МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Таврійський національний університет
імені В.І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра інженерних систем та технологій

На правах рукопису

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЗОВНІШНІМ ОСВІТЛЕННЯМ З АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ

Здобувача вищої освіти
Абібуллаєва Селіма Алімовича
Освітня програма
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(Спеціальність
174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»)

_____
(підпис)

Науковий керівник:
к.т.н., доцент Дроменко В.Б.

_____
(підпис)

Національна шкала_____
Кількість балів_____
Оцінка: ECTS

Київ – 2026

Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра Інженерних систем та технологій
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри
_____Наталія ОМЕЦИНСЬКА
«____» _____2025_року

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Абібуллаєву Селіму Алімовичу

1. Тема роботи: Система автоматичного керування зовнішнім освітленням з альтернативних джерел живлення

керівник роботи: к.т.н., доцент Дроменко В.Б.

затверджені Наказом ТНУ імені В.І Вернадського:
від «7 » листопада 2025 № 138/1-ОД
2. Строк подання студентом роботи: 25.05.2026
3. Вихідні дані до роботи: апаратно-програмний комплекс керування вуличним освітленням з гібридним живленням (керуючий контролер – ATmega16A, альтернативне джерело енергії – полікристалічна сонячна панель 200 Вт / 12 В, резервний гелевий акумулятор 150 Аг, вихідна робоча напруга 220 В).
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Проаналізувати сучасний стан систем зовнішнього освітлення та потенціал використання альтернативних джерел енергії (сонячних панелей), а також виявити ключові проблеми їх енергоефективності та автоматизації; Обґрунтувати вибір апаратної платформи (мікроконтролер ATmega16A, гелеві акумуляторні батареї, силовий інвертор) та розробити алгоритми автоматичного керування в середовищі CodeVisionAVR; Розробити принципову електричну схему, змоделювати роботу комплексу в середовищі Proteus та створити SCADA-систему (Borland Delphi) для моніторингу і дистанційного перемикання джерел живлення; Провести аналіз потенційно небезпечних виробничих факторів та розробити технічні і організаційні заходи з охорони праці, електробезпеки та реагування у надзвичайних ситуаціях при роботі з гібридними системами енергозабезпечення.

5. Перелік графічного матеріалу: графічна робота виконана у вигляді мультимедійної презентації

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	доцент Валерія ДРОМЕНКО		
Розділ 2	доцент Валерія ДРОМЕНКО		
Розділ 3	доцент Валерія ДРОМЕНКО		
Розділ 4	доцент Валерія ДРОМЕНКО		

7. Дата видачі завдання _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	*Назва етапів бакалаврської роботи*	*Термін виконання етапів роботи*	*Заключний документ етапу*
1	Вибір теми бакалаврської роботи, призначення керівника	до 31.10.2025	Затвердження переліку тем бакалаврських робіт
2	Пошук і відбір літератури по темі роботи, складання плану бакалаврської роботи	до 14.12.2025	Список літературних джерел, план роботи
3	Визначення об’єкта, предмета, мети, завдань та методів дослідження, написання вступу до теми бакалаврського дослідження	до 25.01.2026	Текст вступу
4	Написання тексту бакалаврської роботи відповідно до її структури:	26.01.2026-17.05.2026	Текст розділів
	4.1 І розділ	26.01.2026-6.03.2026	Текст розділу
	4.2 ІІ розділ	9.03.2026-27.03.2026	Текст розділу
	4.3 ІІІ розділ	30.03.2026-17.04.2026	Текст розділу
	4.4 IV розділ	20.04.2026-8.05.2026	
5	Підготовка графічних матеріалів чи іншого унаочнення	11.05.2026-15.05.2026	Роздатковий матеріал, презентація
6	Оформлення кінцевого списку використаних джерел та додатків	11.05.2026-15.05.2026	Список літературних джерел
7	Оформлення та попередній захист бакалаврської роботи	18.05.2026-22.05.2026	Бакалаврська робота, рішення кафедри про допуск до захисту
8	Внесення коректив та кінцеве редагування бакалаврської роботи	25.05.2026-29.05.2026	Бакалаврська робота
9	Реєстрація бакалаврської роботи на кафедрі	1.06.2026-5.06.2026	Бакалаврська робота внесена до журналу реєстрації випускових робіт
10	Захист бакалаврської роботи	10.06.2026-28.06.2026	Рішення Екзаменаційної комісії про захист

АНОТАЦІЯ

Абібуллаєв С. А. Система автоматичного керування зовнішнім освітленням з альтернативним джерелом живлення. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка». – Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського. – м. Київ, 2026 рік.

У кваліфікаційній роботі було проведено дослідження принципів побудови та функціонування систем автоматичного керування зовнішнім освітленням з використанням гібридних (альтернативних) джерел енергозабезпечення.

Метою проведеного дослідження було розроблення надійного, енергоефективного та автономного апаратно-програмного комплексу для керування мережею вуличного освітлення, який здатен працювати як від традиційної міської електромережі, так і від накопиченої сонячної енергії.

При проведенні дослідження було використано методи системного аналізу, теорії автоматичного керування, схемотехнічного моделювання та програмування мікроконтролерів. Апаратна платформа базується на мікроконтролері ATmega16A, сонячній панелі потужністю 200 Вт, гелевому акумуляторі ємністю 150 Аг та силовому інверторі. Програмне забезпечення розроблялося в інтегрованому середовищі CodeVisionAVR, апаратно-програмне моделювання здійснювалося у комплексі Proteus VSM, а SCADA-система для диспетчеризації була створена у графічному середовищі Borland Delphi.

В результаті проведення дослідження було отримано повністю працездатну комп'ютерно-інтегровану систему автоматичного керування. Розроблено алгоритми комутування силових ліній освітлення залежно від сезонного розкладу (годинника реального часу) та рівня природного світла. Створено електричну принципову схему та підсистеми клімат-контролю і фізичної безпеки шафи керування. Розроблена SCADA-система забезпечує дистанційний моніторинг параметрів заряду батареї та автоматичне перемикання між основним і резервним джерелами живлення із вбудованими алгоритмами протиаварійного захисту (відключення при перегріві). Також було розроблено технічні та організаційні заходи з охорони праці та реагування у надзвичайних ситуаціях.

Кваліфікаційна робота має обсяг 83 сторінок тексту, її основна частина складається зі вступу, розділу 1, розділу 2, розділу 3, розділу 4, загального висновку і списку використаних джерел. Вона містить 38 рисунків і 4 таблиці та має 2 додатки, список використаних джерел має 42 бібліографічні описи.

Ключові слова: комп'ютерно-інтегрована система, мікроконтролер ATmega16A, альтернативне джерело живлення, зовнішнє освітлення, сонячна панель, SCADA-система, моделювання Proteus, CodeVisionAVR, автоматичне керування.

ABSTRACT

Abibullaiev S. A. Automatic control system for outdoor lighting with an alternative power source. – Manuscript.

Qualification paper for the specialty 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics". – Tavrida National V.I. Vernadsky University. – Kyiv, 2026.

In the qualification work, a study of the principles of construction and operation of automatic control systems for outdoor lighting using hybrid (alternative) power sources was carried out.

The purpose of the study was to develop a reliable, energy-efficient, and autonomous hardware and software complex for controlling the street lighting network, capable of operating both from the traditional city power grid and from stored solar energy.

During the research, methods of system analysis, automatic control theory, circuit modeling, and microcontroller programming were used. The hardware platform is based on the ATmega16A microcontroller, a 200 W solar panel, a 150 Ah gel battery, and a power inverter. The software was developed in the CodeVisionAVR integrated environment, hardware and software modeling was carried out in the Proteus VSM complex, and the SCADA system for dispatching was created in the Borland Delphi graphical environment.

As a result of the study, a fully functional computer-integrated automatic control system was obtained. Algorithms for switching lighting power lines depending on the seasonal schedule (real-time clock) and the level of natural light have been developed. An electrical schematic diagram and subsystems for climate control and physical security of the control cabinet were created. The developed SCADA system provides remote monitoring of battery charge parameters and automatic switching between the main and backup power sources with built-in emergency protection algorithms (shutdown in case of overheating). Technical and organizational measures for occupational health and safety and emergency response were also developed.

The qualification work has a volume of 83 pages of text; its main part consists of an introduction, section 1, section 2, section 3, section 4, a general conclusion, and a list of used sources. It contains 38 figures and 4 tables, has 2 appendices, and the list of used sources includes 42 bibliographic descriptions.

Keywords: computer-integrated system, ATmega16A microcontroller, alternative power source, outdoor lighting, solar panel, SCADA system, Proteus modeling, CodeVisionAVR, automatic control.

ЗМІСТ

ВСТУП……..08
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ОГЛЯД СУЧАСНИХ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЗОВНІШНІМ ОСВІТЛЕННЯМ……..10
1.1. Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку автоматизованих систем керування зовнішнім освітленням ……10
1.2. Дослідження потенціалу та видів альтернативних джерел енергії ……14
1.3. Практичний досвід впровадження автоматизованих систем керування зовнішнім освітленням в Україні ……..26
Висновки до розділу 1 ……29
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ПЛАТФОРМИ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗОВНІШНІМ ОСВІТЛЕННЯМ……31
2.1. Організація архітектури комп’ютерно-інтегрованого комплексу для автоматичного управління вуличним освітленням на базі відновлюваних джерел енергії ……31
2.2. Техніко-економічне обґрунтування вибору апаратної бази для комп’ютерно-інтегрованого комплексу управління вуличним освітленням із резервним живленням від відновлюваних джерел ……..33
Висновки до розділу 2 ……45
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗОВНІШНІМ ОСВІТЛЕННЯМ……..47
3.1. Обґрунтування вибору інструментального програмного забезпечення…….47
3.2. Проектування та розробка програмного забезпечення для керуючого мікроконтролера ……50
3.3. Створення принципової електричної схеми апаратного комплексу автоматизованого управління вуличним освітленням ……56
3.4. Проектування SCADA-системи для моніторингу та керування комп’ютерно-інтегрованим комплексом зовнішнього освітлення з резервним живленням ……..63
Висновки до розділу 3 ……70
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ……73
4.1. Аналіз умов праці та ергономічна організація робочого місця розробника систем керування освітленням ……..73
4.2. Електробезпека та захист від шкідливих виробничих факторів при роботі з апаратною базою та альтернативними джерелами енергії ……75
4.3. Заходи безпеки та порядок дій в умовах надзвичайних ситуацій ……..76
Висновки до розділу 4 ……...77
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК……79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……81

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

AC (alternating current) – змінний струм
AGM – технологія Absorptive Glass Mat
BOD- датчик зниження напруги живлення
CISC - complex instruction set computer
DC (Direct current) – постійний струм
DMA - Direct memory access
EEPROM - electrically erasable programmable read-only memory
GEL – гелеві акумулятори
I2C - Inter-Integrated Circuit
Ір – робочий струм
Ікз – струм короткого замикання
JTAG - Joint Test Action Group
MIPS - Microprocessor without Interlocked Pipelined Stages
RAM - Random-access memory
RISC - Reduced Instruction Set Computer
ROM - Read-only memory
SPI - Serial Peripheral Interface
Up – робоча напруга
USART - universal synchronous and asynchronous receiver-transmitter
Uxx – напруга холостого ходу
WDT - watchdog timer
АСКЗО – автоматизована система керування зовнішнім освітленням
АЦП – аналого-цифровий перетворювач
ГЛВТ - газорозрядні лампи високого тиску
ДНАТ – Дугова Натрієва Трубчаста Лампа
ДРЛ - Дугова ртутна люмінесцентна лампа
КЗ – коротке замикання
ККД – коефіцієнт корисної дії
КЛЛ – компактні люмінесцентні лампи
ЛЛ - люмінесцентні лампи
ЛР - лампи розжарення
ПМЛ – електромагнітний пускач
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач
ШІМ - Широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний енергетичний сектор України перебуває на етапі кардинальних трансформацій, де питання оптимізації витрат та енергозбереження виходить на перший план. Інфраструктурні об'єкти та системи зовнішнього освітлення залишаються одними з головних споживачів електроенергії, витрачаючи близько 16–18% від загальнонаціонального енергоспоживання, що становить приблизно 14–15 ТВт·год щорічно. Попри поступовий перехід на світлодіодні технології, загальний рівень автоматизації залишається критично низьким: близько 70% об'єктів зовнішнього міського освітлення потребують негайної модернізації та впровадження інтелектуальних систем диспетчеризації.

Більшість існуючих систем функціонує за жорсткими часовими графіками без зворотного зв'язку та можливості автономної роботи, що призводить до нераціональних витрат енергії. Водночас, впровадження альтернативних джерел енергії, зокрема сонячних панелей, є екологічно безпечним та перспективним рішенням для забезпечення енергетичної автономності інфраструктури. Використання мікропроцесорних систем на базі контролерів (наприклад, ATmega16A) у поєднанні зі спеціалізованими накопичувачами енергії (гелевими акумуляторами) та SCADA-системами дозволяє створити надійний гібридний комплекс керування. Це обумовлює високу актуальність розробки комп'ютерно-інтегрованої системи автоматичного керування зовнішнім освітленням з альтернативним джерелом живлення.

Мета дослідження полягає у розробленні надійного, енергоефективного та автономного апаратно-програмного комплексу для керування мережею вуличного освітлення, який здатен працювати як від традиційної міської електромережі, так і від накопиченої сонячної енергії.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан систем зовнішнього освітлення та потенціал використання альтернативних джерел енергії (сонячних панелей), а також виявити ключові проблеми їх енергоефективності та автоматизації.

2. Обґрунтувати вибір апаратної платформи (мікроконтролер ATmega16A, гелеві акумуляторні батареї, силовий інвертор) та розробити алгоритми автоматичного керування в середовищі CodeVisionAVR.

3. Розробити принципову електричну схему, змоделювати роботу комплексу в середовищі Proteus та створити SCADA-систему (Borland Delphi) для моніторингу і дистанційного перемикання джерел живлення.

4. Провести аналіз потенційно небезпечних виробничих факторів та розробити технічні і організаційні заходи з охорони праці, електробезпеки та реагування у надзвичайних ситуаціях при роботі з гібридними системами енергозабезпечення.

Об’єкт дослідження — процеси та принципи функціонування систем автоматичного керування зовнішнім освітленням з використанням гібридних (альтернативних) джерел енергозабезпечення.

Предмет дослідження — методи, алгоритми та апаратно-програмні засоби для створення комп'ютерно-інтегрованої системи керування зовнішнім освітленням та підсистемою альтернативного живлення.

Методи дослідження. При проведенні дослідження було використано методи системного аналізу, теорії автоматичного керування, схемотехнічного моделювання (у програмному комплексі Proteus VSM) та програмування мікроконтролерів (у середовищі CodeVisionAVR).

Практичне значення отриманих результатів. В результаті проведення дослідження було створено повністю працездатну комп'ютерно-інтегровану систему автоматичного керування зовнішнім освітленням. Розроблено алгоритми комутування силових ліній освітлення залежно від сезонного розкладу (годинника реального часу) та рівня природного світла. Створена SCADA-система у середовищі Borland Delphi забезпечує дистанційний моніторинг параметрів заряду акумуляторної батареї та автоматичне перемикання між основним і резервним джерелами живлення із вбудованими алгоритмами протиаварійного захисту. Розроблений комплекс дозволяє суттєво знизити енергоспоживання від зовнішньої мережі (щонайменше на 25–35%) та оптимізувати експлуатаційні витрати.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ОГЛЯД СУЧАСНИХ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЗОВНІШНІМ ОСВІТЛЕННЯМ

1.1. Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку автоматизованих систем керування зовнішнім освітленням

Розглядаючи сучасний енергетичний сектор України станом на 2026 рік, варто відзначити кардинальні трансформації у структурі генерації та споживання електроенергії. В умовах суттєвих демографічних змін, коли чисельність населення становить понад 30 мільйонів осіб, а енергосистема працює в умовах підвищеного навантаження та необхідності балансування, питання оптимізації витрат виходить на перший план. Якщо у 2024 році загальне споживання електричної енергії сягало близько 116 ТВтгод, то за підсумками 2025 року та в першій половині 2026 року цей показник стабілізувався на рівні орієнтовно 85–90 ТВтгод внаслідок впровадження жорстких заходів енергозбереження та структурних змін в економіці. Відповідно до актуальних статистичних даних, структура споживання зазнала перерозподілу: промисловий сектор наразі акумулює близько 38% енергоресурсів, частка населення зросла до 32%, комунально-побутовий сектор використовує 15%, транспортна галузь — 4,5%, а сільськогосподарський комплекс — понад 5%. Попри загальне зниження обсягів споживання, інфраструктурні об'єкти та системи освітлення у будівлях і на вулицях залишаються одними з головних споживачів. Витрати електроенергії на забезпечення роботи різноманітних систем освітлення складають близько 16–18% від загальнонаціонального енергоспоживання, що в абсолютному вираженні становить приблизно 14–15 ТВт*год щорічно.

Аналізуючи стан освітлювальної інфраструктури у 2026 році, слід констатувати, що незважаючи на прискорений перехід до використання світлодіодних технологій протягом останніх п'яти років, загальний рівень автоматизації та інтеграції систем керування залишається критично низьким. Значна частина об'єктів продовжує функціонувати на базі морально застарілої архітектури керування. За сучасними оцінками, близько 70% об'єктів зовнішнього

міського освітлення, 60% приміщень освітніх закладів, 65% площ адміністративних будівель та 50% виробничих підприємств потребують негайної модернізації саме в частині впровадження інтелектуальних систем диспетчеризації та автономного живлення.

У вітчизняній практиці до 2026 року відбулося значне витіснення застарілих джерел світла, однак у багатьох регіонах, особливо у сільській місцевості та на старих промислових об'єктах, все ще зберігається частка традиційних ламп розжарювання, люмінесцентних ламп та газорозрядних ламп високого тиску, що наочно продемонстровано на рис. 1.1. Проте головною проблемою сьогодні є не стільки тип лампи, скільки відсутність адаптивних алгоритмів керування (наприклад, диміювання в нічний час або використання датчиків руху), через що питомі витрати електричної енергії на інфраструктурне освітлення в Україні продовжують перевищувати аналогічні показники передових європейських держав.

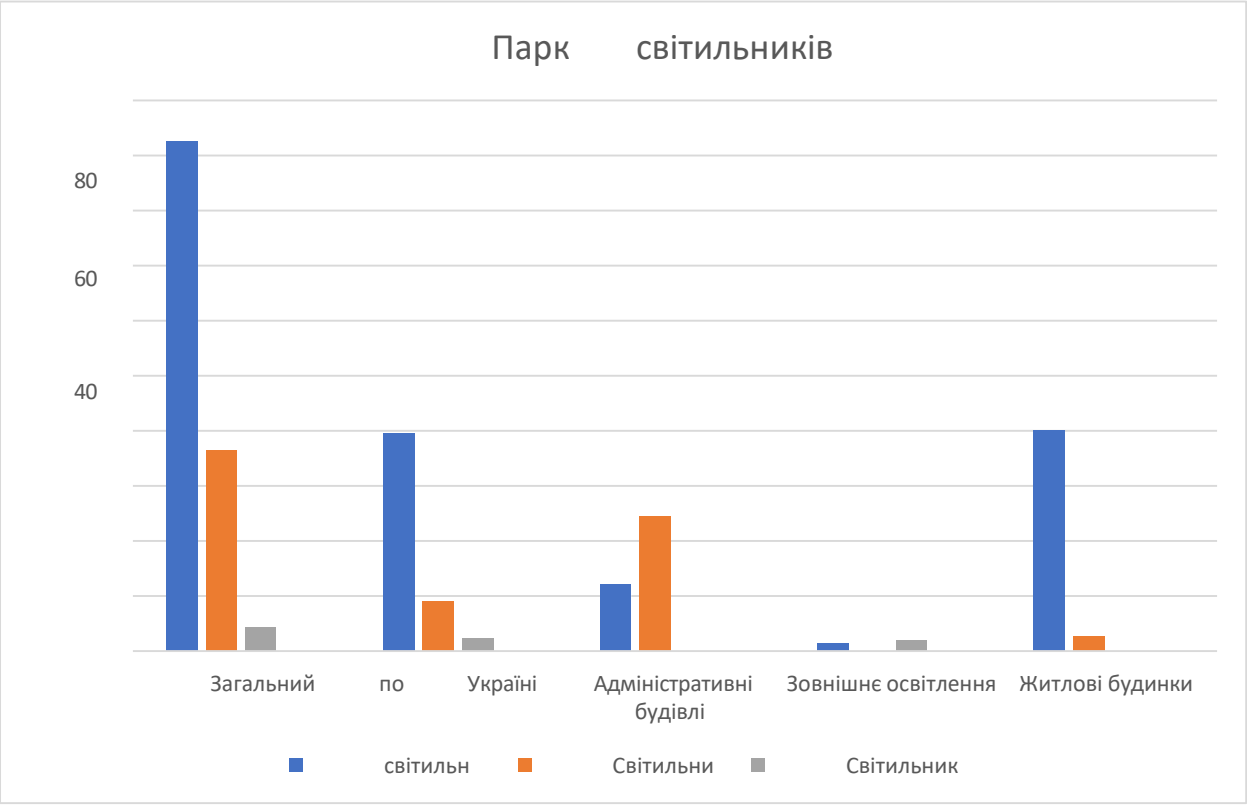


Рис. 1.1. Структура використання освітлювальних приладів та засобів керування в Україні станом на 2026 рік

Історична динаміка розвитку вітчизняного ринку освітлювального обладнання демонструє складний шлях трансформацій. До 2015 року ринковий простір переважно контролювався вітчизняними виробниками світлотехнічної продукції, серед яких провідні позиції займала «ОСП Корпорація Ватра». У період 2019–2020 років частка її виробів на ринку становила вагомі 30–40 відсотків. Однак подальша масштабна експансія азійських корпорацій, які запропонували значно дешевшу продукцію, призвела до стрімкого витіснення локальних компаній. Як наслідок, виробничі потужності вітчизняних підприємств скоротилися до мінімальних значень. Станом на 2025–2026 роки український ринок адаптується до нових викликів: спостерігається різке зростання попиту на комплексні рішення — смарт-контролери, системи альтернативного живлення та інвертори, хоча безпосереднє виробництво самих джерел світла все ще сильно залежить від імпорту.

Детальний аналіз актуальних статистичних даних, що відображають стан ринку у 2025–2026 роках та наведені у табл. 1.1, дозволяє зробити однозначний висновок про стійкий дефіцит електроламп і світлотехнічних матриць вітчизняного виробництва. Найбільший дисбаланс та залежність від зовнішніх постачань фіксується у сегментах сучасних люмінесцентних, галогенних, металогалогенних та інших спеціалізованих джерел світла.

Таблиця 1.1

Актуальний експортно-імпортний баланс торгівлі джерелами світла в Україні (станом на 2025-2026 рр.)

Види електроламп	Різниця між експортом електроламп та їх імпортом (Кількість, тис. шт.)
Розжарювання	60 668,10
Люмінесцентні	-12 209,80
Ртутні	3 011,60
Натрієві	35,6
Металогалогенні	-32,5
Галогенні	-9 251
Інші	-42 016,20

Успішному масштабуванню та глибокому впровадженню технологій інтелектуального енергоефективного освітлення з використанням альтернативних

джерел в Україні у 2026 році перешкоджає цілий комплекс системних бар'єрів. Першочерговою проблемою є дефіцит комплексних автоматизованих систем керування зовнішнім освітленням на рівні муніципалітетів. У більшості населених пунктів вуличне освітлення досі функціонує за жорсткими часовими графіками без зворотного зв'язку та можливості автономної роботи. Якість світлового потоку та загальні рівні освітленості часто не відповідають жорстким сучасним нормативам через відсутність систематичного технічного обслуговування та високу вартість інтелектуальних вузлів керування. Вкрай низька енергоефективність безпосередньо пов'язана з деградацією апаратури керування, а сучасні IoT-рішення та системи диспетчеризації наразі повноцінно впроваджуються переважно лише у великих обласних центрах або в рамках окремих грантових проєктів.

Другою вагомою перешкодою залишається фінансовий аспект, а саме обережне ставлення замовників до значних стартових інвестицій в оновлення освітлювальних систем та встановлення сонячних панелей, попри їхню доведену рентабельність та економію в довгостроковій перспективі. Висока початкова вартість мікропроцесорних систем керування, літій-залізо-фосфатних акумуляторів та якісних інверторів суттєво уповільнює процес їх масового впровадження. Ця проблематика особливо гостро відчувається під час проведення процедур державних закупівель, де тендерні механізми все ще спираються на принцип жорсткої мінімізації початкових витрат. Внаслідок цього високотехнологічні, енергонезалежні, але дорожчі на етапі закупівлі системи освітлення регулярно програють тендери дешевшим базовим комплектаціям без засобів автоматизації.

Третім деструктивним фактором є нестача суворого контролю якості обладнання на ринку енергоефективних технологій. Засилля низькоякісних компонентів — від дешевих світлодіодних матриць до ненадійних контролерів заряду — формує у споживачів хибне уявлення про загальну вразливість автономних систем. Численні прецеденти швидкого виходу з ладу дешевої імпортної продукції протягом перших місяців експлуатації або деградації ємності неякісних акумуляторів повністю нівелюють економічні переваги

енергозбереження. Замість того, щоб заощаджувати кошти протягом усього життєвого циклу автономної системи, споживачі змушені витрачати додаткові ресурси на постійне сервісне обслуговування та заміну вузлів, що суттєво підриває довіру до концепції розумного освітлення загалом.

1.2. Дослідження потенціалу та видів альтернативних джерел енергії

У сучасному світі актуальність розвитку сонячної енергетики невпинно зростає, що зумовлено насамперед її екологічною чистотою та безпечністю для довкілля. Важливим індикатором рівня розвитку будь-якого суспільства виступає його енергоозброєність. Статистичні дані свідчать, що глобальні потреби людства в енергетичних ресурсах подвоюються кожні десять-п'ятнадцять років, а загальне споживання енергії в розрахунку на одну особу за всю історію цивілізації збільшилося понад у сто разів. Саме тому перехід до використання енергії Сонця розглядається як безальтернативне майбутнє нашої планети. Висока доцільність освоєння цього ресурсу пояснюється його колосальною ємністю: лише за дев'ять хвилин поверхня Землі поглинає обсяг сонячного випромінювання, який перевищує річне енергоспоживання всього людства.

Широкомасштабне впровадження фотоелектричних модулів для генерації електричної енергії сьогодні є нормою не лише для країн зі спекотним кліматом, а й для держав із помірними показниками інсоляції. Яскравим прикладом є Німеччина, де загальний рівень сонячної активності приблизно на десять відсотків нижчий порівняно з територією України, проте місцева енергосистема генерує близько третини всієї електроенергії саме завдяки сонячним електростанціям. Світовий попит на технології відновлюваної енергетики продовжує демонструвати стійку тенденцію до зростання. Фундаментальними рушіями цього прогресу виступають прагнення до мінімізації негативного впливу на екосистеми, необхідність раціонального використання вичерпних копалин, а також бажання споживачів досягти часткової або абсолютної енергетичної автономності від монопольних постачальників електроенергії.

На сьогодні інтеграція відновлюваних джерел стала критично важливою і невід'ємною складовою стратегії розбудови енергетичного сектору. Наша

держава, площа якої сягає 603 548 квадратних кілометрів, володіє потужним потенціалом для інтенсивного розвитку цієї галузі. Передача електричної енергії класичними мережами до віддалених населених пунктів неминуче супроводжується значними технологічними втратами, що суттєво знижує загальну ефективність транспортування. Впровадження локальних альтернативних систем живлення у таких регіонах дозволяє кардинально оптимізувати витрати на доставку енергії та уникнути колосальних капіталовкладень у будівництво нових високовольтних магістралей. До спектра доступних альтернативних джерел заведено відносити енергію океанічних припливів та відливів, кінетичний потенціал вітрових потоків, геотермальну енергію земних надр, електромагнітне випромінювання Сонця, а також гідрокінетичну енергію річкових мас. Детальний порівняльний аналіз експлуатаційних та екологічних характеристик основних видів відновлюваної генерації наведено у відповідній таблиці нижче.

Таблиця 1.2

Порівняльна характеристика основних видів відновлюваних джерел енергії

Вид джерела	Безпека (глобальні аварії)	Екологічні проблеми	Можливість технічного рішення	Період вирішення екологічної	Економічна оцінка	Соціальний фактор, наближення
Ядерний	-	-	0	-	-	-
Гідроелектростанції	0	-	+	+	+	0
Вітряні	+	0	+	+	0	+
Сонячні	+	+	+	+	0	+

1.1.1. Фізичні основи та принципи функціонування фотоелектричних перетворювачів

Сонячна панель являє собою комплекс з'єднаних між собою напівпровідникових фотоелектричних перетворювачів. Ці елементи здатні безпосередньо генерувати постійний електричний струм шляхом утилізації сонячної радіації. В основі процесу лежить явище внутрішнього фотоефекту, яке виникає всередині неоднорідних напівпровідникових структур (p-n переходів) під дією квантів світла. Ключовою екологічною перевагою таких систем є абсолютна відсутність емісії вуглекислого газу на етапі безпосередньої генерації. Попри те, що певний вуглецевий слід існує на етапах виробництва та утилізації обладнання,

питомий обсяг викидів на кожен згенерований гігават-час енергії протягом усього життєвого циклу є неспівмірно меншим порівняно з традиційною вуглеводневою генерацією. Згідно з дослідженнями, глобальний перехід на фотовольтаїку дозволив би уникнути щонайменше 89% шкідливих викидів, продукованих сучасним енергетичним сектором.

Стандартні фотоелектричні модулі проектуються переважно для забезпечення заряду акумуляторних блоків з номінальною напругою 12 В, при цьому їхня вихідна потужність може варіюватися в широкому діапазоні від 10 до 300 Вт. Експлуатаційні властивості панелей найповніше описуються вольт-амперною характеристикою, яка знімається за жорстко регламентованих стандартних умов: інтенсивність інсоляції на рівні 1000 Вт/м², температура фотоелемента 25 °C та спектральний розподіл випромінювання, характерний для широти 45 градусів. Графічне відображення цих параметрів містить дві критичні точки: перетин кривої з віссю напруг визначає напругу холостого ходу (Uxx), а перетин з віссю струмів — струм короткого замикання (Ікз). На цьому ж графічному полі зазвичай будується крива генерованої потужності залежно від опору навантаження. Заявлена виробником номінальна потужність відповідає максимальному значенню на цій кривій за стандартних умов тестування. Координати цієї точки визначають оптимальну робочу напругу (Up) та відповідний робочий струм (Ip). Для класичного модуля, складеного з 36 послідовних осередків, робоча напруга за температури 25 °C становить орієнтовно 16–17 В, що еквівалентно 0,45–0,47 В на один елемент. Такий технологічний запас напруги є критично необхідним для компенсації її неминучого падіння під час сильного термічного нагрівання поверхні під дією прямих сонячних променів.

Термічна залежність параметрів кремнієвих елементів характеризується негативним температурним коефіцієнтом для напруги холостого ходу, який становить приблизно мінус 0,4% на кожен градус нагрівання, тоді як для струму цей показник є позитивним і дорівнює плюс 0,07% на градус. Варто зазначити, що напруга холостого ходу демонструє слабку залежність від інтенсивності освітлення, натомість струм короткого замикання змінюється прямо пропорційно

до рівня інсоляції. Коефіцієнт корисної дії, який розраховується як відношення максимально можливої електричної потужності до загальної енергії світлового потоку на робочу площу панелі, для сучасних комерційних зразків коливається в межах 15–40%.



Рис. 1.2. Типова вольт-амперна характеристика фотоелектричного модуля

З метою досягнення необхідних параметрів потужності та робочої напруги окремі модулі комутуються у масиви за допомогою послідовних або паралельних схем з'єднання. На практиці реальна сумарна потужність сонячного масиву завжди виявляється меншою за алгебраїчну суму номіналів окремих панелей. Це явище зумовлене втратами на неузгодженість, оскільки навіть однотипні модулі з однієї партії мають певний розкид заводських характеристик. Ретельне сортування та підбір елементів дозволяє мінімізувати цей негативний ефект. Практика показує, що при послідовній комутації десяти модулів із десятивідсотковою розбіжністю параметрів загальні втрати потужності сягають 6%, тоді як зменшення розбіжності до 5% дозволяє скоротити втрати до 2%.

Вкрай небезпечним явищем під час експлуатації послідовно з'єднаних систем є часткове затінення одного з модулів або його окремих сегментів. У такій ситуації виникає так званий «ефект гарячої плями», коли затінена ділянка перетворюється на споживача, розсіюючи енергію, згенеровану рештою освітлених елементів. Це призводить до критичного локального перегріву та незворотного руйнування структури. Задля нівелювання цієї загрози конструкція передбачає інтеграцію шунтувальних діодів паралельно до кожного модуля або його секції. Застосування таких діодів є обов'язковою умовою при послідовному з'єднанні понад двох панелей. Крім того, на кінці кожного послідовного

ланцюжка (стринга) встановлюється блокувальний діод, функція якого полягає у запобіганні перетіканню струмів між паралельними гілками з різною напругою. Як правило, вся ця захисна напівпровідникова арматура компактно розміщується в герметичній комутаційній коробці на тильній стороні панелі. Варіанти побудови електричних кіл наведено на відповідному рисунку.

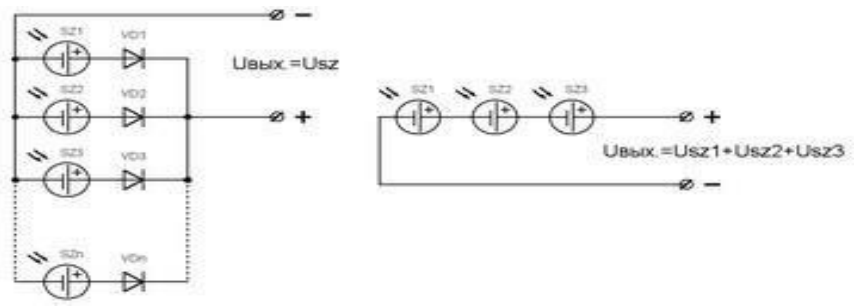


Рис. 1.3. Варіанти електричного сполучення фотоелектричних панелей

Загальний вигляд вольт-амперної характеристики багатомодульного масиву є масштабованою копією графіка одиничного елемента. Під час підключення реального навантаження фактична робоча точка системи далеко не завжди збігається з точкою максимальної генерації потужності, оскільки її просторове положення безперервно дрейфує залежно від погодних умов та температури. Особливу складність становить підключення реактивних навантажень, наприклад, електричних двигунів. Їхні пускові струми здатні миттєво змістити робочу точку в зону критично низької або нульової потужності, що унеможливить запуск агрегату. Саме для подолання цієї проблеми та забезпечення динамічного узгодження джерела генерації з характеристиками навантаження до складу системи вводиться спеціалізований перетворювач напруги.

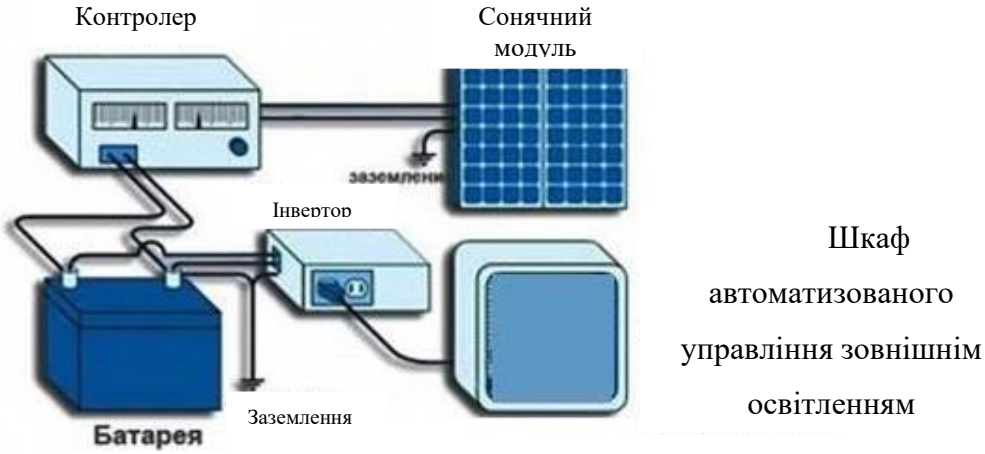


Рис. 1.4. Структурна схема автономної фотоелектричної станції

1.1.2. Роль та класифікація накопичувачів електричної енергії

Акумуляторна батарея є критично важливим вузлом системи, який призначений для хімічного акумулювання електричної енергії з її подальшою віддачею за потреби. Цей електрохімічний пристрій працює за принципом оборотності реакцій і відіграє роль надійного автономного джерела живлення. Для комплексної оцінки акумулятора використовують низку базових параметрів, серед яких: тип електрохімічної системи, номінальна напруга, ємнісні показники, внутрішній опір, інтенсивність саморозряду та очікуваний експлуатаційний ресурс. Поточний технічний стан (здоров'я) батареї визначається шляхом моніторингу трьох ключових метрик: фактичної залишкової ємності, величини внутрішнього опору та струму саморозряду у стані спокою.

Інтеграція накопичувача до складу сонячної електростанції дозволяє вирішити три фундаментальні завдання. По-перше, він забезпечує покриття пікових сплесків енергоспоживання, які перевищують миттєву генераційну здатність фотоелектричного поля. По-друге, акумулятор гарантує безперебійне живлення споживачів у темну пору доби, здійснюючи короткострокове зберігання енергії. По-третє, він виконує функцію середньострокового буфера, компенсуючи дефіцит генерації під час затяжної хмарності або періодів аномально високого споживання. Вибір оптимального типу батареї для геліосистем здійснюється за суворими критеріями. Серед них виділяють високу толерантність до жорстких циклічних навантажень, здатність витримувати глибокі розряди без катастрофічної деградації пластин, мінімальний струм саморозряду, стійкість до випадкових порушень алгоритмів заряду, загальну довговічність, відсутність необхідності в регулярному технічному обслуговуванні, а також конструктивну компактність і повну герметичність, що особливо актуально для мобільних застосувань.

В галузі альтернативної енергетики безперечне лідерство утримують герметизовані свинцево-кислотні акумулятори, що не потребують обслуговування. Вони виготовляються переважно за двома передовими технологіями: Gelled Electrolyte (GEL) та Absorptive Glass Mat (AGM). Технологія гелевих електролітів була започаткована ще наприкінці п'ятдесятих років

минулого століття. Її сутність полягає у легуванні класичного рідкого електроліту діоксидом кремнію, що призводить до його загущення до стану желе. Це конструктивне рішення гарантує стовідсоткову герметичність корпусу, при цьому внутрішня рекомбінація газів відбувається у мікроскопічних порах гелевої маси. Найвагомішою перевагою таких батарей у контексті сонячних електростанцій є повна відсутність потреби у доливанні дистильованої води протягом усього терміну експлуатації.

Альтернативна технологія AGM, що з'явилася у сімдесятих роках, базується на використанні високопористих сепараторів із надтонкого скловолокна. Цей матеріал повністю вбирає в себе рідкий електроліт, унеможливлюючи його вільне перетікання. Дозування електроліту розраховується таким чином, щоб заповнити лише дрібні пори скломату, залишаючи великі пустоти відкритими для вільної циркуляції та рекомбінації газів. Акумулятори типу AGM, подібно до гелевих аналогів, є повністю необслуговуваними. Обидві зазначені технології володіють унікальними експлуатаційними особливостями, які визначають сфери їх раціонального застосування, що деталізовано у порівняльній таблиці.

Таблиця 1.3

Порівняльний аналіз експлуатаційних характеристик акумуляторів типів AGM та GEL

Параметр	AGM	GEL
Умови заряду/розряду	Більш високі струми розряду/зарядки, помірні вимоги до якості напруги зарядки (стабільність, пульсації).	Розвинені струми - до 40% менше, ніж у AGM. Гелеві акумулятори дуже чутливі до якості зарядки.
Важкі циклічні навантаження з глибиною розряду більше 70%	Небажано, значно скорочують термін експлуатації.	Звичайний режим роботи.
Середні циклічні навантаження з глибиною розряду 30-70%	Звичайний режим роботи.	Звичайний режим роботи.
Термін експлуатації	У буферному режимі для блочних акумуляторів ємністю 33-250 Ач	Аналогічний до AGM за умови дотримання всіх експлуатаційних вимог,

	зазвичай дорівнює 10-12 років.	особливо щодо якості заряду.
Сфера застосування	Широкий спектр застосування: від побутових пристроїв до великих промислових потреб.	Використовуються в системах з регулярним і безперервним розрядом за умови забезпечення високої якості заряду.
Циклічний ресурс	Близько 250-280 циклів.	Високий циклічний термін служби: 500-600 циклів.
Вартість	Є раціональним ціновим варіантом для більшості сфер використання.	Зазвичай дорожчі за AGM на 25-35% через складнішу технологію та вартість матеріалів.

Розрахунок необхідної ємності акумуляторного парку здійснюється на основі профілю середньодобового споживання об'єкта. При цьому критично важливо закладати запас ємності таким чином, щоб експлуатаційна глибина розряду не перевищувала 50–70%. Забезпечення правильних алгоритмів заряду та розряду є фундаментальною запорукою збереження заявленого ресурсу батареї. Необхідно враховувати, що подача надмірно високих зарядних струмів неминуче призводить до інтенсивного википання електроліту через запобіжні клапани, що викликає швидке і безповоротне висихання та руйнування акумулятора.

Найпопулярнішим базовим блоком для сонячних систем залишається акумулятор з напругою 12 В. З таких модулів формуються акумуляторні банки з вищою системною напругою (24 В, 48 В тощо) для забезпечення роботи потужних інверторів. Проектування такого банку спирається на три основні параметри: сумарну робочу ємність, максимально допустимий струм заряду та граничний струм розряду. Формування банку з вищою напругою відбувається шляхом послідовного з'єднання 12-вольтових моноблоків, при цьому загальна напруга системи дорівнює сумі напруг усіх елементів ланцюга. Паралельне з'єднання, натомість, використовується для нарощування сумарної ємності при збереженні базової напруги. Важливим технологічним правилом перед початком експлуатації складеної збірки є обов'язкове попереднє вирівнювання (балансування) напруг на клемах кожного окремого блоку.

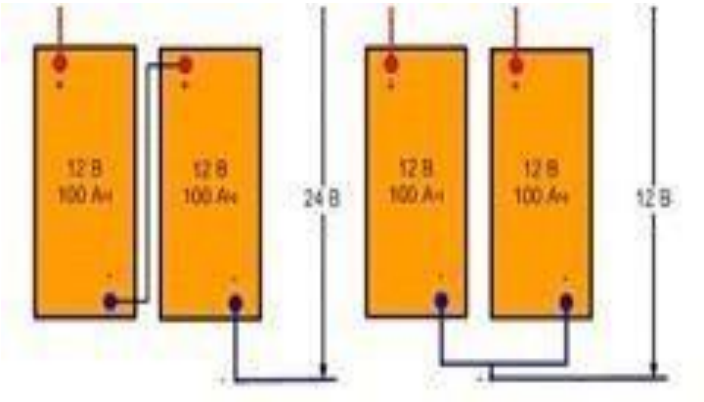


Рис. 1.5. Схеми послідовного та паралельного комутування акумуляторних батарей

Надзвичайно суворим фактором експлуатації є дотримання температурного режиму. Сучасні герметизовані батареї здатні функціонувати в умовах екстремальних температур, однак систематичне перегрівання має руйнівні наслідки. Відповідно до законів фізичної хімії, підвищення температури корпусу на кожні 10 °C призводить до прискорення всіх внутрішніх реакцій удвічі, включаючи процеси корозії решіток та старіння. Під час інтенсивного заряду через екзотермічну реакцію рекомбінації кисню температура батареї може перевищувати температуру довкілля на 10–15 °C. Для уникнення теплового розгону приміщення акумуляторної має бути обладнане ефективною системою природної або примусової вентиляції. Суворе дотримання температурних норм є критичним для забезпечення рентабельності всієї системи.

Аналізуючи доцільність застосування різних технологій, слід зазначити, що акумулятори AGM є оптимальним рішенням для систем резервного живлення, де відключення централізованої мережі мають епізодичний та короткочасний характер. Також вони чудово зарекомендували себе в буферних режимах для підтримки живлення до моменту запуску дизельних генераторів. Натомість технологія GEL є незамінною в умовах нестабільного і непрогнозованого постачання енергії. Вони демонструють високу ефективність під час тривалого живлення фонових навантажень (автоматика котлів, циркуляційні насоси, холодильне обладнання, контролери зовнішнього освітлення) з періодичними піковими пусками. Хоча AGM-батареї в середньому на 10–15% дешевші, в умовах жорсткого циклічного режиму їх доведеться замінювати значно частіше, що зведе

початкову економію нанівець. Враховуючи вищу стабільність та витривалість, саме гелеві накопичувачі рекомендуються для систем, де надійність переважає над стартовим бюджетом. Це особливо стосується систем автоматичного керування зовнішнім освітленням, які функціонують в умовах щоденного циклування, різких температурних перепадів та вимагають тривалої автономності без сервісного втручання.

Фізико-хімічні властивості акумуляторів зумовлюють чітку залежність між залишковим рівнем заряду та напругою на клемах без навантаження. Цей показник також зазнає термічної корекції: при зміні температури електроліту напруга, що відповідає стовідсотковому заряду, зсувається на величину 0,03 В на кожен градус відхилення, що відображено у наведеній таблиці.

Таблиця 1.4.

Температурна залежність напруги повністю зарядженого акумулятора

Температура батареї, °C	Напруга, В
0	15,0
10	14,7
20	14,4
30	14,1

Запорукою максимізації життєвого циклу акумуляторів у складі сонячних електростанцій є жорстке недопущення станів глибокого розряду. Практика доводить, що систематичне розряджання блоків нижче порогу 30% залишкової ємності (тобто розряд на 70% і глибше) катастрофічно зменшує кількість доступних циклів. Ігнорування цього правила призводить до передчасної деградації активної маси, необхідності позапланової заміни батарейного парку та, як наслідок, різкого зростання вартості володіння системою в цілому.

Для забезпечення рентабельної експлуатації в циклічному режимі інженери проектують системи таким чином, щоб робоча глибина розряду не перевищувала безпечного коридору у 30–40%. Цей показник розраховується як відсоток витраченої енергії відносно паспортного номіналу. Досягти таких параметрів можна двома шляхами: впровадженням інтелектуальних алгоритмів відключення некритичних навантажень або закладанням значного надлишку акумуляторної

ємності на етапі проектування. Вплив глибини розряду на ресурс чітко простежується на графіку залежності кількості доступних робочих циклів від інтенсивності експлуатації. Для безпомилкової реалізації цих захисних алгоритмів до архітектури сонячної станції в обов'язковому порядку інтегрується мікропроцесорний контролер заряду-розряду.

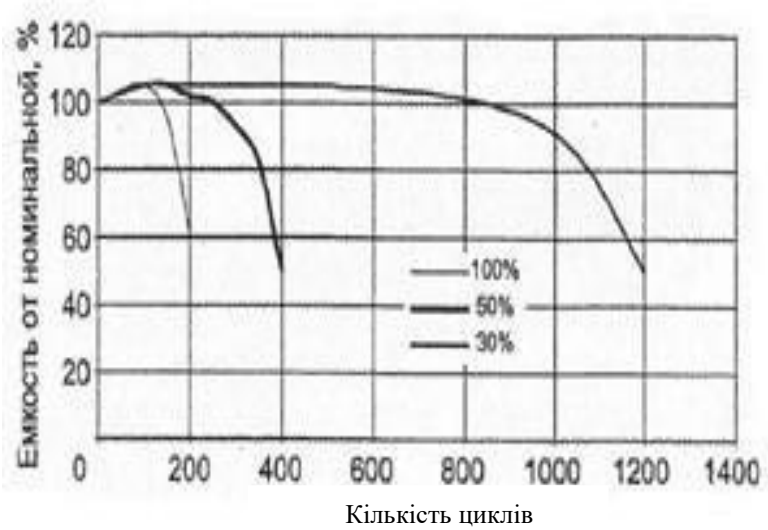


Рис. 1.6. Вплив глибини розряду на циклічний ресурс акумуляторної батареї

1.1.3. Перетворювачі напруги (інвертори) в системах автономного живлення

Будь-який фотоелектричний масив, незалежно від його конфігурації та сумарної потужності, за своєю фізичною природою є генератором виключно постійного струму. Оскільки переважна більшість стандартного електрообладнання та освітлювальних приладів спроектована для роботи від мережі змінного струму, системі критично необхідний силовий вузол для перетворення низьковольтного постійного струму (від акумуляторів або панелей) у змінний струм стандартизованої синусоїдальної форми. Цю функцію виконує спеціалізований електронний пристрій — інвертор.

За своєю суттю, інвертори є складними напівпровідниковими агрегатами, що трансформують постійну напругу системної шини (найчастіше 12, 24 або 48 В) у стандартну змінну напругу 220 В. Джерелом первинної енергії для них виступає акумуляторний банк або безпосередньо масив сонячних панелей. Залежно від архітектури сонячної електростанції, на ринку представлені два принципово різні

класи пристроїв: автономні інвертори (off-grid), що формують власну ізольовану мережу, та мережеві інвертори (on-grid), призначені для паралельної роботи з централізованою енергосистемою. Хоча силова вихідна частина обох типів має подібну схемотехніку, їхні системи керування кардинально відрізняються. Автономний апарат оснащується власним прецизійним задавальним генератором частоти (50 Гц), тоді як мережевий інвертор використовує промислову мережу як еталонний генератор і змушений динамічно підлаштовувати фазу та частоту свого вихідного сигналу для повної синхронізації з нею.

Головним показником енергетичної ефективності перетворювачів будь-якого типу є коефіцієнт корисної дії, який у сучасних моделях обов'язково має перевищувати поріг у 90%. Для систем малої та середньої потужності формується однофазна напруга 220 В, тоді як потужні промислові установки (від 10 до 100 кВт) генерують повноцінну трифазну напругу 380 В. Під час проектування автономних систем вибір вхідної напруги постійного струму (12, 24, 48 або 120 В) є стратегічним рішенням. Зростання робочої напруги дозволяє суттєво спростити схемотехніку інвертора, підвищити його ККД та радикально зменшити теплові (омічні) втрати у силових кабелях на шляху від генератора до акумулятора та перетворювача. Водночас перехід на напруги понад 40 В вимагає застосування суворіших заходів електробезпеки під час монтажу та обслуговування. Вимоги до чистоти вихідної синусоїди для автономних систем є дещо пом'якшеними. Якщо характер навантаження дозволяє (наприклад, для деяких видів освітлення або нагрівачів), можливе застосування економічних моделей інверторів із модифікованою (трапецієподібною) синусоїдою, вартість яких може бути у двічі-тричі нижчою за пристрої з чистою синусоїдою. Критично важливим експлуатаційним критерієм є стабільність ККД у широкому діапазоні потужностей: інвертор не повинен втрачати ефективність під час роботи на холостому ході або за мінімального навантаження, що становить близько 10% від його номіналу. Крім того, пристрій повинен мати високу стійкість до пускових перевантажень, які неминуче виникають під час запуску електродвигунів або компресорів. До сучасного автономного інвертора висуваються жорсткі інженерні вимоги: гарантована здатність витримувати як короткочасні, так і тривалі

перевантаження струмом, мінімізовані втрати в режимі очікування, висока точність стабілізації вихідної напруги, низький коефіцієнт нелінійних спотворень (гармонік), максимальний загальний ККД та повна відсутність генерації високочастотних радіоперешкод.

Світові виробники електроніки наразі пропонують гібридні багатофункціональні комплекси, спеціально адаптовані для систем альтернативної енергетики. У таких пристроях під одним корпусом об'єднані сам силовий інвертор, мікропроцесорний контролер заряду акумуляторів та складний модуль відстеження точки максимальної потужності сонячних панелей (MPPT), що робить систему значно надійнішою і простішою в розгортанні. Натомість до мережевих інверторів висуваються найвищі нормативні вимоги щодо якості енергії, що генерується в загальну мережу. З метою мінімізації втрат вони проектуються для роботи з високими вхідними напругами постійного струму (аж до 1000 В). Оскільки живлення таких інверторів здійснюється безпосередньо від сонячних стрингів без проміжного акумулювання, наявність вбудованого алгоритму MPPT є критично необхідною. Мережеві пристрої також оснащуються складними модулями моніторингу, які автоматично ініціюють процес генерації змінного струму в мережу виключно тоді, коли поточна освітленість панелей дозволяє сформувати достатню і стабільну електричну потужність.

1.4. Практичний досвід впровадження автоматизованих систем керування зовнішнім освітленням в Україні

Практична реалізація та масштабування автоматизованих систем керування зовнішнім освітленням (АСКЗО) на території України пройшли шлях від поодиноких пілотних проєктів до розгортання складних інфраструктурних рішень. Якщо ще кілька років тому такі високотехнологічні комплекси перебували переважно на стадії тестування та впроваджувалися виключно в межах великих мегаполісів, таких як Київ чи Миколаїв, то сьогодні диспетчеризація освітлювальних мереж стала базовим стандартом для розвитку міських агломерацій. Сучасні енергетичні виклики змушують муніципалітети форсовано переходити від ручного керування контакторами до впровадження

повноцінних інтелектуальних вузлів на базі промислових мікроконтролерів, що дозволяє суттєво оптимізувати розподіл навантажень у мережі.

Найбільш показовим прикладом глибокої апаратної модернізації є столичний досвід, де функціонує та постійно вдосконалюється масштабна архітектура Smart Lighting. За час своєї промислової експлуатації київська система диспетчеризації зарекомендувала себе як високонадійний інформаційно-керуючий комплекс. Головна перевага для інженерно-технічного та адміністративного персоналу полягає у забезпеченні абсолютної прозорості та гнучкості керування багатокілометровими лініями. Інтеграція сучасних протоколів передачі даних дозволяє операторам не лише дистанційно вмикати контури, але й за допомогою ШІМ-контролерів плавно регулювати рівень споживаної потужності світлодіодних ліхтарів у надзвичайно широкому діапазоні — від 1 до 100 відсотків. Командний центр отримує вичерпну телеметричну інформацію в режимі реального часу щодо стану кожної фази, працездатності периферійного обладнання та цілісності кабельних мереж. Автоматизований комерційний облік електроенергії супроводжується глибоким архівуванням даних у базах SCADA-систем з подальшою генерацією аналітичних звітів і графіків. Такий прецизійний контроль дозволяє місту заощаджувати від 40 до 80 відсотків енергоресурсів, а також кардинально скорочує час реакції аварійних служб на позаштатні ситуації [11].

Тенденція до глибокої автоматизації комунального господарства активно поширюється і на регіональному рівні. Яскравим прикладом комплексної реновації є місто Біла Церква, де поетапно реалізується стратегія переходу на розумне освітлення. Муніципальний проєкт передбачає не просто механічну заміну застарілих газорозрядних ламп на сучасні енергоефективні LED-світильники та капітальний ремонт силових ліній, а обов'язкове розгортання єдиної централізованої системи керування. Локальні контролери, встановлені у трансформаторних підстанціях, безперервно агрегують інформацію про обсяги спожитої потужності та технічні параметри мережі, передаючи її на сервер. Цей програмно-апаратний підхід гарантує суттєве скорочення експлуатаційних витрат

бюджету та робить вагомий внесок у покращення глобальної екологічної ситуації шляхом прямого зменшення обсягів викидів вуглецю в атмосферу [12].

Перехід до використання АСКЗО, які функціонують у синергії з альтернативними джерелами живлення (зокрема, з фотоелектричними панелями), відкриває принципово нові експлуатаційні перспективи. Впровадження таких гібридних установок забезпечує базове зниження загального енергоспоживання від зовнішньої мережі щонайменше на 25–35 відсотків. Водночас кардинально зменшуються постійні фінансові втрати, пов'язані з фізичним обходом ліній та пошуком несправностей, оскільки вбудовані алгоритми самодіагностики дозволяють мікропроцесору миттєво локалізувати обриви або короткі замикання. Завдяки цьому зростає загальна надійність інфраструктури, оптимізується логістика ремонтних бригад спеціалізованих підприємств та підвищується ефективність використання їхнього технічного потенціалу. Надзвичайно важливим економічним рушієм є можливість переходу від жорстких розрахунків за номінальною встановленою потужністю до прозорої оплати виключно за фактично спожиту енергію. Крім того, використання сонячної генерації дозволяє залучити екологічно чистий і практично невичерпний ресурс для підтримки життєздатності об'єкта.

З інженерної точки зору, проєктування сучасної системи автоматичного керування зовнішнім освітленням з автономним блоком живлення вимагає розв'язання низки алгоритмічних завдань. Першочерговою функцією розроблюваного контролера є забезпечення жорсткого дотримання графіка увімкнення та вимкнення освітлювальних приладів із застосуванням астрономічних таймерів, які автоматично коригують роботу залежно від сезонних змін тривалості світлового дня та географічних координат. Паралельно система повинна здійснювати безперервний інтелектуальний моніторинг альтернативного джерела — відстежувати точку максимальної потужності сонячних панелей та керувати багатостадійним зарядом акумуляторних батарей. Окремим програмним потоком реалізується підсистема апаратної безпеки, яка відповідає за миттєву генерацію тривожних сигналів у разі несанкціонованого доступу до антивандальних шаф керування. Головною ж метою функціонування всього

комплексу залишається гарантування безперебійного освітлення житлових масивів, автомагістралей та інших об'єктів міської інфраструктури, що досягається мінімізацією часового проміжку від моменту виникнення апаратної відмови до її повної ліквідації.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було здійснено комплексний аналіз сучасного стану систем керування зовнішнім освітленням та досліджено можливості застосування альтернативних джерел живлення. Встановлено, що витрати електроенергії на системи освітлення в Україні становлять близько 16–18% від загальнонаціонального енергоспоживання. При цьому орієнтовно 70% об'єктів зовнішнього міського освітлення є морально застарілими та потребують негайної модернізації шляхом впровадження інтелектуальних систем диспетчеризації. Основними бар'єрами для своєчасного оновлення інфраструктури визначено високу початкову вартість інноваційного обладнання та загальний дефіцит комплексних автоматизованих систем керування на муніципальному рівні.

Для забезпечення автономності об'єктів та підвищення їхньої енергоефективності доведено доцільність використання енергії Сонця. Побудова надійної автономної сонячної електростанції вимагає комплексного застосування фотоелектричних модулів, інверторів для перетворення постійного струму в змінний, а також ефективних систем накопичення енергії. Детальний аналіз існуючих технологій накопичення показав, що для систем автоматичного керування зовнішнім освітленням найбільш оптимальним є використання акумуляторів, виготовлених за технологією GEL. Порівняно з AGM-батареями, вони відрізняються значно вищою стійкістю до глибоких розрядів, мають більший циклічний ресурс, який становить 500-600 циклів, та краще адаптовані для роботи в жорстких умовах регулярного щоденного циклування без необхідності частого сервісного втручання.

Практичний досвід впровадження сучасних автоматизованих систем керування зовнішнім освітленням в українських містах, зокрема у Києві та Білій Церкві, беззаперечно доводить їхню високу економічну та експлуатаційну

ефективність. Використання мікроконтролерів, технологій дистанційного керування та ШІМ-регулювання потужності світлодіодних ліхтарів дозволяє міським бюджетам заощаджувати від 40% до 80% енергоресурсів. Крім того, інтеграція гібридних установок із сонячними панелями додатково знижує споживання електроенергії від загальної зовнішньої мережі щонайменше на 25–35%. Таким чином, розроблення сучасної комп'ютерно-інтегрованої системи керування зовнішнім освітленням з живленням від сонячних панелей є вкрай актуальним інженерним завданням, виконання якого дозволить суттєво оптимізувати енерговитрати та обґрунтовує необхідність подальшого вибору апаратної платформи у наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБЛЕННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ПЛАТФОРМИ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗОВНІШНІМ ОСВІТЛЕННЯМ

2.1. Організація архітектури комп’ютерно-інтегрованого комплексу для автоматичного управління вуличним освітленням на базі відновлюваних джерел енергії

Детальна організація взаємодії компонентів розробленого комп’ютерно-інтегрованого комплексу, який забезпечує автоматичне управління мережею вуличного освітлення з використанням енергії з відновлюваних джерел, графічно відображена на рис. 2.1. Наведена конфігурація наочно демонструє інтеграцію засобів автоматизації зі спеціалізованим обладнанням для ефективного та раціонального розподілу енергетичних ресурсів в автономному режимі.

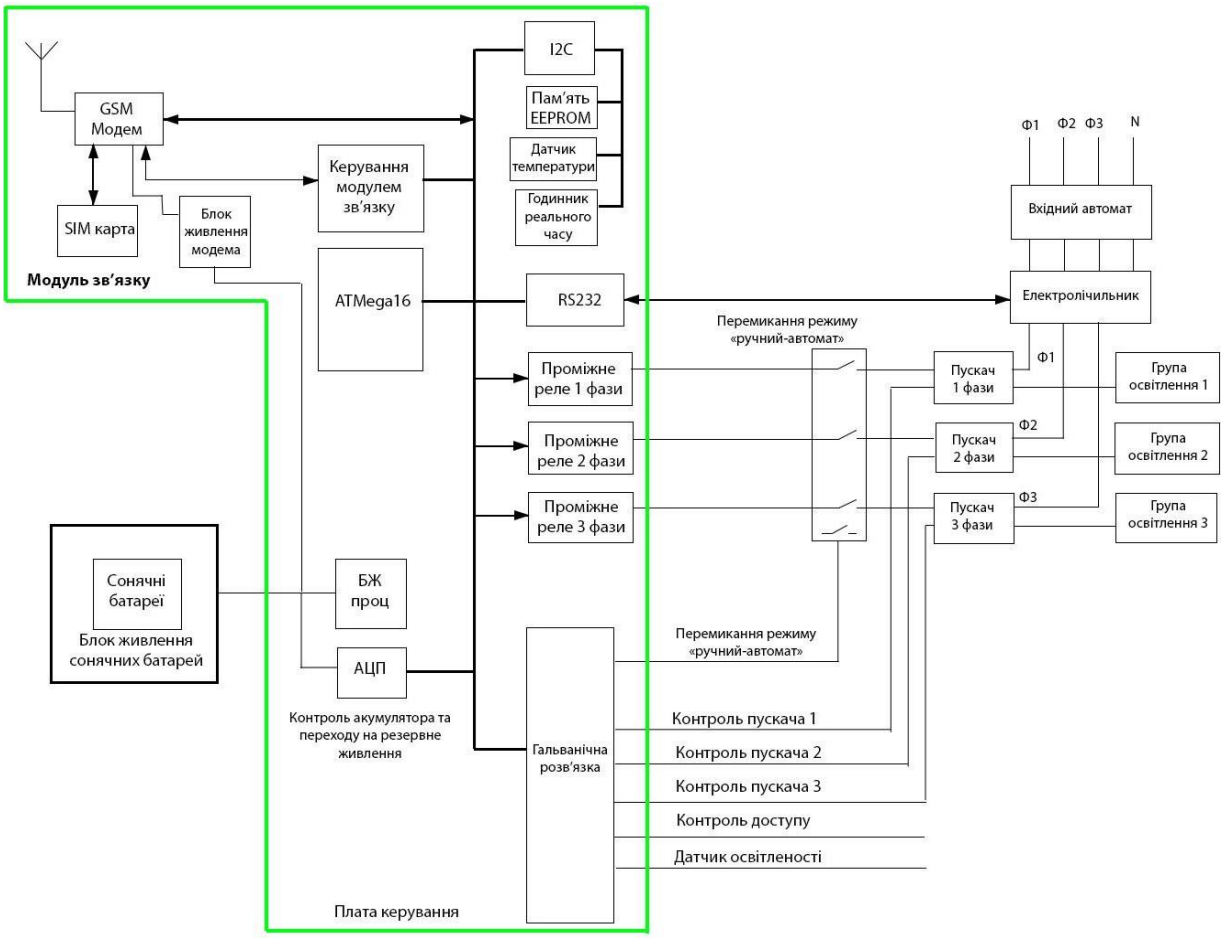


Рис. 2.1. Блок-схема взаємодії елементів комп’ютерно-інтегрованої платформи керування зовнішнім освітленням із підсистемою альтернативного електроживлення

Представлена апаратна конфігурація системи побудована з кількох ключових функціональних вузлів, які тісно взаємодіють між собою. Першим важливим елементом є комунікаційний модуль, який відповідає за дистанційну передачу даних та віддалений моніторинг. До його складу входять GSM-модем із встановленою SIM-картою, а також індивідуальний блок живлення, що гарантує стабільну та безперебійну роботу каналів зв'язку незалежно від навантаження на інші сегменти мережі.

Основним обчислювальним ядром даного комплексу виступає головна плата керування. Її апаратна архітектура реалізована на базі високопродуктивного мікроконтролера ATmega16A, який безпосередньо виконує обробку алгоритмів автоматичного контролю та збору даних. Для забезпечення надійної комунікації з різноманітними периферійними пристроями на платі інтегровано інтерфейсні шини I2C та стандартизований порт RS232. Крім того, модуль керування оснащений енергонезалежною пам'яттю EEPROM для безпечного збереження конфігураційних налаштувань у разі збоїв, вбудованим датчиком температури для моніторингу поточних кліматичних умов та модулем годинника реального часу (RTC), що є критично необхідним для чіткої реалізації часових сценаріїв увімкнення та вимкнення освітлення за заздалегідь визначеним розкладом.

Безпосередній керуючий вплив на виконавчі механізми здійснюється через три незалежні стартові лінії. Вони забезпечують комутацію навантаження, дозволяючи поетапно керувати відповідними групами освітлювальних приладів. Енергетична підсистема комплексу включає спеціалізований блок живлення сонячних панелей, який відповідає за прийом, перетворення та подальшу стабілізацію генерованої сонячної енергії для потреб усієї системи.

Для забезпечення максимального рівня надійності та тривалої автономності роботи комплексу передбачено інтелектуальну підсистему моніторингу стану акумуляторної батареї та автоматичного переходу на резервні джерела живлення. Цей критичний вузол реалізований із застосуванням аналого-цифрового перетворювача (АЦП) для точного вимірювання поточного рівня заряду батареї. Додатково застосовано елементи гальванічної розв'язки, що ефективно захищають

чутливу керуючу електроніку від потенційних перепадів напруги чи коротких замикань під час перемикання між основним та резервним режимами живлення.

2.2. Техніко-економічне обґрунтування вибору апаратної бази для комп'ютерно-інтегрованого комплексу управління вуличним освітленням із резервним живленням від відновлюваних джерел

2.2.1. Аналіз та вибір мікроконтролерного ядра

З метою визначення оптимального обчислювального пристрою для розроблюваної системи було проведено порівняльний аналіз найбільш популярних на сучасному ринку мікроконтролерів. Детальні технічні параметри розглянутих моделей систематизовано у табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Порівняльна характеристика технічних параметрів сучасних мікроконтролерів

Параметр	ATmega16A	ATtiny13A-SSU	PIC16F505I/SL
Програмне забезпечення	CodeVisionAVR	Energia	MPLAB IDE
Об'єм флеш-пам'яті (ROM, пам'ять програми), Kbyte	16	1	1
Об'єм оперативної пам'яті (RAM, пам'ять даних)	1 Kbyte	64 byte	72 byte
Тактова частота, МГц	16	20	20
Лінії вводу-виводу	32	6	12
АЦП	8-канальний 10-розрядний	4-канальний 10-розрядний	0
ЦАП	0	0	0
USART	1	0	0
SPI	1	1	0
I2C	1	0	0
Кількість таймерів	3	1	1
DMA	0	0	0

Здійснивши детальне порівняння, можна зробити висновок, що мікроконтролер ATmega16A архітектури AVR є найбільш оптимальним рішенням для поставленого завдання. Зовнішній вигляд обраного електронного компонента продемонстровано на рис. 2.2.



Рис. 2.2. Зовнішній вигляд мікроконтролера ATMega16A від виробника Atmel (тип корпусу Dip40)

Лінійка AVR є однією з найуспішніших та наймасовіших розробок компанії Atmel у сегменті флеш-мікроконтролерів. До ключових переваг цієї технологічної платформи належить суттєве зниження питомих витрат енергії (мА/МГц), а також здатність стабільно працювати в розширеному діапазоні напруг живлення (починаючи вже від 1,8 В). Це критично важливо для максимізації терміну автономної роботи систем, що живляться від акумуляторних батарей. Крім того, ці мікроконтролери здатні виконувати до 16 мільйонів операцій за одну секунду, підтримують апаратну емуляцію в режимі реального часу та функцію внутрішньосхемного самопрограмування. Варто відзначити також багату інтегровану периферію: вбудовані радіочастотні передавачі, контролери інтерфейсів USB та LCD-дисплеїв, програмовану логіку, DVD-контролери та надійні механізми захисту інформації.

Популярність та масове впровадження мікроконтролерів сімейства AVR значною мірою пояснюється наявністю потужної екосистеми інструментів для розробки. Широкий вибір різноманітних компіляторів, асемблерів, програматорів, адаптерів та налагоджувачів, які пропонуються як самою компанією Atmel, так і сторонніми розробниками, дозволяє суттєво пришвидшити процес проектування та успішно завершити розробку в найкоротші терміни. Вагомим фактором є також економічна доступність фірмових інструментальних засобів від Atmel.

Ще одним ключовим фактором успіху є використання вдосконаленої RISC-архітектури. Вона базується на оптимізованому та потужному наборі інструкцій, абсолютна більшість з яких виконується всього за один такт машинного генератора. Завдяки цій особливості продуктивність AVR-мікроконтролерів у

кілька разів (від 6 до 12) перевищує аналогічні показники класичних мікросхем на базі CISC-архітектури при їхній роботі на ідентичній тактовій частоті.

Таким чином, розробник отримує максимально гнучкий інструмент для балансування між високою швидкодією та енергозбереженням: для досягнення заданої продуктивності додатка контролер AVR може працювати на значно нижчій частоті (у 6-12 разів), споживаючи при цьому мінімум струму. Це робить їх безальтернативним вибором при створенні автономних пристроїв на акумуляторному живленні.

Технічний потенціал обраного контролера ATMega16 підтверджується його потужними характеристиками. Пристрій базується на енергоефективній AVR RISC-архітектурі, а його система команд містить 130 інструкцій (переважно однотактових) з єдиним 16-розрядним форматом. На частоті 16 МГц забезпечується продуктивність на рівні 16 MIPS, додатково наявний апаратний помножувач. Об'єм інтегрованої флеш-пам'яті (Flash ROM) для програм становить 16 Кбайт із гарантованим ресурсом до 1000 циклів стирання/запису, а обсяг енергонезалежної пам'яті даних EEPROM – 512 байт (ресурс до 100000 циклів). Внутрішня оперативна пам'ять (SRAM) складає 1 КБ. Пристрій підтримує пряме внутрішньосхемне програмування та налагодження по шинах SPI і JTAG (відповідно до стандарту IEEE 1149.1), а також функцію самопрограмування.

Система тактування контролера є дуже гнучкою: можливе використання вбудованого RC-генератора, зовнішнього RC-ланцюга, підключення кварцових чи п'єзокерамічних резонаторів, або ж використання зовнішнього тактового сигналу. Передбачено програмне зниження частоти генератора та наявність детектора падіння напруги (BOD). Для ефективного енергозбереження реалізовано шість режимів пониженого споживання струму (від класичного Idle до Extended Standby). Обробка подій здійснюється через багаторівневу систему з підтримкою черг для 21 джерела переривань. Надійний захист інтелектуальної власності гарантується наявністю незалежних бітів блокування для завантажувального сектора та захистом пам'яті від несанкціонованого зчитування. Периферійне оснащення є надзвичайно багатим і включає: два 8-розрядних і один 16-розрядний таймери-лічильники (із подільниками та режимами порівняння), сторожовий

таймер (WDT), чотири незалежні канали генерації ШІМ, аналоговий компаратор та високоточний 8-канальний 10-розрядний АЦП з підтримкою диференціальних та несиметричних входів. Для комунікації використовуються повнодуплексний модуль USART, послідовний синхронний порт SPI (який також слугує для прошивки) та двопровідний інтерфейс TWI (апаратний аналог I2C), що здатен працювати при напрузі живлення від 2,7 до 5,5 В.

2.2.2. Вибір приладу обліку електроенергії (лічильника)

Для ведення точного обліку енергоресурсів передбачено застосування сучасного багатофункціонального лічильника. Згідно з технічними характеристиками, даний пристрій забезпечує високоточне вимірювання як активної, так і реактивної енергії у двох напрямках (прямому та зворотному). Крім того, він зчитує миттєві показники електричної мережі, зокрема фазні струми, робочі напруги, споживану потужність та косинус «фі». Робочі параметри приладу розраховані на номінальну та максимальну силу струму 5(7,5) А при підключенні до трифазної мережі з напругою 3x220/380 В. Прилад відзначається високим класом вимірювальної точності: 0,2S для активної складової та 1,0 для реактивної.

Функціонал лічильника дозволяє вести облік за кількома тарифними зонами (від 1 до 4) і стабільно функціонувати у жорстких температурних умовах від -25 ºС до +55 ºС. Для віддаленої передачі даних пристрій обладнано виходом телеметрії (з постійною лічильника 16000 імп/кВт·год), цифровим інтерфейсом RS-232 та оптичним портом зчитування. Візуальний контроль здійснюється через вбудований LCD-дисплей, на який можна вивести до 58 різних параметрів, використовуючи спеціальний пульт дистанційного керування. Пристрій має потужну незалежну пам'ять для ведення архівів. Він фіксує накопичену енергію з 15-хвилинною дискретністю (до 96 записів на добу протягом 45 діб), зберігає щоденні зрізи та покази на кінець доби за останні 45 днів, а також формує щомісячні звіти глибиною до 24 місяців. Фіксуються і показники максимальної спожитої потужності (подобово за 45 діб та помісячно за 2 роки). Інтегрований електронний журнал подій надзвичайно детальний: він реєструє по 64 записи для кожної з критичних подій, серед яких коливання фазної напруги, факти вмикання

або вимикання живлення (із точною позначкою часу), будь-які коригування внутрішнього годинника, зміни системної конфігурації та спроби несанкціонованого доступу з використанням хибного пароля. Фізичні габарити пристрою становлять 290x175x70 мм при монтажних розмірах 248x149 мм.

2.2.3. Вибір модульного блоку живлення

Для організації стабільного живлення електронних вузлів обрано надійний перетворювач напруги AC/DC моделі DR-30-12 від всесвітньо відомого бренду Mean Well. Даний блок має вихідну потужність 30 Вт та призначений для швидкого монтажу на стандартну промислову DIN-рейку. Зовнішній вигляд пристрою наведено на рис. 2.3.



Рис. 2.3. Зовнішній вигляд модульного джерела живлення Mean Well серії DR-30-12

Аналізуючи технічні параметри перетворювача, варто виділити наявність одного вихідного каналу, який формує стабілізовану напругу 12 В при максимальному навантаженні струмом до 2 А. Розробник має можливість ручного механічного регулювання номіналу вихідної напруги в межах ±10%. Пристрій вирізняється високим показником ККД (на рівні 81%) та вкрай низьким рівнем пульсацій (розмах не перевищує 120 мВ). Гарантовано високу електричну міцність ізоляційних бар'єрів: до 3000 В змінного струму між вхідним і вихідним каскадами, та до 1500 В AC між входом і контуром заземлення. Джерело підключається до однофазної мережі і зберігає працездатність у широкому діапазоні вхідних напруг: від 85 до 264 В для змінного струму (при номіналі 230 В) та від 120 до 370 В для постійного. Відмінну надійність блоку живлення забезпечує вбудований апаратний комплекс захисту, який миттєво реагує на короткі замикання, перевантаження лінії та виникнення перенапруги.

2.2.4. Вибір автоматичного трифазного вимикача

Для комплексного захисту електричних кіл розробленої системи від струмових перевантажень, витоків струму на землю та коротких замикань передбачено застосування автоматичних вимикачів мініатюрної серії HiBS 103j виробництва компанії HYUNDAI (їхня конструкція відображена на рис. 2.4). Ці комутаційні апарати є універсальним рішенням для промислових і побутових установок, дозволяючи оперативно керувати увімкненням ліній у мережах змінного та постійного струму з робочою напругою аж до 500 В.



Рис. 2.4. Захисні автоматичні вимикачі HYUNDAI серії HiBS 103j

Принцип спрацьовування таких автоматів базується на комбінації теплового та електромагнітного розчеплювачів. У разі виникнення перевантаження в захищеному контурі починає протікати надмірний струм, який повільно нагріває біметалеву пластину. Внаслідок деформації від нагрівання пластина згинається і фізично штовхає важіль вільного розчеплення. При цьому час спрацьовування є обернено пропорційним силі струму: чим він більший, тим швидше відбудеться відключення. У випадку виникнення короткого замикання (КЗ) струм зростає миттєво і багаторазово. Це призводить до різкого посилення магнітного поля електромагнітної котушки, яке втягує внутрішнє осердя, б'ючи по важелю розчеплення. В обох сценаріях рухомий контакт стрімко відривається від нерухомого, розриваючи електричне коло та рятуючи обладнання від руйнування. Надійна механіка вільного розчеплення гарантує розрив ланцюга навіть тоді, коли ручка управління примусово утримується користувачем у включеній позиції.

Для зручності експлуатації вимикач обладнано візуальним індикатором поточного стану: червоний колір покажчика відповідає включеному режиму, а зелений – відключеному. Споріднені автомати серій HiBD63 та HiBD125 розраховані на універсальну роботу як у мережах змінного струму (50/60 Гц), так

і в колах постійного струму, маючи номінальну напругу ізоляції на рівні 500 В АС. Пристрої відзначаються високою відключаючою здатністю: вони здатні успішно розривати струми КЗ силою 6 і 10 кА в ланцюгах змінного струму 400/460 В, а також 10 і 15 кА в ланцюгах постійного струму 110 В.

2.2.5. Вибір вимірювального трансформатора струму

Для пропорційного та безпечного зниження рівня вимірюваного струму в силових лініях змінного струму частотою 50 Гц застосовуватимуться спеціалізовані трансформатори струму з номіналами 100/5 та 150/5. Вони передають слабкострумовий сигнал безпосередньо на вимірювальну апаратуру. Трансформатори серії Т-0-66 характеризуються кількома базовими параметрами: максимальним рівнем струму в первинній обмотці, коефіцієнтом трансформації (співвідношенням струмів між первинною та вторинною обмотками) та класом точності, який визначає максимально допустиму відносну похибку перетворення. За способом монтажу вони поділяються на котушкові (кріпляться гвинтовими з'єднаннями до кабелю чи шини) та шинні (встановлюються безпосередньо на поверхню струмопровідної шини).

Згідно з технічними характеристиками, обраний тип трансформатора є шинним вимірювальним приладом (із вбудованою шиною), оснащений однією вторинною обмоткою та має фіксований коефіцієнт трансформації. Прилад розрахований на довгостроковий безперервний режим роботи і не має обмежень щодо просторового положення при монтажі. Клас точності приладу становить 0,5. Він працює в мережах з номінальною напругою 0,66 кВ та стандартною частотою 50 Гц. Номінальний струм первинної обмотки може варіюватися в дуже широких межах (20, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1500 або 2000 А залежно від моделі), тоді як вторинний струм завжди дорівнює 5 А. Номінальне навантаження вторинного кола при $\cos \varphi = 0,8$ складає 5 ВА. Високий рівень надійності підтверджується жорсткими тестовими випробуваннями ізоляції (по 3 кВ для первинної та вторинної обмоток). Опір ізоляційних матеріалів становить щонайменше 40 МОм для первинної обмотки (виміряно при напрузі 2500 В) та 20 МОм для вторинної (при напрузі 1000 В).

2.2.6. Вибір однополюсного вимикача (магнітного пускача)

Безпосередня комутація потужних споживачів електроенергії (переважно запуск, зупинка та реверсування електродвигунів в шафах автоматики) здійснюється за допомогою магнітних контакторів. Для нашої системи обрано пускачі моделі IMC40 на 40 А виробництва компанії HYUNDAI. Ці пристрої оптимізовані для важких режимів роботи категорій AC1 та AC3. Базові версії контакторів (зокрема вітчизняного типу ПМЛ) можуть постачатися як у повністю зібраному вигляді, так і доукомплектовуватися різноманітними додатковими контактними блоками відповідно до потреб розробника. Алгоритм вибору правильного стартера вимагає врахування напруги живлення мережі, паспортної потужності підключеного електродвигуна, очікуваного режиму роботи приводу та вимог до комутаційної зносостійкості контактів (рекомендації зведені у табл. 2.2).

Таблиця 2.2. Рекомендації щодо вибору магнітного пускача залежно від параметрів електродвигуна та мережі

Величина стартера	Номінальна напруга	Номінальний струм AC3	Потужність двигуна при AC3, кВт·год
-	660 В	380	4,5
-	-	10	5,5
-	-	16	7,5
-	-	25	11
-	-	40	18,5
-	-	63	30
-	-	80	37

2.2.7. Вибір датчика температури

Моніторинг температурних режимів покладено на універсальний поверхневий датчик серії ESMB від виробника Danfoss. Цей прецизійний прилад розроблений спеціально для зручного монтажу на труби або пласкі поверхні. В основі його конструкції лежить надійний платиновий термометр опору, який характеризується еталонним значенням опору рівно 1000 Ом при температурі 0 °C. Підключення датчика Danfoss ESMB до вимірювальних кіл здійснюється за класичною двопровідною симетричною схемою. Більш детальна технічна специфікація цього компонента зведена у табл. 2.3.

Таблиця 2.3. Робочі параметри накладного датчика температури Danfoss ESMB

Параметр	Значення
Діапазон температур, °C	від 0 до +100 °C
Корпус	Оболонка: 18/8, нержавіюча сталь. Кабель: PVC, 2 × 0,2 мм^2, l = 2,5 м
Постійний час	20 сек.
Клас захисту	IP 54

2.2.8. Вибір датчика освітленості (фотореле)

Для автоматичного керування масивами світильників залежно від рівня природного освітлення застосовується спеціалізоване фотореле LXP-03 (також відоме як SEN27). Даний пристрій функціонує за принципом «день-ніч» і розрахований на безпосереднє комутування навантажень значної потужності. Важливою перевагою сенсора є повна незалежність його точності спрацьовування від коливань температури навколишнього середовища чи рівня вологості повітря. Модель відрізняється простотою монтажу (у заводський комплект входить зручний кронштейн), високою чутливістю з можливістю її регулювання, а також практичністю, енергоефективністю та абсолютною безпекою в експлуатації.

Особливістю фотореле SEN27 (LXP-03) є наявність посиленої контактної групи в конструкції вихідного реле. Це дозволяє йому безперебійно керувати не лише звичайними лампами розжарювання, але й потужними газорозрядними джерелами світла (такими як ДРЛ, ДНаТ або металогалогенні світильники). У момент увімкнення та вимкнення подібних приладів виникає значне іскроутворення та сильні пускові струми. Слабострумові контакти дешевих моделей (наприклад, LXP-01 чи LXP-02) швидко зношуються і виходять з ладу в таких умовах, тоді як SEN27 гарантує тривалу і надійну роботу. Пристрій здатен витримувати максимальний струм навантаження до 25 А, що еквівалентно сумарній потужності керованих ламп розжарювання до 5500 Вт.

2.2.9. Вибір модуля годинника реального часу (RTC)

Чітка реалізація часових алгоритмів керування забезпечується за рахунок впровадження календарного таймера (датчика реального часу). Його основне завдання полягає у відправці команд на автоматичне вмикання або вимикання виконавчих пристроїв у строго визначені моменти часу. Дане рішення є універсальним і широко застосовується не лише в системах муніципального освітлення, але й для автоматизації складних технологічних процесів у сільському господарстві (управління мікрокліматом в інкубаторах та теплицях), де графік роботи обладнання жорстко прив'язаний до часу доби чи календарної дати.

Цей модуль має ряд суттєвих переваг: він характеризується високими показниками електромагнітної сумісності, має розширене кліматичне виконання (гарантується працездатність у діапазоні температур від -20 до +50 °C) та має вбудовану функцію автоматичного коригування часу при переході на зимовий чи літній сезон. Функціональні можливості пристрою вражають своєю гнучкістю. Він дозволяє скласти дві абсолютно незалежні програми керування для кожного з двох вихідних реле (по 70 командних пар на кожну лінію). Інтервал виконання кожної команди можна індивідуально налаштувати за щоденним, щотижневим або щорічним графіком (цикли виконуються в порядку зменшення їхнього пріоритету). Унікальною опцією є можливість астрономічної корекції часу спрацьовування з огляду на місцевий час сходу та заходу сонця, що вираховується на основі географічної широти об'єкта. Крім того, передбачена можливість підключення зовнішніх датчиків для примусового апаратного блокування команд. Зручне налаштування дати і часу здійснюється за допомогою кнопок та інформативного дисплея на передній панелі. Усі введені користувачем налаштування надійно захищені від несанкціонованого втручання та гарантовано зберігаються в незалежній пам'яті навіть у разі повного знеструмлення пристрою.

2.2.10. Вибір фотоелектричного модуля (сонячної панелі)

Для генерації екологічно чистої енергії в системі використано сонячну батарею виробництва компанії Naps — модель NP200GK потужністю 200 Вт. Зовнішній вигляд даної конструкції продемонстровано на рис. 2.5.



Рис. 2.5. Сонячна панель полікристалічного типу Naps серії NP200GK

Модуль базується на полікристалічній кремнієвій технології і складається з 54 продуктивних комірок. При підключенні до системи з номінальною напругою 12 В він здатен генерувати пікову потужність 200 Вт (з допустимим відхиленням +3%/-0). Робочі параметри панелі в оптимальних умовах становлять: напруга – 26,2 В, струм – 7,63 А. Механічна надійність фотоелектричного перетворювача забезпечується використанням міцної алюмінієвої рами та верхнього покриття зі спеціального загартованого скла товщиною 4 мм. Дана конструкція гарантує максимальний рівень захисту від найсуворіших погодних та атмосферних впливів навколишнього середовища. Фізичні розміри однієї панелі становлять 1475 мм у довжину, 986 мм у ширину при товщині профілю 35 мм. Вага конструкції дорівнює 19,5 кг. Пристрій розрахований на безперебійну експлуатацію в широкому температурному коридорі від -40 до +50 °С. Висока надійність технології підтверджується 25-річною гарантією якості від виробника.

2.2.11. Вибір акумуляторних батарей

Збереження згенерованої сонячної енергії для роботи в темну пору доби покладено на свинцево-кислотні акумулятори гелевого типу. На основі проведеного аналізу найкращим рішенням для даного завдання визнано батареї серії GX від бренду DELTA. Використання гелевого електроліту робить їх ідеальними компонентами для резервних та автономних енергосистем, оскільки вони демонструють виняткову стійкість до руйнівних глибоких розрядів та відмінно працюють за низьких температур навколишнього середовища.

Кожна акумуляторна збірка складається з шести внутрішніх елементів, які генерують номінальну напругу 12 В. Паспортна ємність батареї при кімнатній температурі (25 °C) становить 150 Аг, при цьому внутрішній опір повністю зарядженого акумулятора є вкрай низьким і дорівнює лише 3,8 мОм. Пристрій характеризується мінімальним струмом саморозряду, втрачаючи не більше 3% своєї ємності за місяць простою при температурі 20 °C. Акумулятор може безпечно розряджатися в температурному діапазоні від -20 до +60 °C та приймати заряд за температур від -10 до +60 °C. Максимальний струм розряду, який батарея здатна витримати протягом 5 секунд (при 25 °C), становить 1000 А. Габаритні розміри міцного корпусу складають 482x170x240 мм, а загальна вага батареї досягає 47 кг.

2.2.12. Вибір силового інвертора

Завершальним вузлом апаратної платформи є електронний перетворювач напруги (інвертор). Його головна функція полягає в трансформації постійного струму низької напруги (5, 12 або 24 В, що надходить від акумуляторів) у класичну змінну напругу стандарту 220 В. Обрана модель розрахована на роботу з вхідною напругою в діапазоні від 11 до 15 В постійного струму і генерує на виході стабільні 220 В змінного струму з частотою 50 Гц. Апарат здатен довгостроково підтримувати вихідну потужність на рівні 1000 Вт, при цьому його компоненти витримують короткочасні пікові навантаження до 2000 Вт.

Для зручності користувача на корпусі розміщено світлодіодну індикацію: робочий режим підсвічується зеленим кольором, а активація вбудованих захисних механізмів супроводжується червоним світінням. Безпека експлуатації комплексу гарантується багаторівневою системою захисту. Інвертор автоматично розмикає коло при виникненні короткого замикання, струмового перевантаження або теплового перегріву внутрішніх компонентів. Крім того, пристрій суворо контролює стан живлячої батареї: він відключається при небезпечному зниженні вхідної напруги до позначки 10-10,5 В (для захисту від глибокого розряду) або при перенапрузі акумулятора на рівні 15-16 В. Цей потужний пристрій зібрано у надзвичайно компактному корпусі з габаритами 60x115x35 мм, а його вага становить лише 775 грамів.

Висновки до розділу 2

У другому розділі здійснено розроблення структури та детальне техніко-економічне обґрунтування вибору апаратної бази для комп'ютерно-інтегрованої системи автоматизованого керування зовнішнім освітленням з підсистемою альтернативного живлення. В межах цього завдання було сформовано структурну схему комплексу, яка об'єднує комунікаційний модуль для віддаленого моніторингу (GSM-модем), головну плату керування, виконавчі стартові лінії для поетапної комутації освітлення та автономний блок живлення від сонячних панелей.

Оптимальним обчислювальним пристроєм для управління системою визначено мікроконтролер ATmega16A. Завдяки архітектурі AVR RISC він забезпечує необхідний баланс між високою швидкодією (до 16 MIPS) та мінімальним енергоспоживанням, що є критичним критерієм для автономних систем, які працюють на акумуляторному живленні. Крім того, наявність багатого набору вбудованих інтерфейсів (I2C, SPI, USART, АЦП та ШІМ) дозволяє безперешкодно інтегрувати всі необхідні датчики та периферійне обладнання для повноцінного функціонування комплексу.

Особливу увагу приділено обґрунтуванню енергетичної підсистеми. Для генерації екологічно чистої енергії обрано полікристалічну сонячну панель Naps NP200GK потужністю 200 Вт. Накопичення цієї енергії реалізовано на базі свинцево-кислотних гелевих акумуляторів DELTA серії GX ємністю 150 Аг, що відзначаються високою стійкістю до глибоких розрядів та значних температурних коливань. Для безпечного перетворення постійного струму в стандартну змінну напругу 220 В застосовано силовий інвертор з номінальною потужністю 1000 Вт, який має вбудований захист від глибокого розряду акумуляторної батареї.

Ефективний захист силових кіл від струмів короткого замикання та небезпечних перевантажень гарантують автоматичні вимикачі HYUNDAI серії HiBS 103j. Водночас безпосередня комутація навантажень, зокрема освітлювальних приладів, здійснюється за допомогою надійних магнітних пускачів HYUNDAI IMC40. Для забезпечення стабільного живлення чутливої керуючої електроніки обрано компактний модульний блок живлення Mean Well

DR-30-12, що зручно монтується на стандартну DIN-рейку.

Комплексний контроль за станом навколишнього середовища та роботою системи забезпечується спеціалізованою низкою вимірювальних приладів. Точний моніторинг кліматичних умов здійснюється прецизійним платиновим датчиком температури Danfoss ESMB, а керування мережею за рівнем природного світла покладено на потужне фотореле LXP-03 (SEN27), контактна група якого здатна витримувати великі пускові струми від потужних світильників. Автоматизація роботи системи за заданим розкладом реалізується завдяки модулю годинника реального часу, який підтримує корисну функцію астрономічної корекції часу вмикання освітлення залежно від географічної широти та поточного моменту заходу сонця. Нарешті, для ведення точного обліку спожитої електроенергії передбачено багатотарифний лічильник з інтерфейсом RS-232 та розширеною функцією архівації журналу подій.

РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗОВНІШНІМ ОСВІТЛЕННЯМ

3.1. Обґрунтування вибору інструментального програмного забезпечення

Розробка будь-якого сучасного автономного електронного пристрою є неможливою без етапу програмування мікроконтролерів (МК), який виступає ключовою складовою проектування. На сьогоднішній день у сфері розробки вбудованої електроніки домінуючі позиції займають такі мікроконтролерні архітектури, як PIC, AVR, STM, а також процесори на базі ядра ARM. Важливою особливістю є те, що для кожної з перелічених родин створюються вузькоспеціалізовані інтегровані середовища розробки (IDE). Така диференціація зумовлена глибокими відмінностями у внутрішній апаратній архітектурі чипів, а також специфічними протоколами, які використовуються для запису скомпільованої програми безпосередньо у незалежну пам'ять мікроконтролера.

Одним із цікавих рішень на ринку є FlowCode — універсальне графічне середовище розробки, орієнтоване на візуальне програмування мікроконтролерів. Процес створення програмного коду тут реалізується шляхом конструювання логічної структури за допомогою графічних блок-схем, що концептуально нагадує принципи роботи в середовищі HiAsm. Значною перевагою FlowCode є вбудована функція крос-компіляції, яка надає розробнику можливість легко експортувати готовий проект, написаний для платформи PIC, у формат, зрозумілий для мікроконтролерів сімейства AVR, і в зворотному напрямку. Кінцевим результатом компіляції у цій програмі є генерація стандартного HEX-файлу. Цей файл може бути безпосередньо використаний для фізичної прошивки кристала або ж завантажений у віртуальну модель пристрою для апаратної симуляції у спеціалізованих САПР, таких як Proteus.

Серед фахівців, які працюють з архітектурою AVR, особливою популярністю користується середовище CodeVisionAVR. Цей програмний продукт є потужним інструментом, що органічно поєднує в собі компілятор мови високого рівня (із С-

подібним синтаксисом) та можливість використання низькорівневих асемблерних вставок. Широкий функціонал програми дозволяє не лише писати код, але й здійснювати пряму прошивку мікроконтролера, конфігурувати fuse-біти та керувати пам'яттю ROM безпосередньо з інтерфейсу. Після успішної компіляції проекту середовище формує вихідні файли у форматах HEX, BIN або ROM, які слугують базою для перенесення мікрокоду на фізичний чип за допомогою апаратного програматора.

Професійне середовище розробки IAR Systems пропонує потужний інструментарій для програмування мікроконтролерів AVR та лінійки MSP430, проте варто зауважити, що підтримка цих платформ не інтегрована в єдину оболонку — для кожної архітектури постачається окрема версія програми. Схожий підхід реалізовано і в середовищі Image Craft (ICC). Цей компілятор також оперує С-подібним синтаксисом та підтримує асемблерні інструкції. Як IAR Systems, так і Image Craft постачаються з багатим набором цільових бібліотек, які суттєво спрощують взаємодію з різноманітними апаратними вузлами мікроконтролерів. Окремої уваги заслуговує наявність в ICC спеціальної утиліти для автоматичної генерації стартового коду та швидкої ініціалізації периферії, а також вбудованого модуля ANSI Terminal Emulator, який забезпечує зручну взаємодію та зневадження через послідовний COM-порт.

Для роботи з мікроконтролерами MSP430 часто використовується середовище Energia, яке здобуло значну популярність, особливо серед початківців. Воно використовує спрощену С-подібну мову програмування, синтаксис якої є більш інтуїтивно зрозумілим і наближеним до звичайної англійської мови. Energia має потужну підтримку додаткових бібліотек та містить готові драйвери для взаємодії з апаратними платформами LaunchPad MSP430, побудованими на архітектурі ARM Cortex, а також платами FraunchPad та lm4f120 StallerPad. По суті, дане програмне забезпечення є глибоко модифікованим форком Arduino IDE. Воно оптимізоване для роботи з мікроконтролерами MSP430 на частотах 1 та 16 МГц, а також з потужнішими 80-мегагерцовими чипами lm4f120. Для зручності розробки в середовище також інтегровано інструмент для перегляду даних COM-порту.

Ще одним інструментом є Virtual breadboard — комплексне середовище розробки, яке дозволяє не лише писати код, але й візуально проектувати електричні схеми. Воно орієнтоване переважно на роботу з платформою Arduino під управлінням мікроконтролерів ATMEL AVR. Під час аналізу розглядалася версія 4.2.9, яка також містить модулі для розробки програмного забезпечення під мікроконтролери сімейства PIC. Синтаксис написання коду тут дуже нагадує той, що використовується в середовищах Energia та Arduino IDE. Це програмне забезпечення поширюється на комерційній основі (є платним), проте воно пропонує багату внутрішню базу готових прикладів та функціональних моделей електронних компонентів, на основі яких проектується майбутній пристрій [16].

За результатами всебічного аналізу розглянутих програмних платформ було зроблено висновок, що за сукупністю критеріїв та технічних характеристик найбільш оптимальним вибором для реалізації поставленого завдання є середовище CodeVisionAVR. Цей продукт є повноцінним інтегрованим середовищем розробки програмного забезпечення, спеціально створеним для мікроконтролерів сімейства Atmel AVR. Комплекс CodeVisionAVR включає в себе наступні функціональні компоненти:

- високоефективний компілятор С-подібної мови, спеціально адаптований для архітектури AVR;
- вбудований компілятор мови низького рівня (асемблер) для оптимізації специфічних завдань;
- інтелектуальний генератор початкового коду (CodeWizardAVR), який дозволяє в автоматичному режимі ініціалізувати периферійні пристрої;
- спеціалізований модуль для безпосередньої взаємодії з апаратною налагоджувальною платою STK-500;
- інтегрований модуль для роботи з програматором;
- зручний текстовий редактор вихідного коду, оснащений функцією підсвічування синтаксису;
- вбудований інтерфейсний термінал для обміну даними.

В результаті компіляції проекту середовище CodeVisionAVR формує низку вихідних файлів:

- файли з розширеннями HEX, BIN або ROM, які містять безпосередньо машинний код і призначені для завантаження в пам'ять мікроконтролера через програматор;
- файл формату COFF, у якому зберігається необхідна інформація для роботи програмного налагоджувача;
- файл типу OBJ, який використовується для зберігання проміжного скомпільованого об'єктного коду [14].

Для здійснення ретельного програмно-апаратного налагодження та симуляції коду, написаного в середовищі CodeVisionAVR, застосовується потужний програмний комплекс Proteus. Цей пакет є передовою системою наскрізного схемотехнічного моделювання, в основі якої лежать точні математичні моделі електронних компонентів, розроблені за стандартами PSpice. Ключовою та унікальною особливістю платформи PROTEUS VSM є її здатність до повноцінного симулювання логіки роботи складних програмованих пристроїв, включаючи мікроконтролери, мікропроцесори та цифрові сигнальні процесори (DSP). Вбудована бібліотека компонентів містить гігантський обсяг довідкових даних. Крім того, пакет PROTEUS VSM пропонує інструменти для трасування друкованих плат. Структурно пакет Proteus поділяється на дві тісно інтегровані підпрограми: ISIS, яка відповідає за синтез та безпосереднє моделювання роботи електронних схем, та ARES — спеціалізовану програму для розробки топології друкованих плат.

Надзвичайно корисною функцією модуля ARES є можливість побудови високодеталізованої 3D-моделі розробленої друкованої плати. Це дає розробнику можливість візуально оцінити ергономіку та правильність розміщення компонентів майбутнього пристрою ще на етапі раннього проектування. Для безпосереднього ж моделювання логіки роботи вибраних мікроконтролерів застосовується підпрограма схемотехнічного моделювання ISIS.

3.2. Проектування та розробка програмного забезпечення для керуючого мікроконтролера

Процес створення мікрокоду для мікроконтролера ATMega16A реалізується

за допомогою потужного інтегрованого середовища розробки CodeVisionAVR. Цей програмний комплекс є спеціалізованим інструментом, орієнтованим виключно на сімейство чипів AVR, і органічно поєднує в собі високопродуктивний компілятор мови С, інтуїтивно зрозумілу графічну оболонку, модуль автоматичної генерації стартового коду (CodeWizard) та вбудовану утиліту для прошивки кристала. Окрім стандартного набору функцій мови С та розгалуженої довідкової бази, дане середовище пропонує розробнику багатий арсенал готових бібліотек, які суттєво спрощують організацію взаємодії мікроконтролера з різноманітною периферією. Зокрема, це стосується керування рідкокристалічними індикаторами з інтегрованими контролерами, зчитування даних із цифрових датчиків температури, синхронізації з мікросхемами годинника реального часу (RTC), запису даних до енергонезалежної пам'яті EEPROM та обміну інформацією по шині SPI.

Фундаментальним етапом, що передує написанню основної логіки програми, є ініціалізація та підключення необхідних системних та периферійних бібліотек. До базового набору, разом зі стандартними бібліотеками мови С, входять такі специфічні файли як mega16.h, i2c.h, 1wire.h та ds1307.h (див. рис. 3.1).

```
#include <mega16.h>

#include <delay.h>

// I2C Bus functions
#include <i2c.h>

// DS1307 Real Time Clock functions
#include <ds1307.h>
#include <string.h>
// 1 Wire Bus interface functions
#include <1wire.h>

// Alphanumeric LCD functions
#include <alcd.h>
#include <stdio.h>
#include <ds18b20.h>
```

Рис. 3.1. Програмний код ініціалізації та підключення системних бібліотек

Кожна з підключених бібліотек виконує чітко визначену роль в архітектурі програмного забезпечення. Заголовний файл <mega16.h> є критично важливим, оскільки він містить детальний опис усіх апаратних регістрів мікроконтролера ATmega16, забезпечуючи компілятор необхідною інформацією про їхні точні фізичні адреси в просторі пам'яті чипа (див. рис. 3.2). Модуль <i2c.h> надає набір функцій для організації двопровідної послідовної шини даних, що дозволяє

мікроконтролеру взаємодіяти з іншими інтегральними схемами через лінію даних (SDA) та лінію тактування (SCL). Для забезпечення роботи з часовими розкладами підключається бібліотека <ds1307.h>, яка керує зовнішнім модулем годинника реального часу. Організація низькошвидкісного обміну даними з периферійними пристроями по одному сигнальному проводу (де лінія даних також виконує функцію живлення) реалізується через бібліотеку <1wire.h>. Крім того, для забезпечення візуалізації даних додається <alcd.h>, що відповідає за роботу з символьним LCD-екраном, а температурний моніторинг забезпечується функціями з файлу <ds18b20.h>, розробленого спеціально для популярних цифрових термометрів від Dallas Semiconductor.

```
// CodeVisionAVR V2.0 C Compiler
// (C) 1998-2009 Pavel Haiduc, HP InfoTech S.R.L.

// I/O registers definitions for the ATmega16

#ifndef _MEGA16_INCLUDED_
#define _MEGA16_INCLUDED_

#pragma used+
sfrb TWBR=0;
sfrb TWSR=1;
sfrb TWAR=2;
sfrb TWDR=3;
sfrb ADCL=4;
sfrb ADCH=5;
sfrw ADCW=4;      // 16 bit access
sfrb ADCSRA=6;
sfrb ADMUX=7;
sfrb ACSR=8;
sfrb UBRRL=9;
sfrb UCSRB=0xa;
sfrb UCSRA=0xb;
sfrb UDR=0xc;
sfrb SPCR=0xd;
sfrb SPSR=0xe;
sfrb SPDR=0xf;
sfrb PIND=0x10;
sfrb DDRD=0x11;
sfrb PORTD=0x12;
sfrb PINC=0x13;
sfrb DDRC=0x14;
sfrb PORTC=0x15;
sfrb PINB=0x16;
sfrb DDRB=0x17;
```

Рис. 3.2. Внутрішня структура та вміст заголовного файлу < mega16.h >

Для підвищення читабельності коду та зручності його подальшого масштабування широко застосовується препроцесорна директива #define. Вона дозволяє жорстко прив'язати певний символьний ідентифікатор (ім'я макросу) до конкретної числової константи або послідовності символів. Під час компіляції програми препроцесор автоматично здійснює макропідстановку, замінюючи всі знайдені ідентифікатори на відповідні їм значення безпосередньо у вихідному файлі. Наочні приклади оголошення макросів за допомогою цієї директиви в рамках розроблюваного проекту продемонстровано на рис. 3.3.

```
#define P1 PORTC.5
#define P2 PORTC.6
#define P3 PORTC.7

#define PRG PINC.3
#define CLOSE PIND.3

#define HOT PORTC.4
#define LOCK PORTD.2
```

Рис. 3.3. Приклад застосування макросів та директиви #define у коді

Однією з важливих функцій мікроконтролера в даній системі є забезпечення контролю доступу (наприклад, до антивандальної шафи керування освітленням). Програмний алгоритм передбачає процедуру сканування та перевірки унікального серійного номера електронного ключа, порівнюючи його з базою даних, що зберігається в енергонезалежній пам'яті. Якщо лігітимного ідентифікатора в пам'яті не виявлено, система генерує сигнал на блокування і спрацьовує автоматичний електромагнітний замок дверей. У випадку успішної верифікації та збігу номера ключа з еталонним, мікроконтролер подає команду на розблокування замка, дозволяючи фізичний доступ до обладнання (див. рис. 3.5).

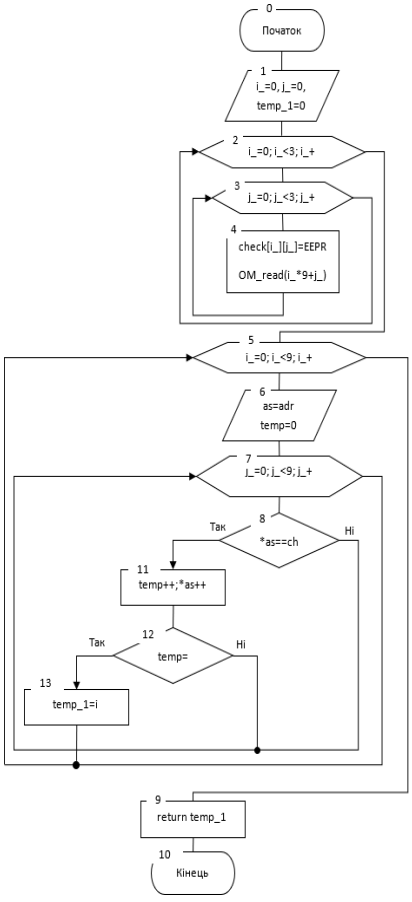


Рис. 3.4. Алгоритмічна блок-схема підпрограми ідентифікації та перевірки електронного ключа

Процедура адміністрування бази ключів також має строгий алгоритм. Програма циклічно перевіряє вміст спеціальної комірки пам'яті, яка виконує роль вказівника і зберігає поточну позицію для запису нового ідентифікатора. Оскільки система розрахована на зберігання обмеженої кількості ключів (до трьох записів), програмний ліміт встановлено на рівні значення 0x02. Якщо лічильник позиції перевищує цю межу, алгоритм примусово обнуляє його, запобігаючи переповненню пам'яті. Зчитане значення позиції тимчасово фіксується у внутрішній змінній, після чого новий код ключа безпечно записується у відповідний сектор енергонезалежної пам'яті мікроконтролера (див. рис. 3.5).

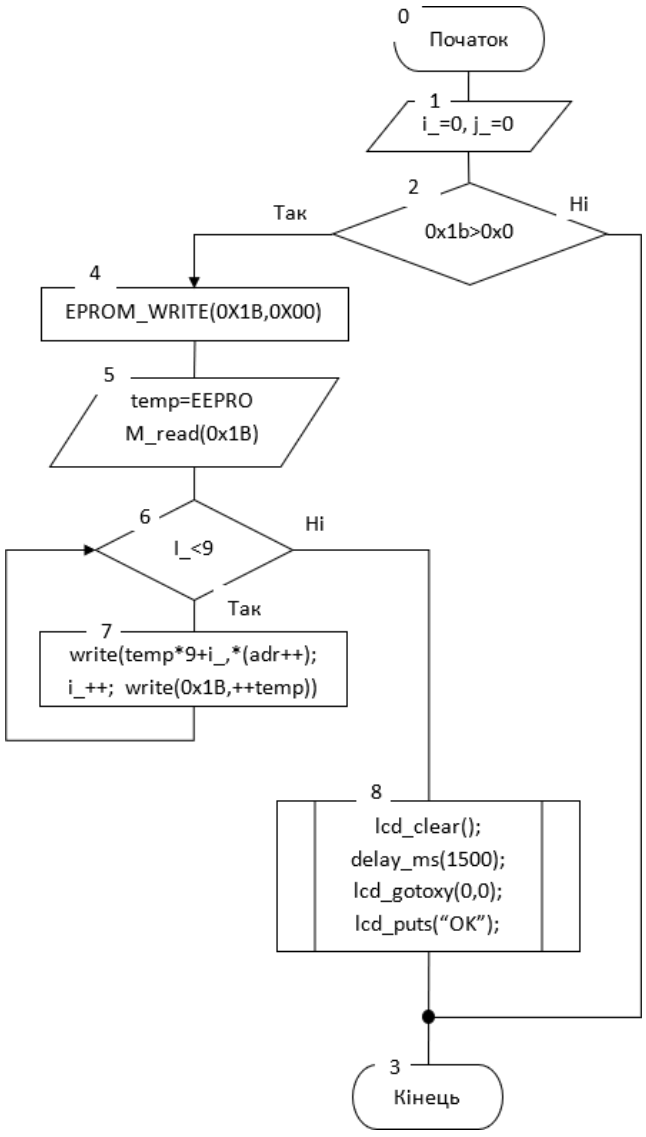


Рис. 3.5. Логіка роботи підпрограми запису ідентифікаторів до енергонезалежної пам'яті

Головний виконавчий цикл програми розробленої комп’ютерно-інтегрованої системи бере на себе комплексне керування всіма вузлами мережі зовнішнього освітлення. Відповідно до закладеного в пам'ять сезонного розкладу, який спирається на показники годинника реального часу, мікроконтролер ініціює автоматичне ввімкнення або вимкнення силових магнітних пускачів (стартерів). Паралельно з цим, у фоновому режимі, основна програма безперервно обробляє запити від системи контролю доступу та аналізує температурні показники для своєчасного вмикання внутрішніх нагрівальних елементів шафи, що запобігає утворенню конденсату на чутливій електроніці (див. рис. 3.6).

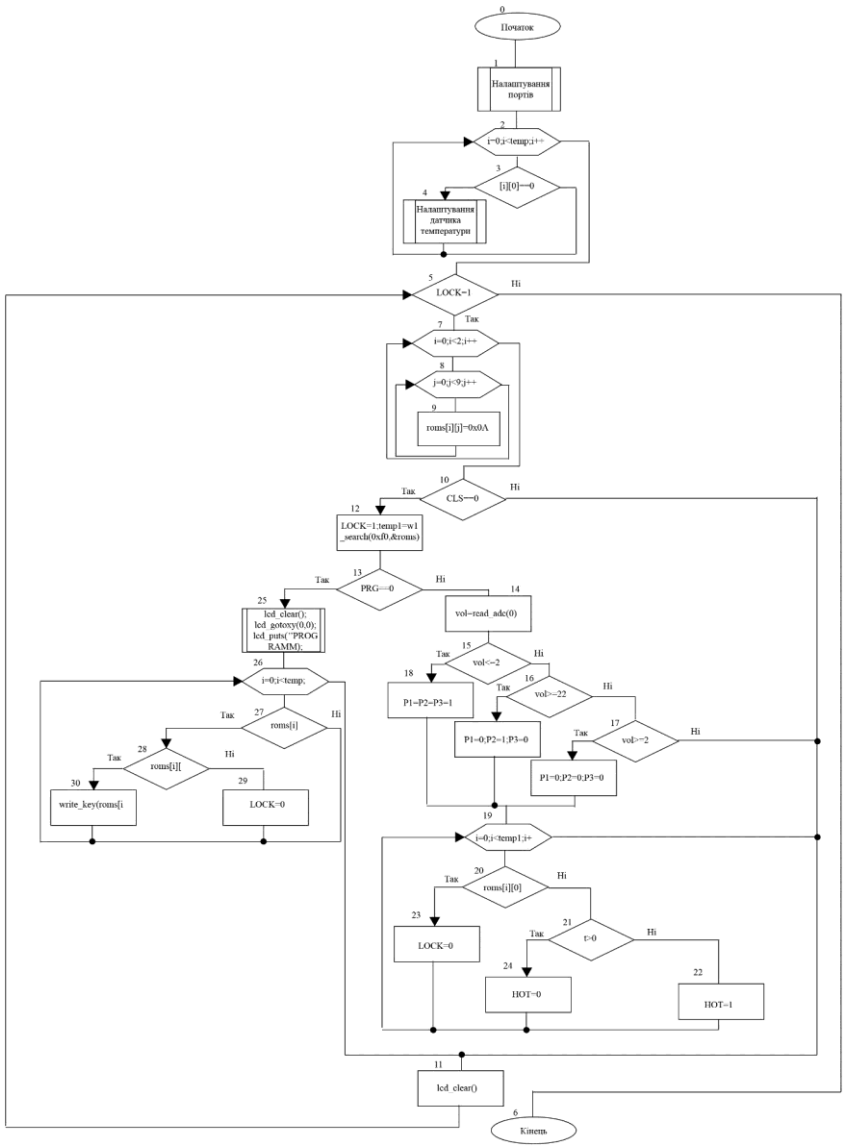


Рис. 3.6. Базова блок-схема головного циклу керування автоматизованим зовнішнім освітленням

Після завершення етапу написання коду та його компіляції у середовищі CodeVisionAVR, фінальне програмно-апаратне налагодження та симуляція логіки

роботи пристрою здійснюються у віртуальному середовищі пакету Proteus, що дозволяє виявити та усунути потенційні помилки ще до моменту фізичного створення прототипу плати.

3.3. Створення принципової електричної схеми апаратного комплексу автоматизованого управління вуличним освітленням

Відповідно до поставленого технічного завдання, на даному етапі було спроектовано детальну принципову електричну схему для системи автоматичного контролю мереж зовнішнього освітлення, яка функціонує з використанням альтернативних джерел енергії. Загальна архітектура апаратних зв'язків розробленої комп’ютерно-інтегрованої платформи наочно продемонстрована на рис. 3.8. Разом з тим, внутрішня електрична структура безпосереднього модуля керування деталізована на рис. 3.9.

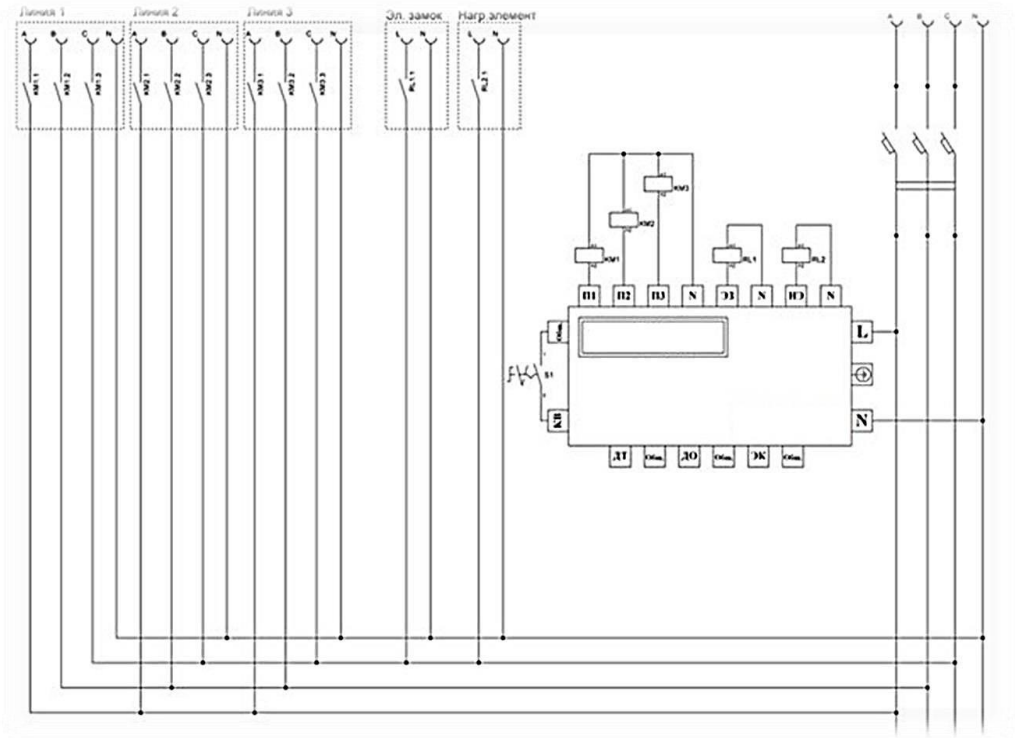


Рис. 3.8. Загальна принципова схема апаратної частини системи управління вуличним освітленням

Представлена принципова схема включає в себе низку ключових компонентів та ліній зв'язку. Зокрема, виводи П1, П2 та П3 відповідають за безпосереднє апаратне керування електромагнітними пускачами (стартерами), тоді як елемент S1 виконує роль кінцевого вимикача, призначеного для надійної

фіксації замикання корпусу. Клеми з позначеннями A, B та C підключені до головного автоматичного вимикача, а силові контакти самих пускачів КМ ідентифікуються на схемі як лінія 1, лінія 2 та лінія 3. За фізичну комутацію струму відповідають котушки стартерів КМ1, КМ2 та КМ3. Система фізичної безпеки об'єкта представлена електронним замком (ЕЗ) та зчитувачем електронного ключа (ЕК). Екологічний та кліматичний моніторинг забезпечують інтегровані датчик температури (ДТ) та датчик рівня освітленості (ДО). Підсистема стабільного енергозабезпечення електроніки сформована з понижуючого трансформатора (Tr), випрямних діодів (vd), згладжувальних конденсаторів (C) та індуктивностей (L1, L2). Окремо виділено вузли керування навантаженням (БКН1, БКН2, БКН3), кожен з яких побудований на базі надійної симісторної оптопари MOC3041. Для гарантування високої стійкості до мережевих перешкод та запобігання хибним спрацьовуванням, керуючий перехід симістора додатково зашунтовано за допомогою спеціально підібраних RC-ланцюгів (резистора та конденсатора).

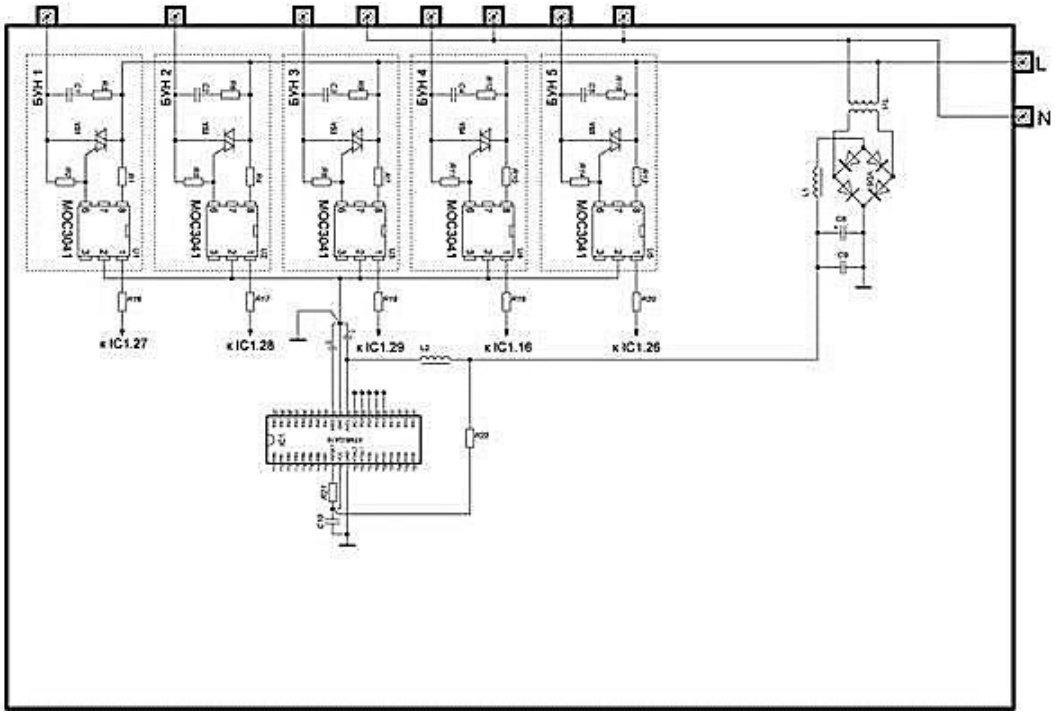


Рис. 3.9. Електрична схема модуля керування розробленого комплексу

Спираючись на розроблену принципову схему, було побудовано повноцінну віртуальну симуляційну модель у професійному програмному комплексі Proteus ISIS 7 Professional. Цей крок є критично важливим для комплексного тестування

та налагодження алгоритмів, які були попередньо написані у середовищі розробки CodeVisionAVR. На створеній моделі комп’ютерно-інтегрованої системи чітко виділено всі функціональні зони: підсистему контролю нагрівальних елементів, блок управління трьома силовими пускачами, модуль контролю санкціонованого доступу, а також усю необхідну периферію для організації повноцінного людино-машинного інтерфейсу (див. рис. 3.10).

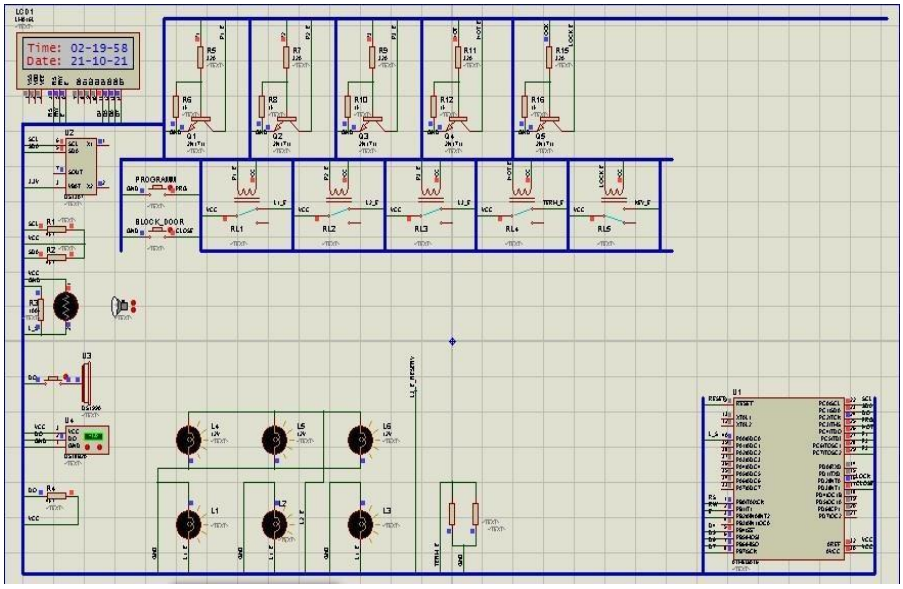


Рис. 3.10. Візуалізація моделі комп’ютерно-інтегрованої системи у середовищі Proteus

Для запуску симуляції та активації віртуального мікроконтролера необхідно завантажити в нього скомпільований машинний код програми, згенерований у CodeVisionAVR. Ця процедура здійснюється через вікно властивостей компонента «Edit Component», де інженер має точно вказати шлях до виконуваного файлу на накопичувачі (див. рис. 3.11).

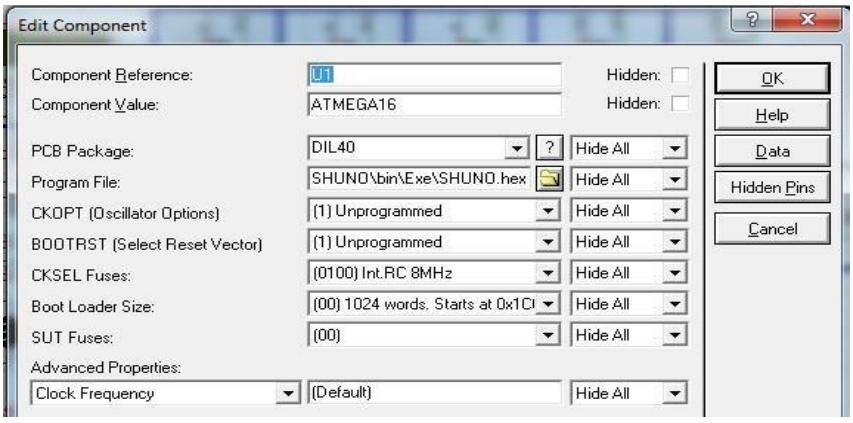


Рис. 3.11. Діалогове вікно завантаження виконуваного файлу в мікроконтролер

Архітектура підключення мікроконтролера до периферії передбачає строгий розподіл портів вводу-виводу. Енергозабезпечення чипа здійснюється через виводи Vcc (позитивний потенціал живлення) та GND (загальна шина або точка нульового потенціалу мікросхеми). Відповідно, Vee може використовуватися для подачі негативної напруги живлення відносно землі. Комунікація по шині I2C організована через лінію тактових імпульсів SCL (Serial Clock Input), яка задає частоту передачі, та двоспрямовану лінію передачі даних SDA (Serial Data Input/Output). Для коректної та точної роботи аналого-цифрового перетворювача задіяні вивід живлення Avcc та спеціальне джерело опорної напруги AREF. Збір даних про рівень природного світла здійснюється через лінію L_S, до якої підключено відповідний датчик. Робота з символьним LCD-дисплеєм вимагає синхронізації сигналів RS (вибір регістра), RW (керування напрямком передачі, де 0 — це запис, а 1 — зчитування), E (стробуючий сигнал дозволу виведення символів), а також 4-бітної шини даних, що займає порти D4, D5, D6 та D7. Обмін інформацією за протоколом 1-Wire з пристроями iButton реалізовано через лінію DQ. Окрім цього, у системі задіяні специфічні дискретні керуючі сигнали: лінія PRG відповідає за переведення пристрою в режим програмування для запам'ятовування нових адрес ключів, сигнал Hot ініціює вмикання термічних нагрівальних елементів, контакти P1, P2 та P3 керують силовими пускачами кожної з фаз, Lock керує станом блокування електронного замка, сигнал Close зчитує стан кінцевого вимикача дверцят, а лінії LE_1, LE_2 та LE_3 слугують індикаторами фактичного увімкнення відповідних груп вуличних ламп.

Функціональні вузли керування трьома електромагнітними пускачами відіграють вирішальну роль у забезпеченні повної автономності системи освітлення. Їхня головна задача — здійснювати своєчасне вмикання та вимикання відповідних силових ліній згідно з жорстко запрограмованим сезонним розкладом. Цей процес безперервно синхронізується за допомогою мікросхеми годинника реального часу, показники якого додатково верифікуються поточними даними від датчика освітленості, що дозволяє уникнути хибних спрацьовувань під час аномальних погодних умов (див. рис. 3.12).

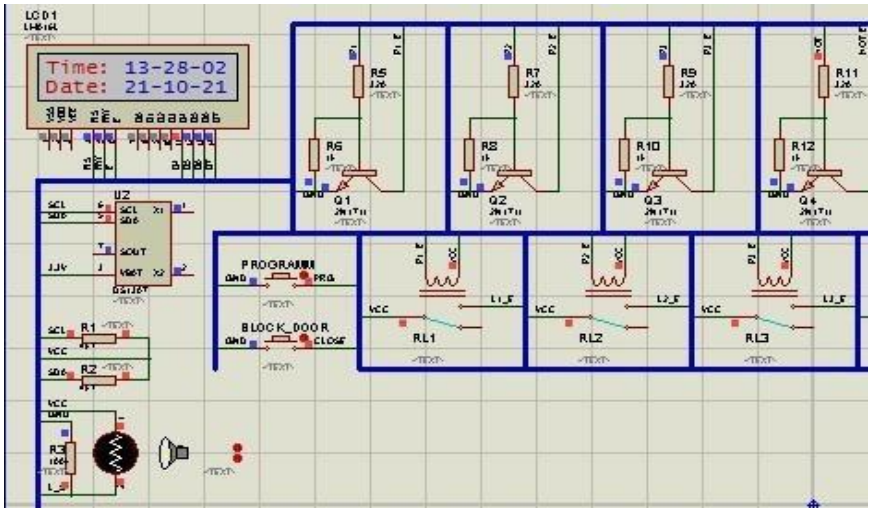


Рис. 3.12. Моделювання вузлів керування електромагнітними пускачами

Алгоритм роботи комплексу передбачає кілька базових сценаріїв реагування на навколишнє середовище. У випадку, коли датчик фіксує рівень повного затемнення, і це підтверджується часовими рамками поточного сезонного графіка (настала ніч), контролер видає сигнал на одночасну активацію всіх трьох ліній стартерів. Як наслідок, освітлювальні прилади вмикаються на повну проектну потужність, задіюючи всі передбачені рівні ламп (див. рис. 3.13).

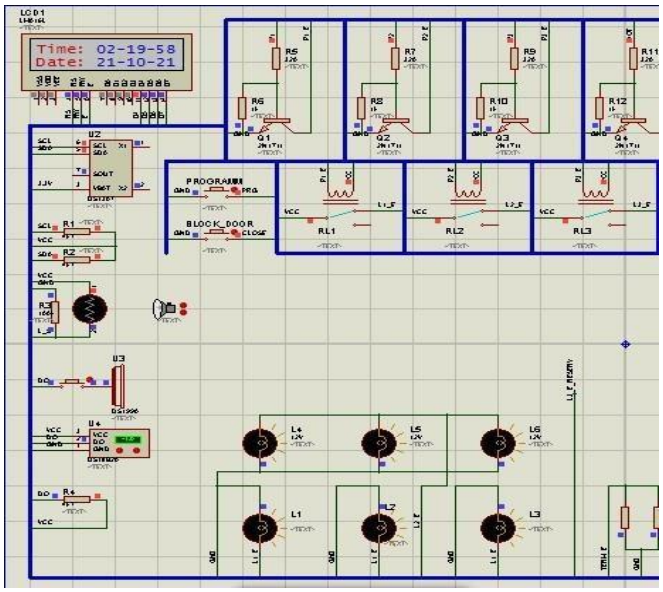


Рис. 3.13. Відображення режиму роботи освітлення в нічний час

Якщо ж зовнішні умови класифікуються оптичним датчиком як сутінки, і поточний час збігається з перехідним періодом графіка, система інтелектуально переходить у режим часткової економії. У цьому стані мікроконтролер подає живлення лише на одну виділену лінію керування стартером. Відбувається

вмикання базового нижнього ярусу ламп, чого цілком достатньо для забезпечення мінімально необхідної видимості на об'єкті (див. рис. 3.14).

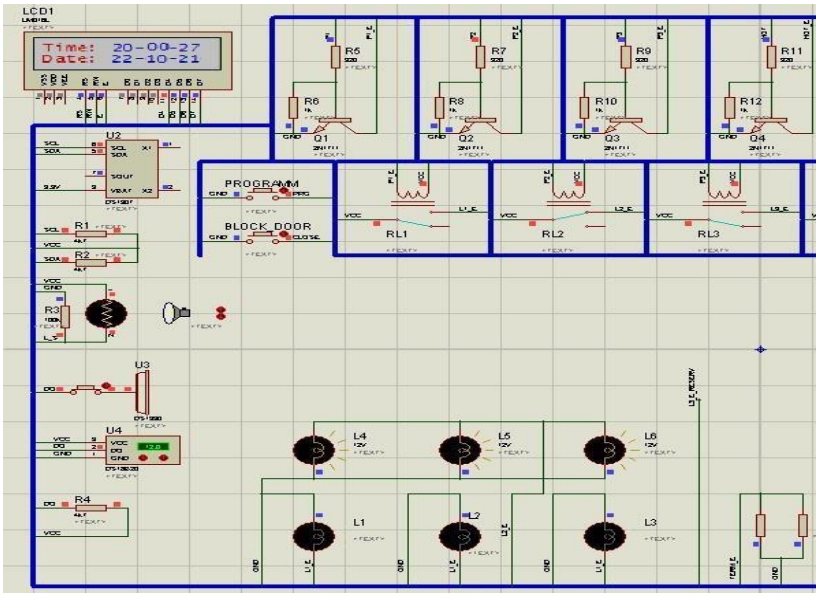


Рис. 3.14. Робота освітлювальної мережі в умовах сутінків

З настанням світлої половини доби (денний час) автоматика повністю знеструмлює всі керуючі лінії пускачів, гарантуючи повне вимкнення освітлювальних приладів і максимізуючи економію накопиченої сонячної електроенергії (див. рис. 3.15). Протягом усього циклу роботи на інформаційному дисплеї системи безперервно виводяться поточна дата та час.

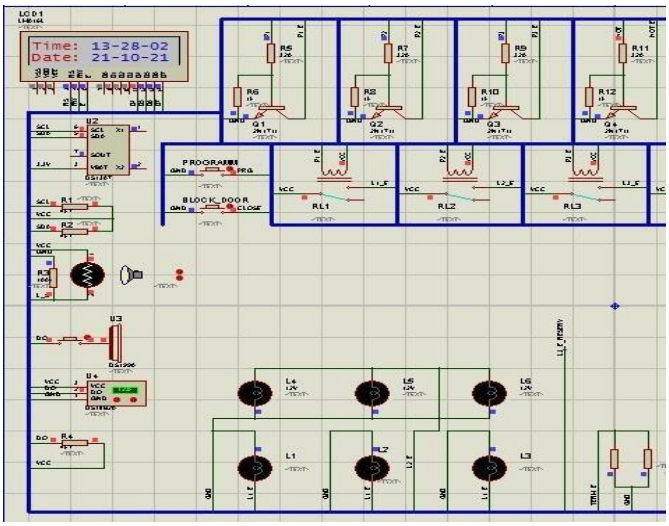


Рис. 3.15. Деактивований стан освітлення у світлу пору доби

Для забезпечення стабільної та безперебійної роботи чутливої керуючої електроніки в суворих зимових умовах передбачено спеціальний блок керування підігрівом. Він об'єднує в єдиний контур прецизійний цифровий датчик температури навколишнього середовища та виконавчий резистивний

нагрівальний елемент. У разі падіння температури всередині монтажної шафи нижче нульової позначки, контролер автоматично замикає коло живлення нагрівача, який здійснює м'який тепловий обігрів компонентів, ефективно запобігаючи утворенню конденсату та їхній відмові (див. рис. 3.16).

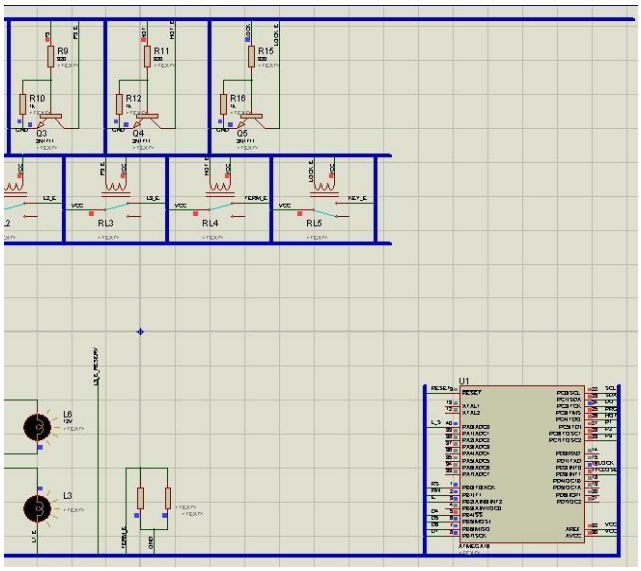


Рис. 3.16. Модель підсистеми температурного контролю та обігріву

Підсистема безпеки та управління фізичним доступом реалізована за допомогою зчитувача контактних електронних ключів стандарту DS1990. Вона оснащена виділеною кнопкою програмування, натискання якої дозволяє зберігати в незалежній пам'яті мікроконтролера до трьох унікальних ідентифікаційних адрес ключів персоналу, а також спеціальною кнопкою примусового блокування комплексу на випадок виявлення несанкціонованого проникнення (див. рис. 3.17). Для реєстрації нового ідентифікатора адміністратор повинен перевести пристрій у режим запису та прикласти ключ до контактної площадки.

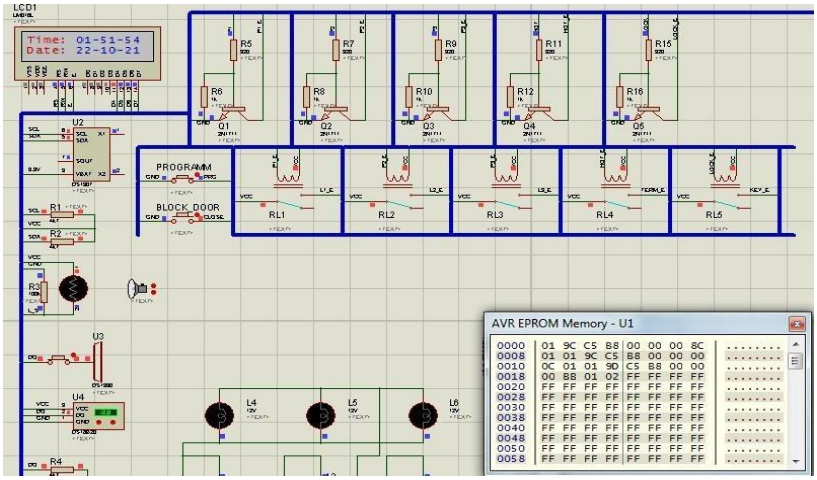


Рис. 3.17. Процедура ініціалізації та запису коду ключа доступу

У ситуації, коли система ідентифікує спробу доступу за допомогою ключа, унікальний серійний номер якого не знайдено в базі даних мікроконтролера, алгоритм розцінює таку подію як злам. У цьому разі негайно активується захисний механізм: автоматичний електромагнітний замок дверцят жорстко фіксується, повністю унеможливлюючи фізичний доступ сторонніх осіб до внутрішніх керуючих вузлів шафи (див. рис. 3.18).

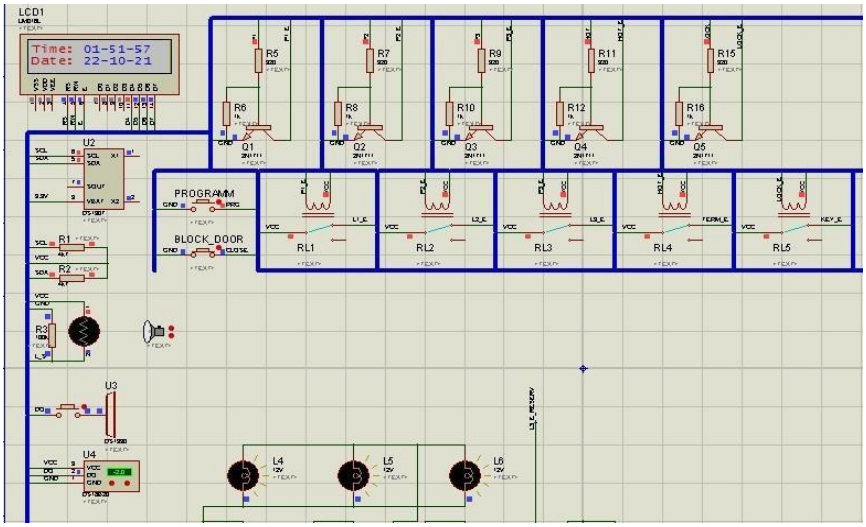


Рис. 3.18. Імітація блокування системи при несанкціонованому доступі

3.4. Проектування SCADA-системи для моніторингу та керування комп’ютерно-інтегрованим комплексом зовнішнього освітлення з резервним живленням

3.4.1. Обґрунтування вибору комунікаційних інтерфейсів

Для організації передачі даних між різними вузлами системи необхідно обрати оптимальний стандарт зв'язку. Розглянемо класичний інтерфейс RS-232. У ньому сигнали кодуються за допомогою перепадів напруги в діапазоні від 3 до 15 Вольт. Через порівняно низьку завадостійкість цієї технології, ефективна довжина комунікаційної лінії RS-232 суворо обмежена відстанню до кількох метрів. Цей порт тривалий час був стандартним оснащенням для переважної більшості ПК-сумісних комп'ютерів, де його головним завданням було підключення зовнішніх модемів або пряма передача невеликих обсягів інформації між двома близько розташованими пристроями. Процес обміну даними відбувається в послідовному режимі, слово за словом (з довжиною слова від 5 до 8 біт). Кожен такий блок

даних обов'язково обрамляється стартовим бітом на початку, а завершується стоп-бітами та необов'язковим бітом парності для контролю помилок. Фундаментальним обмеженням інтерфейсу RS-232 є його топологія "точка-точка", яка здатна з'єднати лише два пристрої (див. рис. 3.19), що унеможливлює створення повноцінних багатоточкових мереж.

На противагу йому, стандарт RS-485 позиціонується як надійний, високошвидкісний промисловий інтерфейс послідовної передачі даних, розрахований на створення розподілених мереж. Сучасне промислове комп'ютерне обладнання, програмовані логічні контролери, а також переважна більшість "розумних" датчиків та виконавчих механізмів, як правило, оснащуються модулем RS-485 (часто паралельно з традиційним RS-232) (див. рис. 3.20).

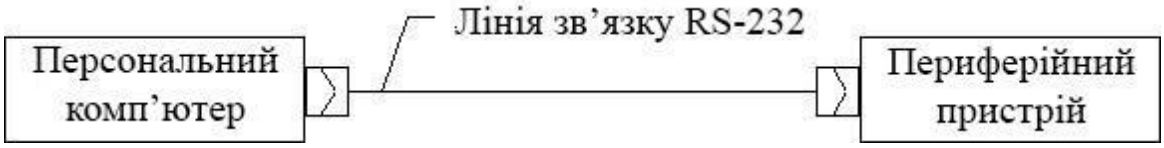


Рис. 3.19. Схема підключення пристроїв за стандартом RS-232

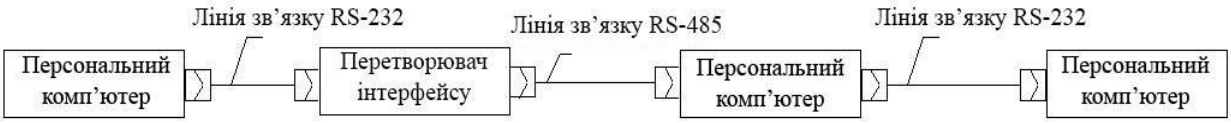


Рис. 3.20. Апаратна сумісність та взаємодія інтерфейсів RS-232 і RS-485

Головна перевага RS-485 полягає у використанні диференціального способу передачі сигналів. Інформація кодується різницею потенціалів (перепадами від 0,2 до 8 В) між двома провідниками, що забезпечує виняткову стійкість лінії до електромагнітних шумів та завад. Завдяки цьому загальна протяжність лінії зв'язку може сягати 1 кілометра (і навіть більше при використанні додаткових ретрансляторів-репітерів).

Однак, у рамках даного проекту базовим обрано протокол RS-232. Таке рішення зумовлене необхідністю організації локального обміну даними та спеціальними службовими сигналами між термінальним обладнанням (DTE - Data Terminal Equipment) і комунікаційним пристроєм (DCE - Data Communications Equipment) на коротких відстанях, що не перевищують 15 метрів. Важливо

пам'ятати про суворе правило маршрутизації в стандарті RS-232: обладнання поділяється на класи DCE та DTE, і пряме з'єднання двох однотипних пристроїв (наприклад, DTE-DTE або DCE-DCE) без використання спеціальних нуль-модемних кабелів є неможливим.

Наступним кроком є розробка графічного людино-машинного інтерфейсу (візуалізації) з використанням середовища Borland Delphi. Для того, щоб забезпечити коректний обмін даними між апаратною симуляцією в Proteus 7 Professional ISIS та новоствореною SCADA-системою в Delphi, необхідно організувати програмний міст. Це завдання вирішується за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення VSPE (Virtual Serial Ports Emulator), яке створює віртуальні комунікаційні порти. Завдяки VSPE генерується пара віртуально з'єднаних пристроїв: COM2 призначається для прийому та передачі даних із симулятора Proteus, а COM1 використовується для зв'язку з графічною оболонкою Borland Delphi (див. рис. 3.21).

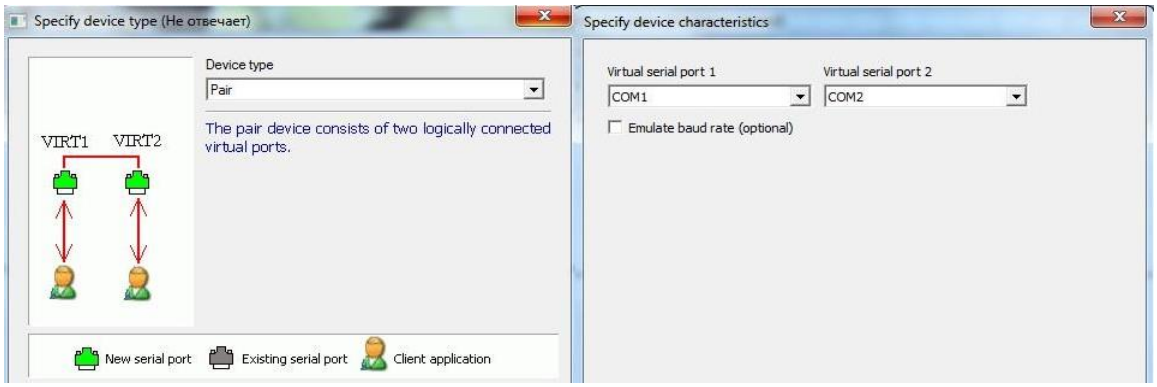


Рис. 3.21. Процес налаштування віртуальних COM-портів за допомогою утиліти VSPE

3.4.2. Аналіз технологій передачі керуючих сигналів Сучасні комп’ютерно-інтегровані системи управління зовнішнім освітленням (зокрема ті, що використовують гібридне живлення) зазвичай підпорядковуються локальним зональним контролерам або центральним серверам. Залежно від закладеної логіки та поточних умов, контролер може генерувати різні команди (наприклад, сигнал на екстрене відключення певної групи вуличних світильників). Доставка цих керуючих сигналів від "мозку" системи до кінцевих виконавчих механізмів може здійснюватися кількома основними шляхами:

- Використання слабкострумових сигнальних ліній (наприклад, спеціальних витих пар або мереж стандарту Ethernet).
- Передача команд через радіоефір (радіоканал).
- Використання стільникових мереж зв'язку (GSM-канал).
- Трансляція високочастотних сигналів безпосередньо по існуючих силових кабелях електроживлення (PLC-технологія).

Детальний порівняльний аналіз цих методів за ключовими критеріями наведено у табл. 3.4.

Таблиця 3.4. Порівняльна характеристика технологій передачі керуючих сигналів

№	Критерій порівняння	Лінії сигналу низького струму	GSM-канал	Силові лінії електропередач	Радіоканал
1	Адресація (економічно доцільно)	Можливість контролювати окремі частини	Лише керування групами	Лише керування групами	Лише керування групами
2	Метод керування	Цифровий протокол керування, наприклад, на основі календарного розкладу	Телефонний дзвінок або SMS на контролер в шафі керування	Управління по силовому кабелю, підключеному до контролера в шафі керування	Передача радіосигналу з диспетчерської на приймач в шафі керування
3	Фактори, які впливають на надійність	Накопичення помилки відліку часу	Залежність від навантажень та публічної мережі оператора GSM.	У разі поломки потрібне ручне перемикання кабелю.	Радіоперешкоди можуть призвести до неможливості отримання сигналу керування
4	Витрати на оплату праці	Високі витрати на робочу силу	Низькі витрати на робочу силу у зв'язку з використанням мережі публічного використання	При індивідуальному керуванні, прокладання кабелів трудозатратне	Високі витрати на робочу силу при установці приймачів-передавачів
5	Покриття	Прив'язка до міста/області	Покриття стільникового зв'язку	Довжина силового кабелю керування не може перевищувати 1 км.	Керування можливе тільки в зоні впевненого прийому радіосигналу
6	Розмір території	Район міста, невеликий населений пункт	Місто і найближче передмістя	Обмежена територія	Місто і передмістя, територія вздовж автомобільних

					доріг
7	Фактори витрат	Індивідуальний блок керування в кожному ліхтарі	Абонентська плата та плата для з'єднання, передачі повідомлень	Вартість прокладання індивідуальних силових кабелів	Вартість обладнання диспетчерської, релейних станцій і приймачів
8	Фактори, які впливають на вартість обслуговування	Постійно потрібні коригування таймера	-	Високі витрати на ремонт електрообладнання	Потрібен кваліфікований диспетчер

3.5.3. Особливості застосування GSM-каналу

Побудова сучасних автоматизованих систем управління вуличним освітленням із використанням GSM-модемів спирається на чітку трирівневу ієрархічну архітектуру (див. рис. 3.22). До основних компонентів цієї структури належать:

- Локальні блоки, що здійснюють безпосереднє керування окремими сонячними батареями або їх групами.
- Головний територіальний (центральний) сервер, який координує роботу всієї системи.

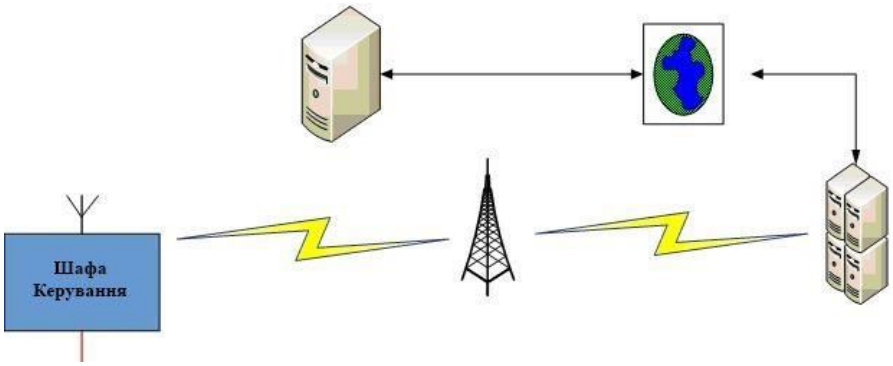


Рис. 3.22. Структурна схема дистанційного керування гібридним живленням через стільникову мережу GSM

Завдяки такій архітектурі, диспетчер має можливість з центрального сервера надіслати команду на увімкнення або вимкнення будь-якого конкретного модуля сонячної батареї. Однак, попри технологічну привабливість, тотальне індивідуальне керування кожним ліхтарем через GSM наразі стикається з фінансовими перешкодами. Висока вартість самих GSM-модемів, а також необхідність придбання та щомісячного обслуговування індивідуальних SIM-карт

для кожного пристрою роблять такий підхід економічно невигідним. Саме тому використання GSM-каналу переважно обмежується рівнем зональних (групових) шаф керування. Для кращого розуміння схемотехніки на рис. 3.23 наведено розшифровку використаних умовних позначень.

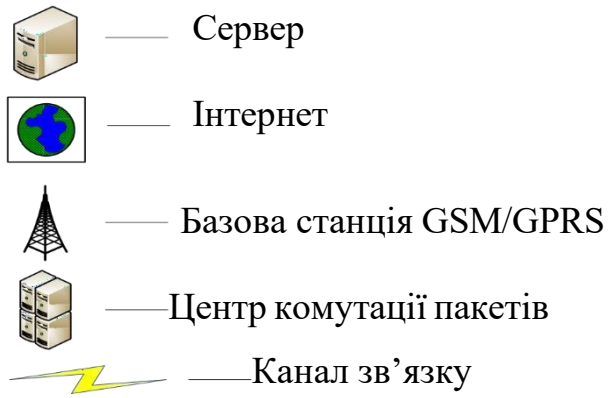


Рис. 3.23. Таблиця умовних графічних позначень для схем керування енергопостачанням

3.5.4. Розробка інтерфейсу візуалізації для системи керування зовнішнім освітленням з альтернативним живленням Спираючись на логіку, закладену у віртуальній моделі Proteus 7 Professional ISIS, було спроектовано графічне програмне забезпечення SCADA-системи (див. рис. 3.24). Розроблений інтерфейс надає оператору інструменти для виконання двох ключових функцій:

1. Постійний моніторинг параметрів та безпосереднє керування процесом заряду акумуляторних батарей.

2. Дистанційне або автоматичне перемикання джерел електроживлення (сонячні панелі/мережа) для всього комп'ютерно-інтегрованого комплексу зовнішнього освітлення.



Рис. 3.24. Базовий екран SCADA-системи для моніторингу та керування

підсистемою альтернативного живлення

Щоб на екрані диспетчера в режимі реального часу відображалися достовірні показники струму, напруги та відсоткового рівня заряду акумуляторів, створена SCADA-система має бути надійно синхронізована з симуляцією в Proteus через попередньо налаштовані віртуальні COM-порти. Алгоритм роботи системи живлення є наступним: для ініціалізації процесу заряду акумулятора диспетчер натискає кнопку живлення. Якщо телеметрія показує, що напруга на виході батареї становить менше 14 В (що відповідає рівню заряду в межах від 31% до 95%), контролер приймає рішення використовувати міську електромережу як основне джерело живлення для шафи керування (див. рис. 3.25).

Якщо ж напруга на клемах акумулятора досягає позначки 14,5 В (що свідчить про 100% рівень заряду), система автоматично блокує подальший заряд, щоб уникнути пошкодження батарей. Одночасно з цим контролер дає дозвіл на перехід до споживання енергії, згенерованої сонячними панелями (див. рис. 3.26). У цьому режимі відбувається поступове розряджання батарей, а після їх критичного виснаження автоматика знову перемкне систему на живлення від загальної мережі. Інтерфейс також дозволяє оператору в будь-який момент відкрити віртуальну панель шафи керування для більш детального огляду.



Рис. 3.25. Індикація режиму роботи: рівень заряду 30-95%, система живиться від загальної електромережі

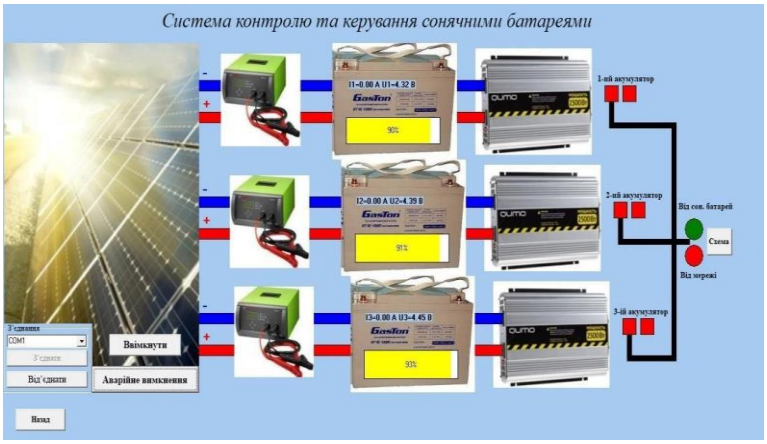


Рис. 3.26. Індикація режиму роботи: батарея повністю заряджена (95-100%), живлення переведено на сонячні панелі

Крім штатних режимів роботи, в SCADA-системі передбачено алгоритм поведінки у нештатних ситуаціях. Наприклад, якщо датчики фіксують критичне перевищення температури (перегрів) акумуляторних блоків, автоматика негайно ініціює аварійне відключення підсистеми альтернативного живлення, сповіщаючи про це диспетчера (див. рис. 3.27).



Рис. 3.27. Відображення стану аварійного блокування системи живлення внаслідок критичного перегріву акумуляторів

Висновки до розділу 3

У третьому розділі кваліфікаційної роботи здійснено комплексну програмну реалізацію, розробку принципових електричних схем та детальне моделювання спеціалізованої комп'ютерної системи керування зовнішнім освітленням, оснащеної підсистемою альтернативного живлення. На початковому етапі було обґрунтовано вибір інструментального програмного забезпечення. Для написання програмного коду, його компіляції та гнучкого налаштування периферійних

модулів мікроконтролера найбільш оптимальним рішенням визнано інтегроване середовище CodeVisionAVR. Водночас для віртуального схемотехнічного моделювання та повноцінної апаратної симуляції логіки роботи розробленого пристрою було обрано потужний програмний комплекс Proteus VSM, зокрема його підпрограму ISIS.

Наступним кроком стала безпосередня розробка програмного забезпечення для керуючого мікроконтролера ATmega16A. Написаний мовою C базовий алгоритм забезпечує автоматичне комутування силових стартерів освітлювальної мережі. Цей процес спирається на інтегрований сезонний розклад, що функціонує завдяки модулю годинника реального часу, та динамічно коригується поточними показаннями оптичного датчика освітленості. Крім того, у програмний код успішно інтегровано підсистему контролю фізичного доступу до обладнання. Вона здійснює точну ідентифікацію електронних ключів за протоколом 1-Wire з подальшою фіксацією подій в енергонезалежній пам'яті EEPROM, а також відповідає за автоматичне керування нагрівальними елементами антивандальної шафи для підтримки оптимального мікроклімату.

На основі розроблених програмних алгоритмів було спроектовано та успішно візуалізовано принципову електричну схему апаратного комплексу. У середовищі Proteus побудовано як загальну архітектуру, так і детальну схему модуля керування, до складу якої увійшли мікроконтролер, елементи безпечної гальванічної розв'язки на базі симісторних оптопар MOC3041, релейні блоки, комплекс датчиків та інформаційний LCD-екран. Проведена апаратна симуляція повністю підтвердила коректність обробки закладених сценаріїв освітлення для нічного, сутінкового та денного режимів. Також було перевірено безвідмовну роботу електромагнітного блокування замка при імітації несанкціонованого доступу та своєчасну активацію системи підігріву для надійного захисту чутливої електроніки від руйнівного впливу низьких температур і конденсату.

Завершальним і надзвичайно важливим етапом роботи стало створення SCADA-системи, призначеної для наочної візуалізації та віддаленої диспетчеризації роботи комплексу. Використовуючи можливості графічного середовища Borland Delphi, було розроблено зручний та інтуїтивно зрозумілий

людино-машинний інтерфейс оператора. Коректний та безперебійний обмін даними між симулятором Proteus та створеною SCADA-системою вдалося налаштувати за протоколом RS-232, застосувавши спеціалізований емулятор віртуальних портів VSPE. Даний інтерфейс надає можливість у режимі реального часу відстежувати критичні параметри енергосистеми, такі як напруга, струм та відсоток залишкового заряду акумуляторних батарей. У системі реалізовано надійну логіку автоматичного або дистанційного перемикання джерел живлення від міської електромережі до сонячних панелей залежно від рівня заряду акумуляторів, а також передбачено функцію миттєвого аварійного відключення всього комплексу у разі фіксації критичного перегріву батарейних блоків.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Розробка, проєктування та практична реалізація комп’ютерно-інтегрованої системи автоматичного керування зовнішнім освітленням з альтернативними джерелами живлення є комплексним інженерним процесом. Він поєднує в собі як тривалу інтелектуальну працю за персональним комп’ютером (написання та компіляція програмного коду для мікроконтролерів, проєктування SCADA-систем), так і безпосередню фізичну роботу з електронними компонентами, силовими ланцюгами, сонячними панелями, потужними акумуляторними батареями, вимірювальними приладами та електромонтажним обладнанням. Відповідно, система охорони праці для фахівця з автоматизації повинна враховувати цей багатогранний характер діяльності. Головною метою даного розділу є аналіз потенційних виробничих небезпек, розробка заходів щодо оптимізації умов праці та формування алгоритму дій для збереження життя і здоров'я в умовах виникнення надзвичайних ситуацій під час роботи з високовольтним та високострумовим обладнанням.

4.1. Аналіз умов праці та ергономічна організація робочого місця розробника систем керування освітленням

Робоче місце інженера-розробника систем керування зовнішнім освітленням є складним технологічним середовищем, яке функціонально інтегрує дві зони: зону інтелектуальної праці (програмування мікроконтролерів AVR, розробка схем у Proteus) та зону електротехнічного монтажу (пайка плат керування, збірка та комутація силових шаф). Ефективність та безпека праці в таких умовах залежать від рівня ергономічної організації простору, дотримання санітарно-гігієнічних норм та правильного технічного оснащення. Недотримання цих аспектів може призвести до швидкої втоми, розвитку професійних захворювань (остеохондроз, зорова втома) та зниження якості виконуваної роботи.

Одним із фундаментальних чинників, що впливає на працездатність, є параметри мікроклімату у приміщенні. Лабораторні приміщення для розробки апаратного забезпечення повинні підтримувати оптимальні показники

температури та вологості відповідно до вимог категорії робіт Іа (легка фізична праця). У холодний період року температура має перебувати в межах 22–24 °С, а в теплий — 23–25 °С. Вологість повітря повинна підтримуватися на рівні 40–60%. Крім того, оскільки розробка передбачає тестування режимів заряду свинцево-кислотних гелевих акумуляторів, приміщення обов'язково повинно мати потужну припливно-витяжну вентиляцію для відведення можливих газових виділень (водню та кисню), що утворюються при інтенсивному заряді. Особливої уваги потребує і зона пайки: паяльна станція має бути оснащена локальним витяжним пристроєм («димовловлювачем»), який відводить небезпечні пари флюсу та важких металів від дихальних шляхів розробника.

Специфічні вимоги висуваються до системи освітлення робочого місця. Робота з дрібними радіоелектронними компонентами (виводами мікроконтролера ATmega16A, SMD-резисторами) та комутація контактів магнітних пускачів у поєднанні з тривалою фіксацією погляду на екрані монітора створює колосальне навантаження на зорову систему. Для запобігання розвитку астенопії (зорової втоми) застосовується комбіноване освітлення. Загальне штучне освітлення лабораторії повинно створювати рівномірне розсіяне світло інтенсивністю 300-400 люкс. Проте безпосередньо над зоною монтажу електронних плат та збірки шафи керування необхідно встановлювати локальні світильники з регульованим кронштейном, які підвищують освітленість робочої поверхні до 700-1000 люкс. Важливо, щоб джерела світла мали нейтральний спектр (4000-5000 К), а конструкція світильника виключала появу прямих відблисків від металевих корпусів інверторів чи екранів вимірювальних приладів.

Ергономіка робочого простору вимагає правильного планування технічних засобів. Робочий стіл має бути достатньо міцним і просторим для зручного розміщення не лише комп'ютерної периферії, а й габаритного обладнання (блоків живлення, інверторів, акумуляторів). Використання спеціалізованого ергономічного крісла з підтримкою поперекового відділу є обов'язковим для тривалої сидячої роботи. Рекомендується дотримуватися графіку праці та відпочинку: через кожні 60 хвилин безперервної роботи необхідно робити 10-

хвилинну перерву, під час якої виконувати гімнастику для очей та розминку м'язів, що значно покращує загальний стан здоров'я розробника.

4.2. Електробезпека та захист від шкідливих виробничих факторів при роботі з апаратною базою та альтернативними джерелами енергії

Розробка гібридної системи освітлення передбачає інтенсивну роботу з електричним струмом широкого діапазону номіналів, що автоматично робить електробезпеку абсолютним пріоритетом. З одного боку, логічне ядро мікроконтролера ATmega16A та цифрові датчики (освітленості, температури) функціонують від безпечних рівнів зниженої напруги (5 В постійного струму). З іншого боку, силова частина комплексу містить джерела найвищого класу небезпеки: сонячні панелі (що генерують високу напругу постійного струму), гелеві акумуляторні батареї ємністю 150 Аг (здатні видавати струми короткого замикання понад 1000 А), силові інвертори (що генерують небезпечну напругу 220 В змінного струму) та магнітні пускачі, які комутують лінії вуличних світильників.

Головною загрозою під час макетування та тестування апаратного прототипу є ризик важкого ураження електричним струмом або отримання термічних опіків від електричної дуги у разі короткого замикання (КЗ) на клемах акумулятора. З метою гарантування безпеки, всі прилади (інвертори, осцилографи, паяльні станції) повинні бути підключені до контуру захисного заземлення. Робота із силовою мережею 220 В має здійснюватися виключно через пристрої захисного відключення (ПЗВ) та автоматичні вимикачі. Під час комутації сонячних панелей та акумуляторів суворо забороняється проводити маніпуляції з дротами під навантаженням. Спочатку формується фізична топологія схеми, затягуються всі клемні з'єднання, проводиться мультиметрична перевірка на відсутність КЗ, і лише потім вмикаються вводні автомати та подається робоче живлення.

Окрім прямої дії електричного струму, значну небезпеку становлять вторинні фактори. GSM-модем, який використовується для дистанційної диспетчеризації системи освітлення, під час передачі даних генерує електромагнітне поле. Під час тривалого налагодження рекомендується розміщувати антену модуля на відстані

не менше 50 см від робочої зони розробника. Силовий інвертор та контролер заряду сонячних батарей під час роботи з великими струмами суттєво нагріваються, тому інженер повинен уникати торкання їхніх радіаторів охолодження для запобігання термічним опікам.

Важливим аспектом є захист самих електронних вузлів від статичної електрики (ESD). Мікросхеми серії AVR є вкрай чутливими до високовольтних статичних розрядів. Для мінімізації цього ризику інженер повинен використовувати антистатичні браслети та діелектричні килимки на робочому столі. Весь ручний інструмент (викрутки, кусачки, плоскогубці), що застосовується для збірки шафи керування, повинен мати сертифіковане діелектричне покриття руків'я (до 1000 В).

4.3. Заходи безпеки та порядок дій в умовах надзвичайних ситуацій

Робота з силовими інверторами, накопичувачами енергії та мікропроцесорними компонентами завжди супроводжується ризиком виникнення надзвичайних ситуацій (НС) техногенного характеру. Найбільш небезпечними явищами є пожежі, зумовлені коротким замиканням акумуляторних ліній, локальним перегрівом контактів магнітних пускачів під навантаженням або займанням ізоляції провідників. Крім того, сучасні реалії вимагають від кожного фахівця чіткого знання алгоритмів поведінки при оголошенні сигналу «Повітряна тривога».

У разі виявлення перших ознак пожежі (поява диму, запаху плавленого пластику з боку інвертора чи шафи керування) розробник зобов'язаний негайно припинити роботу і повністю знеструмити стенд. Насамперед потрібно вимкнути загальний автомат живлення лабораторії та розірвати коло між сонячними панелями, контролером та акумуляторними батареями за допомогою роз'єднувачів постійного струму. Оскільки електроустановки, акумулятори та інвертори можуть перебувати під напругою, гасіння локального загоряння водою або пінними вогнегасниками категорично забороняється. Дозволяється використовувати виключно вуглекислотні (ОУ) або порошкові вогнегасники.

Якщо пожежа швидко поширюється, необхідно викликати Державну службу з надзвичайних ситуацій (за номером 101) і розпочати евакуацію.

На випадок оголошення сигналу «Повітряна тривога» передбачено суворий алгоритм дій. Інженер повинен негайно зберегти програмний код керування у середовищі CodeVisionAVR, зупинити процес прошивки мікроконтролера та вимкнути ПК. Апаратний прототип, інвертор та лабораторні блоки живлення мають бути повністю відключені від електромережі, а акумуляторний банк фізично від'єднаний від системи (переведений у стан холостого ходу), щоб уникнути пожежі у разі руйнувань або стрибків напруги. Після цього працівник повинен взяти особисті речі, аптечку та прослідувати до найближчого укриття.

У випадках виникнення травм (порізів, опіків від паяльника чи радіаторів) інженер повинен надати першу домедичну допомогу. У приміщенні лабораторії обов'язково має бути аптечка з набором антисептиків та протиопіковими засобами. Відновлення процесу розробки системи керування освітленням дозволяється виключно після відбою повітряної тривоги та візуальної перевірки цілісності обладнання.

Висновки до розділу 4

Виконаний аналіз умов праці та заходів безпеки під час проєктування комп'ютерно-інтегрованої системи автоматичного керування зовнішнім освітленням з альтернативними джерелами живлення дозволяє зробити наступні висновки. Дотримання ергономічних вимог та санітарно-гігієнічних норм (якісного комбінованого освітлення, правильного мікроклімату та вентиляції зон пайки і заряду акумуляторів) є необхідною умовою для запобігання швидкій втомі та професійним захворюванням інженера-розробника.

Питання електробезпеки при роботі з гібридними системами енергозабезпечення потребують підвищеної уваги. Одночасна наявність у системі низьковольтних мікроконтролерних модулів (ATmega16A) та потужних силових вузлів (інверторів 220 В, гелевих акумуляторів з високими струмами віддачі, сонячних масивів) вимагає суворого дотримання правил електромонтажу,

використання діелектричного інструменту, антистатичного захисту та пристроїв захисного відключення.

Розроблений алгоритм дій в умовах надзвичайних ситуацій (зокрема при загрозі пожежі акумуляторних блоків чи оголошенні повітряної тривоги) забезпечує системний підхід до збереження здоров'я персоналу та захисту дороговартісного обладнання. Загалом, інтеграція норм охорони праці в процес проєктування систем вуличного освітлення на базі відновлюваної енергетики дозволяє створити безпечне середовище для ефективної інженерної діяльності, зводячи виробничі та техногенні ризики до мінімально можливого рівня.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

У кваліфікаційній роботі успішно вирішено актуальне науково-технічне та інженерне завдання, яке полягає у розробці комп'ютерно-інтегрованої системи автоматизованого керування зовнішнім освітленням з використанням гібридного джерела живлення. На початковому етапі дослідження було проаналізовано сучасний стан систем зовнішнього освітлення в Україні. Встановлено, що вони споживають значну частку електроенергії (близько 16–18%), при цьому більшість із них використовують морально застарілі підходи без засобів інтелектуальної автоматизації. Доведено беззаперечну доцільність впровадження систем диспетчеризації у синергії з альтернативними джерелами енергії. Для забезпечення надійного резервного живлення обґрунтовано використання полікристалічних сонячних панелей та свинцево-кислотних акумуляторних батарей, виготовлених за технологією GEL, оскільки вони є найбільш стійкими до глибоких розрядів та жорстких температурних умов експлуатації.

На основі проведеного аналізу було розроблено структурну схему та здійснено детальне техніко-економічне обґрунтування компонентної бази системи. Як основне обчислювальне ядро обрано високопродуктивний та енергоефективний мікроконтролер ATmega16A. Енергетична підсистема комплексу побудована на базі сонячної панелі Naps NP200GK потужністю 200 Вт, гелевого акумулятора DELTA GX ємністю 150 Аг та силового інвертора номінальною потужністю 1000 Вт. Для збору актуальних даних та комутації силових навантажень у систему інтегровано модуль годинника реального часу, прецизійний датчик температури Danfoss ESMB, фотореле LXP-03, а також надійну комутаційну апаратуру, зокрема магнітні пускачі та автоматичні вимикачі HYUNDAI.

Програмна реалізація проєкту здійснювалася у середовищі CodeVisionAVR, де було розроблено алгоритми та програмний код для мікроконтролера мовою C. Цей код забезпечує гнучке та автономне керування групами освітлення залежно від часу доби за сезонним графіком та поточного рівня природного освітлення. Крім того, у програмному забезпеченні реалізовано підсистеми клімат-контролю

антивандальної шафи та обмеження фізичного доступу за допомогою ідентифікації електронних ключів Touch Memory за протоколом 1-Wire. Створена у програмному комплексі Proteus VSM віртуальна електрична схема дозволила провести глибоку апаратну симуляцію та повністю підтвердила коректність роботи всіх закладених алгоритмів.

Для забезпечення зручного моніторингу та дистанційного керування об'єктами у графічному середовищі Borland Delphi було розроблено сучасну SCADA-систему. Вона отримує телеметричні дані через інтерфейс RS-232 і дозволяє оператору в режимі реального часу відстежувати рівень заряду акумуляторів, напругу та струм. Система надає можливість автоматично або в ручному режимі перемикати джерело живлення між міською електромережею та сонячними панелями, а також містить алгоритми аварійного відключення обладнання при фіксації критичного перегріву батарей.

Невід'ємною частиною роботи став аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що виникають під час проєктування та подальшої експлуатації гібридних енергосистем. Було розроблено комплекс технічних та організаційних заходів щодо покращення ергономіки робочого місця програміста та дотримання правил електробезпеки під час роботи з високовольтними інверторами і акумуляторними банками великої ємності. Окремо сформовано чіткий алгоритм дій персоналу в надзвичайних ситуаціях, який включає заходи пожежної безпеки та правила реагування на сигнали повітряної тривоги.

Загалом, мета кваліфікаційної роботи досягнута, а всі поставлені в технічному завданні цілі виконані у повному обсязі. Розроблений апаратно-програмний комплекс відрізняється високою надійністю, економічною доцільністю та повністю готовий до практичного впровадження в муніципальну інфраструктуру з метою суттєвого підвищення енергоефективності мереж зовнішнього освітлення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизація технологічних процесів і виробництв / [Жученко А. І., Пупена О. М., Ельперін І. В.]: Підручник. — Київ: Вид-во "Ліра-К", 2015. — 410 с.

2. Теорія автоматичного керування / [Попович М. Г., Ковальчук О. В.]: Підручник. — Київ: Либідь, 2007. — 656 с.

3. Автоматизація типових технологічних процесів / [Лукінюк М. В.]: Навчальний посібник. — Київ: Знання, 2008. — 731 с.

4. Проектування систем автоматизації / [Трегуб В. Г.]: Підручник. — Київ: НУХТ, 2014. — 343 с.

5. Інтелектуальні системи керування та автоматизації / [Кравченко В. І.]. — Одеса: ОНПУ, 2015. — 210 с.

6. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії / [Кудря С. О.]: Підручник. — Київ: НТУУ "КПІ", 2012. — 492 с.

7. Відновлювані джерела енергії / [Титко Р., Калініченко В. М.]: Навчальний посібник. — Варшава-Полтава, 2010. — 532 с.

8. Енергетика нетрадиційних та відновлюваних джерел. Досвід і перспективи / [Мхітарян Н. М.]. — Київ: Наук. думка, 1999. — 320 с.

9. Альтернативна енергетика: стан, проблеми, перспективи / [Рєзцов В. Ф. та ін.]. — Київ, 2014. — 280 с.

10. Основи енергозбереження / [Малкін М. С.]: Навч. посіб. — Харків: ХНУГХ, 2014. — 188 с.

11. Solar Energy Engineering: Processes and Systems / [Kalogirou S. A.]: Монографія. — London: Academic Press, 2013. — 840 p.

12. Схемотехніка електронних систем: У 3 кн. Кн. 3. Мікропроцесори та мікроконтролери / [Бойко В. І. та ін.]: Підручник. — Київ: Вища школа, 2004. — 399 с.

13. Проектування мікропроцесорних систем керування / [Азаров О. А., Гарнага В. А. та ін.]: Навч. посібник. — Вінниця: ВНТУ, 2012. — 207 с.

14. Управління та регулювання AVR мікроконтролерів / [Трамперт В.]. — Київ: МК-Пресс, 2006. — 464 с.

15. Мікропроцесорна техніка / [Білинський Й. Й., Огородник К. В.]: Навч. посібник. — Вінниця: ВНТУ, 2011. — 132 с.

16. Моделювання комп'ютерних систем / [Томашевський О. М.]: Навч. посібник. — Вінниця: ВНТУ, 2014. — 210 с.

17. Програмування на мові С для AVR та PIC мікроконтролерів / [Шпак Ю. А.]: Навчальний посібник. — Київ: МК-Пресс, 2011. — 544 с.

18. Світлотехніка і джерела світла / [Кожушко Г. М., Осадчук О. В.]: Навчальний посібник. — Вінниця: ВНТУ, 2012. — 186 с.

19. Електротехніка та електромеханіка / [Під ред. Бойка В. С.]: Підручник. — Львів: Магнолія 2006, 2017. — 400 с.

20. Основи метрології та електричні вимірювання / [Поліщук Є. С. та ін.]: Підручник. — Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2006. — 544 с.

21. Засоби вимірювання та контролю технологічних параметрів / [Середа В. І.]. — Київ: НАУ, 2013. — 250 с.

22. Основи теорії кіл / [Бакалов В. П. та ін.]: Підручник. — Київ: Вища школа, 2007. — 420 с.

23. Промислова електроніка та мікросхемотехніка / [Романенко О. Г.]. — Київ: НТУУ "КПІ", 2012. — 320 с.

24. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. — Київ: Мінрегіон України, 2018. — 132 с.

25. ДСТУ EN 61131-3:2015. Програмовані контролери. Частина 3. Мови програмування / [ДП «УкрНДНЦ»]: Стандарт. — Київ: 2016. — 250 с.

26. ДСТУ IEC 62443-1-1:2019. Мережі комунікаційні промислові. Захищеність мережі та системи / [ДП «УкрНДНЦ»]: Стандарт. — Київ: 2020. — 80 с.

27. ДСТУ EN 61508-1:2010. Функціональна безпечність електричних/електронних/програмованих електронних систем, пов'язаних з безпечністю / [ДП «УкрНДНЦ»]: Стандарт. — Київ: 2010. — 112 с.

28. ДСТУ IEC 60364-1:2014. Електричні установки низьковольтні. Частина 1. Основні положення / [ДП «УкрНДНЦ»]: Стандарт. — Київ: 2015. — 60 с.

29. ДСТУ EN 50131-1:2014. Системи тривожної сигналізації. Системи охоронної сигналізації / [ДП «УкрНДНЦ»]. — Київ: 2015. — 55 с.

30. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). — Київ: Мінпаливенерго України, 2017. — 716 с.

31. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. — Київ: Держнаглядохоронпраці, 1998. — 380 с.

32. Безпека життєдіяльності та охорона праці / [Ткачук К. Н.]: Підручник. — Львів: Основа, 2015. — 420 с.

33. Охорона праці в електроустановках / [Григор'єв А. М.]: Навч. посібник. — Полтава: ПНТУ, 2016. — 190 с.

34. Надійність та безпека функціонування АСК ТП / [Мельник В. І.]: Підручник. — Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2015. — 210 с.

35. EN 13201-1:2014. Road lighting - Part 1: Guidelines on selection of lighting classes / [CEN]: Європейський стандарт. — Brussels: CEN, 2014. — 28 p.

36. ATmega16A. 8-bit AVR Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash / [Atmel Corporation]: Технічний паспорт (Datasheet). — San Jose: Atmel Corporation, 2014. — 356 p.

37. DS1307. 64 x 8, Serial, I2C Real-Time Clock / [Maxim Integrated]: Технічний паспорт (Datasheet). — San Jose: Maxim Integrated, 2015. — 14 p.

38. DS18B20. Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer / [Maxim Integrated]: Технічний паспорт (Datasheet). — San Jose: Maxim Integrated, 2015. — 20 p.

39. MOC3041M. 6-Pin DIP Zero-Cross Optoisolators Triac Driver Output / [Fairchild Semiconductor]: Технічний паспорт (Datasheet). — San Jose: Fairchild Semiconductor, 2011. — 11 p.

40. SIM800 Series. Hardware Design / [SIMCom Wireless Solutions]: Технічний посібник. — Shanghai: SIMCom, 2013. — 83 p.

41. CodeVisionAVR. C Compiler, IDE, Automatic Program Generator / [Pavel Haiduc]: User Manual. — Bucharest: HP InfoTech, 2014. — 612 p.

42. Proteus VSM. Interactive Circuit Simulation and Debugging / [Labcenter Electronics]: User Guide. — Grassington: Labcenter Electronics Ltd, 2015. — 315 p.