

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем

ШИДЛІВСЬКИЙ Ростислав Константинович

Автоматизована система керування захистом електромережі промислового
об'єкта / Automated control system for the protection of the power grid of an
industrial facility

спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи АКІТ-41

Р.К. Шидлівський

Науковий керівник

к.т.н., доцент І.Б. Албанський

Кваліфікаційну роботу допущено

до захисту:

«_____» _____ 2025р.

Завідувач кафедри

_____ А.І. Сегін

Тернопіль 2025

Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"

Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін
"____" _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
ШИДЛІВСЬКОМУ Ростиславу Константиновичу

_____ (прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Автоматизована система керування захистом електромережі промислового об'єкта / Automated control system for the protection of the power grid of an industrial facility.

Керівник роботи: к.т.н., доцент Албанський І.Б.

затверджені наказом по університету від «28» листопада 2024 р. № 938.

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи: 06.05.2025р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

1. Особливості побудови автоматизованих систем керування захистом електромережі промислового об'єкта.

2. Способи керування спеціалізованим обладнанням захисту електромережі.

3. Технічні засоби автоматизації об'єкта управління.

4. Розрахункова ефективність системи автоматичного управління слідкуючого типу.

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Аналіз складової та технічних засобів автоматизованої системи керування захистом електромережі промислового об'єкта.

2. Реалізація структури автоматизованої системи керування захистом електромережі промислового об'єкта та обґрунтування вибору технічних засобів реалізації запропонованої системи.

3. Розробка функціональної схеми комплексу технічних засобів автоматизації.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структура автоматизованої системи керування захистом електромережі промислового об'єкта.

2. Графічні залежності перехідних процесів та динамічної помилки по швидкості.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Албанський І.Б.		
2	Албанський І.Б.		
3	Албанський І.Б.		

7. Дата видачі завдання 28 листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу як об’єкта керування	12.2024р. – 01.2025р.	
2	Специфікація вибору технічних засобів автоматизації	02.2025р. – 03.2025р.	
3	Розрахунок системи автоматичного регулювання	04.2025р. – 05.2025р.	

Студент _____
(підпис)

Шидлівський Р.К.

Керівник роботи _____
(підпис)

к.т.н., доцент Албанський І.Б.

АНОТАЦІЯ

Шидлівський Р.К. Автоматизована система керування захистом електромережі промислового об'єкта. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна (наукова) програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2025.

У роботі досліджено системи керування захистом електромережі промислового об'єкта, тобто системи основне завдання яких контроль та діагностика електромережі підприємства на випадок аварійних ситуацій на розподільчих підстанціях, визначено функціональні, структурні та архітектурні особливості систем, що забезпечують енергопостачання, і управління основними технічними засобами контролю, проаналізовано технічну базу та обґрунтовано вибір засобів автоматизації, реалізації запропонованої системи. Розроблено структуру та функціональну схеми, а також розроблено спосіб побудови системи автоматичного управління слідкуючого типу, проведений синтез та моделювання запропонованої системи з еталонною моделлю та ПІД-регулятором.

ABSTRACT

Shudlivskiy R.K. Automated control system for the protection of the power grid of an industrial facility. - Manuscript.

Research for obtaining a bachelor's degree in the specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies", educational and professional (scientific) program. – West Ukrainian National University, Ternopil, 2025.

The work investigates the control systems for the protection of the power grid of an industrial facility, i.e. systems whose main task is to control and diagnose the power grid of the enterprise in case of emergency situations at distribution substations, determines the functional, structural and architectural features of the systems that provide power supply and control the main technical means of control, analyzes the technical base and justifies the choice of automation means, implementation of the proposed system. The structure and functional scheme are developed, and a method for building a tracking-type automatic control system is developed, the synthesis and modeling of the proposed system with a reference model and a PID regulator are carried out.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	8
1.1 Обґрунтування принципу роботи автоматизованих систем захисту електромережі промислового об'єкта	8
1.2 Аналіз автоматизованих систем захисту електромереж підприємств	13
1.3 Автоматизація процесів контролю та діагностики аварійних ситуацій на розподільчих підстанціях	20
2. СПЕЦИФІКАЦІЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ	27
2.1 Розробка структури автоматизованої системи керування захистом енергомережі та її функціональних пристроїв	27
2.2 Обґрунтування вибору модуля управління АСКЗЕ та його периферії	34
2.3 Обґрунтування вибору сенсорів та виконавчих механізмів автоматизованої системи	39
3. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ	48
3.1 Розробка способу побудови САУ слідкуючого типу для АСКЗЕ	48
3.2 Моделювання та синтез нелінійної слідкуючої системи АСКЗЕ з еталонною моделлю та ПІД-регулятором	51
ВИСНОВКИ	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	61

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ						
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизована система керування захистом електромережі промислового об'єкта / Automated control system for the protection of the power grid of an industrial facility			Літ.	Арк.	Акрушів	
Розроб.		Шидлівський Р.К.									
Перевір.		Албанський І.Б.									
Консульт.		Албанський І.Б.									
Н. Контр.		Заставний О.М.									
Затверд.		Сегін А.І.									
					ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-41						

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність впровадження автоматизованої системи керування захистом електромережі (АСКЗЕ) на промислових об'єктах зростає з розвитком сучасних виробничих потужностей, збільшенням навантажень на енергомережу та переходом до цифрових технологій в енергетиці. Сучасне промислове виробництво вимагає безперервного енергопостачання, а будь-які перебої чи пошкодження в електромережі можуть призвести до значних фінансових втрат або зупинки технологічних процесів. У цьому контексті АСКЗЕ дозволяє оперативно виявляти, локалізувати та усувати аварійні ситуації, забезпечуючи мінімальний час реакції.

Ці системи забезпечують цілодобовий моніторинг параметрів струму, напруги, частоти, фазової синхронізації, стану комутаційної апаратури та інших характеристик, що дозволяє виявляти порушення ще на ранніх етапах. Використання сучасних програмованих контролерів, сенсорів і цифрових реле дає змогу реалізувати гнучке налаштування алгоритмів захисту, включно з селективністю, самодіагностикою та аварійним повідомленням через SCADA чи мобільні системи сповіщення.

АСКЗЕ відіграє ключову роль у підвищенні енергоефективності, захисті обладнання від перевантажень, коротких замикань і перенапруг, а також дозволяє зменшити втрати електроенергії за рахунок точного управління навантаженнями. Враховуючи вимоги сучасних стандартів безпеки, електромагнітної сумісності та надійності, АСКЗЕ стала невід'ємною складовою цифрової трансформації енергосистем промислових підприємств. Її актуальність посилюється в умовах енергетичної нестабільності, зростання цін на електроенергію та необхідності інтеграції альтернативних джерел живлення (наприклад, когенераційних установок або сонячних станцій).

					ДП.АКТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мета кваліфікаційної роботи. Актуалізація розробки автоматизованої системи керування захистом електромережі. У представленій кваліфікаційній роботі проаналізовано аналогічні та сумісні автоматизовані системи керування та наведено структуру і способи включення засобів автоматизації захисту енергомережі розподільчої підстанції промислового об'єкта. Пріоритетними задачами розробки автоматизованої системи захисту енергомережі з використанням інтегрованих програмно-технічних засобів та промислових програмовано-логічних контролерів, що є несьогоднішній день невід'ємним елементом для автоматизованих систем різного ступеня складності.

Основними задачами кваліфікаційної роботи є:

- аналіз автоматизованих систем захисту енергомережі різного рівня на виробничому підприємстві, та пристроїв і засобів їх автоматизації;
- розробка структури технічних засобів та пристроїв входять до загальної схеми автоматизованої системи;
- розробка алгоритму роботи автоматизованої системи керування захистом електромережі промислового об'єкта;
- обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації;
- розробка та моделювання нелінійної слікуючої системи АСКЗЕ з еталонною моделлю та ПІД-регулятором.

Автоматизована система керування захистом електромережі промислового об'єкта є актуальною розробкою та вирішує ряд нагальних задач захисту та попередженню аварій на магістральних лініях енергопостачання. Пошук рішень проблемних задачі такого типу є поєднання сучасних програмно-технічних засобів автоматизації з принципово новими алгоритмами та математичними методами у енергетичній промисловості.

Предметом дослідження є автоматизована система керування захистом електромережі промислового об'єкта.

					ДП.АКТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об’єктом дослідження є система автоматичного управління захистом енергомережі та попередження можливих аварійних ситуацій на розподільчій підстанції промислового об’єкта.

Методи дослідження – аналіз та огляд актуальних електронних ресурсів і літературних джерел, порівняльний аналіз конкуренто спроможних розробок в галузі енергетичних систем.

Практичне значення одержаних результатів. Базується на тому, що запропоновані методи та технічні рішення по проектуванні та розрахунку систем автоматизованого управління, які мають практичні можливості підвищити їх надійність та ефективність в рази.

Апробація. Албанський І.Б., Шестопако В.Є., Шидлівський Р.К., Голосай Ю.Л. Інтеграція вимірювальних перетворювачів та виконавчих механізмів автоматизованих систем у технології інтернету речей IoT. – Збірник матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конференції «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» (АКІТ-2025), Тернопіль, 2025. – 79-85с.

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

1.1 Обґрунтування принципу роботи автоматизованих систем захисту електромережі промислового об'єкта

Тема енергетичної безпеки у сучасних умовах обговорюється на всіляких конференціях (онлайн-конференції) спеціалізованих форумах світових енергетичних компаній. Майже всі практики енергобезпеки, які існують у сучасному світі, були розроблені та впровадженні в період другої світової війни. І, по великому рахунку, напрацювання тих часів досі становлять основу розуміння того, що таке енергетична безпека. Ступінь важливості створення підприємств власної генерації знову зростає. У існуючих умовах знову стало важливим і нагальним питання безпеки підприємства, його економічної безпеки та збереження постійної працездатності у ситуації, коли можуть виникнути нові загрози. І тут стає гострим питання своєї генерації.

Автоматизовані системи захисту енергомережі промислових підприємств (АСЗЕ) призначені для забезпечення надійного та безперебійного енергопостачання, запобігання аваріям, перевантаженням і пошкодженням електрообладнання (рисунок 1.1). Основний принцип роботи АСЗЕ полягає в постійному моніторингу параметрів електричних мереж (струму, напруги, частоти, потужності) та оперативному втручанні в разі виявлення відхилень від норми [1].

АСЗЕ мають ієрархічну структуру, яка складається з трьох рівнів. На нижньому рівні працюють польові пристрої: електронні реле захисту, сенсори струму та напруги, вимикачі, що реагують на надструми, короткі замикання або перенапругу. Середній рівень включає контролери та пристрої керування (наприклад, ПЛК), які аналізують дані з сенсорів, виконують логіку захисту та передають команди на виконавчі механізми. Верхній рівень представлений SCADA-системою або автоматизованим диспетчерським

					ДП.АКТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пунктом, де оператори здійснюють контроль, аналіз ситуацій і приймають рішення щодо оптимізації мережі.



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд АСЗЕ

До функцій АСЗЕ належать: виявлення аварійних режимів, селективне відключення ушкоджених ділянок, автоматичне повторне вмикання (АПВ), забезпечення резервного живлення, захист від перенапруг, коротких замикань, перевантажень, аварій на трансформаторах або лініях. Інтелектуальні захисні пристрої можуть працювати з попереджувальними алгоритмами, що базуються на трендовому аналізі.

АСЗЕ використовують протоколи зв'язку (наприклад, Modbus, IEC 61850) для швидкого обміну інформацією між вузлами системи. Їх інтегрують з енергоменеджментом підприємства для оптимізації споживання. Додатково система може передбачати ручне або автоматичне перемикання на альтернативні джерела живлення.

Завдяки модульній побудові, такі системи легко масштабуються та модернізуються. Надійна АСЗЕ мінімізує ризики простоїв виробництва,

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

підвищує безпеку персоналу, знижує втрати електроенергії та покращує енергоефективність у цілому. В умовах цифровізації виробництва роль АСЗЕ зростає, адже вони є важливим елементом “розумного підприємства” та індустрії.

Автоматизовані системи захисту енергомережі промислових підприємств функціонують за принципом постійного моніторингу параметрів електромережі та оперативного реагування на виникнення аварійних ситуацій. Основною метою таких систем є забезпечення безперебійного електропостачання, захист обладнання від пошкоджень, а також мінімізація ризиків виникнення аварій та пожеж. Для цього система використовує набір спеціалізованих сенсорів, контролерів, виконавчих механізмів і програмного забезпечення, які працюють в інтегрованому режимі.

У структурі АСЗЕ зазвичай виділяють три основні рівні як було сказано вище: польовий (нижній), контрольний (середній) та диспетчерський (верхній) [2]. Польовий рівень включає пристрої захисту — електронні реле, автоматичні вимикачі, трансформатори струму й напруги. Вони здійснюють безпосередній контроль електричних величин і виконують команди від контролера у разі виявлення несправностей, таких як коротке замикання, перенавантаження, зниження або перевищення напруги.

Середній рівень відповідає за аналіз зібраної інформації та прийняття рішень. Тут функціонують програмовані логічні контролери (ПЛК) або мікропроцесорні захисні пристрої, які забезпечують логіку спрацювання захисту, послідовність дій, селективність відключення аварійної ділянки та автоматичне ввімкнення резервного живлення. Ці пристрої можуть бути налаштовані під конкретні умови виробництва та здатні адаптуватися до змін у навантаженнях або конфігурації мережі.

На верхньому рівні працює SCADA-система або інша диспетчерська платформа, яка забезпечує оператору повний візуальний контроль за станом енергосистеми, веде архів подій, сигналізує про виникнення аварій та надає інструменти для дистанційного управління енергомережами. Завдяки

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збиранню історичних даних система дозволяє виконувати прогнозування аварій, аналіз несправностей та оптимізацію схем живлення.

АСЗЕ також передбачають функції автоматичного повторного ввімкнення (АПВ), які дозволяють поновити живлення після короточасного відключення, якщо причина зникла. Якщо ж аварія зберігається, система блокує повторне вмикання, запобігаючи пошкодженню обладнання. У складніших варіантах АСЗЕ взаємодіють із системами автоматичного керування навантаженням, балансування енергії, енергоменеджментом та резервування живлення.

На сьогоднішній день на світовому ринку доступний великий асортимент інтелектуальних пристроїв захисту для АСЗЕ. Серед ряду найбільш актуальних є лінійка цифрових захисних реле, основна задача яких інтегральний захист енергомережі. Загальний вигляд такого цифрового реле представлений на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд цифрового реле захисту для АСЗЕ

Захисні пристрої та пристрої керування розраховані в тому числі на використання на одиночних та подвійних збірних шинах, у зіркоподібних, кільцевих та комірчастих мережах. При цьому можливе використання в ізольованих, компенсованих, стаціонарних та низькоомних заземлених мережах. Основні переваги захисних реле провідних фірм таких як Phoenix Contact - велика кількість функціональних можливостей для захисту, управління та вимірювання у компактній конструкції. Інтуїтивно зрозуміле

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

керування за допомогою наочних елементів, розміщених на передній панелі, та прості можливості параметрування. Довгий термін служби через відсутність акумуляторів і дуже низьку витрату електроенергії. Огляд технологій захисту (захист, контроль та керування електричних мереж).

Актуальним для таких пристроїв є інтуїтивне обслуговування пристроїв. Передні панелі захисних реле пропонують численні можливості для взаємодії та візуалізації існуючих станів. Дисплеї можна конфігурувати індивідуально, мають достатньо місця для відображення графіків установки, таблиць вимірюваних значень і віртуальних світлодіодів. Численні кнопки навігації та управління забезпечують простий контроль на місці. Сервісний інтерфейс USB на передній панелі забезпечує просте з'єднання із захисним реле [3].

Не від'ємним елементом представлених цифрових реле захисту є численні можливості налаштування. Програма обслуговування дозволяє швидко та просто налаштовувати параметри пристроїв. Так під час покрокового введення в експлуатацію враховуються залежності між встановленими налаштуваннями та виділяються різними кольорами. Поряд із загальними налаштуваннями пристрою налаштовуються також параметри інтерфейсів з первинними технологіями та функціями захисту.

Крім матриць вводу-виводу, редактори для створення логіки та візуалізації також підтримують налаштування. Прямий зв'язок із системою управління або вищими системами управління можливий за допомогою різних опцій комунікації. На основі технічно зрілих виробів і рішень з високим ступенем готовності можна оптимізувати надійність постачання.

Таким чином, АСЗЕ забезпечують ефективне, гнучке та надійне управління електропостачанням на промисловому підприємстві. Вони є ключовими елементами у впровадженні концепції "розумної енергомережі" (Smart Grid), забезпечуючи як безпеку обладнання, так і енергетичну ефективність виробництва.

					ДП.АКТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Аналіз автоматизованих систем захисту електромереж підприємств

Тема захисту електромереж особливо актуальна в наш час, коли зросла потреба у надійному та стабільному електропостачанні для всіх. Тому, проведений аналіз у першому розділі кваліфікаційної роботи показав, ряд існуючих і представлених на світовому ринку сучасних технологій забезпечення безпеки електромереж і що варто почерпнути з поданої інформації і взяти до уваги.

Актуальність наявності захисту електромереж на сучасних великих і малих підприємствах зумовила розвиток автоматизованих систем, що відслідковують нештатні ситуації і сигналізують про це. Для початку варто зрозуміти, чому захист електромереж настільки важливий і необхідний на сучасному промисловому об'єкті. Електромережі є складними системами, від яких залежить робота побутової техніки, промислових об'єктів, транспортних мереж і навіть систем життєзабезпечення. Відмови в їх роботі можуть призвести до серйозних наслідків: простою підприємств, пошкодження обладнання, фінансових втрат та загрози життю людини [3, 4].

Розвиток систем безпеки енергомереж та інженерна думка не стоїть на місці. На сьогоднішній день провідними виробниками електрообладнання представлено безліч інструментів, які допомагають знизити ризики та мінімізувати збитки від аварійних ситуацій.

Системи захисту електромереж у промислових підприємствах працюють таким чином [5]:

- по-перше грамотна система заземлення, здатна мінімізувати перенесення струму на основну заземлюючу шину і, відповідно, до виробничого обладнання;
- по-друге система вирівнювання потенціалів не дозволяє створювати велику різницю потенціалів між окремими частинами конструкції будівлі та обладнанням;

					ДП.АКТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- по-третє грамотна прокладка та екранування дротів і кабелів здатні значно зменшити шкідливий вплив мікросекундних імпульсних перенапруг на обладнання;

- по-четверте системи безпеки обмежують імпульси перенапруги і відводять імпульси струму в землю, а релейний захист автоматично виявляє пошкоджений елемент та впливає на вимкнення його вимикачів.

Інтелектуальні системи управління - це, мабуть, одні з найпрогресивніших технологій. Інтелектуальні системи керування (ІСК) дозволяють автоматично відстежувати стан мережі в режимі реального часу. Такі системи здатні не лише виявити проблему, а й запропонувати оптимальне рішення. Наприклад, автоматичні секціонери у разі короткого замикання можуть швидко відключити пошкоджену ділянку, мінімізуючи вплив на решту мережі. Більше того, сучасні ІСК здатні аналізувати дані про зупинки та вносити зміни до параметрів роботи мережі для запобігання повторним вимкненням.

Релейний захист – це ключовий елемент захисту електромереж, який здійснюється за допомогою релейних пристроїв. Основне завдання таких систем полягає у виявленні неполадок та вимкнення несправних елементів мережі. Сучасні технології дозволяють використовувати цифрові реле, які значно надійніші та точніші в порівнянні з їх аналоговими попередниками. Вони можуть обробляти величезну кількість даних і приймати рішення в лічені мілісекунди.

Периферійні пристрої захисту - сучасні пристрої захисту, що можуть бути дуже компактними та простими в установці. Такі пристрої, як, наприклад, розрядники, захищають електромережі від перенапруг, викликаних блискавкою або перехідними процесами в мережі. Захисна автоматика, така як автоматичні вимикачі та запобіжники, дозволяють запобігти перевантаженню та коротким замиканням, що значно збільшує термін служби обладнання та знижує ризик аварій [6].

					ДП.АКТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оптимізація захисних систем включає в себе використання блоків UPS. Безперебійні джерела живлення (БДЖ - UPS) - це надійний засіб захисту електромереж, особливо корисний в умовах нестабільного живлення. UPS підтримує живлення критично важливих пристроїв протягом короткого часу, дозволяючи запобігти їх некоректному вимкненню.

Комплексна система обліку (КСВ) та розподільчий облік допомагають у моніторингу та аналізі споживання електроенергії. Це дозволяє не тільки своєчасно виявляти аномалії та неправомірне споживання, а й планувати оптимізацію експлуатаційних процесів.

Сучасні технології захисту електромереж – це складні та багатогранні системи, які суттєво підвищують надійність та безпеку всієї енергетичної інфраструктури. Важливо не тільки знати про них, а й правильно застосовувати практично, що дозволяє запобігти аварійні ситуації, і економити ресурси. Постійний моніторинг та огляд сучасних рішень допоможе глибше зрозуміти існуючі можливості та вибрати найбільш підходящі під існуючі задачі сучасні технології.

Ще одним рішенням автоматизованої системи захисту всередині підприємства є автоматизована система моніторингу електрообладнання (АСМЕ) призначена для контролю стану електротехнічного обладнання, обладнання електрохімічного захисту (ЕХЗ), параметрів електропостачання та ЕХЗ лінійних та майданчикових об'єктів магістральних ліній електропередач (МЛЕ), а також дистанційного керування автоматизованими пунктами секціонування на лінійній частині МЛЕ за командами енергодиспетчера. Загальна структура такої АСМЕ представлена на рисунку 1.3 і включає в себе три рівні ієрархії, а саме: рівень, що відповідає за зв'язок з іншими автоматизованими системами, рівень, що відповідає за моніторинг та аналітику стану обладнання, рівень, що відповідає за самодіагностику та аналітику параметрів електропостачання (рисунок 1.4) [7].

					ДП.АКТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.3 – Загальна структура автоматизованої системи моніторингу електрообладнання

До основних функції АСМЕ відносять:

- моніторинг поточного стану електротехнічного обладнання;
- реєстрація, архівування та відображення на автоматизованому робочому місці (АРМ) (чергового електромонтера, оператора, енергодиспетчера) інформації про стан електротехнічного обладнання, параметри електропостачання;
- зв'язок із системою станційної телемеханіки;
- зв'язок із суміжними системами автоматизації;
- самодіагностика програмних та апаратних засобів;
- аналітика обладнання та параметрів електропостачання.



Рисунок 1.4 – Ієрархічна структура системи АСМЕ

Когенераційна установка (КГУ) — це енергетична система, яка одночасно виробляє електричну та теплову енергію з одного джерела палива (газу, біомаси, дизеля тощо) (рисунок 1.5). Основне призначення КГУ:

- підвищення ефективності використання палива (до 80-90%);
- зниження енергозалежності підприємства;
- забезпечення локальної стабільності енергопостачання.

Основна роль КГУ в системі автоматизованого захисту енергомережі це ефективна підтримка енергосистеми на основі аналізу основних параметрів та запобігання аварійних ситуацій з електропостачання. КГУ виступає частиною критичної інфраструктури, яка:

- підстраховує основні електричні мережі в разі аварії;
- забезпечує безперервність живлення важливого обладнання;
- компенсує коливання напруги та частоти в локальній мережі підприємства, тим самим зменшує навантаження на зовнішню мережу під час пікових споживань.



Рисунок 1.5 – Загальний вигляд когенераційної установки

Таким чином, когенераційна установка не тільки економить ресурси, а й виконує функцію активного елементу захисту енергосистеми підприємства.

Архітектура автоматизованої системи захисту КГУ включає ряд спеціалізованого програмно-апаратного обладнання, яке функціонує на основі промислового ПЛК і дозволяє автоматизувати процес контролю, діагностики та захисту енергомережі підприємства від нештатних ситуацій. У типових проектах когенераційна установка інтегрується в автоматизовану систему управління та захисту через такі компоненти (рисунк 1.6) [6-8]:

- програмований логічний контролер (ПЛК) — керує алгоритмами підключення/відключення КГУ;
- диспетчерські системи SCADA — моніторять роботу когенератора і дають команди на перехід в резервні або основні режими;
- пристрої автоматичного введення резерву (АВР) — автоматично запускають когенераатор при зникненні живлення в основній мережі;
- системи захисту від перенавантажень і коротких замикань — відслідковують аварійні ситуації і відсікають несправні ділянки;
- реле напруги, струму, частоти — визначають порушення параметрів мережі для запуску/відключення КГУ.

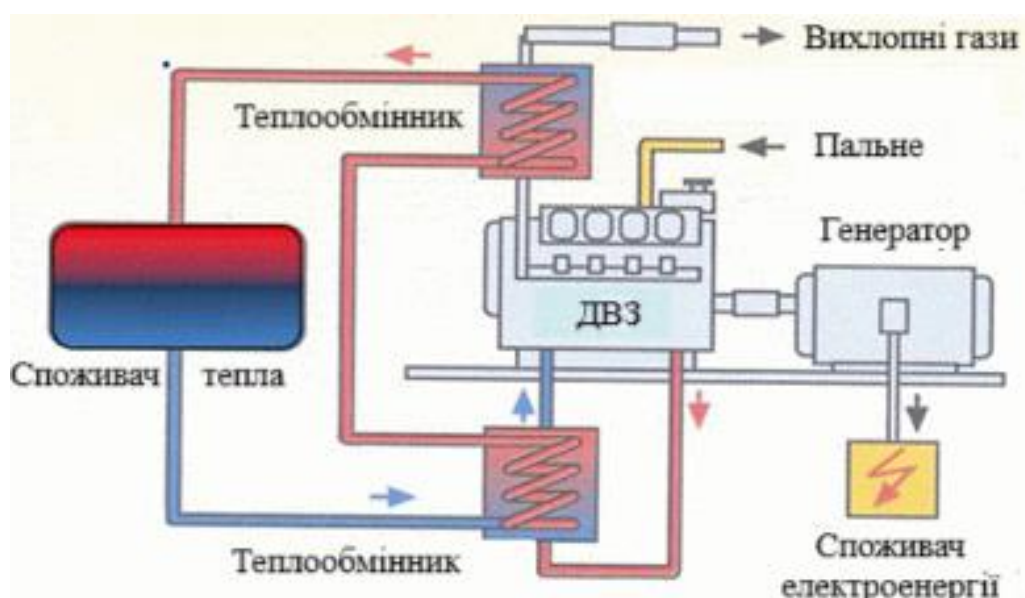


Рисунок 1.6 – Архітектура автоматизованої системи захисту КГУ

Принципи роботи КГУ у складі системи захисту включають цілий ряд функціональних можливостей, а саме:

- моніторинг стану основної мережі (наприклад через реле контролю напруги);
- при виявленні аварії (наприклад, пропадання фаз або критичного зниження напруги), тоді АВР розриває зв'язок із загальною мережею, КГУ запускається в автономному режимі;
- під час роботи КГУ підтримує необхідні параметри електроживлення, може адаптувати вихідну потужність під змінне навантаження;
- після відновлення основного живлення система синхронізує КГУ з мережею (через пристрої плавної синхронізації), вирішується питання переходу в нормальний режим або продовження роботи в паралельному режимі.

Перевагами використання КГУ на великих промислових об'єктах для захисту енергомережі є в свою чергу безперервність роботи критичного обладнання (наприклад, компресорних станцій, насосів, серверних кімнат). А також підвищення енергонезалежності — мінімізація простоїв виробництва, що в свою чергу веде до покращення якості електроенергії — стабілізація напруги та частоти це економічність тобто зниження витрат на енергію і паливо і швидкий перехід у резервний режим без участі персоналу.

Як і кожна автоматизована система захисту КГУ також має свої недоліки і виклики при впровадженні:

- висока вартість обладнання та його інтеграції;
- необхідність регулярного технічного обслуговування;
- складність точного узгодження роботи КГУ із зовнішньою мережею;
- системи безпеки повинні бути дуже надійними через ризики неправильного підключення або перевантаження.

Ефективність застосування КГУ - подвійне використання енергії, а саме когенерація дає можливість одночасно виробляти і тепло, і електрику з одного джерела енергії без зайвих втрат, локальне виробництво енергії, яке немає залежності від зовнішніх електромереж і частих аварій на магістральних лініях. Автоматизація процесів, ПЛК та SCADA постійно

					ДП.АКТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

моніторять стан системи і забезпечують миттєве реагування на відхилення параметрів.

До функціональних переваг автоматизованої системи захисту енергомережі можна віднести [9]:

- постійний моніторинг електричних та теплових параметрів;
- прогнозування навантаження та оптимізація режимів роботи когенератора;
- автоматичний пуск резервного живлення без участі оператора;
- забезпечення балансу навантажень і уникнення перевантажень мережі;
- інтеграція з загальним комплексом енергоменеджменту підприємства;
- збереження логів аварій, можливість аналізу роботи для покращення стратегій.

Когенераційна установка — це не просто резервне джерело енергії. У складі автоматизованої системи захисту енергомережі підприємства вона забезпечує плавний, розумний і ефективний перехід між режимами, стабілізує якість живлення і підвищує стійкість усієї енергосистеми до аварійних ситуацій. Когенераційна установка у складі автоматизованої системи захисту енергомережі підприємства — це сучасний інструмент для досягнення енергетичної незалежності, стабільності роботи і економічної вигоди. За умови правильної інтеграції в існуючу енергетичну систему вона може істотно зменшити ризики зупинки виробничих процесів та знизити експлуатаційні витрати підприємства.

1.3 Автоматизація процесів контролю та діагностики аварійних ситуацій на розподільчих підстанціях

Системи захисту електромереж у промислових підприємствах працюють таким чином:

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

- грамотна система заземлення (вона здатна мінімізувати занесення струму блискавки на головну заземлюючу шину і, відповідно, до виробничого обладнання);

- система вирівнювання потенціалів (не дозволяє виникненню великої різниці потенціалів між окремими частинами конструкції будівлі та обладнанням);

- грамотна прокладка та екранування проводів та кабелів (здатні значно зменшити шкідливий вплив мікросекундних імпульсних перенапруг на обладнання);

- пристрої захисту від імпульсних перенапруг (ПЗІП) (обмежують імпульси перенапруги та відводять імпульси струму в землю);

- системи безперебійного живлення (СБЖ) (при виникненні аварії, високовольтних імпульсних перешкод, низького рівня або стрибків напруги мережі живлення відбувається непомітне відключення основного джерела та приєднання резервного);

- релейний захист (автоматично виявляє пошкоджений елемент та впливає на вимкнення його вимикачів).

Для забезпечення діяльності сучасного підприємства необхідна надійна робота електричних мереж різного призначення. В даному випадку до електричних мереж відносяться всі дротяні мережі, якими проходить струм напругою до 1000 В. Небезпека в електричних ланцюгах і мережах може виникати найрізноманітніша. Це від банальної перенапруги в електромережі цехового обладнання до перекосу напруги та частоти однієї із фаз, як одна так і інша ситуація несе значну небезпеку для електричних кіл та обладнання виробничих ліній.

По-перше, це тривалі перенапруги, викликані різними проблемами у джерелах електроживлення, наприклад, несправністю понижаючого трансформатора, поганий контакт у нейтралі і тому подібне. Ці перенапруги мають порівняно невелику амплітуду, але діють тривалий час. Тому вони становлять для обладнання реальну небезпеку.

					ДП.АКТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

По-друге, це мілісекундні перенапруги, тривалість яких вимірюється максимум кількома напівперіодами мережі живлення. Вони мають дещо більшу амплітуду і найчастіше є результатом комутації потужних реактивних навантажень. Можуть викликати збої у роботі устаткування.

По-третє, це мікросекундні імпульсні перенапруги (МІП), що з'являються в результаті дії як природних, так і штучних факторів. До природних факторів зазвичай належать блискавки. До штучних — різні перехідні та комутаційні процеси в електромережах, імпульси під час роботи потужних тиристорних приводів, зварювальних апаратів та інших пристроїв. Час впливу такого імпульсу становить десятки та сотні мікросекунд, амплітуда напруги – до десятків кіловольт, амплітуда струму – до 100 кілоампер. Незважаючи на дуже малий час дії (багато менше одного напівперіоду), наслідки їх дії на електронне обладнання та електропроводку можуть бути фатальними.

По-четверте, це наносекундні імпульси, що є найчастіше результатом впливу електростатичного розряду. небезпека для інформаційних і слаботочних мереж. Усі МІП можна розділити на дві групи (рисунок 1.7) [9].

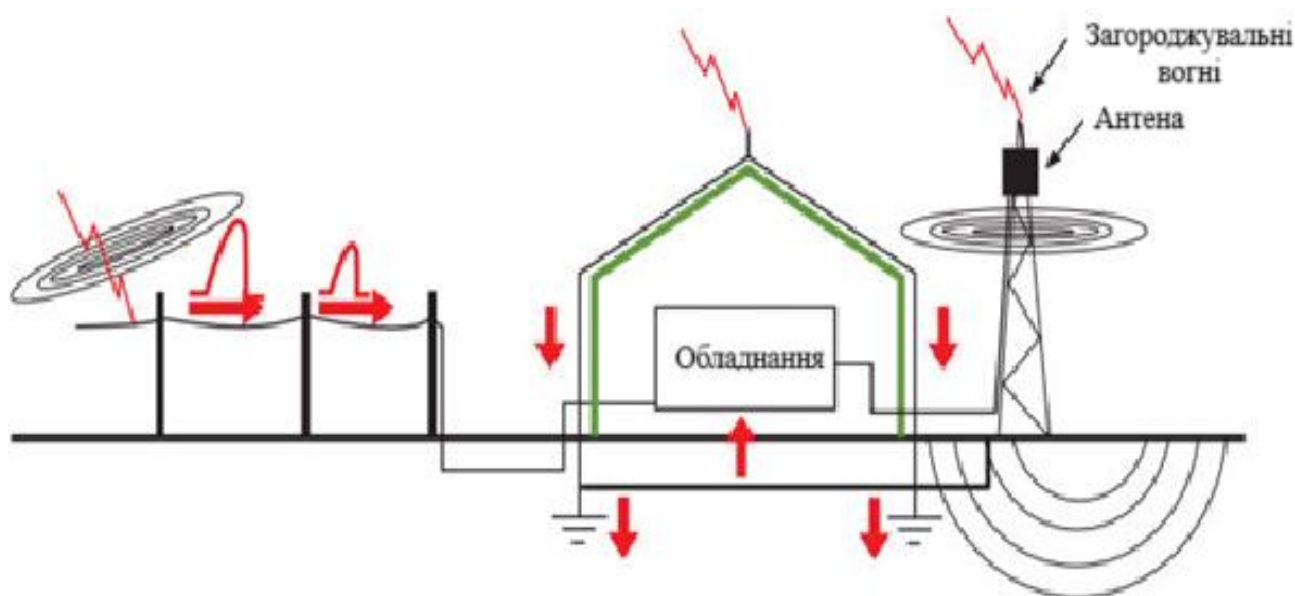


Рисунок 1.7 – Попадання мікросекундних імпульсів в обладнання

Перша - це пряма дія на апаратуру частини струму блискавки. Цей струм може потрапити до будівлі по різних лініях, що йдуть зовні будівлі (лінії живлення змінного та постійного струму різної напруги, інформаційні лінії, коаксіальні кабелі, що йдуть від антен тощо). Також частина струму блискавки може потрапити до будівлі через систему заземлення при ударі блискавки в систему зовнішнього захисту від блискавки або поруч із будинком.

Друга – це електромагнітні наводки різної природи. Ці наводки можуть виникати як з природних причин, наприклад, близький розряд блискавки, так і штучних (комутації ліній на підстанції, включення та вимкнення потужних навантажень тощо). Приходять ці наведені імпульси перенапруги можуть як ззовні, так і генеруватися всередині будівлі.

Захист від руйнівних імпульсів це перш за все комплекс проведених заходів і регламентних робіт по забезпеченню правильного підключення та розподілення електричної напруги у електрощитових та підстанціях. Так як природа цих імпульсів різна, то й способи захисту від них також відрізняються. Ряд цих способів давно відомі для побутових електриків та енергетиків. Наприклад, для захисту від тривалих та мілісекундних перенапруг широко застосовуються стабілізатори напруги, реле контролю напруги, джерела безперебійного живлення.

Інтенсивну боротьбу з мікросекундними імпульсами розпочали порівняно недавно у зв'язку з розвитком та широким впровадженням електронної та мікропроцесорної техніки. Для захисту не тільки обладнання, а й людей, що працюють на ньому, від ураження електричним струмом були розроблені спеціальні методи та пристрої. На об'єктах особливо за наявності зовнішнього блискавковідводу (захисту), повинна бути грамотно зроблена система заземлення, здатна мінімізувати занесення струму блискавки на головну шину, що заземлює, і, відповідно, до виробничого обладнання. У будівлі має бути система вирівнювання потенціалів, яка не дозволяє щоб

					ДП.АКТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

виникала велика різниця потенціалів між окремими частинами конструкції будівлі та обладнанням.

Грамотне прокладання та екранування проводів і кабелів здатне значно зменшити шкідливий вплив МПП на обладнання. Застосування пристроїв захисту від імпульсних перенапруг (ПЗІП) також забезпечує безпеку обладнання та персоналу [9, 10].

Перші три способи добре описані в технічній документації до обладнання. Що стосується застосування ПЗІП, то при простоті цих пристроїв, що здається, їх застосування має багато тонкощів і нюансів, починаючи з обґрунтування необхідності застосування і закінчуючи правилами монтажу. Так як ПЗІП захищає в основному електронне обладнання, треба зрозуміти, чи є відповідне обладнання, яке потрібно захищати. Тут треба враховувати як вартість самого устаткування, а й можливі наслідки виходу його з ладу чи навіть просто збоїв у роботі. Іноді вихід з ладу маловартісного приладу призводить до зупинки всього техпроцесу та багатомільйонних втрат. Так як, імпульсні перенапруги негативно впливають як на електронну апаратуру, так і на кабелі системи електропостачання. Так як імпульс має дуже високу амплітуду напруги, то в деяких випадках не витримує ізоляція кабелю і відбуваються пробой між проводами (наприклад, фазою та нейтраллю) або між проводом та землею. Імпульс триває максимум сотні мікросекунд, і захисні автомати не встигають відреагувати на нього (найкращі автомати захисту мають час спрацювання одиниці мілісекунд). В результаті пробой виникає тільки місцеве пошкодження ізоляції, яке не призводить до короткого замикання. Лінія електропостачання продовжує працювати, а в місцях пошкодження ізоляції виникає невеликий струм пробой, що розігріває ізоляцію кабелю. Розігрів прискорює процес старіння ізоляції, що призводить до зниження її опору в даному місці і ще більшого зростання струму та температури. Цей процес може тривати місяцями і навіть роками — але, зрештою, ми маємо загоряння проводки, здатної викликати пожежу на підприємстві.

					ДП.АКТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Тому керівна документація рекомендує встановлювати обмежувачі перенапруги (ПЗП) під час повітряного введення лінії електромережі до будівлі. Слід зрозуміти, наскільки велика ймовірність попадання імпульсу на обладнання, а також характер і величину цього імпульсу. Наприклад, якщо ваш об'єкт розташований у місті і навколо стоять вищі будинки, то ймовірність попадання до вас серйозного імпульсу перенапруги мала. Якщо ж об'єкт стоїть у чистому полі поруч із вишкою зв'язку, тобто реальна можливість «зловити» як наведений імпульс, так і значну частину струму блискавки, а якщо ще й заживлення відбувається від повітряної лінії, то ймовірність такого результату значно збільшується. Якщо в результаті аналізу потенційних ризиків прийнято рішення, що вигідніше застосувати ПЗП, а ніж потім ліквідувати наслідки економії. Тому враховуючи експлуатаційні характеристики промислового обладнання потрібно вибрати і розрахувати конкретні пристрої захисту та розміщення їх на об'єкті.

На обладнанні підстанцій і спеціальних електроустановках підприємств використовуються розглянуті вище способи захисту з урахуванням специфіки їх функціонування, оскільки робота трансформаторів, електродвигунів і інших електроустановок набагато складніша і супроводжується значним підвищенням струму і зміною напруги в режимах, що відрізняються від нормальних. Для належного функціонування релейного захисту і автоматики елементів автоматизованої системи керування захистом електромережі приходить ускладнювати їх схеми, використовуючи різні блокування при розрахунках параметрів захисту враховують додаткові умови, зв'язані з різними режимами їх роботи.

Автоматизовані системи керування захистом (АСКЗ) на розподільчих підстанціях підприємств — це комплекс апаратно-програмних засобів, що забезпечує контроль, захист, управління та моніторинг електричних мереж для забезпечення їх безпечної, надійної й ефективної роботи [10]. Такі системи в реальному часі стежать за станом електромережі, виявляють

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аварійні ситуації, локалізують пошкодження, автоматично відключають аварійні ділянки та переводять мережу в безпечний режим.

Особливості роботи АСКЗ на підстанціях різного типу враховують наступні елементи:

- децентралізована архітектура: кожен пристрій має свою «інтелектуальну» частину, яка може працювати автономно;
- висока швидкість реакції: час спрацювання захисту — мілісекунди;
- модульність: легке розширення, додавання нових ліній чи генераторів;
- інтеграція зі SCADA: централізований контроль і візуалізація;
- стійкість до збоїв: резервування каналів зв'язку та живлення.

Автоматизовані системи захисту на розподільчих підстанціях підприємств забезпечують неперервність технологічних процесів, збереження обладнання, безпеку персоналу та економію коштів. Вони стають основою для побудови надійних і сучасних енергетичних комплексів на промислових об'єктах.

					ДП.АКТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. СПЕЦИФІКАЦІЯ ВИБОРУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1 Розробка структури автоматизованої системи керування захистом енергомережі та її функціональних пристроїв

Система електропостачання – це сукупність пристроїв, які служать для передачі і розподілу електроенергії між споживачами. Для промислових підприємств система електропостачання надзвичайно важлива, оскільки у цій сфері йде дуже велике споживання електричної енергії, перервати процес споживання неможливо, оскільки це зупинить технологічний процес. На промислові об'єкти та підприємства має постачатися якісна електроенергія.

Системи електропостачання промислових підприємств призначені для забезпечення електроенергією електродвигунів, печей, освітлювальних приладів, зварювальних апаратів, промислових машин та виробничих ліній. Головними джерелами електричної енергії на даний момент є теплові, ядерні та гідроелектростанції. Там за допомогою синхронних трифазних генераторів виробляється електрична енергія. З АЕС, ТЕС чи ГЕС електроенергія передається на центральні розподільні підстанції, які є кожному підприємстві. По виділених лініях електроенергія переходить по розподільних пунктах, що у кожному цеху, звідти енергія передається безпосередньо споживачеві.

Для початку необхідно провести аналіз та планування майбутніх навантажень, які впливатимуть на систему. Від якісно з проектованої системи навантажень залежить ефективність обраної системи та правильна робота елементів системи електропостачання підприємств. При оцінці навантаження слід враховувати такі показники, як надійність електроприймачів, тип струму, що використовується, режими роботи, а також потужність і напруга.

На даний момент усі промислові підприємства працюють на трифазному змінному струмі. Для заживлення приймачів, що працюють на

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

постійному струмі, використовуються спеціальні перетворювачі. На великих об'єктах застосовуються перетворювальні підстанції, які обладнані ртутними та напівпровідниковими випрямлячами. При тому, що більшість підприємств потребує змінного струму, електроприймачі часто працюють на постійному струмі, тому перетворювальна підстанція необхідна практично скрізь.

Існує кілька видів приймачів (споживачів) електроенергії [10, 11]:

- приймачі з високою частотою струму – понад 10 000 Гц;
- приймачі із частотою до 10 000 Гц;
- найпоширеніша категорія – приймачі нормальної частоти, що становить 50 Гц;
- прилади зниженої частоти менше 50 Гц.

Основним струмом у системі промислового електропостачання є змінний трифазний струм із частотою 50 Гц. Інші установки прийому, з підвищеною або високою частотою, використовуються в промисловості з метою індуктивного та діелектричного нагріву.

Струм зниженої частоти, у свою чергу, призначений для живлення багатьох плавильних установок, таких як установки електрошлакового переплаву та інші установки в металургійній промисловості. При створенні системи електропостачання слід враховувати також те, що в різних фазах зазвичай різне навантаження, в мережі часто буває несиметрична напруга. Серед несиметричних приймачів, встановлених на промислових об'єктах, виділяють освітлювальні прилади, однофазні трансформатори та різні види електропечей.

До симетричних приймачів відносяться всі електричні машини, які характеризуються симетричною роботою всіх трьох фаз, зокрема трифазні печі та електродвигуни.

Основна класифікація електроприймачів (споживачів) здійснюється за надійністю живлення. До першої категорії належать найважливіші об'єкти та машини, перерва в роботі яких може призвести до повної зупинки технологічного процесу та несе небезпеку для здоров'я людей. При

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

припиненні подачі електрики на промисловому об'єкті основний збиток полягає у псуванні обладнання. Для цієї категорії необхідно використовувати 2 незалежні джерела живлення і перерву допустимо лише на час включення резервного захисту. Друга категорія включає обладнання, перерва в роботі якого тягне за собою зниження продуктивності і простій машин. Для таких приймачів допустимо перерву в роботі на час ручного включення резервного генератора, але тут також потрібна установка двох джерел живлення. Третя категорія включає обладнання, що використовується на невідповідальних складах і в додаткових цехах. У цьому випадку дозволена перерва у живленні до доби, на час ремонту або заміни обладнання.

На великих підприємствах є приймачі 1-ої категорії, зупинка яких може спричинити пожежі чи вибухи. У такому разі для окремої категорії приймачів передбачено третє джерело електроенергії.

Промисловість у нашій країні споживає близько двох третіх від всієї електричної енергії, що виробляється. Постійно відбувається зростання потужності промислових підприємств та електроприймачів. Саме це призводить до проблеми раціонального формування схем розподілу цієї енергії. Зростають вимоги до економічності, надійності, безпеки та зручності експлуатації, а також якості електроенергії.

Система електропостачання підприємства включає розподільні, живильні, перетворювальні, а також трансформаторні підстанції. Всі вони пов'язані між собою спеціальними кабельними лініями та проводами по яких протікає струм. Потрібні дані пристрої для розподілу електроенергії між усіма споживачами. Розподіл електричної енергії від 35 до 220 кВ відбувається за допомогою повітряних ліній, а 6 – 10 кВ – за кабельними лініями.

Такі системи електропостачання промислових підприємств є дуже важливими для всіх існуючих заводів. Зумовлено це величезним споживанням електроенергії галуззю. Переривати такий процес просто неможливо, оскільки це призведе до порушення технологічного процесу.

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Саме тому всі промислові підприємства мають жити виключно якісною електроенергією. Будується дана система таким чином, щоб вона безперебійно постачала електрику в нормальному та післяаварійному режимі, а також була максимально надійною, безпечною та зручною у процесі обслуговування. Але це не є основні вимоги.

Система електропостачання підприємства має бути ще й економічною, що стосується витрат та втрат енергії. Досягається такий ефект завдяки використанню резервування мереж підприємств та об'єднанню живлення всіх споживачів (сільських, комунальних та промислових). Якщо здійснюється будівництво для підприємства власної електростанції, необхідно враховувати всіх прилеглих незаводських споживачів електричної енергії.

Усі електричні підстанції та мережі входять до складу комплексу підприємства разом із іншими комунікаціями та спорудами. Отже, вони мають бути взаємопов'язані з технічною та будівельною частиною, і навіть генеральним планом. Досить серйозні вимоги до постачання електроенергією пред'являють ті електроприймачі, які мають ударне навантаження, що різко змінюється, циклічно повторюється. Також сюди належать споживачі, які потребують безперебійного живлення. Це стосується всіх режимів.

Інформаційні технології, що постійно розвиваються, істотно збільшують навантаження на існуючі електричні мережі. При цьому дуже важко гарантувати безперебійну роботу будь-яких промислових об'єктів з огляду на випадки падіння напруги та різні аварійні ситуації. Завдяки системі безперебійного живлення (СБЖ) вдається зробити заміну постійного джерела струму на тимчасовий і цим уникнути перебоїв з електрикою. Кожне підприємство прагне мінімізувати свої матеріальні збитки, які пов'язані безпосередньо з різними ситуаціями, що відбуваються на виробництві [11].

Крім людського чинника існують й інші особливості, що впливають на правильну роботу всього обладнання та безперервність виконання різних технологічних операцій. Адже від якості електричної енергії на підприємстві насамперед залежить його ефективність. Це одна з основних складових

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

правильної та гарантованої роботи всього промислового комплексу. Але, на превеликий жаль, якість електричної енергії, яку споживає будь-яке промислове підприємство, бажає кращого. Перебої, перешкоди, стрибки напруги і багато іншого, що виникають, - все це згубно впливає на роботу електричного обладнання і навіть може призвести до його поломки.

Допомогти вирішити цю проблему можуть спеціально призначені автоматизовані системи керування захистом електромереж в комплексі з системами резервного електропостачання. Принцип роботи їх досить простий. Це автоматизоване обладнання, яке гарантує безперебійну роботу всіх приєднаних до нього пристроїв. Такі комплексні системи з кожним роком набирають популярності, адже кожне підприємство хоче випускати якісну та надійну продукцію та бути абсолютно впевненим у тому, що технологічний процес не буде раптово перерваний через проблеми із постачанням електроенергії.

Структура автоматизованої системи керування захистом енергомережі (АСКЗЕ) промислового об'єкта включає наступні рівні (рисунк 2.1) [12]:

1. Рівень первинного обладнання (польовий рівень):
 - трансформатори струму (ТТ), трансформатори напруги (ТН);
 - вимикачі, роз'єднувачі, короткозамикачі;
 - сенсори струму, напруги, частоти, температури;
 - вимірювальні перетворювачі.
2. Рівень захисту та автоматики:
 - мікропроцесорні реле захисту (струмовий, диференційний, газовий захист тощо);
 - пристрої автоматики (АПВ, АЧР, АВР — автоматичне повторне ввімкнення, частотне розвантаження, резервне ввімкнення);
 - логічні контролери, пристрої локального управління.
3. Рівень керування:
 - контролери (PLC), промислові комп'ютери;
 - панелі операторів (HMI);

- комунікаційні шлюзи, сервери збору даних;
- SCADA-системи для моніторингу й керування.

4. Рівень диспетчерського контролю:

- сервери бази даних;
- SCADA-сервери;
- робочі місця операторів і диспетчерів;
- системи аварійного сигналізування.

5. Комунікаційна інфраструктура:

- локальні мережі Ethernet, RS-485, Profibus, Modbus, IEC 61850;
- протоколи обміну даними;
- канали резервного зв'язку.

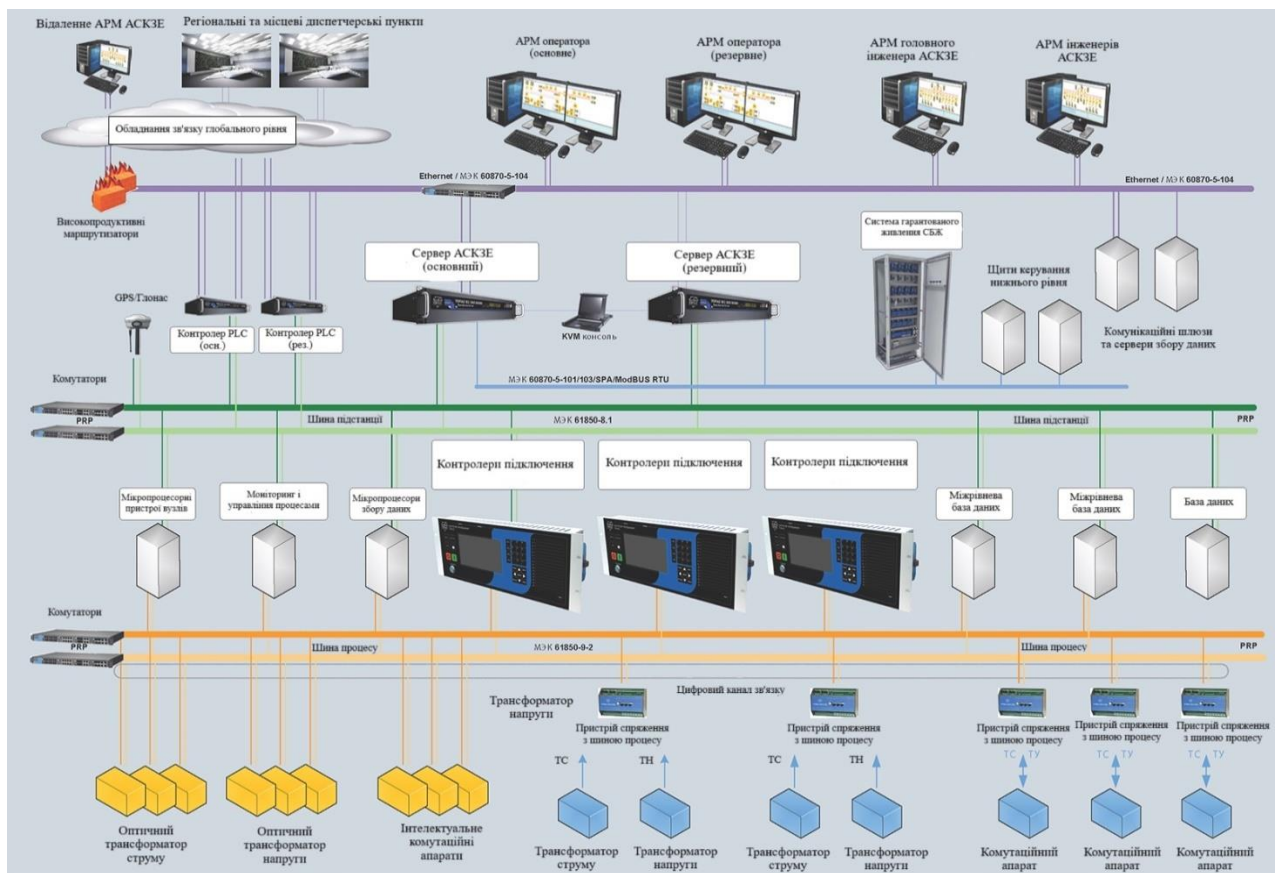


Рисунок 2.1 – Структура автоматизованої системи керування захистом енергомережі

До функціональних можливостей АСКЗЕ можна віднести наступні елементи [12, 13]:

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

- виявлення та ізоляція аварійних режимів;
- автоматичне вимкнення пошкоджених ділянок;
- автоматичне відновлення живлення;
- збір, аналіз і передача інформації про події;
- моніторинг стану обладнання;
- оптимізація навантаження та розподілу потужності;
- запобігання аваріям та зниження експлуатаційних витрат.

АСКЗЕ забезпечує комплексну автоматизацію технологічних процесів, підвищуючи надійність, безпеку та економічність роботи обладнання підстанції та ділянок прилеглих електричних мереж шляхом зведення до мінімуму обслуговуючого персоналу підстанції.

Ієрархічна трьохрівнева система моніторингу та управління, заснована на комплексі стандартів МЕК 61850, а також у системі реалізовано гаряче резервування основних компонентів. Така трьохрівнева система моніторингу у верхньому рівні включає:

- пристрої концентрації, обробки та архівування даних (сервера);
- пристрої надання інформації користувачам (АРМ, принтери);
- автоматизовані робочі місця (АРМ) користувачів:
 - АРМ оператора (основне та резервне);
 - АРМ головного інженера (стаціонарний);
 - АРМ інженерів АСУ (стаціонарний та переносний).

Крім того, програмно-технічні засоби автоматизованої системи керування технологічним процесом (АСК ТП) забезпечують віддалений авторизований доступ до системи з робочого місця «сервер віддаленого доступу».

Середній рівень системи включає:

- пристрої передачі інформації (маршрутизатори, комутатори тощо) для організації підстанційної резервованої мережі передачі даних з розв'язанням задачі надмірної топології;

- сервери оперативної інформації з функціями передачі телеінформації на рівні диспетчерського управління;

- реалізація синхронізації часу;

Нижній рівень є первинними джерелами вимірювальної та дискретної інформації, а також виконавчими механізмами:

- мікропроцесорні пристрої збору та обробки інформації (контролери приєднань та модулі УСО у їх складі, що здійснюють:

- переклад дискретної та аналогової інформації у цифровий формат, у тому числі за допомогою протоколу МЕК 61850-9-2;

- введення у цифровому форматі дискретної та аналогової інформації зі спеціалізованих контролерів, що входять до їх складу;

- надання даних споживачам інформації у протоколі МЕК 61850-8-1;

- здійснення команд телеуправління (вплив на виконавчі механізми) у цифровому протоколі.

2.2 Обґрунтування вибору модуля управління АСКЗЕ та його периферії

Автоматизована система керування захистом енергомережі підстанції є критично важливою ланкою в інфраструктурі промислового енергозабезпечення, забезпечуючи надійність, безпеку та оперативність реагування на аварійні ситуації. Основна її мета — забезпечити швидке виявлення і локалізацію несправностей в енергосистемі та запобігти подальшим пошкодженням обладнання чи відключенням живлення.

Система включає в себе кілька основних функціональних підсистем: захисту, контролю, діагностики, реєстрації подій і дистанційного керування. Для цього використовуються мікропроцесорні реле захисту, які здатні виконувати складні алгоритми оцінки стану мережі у реальному часі. Наприклад, вони можуть аналізувати струми короткого замикання, перенавантаження, асиметрію фаз, частотні та напругові відхилення [13].

					ДП.АКТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливістю сучасних АСКЗЕ є інтеграція з SCADA-системами, які дозволяють візуалізувати стан мережі, оперативно отримувати інформацію з об'єктів та керувати обладнанням віддалено. Також важливу роль відіграють модулі синхронного вимірювання (МСВ(PMU)), які дозволяють проводити кореляційний аналіз між різними точками мережі, підвищуючи точність діагностики.

Система використовує високоточні цифрові трансформатори струму та напруги, а також програмні модулі аналізу сигналів, які можуть реалізовувати алгоритми автокореляції та взаємокореляції для виявлення повторюваних або прихованих аномалій.

Іншими словами, сучасна АСКЗЕ — це інтелектуальний комплекс, що здатний не лише реагувати на аварії, а й прогнозувати їх, забезпечуючи превентивне технічне обслуговування та високу енергоефективність роботи підстанції.

ПЛК в автоматизованій системі керування захистом енергомережі виконує низку критично важливих функцій і завдань. Його основна мета — забезпечення надійного, безперервного та безпечного функціонування енергосистеми підприємства шляхом моніторингу, аналізу та управління параметрами енергомережі в реальному часі. До основних функцій ПЛК у складі АСКЗЕ відносять [14]:

- моніторинг електричних параметрів: напруга, струм, частота, фазові кути;
- виявлення аварійних ситуацій: коротке замикання, перевантаження, обриви фаз, дисбаланс;
- реалізація алгоритмів захисту: наприклад, відключення живлення при аварії, перемикання резервних ліній;
- обробка сигналів від сенсорів і трансформаторів струму/напруги;
- логічне керування релейними виконавчими пристроями (контакторами, автоматами);
- збір і архівація даних про події, параметри, спрацювання захистів;

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- передача даних на SCADA-системи або сервери моніторингу;
- синхронізація роботи з іншими контролерами або автоматикою;
- підтримка взаємозв'язку через промислові протоколи: Modbus, Profibus, CANopen тощо;
- реалізація діагностики та самотестування (self-test) функцій пристрою.

Для вибору оптимального рішення ПЛК АСКЗЕ потрібно врахувати особливості роботи таких пристроїв та широкий спектр функціональних можливостей роботи з периферією. До особливостей роботи ПЛК АСКЗЕ відноситься:

- висока надійність та відмовостійкість (може працювати у складних умовах - вібрації, температура, пил);
- підтримка роботи в реальному часі, що критично для захисних функцій;
- гнучкість програмування для реалізації складних алгоритмів аналізу (зокрема кореляційних методів);
- можливість оновлення ПЗ та параметрів захисту без зупинки системи;
- швидкодія - мінімальні затримки обробки сигналів і прийняття рішень;
- сумісність із цифровими системами релейного захисту (РЗА);
- можливість адаптації під специфіку об'єкта - індивідуальна логіка, резервування, сценарії аварійного реагування;
- ПЛК є "мозком" АСКЗЕ і здатен забезпечити високий рівень адаптивного захисту, автоматизованого реагування на аномалії в енергомережі та інтеграцію з іншими інформаційно-керуючими системами підприємства.

Промисловий ПЛК Schneider Electric Modicon M580 призначений для цифрових підстанцій з високим рівнем автоматизації, а саме підтримкою Ethernet, вбудовані функції кібербезпеки, можливість роботи з різними протоколами зв'язку (рисунок 2.2) [15, 16].

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд промислового ПЛК Schneider Electric Modicon M580 для АСКЗЕ

Modicon M580 – це перший у світі ePAC (programmable automation controller), основою якого є Ethernet. Такий підхід дозволяє комбінувати видалені та розподілені пристрої вводу/виводу в межах однієї мережі, знімаючи цим обмеження на архітектуру системи автоматизації. При цьому використовуються переваги модулів введення/виведення X80, що дозволяє зменшити витрати на обслуговування та навчання та використовувати останні технічні досягнення та стандарти.

Процесор SPEAr має вбудований детермінований стандарт зв'язку Ethernet, який використовується у всіх комунікаціях, включаючи обмін даними по внутрішній шині шасі. В результаті представлено новий рівень прозорості та продуктивності без необхідності ручного налаштування кожного підключеного пристрою. Технологія SPEAr використовує стандарт зв'язку Ethernet для комунікацій по магістральній та внутрішній шині шасі, що полегшує інтеграцію обладнання в єдину систему. Протокол Ethernet також використовується для роботи з будь-якими пристроями мережі, наприклад: пристрої розподілу електроенергії, низьковольтні щити, які разом становлять єдину відкриту систему управління підприємством.

Ядром M580 є сучасний двоядерний ARM-процесор сімейства Cortex-A9 SPEAr, який забезпечує найвищий рівень обчислювальної потужності та

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

широкі можливості підключень, дозволяючи реалізовувати функції безпеки в контролері та підвищуючи його стійкість до кіберзагроз. Крім того, з можливістю зміни конфігурації в режимі реального часу більше не потрібно зупиняти процес, щоб додати або видалити модуль і змінити архітектуру, або навіть модифікувати додаток.

Контролер приєднання TOPAZ є модульним, проектно-компонованим виробом, склад якого визначається в залежності від розв'язуваних завдань, і призначений для вимірювань та обліку електричної енергії та потужності, напруги та сили змінного струму, частоти, показників якості електричної енергії, реєстрації дискретних сигналів про стан обладнання, видачі команд управління, розрахунку та видачі сигналів оперативних блокувань, уніфікованих аналогових сигналів напруги та сили постійного струму (рисунк 2.3) [17]. Функціонал контролера залежить від набору модулів телемеханіки та телевимірювання у його складі.



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд периферійного контролера приєднання
TOPAZ

Периферійний контролер TOPAZ забезпечує наступні особливості роботи в комплексі АСКЗЕ:

- автоматичний регламентний збір результатів вимірювань (включаючи достовірність) із трансформаторів струму та напруги на приєднаннях;
- збирання та зберігання даних про стан засобів вимірювань, опитуваних безпосередньо контролером;

- розрахунок електротехнічних параметрів нормального режиму - значення напруги, струмів, активної та реактивної потужності, нульової, прямої та зворотної послідовності, частоти та інше;
- видачу команд телеуправління та контроль стану комутаційних апаратів на приєднаннях;
- здійснення захисту та блокування технологічного обладнання;
- обмін інформацією з іншими контролерами і ПЛК та передачу інформації на верхній рівень з використанням протоколів IEC 61850-8-1 (MMS, GOOSE) та MEK 60870-5-104;
- архівування осцилограм та ведення “журналу подій”;
- надання доступу ІВК до результатів вимірювань, даних про стан засобів вимірювань, об'єктів вимірювань;
- апаратний та програмний захист від несанкціонованої зміни параметрів та будь-якої зміни даних;
- синхронізацію часу та корекцію часу в приладах обліку;
- самодіагностику з фіксацією результатів у “Журналі подій”;
- підтримку гарячого резервування;
- підтримку протоколу резервування Ethernet PRP (зокрема з використанням протоколу RSTP).

2.3 Обґрунтування вибору сенсорів та виконавчих механізмів автоматизованої системи

Сенсори та виконавчі механізми є ключовими елементами автоматизованих систем керування захистом енергомережі, що забезпечують безперервний моніторинг, управління та реагування на відхилення в електричній мережі промислового об'єкта.

Сенсори в АСКЗЕ виконують функції вимірювання фізичних величин — струму, напруги, частоти, температури, фазового зсуву, потужності тощо. Серед основних типів сенсорів — трансформатори струму (СТ) і напруги

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(VT), сенсори температури на шинопроводах і трансформаторах, сенсори частоти та гармонічного складу сигналу (таблиця 2.1). Вони перетворюють аналогові значення параметрів енергомережі у сигнали, придатні для цифрової обробки ПЛК або іншими пристроями захисту [18, 19].

Таблиця 2.1 – Перелік та особливості роботи наявних сенсорів АСКЗЕ

Тип пристрою	Назва/приклад	Функції	Особливості/Застосування
СЕНСОРИ			
Трансформатори струму (СТ)	СТ 5А/1А	Вимірювання струму в лініях	Живлять реле захисту та ПЛК
Трансформатори напруги (VT)	VT 100:1	Вимірювання фазної та лінійної напруги	Подання на блоки автоматики
Сенсори частоти	Частотоміри з аналоговим/цифровим виходом	Визначення відхилень частоти (наприклад, 49-51 Гц)	Застосовуються для стабілізації режиму
Сенсори фазового зсуву	Електронні фазометри	Виявлення асинхронії фаз або перекосу навантаження	Для синхронізації роботи обладнання
Температурні сенсори	Термопари, термістори	Моніторинг температури трансформаторів, шин, автоматів	Для запобігання перегріванню та аваріям
Цифрові вимірювальні модулі	IED Schneider, Siemens	Комплексний аналіз струму, напруги, частоти, гармонік	Працюють за протоколами IEC 61850, Modbus
Сенсори якості енергії	PQ-аналізатори	Визначення гармонік, сплесків, флуктуацій, несиметрії	Детальний аналіз аварійних режимів

Окрему групу становлять цифрові сенсори, які вже на етапі збору виконують попередню обробку (наприклад, фільтрацію або дискретизацію сигналу). Ці сенсори часто інтегруються з інтелектуальними вимірювальними приладами, що працюють за протоколами IEC 61850, Modbus, DNP3.

Виконавчі механізми (актуатори) — це пристрої, які за командою ПЛК чи контролера АСКЗЕ виконують фізичну дію: вимкнення автоматичного вимикача, увімкнення резервного джерела живлення, перемикання шин, подачу сигналу на аварійне оповіщення тощо (таблиця 2.2). До таких

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пристроїв належать електромагнітні приводи роз'єднувачів, мотор-приводи вимикачів, сигнальні лампи, звукові сирени, релейні модулі для комутації.

Таблиця 2.2 - Перелік та особливості роботи наявних виконавчих механізмів і актуаторів АСКЗЕ

Тип пристрою	Назва/приклад	Функції	Особливості/Застосування
ВИКОНАВЧІ МЕХАНІЗМИ			
Релейні модулі	Реле типу Omron, Siemens, Finder	Вмикання/вимикання аварійних ліній або релейних схем	Висока швидкодія, низький рівень споживання
Електромагнітні приводи	Приводи ABB, Schneider	Керування автоматичними вимикачами та роз'єднувачами	Спрацьовування при перевищенні порогів
Моторні приводи вимикачів	Actuator Motor Units	Дистанційне включення/відключення силових комутаційних апаратів	Забезпечують автоматизацію на підстанціях
Сигнальні пристрої	Сигнальні лампи, сирени	Візуальна/звукова індикація аварійного стану або спрацювання захисту	Миттєве оповіщення обслуговуючого персоналу
Комунікаційні актуатори	Інтерфейси (RS-485, Ethernet)	Передача команд до виконавчих пристроїв	Сумісність із SCADA та ПЛК

За типом керування виконавчі механізми бувають релейного, електронного або гідравлічного/пневматичного типу, залежно від масштабу та специфіки об'єкта. Важливою особливістю є те, що вони повинні спрацьовувати з мінімальною затримкою й бути стійкими до електромагнітних завад.

Сенсори та актуатори часто об'єднані в інтелектуальні пристрої типу IED (Intelligent Electronic Device), які мають вбудовані засоби зв'язку, логіку, протоколи передачі даних та виконання локального аналізу. Таблиці 2.1 та 2.2 охоплює як класичні, так і сучасні компоненти автоматизованих систем, які підтримують повний цикл вимірювання, аналізу та реагування [19].

Особливості АСКЗЕ вимагають від сенсорів високої точності, а від виконавчих пристроїв — надійності й швидкодії, оскільки будь-яка помилка або затримка в обробці сигналів може спричинити серйозні аварії. У

сучасних системах застосовується резервування каналів збору інформації та дублювання критичних виконавчих пристроїв, щоб забезпечити безперервну роботу системи.

Таким чином, сенсори забезпечують точний зйом та аналіз параметрів енергомережі, а виконавчі механізми — негайну реакцію на загрози. Їхня злагоджена робота формує основу для ефективного захисту, автоматизації та стабільності промислових енергетичних систем.

Трансформатори струму і напруги RFCT з кільцевим сердечником підходять для широкого спектру застосувань (рисунок 2.4). В основному вони використовуються для вимірювання залишкового струму і напруги разом з реле захисту від замикань на землю. Такі трансформатори доступні на ринку кільцевого типу та прямокутного типу. Монтаж таких сенсорів здійснюється: по опорній плиті для кільцевих типів, по точці фіксації у корпусі трансформатора струму прямокутного перерізу.



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд трансформаторів струму а) і напруги б)

Основне призначення трансформаторів струму і напруги - застосування для вимірювання суми трифазного струму в 3-фазному кабелі. При роботі в нормальних умовах ця сума складає нуль. Ці трансформатори застосовуються спільно зі статичними реле захисту від короткого замикання на землю.

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На відміну від звичайних вимірювальних трансформаторів струму сердечник сенсорів виготовляється не з листової електротехнічної сталі, а зі спеціалізованих високочастотних матеріалів - феритів. В результаті сенсори цього типу малочутливі до струмів промислової частоти, але дозволяють добре реєструвати періодичні та імпульсні сигнали в діапазоні частот від сотень кГц до десятків МГц, залежно від матеріалу сердечника, що використовується.

За своєю конструкцією сенсори RFCT діляться на три типи [20]:

- нероз'ємні стаціонарні сенсори кільцевої конструкції, що монтуються на заземлюючих проводах та шинах на відключеному обладнанні;

- сенсори з роз'ємним сердечником, що легко монтуються на провідниках і шинах навіть контрольованого обладнання, що працює, зазвичай використовуються для проведення оперативних вимірювань часткових розрядів;

- модульні сенсори часткових розрядів, призначені для вимірювань у слаботочних ланцюгах, що включаються до розриву з'єднувального дроту (на відключеному обладнанні), такий тип конструкції застосовується для комплексних сенсорів, призначених, крім контролю часткових розрядів, для вимірювання додаткових параметрів устаткування.

Аналізатор якості електроенергії SEL-735 (сенсор частоти та фазного зсуву) повністю відповідає класу А згідно зі стандартом якості електроенергії ІЕС 61000-4-30 (рисунок 2.5). Вимірювання класу А дозволяє операторам визначати відхилення в системі та впевнено ізолювати джерела їх виникнення. Призначений для високоточного комерційного обліку електроенергії лічильник SEL-735 перевищує вимоги класів точності стандартів ANSI C12.20-2015 0.1 та ІЕС 62053-22: 2003 0.1 S у широкому діапазоні струмів. Таким чином, SEL-735 є оптимальним лічильником для середовищ генерації, обміну, передачі та розподілу, а також для промислових застосувань [20-22].

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.5 – Загальний вигляд сенсора частоти та фазного зсуву у комплексі аналізатора якості електроенергії SEL-735

Основна задача таких аналізаторів - вимірювання та видача надійних індикаторів якості електроенергії - SEL-735 гарантує точні та надійні виміри відповідно до стандарту якості електроенергії IEC 61000-4-30. За допомогою індикаторів якості електроенергії можна вибрати потужність фідерів, параметри обладнання захисту, а також спланувати модернізацію з метою превентивного техобслуговування. Модель SEL-735 вимірює гармоніки, інтергармоніки, флікер напруги, коефіцієнт потужності, відхилення напруги, К-фактор та інші ключові показники якості електроенергії.

Релейні модулі або електромагнітне реле мініатюрне G2R-2-SNDI-DC24 OMRON є надійним і високоякісним пристроєм для комутації електричних ланцюгів (рисунок 2.6). З номінальною напругою обмотки 24 В і максимальним струмом контактів 10 А, це реле здатне комутувати напруги до 125 В постійного струму (DC) і до 380 В змінного струму (AC). Конфігурація контактів DPDT (подвійне перемикання) робить його універсальним рішенням щодо різноманітних застосувань. Реле керується постійним струмом, що забезпечує його гнучкість у використанні. Модель G2R2SNDIDC24 відрізняється розмірами, що дозволяє ефективно використовувати простір на друкованій платі або у шафах управління [23].

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд релейного модуля G2R-2-SNDI-DC24
OMRON

Електромагнітний або моторний привід ABB MOE для XT5 призначений для дистанційного керування автоматичними вимикачами, забезпечуючи оперативне включення та відключення. Працює в діапазоні напруг 220...250 В змінного або постійного струму, з пусковою потужністю 300 ВА та робочою – 150 ВА. Пристрій оснащений метровими проводами з роз'ємами, що полегшує підключення та інтеграцію в систему. Фланець забезпечує зручний монтаж та стійкість конструкції. Висока надійність роботи та довговічність роблять цей привід оптимальним вибором для об'єктів із жорсткими вимогами до безпеки та стабільності електропостачання. Інноваційні технології ABB гарантують ефективність та відмовостійкість у різних умовах експлуатації.



Рисунок 2.7 – Загальний вигляд електромагнітного приводу ABB MOE XT5

Система швидкого монтажу такого електромагнітного приводу - механізм швидкої установки унеможливорює складні підключення, дозволяючи монтувати пристрої без гвинтових з'єднань. Розширені функції

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

управління забезпечують інтеграцію вимикачів у системи віддаленого моніторингу та управління, включаючи зв'язок за протоколами Modbus та Bluetooth. Механічні та електричні блокування, доступні механізми взаємного блокування вимикачів, що запобігають одночасному включенню кількох ліній. Реле захисту від струмів витоку - додаткові модулі захисту, що дозволяють контролювати та запобігати аварійним ситуаціям, викликаним витоками струму. Додаткові і допоміжні контакти передають інформацію про стан вимикача, забезпечуючи точний контроль та сигналізацію.

Комунікаційний актуатор Мохіа ioLogik E1242 — компактний, інтелектуальний модуль вводу/виводу (I/O) з підтримкою мережових протоколів, призначений для збору даних із зовнішніх пристроїв та їхньої передачі в системи автоматизації та SCADA через Ethernet-мережу. До можливостей актуатора Мохіа ioLogik E1242 відносять:

- передача дискретних (ON/OFF) та аналогових сигналів у цифрову систему керування (наприклад, PLC або SCADA);
- моніторинг технологічних процесів у режимі реального часу;
- віддалене керування обладнанням через локальну або глобальну мережу (LAN/Internet).



Рисунок 2.8 – Загальний вигляд комунікаційного актуатора Мохіа ioLogik E1242

Комутаційні актуатори такого типу застосовуються в енергетиці, автоматизації промисловості, будівельному управлінні, логістиці, транспорті. Можливості за допомогою вбудованих модулів Edge Computing — базова

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обробка даних прямо на пристрої перед передачею та пристроїно-орієнтована передача даних (active reporting) не потребує циклічного опитування PLC, що економить трафік і час реакції. Просте налаштування через Web-інтерфейс надає системі висока гнучкість інтеграції завдяки підтримці стандартних протоколів. Підтримка RESTful API дозволяє взаємодію з хмарними платформами та сучасними IT-системами. Моніторинг аварій та стану пристроїв наприклад, в енергетичних щитах або розподільчих підстанціях дозволяє оперативно реагувати на ті чи інші події.

Основними перевагами таких актуаторів у промислових системах це є:

- надійна робота у складних середовищах;
- зниження навантаження на центральний PLC;
- забезпечення децентралізованого збору даних;
- сумісність з існуючими системами автоматизації.

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

3. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

3.1 Розробка способу побудови САУ слідкуючого типу для АСКЗЕ

Збір і обробка параметрів в автоматизованих системах керування захистом енергомережі розподільчих підстанцій промислових об'єктів є критично важливими для забезпечення надійного та безперебійного електропостачання. Основною метою є виявлення аномалій у режимі роботи мережі, таких як короткі замикання, перевантаження, втрати напруги чи порушення синхронізації фаз. Для цього система безперервно збирає дані з трансформаторів струму і трансформаторів напруги, які фіксують змінні параметри — струм, напругу, частоту, фазові кути тощо.

Ці сигнали передаються до ПЛК, оснащеного високошвидкісними аналогово-цифровими перетворювачами. На рівні ПЛК реалізуються алгоритми обробки даних у реальному часі, включаючи фільтрацію шумів, виявлення піків навантаження, гармонік, асиметрій. Особливу роль відіграє застосування кореляційного аналізу, зокрема автокореляції для виявлення повторюваних збурень, і взаємкореляції — для встановлення залежностей між подіями на різних лініях чи фазах.

Після первинної обробки дані зберігаються у буферах або передаються на верхній рівень SCADA-системи, де виконується візуалізація, логування подій, формування звітів, а також ухвалення рішень на основі аналітики. Система також контролює параметри оточення: температуру силових комірок, стан охолодження, рівень частотних флуктуацій, пробою ізоляції [24].

Важливою особливістю АСКЗЕ є її реактивність: при досягненні граничних значень система автоматично активує захисні сценарії — наприклад, аварійне відключення секції, запуск резервного живлення або блокування певного навантаження. До цього залучаються виконавчі пристрої — реле, контактори, автоматичні вимикачі, які працюють під керуванням

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЛК або релейного захисту. Система підтримує віддалене адміністрування, а також може бути інтегрована з хмарними сервісами для довгострокового зберігання даних і прогнозної діагностики. Завдяки модульній структурі, АСКЗЕ легко адаптується до масштабування — від малих підстанцій до великих об'єктів з декількома трансформаторами і десятками секцій. Надійність, швидкодія та інтелектуальна обробка даних роблять її важливою складовою сучасної цифрової енергетики промислового підприємства.

Відомо, що при модернізації, так і при створенні нових систем керування технологічними процесами в машинобудуванні, енергетиці, хімічній промисловості, космонавтиці, суднобудуванні, авіаційній промисловості, автомобілебудуванні, у зразках військової техніки, а також в інших галузях, у яких при проведенні технологічних процесів виникає потреба підтримки вихідних змінних при заданих межах у стаціонарних режимах та забезпечення заданих параметрів при перехідних режимах, виникають певні складності у налаштуванні регуляторів.

У цьому випадку синтез САУ забезпечує оптимальні показники перехідного процесу по впливу, що задає інваріантність по збурювальному впливу (навантаженні) без вимірювання його величини, є одним із способів вирішення проблеми. Загальновідомо, що САУ поділяються на слідкуючі системи та системи автоматичного регулювання (САР). Завданням слідкуючих систем є відпрацювання заданого впливу з оптимальними динамічними і заданими статичними і динамічними помилками для режиму, що встановився [24, 25].

В даному розділі представлено синтез нелінійної слідкуючої системи АСКЗЕ з еталонною моделлю та ПД-регулятором. На рисунку 3.1 представлена структурна схема нелінійної слідкуючої системи АСКЗЕ з еталонною моделлю та ПД-регулятором, у якого пропорційний канал формується із уповільненням і $K_p=b_0$, диференційний канал формується із уповільненням та $K_d=b_1$, інтегральний канал має $K_i = 0$. Динамічний елемент є передавальною функцією, що має наступний вигляд [26]:

					ДП.АКТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

$$W(p) = 120 / (p + 12.53p^2 + 0.39p^3) .$$

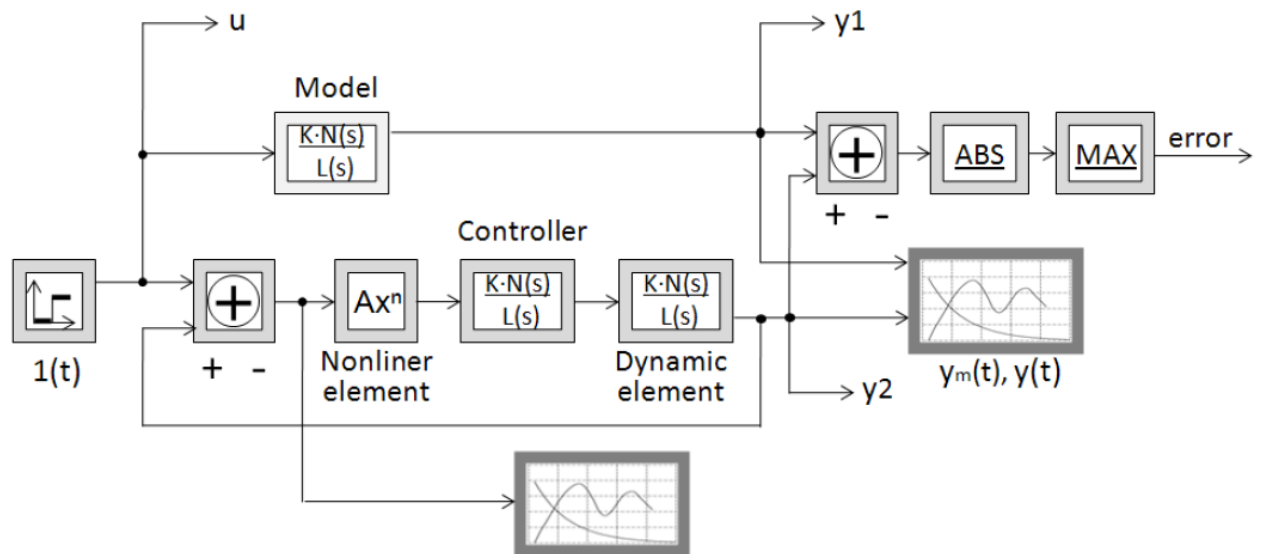


Рисунок 3.1 - Структурна схема нелінійної слідкуючої системи (синтез нелінійної системи по заданому перехідному процесу)

Нелінійний елемент є поліноміальною функцією, що має наступний вигляд:

$$y(t) = x(t) + 1/6 \cdot x(t)^3.$$

Налаштування даного регулятора за еталонною моделлю забезпечує одночасно якість перехідного процесу, що відповідає заданому типу логарифмічної амплітудної характеристики (ЛАХ), та задані статичні та динамічні помилки. Основна складність при цьому полягає в тому, що параметри регулятора визначають як перехідний, так і режими роботи системи, що встановилися і будь-які спроби покращити якість перехідного процесу, наприклад, виключити перерегулювання, призводять до збільшення помилок для режиму роботи, що встановився.

Керуючись основними правилами, при синтезі регулятора вирішується наступне завдання, а саме, необхідно розрахувати параметри регулятора b_0 , b_1 , що забезпечують при входньому впливі $1(t)$ перехідний процес з такими показниками якості:

- час регулювання – не більше 1,3 с;

- перерегулювання – не більше 25%;
- кількість коливань за час регулювання - менше одного.

Бажаний перехідний процес задається у вигляді передавальної функції еталонної моделі. Вирішення даної задачі здійснювалося з застосуванням спеціального програмного комплексу методом мінімізації максимального відхилення перехідного процесу від бажаного. Для розрахунків прийнято наступні значення параметрів регулятора: $b_0=0,882$ (коефіцієнт посилення регулятора), $b_1 = 0,573$.

3.2 Моделювання та синтез нелінійної слідкуючої системи АСКЗЕ з еталонною моделлю та ПІД-регулятором

В результаті моделювання за допомогою програмного комплексу MatLab в режимі оптимізації процесу за еталонною моделлю встановлено, що максимальне відхилення не перевищує 0,2, час регулювання приблизно дорівнює 1,3 с, отримані значення динамічної помилки за швидкістю. Отримані дані у графічному вигляді наводяться далі [27].

Запропонований новий спосіб синтезу САУ, застосовний, у тому числі, й для слідкуючих систем. Прикладом реалізації запропонованого способу може бути нелінійна слідкуюча система, наведена на рисунку 3.2.

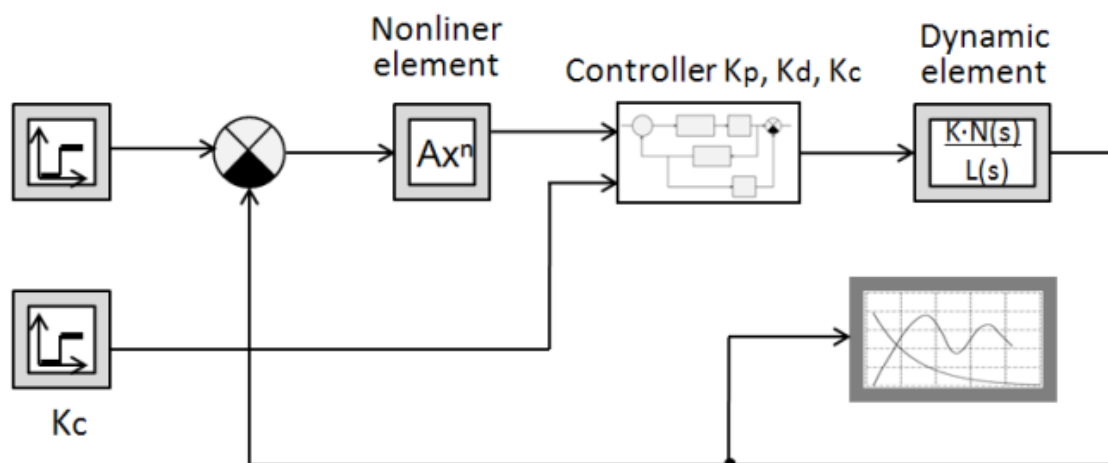


Рисунок 3.2 – Структурна схема нелінійної слідкуючої системи з регулятором, що має K_p, K_d, K_c

Тут, аналогічно до рисунка 3.1, представлена структурна схема нелінійної слідкуючої системи, але з регулятором, що має пропорційний канал регулювання з параметром налаштування K_p та диференціальний канал регулювання з двома параметрами налаштування K_d та K_c , при цьому, параметр K_c є додатковим параметром налаштування.

Для запропонованої схеми регулювання виконано математичне моделювання для наступних значень параметрів: коефіцієнт посилення пропорційного каналу регулятора $K_p=8$, коефіцієнт посилення диференціального каналу регулятора $K_d = 0,45$, додатковий параметр налаштування диференціального каналу регулятора $K_c=0,03$.

На рисунку 3.3 наведено графіки перехідного процесу регульованої змінної $y(t)$ для розглянутої раніше (рисунок 3.1) та знову запропонованої структурної схеми нелінійної слідкуючої системи (рисунок 3.2), на рисунку 3.4 представлені відповідні графіки динамічної помилки за швидкістю регулювання [28, 29].

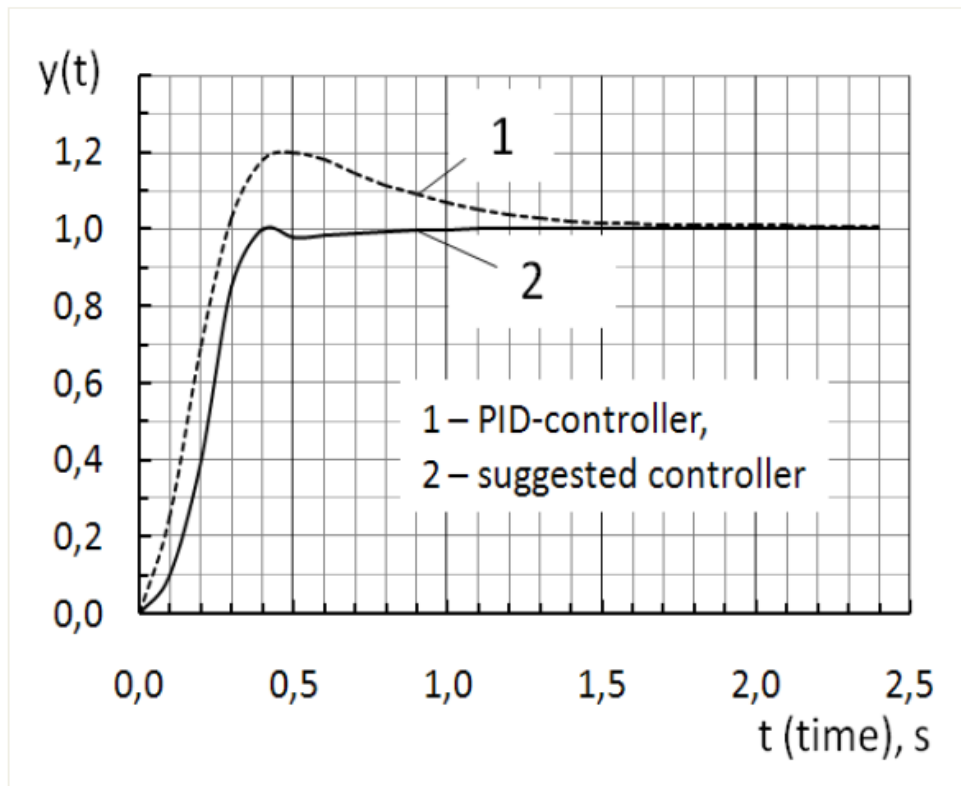


Рисунок 3.3 – Графік перехідного процесу

Як впливає з графіка (рисунок 3.4, лінія 1), для регулятора-прототипу максимальна помилка 0.158 виникає в момент перехідного процесу, яка потім зменшується до 0,01 та після 2,3 с залишається практично постійною. Спроба зменшити динамічну помилку за швидкістю для встановленого режиму за рахунок збільшення коефіцієнта посилення регулятора призводить до збільшення перерегулювання та часу перехідного процесу, а також максимального значення помилки за швидкістю.

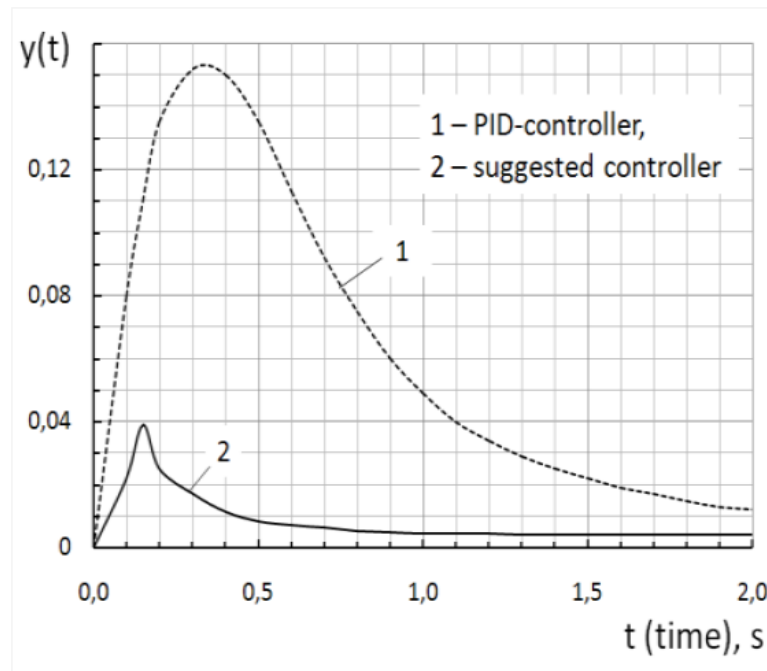


Рисунок 3.4 – Графік динамічної помилки по швидкості

Для повторно запропонованого регулятора перерегулювання практично відсутнє (0,025), час регулювання складає близько 0,3 с (лінія 2 рисунок 3.3). З графіка, представленого на рисунку 3.4 (лінія 2) впливає, що з запропонованого регулятора максимальна помилка 0,039 виникає у момент перехідного процесу потім плавно зменшується до 0,0011, а після 2,5 с залишається практично постійною.

З отриманих результатів впливає, що застосування запропонованого регулятора при його відповідному налаштуванні дозволяє отримати близьку до свого оптимального значення якість перехідного процесу, при цьому

істотно переважає якість перехідного процесу регульованої змінної $y(t)$ при традиційному підході до побудови САУ.

Таким чином, синтез нелінійних слідкуючих систем на основі регулятора, включає пропорційний канал з параметром налаштування (коефіцієнтом посилення регулятора) K_p та диференціальний канал із двома параметрами налаштування K_d , K_c в порівнянні з синтезом нелінійної слідкуючих системи з еталонною моделлю та ПІД-регулятором дозволяє [29]:

- зменшити максимальну динамічну помилку за швидкістю з 0,158 до 0,039 для перехідного режиму та з 0,01 до 0,0011 (практично на порядок) для режиму, що встановився, за рахунок збільшення коефіцієнта посилення регулятора з 0,882 до 8;

- при збільшенні коефіцієнта посилення регулятора не тільки уникнути погіршення якості перехідного режиму, а навпаки, практично виключити перерегулювання (0,025 замість 0,2) та зменшити час перехідного процесу з 1,3 до 0,3 с;

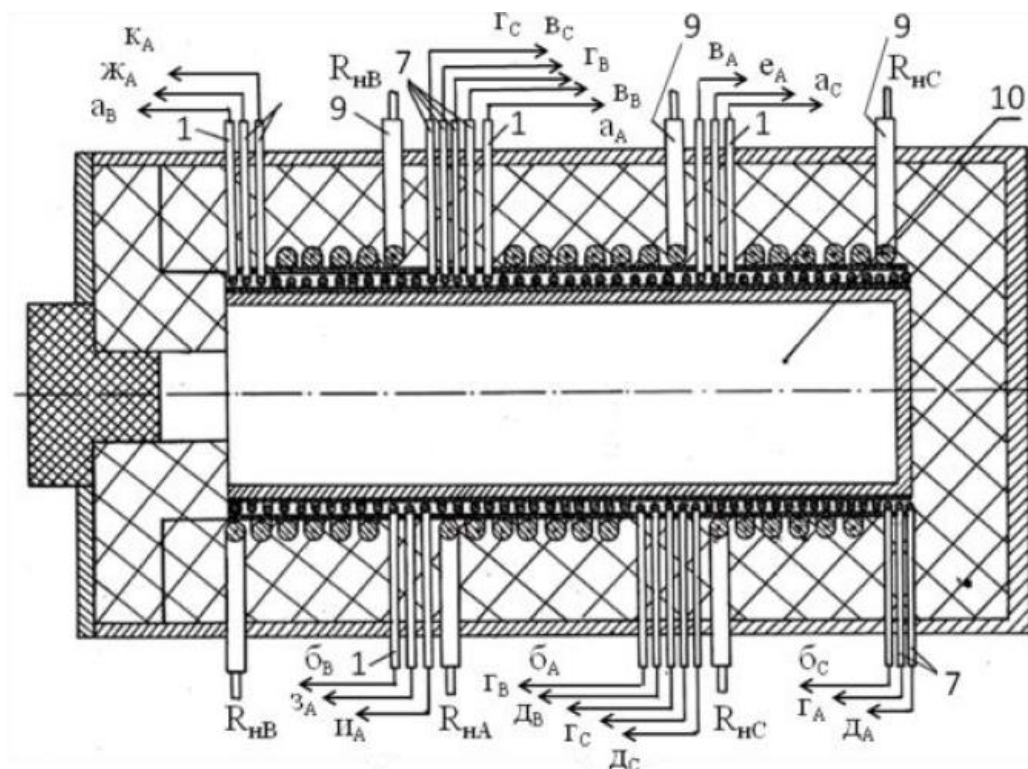
- при мікропроцесорній реалізації перепрограмувати типовий ПІД-регулятор у пропонований регулятор без будь-яких додаткових пристроїв введення інформації, оскільки обидва регулятори мають однакову кількість параметрів налаштування.

Пропонований підхід може бути реалізований за будь-якої конфігурації системи управління із зосередженими параметрами, що містять головний від'ємний зворотний зв'язок, як для лінійних, так і для нелінійних систем. Це означає, що пропонований регулятор може бути в більшості випадків використаний замість дорогих і складних регуляторів іншого типу, наприклад, оптимальних з налаштуванням за еталонною моделлю, інваріантних за впливом, що збурює і так далі.

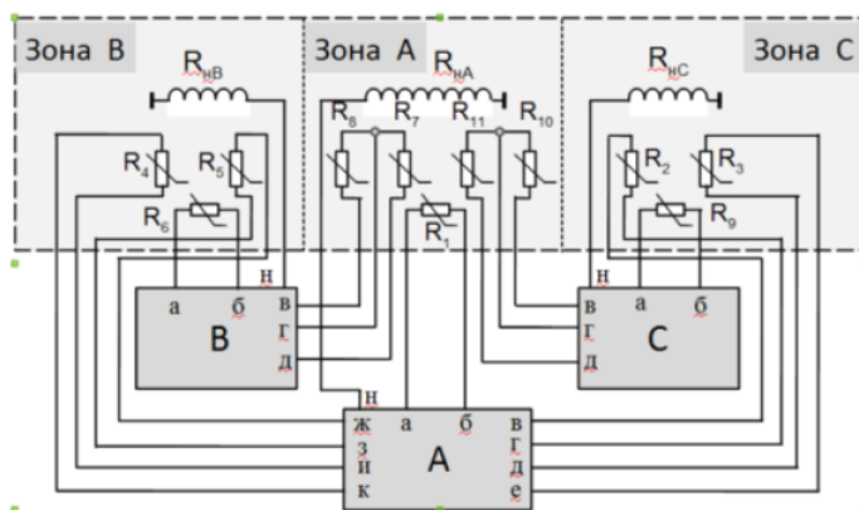
Як приклад практичної реалізації розглянутого вище способу побудови слідкуючої САУ, можна навести аналоговий прецизійний терморегулятор тризонного термостата, призначений для забезпечення заданого профілю температури обсягом і під час досліджень в АСКЗЕ розподільчої підстанції.

					ДП.АКТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У даному схематичному рішенні запропоновано використовувати відомий прийом, що полягає у використанні трьох однакових систем терморегулювання, що працюють кожна на свою зону термостата (на трьох обмотка головного трансформатора підстанції). У системі регулювання кількість первинних перетворювачів, підключених до кожного регулятора-вимірювача – не менше трьох (рисунок 3.5).



а)



б)

Рисунок 3.5 – Схема трьохзонального термостата – а) і структура САУ – б)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ

Арк.

55

Терморегулятор трьохзонального термостату містить три системи регулювання температури кожної зони А, В, С, кожна з яких складається з їх первинного термоперетворювача опору 1 (рисунок 3.6), розміщеного в регульованій зоні, термочутливого моста Уїтстона 2, попереднього підсилювача 3, перетворювача напруга-частота 4, активного фільтра верхніх частот 5, пасивного фільтра нижніх частот з термозалежною частотою зрізу 6, термоперетворювачів опору 7, розміщених у периферійних зонах термостата, підсилювача потужності 8, нагрівача 9, термостатичного об'єму (зони) 10 та сенсора температури 11 [30].

Кожна система регулювання забезпечує підтримку температури відповідної зони на заданому рівні $T_{\text{зад}}$. При цьому слід зазначити, що пасивний фільтр нижніх частот з термозалежною частотою зрізу, що є інтегруючою ланкою для регулятора центральної зони А утворений чотирма послідовно з'єднаними термоперетворювачами опору, розташованими по два в кожній периферійній зоні, а фільтри нижніх частот регуляторів периферійних зон В, С – двома термоперетворювачами опору, розташованими у центральній зоні термостату. Основним первинним перетворювачем температури у кожній зоні є термоперетворювач опору 1 (рисунок 3.6), включений у термочутливий міст 2.



Рисунок 3.6 – Регулятор однієї зони термостату

Для зручності використання всі термоперетворювачі опору повинні мати ідентичні теплофізичні та електричні властивості, а їх матеріал – позитивний тепловий коефіцієнт опору. Зміна температури об'єму 10 при даній системі регулювання має швидкозатухаючий характер, при цьому абсолютне значення потужності, що виділяється нагрівачем 9 в процесі регулювання встановленого режиму визначається автоматично самим регулятором, залежить лише від змінної часу системи та рівня температур, що задаються, не вимагає втручання оператора.

Як показало практичне дослідження запропонованого способу управління, це технічне рішення може виявитися досить дієвим інструментом як досягнення високої якості управління технологічними процесами, так для проведення цілого ряду дослідницьких і пошукових задач в енергетичній галузі.

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У запропонованій кваліфікаційній роботі розроблена автоматизована система керування захистом енергомережі промислового об'єкта. Основні етапи автоматизації зосередженні на процесах виконання поставлених задач, роботі та виконання технологічних процесів автоматизованих програмно-технічних пристроїв на основі, програмовано-логічних контролерів промислового стандарту – центральні процесорні модулі, модулі вводу-виводу для підключення сенсорів та виконавчих пристроїв. Використання технічних засоби автоматизації дозволяють моніторити на підстанції параметри струму, напруги, частоти, фазової синхронізації, стану комутаційної апаратури та інших характеристик, що дозволяє виявляти порушення ще на ранніх етапах. Це дає можливості ефективніше та надійніше функціонувати розподільчій підстанції підприємства.

Запропонований у першому розділі аналіз автоматизованих система керування захистом енергомережі промислового об'єкта, дозволяє показати функціональні та апаратні можливості системи автоматичного управління технологічним процесом захисту та попередження аварійних ситуацій на тій чи іншій підстанції. Аналіз та можливості програмно-технічних засобів автоматизації показують, що САУ є об'єктом управління, це дає можливість встановити переваги і недоліки актуальних інформаційних алгоритмів та технічних засобів, які застосовуються при проектуванні складних автоматизованих систем. Актуалізовано контрольовані параметри технологічного процесу автоматизованої системи та налаштування ПД-регуляторів.

Для гарантування надійного та безперебійного функціонування технологічного процесу відповідно до поставленої задачі, обґрунтований вибір програмно-технічних засобів контролю і автоматизації, що відповідають високим стандартам і вимогам, до ефективної і якісної роботи розробленої САУ. На етапах розробки та моделювання обґрунтовано

					ДП.АКТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

застосування програмно-технічних засобів, спеціально для запропонованого об'єкта керування, з урахуванням контрольованих параметрів, та засобів діагностики (сенсорів та виконавчих механізмів), тощо. Проаналізовано програмовано-логічний контролер відомих брендів, мережеві контролери і контрольно-вимірювальне обладнання та виконавчі механізми аналогічних систем.

Розроблено структурну та функціональні схеми автоматизованої система керування захистом енергомережі промислового об'єкта, а саме САУ моніторингу перевантажень, коротких замикань і перенапруг, а також дозволяє зменшити втрати електроенергії за рахунок точного управління навантаженнями. Функціонування даної САУ ґрунтується на тому, щоб забезпечувати цілодобовий моніторинг параметрів струму, напруги, частоти, фазової синхронізації, стану комутаційної апаратури та інших характеристик, що дозволяє виявляти порушення ще на ранніх етапах і в свою чергу реєструє відхилення регульованих параметрів, які характеризують роботу об'єкта керування або плин процесів від установленого режиму роботи.

Розроблено спосіб синтезу нелінійної слікуючої системи АСКЗЕ з еталонною моделлю та ПД-регулятором, суть запропонованого підходу полягає в тому, щоб із застосуванням спеціального програмного комплексу методом мінімізації максимального відхилення перехідного процесу від бажаного. Особливо важливим для ефективності процесу є те, що інтегрована автоматизація забезпечує моніторинг контрольованих параметрів САУ розподільчої підстанції, що дозволяє оптимізувати ресурси та покращити організацію об'єктів керування.

У третьому розділі кваліфікаційної роботи представлено моделювання та синтез нелінійної слікуючої системи АСКЗЕ з еталонною моделлю та ПД-регулятором. Розрахунок параметрів ПД-регулятора різними методами при застосуванні не стаціонарних параметрів об'єкта керування і впливу зовнішніх збурень шляхом моделювання у програмному середовищі MATLAB.

					ДП.АКТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У результаті моделювання за допомогою програмного комплексу MatLab в режимі оптимізації процесу за еталонною моделлю встановлено, що максимальне відхилення не перевищує 0,2, час регулювання приблизно дорівнює 1,3 с, отримані значення динамічної помилки за швидкістю. З одержаних результатів отримується, що застосування запропонованого регулятора при його відповідному налаштуванні дозволяє отримати близьку до свого оптимального значення якість перехідного процесу, при цьому істотно переважає якість перехідного процесу регульованої змінної при традиційному підході до побудови САУ.

Як приклад практичної реалізації розглянутого способу побудови слідкуючої САУ, можна навести аналоговий прецизійний терморегулятор тризонного термостата, призначений для забезпечення заданого профілю температури обсягом і під час досліджень в АСКЗЕ розподільчої підстанції.

Проведене дослідження запропонованого способу управління дало можливість виявити технічне рішення, яке є дієвим інструментом для досягнення високої якості управління технологічними процесами, так для проведення цілого ряду дослідницьких і пошукових задач в енергетичній галузі.

Запропонована у кваліфікаційні роботі САУ забезпечує надійну, безперебійну роботу в процесі моніторингу контрольованих параметрів розподільчої підстанції промислового об'єкта, а також дає можливість мінімізувати людський фактор, це значною мірою підвищує ефективність та надійність роботи системи.

					ДП.АКТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Рудницький В.Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування. Суми : ВТД «Університетська книга», 2006. 153 с.
2. Бурбело М.Й., Бірюков О.О., Мельничук Л.М. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків. Вінниця : Вінницький національний технічний університет, 2011. 204 с.
3. Шкрабець Ф.П. Електропостачання. Дніпро: НГУ, 2015. 540 с.
4. Зайцев М.О., Кучанський В.О., Гунько І.О. Підвищення експлуатаційної надійності та ефективності роботи електричних мереж та електроустановлення. Монографія. Друкарня ФОП Гуляєва В.М., 2021с.
5. Буряк В.М., Дейнеко Н.А. Вибір електричних апаратів захисту в мережах до 1000 В. Харків : ХНАМГ, 2007. 62 с.
6. ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності.
7. Зорін В.В., Штогрин Є.А., Буйний Р.О. Електричні мережі та системи. Ніжин : Аспект-Поліграф, 2011. 224 с.
8. Шестеренко В.Є., Шестеренко О.В. Електропостачання промислових підприємств. Вінниця : Нова книга, 2013. 424 с.
9. Шестеренко Є.В. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Вінниця : Нова книга, 2004. 655 с.
10. Василега П.О. Електропостачання. Суми : вид-во «Університетська книга», 2018. 415 с.
11. Бурбело М.Й. Розрахунок внутрішнього електропостачання. Вінниця : Вінницький національний технічний університет, 2017. 123 с.
12. Галузеві будівельні норми України. Електротехнічні пристрої. Київ : Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2012. 139 с.
13. Електрична частина станцій та підстанцій : підручник / В. Д. Козлов, В. П. Захарченко, О. М. Тачиніна; за заг. ред. В. Д. Козлова. Київ : НАУ, 2018. 312 с.

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

14. В. А. Попов, В. В. Ткаченко, Ярмолюк О. С. Проектування систем забезпечення споживачів електричною енергією. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 222 с.
15. Зорін В.В., Тисленко В.В. Системи електропостачання загального призначення. Чернігів: ЧДТУ, 2005. 341 с.
16. Букович Н. В. Розрахунок струмів короткого замикання електроенергетичних систем. Львів : Вища шк., 2008. 248 с.
17. Півняк Г.Г., Винославський В.М., Рибалко А.Я., Несен Л.І. Перехідні процеси в системах електропостачання. Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000. 597 с.
18. Нестерович В.В. Електромагнітні перехідні процеси. Маріуполь: ПДТУ, 2007 с.
19. Павленко Т.П., Милих В.І. Електропостачання промислових підприємств: навч. посіб. – Харків: НТУ «ХП», 2015. – 269 с.
20. Клименко Б.В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту : навч. посіб. / Б.В. Клименко. – Харків : Вид-во «Точка», 2012. – 340 с.
21. Милих В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник / В.І. Милих, О.О. Шавьолкін. – Київ: Каравела, 2007. – 688 с.
22. А.А. Малиновський Основи електропостачання: навч. посібник / Малиновський А.А., Хохулін Б.К. – Львів: Львівська політехніка, 2005. – 324 с.
23. Шидловський А.К., Кузнецов В.Г. Підвищення якості енергії у електричних мережах. - К.: Наук. думка, 1985.
24. Разумний Ю.Т., Заїка В.Т., Степаненко Ю.В. Енергозбереження: Навч. посібник. –Д.: Національний гірничий університет, 2005.
25. Букович Н.В. Автоматика електроенергетичних систем. Київ, 1998. – 280 с.
26. Голота А.Д. Автоматика в електроенергетичних системах: Навч. посіб. – К.: Вища шк., 2006. – 367 с.
27. Клепач М.І. Теорія автоматичного керування. Навчальний посібник. / М.І.

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Клепач / Рівне: НУВГП, 2007. – 206 с.

28. Луцька Н.М. Дослідження та синтез оптимальних регуляторів для систем автоматизації технологічних комплексів неперервного типу [Текст]: дис. канд. техн. наук : 05.13.07 / Н.М. Луцька – Київ, 2006. – 180С.

29. Теорія автоматичного керування: Підручник. — 2-ге вид., перероб. і догі. К.: Либідь, 2007. — 656 с.

30. Сердюк, О. О. Проектування систем автоматизації Simatic : навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / О. О. Сердюк, О. В. Разживін. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – 208 с.

					ДП.АКІТ.9702578.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		