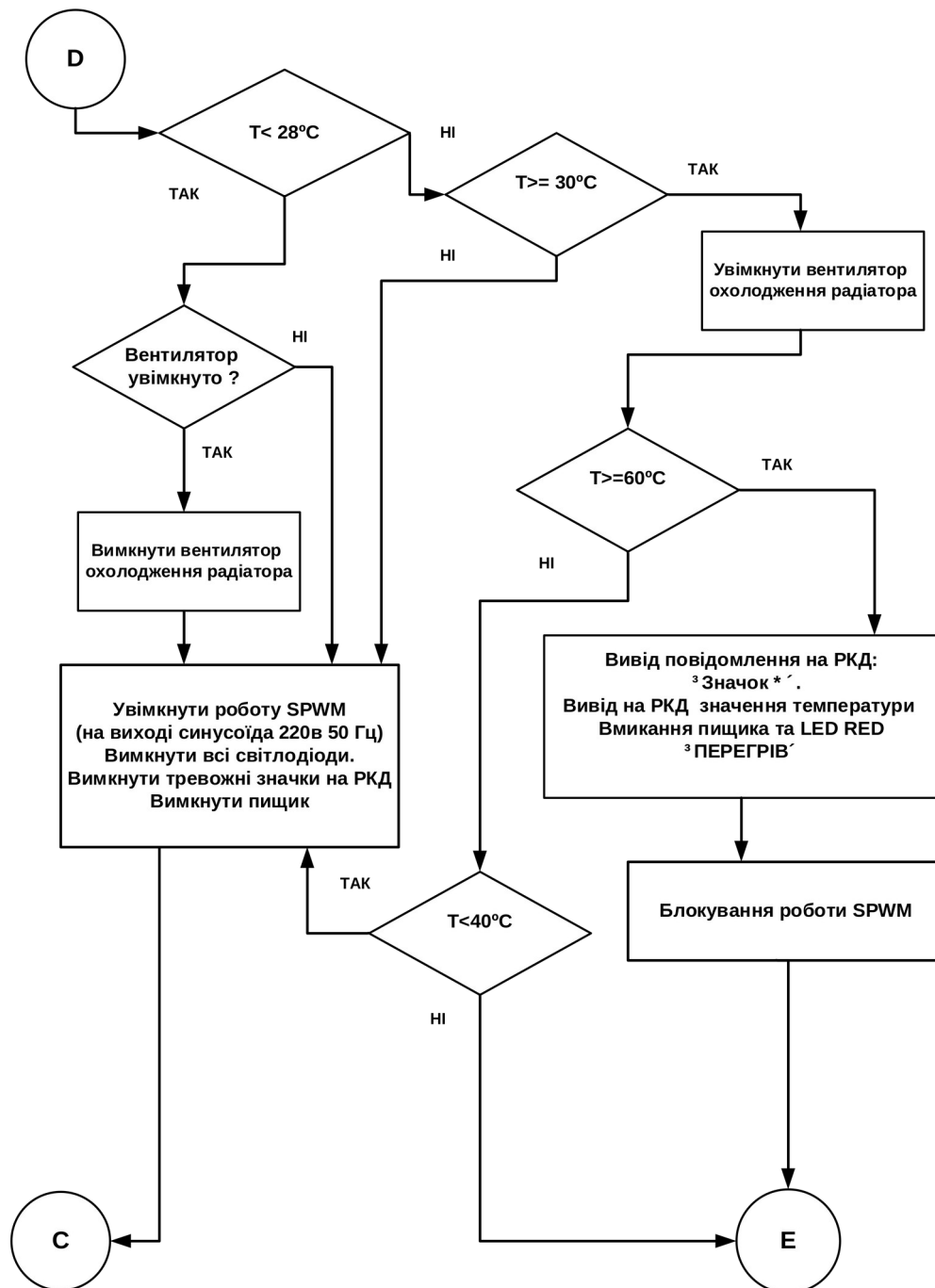


Рис.4.3. Блок-схема алгоритму функціонування інвертора (продовження2)

## 4.2. Розроблення драйвера для взаємодії з сенсором температури DS18B20

Для забезпечення обміну даними з цифровим температурним сенсором DS18B20 було реалізовано драйвер, що містить наступний набір функцій:

/\* Протоколи низького рівня (1-Wire) \*/

uint8\_t ds18b20\_reset\_bus(void);

// Скидання шини та виявлення датчика

```

void ds18b20_send_bit(uint8_t bit_val);    // Передача окремого біта
uint8_t ds18b20_get_bit(void);           // Прийом окремого біта
uint8_t ds18b20_get_byte(void);          // Читання повного байта даних
void ds18b20_send_byte(uint8_t data_byte); // Запис байта в пристрій
/* Обробка даних та верифікація */
uint8_t ds18b20_calc_crc(unsigned char *buffer, unsigned char len); // Перевірка цілісності
даних (CRC8)
/* Високорівневе керування */
// Налаштування параметрів датчика (ID, пороги тривоги, роздільна здатність)
uint8_t ds18b20_configure(uint8_t dev_id, char limit_low, char limit_high, uint8_t res_bits);
// Отримання фінального значення температури
uint8_t ds18b20_get_temp_value(uint8_t dev_id, float *result_celsius);

```

### 4.3. Програмна реалізація алгоритму формування SPWM-сигналу

Формування сигналу синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції (SPWM) здійснюється за допомогою спеціально розробленого програмного модуля. Для реалізації алгоритму чистої синусоїди (pure sine) було розроблено дві Look-up таблиці (Lut-масиви). Кожен масив містить по 200 дискретних значень, що описують півперіоди вихідного сигналу. Максимальна амплітуда обмежена значенням 1600, що відповідає періоду ШІМ, який встановлюється у регістрі захоплення/порівняння ICR1. Розподіл нульових значень у масивах забезпечує почергову роботу ключів інвертора для формування позитивної та негативної напівхвиль.

```

// Таблиці перерахунку (Look-up tables) для синтезу SPWM сигналу
// Кожен масив містить 200 точок; амплітудний пік 1600 узгоджений з регістром ICR1.
const int spwm_wave_half_A[] = {
    50, 100, 151, 201, 250, 300, 349, 398, 446, 494, 542, 589, 635, 681, 726, 771,
    814, 857, 899, 940, 981, 1020, 1058, 1095, 1131, 1166, 1200, 1233, 1264, 1294,
    1323, 1351, 1377, 1402, 1426, 1448, 1468, 1488, 1505, 1522, 1536, 1550, 1561,
    1572, 1580, 1587, 1593, 1597, 1599, 1600, 1599, 1597, 1593, 1587, 1580, 1572,
    1561, 1550, 1536, 1522, 1505, 1488, 1468, 1448, 1426, 1402, 1377, 1351, 1323,
    1294, 1264, 1233, 1200, 1166, 1131, 1095, 1058, 1020, 981, 940, 899, 857, 814,
    771, 726, 681, 635, 589, 542, 494, 446, 398, 349, 300, 250, 201, 151, 100, 50,
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
};

const int spwm_wave_half_B[] = {
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 50, 100, 151,
    201, 250, 300, 349, 398, 446, 494, 542, 589, 635, 681, 726, 771, 814, 857, 899,

```



системи представлена на Рис. 4.1 – 4.3, а вихідний текст програми наведено у додатку 2.

#### 4.6. Дослідження характеристик та верифікація роботи інвертора з інтегрованими системами захисту в середовищі Proteus ISIS

Процес підготовки програмного забезпечення передбачає компіляцію вихідного коду (скетчу) в середовищі Arduino IDE з отриманням виконуваного файлу формату .hex. У подальшому сформований файл завантажується безпосередньо в енергонезалежну пам'ять мікроконтролера ATmega328P, який є базовим для платформи Arduino Uno. Верифікація розробленої схемотехніки інвертора та коректності функціонування мікропрограми здійснювалася за допомогою середовища моделювання Proteus ISIS. На наведених нижче ілюстраціях продемонстровано результати симуляції роботи пристрою на базі Arduino Uno, що підтверджують ефективність алгоритмів формування чистої синусоїди та стабільність систем захисту від теплового перегріву й струмового перевантаження. Результати моделювання перехідних процесів у момент подачі живлення та на початковому етапі ініціалізації системи керування інвертором представлені на Рис. 4.4.

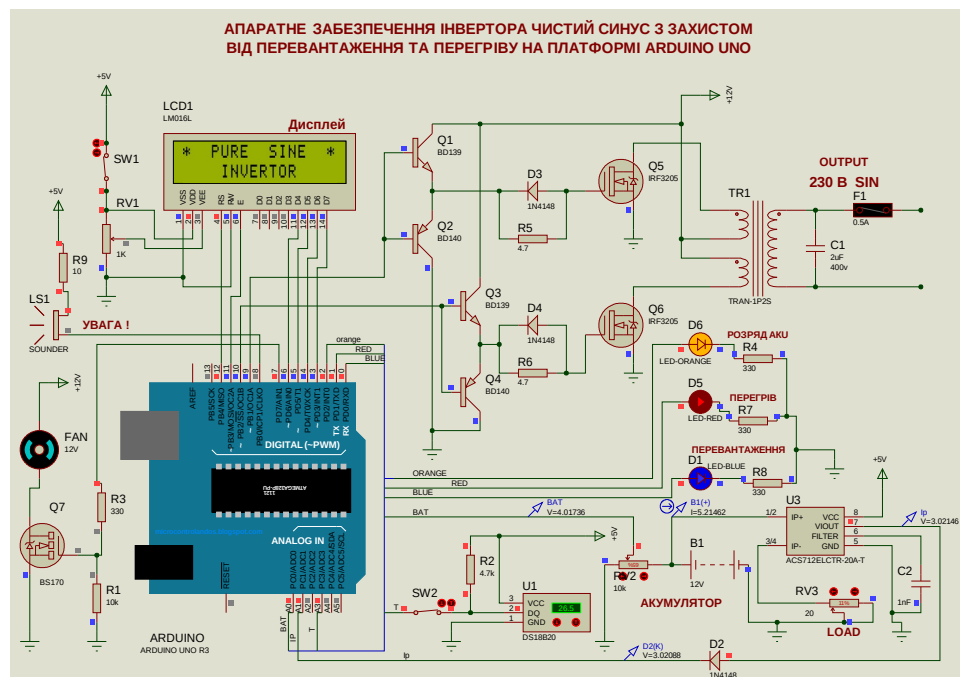


Рис. 4.4. Процес ініціалізації системи та стан вихідних сигналів інвертора в момент запуску

На етапі ініціалізації пристрою на рідкокристалічному дисплеї з'являється привітальне повідомлення "PURE SINE INVERTOR". У цей момент система виконує діагностику цифрового термометра DS18B20, а також проводить тестову активацію світлодіодних індикаторів та охолоджувального вентилятора. Якщо виявлено несправність температурного датчика, на РКД виводиться сповіщення "T: error" і вмикається червоний світлодіод перегріву. За таких умов формування SPWM-сигналу блокується, що унеможливорює появу напруги на виході інвертора.

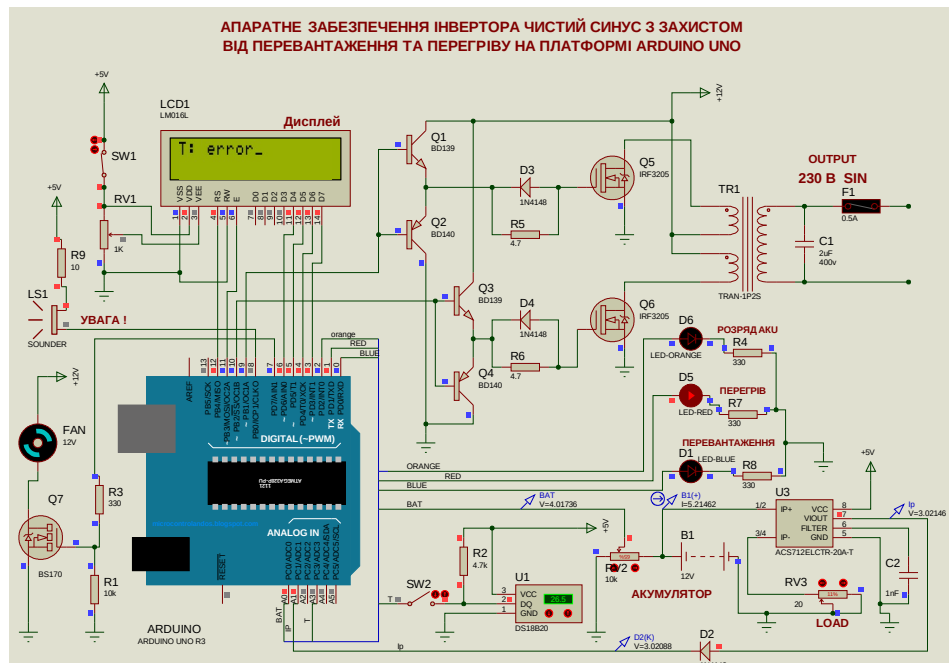


Рис. 4.5. Візуалізація стану системи при виявленні помилки опитування

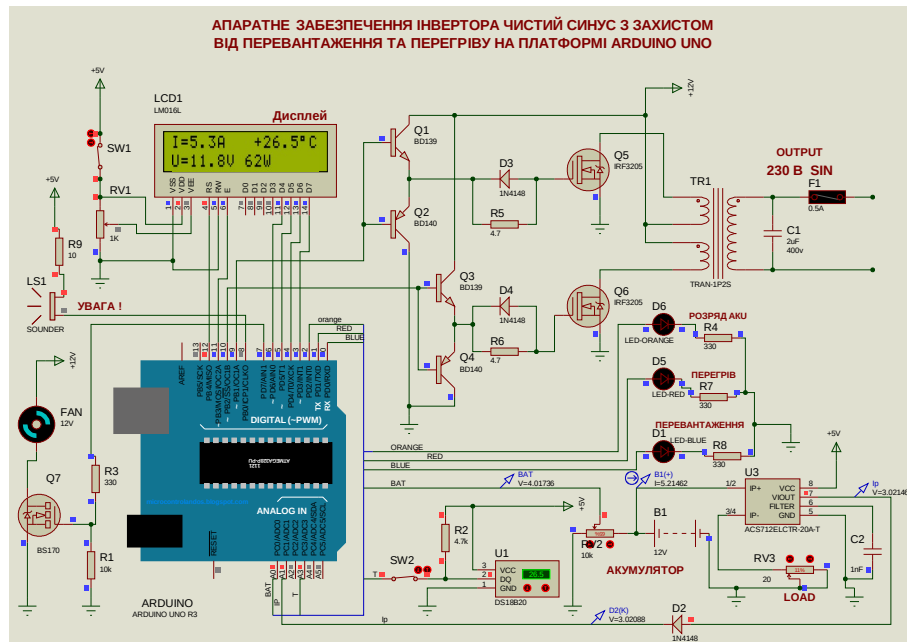


Рис. 4.6. Результати моделювання сталого режиму функціонування інвертора

По завершенню етапу ініціалізації мікроконтролер переходить до безперервного моніторингу даних, що надходять від сенсорів напруги, струму та температури. На рідкокристалічному дисплеї в режимі реального часу відображаються наступні параметри системи: величина струму, що споживається від первинного джерела живлення; поточне значення температури радіатора силового блоку; рівень напруги акумуляторної батареї та сумарна потужність навантаження. За умови відповідності всіх контрольованих параметрів встановленим нормам, активується алгоритм синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції (SPWM). Сформовані імпульси надходять на вхід силового каскаду, що ініціює процес перетворення. У результаті на вихідній обмотці трансформатора формується напруга синусоїдальної форми з частотою 50 Гц та амплітудою 230 В, що свідчить про перехід інвертора у сталий робочий режим. Для запобігання перегріву реалізовано алгоритм двопозиційного регулювання: вентилятор FAN запускається при температурі вище 30°C і припиняє роботу, коли температура опускається до 28°C.

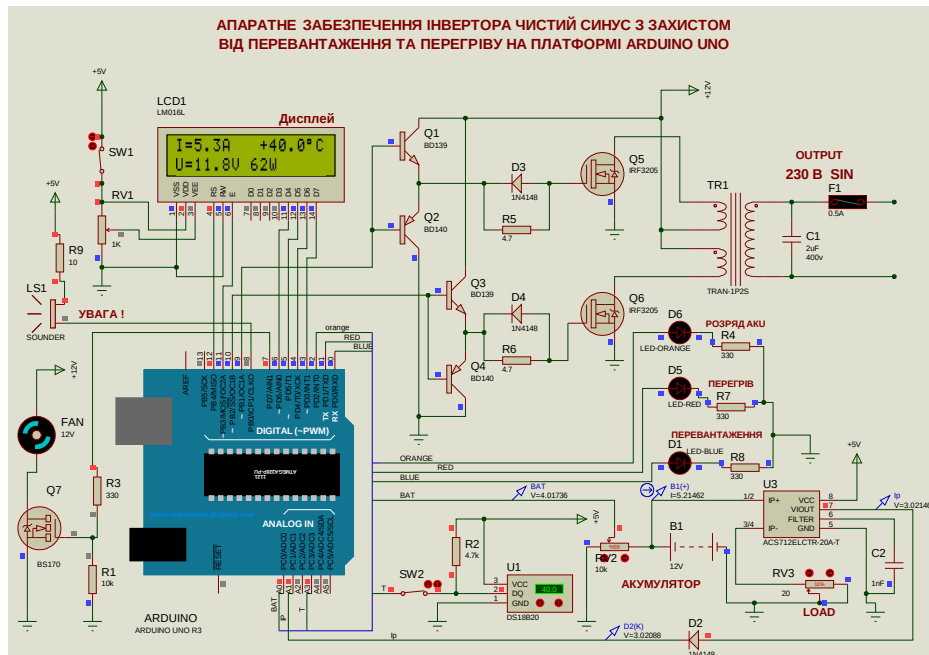


Рис. 4.7. Візуалізація результатів моделювання роботи системи терморегуляції при підвищенні температури силового модуля понад  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  та активації вентилятора FAN

При досягненні критичного температурного порогу в  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  активується багаторівнева система захисту: вмикається світлова індикація “ПЕРЕГРІВ”, а генерація SPWM-сигналів миттєво блокується. Одночасно з цим спрацьовує акустичне сповіщення “УВАГА”, а на рідкокристалічному дисплеї відображається спеціальний символ-маркер “\*”. Автоматичне відновлення функціонування інвертора можливе лише після охолодження силових елементів до безпечного рівня  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

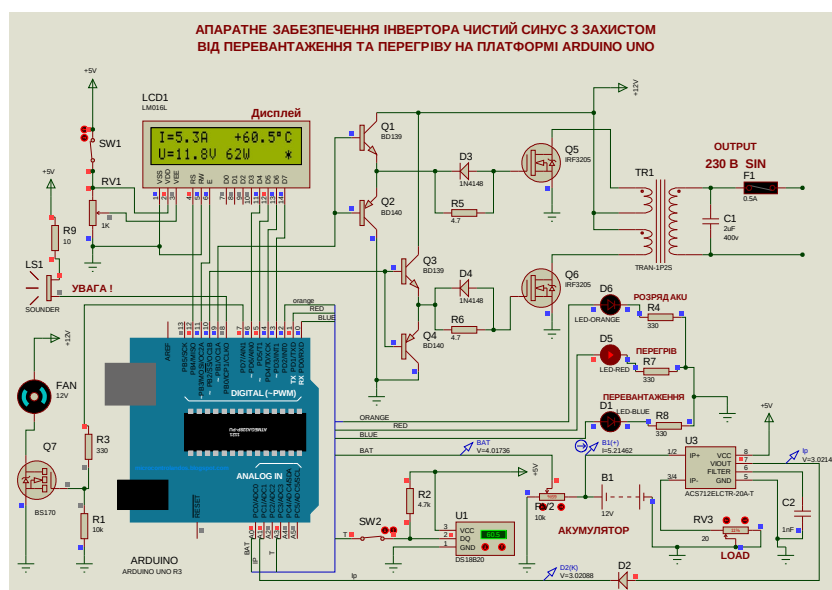


Рис. 4.8. Візуалізація результатів моделювання аварійного режиму при критичному перегріві радіатора (понад  $60^{\circ}\text{C}$ )

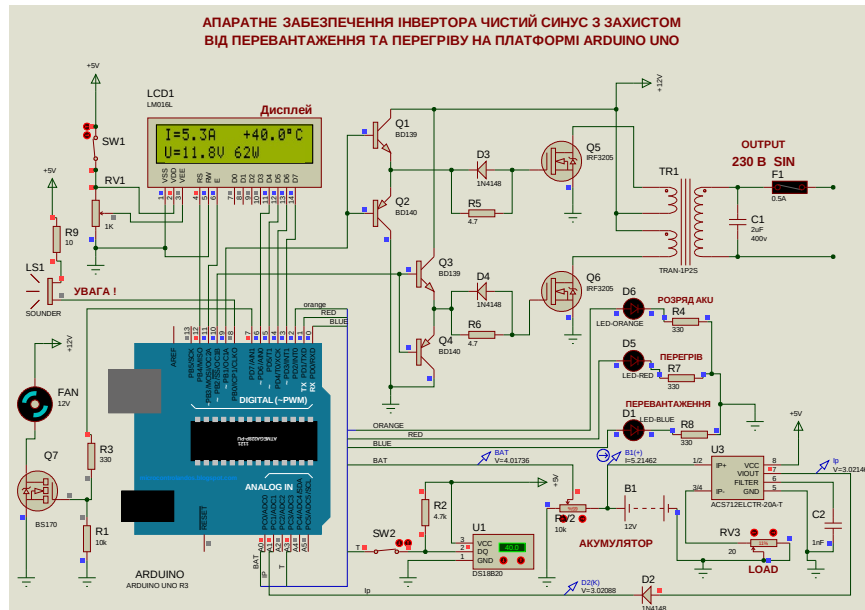


Рис. 4.9. Результати моделювання автоматичного перезавантаження системи після стабілізації температурного режиму

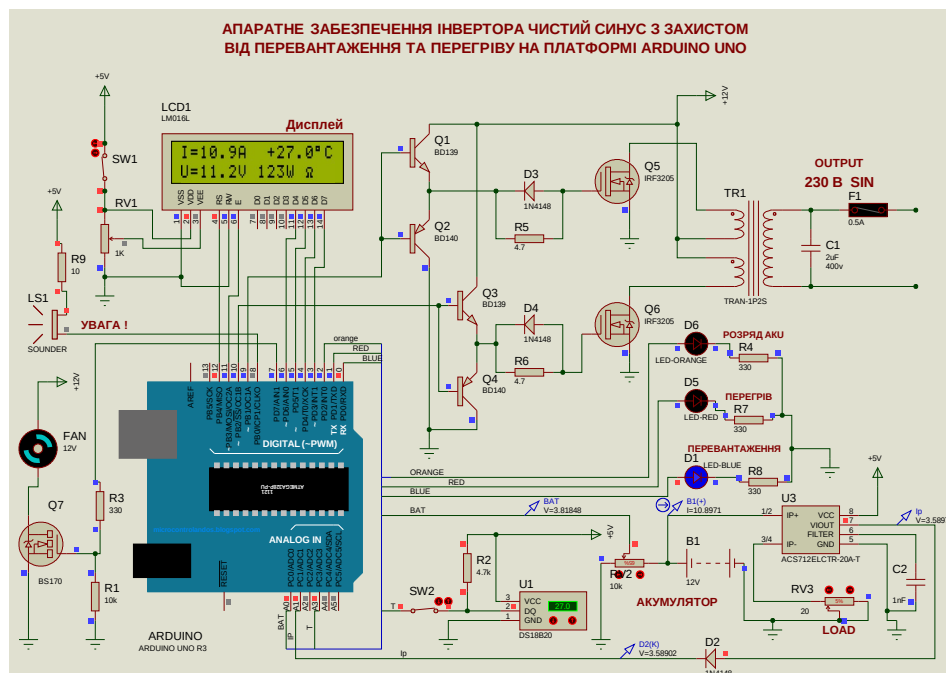


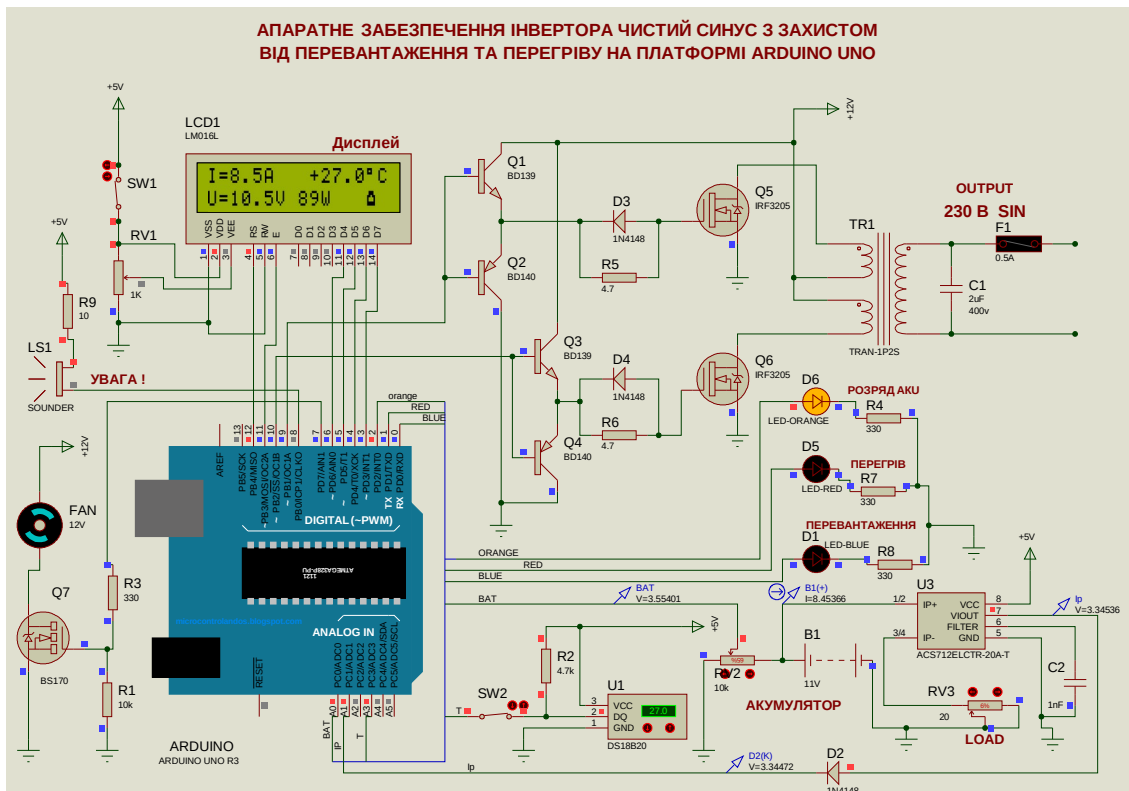
Рис. 4.10. Результати моделювання роботи системи захисту при виникненні струмового перевантаження

Алгоритм захисту за струмом активується, якщо споживання від джерела живлення перевищує поріг 10 А. У такому разі система автоматично блокує генерацію SPWM-сигналів, активує світловий індикатор “Перевантаження” та акустичне сповіщення “УВАГА”. Для візуального

підтвердження аварійного стану на РКД виводиться символ “Ω”. Автоматичне поновлення роботи інвертора відбувається лише після зниження струму навантаження до безпечного рівня 9 А.

Для захисту акумуляторної батареї від глибокого розряду передбачено алгоритм контролю вхідної напруги. При зниженні напруги на клеммах АКБ нижче порогу 10,5 В активується світлодіодний індикатор “РОЗРЯД АКУ”, а на рідкокристалічному дисплеї з’являється відповідна піктограма батареї (рис. 4.11). У цьому стані генерація SPWM-сигналів блокується, що супроводжується акустичним сигналом тривоги. Автоматичне поновлення роботи інвертора стає можливим лише після зростання напруги живлення до рівня 11,5 В.

З метою захисту силових ланцюгів від струмів короткого замикання в конструкції передбачено плавкий запобіжник F1, встановлений на виході пристрою. Для підвищення енергоефективності інвертора та мінімізації власного споживання потужності реалізована можливість деактивації підсвічування та самого рідкокристалічного дисплея за допомогою перемикача SW1.



*Рис. 4.11. Візуалізація стану системи при зниженні напруги акумуляторної батареї нижче критичного рівня (режим “РОЗРЯД АКУ”)*

## ВИСНОВКИ

Розроблено систему автономного живлення на основі Arduino Uno, яка генерує напругу синусоїдальної форми. Завдяки впровадженню багаторівневого захисту (від перегріву та перевищення навантаження) забезпечується висока надійність роботи інвертора при живленні високочутливої апаратури у польових локаціях.

Програмний алгоритм забезпечує безперервний контроль ключових параметрів системи: споживаного струму, рівня заряду акумуляторної батареї та температурного режиму силових ключів на радіаторі. За умови стабільності цих показників, пристрій генерує вихідну синусоїдальну напругу 230 В з частотою 50 Гц, що за своїми характеристиками повністю відповідає параметрам промислової електромережі.

Для візуалізації робочих процесів у системі реалізовано вивід даних на символний рідкокристалічний дисплей (РКД). Користувач має можливість у реальному часі відстежувати величину споживаного струму, потужність навантаження, поточну напругу акумулятора та температурні показники силових ключів. Окрім числових значень, інтерфейс передбачає відображення спеціальних аварійних піктограм у разі виходу параметрів за межі безпечних діапазонів.

Для оперативного інформування користувача про стан системи реалізовано комбіновану світло-звукову сигналізацію на базі світлодіодних індикаторів та п'єзоелектричного випромінювача (зумера). Додатково у програмному забезпеченні передбачено режим енергозбереження, який дозволяє деактивувати підсвітку або живлення рідкокристалічного дисплея для мінімізації власного споживання інвертора.

Запропоноване рішення вирізняється низькою собівартістю у порівнянні з комерційними аналогами при збереженні високої функціональності. Зокрема, наявність рідкокристалічного інтерфейсу та комплексної системи світло-звукового оповіщення дозволяє ефективно контролювати стан пристрою в різних експлуатаційних режимах.

Завдяки компактному виконанню та вихідній потужності 100 Вт, пристрій позиціонується як мобільне джерело живлення для польових умов. Наявність чистої синусоїди дозволяє підключати високочутливу техніку, таку як портативні комп'ютери, аудіосистеми та телевізійне обладнання. Варто зазначити, що у сегменті малопотужних рішень подібні інвертори з прецизійними характеристиками сигналу практично не представлені на ринку.

Проектування інвертора з чистою синусоїдальною формою вихідного сигналу базується на використанні актуальних компонентів мікропроцесорної та силової електроніки. Центральним вузлом керування обрано мікроконтролер Atmel ATmega328 (платформа Arduino Uno). Систему зворотного зв'язку та моніторингу реалізовано за допомогою цифрового термометра DS18B20 та датчика струму ACS712, що працює на основі ефекту Холла. Комутацію силових ланцюгів здійснюють MOSFET-транзистори, а для відображення параметрів системи інтегровано символічний рідкокристалічний модуль WH1602B з конфігурацією 16x2.

У середовищі Proteus VSM розроблено та верифіковано принципову електричну схему перетворювача. Програмний комплекс системи реалізовано мовою C++ з використанням середовища Arduino IDE для мікроконтролерів сімейства AVR. Особливу увагу приділено створенню модульного програмного забезпечення, що включає алгоритми формування синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції (SPWM), а також процедури обробки сигналів від цифрового термометра та сенсора струму.

Етап імітаційного моделювання було реалізовано за допомогою інструментарію Proteus ISIS. Отримані результати підтвердили адекватність розробленої програмної логіки та працездатність алгоритму керування інвертором. Верифікація в середовищі емуляції засвідчила, що створені програмні модулі коректно взаємодіють між собою, забезпечуючи стабільне функціонування системи у заданих режимах.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ**

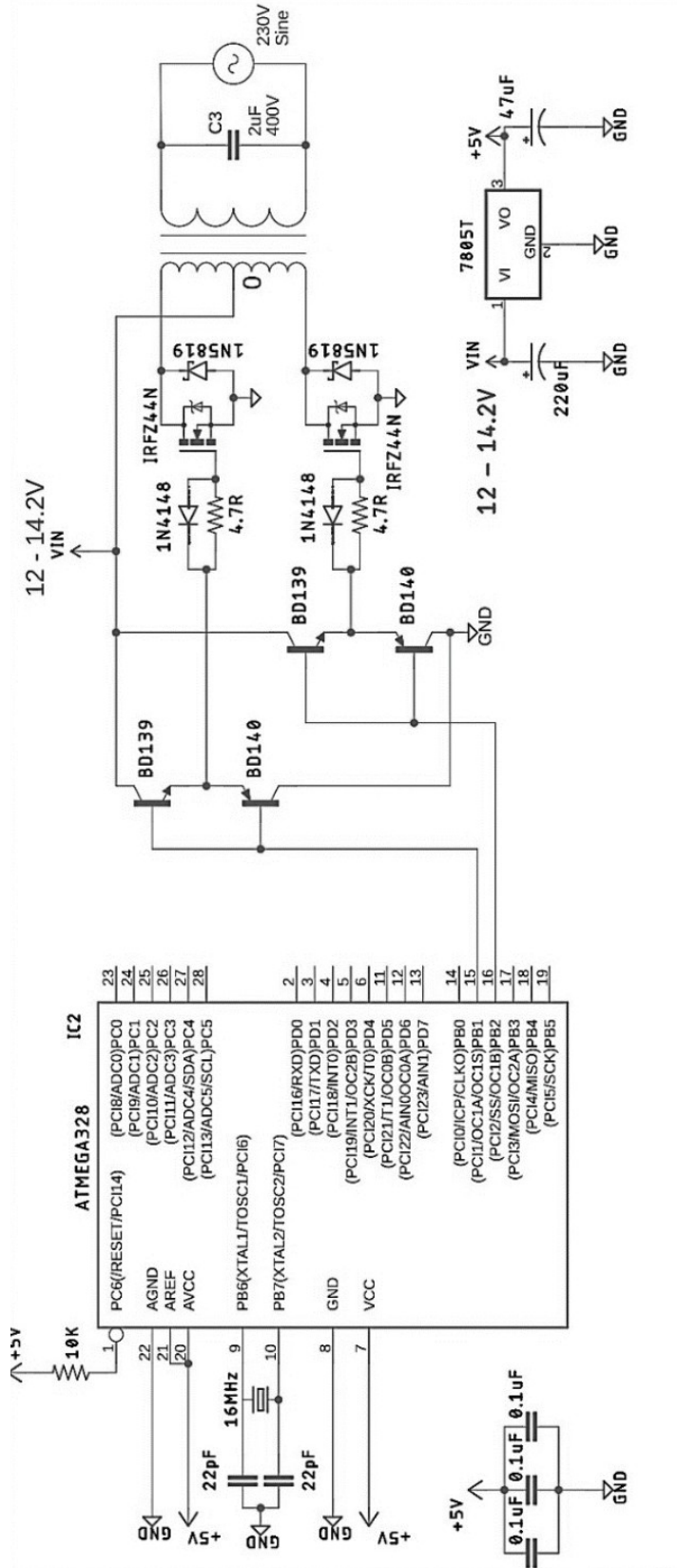
1. Osher J., Blemings H. Practical Arduino: Cool Projects for Open Source Hardware. — New York: Springer-Verlag, 2009. — 445 p.
2. Banzi M., Shiloh M. Getting Started with Arduino. — 2nd ed. — Sebastopol: O'Reilly Media, 2011. — 130 p.
3. Igoe T. Making Things Talk: Using Sensors, Networks, and Arduino to See, Hear, and Feel the World. 2nd ed. - Sebastopol: O'Reilly Media, 2012. - 496 p.
4. Кравченко А. В. 10 практичних пристроїв на AVR-мікроконтролерах. Книга 3. — М.: Додека-XXI, 2011. — 416 с.
5. Шпак Ю. А. Програмування мікроконтролерів Atmel на мові С. — К.: МК-Прес, 2012. — 342 с.
6. Белов А. В. Створюємо пристрої на мікроконтролерах AVR. — СПб.: Наука і Техніка, 2007. — 256 с.
7. Белов А. В. Розробка пристроїв на мікроконтролерах AVR: від початківця до професіонала. — СПб.: Наука і Техніка, 2013. — 528 с.
8. Трамперт В. Вимірювання, керування та регулювання за допомогою AVR-мікроконтролерів: Пер. з нім. — К.: МК-Прес, 2006. — 208 с.
9. Atmel Corporation. AVR130: Setup and Use of the AVR Timers [Electronic resource]. — URL: <http://www.atmel.com/images/doc2503.pdf>.
10. Williams E. Make: AVR Programming. Learning to Write Software for Hardware. — San Francisco: Maker Media, 2014. — 472 p.
11. Pardue J. C Programming for Microcontrollers: Featuring ATMEL's AVR Butterfly. — Smiley Micros, 2005. — 300 p.
12. Белов А. В. Самовчитель розробника пристроїв на мікроконтролерах AVR. — СПб.: Наука і Техніка, 2008. — 544 с.
13. Barrett S. F., Pack D. J. Atmel AVR Microcontroller Primer: Programming and Interfacing. — Morgan & Claypool Publishers, 2008. — 198 p.
14. Allegro MicroSystems. Fully Integrated Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC ACS712: Datasheet [Electronic resource]. — URL: <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>.

15. Maxim Integrated. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer: Datasheet [Electronic resource]. — URL: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.
16. Arduino Project Hub. DS18B20 Digital Temperature Sensor Interface [Electronic resource]. — URL: <https://create.arduino.cc/projecthub/TheGadgetBoy/ds18b20-digital-temperature-sensor-and-arduino-9cc806>.
17. Hitachi. HD44780U (LCD-II): Dot Matrix Liquid Crystal Display Controller/Driver [Electronic resource]. — URL: <https://circuitdigest.com/sites/default/files/HD44780U.pdf>.
18. Arduino Software (IDE) [Electronic resource]. — URL: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>.
19. Arduino Documentation and Tutorials [Electronic resource]. — URL: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/HomePage>.

## **ДОДАТКИ**

### Додаток 1

## Повна принципова електрична схема SPWM-інвертора на базі мікроконтролера АТmega328



## Додаток 2

### Фрагмент програмної реалізації алгоритму SPWM-інвертора на базі мікроконтролера Arduino з інтегрованими модулями теплового та струмового захисту

```

/* Надійний інвертор з чистою синусоїдою (SPWM) для живлення чутливої апаратури */
* Платформа: Arduino UNO (ATmega328P)
* Функціонал: Контроль температури, захист від перевантаження, моніторинг АКБ */

#include <LiquidCrystal.h>
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <avr/pgmspace.h>

// Ініціалізація дисплея (RS, E, D4, D5, D6, D7)
LiquidCrystal lcd(12, 11, 6, 5, 4, 3);

// Константи пінів
#define PIN_FAN 7
#define PIN_BUZZER 8
#define PIN_LED_TEMP 1
#define PIN_LED_OVERLOAD 0
#define PIN_LED_BATTERY 2

// Налаштування OneWire для DS18B20
#define DS18B20_PIN 3
#define DS18B20_PORT PORTC
#define DS18B20_DDR DDRC
#define DS18B20_INPUT PINC

// Таблиці значень SPWM (збережені у флеш-пам'яті)
const int lookUpA[] PROGMEM = {
  50, 100, 151, 201, 250, 300, 349, 398, 446, 494, 542, 589, 635, 681, 726, 771,
  814, 857, 899, 940, 981, 1020, 1058, 1095, 1131, 1166, 1200, 1233, 1264, 1294,
  1323, 1351, 1377, 1402, 1426, 1448, 1468, 1488, 1505, 1522, 1536, 1550, 1561,
  1572, 1580, 1587, 1593, 1597, 1599, 1600, 1599, 1597, 1593, 1587, 1580, 1572,
  1561, 1550, 1536, 1522, 1505, 1488, 1468, 1448, 1426, 1402, 1377, 1351, 1323,
  1294, 1264, 1233, 1200, 1166, 1131, 1095, 1058, 1020, 981, 940, 899, 857, 814,
  771, 726, 681, 635, 589, 542, 494, 446, 398, 349, 300, 250, 201, 151, 100, 50, 0
};

// Системні змінні
volatile int phaseStep = 0;
volatile bool isPowerActive = true;
float currentAmps, batteryVoltage, currentPower, temperatureCelsius;

// Спеціальні символи для дисплея
byte charBattery[8] = {0b01110, 0b01110, 0b11011, 0b10001, 0b10001, 0b11111, 0b11111,
  0b11111};

```

```

byte charWarning[8] = {0b00000, 0b01110, 0b10001, 0b10001, 0b01010, 0b01010, 0b11011,
0b00000};

void setup() {
  // Налаштування таймера 1 для генерації SPWM (1600 тактів = 10 кГц несуча)
  TCCR1A = _BV(COM1A1) | _BV(COM1B1) | _BV(WGM11);
  TCCR1B = _BV(WGM13) | _BV(WGM12) | _BV(CS10);
  ICR1 = 1600;
  TIMSK1 = _BV(TOIE1);

  DDRB |= B00000110; // Виходи 9 та 10
  sei();

  // Ініціалізація периферії
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.createChar(0, charBattery);
  lcd.createChar(1, charWarning);

  pinMode(PIN_FAN, OUTPUT);
  pinMode(PIN_BUZZER, OUTPUT);
  pinMode(PIN_LED_TEMP, OUTPUT);
  pinMode(PIN_LED_OVERLOAD, OUTPUT);
  pinMode(PIN_LED_BATTERY, OUTPUT);

  // Стартове вітання
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("SYSTEM STARTING");
  delay(1000);
}

void loop() {
  readSensors();
  processProtection();
  updateDisplay();
  delay(500);
}

void readSensors() {
  // Розрахунок струму (ACS712)
  int rawCurrent = analogRead(A1);
  float vCurrent = rawCurrent * (5.0 / 1023.0);
  currentAmps = (vCurrent - 2.5) / 0.1; // Чутливість 100мВ/А
  if (currentAmps < 0.15) currentAmps = 0;

  // Розрахунок напруги АКБ
  int rawVolt = analogRead(A0);
  batteryVoltage = (rawVolt * (5.0 / 1023.0)) * 2.94; // Дільник напруги

  currentPower = batteryVoltage * currentAmps;
}

void processProtection() {

```

```

// Захист від перевантаження (10A)
if (currentAmps > 10.0) {
  isPowerActive = false;
  digitalWrite(PIN_LED_OVERLOAD, HIGH);
  triggerAlarm();
} else if (currentAmps < 9.0 && batteryVoltage > 11.5) {
  isPowerActive = true;
  digitalWrite(PIN_LED_OVERLOAD, LOW);
}

// Захист АКБ (10.5В)
if (batteryVoltage < 10.5) {
  isPowerActive = false;
  digitalWrite(PIN_LED_BATTERY, HIGH);
} else if (batteryVoltage > 11.8) {
  digitalWrite(PIN_LED_BATTERY, LOW);
}
}

void triggerAlarm() {
  digitalWrite(PIN_BUZZER, HIGH);
  delay(200);
  digitalWrite(PIN_BUZZER, LOW);
}

void updateDisplay() {
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("I:"); lcd.print(currentAmps, 1); lcd.print("A ");
  lcd.print("U:"); lcd.print(batteryVoltage, 1); lcd.print("V");

  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("P:"); lcd.print(currentPower, 0); lcd.print("W ");

  if (!isPowerActive) {
    lcd.setCursor(14, 1);
    lcd.write(byte(1)); // Символ попередження
  }
}

// Переривання таймера для формування сигналу
ISR(TIMER1_OVF_vect) {
  if (isPowerActive) {
    OCR1A = pgm_read_word(&lookUpA[phaseStep]);
    // Для другого плеча використовується зсув фази (спрощено)
    OCR1B = (phaseStep < 100) ? 0 : pgm_read_word(&lookUpA[phaseStep - 100]);

    if (++phaseStep >= 200) phaseStep = 0;
  } else {
    OCR1A = 0;
    OCR1B = 0;
  }
}

```