

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 1

## КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ З ДИСЦИПЛІНИ

### «Релейний захист та автоматика енергосистем»

для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «бакалавр»  
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
освітньо-професійна програма «Комп'ютеризоване управління енергетичними  
системами»

факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки  
та робототехніки  
кафедра робототехніки, електроенергетики та автоматизації  
ім. проф. Б.Б. Самотокіна

Схвалено на засіданні кафедри  
робототехніки, електроенергетики та  
автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна  
25 серпня 2025 р.,  
протокол № 7

Розробник: к.т.н., доцент кафедри робототехніки, електроенергетики та  
автоматизації ім. проф. Б.Б.Самотокіна ДОБРЖАНСЬКИЙ Олександр  
професор кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації  
ім. проф. Б.Б. Самотокіна КОВАЛЕНКО Віктор

Житомир  
2025 – 2026 н.р.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 2

## МОДУЛЬ 1

### Релейний захист і автоматика локальних мереж та електроустановок

#### Змістовий модуль 1. Максимальний струмовий захист

#### Тема 1.1. Принцип дії максимального струмового захисту та його селективність.

#### - Типи максимального струмового захисту: інверсні, неінверсні, миттєві; часово-струмові характеристики.

##### Загальна класифікація типів струмового захисту

Тип захисту	Принцип дії	Особливості часово-струмової характеристики	Застосування
Інверсний	Час спрацювання залежить від величини струму: чим більший струм, тим менший час відключення	Має обернено пропорційну характеристику: при великих струмах відключення майже миттєве, при менших – із витримкою часу	Лінії та обладнання, де важлива селективність і швидке відключення при великих КЗ
Неінверсний (з незалежною витримкою часу)	Час спрацювання не залежить від величини струму, визначається лише уставкою реле часу	Характеристика горизонтальна: однаковий час відключення при будь-якому перевищенні струму	Використовується для забезпечення координації між різними ступенями захисту
Миттєвий (струмове відсічення)	Спрацьовує без витримки часу при досягненні заданого порогу струму	Характеристика вертикальна: відключення відбувається одразу після перевищення уставки	Захист від великих коротких замикань поблизу джерела живлення

##### Часово-струмові характеристики

- Інверсна характеристика:

$$t = k / (I/I_{уст} - 1)$$

де  $t$  – час спрацювання,  $I$  – струм,  $I_{уст}$  – уставка,  $k$  – коефіцієнт.

Чим більший струм, тим менший час.

- Неінверсна характеристика:

$$t = \text{const}$$

незалежно від величини струму.

- Миттєва характеристика:

$$t \approx 0$$

відключення відбувається практично без затримки.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 3

У сучасних мікропроцесорних реле часто поєднують кілька типів характеристик, щоб забезпечити селективність і швидкодію одночасно.

## - Параметри спрацювання: уставка струму, часові затримки, кратність.

### Принцип дії МСЗ

Основна ідея: захист спрацьовує, коли струм у колі перевищує задану уставку.

Етапи роботи:

1. Вимірювання струму трансформатором струму.
2. Порівняння з уставкою реле.
3. Якщо струм перевищує уставку — запускається реле часу.
4. Після закінчення витримки часу подається команда на відключення комутаційного апарата (вимикача).

### Селективність

Селективність означає, що при аварії відключається тільки пошкоджена ділянка мережі, а решта залишається в роботі.

Досягається шляхом:

- правильного вибору уставок струму;
- налаштування витримок часу для різних ступенів захисту;
- використання комбінованих характеристик (інверсна + незалежна).

### Параметри спрацювання

#### 1. Уставка струму

- Мінімальний рівень струму, при якому захист починає діяти.
- Вибирається з урахуванням номінального навантаження та допустимих перевантажень.

#### 2. Часові затримки (витримка часу)

- Дають можливість забезпечити селективність між різними ступенями захисту.
- Можуть бути незалежними (постійний час) або залежними від величини струму (інверсні).

#### 3. Кратність струму

- Відношення струму спрацювання до номінального струму.
- Використовується для налаштування чутливості захисту та відсічення великих коротких замикань.

Таким чином, МСЗ — це базовий і водночас дуже гнучкий вид релейного захисту, який можна налаштувати під конкретні умови мережі, забезпечуючи як швидкодію, так і селективність.

## - Селективність: координування уставок по ступенях; методи забезпечення.

### Координування уставок по ступенях

- Принцип каскаду: уставки струму та витримки часу налаштовуються так, щоб найближчий до місця аварії захист спрацьовував першим.
- Часова координація: кожен наступний ступінь захисту має більшу витримку часу, ніж попередній.
- Струмова координація: уставки струму вибираються з урахуванням відстані до джерела живлення та рівня короткого замикання.

### Методи забезпечення селективності

#### Часова селективність

- Використання різних витримок часу для реле на різних ділянках мережі.
- Найближчий до аварії апарат спрацьовує швидше, віддалені — із затримкою.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОКЗ0- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 4

### Струмова селективність

- Уставки струму налаштовуються так, щоб ближчі до джерела реле реагували лише на великі струми, а віддалені — на менші.
- Це дозволяє відсікати тільки аварійну ділянку.

### Комбінована селективність

- Поєднання часової та струмової координації.
- Найбільш поширений метод у практиці, особливо в мережах із кількома джерелами живлення.

### Логічна селективність (сучасні системи)

- Використання мікропроцесорних реле, які обмінюються сигналами між собою.
- Дозволяє досягти високої точності та швидкодії без великих витримок часу.

Селективність МСЗ досягається грамотним координуванням уставок по струму та часу, а сучасні цифрові системи додають можливість логічної взаємодії між реле для ще більшої надійності.

## - Вплив трансформаторів струму: похибки, насичення, коефіцієнти перетворення.

Вплив трансформаторів струму (ТС) на роботу максимального струмового захисту (МСЗ) є дуже суттєвим, адже саме вони визначають точність вимірювання струму та коректність спрацювання реле.

### Похибки трансформаторів струму

- Струмова похибка: різниця між дійсним струмом у первинній обмотці та перетвореним струмом у вторинній.
- Кутова похибка: відхилення фази вторинного струму від первинного.
- В аварійних режимах похибки можуть зростати, що призводить до несвоєчасного або помилкового спрацювання захисту.

### Насичення магнітопроводу

- При великих струмах короткого замикання ТС може входити в режим насичення.
- Це призводить до спотворення форми вторинного струму, зменшення його амплітуди та появи гармонік.
- Наслідок: реле може «не побачити» реальний рівень струму або спрацювати із запізненням.

### Коефіцієнти перетворення

- Вибір коефіцієнта трансформації (наприклад, 100/5 А, 1000/5 А) визначає діапазон вимірювань.
- Якщо коефіцієнт підібрано неправильно:
  - занадто великий — реле може бути нечутливим до малих перевантажень;
  - занадто малий — ТС може перевантажуватися і насичуватися при великих струмах.

### Для забезпечення надійної роботи МСЗ необхідно:

- використовувати трансформатори струму з класом точності, відповідним до вимог релейного захисту (наприклад, 5Р, 10Р);
- враховувати можливість насичення при великих струмах КЗ;
- правильно підбирати коефіцієнти перетворення для конкретної ділянки мережі.

### Узагальнена класифікація похибок ТС

Параметр ТС	Суть	Наслідки для роботи МСЗ	Способи компенсації
Похибки (струмова, кутова)	Відхилення між первинним і вторинним струмом	Можливе несвоєчасне або помилкове спрацювання реле	Використання ТС класів точності 5Р, 10Р; регулярна перевірка

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОКЗ0- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 5

Насичення магнітопроводу	При великих струмах КЗ вторинний струм спотворюється	Зменшення амплітуди, поява гармонік → реле може «не побачити» аварію	Використання ТС з високим рівнем насичення; правильний вибір коефіцієнта трансформації
Коефіцієнт перетворення	Відношення первинного струму до вторинного (наприклад, 1000/5 А)	Неправильний вибір → або нечутливість до малих перевантажень, або насичення при великих струмах	Підбір коефіцієнта відповідно до номінального струму лінії/обладнання
Клас точності	Визначає допустимі похибки при різних режимах	Низький клас точності → неточні вимірювання, зниження селективності	Використання спеціалізованих ТС для релейного захисту
Динамічна стійкість	Здатність витримувати короткочасні великі струми	Недостатня стійкість → пошкодження ТС, відмова захисту	Вибір ТС з відповідними параметрами термічної та динамічної стійкості

## - Фізичні обмеження: помилкові спрацювання, вплив гармонік і асиметрії.

### Помилкові спрацювання

- Виникають через неточність вимірювань або сторонні впливи.
- Причини:
  - коливання навантаження, які перевищують уставку;
  - похибки трансформаторів струму;
  - електромагнітні завади.
- Наслідок: відключення справної ділянки мережі, що знижує надійність системи.

### Вплив гармонік

- Гармоніки у струмі можуть з'являтися через роботу перетворювачів, нелінійних навантажень, насичення трансформаторів.
- Вони спотворюють форму сигналу, що може призвести до:
  - завищення вимірюваного струму;
  - хибного спрацювання реле.
- Особливо небезпечні високі гармоніки, які впливають на точність інверсних характеристик.

### Асиметрія струмів

- При однофазних або двофазних коротких замиканнях виникає асиметрія між фазами.
- Це може призвести до:
  - нерівномірного навантаження трансформаторів струму;
  - появи складових нульової та зворотної послідовності;
  - помилкових спрацювань або затримок у роботі захисту.

### Способи мінімізації впливу

- Використання фільтрів гармонік у сучасних мікропроцесорних реле.
- Правильний вибір класу точності трансформаторів струму.
- Налаштування уставок із запасом, щоб уникнути спрацювання при короткочасних перевантаженнях.
- Використання комбінованих схем захисту (наприклад, поєднання МСЗ із диференційним захистом).

**Фізичні обмеження** — це фактори, які можуть знизити надійність МСЗ. Їх врахування при проектуванні та налаштуванні системи дозволяє уникнути помилкових спрацювань і забезпечити селективність.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОКЗ0- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 6

## Тема 1.2. Розрахунок уставок струмових реле для трансформаторів і кабельних ліній.

### - Вихідні дані: номінальні струми, довжина кабелю, допустима температура.

#### Номінальні струми

• Для трансформаторів: номінальний струм первинної обмотки, який визначається потужністю трансформатора та напругою.

$$I_{ном} = S_{ном} / (\sqrt{3} \times U_{ном})$$

• Для кабельних ліній: номінальний струм пропускної здатності кабелю, що залежить від перерізу провідника, матеріалу та умов прокладання.

• Ці значення визначають базову уставку реле, щоб воно не спрацювало при нормальних режимах.

#### Довжина кабелю

• Впливає на опір лінії та, відповідно, на величину струмів короткого замикання.

• Чим довший кабель, тим менший струм КЗ на його кінці → уставки реле повинні враховувати цей фактор, щоб залишатися чутливими.

• Використовується для перевірки чутливості захисту.

#### Допустима температура

• Визначає теплову стійкість кабелю та трансформатора.

• При підвищеній температурі допустимий струм зменшується, тому уставки реле повинні враховувати корекційні коефіцієнти.

• Це особливо важливо для кабелів, прокладених у ґрунті чи каналах, де охолодження обмежене.

Для розрахунку уставок струмових реле необхідно враховувати номінальні струми обладнання, довжину кабельних ліній та допустиму температуру експлуатації. Це забезпечує правильну чутливість і селективність захисту.

### - Методика розрахунку: вибір уставки за максимальним струмом та селективністю.

#### Вибір уставки за максимальним струмом

• Для трансформаторів: уставка реле повинна перевищувати номінальний струм трансформатора з урахуванням допустимих перевантажень.

$$I_{уст} = k \times I_{ном}$$

де  $k$  — коефіцієнт запасу (зазвичай 1.2–1.3).

• Для кабельних ліній: уставка визначається за пропускною здатністю кабелю, щоб уникнути спрацювання при тривалих робочих навантаженнях.

#### Забезпечення селективності

• Часова координація: для кожного ступеня захисту встановлюється витримка часу, більша ніж у попереднього, щоб спрацював найближчий до місця аварії апарат.

• Струмова координація: уставки струму налаштовуються так, щоб реле реагувало лише на аварії у своїй зоні відповідальності.

• Комбінована координація: поєднання часової та струмової селективності для більшої надійності.

#### Перевірка чутливості

• Уставка повинна бути достатньо низькою, щоб реле реагувало на мінімальні струми короткого замикання у кінці захищеної ділянки.

• Виконується розрахунок струмів КЗ та порівняння їх із уставкою реле.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 7

Методика розрахунку уставок струмових реле базується на виборі уставки за максимальним струмом обладнання та забезпеченні селективності між різними ступенями захисту. Це гарантує надійне відключення пошкодженої ділянки без впливу на інші елементи мережі.

## - Теплові обмеження кабелю: тривалість перевантаження, коефіцієнти корекції.

### Тривалість перевантаження

- Кабель може витримувати перевантаження лише протягом обмеженого часу, поки температура ізоляції не перевищить допустимий рівень.
- Тривалість залежить від:
  - типу ізоляції (ПВХ, XLPE тощо);
  - умов прокладання (у ґрунті, у повітрі, у каналі);
  - початкової робочої температури.
- При розрахунку уставок реле враховується максимально допустимий час перевантаження, щоб уникнути термічного пошкодження кабелю.

**Коефіцієнти корекції** - Використовуються для врахування реальних умов експлуатації. Корекційні коефіцієнти застосовуються до номінального струму кабелю, щоб визначити реальну допустиму тривалу навантажувальну здатність.

- Температурні коефіцієнти — зменшують допустимий струм при підвищеній температурі навколишнього середовища.
- Коефіцієнти групового прокладання — враховують взаємний нагрів кабелів, прокладених поруч.
- Коефіцієнти ґрунту — враховують теплопровідність ґрунту при підземному прокладанні.

Теплові обмеження кабелю визначають максимально допустимий струм і час перевантаження. При розрахунку уставок реле необхідно враховувати корекційні коефіцієнти, щоб захист реагував до того, як кабель досягне критичної температури.

## - Уставки для трансформатора: врахування пускових струмів та КЗ на стороні низької напруги.

### Врахування пускових струмів

- При включенні трансформатора виникають аперіодичні пускові струми, які можуть у кілька разів перевищувати номінальний.
- Якщо уставка реле буде занадто низькою, воно може спрацювати помилково при пуску.
- Тому уставку струму вибирають із запасом:  

$$I_{уст} \geq k_{пуск} \times I_{ном}$$
 де  $k_{пуск}$  — коефіцієнт, що враховує пускові струми (зазвичай 2–3).

### Короткі замикання на стороні низької напруги

- При КЗ на низькій стороні трансформатора струм у первинній обмотці може бути значно меншим, ніж на вторинній, через коефіцієнт трансформації.
- Уставка повинна бути достатньо чутливою, щоб реле реагувало навіть на такі струми.
- Виконується перевірка чутливості:  

$$I_{уст} \leq I_{КЗнн} / k_{транс}$$
 де  $I_{КЗнн}$  — струм короткого замикання на низькій напрузі,  $k_{транс}$  — коефіцієнт трансформації.

### Компроміс між чутливістю та надійністю

- Уставка повинна бути:
  - достатньо високою, щоб уникнути помилкових спрацювань при пускових струмах;
  - достатньо низькою, щоб забезпечити відключення при КЗ на стороні низької напруги.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 8

- Це досягається шляхом вибору оптимального коефіцієнта запасу та перевірки селективності з іншими ступенями захисту.

Уставки для трансформатора визначаються балансом між врахуванням пускових струмів і забезпеченням чутливості до коротких замикань на стороні низької напруги. Це гарантує надійність роботи захисту без помилкових спрацювань.

## Тема 1.3. Практичні приклади застосування МСЗ у розподільчих мережах 0,4–10 кВ.

### - Схеми захисту фідерів: одно- та багатоступеневі рішення.

#### Одноступеневі рішення

Принцип: використовується один рівень максимального струмового захисту для всього фідера.

Особливості:

- простота реалізації та налаштування;
- менша вартість обладнання;
- обмежена селективність — при аварії може відключитися весь фідер.

Застосування: у невеликих мережах 0,4–6 кВ, де кількість відгалужень мінімальна.

#### Багатоступеневі рішення

Принцип: захист реалізується кількома ступенями — на початку фідера та на його відгалуженнях.

Особливості:

- кожен ступінь має власну уставку струму та витримку часу;
- забезпечується селективність — відключається лише пошкоджена ділянка;
- можливість комбінування інверсних і незалежних характеристик.

Застосування: у розгалужених мережах 6–10 кВ, де важливо зберегти живлення для непошкоджених ділянок.

#### Порівняння типів схем захисту фідерів

Тип схеми	Переваги	Недоліки	Типові області застосування
Одноступенева	Простота, дешевизна	Низька селективність, відключення всього фідера	Малі мережі, локальні об'єкти
Багатоступенева	Висока селективність, гнучкість	Складність налаштування, більша вартість	Розподільчі мережі 6–10 кВ, промислові об'єкти

У розподільчих мережах 0,4–10 кВ вибір між одно- та багатоступеневими схемами залежить від розгалуженості мережі та вимог до селективності. Для простих систем достатньо одноступеневого захисту, а для складних — багатоступеневі рішення є оптимальними.

### - Захист від перевантаження в житлових мережах: типові уставки та типи автоматів.

#### Типові уставки

- Уставки автоматичних вимикачів у житлових мережах вибираються відповідно до номінального струму лінії та допустимого навантаження.

- Найпоширеніші значення номінальних струмів автоматів:

**10 А, 16 А, 25 А, 32 А, 40 А, 50 А, 63 А.**

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 9

- Для розеткових груп зазвичай застосовують автомати на **16 А**, для освітлення — **10 А**, для потужних побутових приладів (бойлер, електроплита) — **25–32 А**.

- Уставки враховують переріз кабелю:

- **1,5 мм<sup>2</sup> → 10–16 А**
- **2,5 мм<sup>2</sup> → 16–25 А**
- **4 мм<sup>2</sup> → 25–32 А**
- **6 мм<sup>2</sup> → 32–40 А**

#### Типи автоматів

##### Автомати типу В

- Спрацьовують при перевантаженнях у 3–5 разів від номінального струму.
- Використовуються для освітлення та розеткових груп.

##### Автомати типу С

- Спрацьовують при перевантаженнях у 5–10 разів від номінального струму.
- Застосовуються для ліній із побутовими приладами, кондиціонерами, насосами.

##### Автомати типу D

- Спрацьовують при перевантаженнях у 10–20 разів від номінального струму.
- Використовуються для обладнання з великими пусковими струмами (електродвигуни, компресори).

У житлових мережах захист від перевантаження реалізується автоматами з типовими уставками, що відповідають перерізу кабелю та характеру навантаження. Правильний вибір типу автомата (В, С, D) забезпечує надійність і селективність роботи системи.

## - Промислові застосування: захист моторних груп, трансформаторних підстанцій.

#### Захист моторних груп

- Особливості навантаження: електродвигуни мають значні пускові струми, які можуть у 5–7 разів перевищувати номінальний.
- Уставки реле:
  - вибираються з урахуванням пускових струмів, щоб уникнути помилкових спрацювань;
  - застосовується часовий захист (витримка часу) для відсікання аварійних режимів, але пропуску пускових процесів.
- Схеми:
  - індивідуальний захист кожного двигуна;
  - груповий захист для кількох двигунів, що живляться від одного фідера.
- Додатково: часто комбінується з тепловим реле для захисту від перевантаження.

#### Захист трансформаторних підстанцій

- Особливості навантаження: трансформатори працюють у режимах із можливими перевантаженнями та короткими замиканнями на стороні низької напруги.
- Уставки реле:
  - враховують номінальний струм трансформатора та допустимі перевантаження;
  - забезпечують чутливість до КЗ на стороні НН, навіть якщо струм у первинній обмотці невеликий.
- Схеми:
  - максимальний струмовий захист на стороні ВН;
  - багатоступенева селективна схема для відгалужень на стороні НН;
  - комбінування МСЗ із диференційним захистом для підвищення надійності.

#### Порівняння застосувань захисту

Об'єкт	Особливості	Уставки	Додатковий захист
Моторні групи	Великі пускові струми	Вибір із запасом, витримка часу	Теплові реле
Трансформаторні підстанції	Перевантаження, КЗ на НН	Баланс між чутливістю та надійністю	Диференційний захист

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 10

У промислових мережах МСЗ застосовується з урахуванням специфіки обладнання — для моторних груп важливо врахувати пускові струми, а для трансформаторних підстанцій — забезпечити чутливість до КЗ на стороні низької напруги. Це гарантує надійність і селективність роботи системи.

## - Координація з АПВ (автоматичним повторним ввімкненням) та іншими захистами: взаємодія алгоритмів.

### Взаємодія АПВ з МСЗ (автоматичним повторним ввімкненням)

Принцип роботи АПВ: після відключення лінії через коротке замикання АПВ намагається повторно ввімкнути її через певний інтервал часу. При застосуванні МСЗ, забезпечується відключення при аварії, МСЗ координується з алгоритмом АПВ, щоб уникнути конфлікту — наприклад, МСЗ має витримку часу, яка узгоджена з паузою АПВ.

Практично у мережах 6–10 кВ часто застосовується одноразове або багаторазове АПВ, яке працює разом із МСЗ для підвищення надійності живлення.

### Взаємодія з іншими видами захисту

- Диференційний захист: реагує на внутрішні пошкодження трансформатора чи лінії, тоді як МСЗ — на зовнішні.
- Захист від перевантаження: працює на менших струмах і з більшою витримкою часу, ніж МСЗ.
- Захист від замикань на землю: координується з МСЗ, щоб уникнути дублювання спрацювань.

### Алгоритми координації

- *Часова селективність*: витримки часу МСЗ узгоджуються з АПВ та іншими реле, щоб уникнути одночасного спрацювання.
- *Струмова селективність*: уставки налаштовуються так, щоб кожен захист реагував лише на свою зону відповідальності.
- *Комбіновані алгоритми*: сучасні мікропроцесорні реле дозволяють програмувати взаємодію МСЗ, АПВ та інших захистів у єдиній логіці.
- *Координація МСЗ з АПВ та іншими захистами* забезпечує баланс між надійністю живлення і селективністю відключень. Це дозволяє швидко відновлювати роботу мережі після короточасних пошкоджень і водночас гарантує відключення при стійких аваріях.

## - Кейси помилкових спрацювань: аналіз причин і заходи усунення.

### Причини

*Похибки трансформаторів струму* - неточність вимірювання при насиченні або неправильному виборі коефіцієнта трансформації; призводить до завищення або заниження струму на реле.

*Пускові струми двигунів і трансформаторів* - аперіодичні складові можуть перевищувати уставку реле; - реле спрацюває помилково при нормальному пуску.

*Гармоніки та електромагнітні завади* - спотворення сигналу викликає хибне визначення аварійного режиму.

*Асиметрія навантаження* - нерівномірний розподіл струмів між фазами може імітувати аварію.

*Неправильні уставки* - занадто низькі значення уставок → спрацювання при перевантаженні, яке ще допустиме для кабелю чи трансформатора.

### Заходи усунення

*Коректний вибір трансформаторів струму* (клас точності, коефіцієнт трансформації, стійкість до насичення).

*Врахування пускових струмів* — застосування витримки часу або коефіцієнтів запасу.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 11

Фільтрація гармонік у сучасних мікропроцесорних реле.

Регулярна перевірка та налаштування уставок відповідно до реальних умов експлуатації.

Селективність — узгодження уставок між різними ступенями захисту, щоб уникнути дублювання спрацювань.

Помилкові спрацювання МСЗ виникають через похибки вимірювань, пускові струми, гармоніки та неправильні уставки. Усунення цих проблем можливе завдяки точному вибору параметрів трансформаторів струму, коректному налаштуванню реле та використанню сучасних алгоритмів фільтрації.

## Змістовий модуль 2. Дуговий захист

### Тема 2.1. Методи виявлення дугових замикань у низьковольтних мережах

Дугове замикання — це один із найнебезпечніших видів пошкоджень, що супроводжується виділенням колосальної енергії за мілісекунди. Для його ефективного виявлення використовують такі параметри детекції:

- **Оптичні:** реєстрація світлового випромінювання дуги.
- **Акустичні:** фіксація звукової хвилі від вибухоподібного розширення повітря.
- **Струмові:** аналіз стрибків струму в ланцюзі.
- **Спектральні:** виявлення специфічних гармонік у спектрі струму та напруги.

Забезпечення надійності та селективності

- **Уникнення хибних спрацювань:** реалізується через чітке встановлення порогів та часових інтервалів.
- **Комбіновані методи:** для максимальної надійності використовується поєднання оптичного датчика та контролю перевищення струму. Захист спрацьовує лише тоді, коли зафіксовано обидва фактори одночасно.
- **Розміщення давачів:** датчики встановлюються у вразливих зонах: щитах, розподільчих шафах та кабельних каналах.
- **Нормативи:** проектування систем регулюється стандартами безпеки та пожежозахисту.

### Тема 2.2. Сучасні пристрої дугового захисту та їх інтеграція

Сучасні системи — це інтелектуальні пристрої (IED), що інтегруються в загальну систему автоматизації об'єкта.

Класифікація обладнання

Тип пристрою	Особливості
AFD (Arc Fault Detection)	Базові пристрої виявлення дуги.
AFD + RCD	Комбінований захист: від дуги та від витоку струму.
Модулі з GOOSE	Цифрові модулі для миттєвої передачі команд у мережах IEC 61850.

Комунікація та логіка

- **Інтерфейси зв'язку:** підтримка IEC 61850, Modbus, а також наявність стандартних цифрових входів/виходів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 12

- **Алгоритми взаємодії:** можливість налаштування блокування суміжних пристроїв, селективного відключення конкретного фідера та миттєвої сигналізації.
- **Логуювання:** пристрої зберігають події та осцилограми для подальшого аналізу.

## Тема 2.3. Аналіз аварій та практичні висновки

Вивчення реальних випадків дозволяє коригувати налаштування захисту для запобігання майбутнім інцидентам.

Типові сценарії та причини

- **Пошкодження кабелів:** механічне зношення або старіння ізоляції.
- **Контактні дефекти:** ослаблення затискачів, що призводить до локального перегріву.
- **Зовнішні фактори:** потрапляння пилу, вологи або сторонніх предметів у розподільче обладнання.

Методика розслідування та наслідки

1. **Збирання логів:** аналіз даних з пам'яті мікропроцесорних реле.
2. **Огляд та фотодокументація:** фіксація термічних пошкоджень та зон іонізації.
3. **Оцінка наслідків:** аналіз пошкоджень обладнання, ризику пожежі та витрат через простої.
4. **Корекція налаштувань:** зміна порогів чутливості та встановлення додаткових датчиків у зонах, де виникла дуга.
5. **Заходи запобігання:** впровадження організаційних регламентів щодо перевірки контактів та очищення шаф від пилу.

## Змістовий модуль 3. Захист двигуна

### Тема 3.1. Захист від перевантаження та короткого замикання

Захист електродвигунів потребує врахування їхніх пускових характеристик, щоб уникнути помилкових спрацювань під час старту.

- **Типи захисту:** використовуються як традиційні теплові реле, так і сучасні електронні пристрої, такі як МРСВ (автоматичні вимикачі захисту двигуна) та мікропроцесорні реле.
- **Пускові струми:** при виборі уставок та часових характеристик обов'язково враховується кратність та тривалість пускового струму.
- **Захист від блокування ротора:** застосовуються спеціальні алгоритми та уставки, що розрізняють важкий пуск і реальне заклинювання валу.
- **Режими роботи:** захист має враховувати допустимі перевантаження в короткочасних режимах роботи.
- **Діагностика:** комплексна перевірка стану двигуна включає аналіз робочих струмів, рівнів вібрації та температури обмоток.

### Тема 3.2. Контроль втрати фази та асиметрії струмів

Асиметрія живлення є однією з головних причин передчасного виходу двигуна з ладу через нерівномірний перегрів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 13

- **Методи виявлення:** для детекції асиметрії використовують фазні трансформатори струму та схеми виявлення струмів нульової послідовності.
- **Наслідки для двигуна:** навіть незначна асиметрія призводить до надмірного нагріву, суттєвого зниження крутного моменту та появи шкідливих вібрацій.
- **Налаштування:** порогові значення та часові інтервали виставляються таким чином, щоб запобігти деградації ізоляції обмоток.
- **Взаємодія:** захист від асиметрії часто комбінується з блокуванням пуску та системою аварійної сигналізації.
- **Практика:** типові налаштування розраховуються для трифазних двигунів потужністю від **15 до 200 кВт**.

### Тема 3.3. Мікропроцесорні реле для комплексного захисту

Сучасні цифрові рішення дозволяють об'єднати всі види захисту в одному пристрої з можливістю віддаленого моніторингу.

- **Багатофункціональність:** мікропроцесорні реле одночасно виконують функції теплового, струмового, диференційного захисту та контролю відсутності фази.
- **Цифрові переваги:** на відміну від електромеханічних реле, цифрові пристрої мають вищу точність, гнучкість налаштувань та розвинену самодіагностику.
- **Адаптивність:** можливість налаштування адаптивних уставок та створення індивідуальних «профілів двигуна».
- **Інтеграція з SCADA:** реле підтримують телеметрію та дистанційне керування, передаючи дані про стан агрегату в режимі реального часу.
- **Аналітика:** збереження журналів подій та можливість віддаленого доступу полегшують розслідування причин аварійних зупинок.

## Змістовий модуль 4. Захист і управління трансформаторами

### Тема 4.1. Диференційний захист трансформаторів: принципи та налаштування

Диференційний захист є основним і найбільш швидкодіючим захистом від внутрішніх пошкоджень (КЗ між фазами та на землю всередині бака).

- **Баланс струмів:** Принцип базується на порівнянні струмів на стороні високої (ВН) та низької (НН) напруги. У нормальному режимі векторна сума струмів дорівнює нулю (з урахуванням коефіцієнта трансформації).
- **Компенсація:** Оскільки трансформатор має різні рівні напруги та групи з'єднання обмоток, мікропроцесорні реле програмно компенсують ці відмінності для точного порівняння струмів.
- **Зони дії:** Захист миттєво спрацьовує при внутрішніх КЗ, але ігнорує зовнішні замикання за межами зони, обмеженої трансформаторами струму.
- **Відбудова від пускових струмів:** При ввімкненні трансформатора виникає кидок струму намагнічування (inrush current). Для запобігання хибним спрацюванням використовуються цифрові фільтри, що блокують захист за наявності другої гармоніки в струмі.
- **Вплив насичення ТС:** При сильних зовнішніх КЗ трансформатори струму можуть насичуватися, що створює «хибний» диференційний струм. Сучасні алгоритми коректують ці похибки для уникнення помилкових відключень.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОКЗ0- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 14

## Тема 4.2. Захист від перевантаження та внутрішніх пошкоджень

Окрім електричних параметрів, критично важливо контролювати фізичний стан оливи та обмоток.

- **Термозахист:** Використання датчиків (РТ100) для контролю температури верхніх шарів оливи та розрахункової температури найбільш нагрітої точки обмотки.
- **Газовий захист (Реле Бухгольца):** Встановлюється в трубці між баком і розширювачем. Воно реагує на газоутворення при повільних пошкодженнях (іскріння, перегрів) та на сильний потік оливи при бурхливому дуговому розряді всередині бака.
- **Міжвиткові замикання:** Для виявлення замикань між витками однієї обмотки (які важко помітити диференційним захистом) застосовуються спеціальні високочастотні методи контролю.
- **Моніторинг стану:** Постійна діагностика параметрів ізоляції та аналіз розчинених газів в оливі дозволяє виявити дефекти на ранніх стадіях.
- **Процедура реагування:** При внутрішньому КЗ алгоритм передбачає негайне відключення всіх вимикачів трансформатора, його повну ізоляцію від мережі та обов'язковий детальний огляд перед повторним ввімкненням.

## Тема 4.3. Автоматизоване управління та цифрова інтеграція

Сучасні підстанції (ПС) вимагають не лише захисту, а й інтелектуального керування навантаженням.

- **Керування Tap-Changer (РПН):** Автоматичне регулювання напруги під навантаженням (РПН) за допомогою дистанційних команд або вбудованої логіки контролера.
- **Паралельна робота:** Автоматика забезпечує баланс навантаження між декількома трансформаторами, що працюють паралельно, та виконує перемикання при виході одного з них з ладу.
- **Протокол IEC 61850:** Використання GOOSE-повідомлень для миттєвої передачі команд між пристроями захисту (наприклад, блокування РПН при спрацюванні захисту).
- **Прогнозування відмов:** Аналіз трендів температури та струмів у часі дозволяє передбачити аварію ще до її настання.

## Приклади реальних систем та моделей

Для реалізації описаних функцій у промисловості використовують такі перевірені рішення:

1. **ABB RET650 / RET670:** Потужні термінали захисту та управління, що спеціалізуються на диференційному захисті трансформаторів будь-якої складності.
2. **Siemens SIPROTEC 7UT6x:** Популярна серія реле для захисту дво- та триобмоткових трансформаторів із вбудованими функціями контролю РПН.
3. **Schneider Electric MiCOM P64x:** Серія інтелектуальних пристроїв (IED), що забезпечують комплексний захист і детальне логування подій.
4. **SEL-487E (Schweitzer Engineering Laboratories):** Відомі своєю високою швидкістю та точністю алгоритмів компенсації струмів.

## Змістовий модуль 5. Захист генераторів

### Тема 5.1. Захист від внутрішніх пошкоджень обмоток генератора

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 15

Внутрішні пошкодження (КЗ) в обмотках генератора потребують миттєвої реакції, щоб запобігти руйнуванню активної сталі та пожежі.

- **Диференційний захист:** є основним для виявлення багатофазних КЗ в обмотці статора; він налаштовується на високу чутливість для фіксації найменших розбалансів.
- **Захист від міжвиткових замикань:** для виявлення замикань всередині однієї фази застосовуються спеціальні методи, зокрема аналіз вищих гармонік або порівняння струмів у паралельних вітках.
- **Контроль обмотки збудження:** захист стежить за станом ізоляції та струмом збудження, щоб запобігти пошкодженню ротора.
- **Механічні та термічні параметри:** безперервний моніторинг температури обмоток та рівнів вібрації дозволяє виявити дефекти (наприклад, послаблення кріплень) на ранніх стадіях.
- **Післяремонтні випробування:** обов'язковим етапом є тестування ізоляції та перевірка цілісності ланцюгів захисту перед пуском у мережу.

## Тема 5.2. Захист від перевантаження та втрати збудження

Режими, що виходять за межі номінальних, можуть призвести до перегріву або випадку генератора із синхронізму.

- **Керування перевантаженням:** захист має окремі уставки для тривалих режимів (невеликі перевищення) та короткочасних пікових навантажень.
- **Втрата збудження:** при зникненні збудження генератор переходить в асинхронний режим, споживаючи реактивну потужність із мережі, що спричиняє небезпечний перегрів ротора; автоматика має миттєво реагувати на таку зміну.
- **Стабільність синхронізації:** при виникненні коливальних у мережі система вирішує: відключити генератор чи спробувати перевести його в режим роботи з обмеженою потужністю.
- **Взаємодія з АРЗ:** захист працює в тісному зв'язку із системою автоматичного регулювання збудження (АРЗ) для підтримки стабільної напруги.
- **Аналіз кейсів:** розгляд аварійних режимів дозволяє розробити алгоритми швидкого відновлення роботи після збоїв.

## Тема 5.3. Автоматика для синхронізації генераторів з мережею

Процес включення генератора в мережу є критичним моментом, який вимагає ідеального збігу параметрів.

- **Критерії включення:** автоматика перевіряє рівність напруг, частот, збіг фаз та правильну послідовність фаз між генератором і мережею.
- **Пристрої синхронізації:** використовуються автоматичні синхронізатори та контролери, що самостійно підлаштовують швидкість турбіни та напругу збудження.
- **Плавне включення:** спеціальні алгоритми мінімізують кидки струму та ударні механічні навантаження на вал під час замикання вимикача.
- **Інтеграція та резервування:** системи синхронізації взаємодіють з АПВ та пристроями резервування, щоб забезпечити безпечний пуск за будь-яких умов.

## Приклади реальних систем та моделей

Для захисту великих та середніх генераторів на сучасних електростанціях використовують:

1. **ABB REG670:** інтелектуальний термінал для повного захисту та управління генераторами та блоками «генератор-трансформатор».

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 16

2. **Siemens SIPROTEC 7UM62**: спеціалізоване реле для малих та середніх генераторів, що включає захист від втрати збудження та зворотної потужності.
3. **SEL-700G (Schweitzer Engineering Laboratories)**: пристрій, відомий своєю швидкістю та гнучкістю при синхронізації та захисті від асинхронних режимів.
4. **Schneider Electric MiCOM P34x**: серія пристроїв для захисту генераторів, що забезпечує глибоку діагностику та інтеграцію в цифрові підстанції за протоколом IEC 61850.

## Змістовий модуль 6. Диференційний захист шин

### Тема 6.1. Методи організації захисту шин на підстанціях

Шини підстанції є вузлом, де збігається велика кількість приєднань, тому аварія на них призводить до відключення всієї секції або підстанції в цілому.

- **Принцип підключення**: Диференційний захист шин (ДЗШ) базується на першому законі Кірхгофа: сума всіх струмів, що входять у вузол (шини), має дорівнювати сумі струмів, що виходять.
- **Зонування шинних секцій**: Для складних схем (наприклад, з двома системами шин) захист розділяється на зони, кожна з яких охоплює свою секцію. Це дозволяє при КЗ на одній секції залишати іншу в роботі.
- **Резервування вимикачів (ПРВВ)**: ДЗШ тісно взаємодіє з логікою ПРВВ (пристрій резервування відмови вимикача). Якщо при замиканні на фідері його вимикач не спрацював, ДЗШ дає команду на відключення всіх вимикачів даної секції шин.
- **Виявлення внутрішніх КЗ**: Захист миттєво реагує на розбаланс струмів, що виникає при пробі ізоляції або падінні сторонніх предметів на шини.
- **Сигналізація та блокування**: Передбачено алгоритми блокування захисту при несправностях у ланцюгах трансформаторів струму (ТС), щоб уникнути хибного знеструмлення підстанції.

### Тема 6.2. Виявлення внутрішніх пошкоджень та селективність відключення

Основним викликом для ДЗШ є забезпечення стабільності при потужних зовнішніх замиканнях (поза зоною шин).

- **Порогові уставки**: Розраховуються так, щоб захист не спрацював від струмів навантаження та похибок ТС, але був максимально чутливим до малих струмів внутрішніх КЗ.
- **Вплив насичення ТС**: При сильних зовнішніх КЗ трансформатори струму пошкодженого фідера можуть насичуватися, що створює «хибний» диференційний струм. Сучасні реле використовують алгоритми «гальмування» або аналіз насичення для блокування захисту в таких режимах.
- **Часова координація**: ДЗШ — це зазвичай захист без витримки часу (миттєвий), проте він повинен бути скоординований з захистами фідерів для правильної послідовності дій.
- **Процедури відновлення**: Після спрацювання ДЗШ повторне ввімкнення (АПВ) шин зазвичай заборонено до з'ясування причин, оскільки пошкодження шин часто є стійкими та руйнівними.

### Тема 6.3. Практичні приклади реалізації на цифрових підстанціях

Перехід на цифрові стандарти радикально спрощує монтаж ДЗШ, замінюючи сотні контрольних кабелів однією оптичною шиною.

- **GOOSE для швидких команд**: На цифрових ПС команди на відключення та сигнали про стан вимикачів передаються через швидкі повідомлення GOOSE. Це критично для реалізації складних логік ПРВВ та оперативного перемикачів зон захисту.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОКЗ0- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 17

- **Централізоване логування та SCADA:** Всі події, осцилограми та вектори струмів передаються в систему верхнього рівня для миттєвого аналізу диспетчером.
- **Кейси модернізації:** При оновленні старих ПС часто встановлюють цифрові модулі поблизу вимикачів, що перетворюють аналогові сигнали в цифрові, передаючи їх на центральне реле захисту шин.
- **Тестування сумісності:** Важливим етапом є перевірка того, як пристрої різних виробників обмінюються даними в межах однієї шини процесу.

## Приклади реальних систем та моделей

Для надійного захисту шин використовують спеціалізовані термінали:

1. **Siemens SIPROTEC 7SS85:** Універсальний пристрій для захисту шин будь-якої конфігурації. Підтримує до 20 приєднань в одному модулі та повну інтеграцію IEC 61850.
2. **ABB REB670:** Високошвидкісне реле з розвиненою логікою селективності, що ідеально підходить для підстанцій з подвійною системою шин та обхідним вимикачем.
3. **GE Multilin B90:** Централізована система захисту шин, яка використовує шину процесу для збору даних з усіх фідерів та миттєвого розрахунку диференційного струму.
4. **SEL-487B (Schweitzer Engineering Laboratories):** Відоме своєю екстремальною надійністю та вбудованою функцією перевірки цілісності вторинних ланцюгів ТС.

## Змістовий модуль 7. Установки АВР

### Тема 7.1. Принцип роботи АВР

Функція АВР призначена для забезпечення безперебійного живлення споживачів шляхом автоматичного перемикання з основного джерела на резервне у разі збою.

- **Критерії відмови:** Система постійно моніторить стан мережі за такими параметрами, як поріг зниження напруги (уставка), тривалість провалу та відхилення частоти.
- **Типи реакцій:** Залежно від важливості навантаження, перемикання може бути миттєвим, з фіксованою затримкою (для ігнорування короткочасних просядок) або адаптивним.
- **Часове вікно:** Важливим параметром є швидкість перемикання, оскільки тривала пауза може призвести до зупинки двигунів або перезавантаження чутливої електроніки.
- **Логіка повернення:** Після відновлення напруги на основному вводі система перевіряє її стабільність протягом заданого часу (затримка повернення), перш ніж переключити навантаження назад.

### Тема 7.2. Типові схеми АВР

Вибір схеми залежить від категорії надійності електропостачання об'єкта та наявності автономних джерел.

- **Два вводи (Мережа + Мережа):** Класична схема, де резервом виступає інша незалежна лінія електропередачі.
- **Схема з генератором:** При відмові основної мережі АВР подає сигнал на запуск дизель-генераторної установки (ДГУ), чекає виходу її на номінальний режим і лише тоді виконує перемикання.
- **Кілька резервів:** У складних системах (наприклад, дата-центри) може бути послідовна логіка: спочатку перехід на другу лінію, а при її відсутності — на генератор.
- **Блокування та безпека:** Обов'язково реалізується електричне або механічне блокування, щоб унеможливити одночасне ввімкнення двох джерел («зустрічне» ввімкнення).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 18

- **Індикація:** Сучасні пристрої мають РК-дисплеї або світлодіодні панелі для відображення поточного активного джерела та стану ліній.

### Тема 7.3. Налаштування уставок і часових інтервалів

Правильне налаштування забезпечує баланс між надійністю живлення та мінімізацією зайвих спрацювань.

- **Уставки напруги:** Зазвичай поріг спрацювання встановлюється на рівні 80–85% від номіналу, а поріг повернення — на рівні 90–95%.
- **Часова координація:** Затримка АВР повинна бути більшою за час спрацювання захистів (МСЗ) на лініях, що відходять, щоб не перемикатися на резерв при звичайному короткому замиканні у споживача.
- **Параметри для ДГУ:** Враховується час прогріву двигуна та час стабілізації напруги альтернатора після пуску.
- **Гістерезис:** Використовується для запобігання «качанню» контакторів (багаторазових перемикачів) при граничних значеннях напруги.

### Тема 7.4. Інтеграція АВР з системами захисту та автоматики

АВР не працює ізольовано, а є частиною комплексної системи релейного захисту підстанції.

- **Взаємодія з ПРВВ:** Якщо вимикач основного введення відмовив (не розімкнувся), АВР має бути заблоковано для уникнення аварії.
- **Цифрова інтеграція (IEC 61850):** У сучасних мережах команди на запуск генератора або повідомлення про готовність джерела передаються через GOOSE-повідомлення, що значно прискорює процес.
- **Блокування при аваріях:** АВР блокується, якщо на шинах зафіксовано коротке замикання, щоб не «подавати» резервне живлення на пошкоджену ділянку.
- **SCADA та телеметрія:** Всі події (час спрацювання, причина відмови, параметри мережі) реєструються та передаються диспетчеру для аналізу.

### Приклади реальних систем та моделей

Для реалізації функцій АВР у промисловості та енергетиці найчастіше застосовуються:

1. **ABB TruONE:** Перший у світі справжній АВР «все в одному», що поєднує датчики, контролер та перемикач в одному корпусі.
2. **Schneider Electric ASCO (серія 7000):** Високонадійні системи для об'єктів критичної інфраструктури (лікарні, ЦОД).
3. **Socomec ATyS:** Популярні в Європі моторизовані перемикачі навантаження з вбудованою логікою контролю напруги.
4. **Deep Sea Electronics (DSE 7320/8610):** Спеціалізовані контролери для складних систем АВР, де одним із джерел є дизель-генератор.
5. **Siemens SIPROTEC 7SJ8x:** Багатофункціональні реле захисту, в яких логіка АВР реалізується програмно для високовольтних підстанцій.

## МОДУЛЬ 2

### Релейний захист і автоматика ліній електропередачі та кабельних мереж

#### Змістовий модуль 8. Диференційний захист ліній електропередачі та кабельних мереж

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.02/141.00.1/Б/ОК30-2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 19

## Тема 8.1. Фундаментальні принципи та селективність

На відміну від захисту шин, ДЗЛ працює на значних відстанях, що потребує особливого підходу до порівняння струмів на різних кінцях лінії.

- **Принцип «Вхід = Вихід»:** Захист порівнює вектори струмів на обох кінцях лінії; будь-яка різниця (диференційний струм) свідчить про витік енергії через місце пошкодження всередині лінії.
- **Компенсація та зони:** Для точного розрахунку реле враховує коефіцієнти трансформації ТС та ТН на обох підстанціях, чітко розмежовуючи внутрішню зону (лінія) та зовнішню (мережу за межами ТС).
- **Інтелектуальна фільтрація:** Алгоритми блокування відсікають пускові струми та струми намагнічування, що дозволяє уникнути помилкових відключень при ввімкненні лінії під навантаження.
- **Резервна логіка:** У разі розриву зв'язку між терміналами, пристрій автоматично переходить на резервні алгоритми (наприклад, дистанційний або струмовий захист).

## Тема 8.2. Цифрові магістралі та синхронізація

Для ДЗЛ критично важливо, щоб виміри з обох кінців лінії порівнювалися в один і той самий момент часу.

### Порівняння каналів зв'язку та протоколів

Параметр	Оптичне волокно (ВОЛЗ)	PDH/SDH мережі	Ethernet / IP
Швидкість	Найвища, мінімальні затримки	Стабільна, середня швидкість	Гнучка, але потребує пріоритетизації
Синхронізація	Пряма (через кабель)	Через протоколи мережі	PTP (IEEE 1588) або GPS
Надійність	Максимальна (fallback-режими)	Висока, залежить від вузлів	Залежить від завантаження мережі

- **Цифрові стандарти:** Використання **GOOSE** для миттєвих команд відключення та **Sampled Values (SV)** для передачі миттєвих значень струмів.
- **Кіберзахист:** Обов'язкова автентифікація пристроїв та шифрування даних для запобігання несанкціонованому втручанням в роботу автоматики.

## Тема 8.3. Високовольтна практика та кейси

Застосування ДЗЛ на лініях надвисокої напруги має свої особливості, пов'язані з великою ємністю кабелів та довжиною ліній.

- **Магістральні мережі (110–750 кВ):** ДЗЛ є основним захистом для коротких і середніх ліній, забезпечуючи миттєве відключення без витримки часу.
- **Кабельні ділянки:** Спеціальна компенсація ємнісних струмів витоку, які в кабелях значно вищі, ніж у повітряних лініях.
- **Координація систем:** ДЗЛ завжди працює в парі з дистанційним захистом (ЗМ 9), який виступає резервом при відмові каналів зв'язку.
- **Аналіз помилок:** Розгляд реальних кейсів відмов допомагає виявити проблеми, пов'язані з неправильним налаштуванням затримок у каналах зв'язку або насиченням ТС.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 20

## Приклади промислових систем (IED)

1. **Siemens SIPROTEC 7SD8x**: Спеціалізоване реле для диференційного захисту ліній з вбудованим контролем синхронізації та підтримкою будь-яких каналів зв'язку.
2. **ABB RED670**: Термінал лінійного захисту, що забезпечує надшвидку детекцію пошкоджень та повну підтримку IEC 61850.
3. **GE Multilin L90**: Високоточна система, що використовує запатентовані алгоритми синхронізації часу для ліній великої протяжності.
4. **SEL-411L (Schweitzer Engineering Laboratories)**: Пристрій, що поєднує ДЗЛ з потужними функціями автоматики та реєстрації подій.

## Змістовий модуль 9. Дистанційний релейний захист і автоматика

Дистанційний захист є одним із найскладніших видів релейного захисту, оскільки його робота базується не на простому вимірюванні струму, а на розрахунку опору (імпедансу) до місця пошкодження.

### Тема 9.1. Принцип дії дистанційного захисту та його зони. Архітектура зон та логіка імпедансу

Робота захисту побудована на методі контролю опору петлі КЗ, що дозволяє чітко розмежовувати пошкоджені ділянки.

- **Зонування лінії:**
  - **Перша зона:** працює миттєво і охоплює близько 80-85% довжини лінії, щоб уникнути помилкового спрацювання при КЗ на шинах протилежної підстанції.
  - **Друга зона:** охоплює всю лінію та частину суміжної ділянки, працюючи з невеликою витримкою часу для забезпечення селективності.
- **Вплив параметрів:** при налаштуванні враховуються фізична довжина лінії та співвідношення активного і реактивного опору ( $R/X$ ), що критично для точного визначення відстані до аварії.
- **Захист від перекриття:** спеціальні алгоритми запобігають помилковому спрацюванню захисту однієї зони при замиканнях, що належать до сфери відповідальності іншої.

### Тема 9.2. Алгоритми роботи автоматики при міжфазних та однофазних КЗ. Інтелектуальний аналіз пошкоджень

Сучасний дистанційний захист здатен самостійно ідентифікувати характер аварії та адаптувати свою поведінку.

- **Класифікація КЗ:** система автоматично розрізняє міжфазні замикання та однофазні замикання на землю, обираючи відповідну розрахункову модель.
- **Адаптивність:** для неоднорідних ділянок мережі (наприклад, лінії з різним перерізом проводів) застосовується корекція уставок у реальному часі.
- **Блокування та селективність:**
  - **Зовнішні КЗ:** логіка блокування запобігає спрацюванню при пошкодженнях поза межами захищеної лінії.
  - **Селективне відключення:** гарантує, що буде вимкнено лише пошкоджену фазу або ділянку, мінімізуючи вплив на енергосистему.
- **Взаємодія з АПВ:** дистанційний захист координує свої дії з автоматичним повторним ввімкненням для швидкого відновлення живлення.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 21

## Тема 9.3. Сучасні мікропроцесорні реалізації дистанційного захисту. Цифрова еволюція та мікропроцесорна реалізація

Перехід до мікропроцесорних баз дозволив значно підвищити точність та функціональність дистанційного захисту.

- **Функціональні вузли:** сучасне реле поєднує блоки вимірювання, програмовану логіку та потужні комунікаційні модулі.
- **Цифрова фільтрація:** програмні фільтри очищують вхідні сигнали від гармонік та шумів, що особливо важливо при перехідних процесах у мережі.
- **Експлуатаційна готовність:**
  - **Самотестування:** пристрій постійно проводить внутрішню діагностику, сигналізуючи про будь-які несправності в платах або ПЗ.
  - **Інтеграція:** повна підтримка протоколу **IEC 61850** дозволяє дистанційному захисту бути частиною «цифрової підстанції» та передавати дані в системи SCADA.

### Промислові рішення для дистанційного захисту

Для реалізації описаних функцій використовуються спеціалізовані термінали:

1. **ABB REL670:** лідер у сфері захисту ліній, що забезпечує надшвидкий розрахунок імпедансу для магістральних мереж.
2. **Siemens SIPROTEC 7SA8x:** пристрій з високим рівнем адаптивності, що підтримує складні схеми автоматики та синхронізації.
3. **SEL-411G (Schweitzer Engineering Laboratories):** поєднує функції дистанційного захисту з потужним моніторингом стабільності енергосистеми.

### Можливі аварійні сценарії

Сценарій аварії	Дія дистанційного захисту (ДЗ)	Результат для системи
Блискавка (КЗ у першій третині лінії)	Миттєве спрацювання 1-ї зони ( $t=0$ ).	Швидке відключення, мінімальні пошкодження проводу.
КЗ на шинах протилежної підстанції	Спрацювання 2-ї зони з витримкою часу.	Резервування захисту підстанції, селективне вимкнення.
Замикання через високий опір (дуга)	Алгоритм корекції уставки для неоднорідних ділянок.	Виявлення "складних" КЗ, які не бачить струмова відсічка.
Гойдання в енергосистемі (Power Swings)	Блокування захисту (щоб не сприйняти гойдання за КЗ).	Збереження цілісності мережі, запобігання каскадним аваріям.
Обрив зв'язку з ТН (трансформатором напруги)	Автоматичне блокування ДЗ та перехід на резервний МСЗ.	Попередження помилкового відключення через відсутність сигналу U.
Неуспішне АПВ на стійке КЗ	Повторне миттєве відключення (прискорення захисту).	Остаточна ізоляція пошкодженої ділянки для ремонту.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 22

## Змістовий модуль 10. Релейний захист по напрузі та частоті

### Тема 10.1. Захист від зниження та підвищення напруги

Захист за напругою (ANSI 27/59) є критичним для збереження ізоляції обладнання та забезпечення нормальної роботи споживачів.

- **Порогові значення і гістерезис:** Налаштування включають рівні спрацювання для зниженої ( $U <$ ) та підвищеної ( $U >$ ) напруги з обов'язковим коефіцієнтом повернення (гістерезисом) для запобігання вібрації контактів при граничних значеннях.
- **Часові інтервали відключення:** Витримки часу встановлюються для ігнорування короточасних перехідних процесів або самозапуску двигунів.
- **Взаємодія з регуляторами:** Захист координується з автоматичними регуляторами напруги (АРН) трансформаторів та генераторів, даючи їм шанс виправити ситуацію до відключення.
- **Захист від тривалих провалів:** Особлива увага приділяється сценаріям, де тривале зниження напруги може призвести до "лавини напруги" та зупинки промислових об'єктів.
- **Логування і статистика:** Реєстрація всіх відхилень дозволяє аналізувати якість електроенергії та виявляти слабкі місця в мережі.

### Тема 10.2. Захист від відхилення частоти в енергосистемах

Частота є головним показником балансу між генерованою та споживаною потужністю.

- **Порогові уставки:** Встановлюються окремі рівні для генераторів (захист від перевищення частоти при скиданні навантаження) та для шин підстанцій (дефіцит потужності).
- **Автоматичні заходи:** При зниженні частоти активуються черги АЧР (автоматичного частотного розвантаження) — відключення частини споживачів для збереження цілісності системи.
- **Системи балансування:** Захист інтегрується з алгоритмами автоматичного регулювання частоти та потужності (АРЧП).
- **Режими при коливаннях:** Логіка захисту має бути стійкою до короточасних системних гойдань, щоб не спровокувати каскадну аварію.
- **Практичні налаштування:** У локальних мережах уставки адаптуються під особливості місцевої генерації (наприклад, сонячні або вітрові станції).

### Тема 10.3. Використання захисту по напрузі та частоті для запобігання аваріям

Системна взаємодія захистів повинна відбуватись для недопущення "блекаутів".

- **Комбінація порогів:** Одночасний контроль швидкості падіння частоти ( $df/dt$ ) та напруги дозволяє реагувати на аварію ще на етапі її зародження.
- **Інтеграція з АПВ та резервуванням:** Координація з автоматичним повторним ввімкненням для безпечного відновлення живлення після стабілізації параметрів.
- **Сценарії відключення навантажень:** Розробка пріоритетних списків відключення критичних та некритичних споживачів.
- **Моніторинг трендів:** Цифрові пристрої прогнозують розвиток аварії, аналізуючи швидкість зміни параметрів у часі.
- **Кейси запобігання аваріям:** Аналіз реальних випадків, де вчасне спрацювання частотного розвантаження врятувало енерговузол від повного знеструмлення.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.02/141.00.1/Б/ОК30-2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 23

## Структура системної стабільності - карта реакції системи на зміну критичних параметрів

Рівень загрози	Параметри (U, f)	Дія автоматики	Мета
Зелена зона	$U_{nom} \pm 5\%$ , $f = 50.0$ Гц	Робота регуляторів (АРН, АРЧП)	Підтримка якості
Жовта зона	$U < 0.9 U_{nom}$ , $f < 49.5$ Гц	Попереджувальна сигналізація, блокування АВР	Підготовка персоналу
Помаранчева зона	$U < 0.8 U_{nom}$ , $f < 49.0$ Гц	Спрацювання перших черг АЧР / АЗН	Зупинка падіння параметрів
Червона зона	$U < 0.7 U_{nom}$ , $f < 47.5$ Гц	Масове відключення навантаження, поділ мережі	Запобігання розпаду системи
Критична зона	Екстремальні відхилення	Відключення генераторів від мережі	Захист дорогого обладнання

## Змістовий модуль 11. АПВ (Автоматичне повторне ввімкнення) і контроль синхронізму

Автоматичне повторне ввімкнення (АПВ) є одним із найефективніших засобів автоматики, оскільки більшість пошкоджень на повітряних лініях (до 80-90%) мають перехідний характер (наприклад, перекриття ізоляції через грозу).

### Тема 11.1. Принцип роботи АПВ

Ця функція призначена для швидкого відновлення живлення після того, як релейний захист відключив пошкоджену ділянку.

- **Типи АПВ:** в енергосистемах застосовують однократні (одна спроба ввімкнення) та багатократні (дві або більше спроб) пристрої АПВ.
- **Критерії дозволу:** перед ввімкненням система перевіряє наявність напруги, збіг фаз та стабільність частоти.
- **Часові параметри:** налаштовуються специфічні часові інтервали та затримки, необхідні для деіонізації середовища в місці КЗ.
- **Логіка блокування:** АПВ автоматично блокується при спрацюванні захистів, що свідчать про внутрішні пошкодження обладнання (наприклад, диференційний захист трансформатора), або при інших небезпечних умовах.
- **Реєстрація:** система веде логування кожної спроби ввімкнення для подальшого аналізу успішності роботи автоматики.

### Тема 11.2. Контроль синхронізму при включенні ліній і генераторів

Контроль синхронізму (Synchrocheck) гарантує, що ввімкнення вимикача відбудеться лише за умови збігу векторів напруги з обох боків.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 24

- **Критерії синхронізації:** пристрій контролює різницю модулів напруги, різницю частот та кут зсуву фаз між шинами та лінією.
- **Пристрої реалізації:** використовуються спеціалізовані блоки контролю синхронізму або вбудовані функції мікропроцесорних реле.
- **Автоматичні синхронізатори:** для генераторів застосовуються пристрої, що самостійно підганяють параметри агрегату до параметрів мережі перед ввімкненням.
- **Захист від асинхронного включення:** запобігає замиканню контактів вимикача, якщо кут розходження завеликий, що захищає обладнання від важких ударних навантажень.

### Тема 11.3. Практичні приклади застосування АПВ у магістральних мережах

Особливості експлуатації АПВ на лініях високої напруги (110–750 кВ).

- **Міжпідстанційні лінії:** на таких об'єктах АПВ часто працює в парі з контролем синхронізму, оскільки лінія з'єднує дві частини енергосистеми.
- **Ризики:** враховуються можливі негативні наслідки повторного ввімкнення на стійке КЗ, що може призвести до додаткових пошкоджень обладнання.
- **Координація з дистанційним захистом:** автоматика АПВ тісно взаємодіє з ДЗ для реалізації алгоритмів "прискорення захисту" до або після спрацювання АПВ.
- **Аналіз кейсів:** розглядаються реальні аварії, де успішне АПВ запобігло тривалим простоям промисловості, та випадки неуспішних циклів із детальним аналізом наслідків.

### Циклограма відновлення (АПВ на перехідне КЗ) - послідовність подій у часі при виникненні аварії та успішному спрацюванні автоматики

Етап процесу	Дія в системі	Стан вимикача	Примітка
0 мс	Виникнення перехідного КЗ (напр. гроза)	<b>Ввімкнено</b>	Початок аварійного режиму.
60-100 мс	Спрацювання захисту та відключення КЗ	<b>Вимкнено</b>	Струм зникає, починається деіонізація повітря.
0.5 - 2.0 с	<b>Безструмова пауза (Dead Time)</b>	<b>Вимкнено</b>	Очікування для зникнення дуги.
~2.1 с	Команда від АПВ на ввімкнення	<b>Ввімкнено</b>	Спроба відновити живлення.
>2.5 с	Успішне відновлення (КЗ зникло)	<b>Ввімкнено</b>	Автоматика повертається в режим очікування.

### Змістовий модуль 12. ПРВВ (пристрій резервування відмови вимикача)

ПРВВ — це системна автоматика, завдання якої — локалізувати аварію, якщо вимикач пошкодженого приєднання не зміг розімкнути коло (через механічну поломку, вихід газу SF6 або обрив ланцюгів керування).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 25

## Тема 12.1. Принцип роботи ПРВВ та його роль у надійності системи

ПРВВ є критичним елементом, що запобігає перетворенню локального КЗ на системну катастрофу.

- **Виявлення відмови:** Логіка базується на двох факторах: наявності команди на відключення від релейного захисту та факті протікання струму через вимикач після закінчення контрольного часу.
- **Логіка резервування:** Якщо вимикач "застряг", ПРВВ надсилає команди на відключення всіх суміжних вимикачів, які живлять дану секцію шин.
- **Часові інтервали:** Час спрацювання ПРВВ ( $t_{\text{ПРВВ}}$ ) має бути більшим за повний час відключення вимикача плюс запас на похибку реле, щоб уникнути зайвих відключень секції.
- **Взаємодія з ДЗ:** Тісна інтеграція з дистанційним захистом дозволяє ПРВВ розуміти зону пошкодження та вибирати правильну комбінацію вимикачів для знеструмлення.

## Тема 12.2. Алгоритми резервування при відмові вимикача

Ця тема розглядає послідовність дій цифрового інтелекту підстанції у критичні мілісекунди.

- **Послідовність команд:** Спочатку може подаватися повторна команда на власний вимикач ("дотискання"), а через 150-200 мс — команди на "оточення" (сусідні вимикачі).
- **Блокування помилок:** Використання датчиків положення контактів та контролю тиску середовища (елегазу/повітря) для верифікації відмови.
- **Комунікаційні вимоги:** У цифрових підстанціях ПРВВ використовує надшвидкі **GOOSE-повідомлення**, щоб миттєво "зупинити" суміжні приєднання.
- **Відновлення:** Після спрацювання ПРВВ система блокує АПВ, оскільки відмова вимикача часто супроводжується його серйозним пошкодженням.

## Тема 12.3. Практичні приклади застосування на підстанціях

Реалізація ПРВВ залежить від архітектури розподільчого пристрою (РП).

- **Розподільчі схеми:** На схемах з однією секційною системою шин ПРВВ відключає секційний вимикач та ввідний трансформатор.
- **Модернізація:** При заміні старих оливних вимикачів на сучасні вакуумні або елегазові, функції ПРВВ інтегруються безпосередньо в мікропроцесорні термінали захисту фідерів.
- **Кейси відмов:** Аналіз реальних випадків показує, що без ПРВВ коротке замикання на одному кабелі могло б призвести до пожежі на всій підстанції через термічну дію струмів КЗ.

## Алгоритм "Останнього шансу" (Логіка ПРВВ)

Крок	Подія / Умова	Дія системи	Статус системи
1	Виникнення КЗ на лінії	Основний захист дає команду "ВІДКЛ"	Аварія триває
2	Пройшло 100 мс	ПРВВ бачить: команда є, але струм все ще тече	<b>Тривога!</b>
3	Спроба "дотискання"	Повторний імпульс на котушку відключення	Очікування
4	Пройшло 200 мс	Струм КЗ не зник (Вимикач відмовив)	<b>Критична фаза</b>
5	<b>Резервне відключення</b>	Команда на всі сусідні вимикачі секції	Локалізація
6	Фінал	КЗ ліквідовано сусідніми апаратами	Секція знеструмлена

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 26

## Змістовий модуль 13. Цифрова підстанція - МЕК 61850

«Цифрова підстанція — МЕК 61850 - технологічний пік релейного захисту, де мідні кабелі замінюються на «цифрову шину».

### Тема 13.1. Архітектура цифрової підстанції та протоколи передачі даних

Цифрова підстанція (ЦПС) — це новий рівень автоматизації, де вся інформація передається у вигляді цифрових пакетів по оптичному волокну.

- **Три рівні архітектури:**
  1. **Рівень процесу:** первинне обладнання (ТС, ТН, вимикачі) та пристрої сполучення (Merging Units), що оцифровують сигнали.
  2. **Рівень приєднання:** інтелектуальні електронні пристрої (IED) — реле захисту та контролери.
  3. **Станційний рівень:** сервери, АРМ оператора та системи SCADA.
- **Основні типи повідомлень:**
  - **GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event):** надшвидка передача статусів та команд (відключення, блокування) між реле.
  - **Sampled Values (SV):** передача миттєвих значень струмів та напруг у цифровому форматі.
  - **MMS:** передача звітів та даних моніторингу на верхній рівень (SCADA).

### Тема 13.2. Налаштування обміну даними між пристроями захисту

Взаємодія пристроїв у стандарті МЕК 61850 базується на об'єктно-орієнтованому підході.

- **Логічні вузли (Logical Nodes):** кожна функція реле (наприклад, МСЗ або АПВ) має своє унікальне ім'я, зрозуміле будь-якому пристрою незалежно від виробника.
- **Інженерна мова SCL:** використання файлів конфігурації (.SCD, .CID) для опису всієї логіки підстанції.
- **Швидкодія:** стандарт гарантує доставку повідомлення GOOSE за час менше 3-10 мс, що швидше за спрацювання проміжних реле в традиційних схемах.
- **Віртуальні зв'язки:** замість фізичного перемикання дротів для зміни логіки захисту достатньо змінити конфігурацію програмного забезпечення.

### Тема 13.3. Практичне впровадження стандарту МЕК 61850

Перехід на цифру змінює підхід до проектування та експлуатації.

- **Зменшення витрат на кабель:** економія на мідних контрольних кабелях може сягати 80%.
- **Повна самодіагностика:** система миттєво бачить обрив зв'язку або помилку в даних, тоді як обрив звичайного дроту часто виявляється лише при відмові захисту під час аварії.
- **Інтероперабельність:** можливість поєднувати в одній мережі пристрої від різних брендів (наприклад, ABB, Siemens, Schneider Electric).
- **Кібербезпека:** впровадження протоколів шифрування та контролю доступу для захисту енергосистеми від хакерських атак.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10-05.02/141.00.1/Б/ОК30-2-2025
	Витуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 27

## Порівняння: MEK 61850 vs Традиційні протоколи

Параметр	MEK 61850 (Modern)	Modbus RTU/TCP	DNP3 / IEC 60870-5-104
Призначення	Комплексна автоматизація ПС	Проста передача даних	Телемеханіка (диспетчеризація)
Швидкість (GOOSE)	Надшвидка (< 3-10 мс)	Повільна (опитування)	Середня (подія/опитування)
Обмін "реле-реле"	Напряму (Peer-to-Peer)	Лише через Master-пристрій	Зазвичай через сервер
Модель даних	Об'єктна (зрозумілі назви)	Регістри (просто числа)	Адреси точок
Передача осцилограм	Так (SV, MMS)	Ні	Обмежено
Самодіагностика	Повна та миттєва	Обмежена	Базова

## Інфографіка системної стабільності (Digital Edition)

У цифровій підстанції стабільність забезпечується не лише запасом міцності апаратної частини, а й «здоров'ям» мережі:

- **Latency (Затримка):** якщо затримка в мережі перевищує 5 мс, система автоматично переходить у режим підвищеної готовності.
- **Network Load (Завантаження):** при трафіку > 40% на шині процесу активуються фільтри пріоритетів.
- **Sync (Синхронізація):** використання протоколу PTP (IEEE 1588) забезпечує точність часу до 1 мікросекунди для всіх пристроїв.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ			Ф-20.10-05.02/141.00.1/Б/ОК30-2-2025 Арк 30 / 28
	ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»			
	Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			
	Витуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	

## Глосарій

№ з/п	Термін державною мовою	Відповідник англійською мовою
1.	ТС (ТСт, ТТ) – Трансформатор струму	CT – Current Transformer
2.	ТН – Трансформатор напруги	VT (або PT) – Voltage (Potential) Transformer
3.	ТВП – Трансформатор власних потреб	SST – Station Service Transformer
4.	МСЗ (МТЗ) – Максимальний струмовий захист	ANSI code 50/51 – Overcurrent Protection
5.	СВ (ТО) – Струмове відсікання	ANSI code 50 – Instantaneous Overcurrent
6.	ДЗ – Дистанційний захист	ANSI code 21 – Distance Protection
7.	ДЗТ – Диференційний захист	ANSI code 87 – Differential Protection
8.	ЗНЗ (ЗНТЗ) – Захист від замикань на землю	ANSI code 50N / 51N – Ground Fault Protection, Earth Fault Protection
9.	АПВ – Автоматичне повторне ввімкнення	ANSI code 79 – Autoreclosing
10.	АВР – Автоматичне введення резерву	ATS – Automatic Transfer Switch
11.	ПрВВ (УРОВ) – Пристрій резервування відмови вимикача	ANSI code 50BF – Breaker Failure Protection
12.	АЧР – Автоматичне частотне розвантаження	UFLS – ANSI code 81 – Underfrequency Load Shedding
13.	ОПН – Обмежувач перенапруг	SA – Surge Arrester
14.	Вимикач – Силовий вимикач	CB – Circuit Breaker
15.	Роз'єднувач	DS – Disconnecter / Isolator
16.	Рівень сигналу	Signal level
17.	Дискретний вхід/вихід	Discrete input/output
18.	Аналоговий вхід/вихід	Analog input/output
19.	Інтерфейс	Interface
20.	Промислова польова мережа	Industrial field network
21.	Програма	Program
22.	Шина	Bus
23.	Алгоритм	Algorithm
24.	Лінія сигналу	Signal line
25.	Давач, сенсор	Sensor
26.	Лінія входу	Input/ Output line
27.	Цифровий інтерфейс	Digital interface
28.	Сигнал тривоги	Alarm signal

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 29

## Рекомендована література

### Основна література

1. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2013. – 533 с.  
[Релейний захист електроенергетичних систем](#)
2. Яндульський О. С., Дмитренко О. О. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем : навч. посіб. (електронне видання). - Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 102 с.  
<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/9fe8b977-13b6-4c3a-82bf-dcad5db59a34/content>
3. Панченко С. В., Блиндюк В. С., Баженов В. М. та ін. Релейний захист і автоматика : навч. посіб. : у 2 ч. - Ч. 2. - Харків : УкрДУЗТ, 2021. - 276 с.  
[Навчальний посібник.pdf](#)
4. Правила улаштування електроустановок – ПУЕ. Київ: Міненерговугілля України, 2017.  
[pue.pdf](#)
5. ДСТУ-Н ІЕС Guide 111:2007. Електрообладнання підстанцій високої напруги високовольтне. Загальні рекомендації щодо стандартів на виробі. Київ: Держспоживстандарт України, 2008.  
[https://dnaop.com/html/62957/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3-%D0%9D IEC G uide 111 2007](https://dnaop.com/html/62957/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3-%D0%9D%20IEC%20G%20uide%20111%202007)
6. ДСТУ EN 50160. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності.  
[Характеристики напруги в електромережах \(Український стандарт\)](#)
7. ДСТУ 62305-2 Блискавкозахист Частина 1. Загальні положення.  
[DSTU-EN-62305-1-2012.pdf](#)
8. ДСТУ 62305-3 Блискавкозахист Частина 2.  
[ДСТУ ІЕС 62305-2:2012.pdf](#)
9. ДСТУ 62305-3 Блискавкозахист Частина 3. Фізичні пошкодження будівель (споруд) та небезпека для життя. Порядкування ризиком. [dstu EN 62305-3.pdf](#)
10. ДСТУ Б В.2.5-82 Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом.  
[dstu b v.2.5-82.pdf](#)

### Допоміжна література

1. Пужна О.М. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах. / О.М. Пужна, І.В. Ельперін, Н.П. Луцька, А.П. Ладанюк – К.: Ліра-К, 2015. – 552с.  
[Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах | fieldbusbook](#)
2. Закон України Про ринок електричної енергії.  
[Про ринок електричної енергії | від 13.04.2017 № 2019-VIII](#)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ОК30- 2-2025
	Випуск 2	Зміни 1	Екземпляр № 1	Арк 30 / 30

## Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. Schneider Electric. Релейний захист і автоматика по застосуванню. [Релейний захист і автоматика по застосуванню | Schneider Electric Україна](#)
2. Загальний каталог РЕЛСіС  
<https://relsis.ua/ua>
3. Electropedia: The World's Online Electrotechnical Vocabulary.  
<https://www.electropedia.org/>
4. Високовольтне обладнання 110-750кВ. Технічний каталог.  
[High Voltage Direct Current Systems](#)
5. Низьковольтне обладнання. Модульні автоматичні вимикачі.  
[https://enext.ua/upload/support/presentations/Moduln%D1%96\\_avtomatichn%D1%96\\_vimikach%D1%96\\_2024.pdf](https://enext.ua/upload/support/presentations/Moduln%D1%96_avtomatichn%D1%96_vimikach%D1%96_2024.pdf)
6. Каталог низьковольтного обладнання.  
[Low voltage katalog.pdf](#)
7. Пристрої контролю та управління  
<https://enext.ua/upload/iblock/9f7/f5z7njkhko1dqpc0pjid31ttkmmikmj1/>
8. Контактори  
<https://enext.ua/upload/iblock/6d7/eomqgp8msayxqg2gcwd29ego1qlyvoy>
9. Силлові та повітряні автоматичні вимикачі E.NEXT-Україна  
<https://enext.ua/upload/iblock/23e/11rkdr71rl1wz74sgqyoyjlxbcdvhot9>
10. Перетворювачі частоти e.f-drive  
[Презентація PowerPoint](#)
11. Диференційний захист  
[Презентація PowerPoint](#)
12. Serial Peripheral Interface - Вікіпедія.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Serial\\_Peripheral\\_Interface](https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface)
13. Сайт Сіменс-Україна. Продукти та рішення.  
<https://www.siemens.com/ua/uk.html>
14. Системи промислової автоматизації SIMATIC.  
<https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/systemy-avtomatyzatsiyi/systemy-promyslovoyi-avtomatyzatsiyi-simatic.html>
15. Каталог для енергетиків та інженерів з автоматизації ТОВ «ЦІТ Альтера».  
<https://www.svaltera.ua/catalog/>
16. Complete Beginners Guide to PTC Mathcad.  
<https://www.mathcad.com/en/blogs/complete-beginners-guide-ptc-mathcad>
17. Електронний архів Державного університету Житомирська політехніка.  
<https://eztuir.ztu.edu.ua/>
18. Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського.  
<http://www.nbu.gov.ua>
19. Електронний каталог Національної парламентської бібліотеки України.  
<http://catalogue.nplu.org>
20. Український інститут інтелектуальної власності.  
<http://www.uipv.org>