Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Розробка системи енергоефективного керування електроспоживанням на виробництві
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи АКТСІ-22-1.
Роман САДОВИЙ.
(власне ім'я прізвище)
Спеціальності 151 Автоматизація та комп`ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма Системна інженерія
(повна назва освітньої програми)
Керівник ст. викл. Дмитро ГУРІН
(посада, власне ім'я прізвище)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАРБІ _____ Ігор НЕВЛЮДОВ.
(підпис) (власне ім'я прізвище)

2026р.

Я, Садовий Роман Вікторович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«16» червня 2026 р.  Роман САДОВИЙ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет АКІТС
Кафедра КІТАРБІ
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп`ютерно-інтегровані технології
Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Системна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри КІТАРБІ _____
(підпис)
«__» ___ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Садовому Роману Вікторовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка системи енергоефективного керування електроспоживанням на виробництві
затверджена наказом по університету від "04" червня 2026р. № 473 Ст
2. Термін подання студентом роботи "16" липня 2026р.
3. Вихідні дані до роботи:
3.1 Напруга мережі – 230 В;
3.2 Струм – 10А;
3.3 Максимальна потужність – до 2000 Вт;
3.4 Плата керування – ESP32;
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
4.1 Вступ;
4.2 Аналіз предметної області;
4.3 Розробка системи енергоефективного керування електроспоживанням у промисловому приміщенні;
4.4 Розробка програмного забезпечення для енергоефективного керування Електроживленням;
4.5 Заходи і розрахунки для забезпечення безпечних умов праці;
4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний матеріал у вигляді презентації – 12 арк. ф. А4.

6. Консультанти розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз аналогічних систем енергоефективного електроспоживання	28.04 – 15.05.25	виконано
2	Вибір електронних компонентів для реалізації системи енергоефективного керування електроживленням	16.05 – 28.05.25	виконано
3	Розробка програмного забезпечення для системи енергоефективного керування електроспоживанням у промисловому приміщенні	29.05 – 15.06.25	виконано
4	Заходи і розрахунки для забезпечення безпечних умов праці	16.06 – 18.06.25	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	19.06 – 15.07.25	виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернет-системою StrikePlagiarism	15.06 – 17.06.25	виконано
7	Подання роботи на рецензію	18.06 – 20.06.25	виконано
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри	21.06 – 23.06.25	виконано
9	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	24.06.25	виконано

Дата видачі завдання 27.04.2026р.

Здобувач _____ Роман САДОВИЙ
(підпис)

Керівник роботи _____ ст. викл. Дмитро ГУРІН
(підпис) (посада, власне ім'я прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 80 с., 43 рис., 2 дод., 30 джерел.

ДАТЧИКИ, ЕНЕРГОЖИВЛЕННЯ, КОНТРОЛЬ, ПРОГРАМУВАННЯ, C++, АСУ ТП, ESP32.

Метою роботи є розробка системи енергоефективного електроспоживання для зменшення електроспоживання на виробництві.

Об’єкт розробки – процес споживання та розподілу електричної енергії на промисловому підприємстві в умовах змінного графіку навантаження.

Предмет розробки – методи, алгоритми та програмно-апаратні засоби інтелектуального керування електроспоживанням, спрямовані на мінімізацію втрат та оптимізацію енергетичних витрат.

В роботі проведено аналіз систем електроживлення їх аналоги, проаналізовано принцип їх роботи, алгоритми роботи. Проведено вибір електронних компонентів для реалізації системи керування електроспоживанням. Побудовано блок-схему системи, та схему підключення. Розроблено алгоритм та програмне забезпечення для контролю електроспоживанням. Проведено заходи і розрахунки для забезпечення безпечних умов праці та розрахунки теорії автоматично управління.

Отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», зокрема до пункту 9.4 «Розвиток високотехнологічного машинобудування».

ABSTRACT

Explanatory Note: 80 pages, 60 figures, 2 appendix, 30 references.

Keywords: SENSORS, POWER SUPPLY, CONTROL, PROGRAMMING, C++, INDUSTRIAL AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS, ESP32.

The purpose of this work is to develop an energy-efficient power consumption management system aimed at reducing electricity consumption in industrial production.

The object of the development is the process of electrical energy consumption and distribution at an industrial enterprise under variable load conditions.

The subject of the development is methods, algorithms, and hardware-software tools for intelligent power consumption management aimed at minimizing losses and optimizing energy costs.

The work includes an analysis of existing power management systems and their analogues, as well as an investigation of their operating principles and control algorithms. Electronic components for implementing the power consumption management system were selected. A structural diagram of the system and a wiring diagram were developed. An operating algorithm and software for monitoring and controlling power consumption were designed and implemented. In addition, measures and calculations were carried out to ensure safe working conditions, and calculations based on automatic control theory were performed.

The obtained results contribute to Sustainable Development Goal 9, "Industry, Innovation and Infrastructure", particularly target 9.4, which focuses on upgrading infrastructure and promoting the adoption of advanced and resource-efficient industrial technologies.

ЗМІСТ

Перелік скорочень 8

Вступ 9

1 Аналіз предметної області 11

1.1 Аналіз систем енергозбереження 11

1.2 Аналіз методів контролю електроспоживанням на підприємстві 18

2 Розробка системи енергоефективного керування електроспоживанням у промисловому приміщенні 23

2.1 Вибір електронних компонентів для побудови системи керуванням електроживленням у промисловому приміщенні 23

2.2 Побудова схеми підключення системи керування освітленням 35

3 Розробка програмного забезпечення для енергоефективного керування електроспоживанням 37

3.1 Розробка алгоритму програмного забезпечення 37

3.2 Розробка програмного забезпечення 48

3.3 Моделювання системи керування освітленням із PID-регулятором**Помилка! Закладку не визначено.**

3.4 Охорона праці 58

Висновки 61

Перелік джерел посилання 62

Додаток А Демонстраційний матеріал 66

Додаток Б Код програмного засобу ESP32.ino 67

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСК ТП – автоматизована система керування технологічним процесом;

ДБЖ – джерело безперебійного живлення;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ПЗ – програмний засіб;

ПЛК – програмований логічний контролер;

ТП – технологічний процес;

IOT – Internet of Things (інтернет речей);

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (супервізорне управління і збирання даних).

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку світової економіки питання раціонального використання енергетичних ресурсів набуває статусу стратегічного пріоритету для промислового сектора. Постійне зростання тарифів на електроенергію, виснаження природних ресурсів та жорсткі екологічні вимоги змушують підприємства шукати нові шляхи оптимізації енергоспоживання. Для України ця проблема загострюється через необхідність відновлення енергетичної інфраструктури та переходу до сучасних інтелектуальних мереж (Smart Grids).

Традиційні методи енергозбереження, такі як заміна обладнання на більш сучасне, вже не забезпечують необхідного рівня ефективності без впровадження комплексних систем автоматизації.

Сучасне виробництво – це складний механізм, де енергоефективність залежить від точності моніторингу в реальному часі, здатності системи прогнозувати навантаження та оперативно реагувати на пікові запити. Розробка та впровадження систем інтелектуального керування електроспоживанням дозволяє не лише знизити прямі фінансові витрати, а й підвищити експлуатаційну надійність обладнання та стабільність енергосистеми в цілому.

Об’єкт розробки – процес споживання та розподілу електричної енергії на промисловому підприємстві в умовах змінного графіку навантаження.

Предмет розробки – методи, алгоритми та програмно-апаратні засоби інтелектуального керування електроспоживанням, спрямовані на мінімізацію втрат та оптимізацію енергетичних витрат.

Мета роботи – зменшення електроспоживання на виробництві за рахунок розробки підсистеми енергоефективного енергоспоживання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– проаналізувати системи енергоефективного керування енергозбереженням;

– проаналізувати методи оптимізації витрат електроенергії;

– побудувати функціональну схему апаратно-програмного комплексу

системи енергоефективного керування енергозбереженням;

– вибрати електронні компоненти для розробки системи;

– побудувати схему підключення;

– розробити алгоритм програмного забезпечення;

– розробити програмне забезпечення;

– виконати розрахунку з безпеки праці;

– виконати розрахунки з теорії автоматичного управління.

Пояснювальну записку оформлено згідно з ДСТУ 3008:2015 [1], а також з рекомендаціями з підготовки і оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти [2-3].

Отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», зокрема до пункту 9.4 «Розвиток високотехнологічного машинобудування».

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Аналіз систем енергозбереження

З розвитком технологій та впровадженням нових стандартів в побудові підприємств з використанням Індустрії 4.0, впровадження систем контролю електроживленням та енергозбереженням набуває особливої актуальності. Сучасні виклики до енергозбереження вимагають впровадження сучасних систем енергоефективного керування енергозбереженням. Це дозволяє не тільки знизити виробничі витрати а й підвищити стабільність технологічних процесів, надійність роботи обладнання та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище.

Системи енергоефективного керування енергозбереженням це програмно-технічний комплекс призначений для збору, обробки та аналізу даних, щодо споживання енергії. Ці системи забезпечують постійний моніторинг енергетичних показників, виявлення неефективних режимів роботи обладнання, контроль енергетичних втрат та підтримку прийняття управлінських рішень щодо оптимізації втрат.

Використання сучасних інформаційних технологій, засобів автоматизації, SCADA-систем та платформ енергомоніторингу дозволяє здійснювати комплексний аналіз енергетичної ефективності виробництва, своєчасно виявляти відхилення від нормативних показників та реалізовувати заходи з енергозбереження.

На сьогодні є декілька категорій систем енергозбереження, а саме, системи автоматизації та управління енергоживленням, вдосконалення технологічного обладнання, рекуперація енергії, розвиток зеленої енергетики та власної генерації.

Всі ці типи направлені на скорочення електроспоживання або знаходження інших шляхів живлення власного технологічного обладнання.

Система автоматизації та управління енергоспоживанням слугує для оптимізації витрат енергії не змінюючи основні технологічні елементи у вигляді

верстатів, тощо. Такі системи зазвичай включають в себе програмно-апаратні комплекси, які збирають дані про споживання з лічильників та датчиків в реальному часі(SCADA), після чого аналізують отримані дані і на їх основі автоматично вимикають або обмежують потужності обладнання або освітлення. Архітектура такої системи зазвичай має три рівня:

– нижній рівень – збір даних з датчиків, а саме з лічильників, датчиків, які встановлені перед обладнанням;

– середній рівень забезпечує передачу даних та включає в себе контролери та шлюзи, які збирають інформацію з датчиків та передають її на сервер для подальшої обробки;

– верхній рівень, що відповідає за обробку даних та загальне керування, включає в себе програмне забезпечення та сервер, що аналізує інформацію з датчиків, розробляє звіти на основі отриманої інформації і при виявленні відхилень від прогнозованих значень автоматично приймає рішення про відключення окремих елементів системи.

Таким чином ця SCADA-система може показувати яке саме обладнання споживає енергію в неробочий час, контролює максимально допустиме навантаження, можливість точного розрахунку витрат на енергоносії при виробництві окремої одиниці товару та контроль технічного стану енергетичного обладнання, для предиктивного обслуговування.

На сьогодні на ринку вже є такі системи , наприклад:

– Schneider Electric (EcoStruxure Resource Advisor / Power Monitoring Expert);

– Siemens (Siemens Desigo CC або Simatic Energy Management);

– ABB (ABB Ability Energy Manager);

EcoStruxure Power Monitoring Expert є локальною системою енергоживлення підприємств, основною задачею якої є контроль електромережі в реальному часі. З основних функцій можливо виділити моніторинг мережі а саме напруги, струму, використаної потужності, частоти, тощо. Також ця система може відмічати провали у напрузі, локальні перенавантаження, перекоси фаз та аварійні ситуації, що виникають. Таким чином у випадку аварійних ситуацій система реєструє

відключення, спрацювання захисту, аварії обладнання та перевантаження в мережі. Інтерфейс системи зображений на рисунку 1.1 [4].

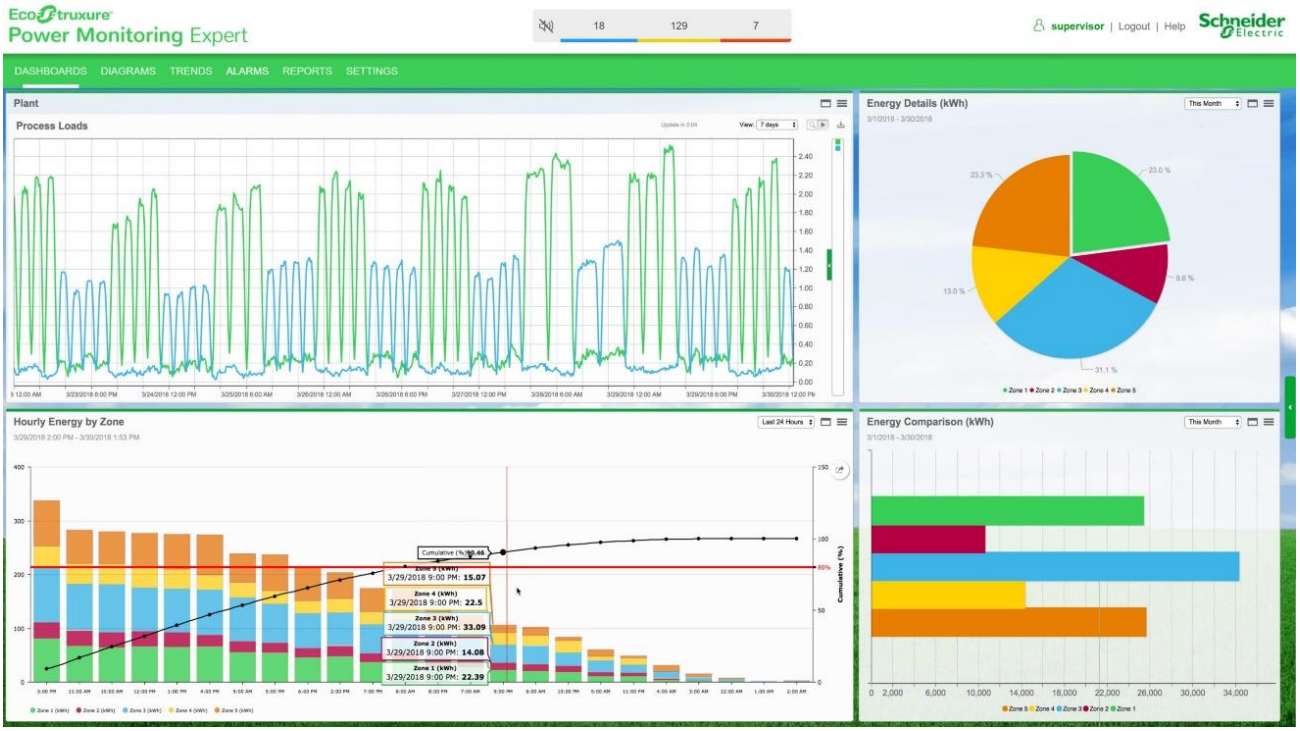


Рисунок 1.1 – Інтерфейс EcoStruxure Power Monitoring Expert

Також ця система аналізує тренди, створює графіки, ККД енергоживлення та прогнозовані навантаження. Має широкі можливості до інтеграції з іншими системами.

Таким чином може використовуватися в промисловості, а саме на заводах, виробничих лініях, тощо. В дата-центрах для контролю резервного живлення, джерела безперебійного живлення, тощо.

EcoStruxure Resource Advisor це IOT платформа, яка збирає дані та аналізує їх. В набір даних для аналізу входять всі витрати на енергоживлення та інші енергоресурси, тощо[5]. Основною метою цієї платформи є глибокий аналіз витрат у великих та розгалужених підприємствах. Формує звіти для аналізу енергоефективності підприємства та менеджменту. Інтерфейс системи зображений на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Інтерфейс системи EcoStruxure Resource Advisor

Загальна схема архітектури Schneider Electric зображена на рисунку 1.3.

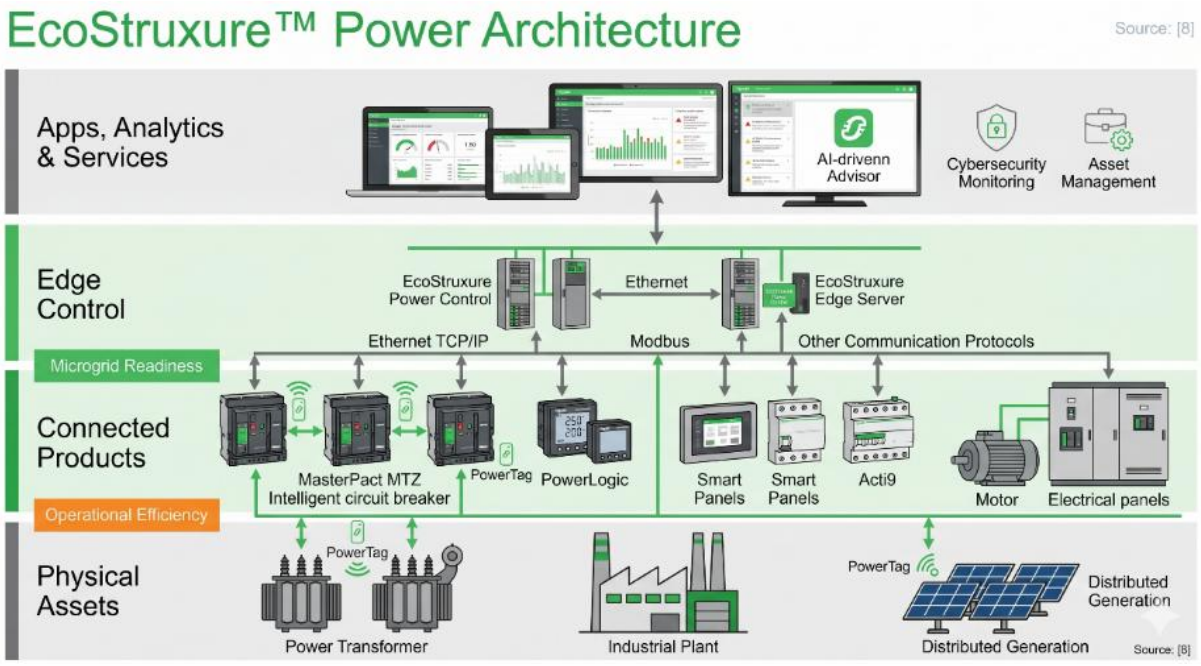


Рисунок 1.3 – Загальна архітектура Schneider Electric

Siemens Desigo CC – інтегрована платформа для керування будівлями та системи безпеки [6]. Загальний інтерфейс платформи зображений на рисунку 1.4.

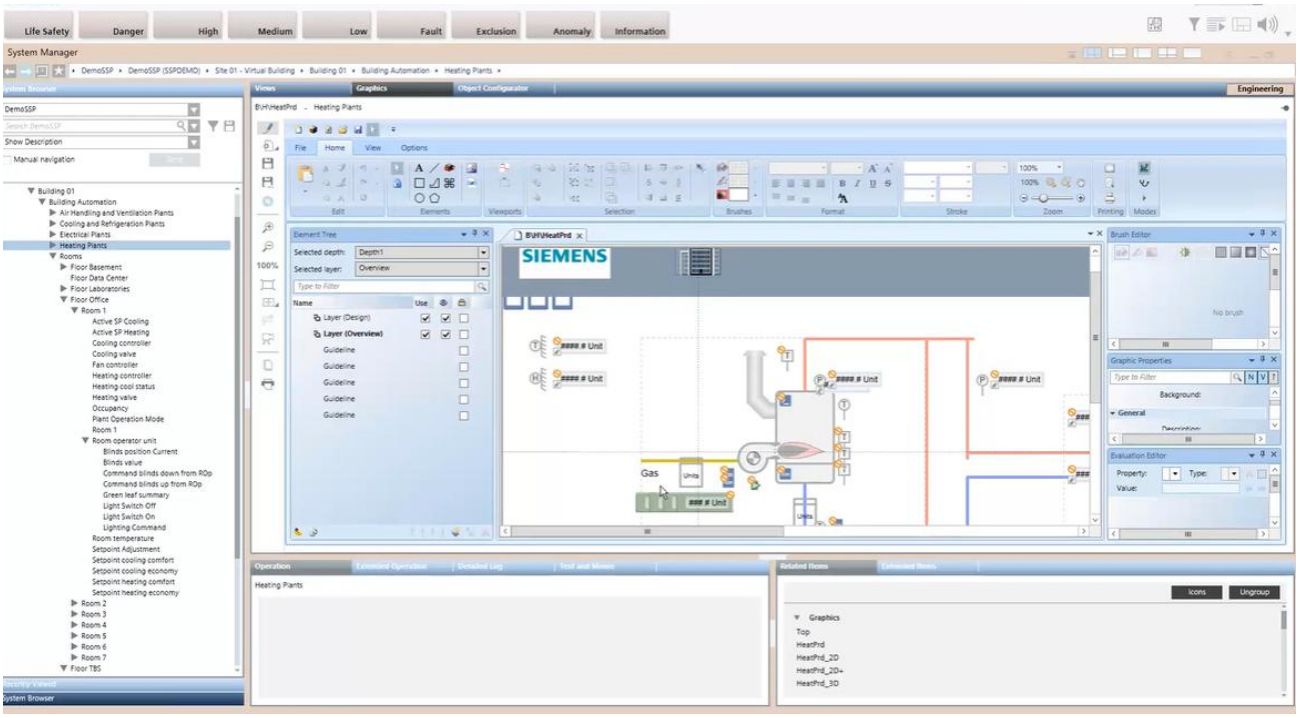


Рисунок 1.4 – Інтерфейс платформи Siemens Desigo CC

Таким чином основною мето є централізоване керування інженерними системами будівлі. Ця платформа включає в себе контроль вентиляції, систем кондиціонування, системи опалення, тощо.

Керування електроживленням включає в себе ввідно-розподільні пристрої, лічильники, генератори, джерела безперебійного живлення. Також включає в себе керування освітленням та створення сценаріїв роботи для оптимізації витрат. До системи керування безпекою входять пожежна сигналізація, контроль доступу та відеоспостереження.

Таким чином ця платформа дає можливість створити диспетчерський центр, в якому оператор може контролювати план будівлі, стан обладнання, аварії та тривоги і мати статистику у виглядів трендів та графіків для прийняття рішень по керуванню інфраструктурою будівлі.

Simatic Energy Manager – це система енергетичного менеджменту підприємства. Ця система збирає дані від лічильників та датчиків і формує звіти про споживання від окремого обладнання до цехів. Рахує загальне ККД для контроля ефективності виробництва. Інтерфейс системи зображений на рисунку 1.5 [7].



Рисунок 1.5 – Інтерфейс системи Simatic Energy Manager

ABB Abilit Energy Manager – хмарна платформа для моніторингу, аналізу та оптимізації енергоспоживання підприємств, тощо. Має декілька рівнів, перший з яких включає в себе датчики, лічильники, частотні перетворювачі, електродвигуни, ПЛК та SCADA. Наступним рівнем є ABB Ability Edge Gateway, що є промисловим шлюзом і слугує для з’єднання в одну мережу обладнання з датчиками та хмарними сервісами ABB. Цей шлюз має можливість фільтрування та попереднього аналізу отриманих даних з датчиків. Також є можливість виконувати окремі правила та сценарії [8].

Таким чином ця система є кінцевим елементом, яка виконує моніторинг у реальному часі приймаючи дані з датчиків через шлюз, може розраховувати енергетичні показники та виявляти неефективні процеси в процесі виробництва. Формує звіти для аудиту енергоефективності, підтримує стандарти ISO 50001, тощо. Оптимізація споживання з використанням цієї платформи полягає у виявленні пікових навантажень, формування рекомендацій щодо зменшення енергоспоживання на основі проаналізованих даних за визначений період, балансування навантажень та аналізу ефективності від окремих процесів до загального виробництва. Також ця система має можливість відслідковувати стан обладнання, прогнозувати навантаження, інтегруватися з системами автоматизації.

Загальна схема архітектури ABB зображено на рисунку 1.6.

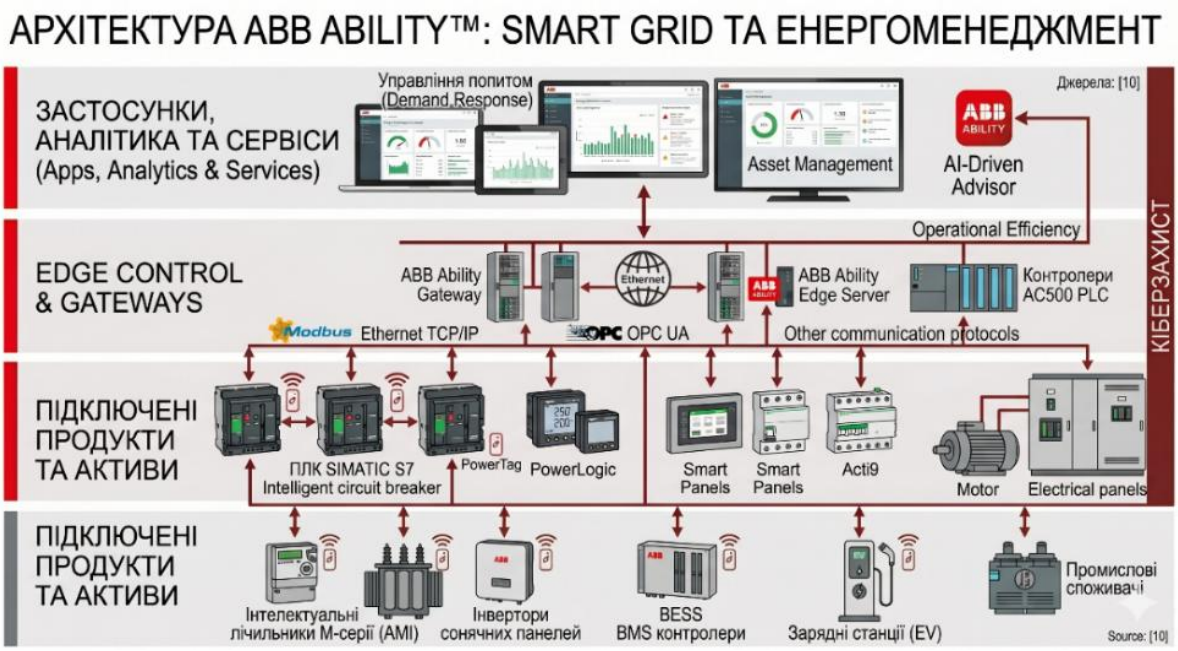


Рисунок 1.6. – Загальна схема архітектури ABB Ability Energy Manager

Прикладом використання таких систем може слугувати проект очисної конструкції від компанії Світовир, що зображений на рисунку 1.7 [9].

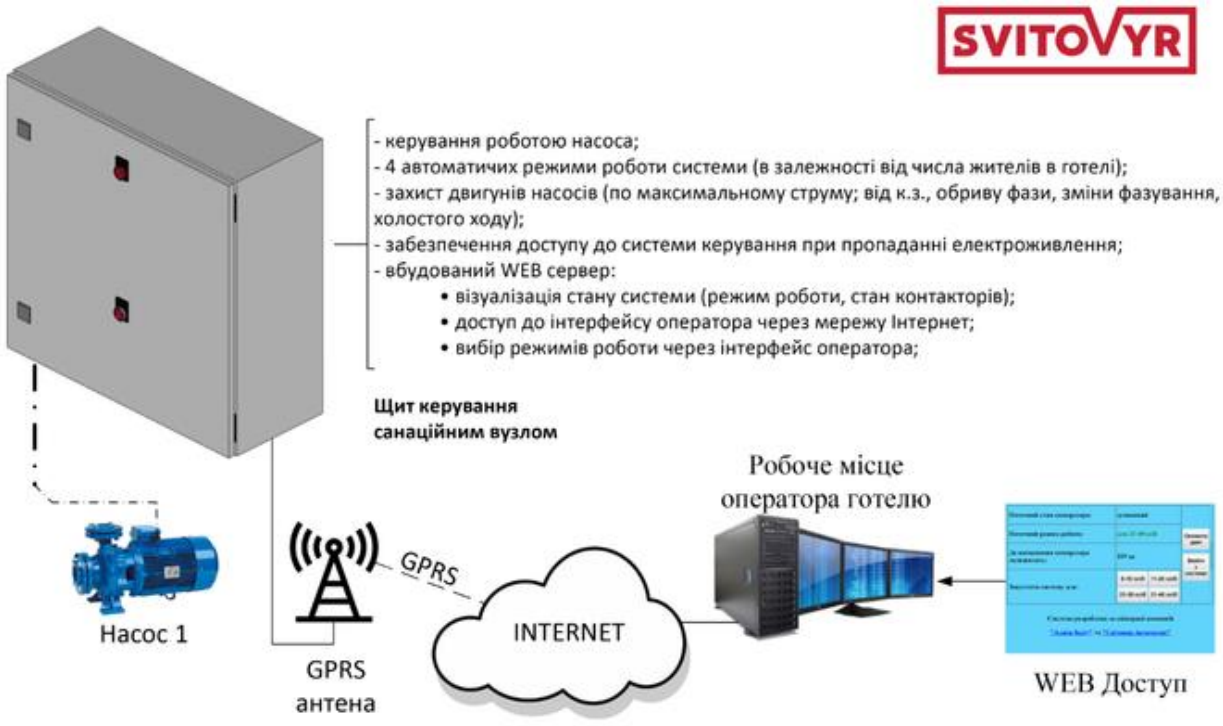


Рисунок 1.7 – Проект очисної споруди від компанії Світовир

В цьому проекті використовується контроль насосу з використанням Arduino, який вмонтовано в щит керування. На базі Arduino реалізовано програму керування та web-сервер. Сам щит керування забезпечує захист насосу по струмі та напрузі.

В залежності від кількості людей у готелі, для якого розроблена ця система, може бути чотири автоматичних режимів роботи. Також щит обладнаний безперебійним блоком живлення для повідомлення про критичні збої оператору навіть без зовнішнього живлення.

1.2 Аналіз методів контролю електроспоживанням на підприємстві

Для контролю електроживленням на підприємстві використовуються методи АСК ТП, тобто виконується оптимізація витрат шляхом усунення людського фактору та мінімізації надлишкових витрат енергії шляхом оптимізації роботи устаткування.

Першим методом контролю електроспоживанням є динамічне регулювання продуктивності [10].

На виробництві у багатьох виробничих процесах навантаження постійно змінюється і в ТП виникають технологічні простої, як планові наприклад ремонти, заміна інструментів, переналагоджування, тощо так і непланові у вигляді аварій, тощо. У час простоїв обладнання продовжує працювати з тим же енергоспоживанням що і при роботі і тоді постає завдання у скороченні витрат енергії саме в ці моменти.

Для вирішення цього питання існують алгоритми інтелектуального вимкнення та «сплячого режиму» [11]. Алгоритми інтелектуального вимкнення задають сценарії роботи обладнання:

– на основі активності, тобто відбувається відслідковування активності основних елементів ТП, і у випадку коли відбувається простої або паузи, які відбуваються довше заданого часу, в такому випадку обладнання вимикається.

– прогнозовані, тобто система SCADA формує графіки неактивності обладнання, згідно попередніх спостережень і таким чином відключає обладнання

саме в ці моменти.

– power-aware, перемикають обладнання на ДБЖ у випадках аварій

– згідно пріоритетів, тобто у випадку дефіциту живлення вимикають обладнання починаючи з найменш важливих.

Для роботи алгоритму необхідні наступні етапи:

– збір даних а з датчиків;

– аналіз попередньо зібраної інформації та формування звітів;

– попередження операторів;

– збереження стану обладнання;

– вимкнення живлення на окремих елементах системи.

Сплячий режим може замінювати повне вимкнення обладнання, і полягає він в програмному обмеженні потужності обладнання, тобто наприклад вимкнення вентиляторів, нагріву, двигунів, тобто елементів що споживають основну частку електроенергії зберігаючи системи керування в активному режимі.

Наступним способом скорочення витрат є управління піковими навантаженнями, цей спосіб призначений для обмеження загального пікового споживання на виробництві, часто такий спосіб використовується коли є обмеження у використанні електроенергії, чи то обмеження від постачальників, чи то обмеження від генерації потужності, на прикладі сонячних або вітряних електростанцій, які можуть давати максимальне значення пікового навантаження[12]. Схематичне зображення процесу зменшення пікового навантаження зображено на рисунку 1.8.

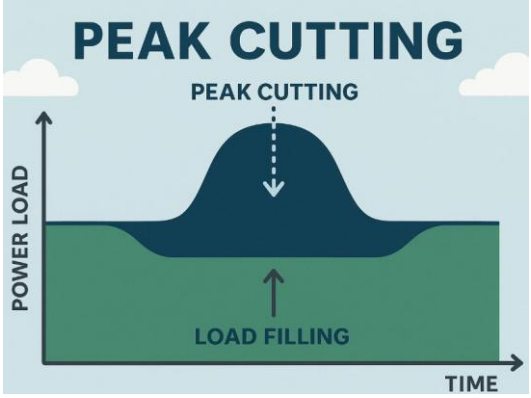


Рисунок 1.8 – Зменшення пікового навантаження

Для управління піковими навантаженнями необхідно:

– збирати дані про обладнання та аналізувати максимальні споживані потужності як окремого обладнання так і всіх обладнань в цілому для розрахунку максимальних потужностей, що споживаються;

– керувати обладнанням і вимикати його при можливому перевищенні порогу споживаної потужності.

Таким чином, цей алгоритм автоматично визначає непріоритетних споживачів і вимикає їх якщо є ризик перевищення порогу навантаження.

Наступним методом є впровадження вдосконаленого управління процесами[13].

Цей метод будує цифрову модель ТП, з урахуванням інформації про сировину, яка надходить з датчиків, наприклад, якщо в ТП закладено використання деревини, яка має властивості набирати вологу або вже може бути вологою та недосушеною, і таким чином встановивши датчики вологості на вхідному етапі система може визначити, що через вологість весь процес може затягнутися на визначений час і корегує режим роботи обладнання.

Таким чином зберігається постійність результатів ТП, без залежності від людського фактору, збільшується ресурси обладнання через оптимальні режими роботи і тим самим зменшуються загальні витрати енергоресурсів.

Для використання всіх цих методів необхідно щоб інформація з датчиків швидко потрапляла до серверу. Таким чином для цього використовуються мережеві протоколи, тобто набори правил, стандартів та алгоритмів, вони пов’язують між собою датчики, контролери та ПЛК та сервери. Можуть працювати на різних рівнях, стандартні протоколи зазвичай не використовуються в промисловості для з’єднання датчиків та серверів. Для використання в промисловості протоколи повинні забезпечувати миттєву реакцію і не завантажувати сервери у випадку коли таких датчиків дуже велика кількість.

Для цього в системах SCADA використовуються наступні протоколи:

– Modbus (RTU/TCP), для RTU працює через RS-485, дані передаються у бінарному форматі з архітектурою Master/Slave [14]. Modbus TCP використовує

стандартні пакети TCP/IP, загальна архітектура зображена на рисунку 1.9;

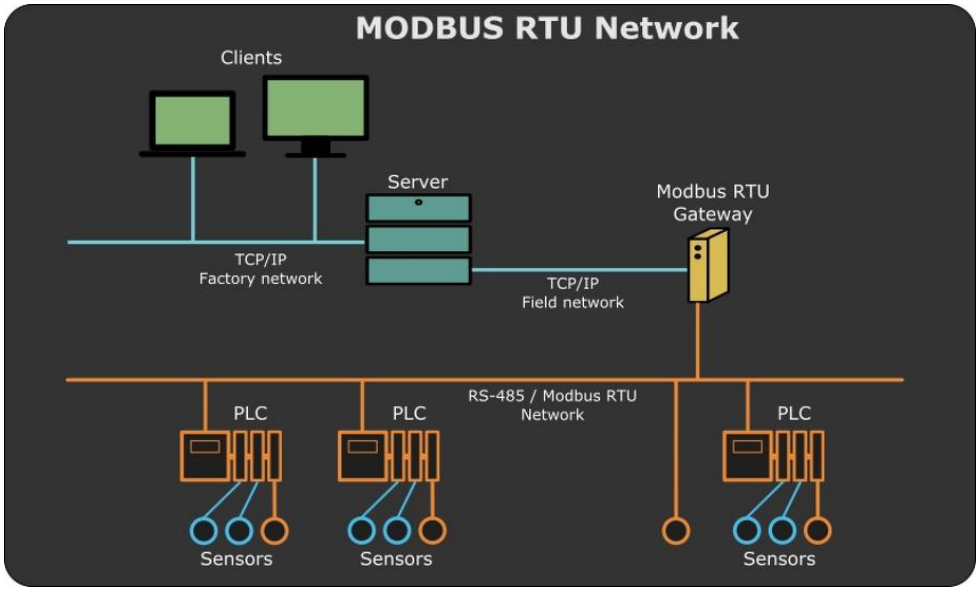


Рисунок 1.9 – Архітектура MODBUS

– Profibus / Prodigy. Profibus – швидкісний послідовний протокол для зв'язку ПЛК з периферією [15]. Prodigy – версія на базі Industrial Ethernet. Підтримує роботу в реальному часі, архітектура Profibus зображена на рисунку 1.10;

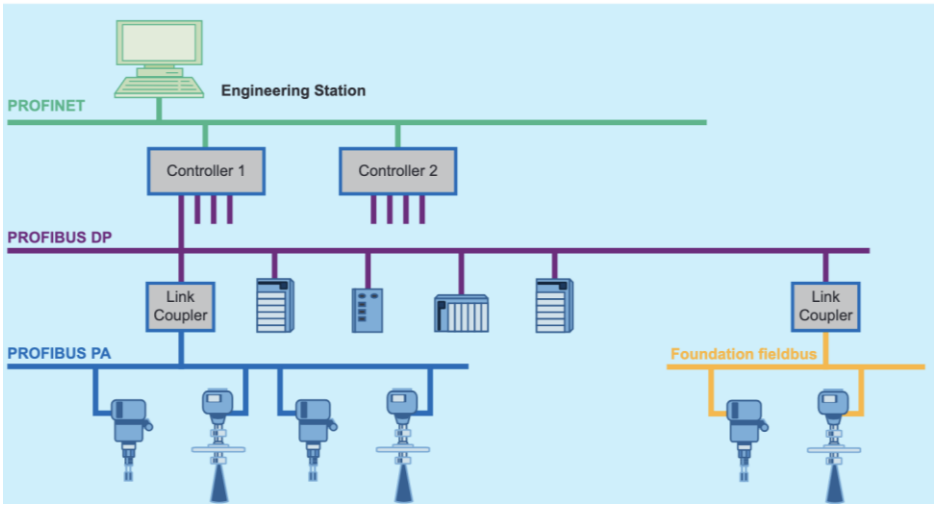


Рисунок 1.10 – Архітектура Profibus

– OPC UA – кросплатформений стандарт обміну даними, розроблений для промислової автоматизації, забезпечує шифрування даних, автентифікацію та

контроль доступу та передає повну інформацію про об'єкт (його метадані, структуру та статус) [16]. Архітектура OPC UA зображена на рисунку 1.11;

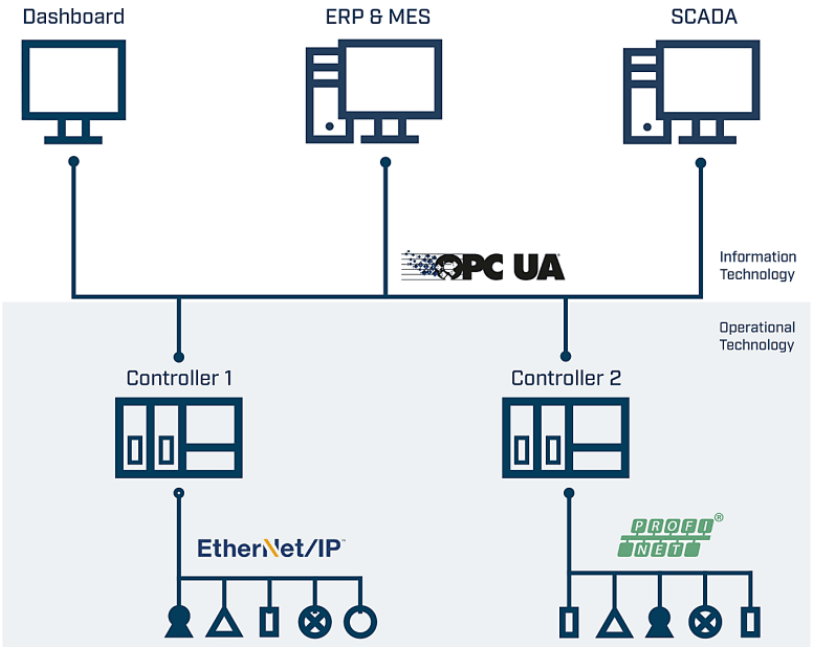


Рисунок 1.11 – Архітектура OPC UA

– MQTT – мережевий протокол, з моделлю обміну повідомленнями «Publish/Subscribe» [17]. Він був розроблений спеціально для систем з обмеженими ресурсами (як ESP32) та каналів зв'язку з низькою пропускною здатністю. Архітектура MQTT зображена на рисунку 1.12.

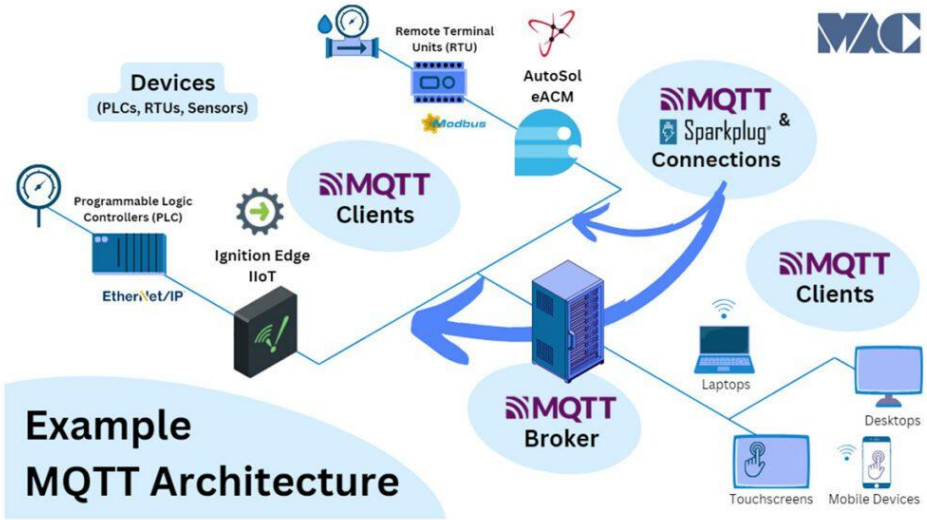


Рисунок 1.12 – Архітектура MQTT

2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ У ПРОМИСЛОВОМУ ПРИМІЩЕННІ

2.1 Вибір електронних компонентів для побудови системи керуванням електроживленням у промисловому приміщенні

Енергоефективне керування електроживленням полягає у розробці системи, яка б відстежувала присутність людей та рівень освітленості у приміщенні. Також ця система повинна забезпечувати автоматичне вимкнення електроприладів від мережі при відсутності персоналу на робочому місці.

Таким чином постає завдання підбору електроніки, яка б забезпечила всі ці можливості.

Для визначення електроніки, що буде використовуватися в цій системі необхідно побудувати функціональну схему, на якій будуть зображені основні компоненти системи. Функціональна схема зображена на рисунку 2.1.

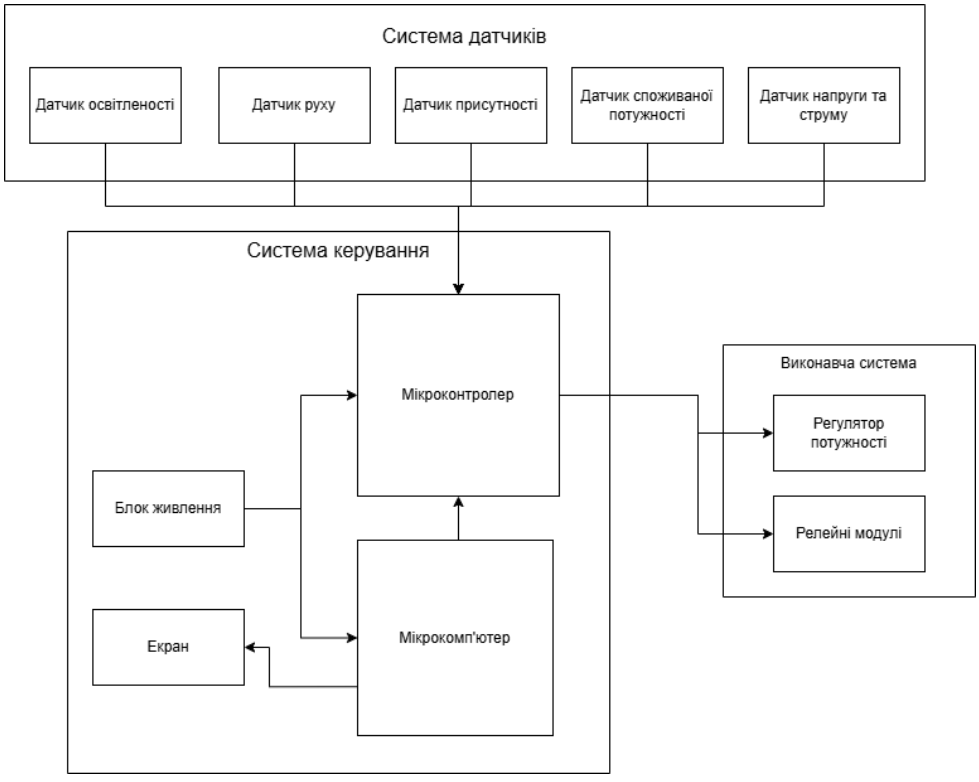


Рисунок 2.1 – Функціональна схема системи керуванням електроживленням

Основним елементом цієї системи є мікроконтролер, який може виконувати керування всією периферією. Він повинен підтримувати всі стандартні інтерфейси передачі даних, мати низьке енергоспоживання, мати як цифрові так і аналогові входи та виходи. Також мікроконтролер повинен мати достатні характеристики для встановлення на нього прошивки.

На сьогодні є широкий вибір мікроконтролерів, що дозволять як приймати сигнали з датчиків так і керувати периферійними пристроями.

Першим з таких мікроконтролерів є мікроконтролери Arduino[18], а саме налагоджувальні плати з цими мікроконтролерами, які розроблені для простого підключення датчиків та перепрограмування мікроконтролерів. Серію налагоджувальних плат Arduino зображено на рисунку 2.2.

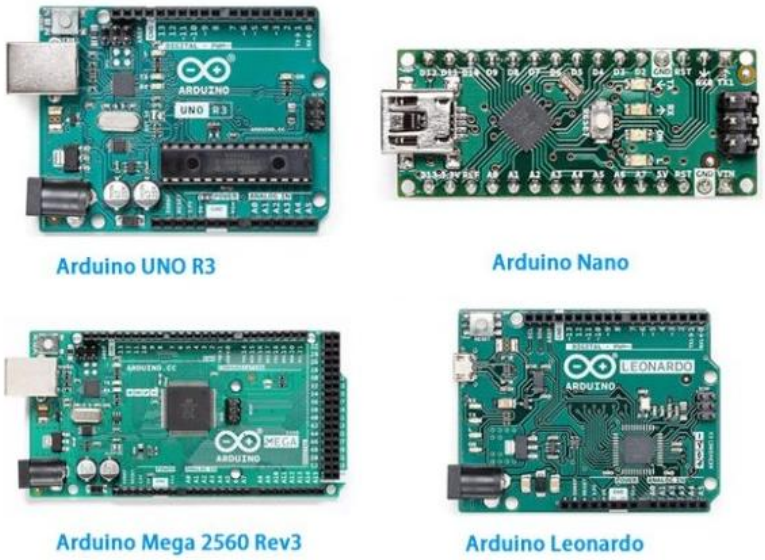


Рисунок 2.2 – Налагоджувальні плати Arduino

Ці макетні плати відрізняються між собою мікроконтролером, що використовується, та кількістю пінів, до яких можливе підключення зовнішніх пристроїв.

Arduino Uno та Arduino Nano мають один і той же мікроконтролер ATmega328P [19]. Ці мікроконтролери мають 14 цифрових входів/виходів, 6 аналогових входів. Для роботи цієї плати необхідно зовнішнє живлення від 7 В до 12 В. Flash пам’ять цих плат становить 32Кб.

Схема виводів Arduino Nano зображено на рисунку 2.3.

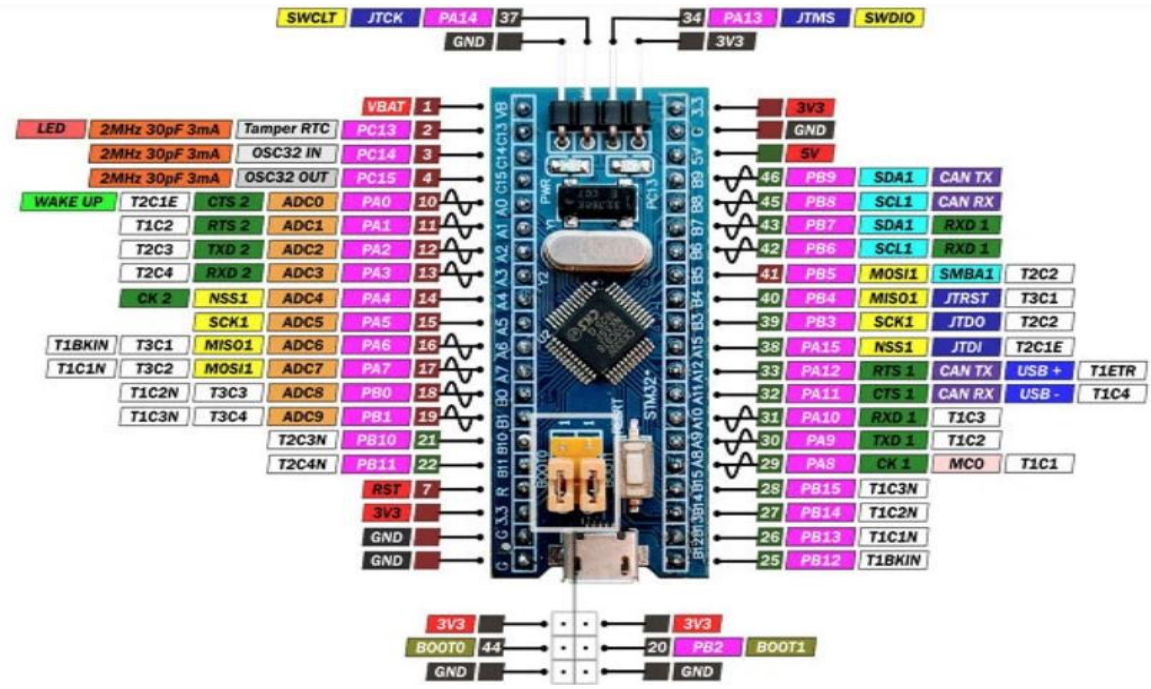


Рисунок 2.3 – Схема виводів Arduino Nano

Розміри цієї плати становлять 43x18 мм, через що її зручно використовувати у проєктах де є вимоги до компактності.

Схема виводів Arduino Uno зображено на рисунку 2.4.

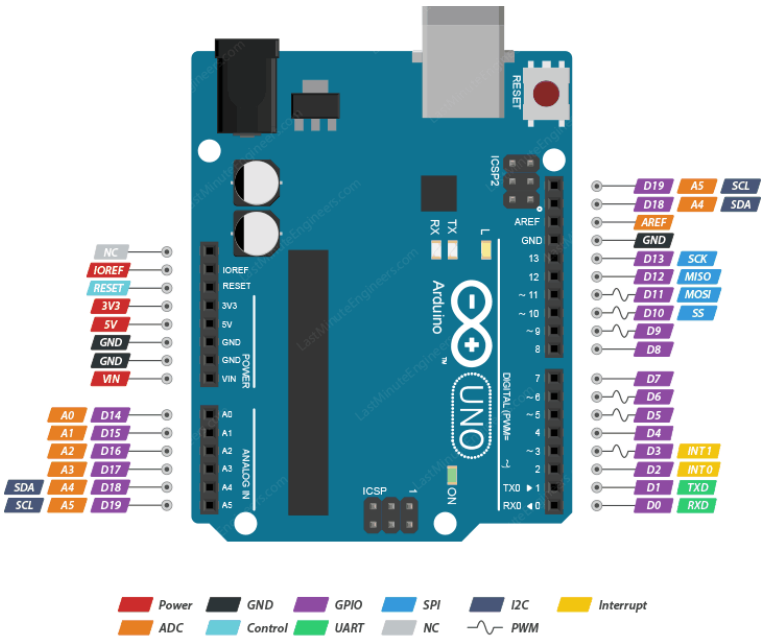


Рисунок 2.4 – Схема виводів Arduino Uno

Розміри Arduino Uno становлять 62.5x50.5 мм. Перевагами цих плат є невеликі розміри, низьке енергоспоживання, зручні побудови на таких мікроконтролерах невеличких проєктів. Низька вартість таких налагоджувальних плат.

Недоліками є невелика кількість виходів, низька продуктивність мікроконтролера та маленький об’єм внутрішньої пам’яті, що робить неможливим її використання у складних проєктах.

Наступною налагоджувальною платою із серії Arduino є Arduino Mega 2560[20]. В своєму складі вона має мікроконтролер ATmega 2560 з тактовою частотою 16МГц, який має EEPROM – 4Кб, SRAM – 8Кб та Flash пам’ять – 256 Кб. Цей мікроконтролер має 54 цифрових входів/виходів, 15 PWM виходів та 16 аналогових входів. Також має 4 інтерфейса UART для комунікації.

Схема виводів Arduino Mega 2560 зображено на рисунку 2.5.

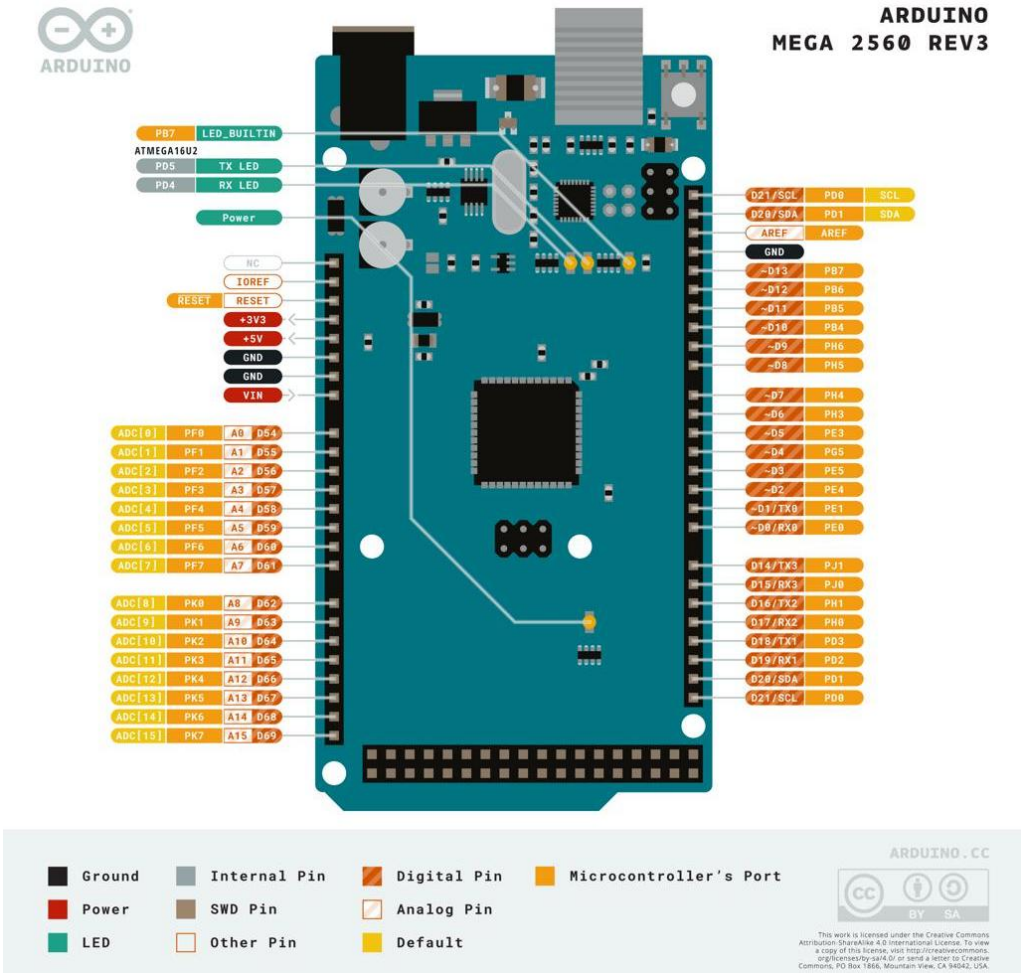


Рисунок 2.5 – Схема виводів Arduino Mega 2560

Перевагою цієї плати є велика кількість пінів, досить багато пам’яті, що дозволяє будувати складні проєкти, велика кількість вже готових проєктів які відкриті для використання через велику популярність. Також до переваг можливо віднести низьку вартість таких плат.

Недоліками цієї плати є досить великі розміри, що становлять 53.4x101.6мм. Менша продуктивність у порівнянні з більш сучасними платами, побудованими на 32-х бітних мікроконтролерах.

Наступною платою що можна використати у системі керування електроживленням є ESP32 [21]. Це також налагоджувальна плата, яка має 32-бітний мікроконтролер Xtensa LX6, який є вже не мікроконтролером а мікропроцесором, що має два ядра, 240 МГц тактову частоту, 520 Кб SRAM, 4 Мб Flash пам’ять, вбудований Wi-Fi та Bluetooth. В своєму складі має 34 піни GPIO та 2 аналогових виходи. Підтримує стандартні інтерфейси UART, SPI, I2C, I2S,CAN.

Живлення плати становить 3.3В, що може стати перешкодою для підключення стандартних датчиків, у яких живлення зазвичай становить 5В. Схема виводів ESP32 зображено на рисунку 2.6.

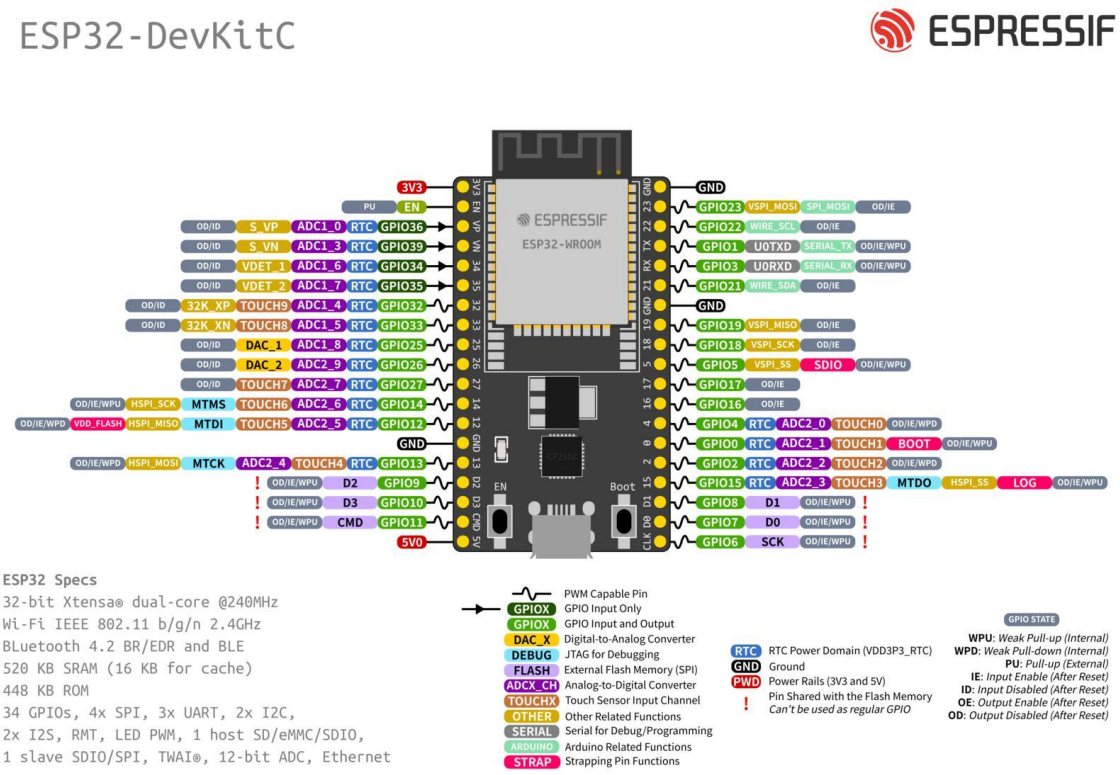


Рисунок 2.6 – Схема плати ESP 32

Перевагами цієї плати є висока продуктивність у порівнянні з Arduino, вбудований WI-Fi та Bluetooth. Недоліками є використання 3.3 В у якості логічного рівня, GPIO мають обмеження у використанні.

Таким чином, із проаналізованих раніше мікроконтролерів можливо визначити, що саме ESP32 буде використовуватися в якості основного мікроконтролера та заміщувати собою ще й роль мікрокомп’ютера в системі керування.

Наступним елементом є система датчиків, що складаються з датчика освітлення, датчика руху, датчика присутності, датчика споживаної потужності та датчика напруги і струму.

Таким чином першим є датчик освітлення, що використовується для вимірювання рівня освітленості у приміщенні. Першим з типів таких датчиків є звичайний фоторезистор, у якого змінюється опір при зміні рівня освітленості. Однак він має недоліки, а саме невисоку точність, повільну реакцію. Такий датчик зображено на рисунку 2.7.



Рисунок 2.7 – Фоторезистор

Наступним є цифровий датчик освітленості, використовується для вимірювання фонового освітлення. Вимірює рівень освітленості у люксах, підключається за допомоги інтерфейса I2C [22]. Складається з вбудованого сенсора та цифрового перетворювача. Точність вимірювання 1 люкс. Живлення можливе як від 3В так і від 5В. Цей датчик зображений на рисунку 2.8.



Рисунок 2.8. – Датчик освітлення GY-302 BH1750FVI

Наступним датчиком є TSL261, схожий до попереднього датчика але має окремі канали для видимого та інфрачервоного світла, має високу чутливість та широкий динамічний діапазон[23]. TSL261 зображений на рисунку 2.9.

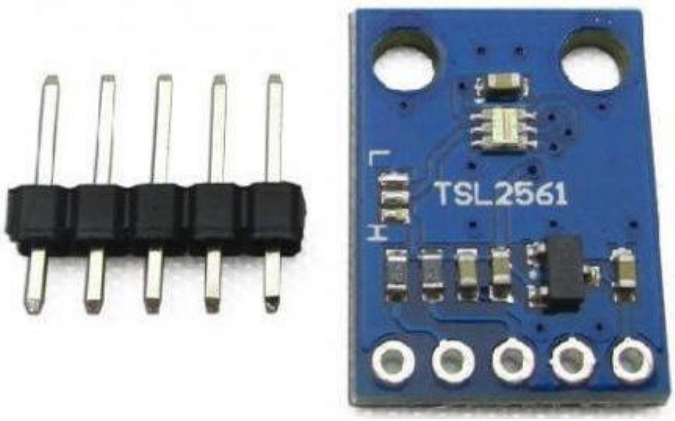


Рисунок 2.9 – Датчик освітленості TSL261

Останнім датчиком є VEML7700. Це високоточний датчик освітленості, що призначений для вимірювання рівня навколишнього світла [24]. Побудований на чутливому фотодіоді з широким динамічним діапазоном та низьким рівнем шуму. Підтримує автоматичне налаштування чутливості. Інтерфейс підключення цього датчика – I2C. Живлення становить від 3.3 до 5В. VEML7700 зображений на рисунку 2.10.

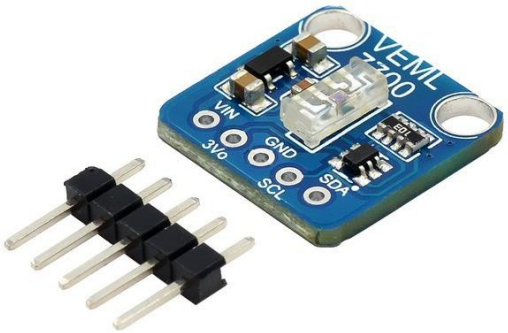


Рисунок 2.10 – Датчик освітлення VEML7700

Таким чином, в роботі планується використовувати VEML7700, через його високу чутливість, живлення 3.3В та інтерфейс I2C.

Наступним датчиком є датчик руху, для фіксування людей у приміщенні. Такі датчики поділяються на наступні типи:

– інфрачервоні, фіксують зміну інфрачервоного випромінювання;

– мікрохвильові, активні датчики, що випромінюють високочастотні хвилі після чого аналізують їх відбиття;

– ультразвукові, випромінюють звукові хвилі високої частоти та аналізують їх відбиття;

– комбіновані, включають в себе декілька різних типів.

Першим з інфрачервоних датчиків руху є HC-SR501, має живлення від 4.5 - 20В з дальністю виявлення до 7м та кутом огляду до 120°. Споживає до 60мкА у режимі очікування [25]. Цей датчик зображений на рисунку 2.11.



Рисунок 2.11 – Інфрачервоний датчик руху

Його перевага полягає у низькій ціні, простому підключенні, малому енергоспоживанні. Недоліками є неможливість детекції нерухомих об’єктів, можлива похибка під дією зовнішніх факторів та необхідність калібрування після ввімкнення. Також великим недоліком є мінімальна напруга живлення, що складає 4.5 В, що не дає можливості використання у ESP32.

Наступним типом датчиків є мікрохвильові датчики руху, а саме HW-MS03[26]. Він працює за принципом ефекту Доплера що виявляє рух за допомоги мікрохвильового випромінювання в діапазоні від 2.4 – 5.8 GHz. Напруга живлення становить від 3 В до 28В. Споживання становить 3мА, дальність виявлення становить до 9м. Датчик зображений на рисунку 2.12.



Рисунок 2.12 – Мікрохвильовий датчик руху HW-MS03

Перевагами такого датчика є можливість праці у темряві, менша похибка від зовнішніх чинників, можливість детекції руху за перешкодами, має великий кут охоплення, а саме до 360° та високу чутливість.

Недоліками є можливість хибних спрацювань, чутливий до електромагнітних завад.

Наступним датчиком є ультразвуковий датчик руху а саме HC-SR04, який випромінює ультразвуковий імпульс та вимірює час повернення відбитого сигналу[27].

Його робоча напруга становить 5В, споживання становить до 15мА, частота – 40кГц, можливе вимірювання до 4 м з точністю до 3мм. Кут вимірювання становить 15°. Цей датчик зображений на рисунку 2.13.



Рисунок 2.13 – Ультразвуковий датчик HC-SR04

Він не підходить з декількох причин, першою з яких є живлення 5В, іншою причиною є мала відстань вимірювання, що становить всього 4 м. Чого зазвичай недостатньо для повноцінної роботи системи.

Останнім з датчиків відстані є комбіновані датчики, які включають в себе декілька різних типів, вони включають в собі використання двох різних окремих датчиків, які таким чином знижують можливість похибки спрацювання.

Наступним з датчиків є датчик присутності, він визначає наявність людини у приміщенні, по принципу роботи це датчик руху з можливістю визначення нерухомої людини. Таким датчиком є HLK-LD2410C, він працює на частоті 24ГГц, використовуючи безперервний сигнал з частотною модуляцією[28]. Таким чином оброблюючи сигнал, він може визначати наявність людини у просторі та відстань до неї. Максимальна дальність виявлення становить 6 м. Має високий опір до перешкод, широкий кут огляду до 60°. Живлення відбувається від 3В. Цей датчик зображений на рисунку 2.14.

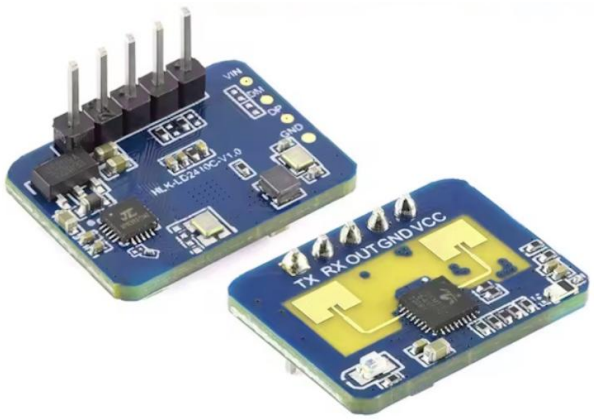


Рисунок 2.14 – Датчик присутності LK-LD2410C

Таким чином за сукупністю переваг він підходить як датчик руху так і як датчик присутності.

В якості датчика споживаної потужності можливо використати датчик PZEM-004T, який вимірює напругу, струм, потужність, енергію та частоту[29]. Використовуючи цей датчик можливо контролювати стан енергомережі на підприємстві. Використовується для змінної напруги до 260 В зі струмом до 100А. Датчик зображений на рисунку 2.15.



Рисунок 2.15 – Вимірювач напруги PZEM-004T

Цей датчик заміщає собою як датчик споживаної потужності так і датчик напруги та струму.

У виконавчій системі використовується релейний модуль для вимкнення та увімкнення приладів та регулятор потужності для керування освітленням.

В якості релейного модуля використовується чотириканальний релейний модуль, електромеханічне реле, яке має 4 канала, з максимальним струмом до 10А та 220В змінної напруги, підтримує комунікацію по Wi-FI. Чотириканальний релейний модуль зображено на рисунку 2.16 [30].

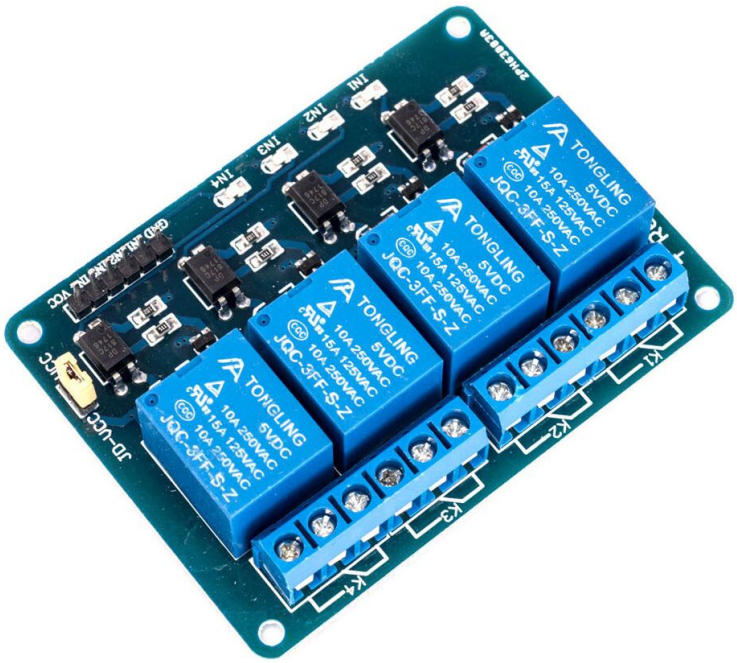


Рисунок 2.16 – Чотириканальний релейний модуль

Його перевагами є велика кількість каналів та до 10 А струму, що може через нього проходити на один канал.

Останнім елементом є регулятор потужності, що використовується для керування освітленням, він може плавно регулювати яскравістю освітлення в приміщенні.

Таким регулятором потужності є теристорний вимикач, має мінімальну напругу керування 3.3 В, призначений для змінної напруги 220В та до 10А струму. Має 2 канала для окремого керування. Тиристорний вимикач зображений на рисунку 2.17.

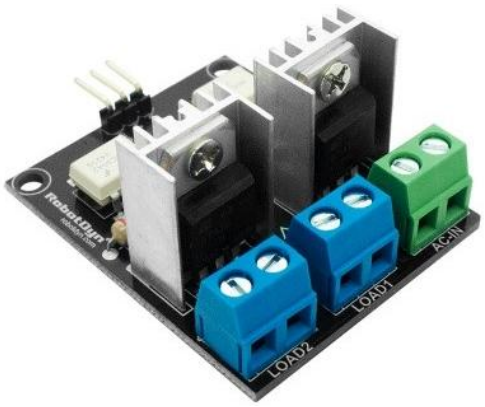


Рисунок 2.17 – Тиристорний вимикач

2.2 Побудова схеми підключення системи керування освітленням

Таким чином було розроблено схему підключення системи керування освітленням та живленням, яка зображена на рисунку 2.18.

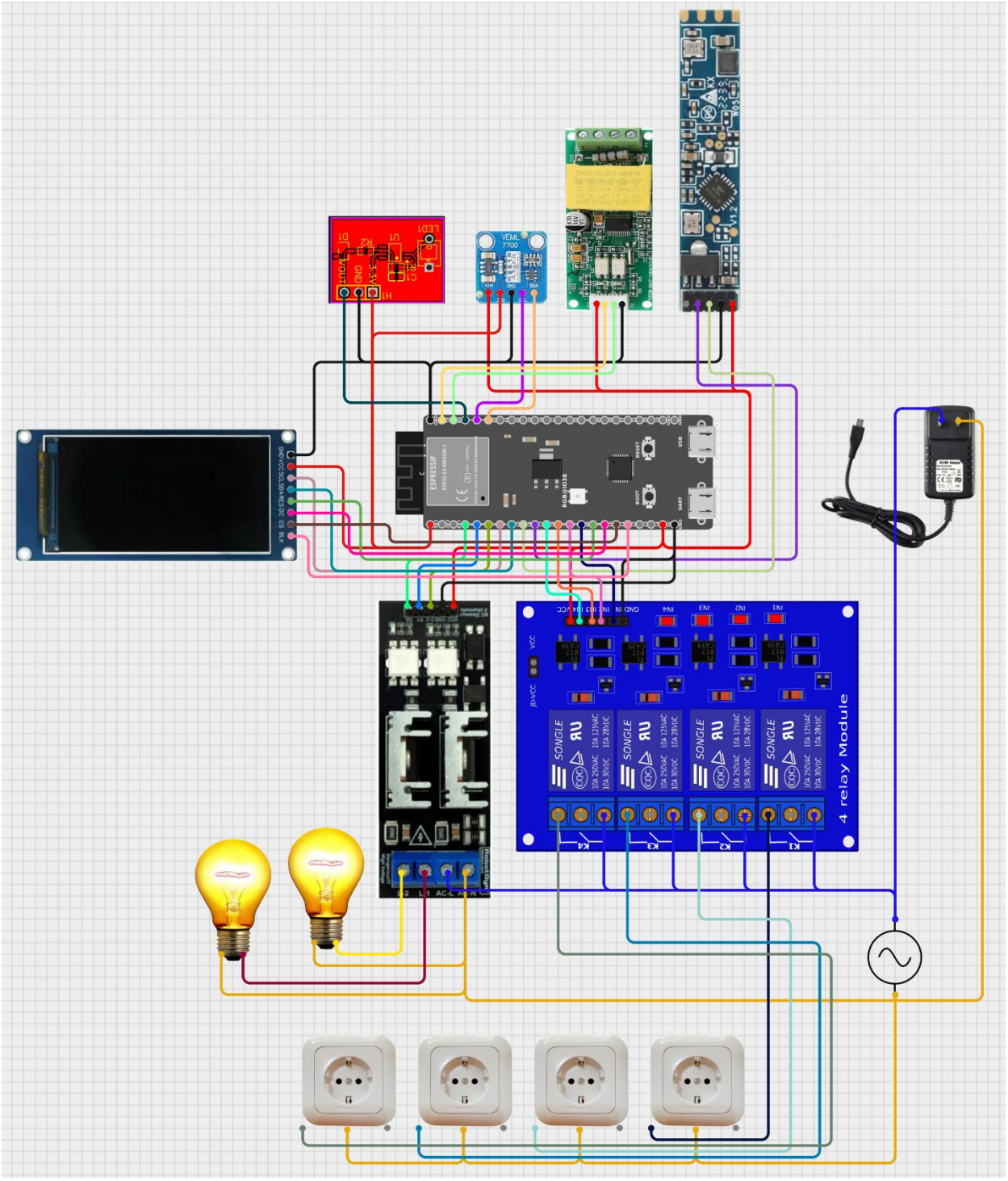


Рисунок 2.18 – Схема підключення системи керування освітленням та електроживленням у промисловому приміщенні

Після підключення основних компонентів системи було виконано з'єднання периферійних пристроїв із мікроконтролером ESP32-S3-WROOM-1.

Датчик освітленості підключено до мікроконтролера через сигнальний вихід, який з'єднано з контактом GPIO1.

Для підключення цифрового датчика освітленості VEML7700 використано інтерфейс I^2C. Лінію синхронізації SCL підключено до контакту GPIO2, а лінію передачі даних SDA – до контакту GPIO42 мікроконтролера ESP32.

Обмін даними з датчиком вимірювання напруги, струму та потужності PZEM здійснюється через послідовний інтерфейс UART. Контакти RX і TX датчика з'єднано з відповідними контактами TX і RX мікроконтролера.

Датчик присутності LD2410B також підключено за допомогою інтерфейсу UART. Вивід TX датчика підключено до GPIO16, а вивід RX – до GPIO17.

Керування регулятором потужності здійснюється через сигнали Z_C, D1 та D2, які підключені до контактів GPIO4, GPIO5 та GPIO6 відповідно.

Для керування зовнішніми навантаженнями використано чотириканальний релейний модуль. Його входи IN1, IN2, IN3 та IN4 з'єднано з контактами GPIO46, GPIO3, GPIO8 та GPIO18 відповідно.

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ

3.1 Розробка алгоритму програмного забезпечення

Програмно-апаратний комплекс для енергоефективного керування електроспоживанням повинно контролювати наявність людей у приміщенні, рівень освітлення та характеристики мережі, такі як напруга, струм та споживана потужність. В залежності від наявності людей ПЗ повинно контролювати світло і при їх відсутності вимикати розетки. При перевищенні напруги, струму або споживаної потужності ПЗ повинно автоматично вимкнути освітлення та навантаження, для уникнення аварійних ситуацій і поломки обладнання.

Також ПЗ повинно мати декілька режимів роботи, які розраховані на аварійну ситуацію, звичайну роботу, ручний режим, нічний режим та режим економії електроенергії.

Алгоритм програмного забезпечення поділений на основні структурні елементи:

– загальний алгоритм;

– ініціалізація датчиків;

– зчитування датчиків;

– перевірка аварій;

– робота окремих режимів, таких як автоматичний режим, ручний режим, нічний режим та додатковий ECO-режим;

– оновлення екрану.

В загальному алгоритмі виконується ініціація системи, зчитування інформації з датчиків, перевірка чи не знаходиться в даний момент система в аварії, якщо аварія є тоді використати аварійний режим. Якщо аварії немає, тоді перейти до обраного режиму роботи і оновити екран зі збереженням статистики.

Загальний алгоритм зображений на рисунку 3.1.

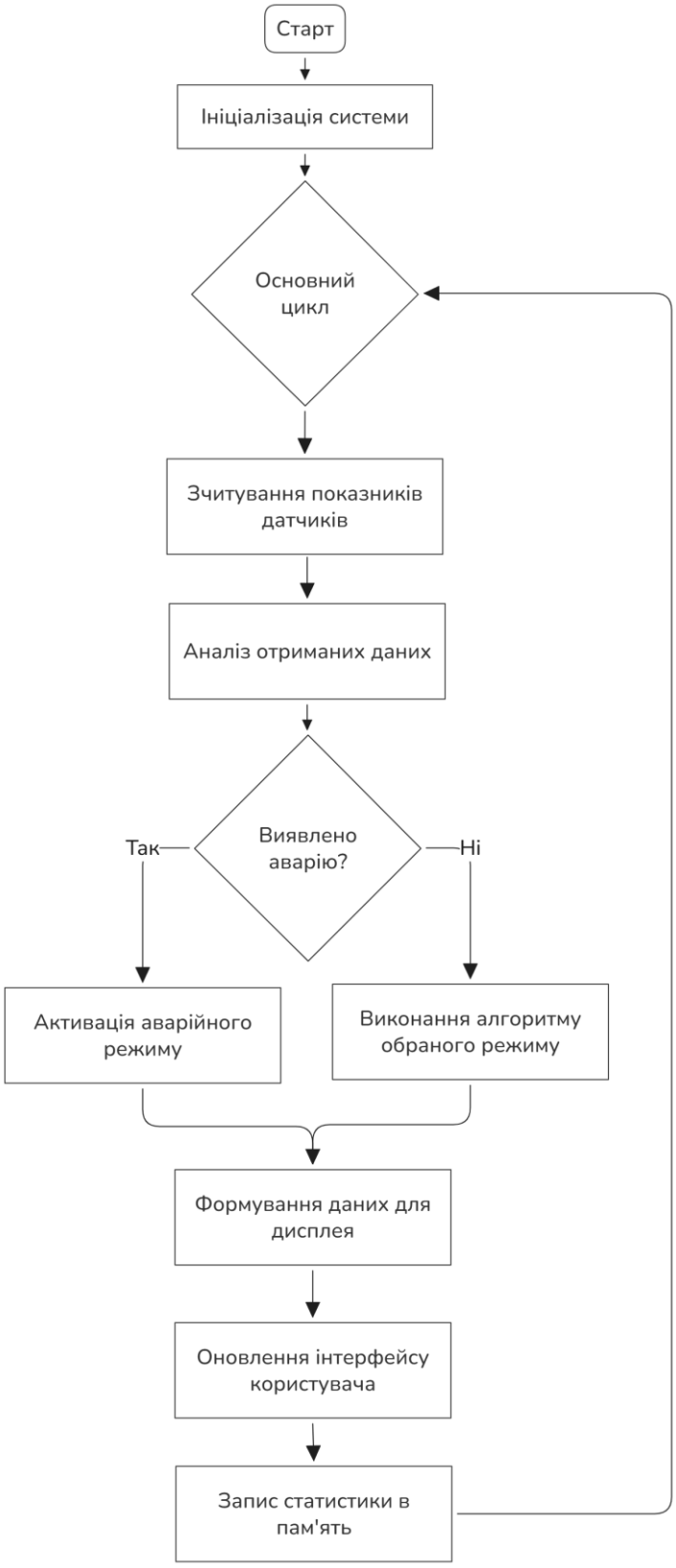


Рисунок 3.1 – Загальний алгоритм програми

Наступним алгоритмом є алгоритм ініціалізація системи, екрану та датчиків. Алгоритм ініціалізації зображено на рисунку 3.2.

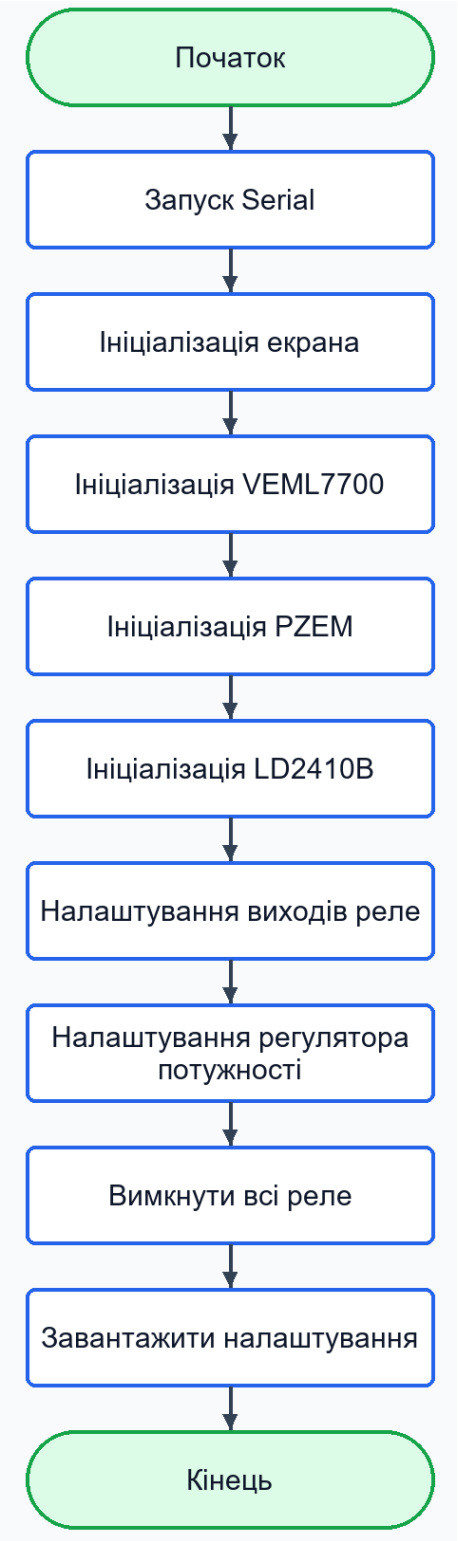


Рисунок 3.2 – Алгоритм ініціалізації

Наступним є алгоритм зчитування інформації з датчиків, а саме датчиків присутності, датчика освітленості та датчика вимірювання напруги, струму та потужності PZEM.

Алгоритм зчитування інформації зображений на рисунку 3.3.

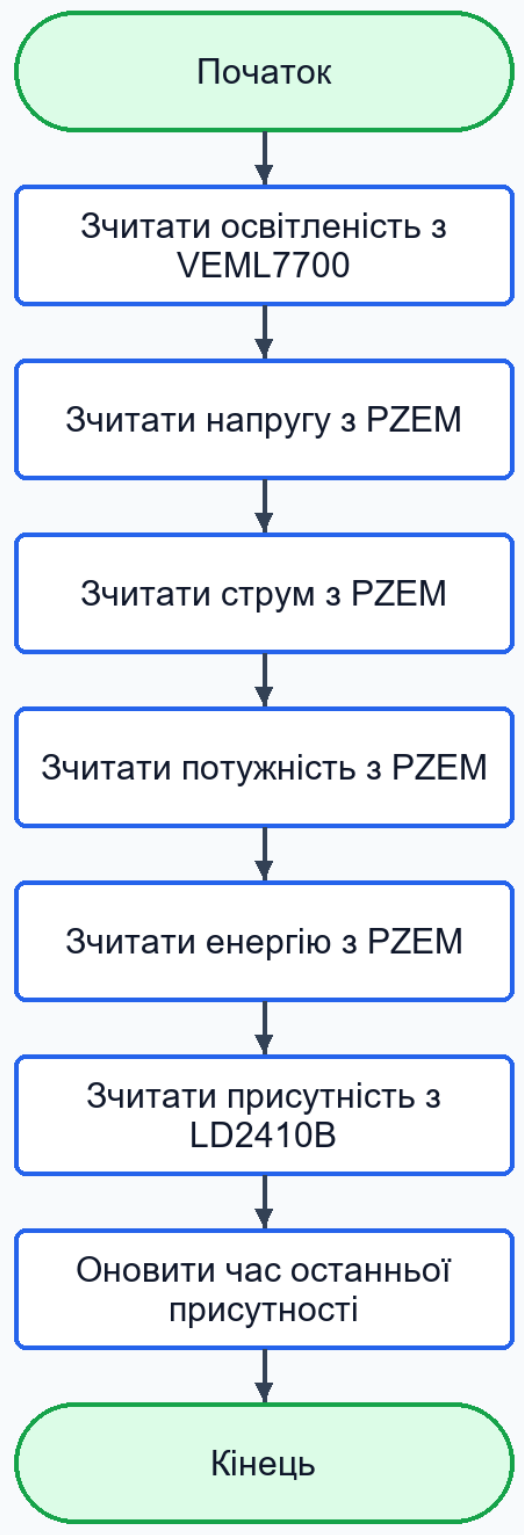


Рисунок 3.3 – Алгоритм зчитування інформації

Наступним етапом є перевірка аварій, а саме перевищення значень струму, напруги та потужності. У випадку виявлення аварій ПЗ повинно переходити до режиму роботи аварія. Алгоритм перевірки аварії зображено на рисунку 3.4.

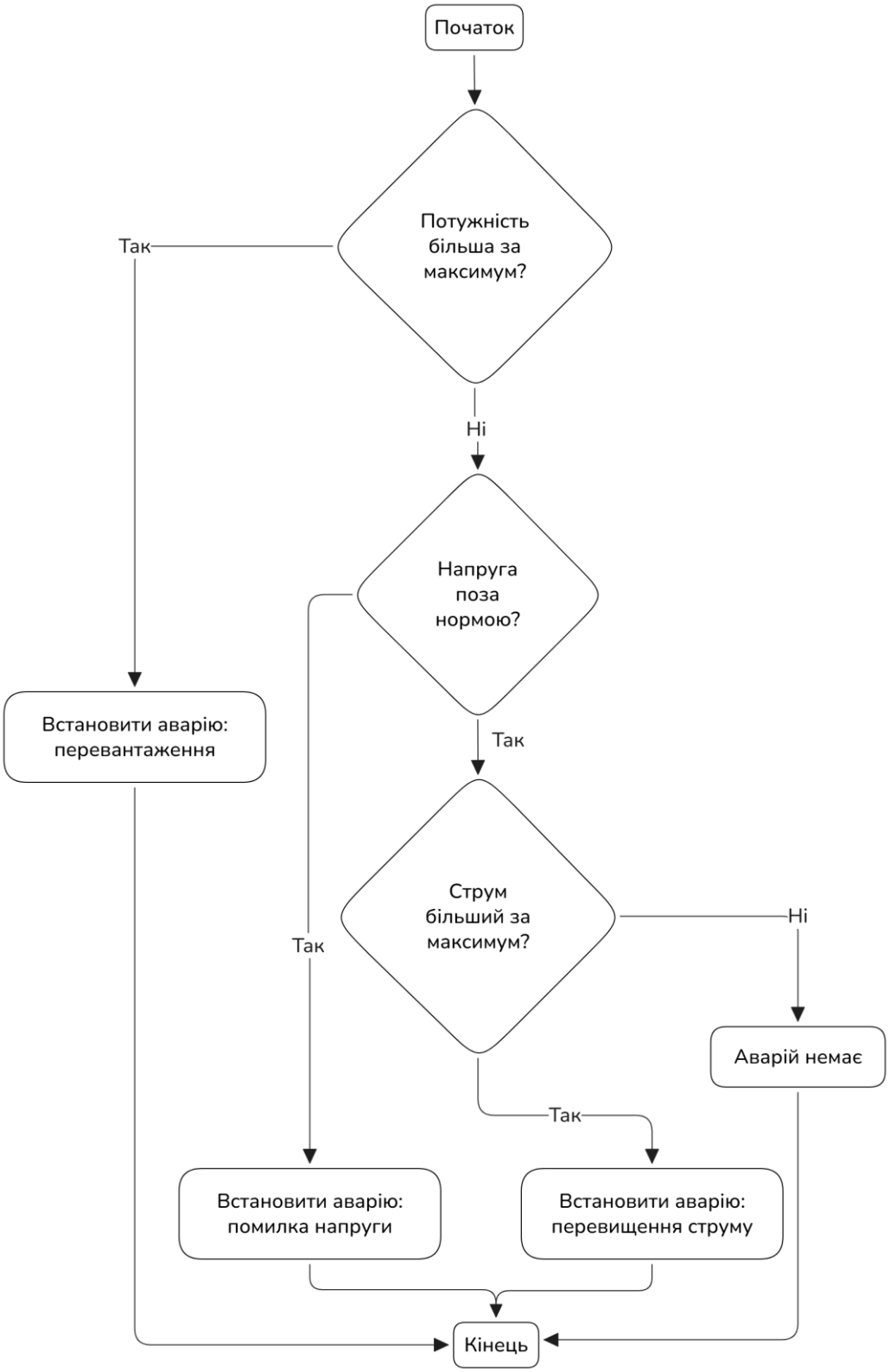


Рисунок 3.4 – Алгоритм перевірки аварії

Наступним алгоритмом є алгоритм режиму аварії, в цьому режимі всі споживачі вимкнені до усунення аварії. Алгоритм режиму аварії зображено на рисунку 3.5.

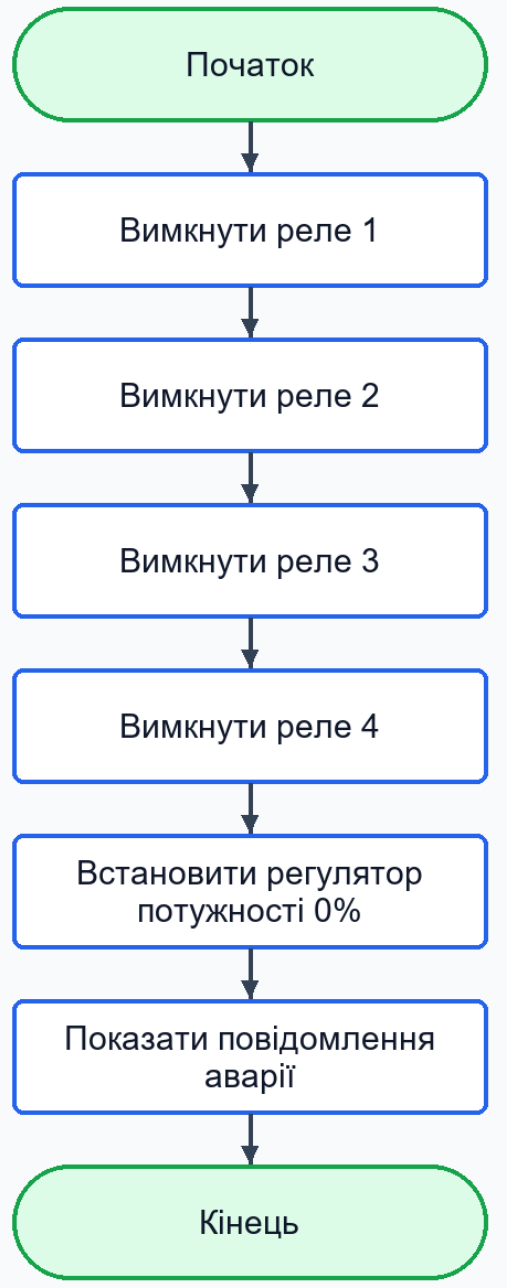


Рисунок 3.5 – Алгоритм режиму аварії

Наступним алгоритмом є алгоритм режиму AUTO, він є основним алгоритмом і працює коли немає аварії. В цьому алгоритмі задано як буде регулюватися освітлення при наявності та відсутності людей. Також в цьому алгоритмі задається робота зі споживачем в час простою.

Алгоритм режиму AUTO зображено на рисунку 3.6.

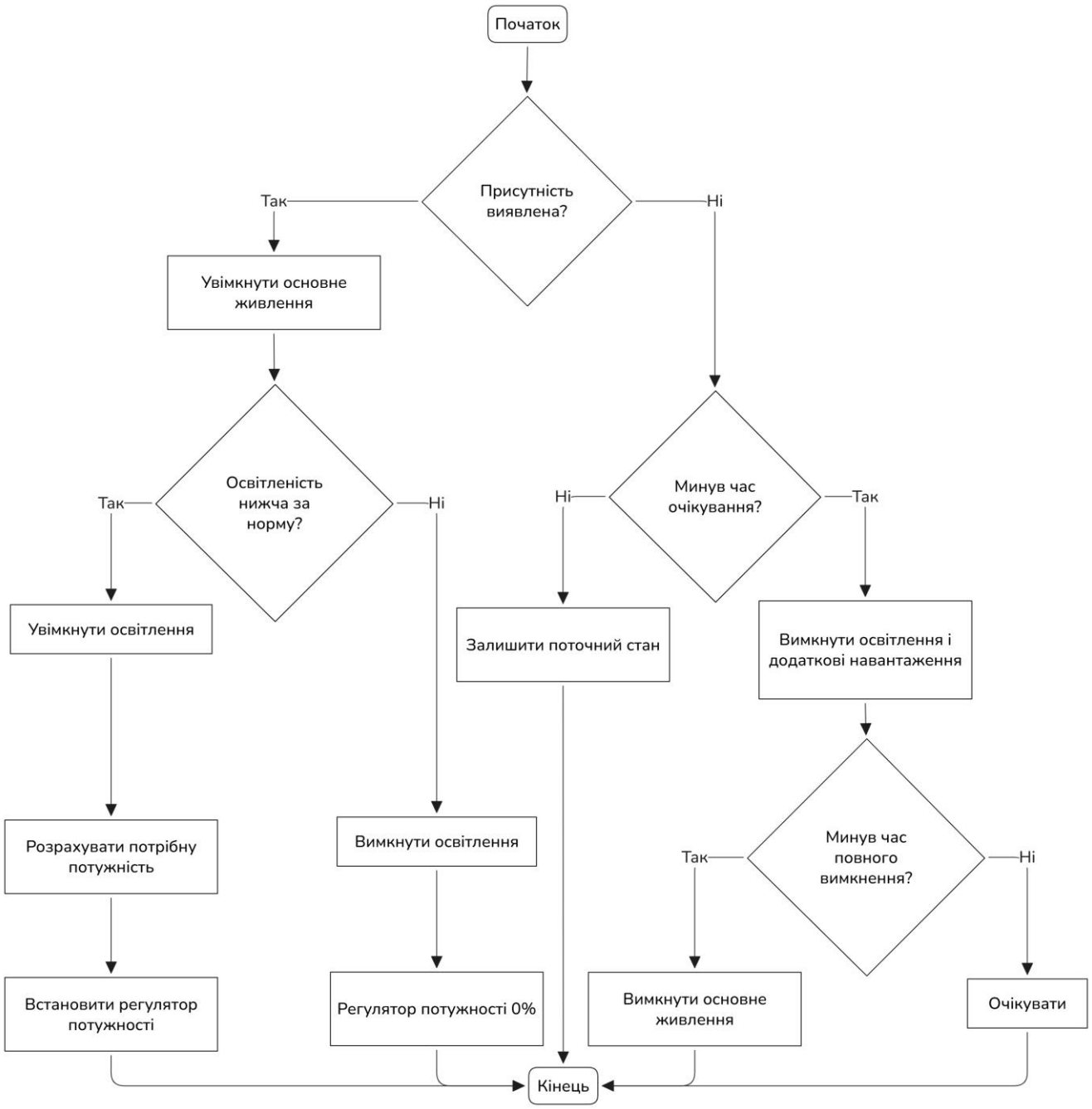


Рисунок 3.6 – Алгоритм роботи режиму AUTO

ECO режим використовується тоді коли є обмеження використання максимальної потужності і є необхідність її обмеження для запобігання різкого вимкнення системи, тому в цьому випадку вимикаються другорядні системи і відповідно зменшується потужність освітлення. Також менший час очікування присутності людей.

Алгоритм режиму ECO зображено на рисунку 3.7.

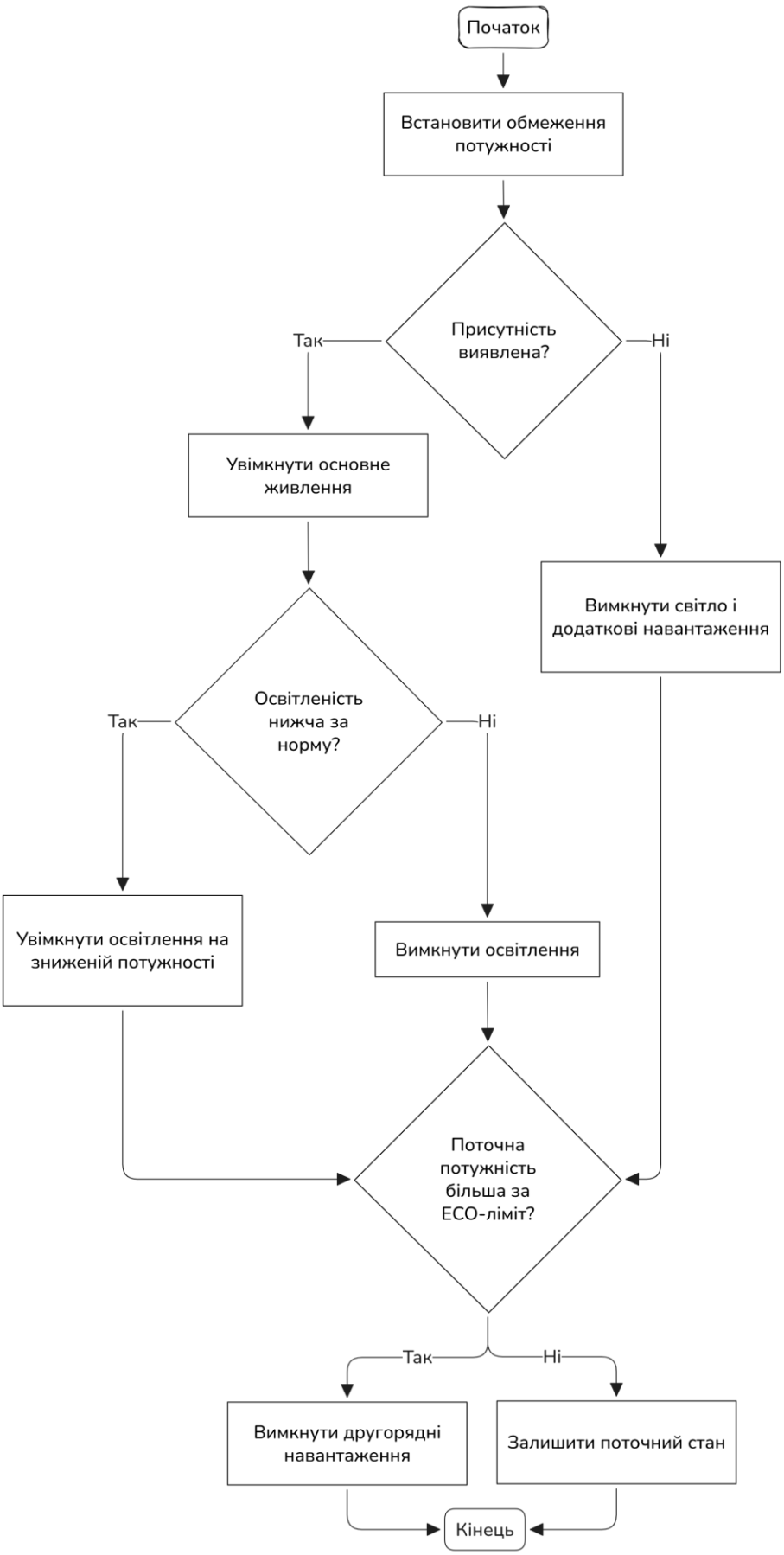


Рисунок 3.7 – Алгоритм режиму ECO

Наступним є нічний режим, його алгоритм зображений на рисунку 3.8

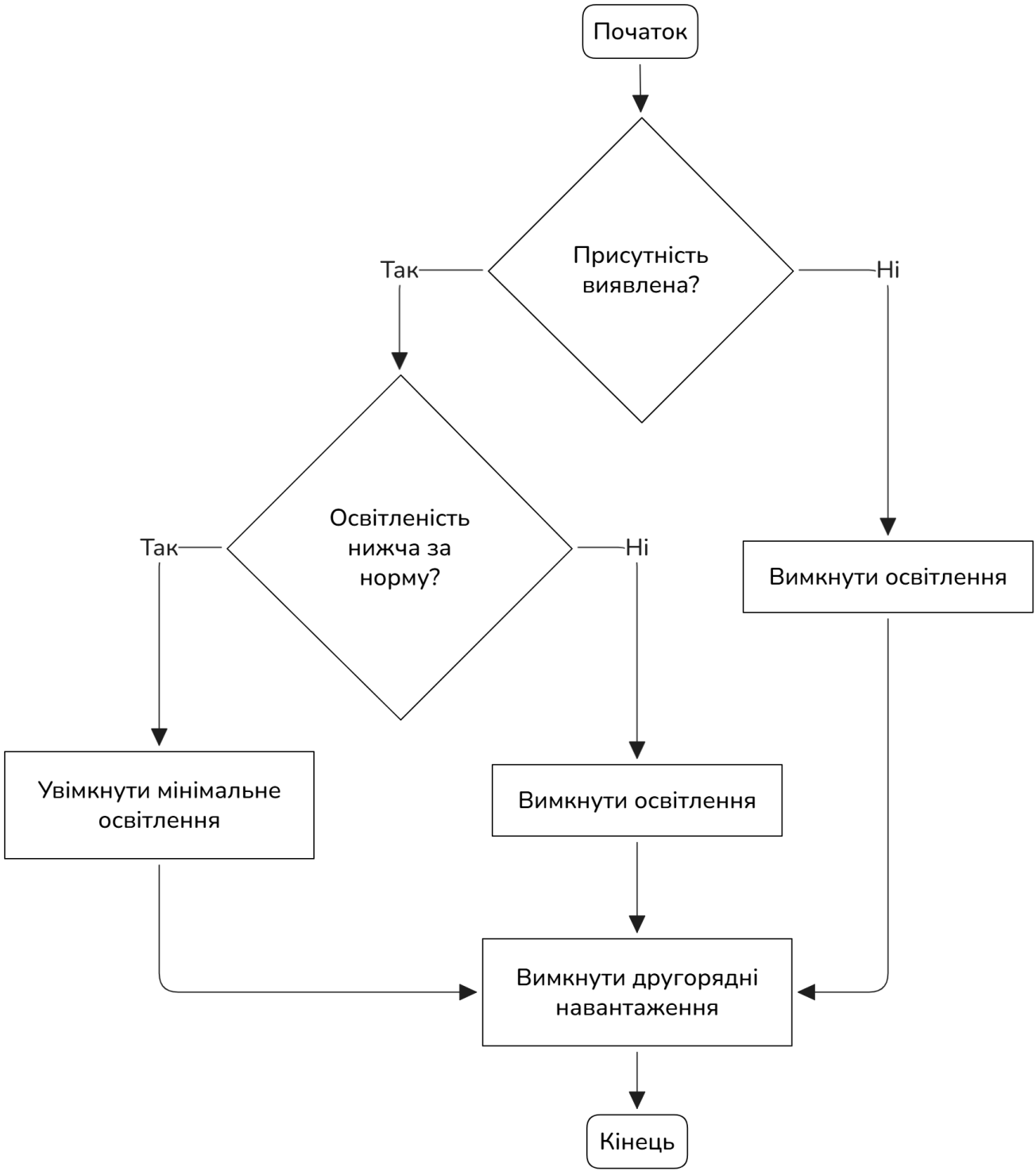


Рисунок 3.8 – Алгоритм нічного режиму

Наступним алгоритмом є алгоритм ручного режиму, він включає можливість самостійно змінювати стан виходів на реле а також змінювати рівень освітленості.

Алгоритм зображений на рисунку 3.9.

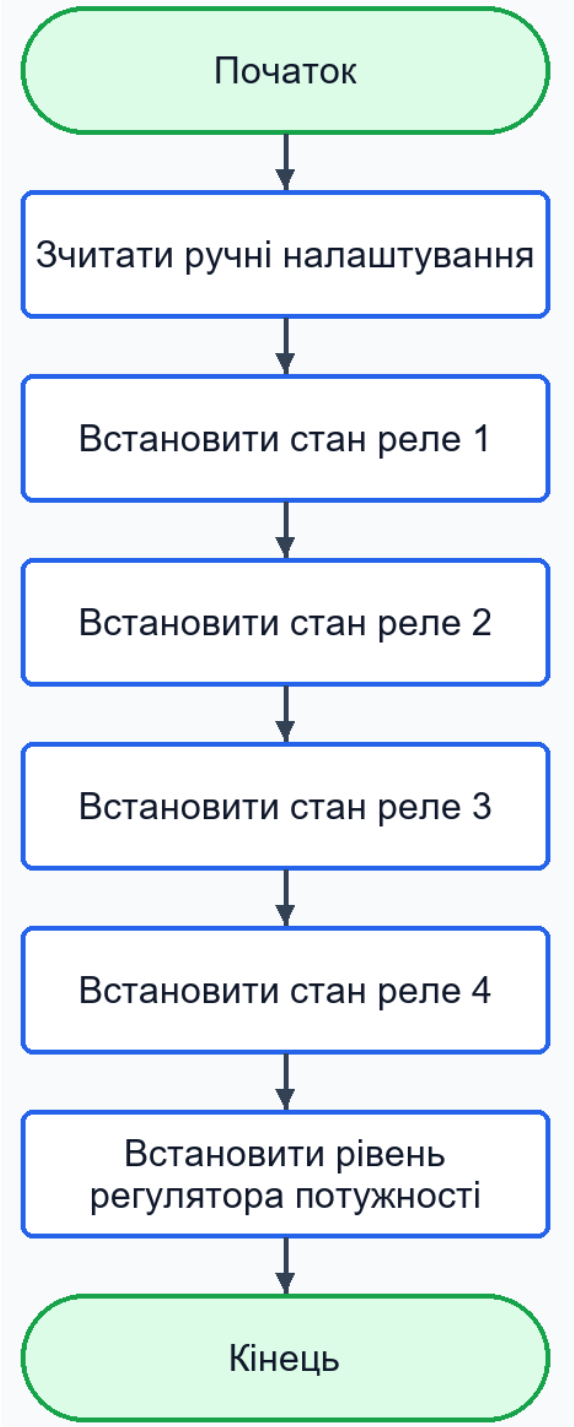


Рисунок 3.9 – Алгоритм ручного режиму

Останнім алгоритмом є алгоритм оновлення екрану, він повинен виводити всі поточні значення напруги, струму, навантаження, спожиту енергію та стани реле. Також на екран виводиться значення освітлення та присутність людей.

Алгоритм оновлення екрану зображено на рисунку 3.10.

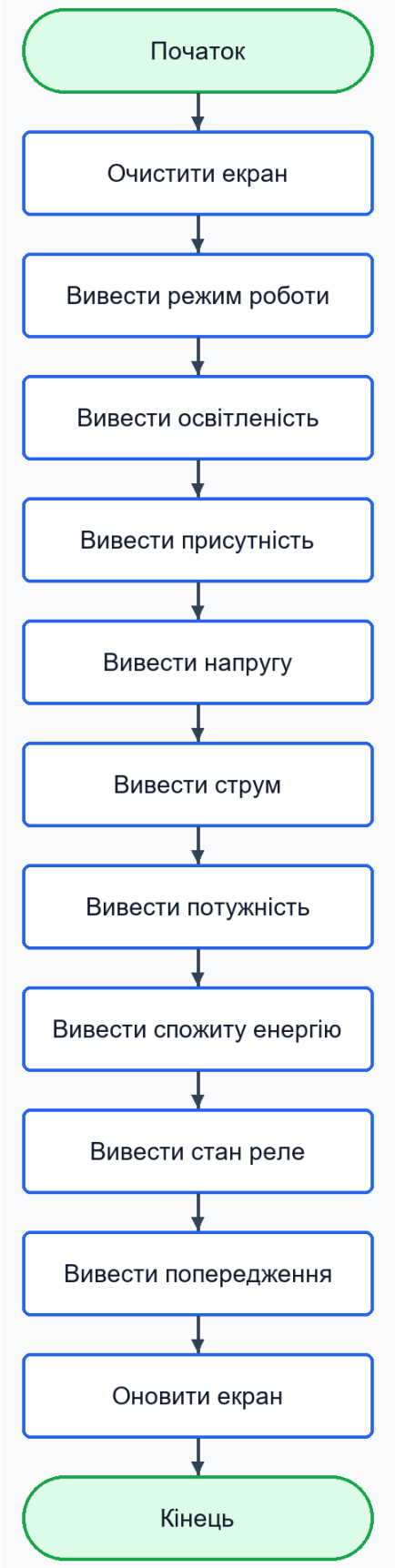


Рисунок 3.10 – Алгоритм оновлення екрану

3.2 Розробка програмного забезпечення

ПЗ складається з двох файлів, першим є файл .ino, який включає в себе основну програму побудовану за алгоритмом, другим є файл config.h, який включає в себе призначені виходи для підключення датчиків та порогові значення спрацювання датчика освітленості, присутності та датчика напруги, струму та потужності.

Файл config.h наведений далі:

```
#pragma once

static const int I2C_SDA_PIN = 42;
static const int I2C_SCL_PIN = 2;

static const uint8_t OLED_ADDRESS = 0x3C;
static const int OLED_WIDTH = 128;
static const int OLED_HEIGHT = 64;

static const int PZEM_RX_PIN = 26;  // ESP32 RX, connect to PZEM TX.
static const int PZEM_TX_PIN = 27;  // ESP32 TX, connect to PZEM RX.

static const int LD2410_RX_PIN = 17;  // ESP32 RX, connect to LD2410B TX.
static const int LD2410_TX_PIN = 16;  // ESP32 TX, connect to LD2410B RX.
static const uint32_t LD2410_BAUD = 256000;

static const bool RELAY_ACTIVE_LOW = true;
static const int RELAY1_PIN = 46;  // Main power.
static const int RELAY2_PIN = 3;  // Lighting.
static const int RELAY3_PIN = 8;  // Auxiliary load.
static const int RELAY4_PIN = 18;  // Reserve / ventilation / emergency load.
```

```
static const int POWER_REGULATOR_PIN = 4;
static const int PWM_CHANNEL = 0;
static const int PWM_FREQUENCY = 1000;
static const int PWM_RESOLUTION_BITS = 10;

// Main limits.
static const float MIN_LUX = 250.0f;
static const float TARGET_LUX = 400.0f;
static const float MAX_POWER_W = 2000.0f;
static const float ECO_POWER_LIMIT_W = 800.0f;
static const float MIN_VOLTAGE_V = 180.0f;
static const float MAX_VOLTAGE_V = 250.0f;
static const float MAX_CURRENT_A = 10.0f;

// Timeouts.
static const unsigned long SENSOR_INTERVAL_MS = 500;
static const unsigned long DISPLAY_INTERVAL_MS = 1000;
static const unsigned long PRESENCE_TIMEOUT_MS = 5UL * 60UL * 1000UL;
static const unsigned long FULL_POWER_OFF_TIMEOUT_MS = 15UL * 60UL * 1000UL;
static const unsigned long PROTECTION_RESTART_DELAY_MS = 10UL * 1000UL;
```

Призначення пінів відбувалося згідно попередньої схеми підключення.

Задані ліміти на струм, напругу та потужність згідно можливостей електронних компонентів, а саме реле, яке працює до 10А, 230В та 2КВт максимального навантаження. Мінімальне освітлення встановлене на рівні 250 лк, необхідне освітлення становить 400 лк. Також встановлено ліміт потужності при недостатній генерації на рівні 800Вт.

Код файлу ESP32.ino з основною програмою відображений в додатку Б.

В програмі використовуються наступні бібліотеки:

```
#include <Arduino.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <Adafruit_VEML7700.h>
#include <PZEM004Tv30.h>
```

Задано 5 режимів роботи:

```
enum SystemMode {
  MODE_AUTO,
  MODE_ECO,
  MODE_NIGHT,
  MODE_MANUAL,
  MODE_PROTECTION
};
```

Керування реле здійснюється наступною функцією:

```
void setRelayPin(int pin, bool on) {
  const int activeLevel = RELAY_ACTIVE_LOW ? LOW : HIGH;
  const int inactiveLevel = RELAY_ACTIVE_LOW ? HIGH : LOW;
  digitalWrite(pin, on ? activeLevel : inactiveLevel);
}
void applyRelays() {
  setRelayPin(RELAY1_PIN, relays.r1);
  setRelayPin(RELAY2_PIN, relays.r2);
  setRelayPin(RELAY3_PIN, relays.r3);
  setRelayPin(RELAY4_PIN, relays.r4);
}
```

Керування регулятором потужності задається функцією:

```
void setPowerPercent(uint8_t percent) {
  powerPercent = constrain(percent, 0, 100);
  const uint32_t maxDuty = (1UL << PWM_RESOLUTION_BITS) - 1UL;
  const uint32_t duty = map(powerPercent, 0, 100, 0, maxDuty);
#if ESP_ARDUINO_VERSION_MAJOR >= 3
  ledcWrite(POWER_REGULATOR_PIN, duty);
#else
  ledcWrite(PWM_CHANNEL, duty);
#endif
}
```

Наступна функція зчитує інформацію з датчиків PZEM та VEML7700:

```
void readSensors() {
  sensors.lux = veml.readLux();
  sensors.voltage = validOrZero(pzem.voltage());
  sensors.current = validOrZero(pzem.current());
  sensors.power = validOrZero(pzem.power());
  sensors.energy = validOrZero(pzem.energy());
  readLd2410();
  if (millis() - lastPresenceMs > PRESENCE_TIMEOUT_MS) {
    sensors.presence = false;
  }
}
```

Перевірка на аварії задається наступним чином:

```
void checkProtection() {
  if (sensors.power > MAX_POWER_W) {
    enterProtection(PROTECTION_OVER_POWER);
    return;
  }
```

```
  if (sensors.current > MAX_CURRENT_A) {
    enterProtection(PROTECTION_OVER_CURRENT);
    return;
  }

  if (sensors.voltage > 0.0f &&
      (sensors.voltage < MIN_VOLTAGE_V || sensors.voltage > MAX_VOLTAGE_V)) {
    enterProtection(PROTECTION_BAD_VOLTAGE);
    return;
  }
```

Розрахунок освітлення задається наступним чином:

```
uint8_t calculateLightPower(float currentLux) {
  if (currentLux >= TARGET_LUX) {
    return 0;
  }
  const float missingLux = TARGET_LUX - currentLux;
  const float ratio = constrain(missingLux / TARGET_LUX, 0.0f, 1.0f);
  return static_cast<uint8_t>(constrain(20 + ratio * 80, 20, 100));
}
```

Режими, на прикладі автоматичного режиму, задаються наступним чином:

```
void handleAutoMode() {
  if (sensors.presence) {
    relays.r1 = true;
    relays.r3 = true;
    if (sensors.lux < MIN_LUX) {
      relays.r2 = true;
      setPowerPercent(calculateLightPower(sensors.lux));
```

```
    } else {
      relays.r2 = false;
      setPowerPercent(0);
    }
  } else {
    const unsigned long absentMs = millis() - lastPresenceMs;
    if (absentMs > PRESENCE_TIMEOUT_MS) {
      relays.r2 = false;
      relays.r3 = false;
      setPowerPercent(0);
    }
    if (absentMs > FULL_POWER_OFF_TIMEOUT_MS) {
      relays.r1 = false;
    }
  }
}
```

Виведення на екран інформації задається:

```
void updateDisplay() {
  display.clearDisplay();
  display.setTextSize(1);
  display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
  display.setCursor(0, 0);

  display.print("Mode: ");
  display.println(modeName(systemMode));

  display.print("Lux: ");
  display.println(sensors.lux, 0);
```

```
display.print("Presence: ");
display.println(sensors.presence ? "YES" : "NO");

display.print("U/I: ");
display.print(sensors.voltage, 0);
display.print("V ");
display.print(sensors.current, 2);
display.println("A");

display.print("P: ");
display.print(sensors.power, 0);
display.print("W E:");
display.print(sensors.energy, 2);
display.println("kWh");

display.print("R:");
display.print(relays.r1 ? "1" : "-");
display.print(relays.r2 ? "2" : "-");
display.print(relays.r3 ? "3" : "-");
display.print(relays.r4 ? "4" : "-");
display.print(" PWM:");
display.print(powerPercent);
display.println("%");

if (systemMode == MODE_PROTECTION) {
  display.print("ERR: ");
  display.println(protectionName(protectionReason));
}
display.display
```

3.3 Моделювання системи керування освітленням із PID-регулятором

Для плавного ввімкнення світла було досліджено використання PID регулятора для ввімкнення світла. Дослідження було виконано за допомоги ПЗ MATLAB. Для дослідження було написано код скрипту, який розраховує PID регулятор та стійкість системи[31].

Код застосунку наведений далі:

```
clc;
clear;
close all;

K = 8;          % лк / %
T = 1.5;        % с

L_set = 500;    % лк

Kp = 0.4;
Ki = 0.1;

num = [K*Kp, K*Ki];
den = [T, 1 + K*Kp, K*Ki];

p = roots(den);

disp('Полюси замкненої системи:');
disp(p);

if all(real(p) < 0)
    disp('Висновок: система стійка.');
else
    disp('Висновок: система нестійка.');
end

t_end = 30;     % час моделювання, с
dt = 0.01;      % крок, с

t = 0:dt:t_end;
y = zeros(size(t));      % освітленість, лк
dy = zeros(size(t));     % швидкість зміни освітленості
for i = 2:length(t)
```

```
    ddy = (K*Ki*L_set - (1 + K*Kp)*dy(i-1) - K*Ki*y(i-1)) / T;

    dy(i) = dy(i-1) + ddy * dt;
    y(i) = y(i-1) + dy(i) * dt;
end
e = L_set - y;
figure;
plot(t, y, 'b', 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(t, L_set*ones(size(t)), 'r--', 'LineWidth', 1.5);
grid on;
xlabel('Час, с');
ylabel('Освітленість, лк');
title('Перехідний процес системи керування освітленням');
legend('Поточна освітленість', 'Задана освітленість');
figure;
plot(t, e, 'm', 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('Час, с');
ylabel('Помилка, лк');
title('Помилка регулювання');
I = zeros(size(t));
u = zeros(size(t));
for i = 2:length(t)
    I(i) = I(i-1) + e(i) * dt;
    u(i) = Kp*e(i) + Ki*I(i);
    if u(i) > 100
        u(i) = 100;
    end
    if u(i) < 0
        u(i) = 0;
    end
end
figure;
plot(t, u, 'k', 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('Час, с');
ylabel('Керування, %');
title('Керуючий сигнал PI-регулятора');
```

В результаті виконання коду було отримані полюси замкнутої системи, зі значеннями -2.5944, -0.2056. Отримано перехідний процес системи керування освітленням, що зображений на рисунку 3.11.

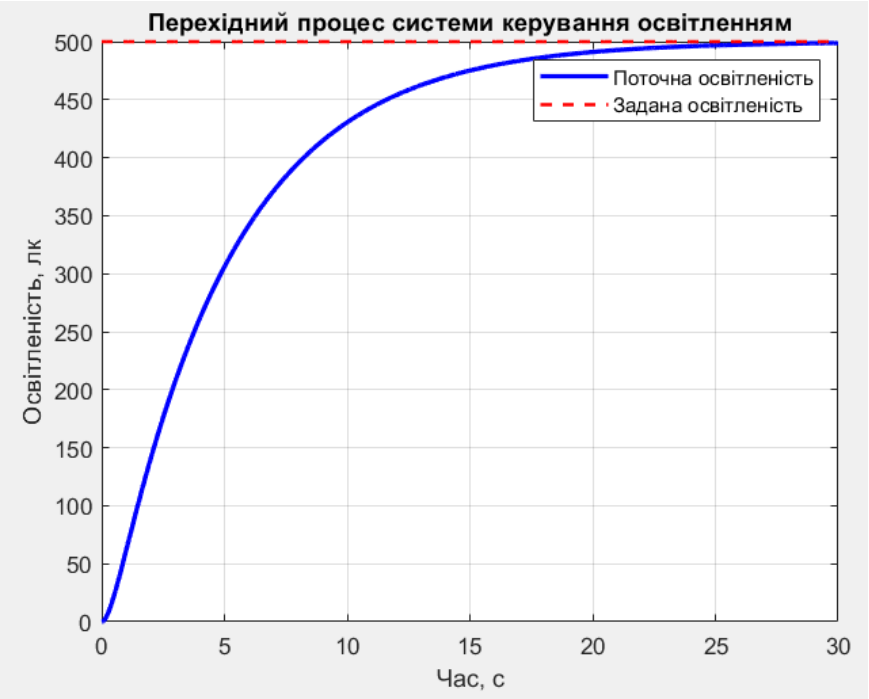


Рисунок 3.11 – Перехідний процес системи керування освітленням

Отримано графік помилки регулювання, що зображений на рисунку 3.12.

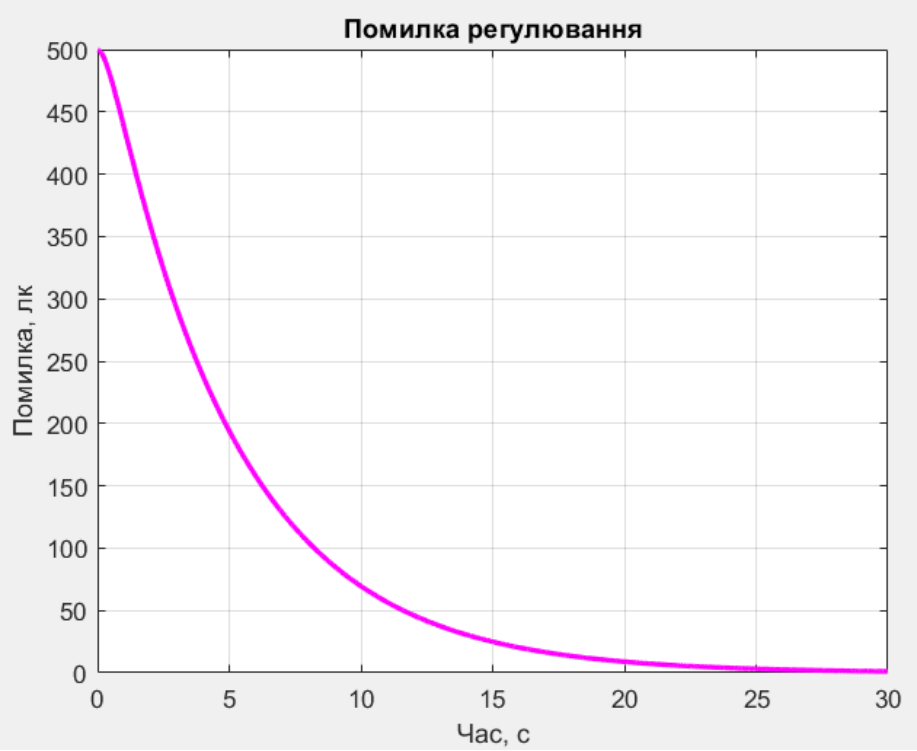


Рисунок 3.12 – Графік помилки регулювання

Керуючий сигнал зображений на рисунку 3.13.

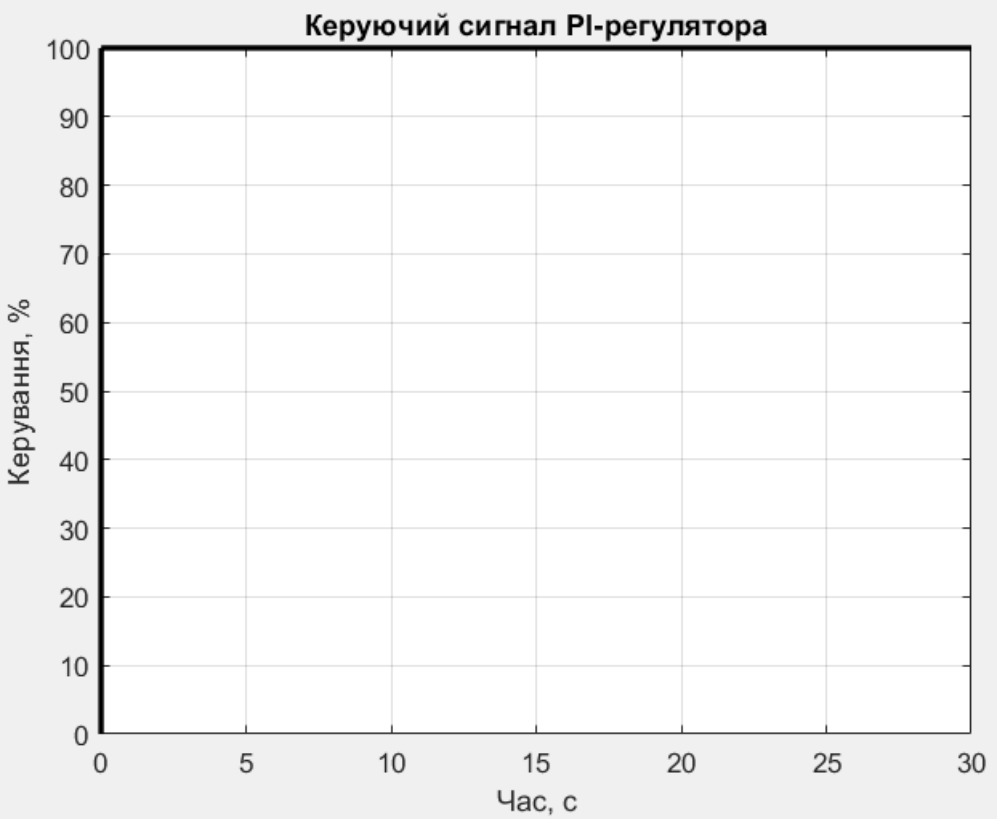


Рисунок 3.13 – Керуючий сигнал PI-регулятора

В результаті аналізу отриманих даних можна зробити висновок, що система стійка.

3.4 Охорона праці

Мета цього розділу – забезпечити безпечні та комфортні умови праці, зменшити ризики професійних захворювань і травматизму.

Специфіка такої роботи передбачає тривале перебування у сидячому положенні перед екраном монітора, що спричиняє низку потенційних ризиків, серед яких: підвищене навантаження на зорову систему, порушення функціонування опорно-рухового апарату, а також психофізіологічні перенавантаження, пов’язані з високою інтенсивністю розумової праці. У зв’язку з цим особливого значення набуває дотримання принципів ергономіки: правильне розміщення елементів робочого місця (монітора, клавіатури, стільця), раціональна

організація простору, підтримання оптимального мікроклімату (температури, вологості повітря), а також забезпечення належного рівня освітлення.

Робоче місце повинно відповідати вимогам санітарних норм, визначених ДСанПіН 3.3.2.007-98. Зокрема, висота столу має становити 70-75 см, а стілець повинен бути регульованим для забезпечення правильної посадки. Монітор слід розташовувати на відстані 50–70 см від очей, при цьому його верхній край має бути на рівні лінії погляду користувача. Освітлення робочої зони повинно бути природним із лівого боку, а за потреби використовувати додаткову настільну лампу з яскравістю 400-500 лк. Мікроклімат у приміщенні повинен підтримуватися в межах температури 20-24°С і відносної вологості 40-60%. Необхідне також регулярне провітрювання кімнати не менше двох разів на день або забезпечення постійної вентиляції[32].

Усі електроприлади, включаючи комп’ютер, монітор та джерела живлення, повинні відповідати вимогам класу захисту I або II згідно з ГОСТ 12.2.007.0–75. Забороняється працювати на несправному обладнанні, перевантажувати розетки, а також необхідно регулярно перевіряти стан електроізоляції. Усі пристрої повинні бути сертифікованими. Біля робочого місця бажано мати вогнегасник, наприклад, порошковий типу ВП-2. Згідно з класифікацією ДБН В.1.1-7-2016, така робоча зона належить до категорії пожежної небезпеки В. Категорично заборонено закривати вентиляційні отвори системних блоків або залишати обладнання ввімкненим без нагляду.

Оскільки робота за комп’ютером супроводжується значним нервово-емоційним навантаженням і знижує працездатність, для збереження здоров’я рекомендовано щогодини робити перерви тривалістю 5–10 хвилин. Не менш важливою складовою є дотримання вимог електробезпеки. Оскільки комп’ютерне обладнання живиться від мережі змінного струму, воно повинно бути технічно справним, мати надійну ізоляцію та підключатися через справні електричні розетки. З метою запобігання пожежонебезпечним ситуаціям рекомендується наявність первинних засобів пожежогасіння, зокрема порошкового вогнегасника.

З метою профілактики перенавантаження організму при інтенсивній роботі

за комп’ютером необхідно дотримуватися режиму праці та відпочинку. Відповідно до чинних санітарно-гігієнічних норм, рекомендується проводити короткочасні перерви кожні 60 хвилин безперервної роботи. Такі перерви сприяють зменшенню втоми, відновленню концентрації уваги та зниженню негативного впливу статичних навантажень.

Отже, за умови належної організації робочого процесу, дотримання вимог безпеки праці та санітарно-гігієнічних нормативів, умови праці під час виконання дипломної роботи можуть вважатися достатньо комфортними та безпечними для здоров’я виконавця. Забезпечення сприятливих умов праці є важливим чинником не лише збереження здоров’я, а й підвищення продуктивності та якості результатів інженерної діяльності.

ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної роботи були розв'язані всі поставлені завдання, а також досягнуто основної мети, тобто розроблено систему енергоефективного керування електроспоживанням на виробництві.

У першому розділі були проаналізовані аналогічні конструкції побудови систем енергоспоживання, проаналізовані системи SCADA та методи оптимізації витрат енергії.

У другому розділі з метою розроблення програмно-апаратного комплексу системи було побудовано функціональну схему, вибрано електронні компоненти та побудовано схему підключення.

У третьому розділі було розроблено алгоритм основних елементів та саме програмне забезпечення, проведено розрахунку з охорони безпеки та теорії автоматичного управління.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017. – 29 с.

2. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, В.А. Андрусевич, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2022. – 151 с.

3. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О. В Сичова. – Харків: ХНУРЕ, 2022. – 55 с.

4. EcoStruxure™ Power Monitoring Expert; режим доступу(https://www.se.com/ua/uk/product-range/65404-ecostruxure-power-monitoring-expert/?utm_source=chatgpt.com#overview) дата використання [05.06.26].

5. EcoStruxure Resource Advisor; режим доступу (https://www.se.com/ww/en/work/services/se-advisory-services/intelligent-software/resource-advisor/) дата використання [05.06.26].

6. Desigo CC; режим доступу (https://www.siemens.com/uk-ua/products/desigo/cc/) дата використання [05.06.26].

7. SIMATIC Energy Management; режим доступу (https://biendongco.vn/en/simatic-energy-management.html) дата використання [05.06.26].

8. ABB Ability Energy Manager; режим доступу (https://electrification.us.abb.com/products/energy-management-systems/abb-ability-energy-manager?utm_source=chatgpt.com) дата використання [05.06.26].

9. САНАЦІЯ. ARDUINO; режим доступу (https://svitovyr.ua/blog/sanaciya-arduino) дата використання [05.06.26].

10. Що таке динамічне балансування навантаження? Вичерпний посібник; режим доступу (https://www.evb.com/uk/what-is-dynamic-load-balance-a-comprehensive-guide/#) дата використання [05.06.26].

11. Інтелектуалізація електроенергетичних систем; режим доступу (https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/34611/89671.pdf?seq) дата використання [05.06.26].

12. Контроль пікових навантажень: як уникнути перевитрат і аварій; режим доступу (https://aziot.com.ua/novyny/kontrol-pikovykh-navantazhen-iak-unyknuty-perevytrat-i-avarii/) дата використання [05.06.26].

13. Автоматизовані системи керування технологічними процесами; режим доступу (https://itf.snau.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/24_52.pdf) дата використання [05.06.26].

14. Modbus: що це таке і як працює? Огляд протоколу та його застосування; режим доступу (https://www.a2m.com.ua/ua/post/what-is-modbus-a-complete-guide?srsltid=AfmBOooiyRO7ug7ORIzx3u_WbsHudN7WQ6TwQ_xAbpPxs—BWHotTFN0) дата використання [05.06.26].

15. Різниця між Profibus і Profinet ; режим доступу (https://pneumatyka.com.ua/p/riznicya-mizh-profibus-i-profinet) дата використання [05.06.26].

16. OPC UA; режим доступу (https://www.phoenixcontact.com/uk-ua/tekhnolohiyi/tekhnolohiyi-zvyazku/opc-ua) дата використання [05.06.26].

17. Протокол MQTT; режим доступу (https://pupenasan.github.io/TI40/Лекц/MQTT.html) дата використання [05.06.26].

18. Що таке Arduino та які його основні переваги й компоненти?; режим доступу (https://geekmatic.in.ua/ua/chto-takoe-arduino-preimushchestva-komponenty) дата використання [05.06.26].

19. Arduino Nano - плата розробки для ATmega328; режим доступу (https://itmaster.biz.ua/directory/kits-nabory/arduino-nano.html) дата використання [05.06.26].

20. Огляд плат Arduino; режим доступу (https://distancionka.com/ua/blog/arduino/obzor-plat-arduino/?srsltid=AfmBOorvhTmu83sRs3jEvHYL0mfW4KDWo1Xh5pyppHfkwle2U_qtfFOn) дата використання [05.06.26].

21. Посібник з мікроконтролерів ESP32; режим доступу (https://ua.ariat-tech.com/blog/ESP32-Microcontroller-Guide.html) дата використання [05.06.26].

22. Датчик освітленості цифровий GY-302 BH1750FVI; режим доступу (https://arduino.ua/prod1116-datchik-osveshhennosti-cifrovoi-bh1750fvi?srsltid=AfmBOoqVODGj39UsxKlkfyGuk9XsWCaC66pdjIUdpeMbY3ZcxAmEs9tJ) дата використання [05.06.26].

23. TSL2561 - Цифровий датчик освітленості; режим доступу (https://1wire.com.ua/tsl2561-cifrovoj-datchik-osveshhennosti.html) дата використання [05.06.26].

24. Датчик освітленності VEML7700-TR; режим доступу (https://vseplus.com/ua/product/datcik-osvitlennosti-veml7700-tr-488601) дата використання [05.06.26].

25. Датчик руху інфрачервоний (PIR Sensor) HC-SR501; режим доступу (https://www.mini-tech.com.ua/ua/datchik-dvizheniya-infrakrasniy-pir-sensor-hc-sr501) дата використання [05.06.26].

26. HW-MS03 - Мікрохвильовий датчик руху 2.4 - 5.8 ГГц; режим доступу (https://1wire.com.ua/hw-ms03-mikrovolnovij-datchik-dvizhenija-2-4---5-8-ggc.html) дата використання [05.06.26].

27. Датчик відстані ультразвуковий HC-SR04; режим доступу (https://www.mini-tech.com.ua/ua/datchik-rasstoyaniya-ultrazvukovoy-hc-sr04) дата використання [05.06.26].

28. 24GHz датчик присутності людини HLK-LD2410C-P; режим доступу (https://arduino.ua/prod7966-24ghz-human-radar-module-sensor-hlk-ld2410c-p?srsltid=

AfmBOooSsPs5ujwqnrk9IU5Tkr5xh1AUowBxdYMELPF7CzLPY73EBgv-) дата використання [05.06.26].

29. Вимірювач параметрів споживаної енергії PZEM-004T v4.0 100A; режим доступу (https://www.mini-tech.com.ua/ua/izmeritel-potrebleniya) дата використання [05.06.26].

30. 4-х канальний модуль реле 5В 10А з опторозв'язкою (low level); режим доступу (https://arduino.ua/prod206-4-h-kanalnii-modyl-rele-5v-10a?srsltid=AfmBOorKL9CeosnR9IQuvF5V_BXTEotI2o8xThD0mJBLEhNZ4fG3pnqc) дата використання [05.06.26].

31. Невлюдов, І.Ш. Теорія автоматичного управління (збірник задач): навчальний посібник / І.Ш. Невлюдов, О.В.Токарєва. – Харків: ХНУРЕ, 2020.240 с.

32. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Організація керування умовами праці» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т.Є. Стиценко, Г.В. Пронюк, Н.М. Сердюк. – Харків, 2017. – 108 с.