

ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**Пашинський Олександр Володимирович**

УДК 621.359.4

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Обґрунтування модернізації релейного захисту та автоматики в ОРП  
підстанції 220 кВ  
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на  
відповідне джерело

Пашинський О. В.  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Журавльов Валерій Пилипович  
(прізвище, ім'я, по батькові)  
д.ф-м.н., професор кафедри вищої  
та прикладної математики  
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2023

## АНОТАЦІЯ

Пашинський О. В. Обґрунтування модернізації релейного захисту та автоматики в ОРП підстанції 220 кВ. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

Метою кваліфікаційної роботи є в розробка проекту модернізації релейного захисту та автоматики електричної підстанції з урахуванням сучасних вимог надійності, безпеки та ефективності її роботи, а також проекту часткової заміни обладнання ОРП.

**Ключові слова:** релейний захист, електрична підстанція, модернізація.

## ABSTRACT

Pashynskyi O. V. Justification of the modernization of relay protection and automation in the 220 kV substation ORP. Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2023.

The purpose of the qualification work is to develop a project to modernize the relay protection and automation of the electric substation taking into account the modern requirements of reliability, safety and efficiency of its operation, as well as a project to partially replace the equipment of the electrical substation.

**Keywords:** relay protection, electrical substation, modernization.

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 ХАРАКТЕРИСТИКА ПІДСТАНЦІЇ, АНАЛІЗ ЧИННОГО РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ, ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ РЗА ТА ЧАСТКОВОЇ ЗАМІНИ ОБЛАДНАННЯ ОРП	7
1.1 Загальна характеристика підстанції	7
1.2 Аналіз існуючої схеми ОРП 220 кВ	8
1.3 Аналіз існуючого релейного захисту і автоматики	9
1.4 Обґрунтування необхідності модернізації РЗА і часткової заміни обладнання ОРП 220 кВ	14
Висновки по розділу 1	16
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ, ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ОРП 220 кВ	17
2.1 Розрахунок струмів короткого замикання	17
2.2 Вибір і перевірка обладнання ОРП 220 кВ	23
Висновки по розділу 2	30
РОЗДІЛ 3. ВИБІР ОБЛАДНАННЯ РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТУ І АВТОМАТИКИ, РОЗРАХУНОК УСТАВОК	32
3.1 Вибір терміналів мікропроцесорної релейний захисту і автоматики	32
3.2 Релейна захист силових автотрансформаторів	34
3.3 Захист відходять ліній напругою 10 кВ	41
Висновки по розділу 3	43
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	45
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46

## ВСТУП

Основне обладнання електричної частини підстанції служить для перетворення, передачі та розподілу електроенергії, допоміжне для виконання допоміжних функцій (вимірювання, сигналізація, керування, захист і автоматика і т.д.). Устаткування повинно надійно працювати при будь-яких режимах, то є необхідно своєчасно виробляти ремонт і, якщо необхідно, то заміну устаткування, що зносилася, для того щоб уникнути відмов обладнання в нормальних та аварійних режимах.

Релейний захист і автоматика (РЗА) на підстанції виконує важливу функцію захисту дорогого силового обладнання, такого як силові трансформатори, вимірювальні трансформатори, високовольтні вимикачі і т.д. Автоматичне виявлення та відключення пошкоджених ділянок електричної мережі від загальної енергосистеми дозволяє мінімізувати дію струмів при КЗ і негативних впливів при інших ненормативних режимах роботи електричної мережі

**Актуальність теми** полягає в тому, що в даний час значна частина підстанцій експлуатується з технологічно застарілим типом РЗА з урахуванням електромеханічних реле. Таке обладнання, як правило, має високу або критичну ступінь зносу і недостатні по сучасним вимогам техніко-експлуатаційні показники. Це викликає помилкові спрацювання захисту та аварійні ситуації, що загрожує недовідпусткою електроенергії споживачам та пошкодженням обладнання як підстанції, так і інших елементів електроенергетичної системи. Крім того, в даний час у зв'язку з поступовим впровадженням схем електричних мереж з розподіленою генерацією і підключенням до енергосистем додаткових джерел живлення на основі традиційних і нетрадиційних джерел енергії, питання модернізації на підстанціях технологічно застарілого обладнання РЗА на основі електромеханічних реле стають все більш актуальними. Актуальність часткової заміни обладнання ВРП 220 кВ обумовлена необхідністю

збільшення пропускної навантажувальної здатності обладнання у зв'язку з плановим збільшенням навантаження тягового транзиту ВЛ 220 кВ, який проходить через ОРП 220 кВ.

**Об'єктом дослідження** є електрична частина ПС 220/10 кВ .

**Предметом дослідження** є питання модернізації релейного захисту і автоматики (РЗА) і часткової заміни електрообладнання ОРП 220 кВ.

**Ціль роботи** полягає в розробці проекту модернізації релейного захисту та автоматики електричної підстанції з урахуванням сучасних вимог надійності, безпеки та ефективності її роботи, а також проекту часткової заміни обладнання ОРП.

Завдання роботи:

- 1) Систематизувати і проаналізувати характеристики ПС, її діючої електричної схеми і чинною РЗА, електрообладнання ОРП 220кВ;
- 2) Провести обґрунтування необхідності модернізації РЗА та часткової заміни обладнання ОРП;
- 3) Здійснити розрахунок струмів короткого замикання, що впливають на вибір уставок роботи РЗА і впливають на вибір обладнання ОРП, що замінюється, в ключових точках електричної мережі;
- 4) Вибрати сучасні мікропроцесорні термінали релейного захисту та автоматики, розрахувати уставки передбачених видів захистів;
- 5) Вибрати нове електроустаткування ОРП для забезпечення необхідної пропускної спроможності обладнання, провести перевірку за допустимими параметрами в робочих та аварійних режимах;
- 6) Область застосування проблеми, що розробляється – модернізація РЗА та РУ діючих станцій і підстанцій та перевірка їх діючого обладнання.
- 7) Технічна і практична значимість роботи укладаються в тому, що згідно даному проекту можливо провести реальну модернізацію РЗА і часткову заміну обладнання ОРП ПС 220/10 кВ однієї з підстанцій ЕС «Західна». Заміна зношеного і застарілого обладнання РЗА приведе до зниження ризику пошкодження обладнання ПС і інших найближчих

елементів енергосистеми. Ча- стмчна заміна обладнання ОРП 220 кВ дозволить підвищити його пропускну навантажувальну здатність і забезпечити транзит необхідною потужності через ОРП. Теоретична та методологічна основа роботи полягає в аналізі сучасної наукової літератури, методик проектування і розрахунку мікропроцесорних систем РЗА на підстанціях, методик розрахунків режимів роботи, вибору і перевірки обладнання електричної частини ПС.

**Перелік публікацій автора за темою дослідження :**

Пашинський О. В., Журавльов В. П. ПОРЯДОК ВИБОРУ І ПЕРЕВІРКА ОБЛАДНАННЯ ОРП 220 кВ.

Матеріали VII Міжнародна науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи» 15-17 листопада 2023 року. Житомир: Поліський національний університет, 2023.- С 47-49.

Пашинський О. В, Журавльов В. П. ВИБІР СУЧАСНИХ ТЕРМІНАЛІВ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ І АВТОМАТИКИ ОРП 220 кВ

Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інженерні процеси та системи» 14-15 червня 2023 року. Житомир: Поліський національний університет, 2023.- С 47-51.

Пашинський О. В ПОРЯДОК РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ОРП 220 кВ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2023» 25 жовтня 2023 року. Житомир: Поліський національний університет, 2023.- С 72-73.

**РОЗДІЛ**

**ХАРАКТЕРИСТИКА ПІДСТАНЦІЇ, АНАЛІЗ ЧИННОГО РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ, ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ РЗА ТА ЧАСТКОВОЇ ЗАМІНИ ОБЛАДНАННЯ ОРП**

**1.1 Загальна характеристика підстанції**

Підстанція (ПС) 220/10 кВ «Стрий» відноситься до Західної енергосистеми, що належить та обслуговується ПрАТ «Львівобленерго». Ця підстанція введена в експлуатацію у 1970 році. Підстанція запитана по двох ПЛ 220 кВ: 1) Калуш – Стрий; 2) Стрий – Мукачево. До складу навантаження входять розподільні ТП 10/0,4 кВ; ЦРП 10 кВ; ГРП кар'єрів та інші споживачі. До складу навантаження 10 кВ входять споживачі 1,2 та 3 категорій надійності електропостачання. Для своєчасного введення резерву живлення на ПС «Стрий» передбачено АВР на основі електромеханічних реле [22].

ПС «Стрий» є важливим елементом Західної енергосистеми України, що забезпечують передачу електроенергії до розподільчих мереж 10 кВ. У той же час, згідно зі статистикою аварійних відмов і хибних спрацювань релейного захисту та автоматики (РЗА) серед усіх ПС «Львівобленерго» енергосистеми класом напруги до 220 кВ включно (за період 2016 – 2020 роки), найбільше таких інцидентів зафіксовано саме на ПС «Стрий» [27].

Також, згідно планом подальшого розвитку енергосистеми, актуальність часткової заміни обладнання ВРП 220 кВ обумовлена необхідністю збільшення пропускної навантажувальної здатності обладнання у зв'язку з плановим збільшенням навантаження тягового транзиту ВЛ 220 кВ, проходить через ОРП 220 кВ [26].

Перераховані вище фактори зумовили вибір ПС «Стрий» для розробки проекту модернізації релейного захисту та автоматики та проекту часткової заміни обладнання ОРП 220 кВ.

## 1.2 Аналіз існуючої схеми ОРП 220 кВ

ОРП 220 кВ призначене для прийому ПС електроенергії, а також її транзиту далі через мережу 220 кВ. Електрообладнання ОРП має комутаційні, захисні та вимірювальні функції

Чинна, згідно з актуальною технічною документацією, однолінійна схема ОРП 220 кВ представлена на рисунку 1.1.

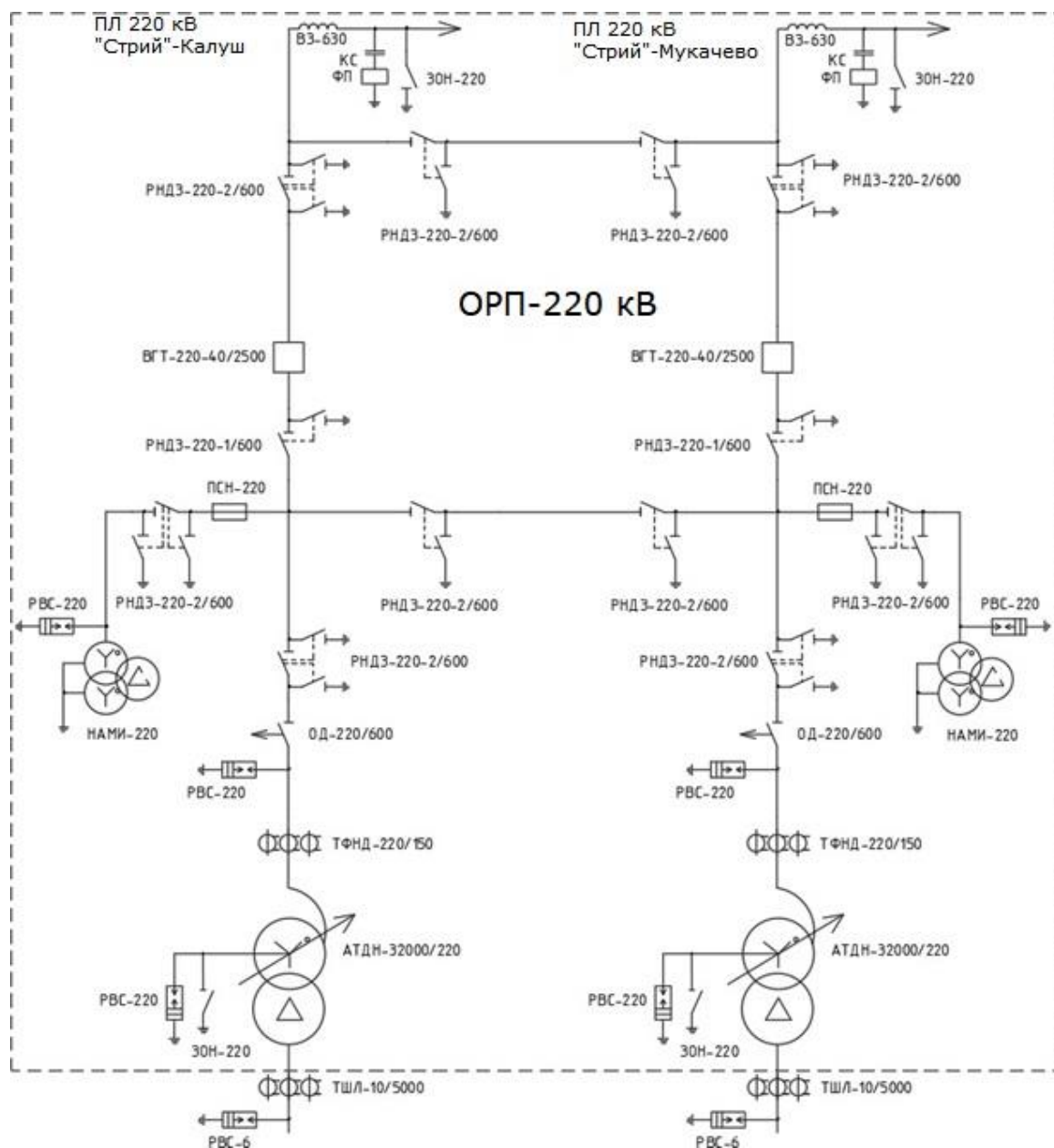


Рисунок 1.1 - Діюча однолінійна схема ОРП 220 кВ

Номинальний робочий струм ліній 220 кВ визначається по формулі:



$$I_{ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_n},$$

де  $S_{ном}$  - номінальна повна потужність навантаження, кВА;

$U_n$  - напруга лінії, кВ.

Номінальне навантаження ліній 220 кВ у зв'язку з плановим збільшенням навантаження тягового транзиту ПЛ 220 кВ, що проходить через ОРП 220 кВ складе 312,6 МВА [18].

Номінальний робочий струм ліній 220 кВ з урахуванням планового збільшення навантаження тягового транзиту ПЛ 220 кВ, що проходить через ОРП 220 кВ:

$$I_{ном} = \frac{312600}{\sqrt{3}} = 820,386 \text{ A}.$$

Потрібна часткова заміна обладнання ОРП 220 кВ обумовлена необхідністю збільшення пропускної здатності навантаження обладнання в зв'язку з плановим збільшенням навантаження тягового транзиту ПЛ 220 кВ, проходячого через ОРП 220 кВ. Необхідно замінити обладнання на другій секційнійній перемишці включно:

- високочастотні загороджувачі ВЗ-630;
- роз'єднувачі РНДЗ-220-1/600 і РНДЗ-220-2/600.

Також потрібно встановити трансформатори струму на першій секційній перемишці (для вимірювання та контролю перетоків потужності та робочих струмів ПЛ 220 кВ) і замінити застарілі вентиляльні розрядники РВС-220 на сучасні ГНН для забезпечення належного рівня захисту від перенапруг та згідно вимогам до роботи сучасної мікропроцесорної РЗА.

### **1.3 Аналіз існуючого релейного захисту і автоматики**

Устаткування релейний захисту на підстанціях забезпечує відключення пошкоджених ділянок електричної мережі, на яких виникла аварійна ситуація (наприклад, коротке замикання). Автоматичне введення резерву (АВР) забезпечує аварійне відключення пошкодженого введення живлення та перемикання його навантажень на введеннях живлення, що залишилося в

роботі. Таким чином, очевидно, що обладнання РЗА виконує найважливішу функцій, захищаючи обладнання від критичних пошкоджень. При проведенні модернізації РЗА необхідно також враховувати, що діюча електрична схема та її діюче електроустаткування не завжди здатні забезпечити нормальну роботу нового обладнання РЗА. Особливо часто це спостерігається при перекладі застарілої електромеханічної РЗА на сучасну мікропроцесорну [4].

Діючий релейний захист і автоматика - електромеханічного типу.

Передбачено такі види захисту. Для силових автотрансформаторів:

- поздовжній диференційний захист;
- максимальний струмовий захист (МСЗ);
- струмова відсікання (СВ);
- газовий захист.

Поздовжній диференційний захист є основним для силових трансформаторів, інші види захистів є допоміжними. Релейна захист силових трансформаторів виконано на електромеханічних реле РТ-80.

Для відходять ліній 10 кВ види захистів:

- МСЗ;
- СВ;
- захист від замикань на землю (ЗНЗ).

Релейна захист відходять ліній 6 кВ виконано на електромеханічних реле РТ-80.

Далі розглянемо діючі схеми релейний захисту на підстанції "Стрий".

Чинна схема релейного захисту силових трансформаторів представлена на рисунку 1.2

Схема підключення реле чинного РЗ силових трансформаторів показана на рисунку 1.3.

Схема релейного захисту  
силових трансформаторів

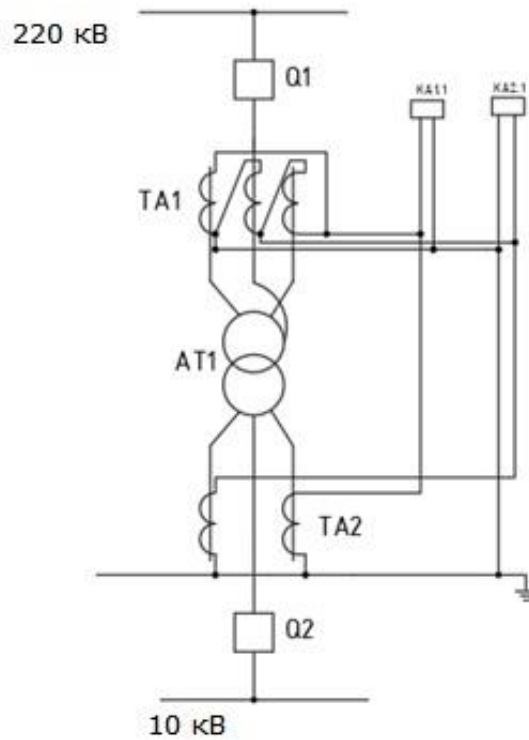


Схема живлення оперативних ланцюгів

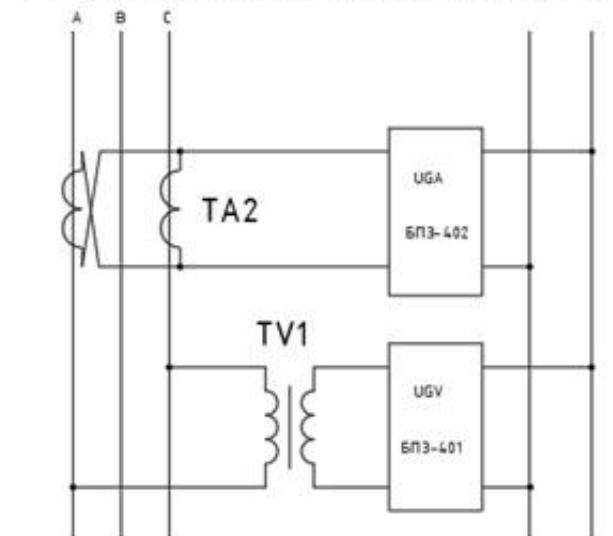


Рисунок 1.2 - Чинна схема релейного захисту силових трансформаторів

Чинна схема релейного захисту відходячих ліній 10 кВ представлена на  
рисунок 1.4

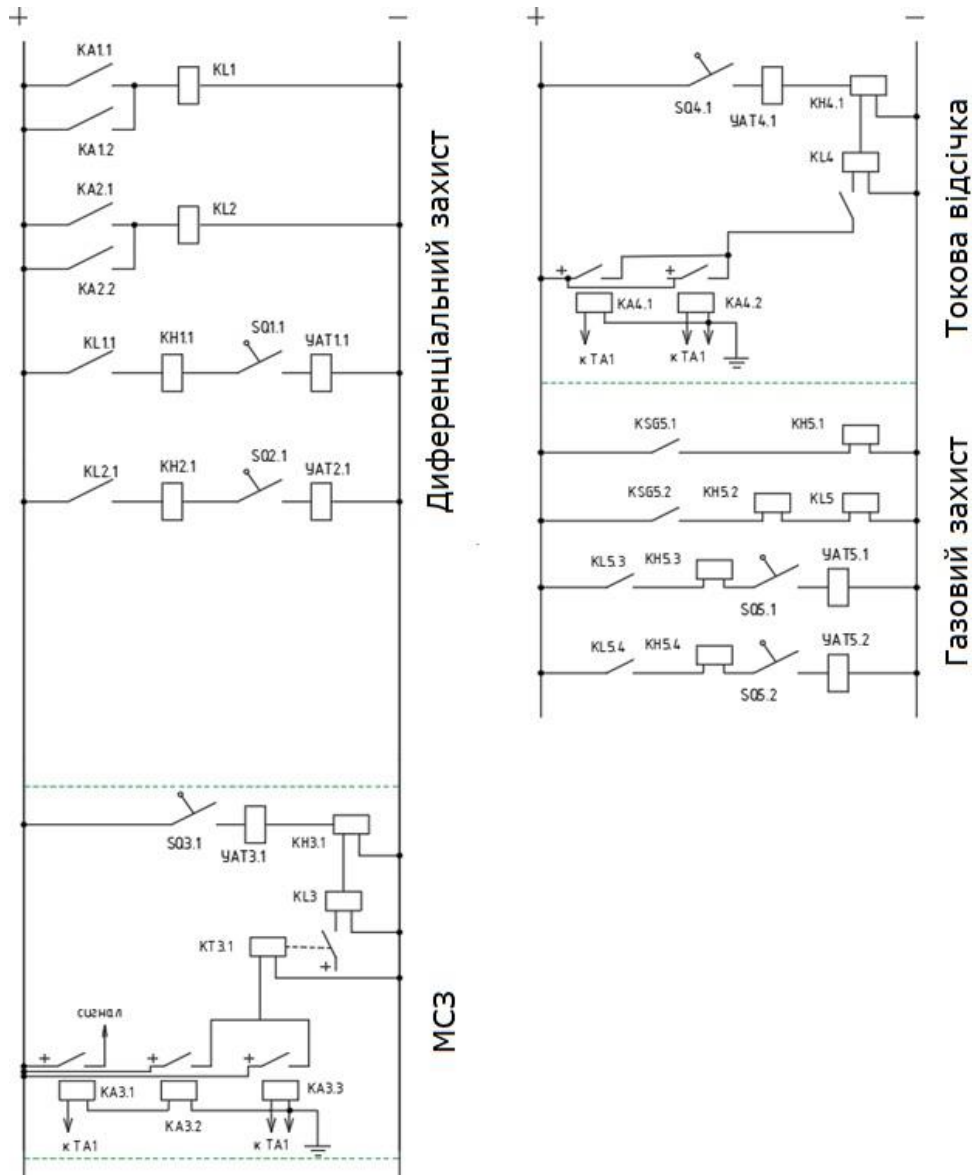


Рисунок 1.3 – Схема підключення реле діючого РЗ силових трансформаторів

На даний момент для релейний захисту силових трансформаторів і відходячих ліній 10 кВ використовуються електромеханічні реле струму серії РТ. Принцип дії: при струмі спрацьовування електромагнітна сила перевищить причинну силу (обумовлена силою пружини і силою тертя), якір реле повернеться і повернеться зв'язаний з ним контакт, замкнучи нерухомий контакт. Статистика відмов реле РТ на ПС «Стрий», згідно аварійному журналу, по даними ПрАТ «Львівенерго» наведено в таблиці 1.1.

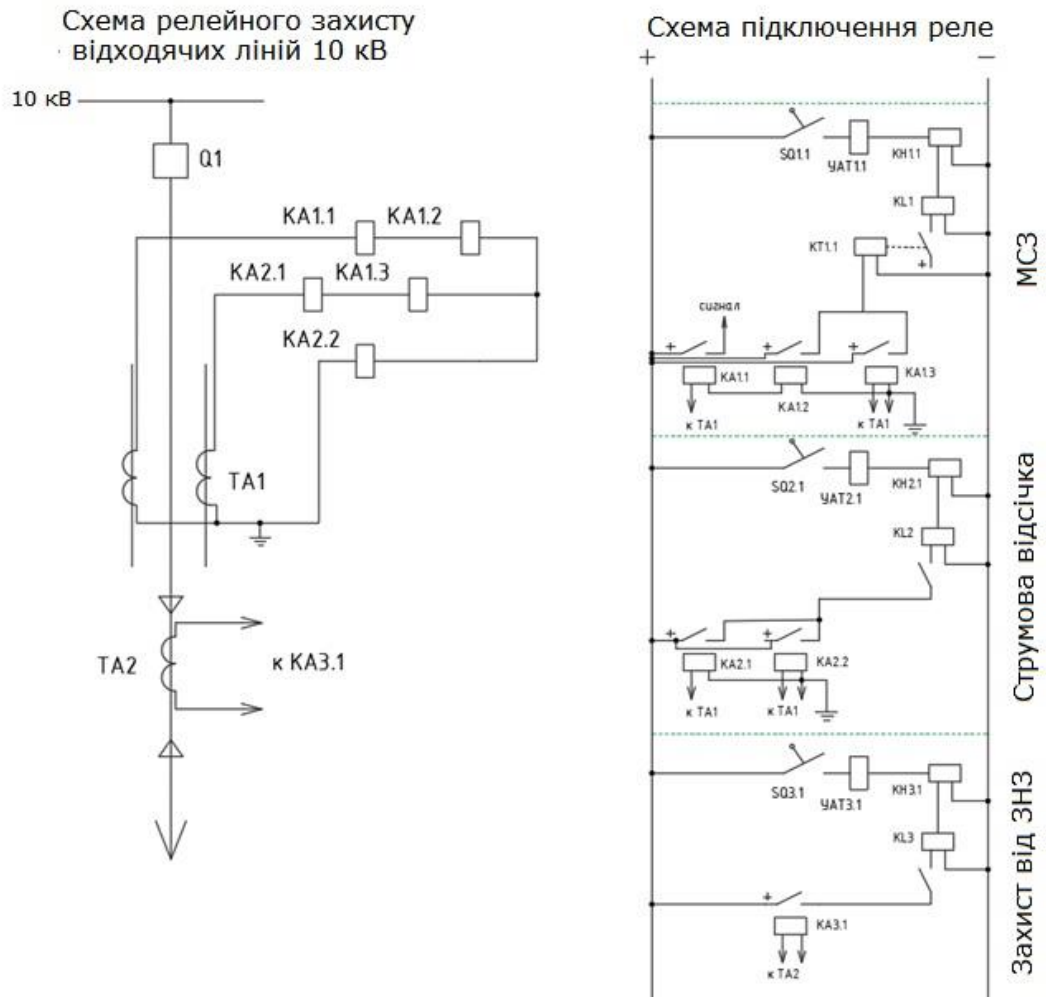


Рисунок 1.4 – Діюча схема релейного захисту ліній, що відходять 10 кВ

Очевидно, що реле серії РТ, що діють, далеко не завжди здатні ефективно забезпечити захист силових трансформаторів і ліній, що відходять 10 кВ.

Проведемо аналіз діючого електроустаткування РЗА на залишковий ресурс. Залишковий ресурс діючого обладнання визначається за формулі:

$$T_{зал} = \frac{T_{ном} - T_{факт}}{T_{ном}} \cdot 100, \%$$

де  $T_{ном}$  – номінальний ресурс обладнання згідно з паспортом, років;

$T_{факт}$  - фактичний ресурс обладнання на даний момент, років.

Таблиця 1.1 - Статистика відмов реле струму згідно аварійному журналу

Рік	Відмови загальні	Основна причина
2016	3	Реле не спрацьовує через затирання рухливої системи
	2	Обрив в ланцюзі підйомної котушки
	2	Велике контактне натискання, яке вимагає регулювання реле
2017	4	Велике контактне натискання, яке потребує регулювання реле
	4	Реле не спрацьовує через затирання рухливої системи
	2	Обрив в ланцюзі підйомної котушки
2018	3	Обрив в ланцюзі підйомної котушки
	5	Велике контактне натискання, яке потребує регулювання реле
	6	Реле не спрацьовує через затирання рухливої системи
2019	4	Реле не спрацьовує через затирання рухливої системи
	5	Обрив в ланцюзі підйомної котушки
	5	Велике контактне натискання, яке вимагає регулювання реле
2020	7	Велике контактне натискання, яке потребує регулювання реле
	6	Реле не спрацьовує через затирання рухливої системи
	5	Обрив в ланцюзі підйомної котушки

Чинне електроустаткування РЗА експлуатується з моменту введення ПС в експлуатацію, тобто з 1970 р., номінальний ресурс обладнання, відповідно паспорту, становить 30 років [27]. Отже залишковий ресурс зі- ставить:

$$T_{\text{зал}} = \frac{30 - 50}{30} \cdot 100 = -66,7 \%$$

Так як розрахункове значення негативно, то залишковий ресурс відсутній. Ступінь зносу діючого електроустаткування РЗА ПС критична, що і зумовлює велику кількість аварійних відмов та хибних спрацьовувань РЗА.

#### **1.4 Обґрунтування необхідності модернізації РЗА і часткової заміни обладнання ОРП 220 кВ**

Виходячи з проведеного аналізу чинної РЗА на ПС 220 кВ, наведемо обґрунтування необхідності її модернізації:

1) Необхідна установка нового обладнання РЗА через критичну ступінь зносу чинного обладнання. Відмови струмових реле і інших елементів

РЗА створюють загрозу виходу з ладу дорогого обладнання ПС, наприклад, силових трансформаторів з супутніми негативними наслідками. Хибні спрацьовування захисту призводять до недовідпуску електроенергії споживачам з наступним матеріальним і іншим збитком.

2) Чинний тип устаткування РЗА – електромеханічний. В даний час такий тип РЗА не задовольняє сучасним вимогам, які пред'являються до РЗА, таким як швидкодія, селективність і т.д. [21].

3) В даний час на ПС відсутній цифровий моніторинг роботи РЗА та миттєва передача даних безпосередньо до диспетчерської служби ПрАТ «Львівобленерго». Для отримання, збору і систематизації даних про роботу обладнання РЗА ведуться робочий та аварійний журнали. Це ускладнює отримання та статистичну обробку даних, знижує точність і достовірність одержуваної інформації. Рішення даної проблеми можливі тільки при використанні сучасної мікропроцесорної РЗА, що дозволяє проводити цифровий моніторинг роботи РЗА.

4) Потрібно часткова заміна обладнання ОРП 220 кВ з огляду необхідності збільшення пропускної навантажувальної здібності обладнання в зв'язку зплановим збільшенням навантаження тягового транзиту ПЛ 220 кВ, проходить через ОРП 220 кВ. Також потрібно встановити трансформатори струму на першій секційній перемичці (для вимірювання та контролю перетікань потужності та робочих струмів ПЛ 220 кВ) та замінити застарілі вентильні розрядники РВС-220 на сучасні ОПН для забезпечення належного рівня захисту від перенапруг і відповідно до вимог до роботи сучасної мікропроцесорної РЗА.

Таким чином, далі необхідно розробити проект модернізації релейного захисту та автоматики ПС, що дозволяє усунути зазначені недоліки діючої РЗА, для чого планується встановлення сучасних терміналів мікропроцесорної РЗА. Також необхідно виконати часткову заміну обладнання ОРП 220 кВ та встановлення додаткових трансформаторів струму.

### **Висновки по першому розділу.**

Проаналізовано чинна електрична схема ПС з метою виявлення відповідності встановленого електрообладнання передбачуваному проекту модернізації РЗА. Визначено необхідні зміни у чинній електричній схемі ПС при проведенні модернізації. Проаналізовано діюче обладнання ОРП 220 кВ і чинного релейного захисту і його технічний стан, проведено аналіз обладнання РЗА на залишковий ресурс.



## РОЗДІЛ 2

### РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ, ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ОРП 220 кВ

#### 2.1 Розрахунок струмів короткого замикання

Розрахунок струмів короткого замикання (КЗ) в максимальному режимі живильної енергосистеми буде необхідний для вибору та перевірки обладнання вводів додаткових джерел живлення за режимом КЗ на термічну та електродинамічну стійкість. Розрахунок струмів КЗ в мінімальному режимі живильної енергосистеми буде необхідний для перевірки чутливості релейного захисту.

Розрахункова схема та схема заміщення для визначення струмів короткого замикання представлені рисунку 2.1.

Приймаємо за базисну напругу 220 кВ (напруга ВН живлячих силових трансформаторів) [11].

Періодична складова струму КЗ визначається по формулі згідно ДСТУ 3429-96 [14]:

$$I_K'' = \frac{E_c}{\sqrt{3} \cdot X_{\Sigma K}}, \quad (2.1)$$

де  $E_c$  – напруга короткого замикання, кВ;

$X_{\Sigma K}$  - сумарний еквівалентний опір до точки КЗ, Ом.

Ударний коефіцієнт струму КЗ визначається по формулі:

$$K_V = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}}, \quad (2.2)$$

де  $T_a$  - постійна часу згасання аперіодичної складовою струму КЗ (для мережі 220 кВ  $T_a = 0,05$  с для мережі 10 кВ  $T_a = 0,07$  с; для мережі до 1 кВ  $T_a = 0,09$  с).

Ударний струм КЗ визначається по формулі:

$$i_V = \sqrt{2} \cdot K_V \cdot I_K'', \quad (2.3)$$

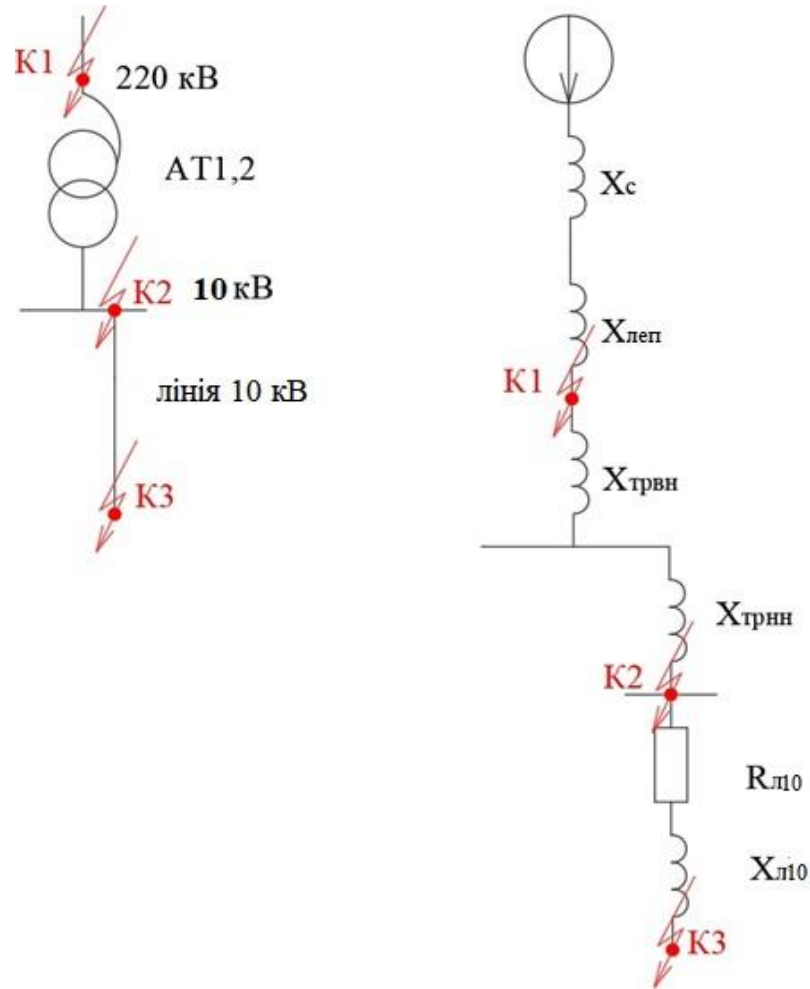


Рисунок 2.1 - Розрахункова схема для визначення струмів короткого замикання

Діюче значення ударного струму КЗ визначається по формулі:

$$I_v = I_K'' \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (K_v - 1)^2}, \quad (2.4)$$

Струм двофазного КЗ визначається по формулі:

$$I_K^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_K'', \quad (2.5)$$

Струм однофазного КЗ визначається по формулі:

$$I_K^{(1)} = 0,55 \cdot I_K'', \quad (2.6)$$

Максимальне значення аперіодичної складової струму КЗ визначається по формулі:

$$i_{\alpha\tau} = \sqrt{2} \cdot I_K'' \cdot e^{\frac{\tau}{T_a}}, \quad (2.7)$$

де  $\tau$  – мінімальний час КЗ, с.

$$\tau = t_{\text{зmin}} + t_{\text{CB}} \quad (2.8)$$

де  $t_{\text{зmin}}$  – мінімальний час дії захисту, 0,01 с [1];

$t_{\text{CB}}$  - власний час відключення вимикача 220 кВ, с ;

$$I_n = i_{\alpha\tau} + I_K'' \quad (2.9)$$

Опір двообмотувальних знижувальних автотрансформаторів 220/10 кВ на боці ВН визначається по формулі:

$$X_{\text{ТРВН}} = \frac{U_K \cdot U_H^2}{100 \cdot S_{\text{HT}}^2} \quad (2.10)$$

де  $U_K$  - напруга короткого замикання (паспортна величина), %;

$U_H$  - напруга обмотки ВН, кВ;

$S_T$  - номінальна потужність трансформатора, МВА.

$$X_{\text{ТРВН}} = \frac{10,5 \cdot 220^2}{100 \cdot 32^2} = 4,963 \text{ Ом}$$

Опір двообмотувальних знижувальних автотрансформаторів 220/10 кВ по боці НН визначається по формулі:

$$X_{\text{ТРНН}} = X_{\text{ТРВН}} \cdot (U_{\text{ном.НН}} / U_{\text{ном.ВН}})^2 \quad (2.11)$$

$$X_{\text{ТРНН}} = 4,963 \cdot (6/220)^2 = 0,004 \text{ Ом}$$

Розрахуємо опір ЛЕП:

$$X_{\text{ЛЕП}} = x_o \cdot L \quad (2.12)$$

де  $x_o = 0,420$  Ом/км – питомий опір лінії 220 кВ з проводами АС-400/64;

$L$  - довжина лінії, км.

У даному випадку довжини ПЛ до ПС "Стрий" однакові, тому

$$X_{\text{ЛЕП}} = 0,42 \cdot 1,48 = 0,622 \text{ Ом}$$

Визначимо опір системи  $X_C$  в в іменованих одиницях:

$$X_C = \frac{U_{\phi}^2}{S_K} \quad (2.13)$$

$S_K$  потужність КЗ на початку живильних ЛЕП до ПС "Стрий", МВА.

За даними ПрАТ «Львівобленерго», потужності КЗ впочатку відпайок [27]:

– від ЛЕП «Стрий» – Лінія 1, в максимальному режимі живильної енергосистеми: 6230 МВА;

– від ЛЕП «Стрий» - Лінія 2, в мінімальному режимі живильної енергосистеми: 5021 МВА;

– від ЛЕП Лінія 3 - «Стрий», в максимальному режимі живильної енергосистеми: 6156 МВА;

– від ЛЕП Лінія 4 - «Стрий», в мінімальному режимі живильної енергосистеми: 5005 МВА.

Відповідно, опору енергосистеми в різних режимах енергосистеми та живлення ПС «Стрий» будуть рівні:

$$X_{C1} = 220^2 / 6230 = 7,769 \text{ Ом}$$

$$X_{C2} = 220^2 / 5021 = 9,64 \text{ Ом}$$

$$X_{C3} = 220^2 / 6156 = 7,862 \text{ Ом}$$

$$X_{C4} = 220^2 / 5005 = 9,67 \text{ Ом}$$

Лінії 10 кВ, які відходять виконані кабельними і кабельно-повітряними.

Активний і індуктивний опори КЛ визначаються по формулам:

$$R_{KL} = r_0 \cdot L \quad (2.14)$$

$$X_{KL} = x_0 \cdot L \quad (2.15)$$

де  $r_0$  та  $x_0$  – питомий активний і реактивний опір кабелю відповідно, Ом/км.

$L$  - довжина кабелю, км.

Активний і індуктивний опори ПЛ визначаються по формулам:

$$R_{\text{пл}} = r_0 \cdot L \quad (2.16)$$

$$R_{\text{пл}} = x_0 \cdot L \quad (2.17)$$

де  $r_0$  та  $x_0$  – питомий активний і реактивний опір проводу відповідно, Ом/км.

$L$  - довжина проводу, км.

У якості прикладу наведемо розрахунок струмів КЗ для точки К1 (РУВН ПС 220 кВ) при живленні ПС від ЛЕП 1, в максимальному режимі роботи живильної енергосистеми.

Періодична складова струму КЗ визначається за формулою (2.1):

$$I_K'' = \frac{220}{\sqrt{3} \cdot (7,769 + 0,622)} = 15,139 \text{ кА}$$

Ударний коефіцієнт струму КЗ визначається по формулою (2.2):

$$K_y = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,05}} = 1,82$$

Ударний струм КЗ визначається по формулі (2.3):

$$i_{y1} = \sqrt{2} \cdot 1,82 \cdot 15,139 = 38,959 \text{ кА}$$

Діюче значення ударного струму КЗ визначається по формулі (2.4)

$$I_{y1} = 15,139 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,82 - 1)^2} = 23,177 \text{ кА}$$

Струми двофазного і однофазного КЗ визначаються по формулам (2.5-2.6):

$$I_{K1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 15,139 = 13,11 \text{ кА}$$

$$I_{K1}^{(1)} = 0,55 \cdot 15,139 = 8,326 \text{ кА}$$

Визначаємо мінімальний час КЗ, по формулі (2.8):

$$\tau = 0,01 + 0,065 = 0,075 \text{ с}$$

Максимальне значення аперіодичною складника струму КЗ, по формулі

(2.7):

$$i_{\alpha r1} = \sqrt{2} \cdot 15,139 \cdot e^{-\frac{0,075}{0,05}} = 4,315 \text{ кА}$$

Повний струм КЗ визначається по формулі (2.9):

$$I_{\text{м}} = 4,315 + 15,139 = 19,453 \text{ кА}$$

Розрахунок струмів КЗ в інших режимах енергосистеми та живлення ПС «Стрий» аналогічний, для точки К2 розрахунок також аналогічний, результати зведені в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 - Результати розрахунків струмів КЗ в точках К1-К2

Живлення	Режим ЕС	Крапка КЗ	$I''$ , кА	$i_{y, \text{кА}}$	$I_y$ , кА	$I^{(2)}$ , кА	$I^{(1)}$ , кА	$I_{\alpha r}$ , кА	$I_{\text{п}}$ , кА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
від ЛЕП «Стрий» - ЛЕП1	Макс.	К1	15,139	38,959	23,177	13,110	8,326	4,315	19,453
від ЛЕП «Стрий» - ЛЕП1	Макс.	К2	9,462	24,349	14,486	8,194	5,204	2,697	12,158
від ЛЕП «Стрий» - ЛЕП2	Мін.	К1	11,131	28,646	17,042	9,640	6,122	3,172	14,304
від ЛЕП «Стрий» - ЛЕП2	Мін.	К2	6,957	17,904	10,651	6,025	3,826	1,983	8,940
від ЛЕП3 ПС3 - «Стрий»	Макс.	К1	14,363	36,963	21,990	12,438	7,900	4,093	18,457
від ЛЕП ПС3 - «Стрий»	Мін.	К2	8,977	23,102	13,744	7,774	4,937	2,558	11,535
від ЛЕП ПС4 - «Стрий»	Макс.	К1	10,561	27,179	16,169	9,146	5,809	3,010	13,571
від ЛЕП ПС4 - «Стрий»	Мін.	К2	6,601	16,987	10,106	5,716	3,630	1,881	8,482

Також для перевірки чутливості релейного захисту на фідерах ЗРУ 10 кВ потрібно визначити мінімальні двофазні струми КЗ в кінці ліній 6 кВ [1].

Виходячи з результатів розрахунків в таблиці 2.1, очевидно, що мінімальні двофазні струми КЗ наприкінці ліній 6 кВ будуть при живленні ПС «Стрий» по відпаюванню від ЛЕП 3 - «Стрий», в мінімальному режимі живлючої енергосистеми.

Зведемо дані по лініях, що відходять 10 кВ (відповідно до технічної документації [19]) в таблицю 2.2.

*Лінії 10 кВ	Число ланцюгів	L, км	Марка ка- беля/дроту	$r_0$ , Ом/км	$X_0$ Ом/км	R, Ом	X, Ом	Z, Ом	$I_p$ , А	$I_{\max}$ , А
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
фідер 1	2	0,080	ААШВ-3х120	0,258	0,081	0,021	0,006	0,022	92,4	184,8
фідер 2	2	0,100	ААШВ-3х120	0,258	0,081	0,026	0,008	0,027	97,5	195,0
фідер 3	2	0,080	ААШВ-3х120	0,258	0,081	0,021	0,006	0,022	88,9	177,8
фідер 4	2	0,505	ААШВ-3х240	0,129	0,071	0,065	0,036	0,074	188,1	376,2
фідер 5	2	0,498	ААШВ-3х240	0,129	0,071	0,064	0,035	0,073	171,2	342,4
фідер 6	2	0,709	ААШВ-3х240	0,129	0,071	0,091	0,050	0,104	183,8	367,6
фідер 7	2	0,621	ААШВ-3х240	0,129	0,071	0,080	0,044	0,091	187,4	374,8
фідер 8	2	0,722	ААШВ-3х240	0,129	0,071	0,093	0,051	0,106	170,5	341,0
фідер 9	1	0,809	ААШВ-3х120	0,258	0,081	0,209	0,066	0,219	151,2	151,2
фідер 10	1	0,908	ААШВ-3х120	0,258	0,081	0,234	0,074	0,246	108,2	108,2
фідер 1	2	19,700	АС-50/8	0,603	0,302	11,879	5,949	13,286	92,4	184,8
фідер 2	2	10,300	АС-50/8	0,603	0,302	6,211	3,111	6,946	97,5	195,0
фідер 3	2	1,090	АС-50/8	0,603	0,302	0,657	0,329	0,735	88,9	177,8

\*Примітка: для фідерів 1, 2 і 3 використовуються повітряно-кабельні лінії

Розрахунок струмів КЗ в кінці відходять ліній 10 кВ для перевірки чутливості релейного захисту проводиться аналогічно, результати зведені в таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 - Розрахунок струмів КЗ в кінці відхідних ліній 10 кВ

Фідер 10 кВ	$I''$ , кА	$I^{(2)}$ кА
фідер 1	1,788	1,548
фідер 2	2,175	1,884
фідер 3	2,855	2,473
фідер 4	2,758	2,388
фідер 5	2,849	2,467
фідер 6	2,845	2,464
фідер 7	2,846	2,465
фідер 8	2,844	2,463
фідер 9	2,830	2,451
фідер 10	2,827	2,448

## 2.2 Вибір і перевірка обладнання ОРП 220 кВ

Номінальне навантаження ліній 220 кВ у зв'язку із плановим збільшенням навантаження тягового транзиту ВЛ 220 кВ, проходить через ОРП 220 кВ складе 312,6 МВА [19].

Номінальний робочий струм ліній 220 кВ з урахуванням планового збільшення навантаження тягового транзиту ВЛ 220 кВ, проходить через ОРП 220 кВ:

$$I_{ном} = \frac{312600}{\sqrt{3} \cdot 220} = 829,386 \text{ А},$$

Таким чином номінальний робочий струм обирається електрообладнання-ОРП має бути більше 820,386 А.

### 2.2.1 Вибір і перевірка роз'єднувачів

Проведемо вибір роз'єднувачів серії РНДЗ-220-1 і РНДЗ-220-2 для другої секційної перемички включно.

Роз'єднувачі повинні відповідати наступним вимогам [16]:

- по номінальному напруги установки  $U_{н.ан.} \geq U_{н.уст.}$
- по максимальному робочому струму  $I_{н.ан.} \geq I_{роб.макс.}$
- перевірка на термічну стійкість  $I_{тер.}^2 \cdot t_{тер.} \geq B_k$
- перевірка на динамічну стійкість  $i_{дин} \geq i_y$

Таблиця 2.3 - Технічні Характеристики роз'єднувачів РНДЗ-220

Найбільша робоча напруга, кВ	252
Номінальний струм, А	1000
Струм термічної стійкості, кА (3 с)	25
Струм електродинамічної стійкості, кА	63

Перевірку роз'єднувачів зведемо в таблицю 2.4.

Таблиця 2.4 - Перевірка роз'єднувачів 220 кВ



Каталожні дані	Розрахункові дані
$U_{\text{ном}} = 220 \text{ кВ}$	$U_{\text{уст}} = 220 \text{ кВ}$
$I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$	$I_{\text{р.мах}} = 820,386 \text{ А}$
$I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} = 25^2 \cdot 3 = 1875 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{\text{к}} = 15,139^2 \cdot 3 = 688 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
$i_{\text{дин}} = 63 \text{ кА}$	$i_{\text{у}} = 38,96 \text{ кА}$

Вибрані роз'єднувачі задовольняють умовам перевірки по всім параметрах.

### 2.2.2 Вибір і перевірка трансформаторів струму

Потрібно встановити трансформатори струму на першій секційній перемичці (для вимірювання і контролю перетікань потужності і робітників струмів ПЛ 220 кВ).

Трансформатори струму повинні відповідати наступним вимогам [16]:

- по номінальному напруги установки  $U_{\text{н.ан.}} \geq U_{\text{н.уст.}}$ .
- по максимальному робітнику струму  $I_{1\text{н}} \geq I_{\text{роб. макс.}}$ .
- по класу точності
- по вторичному навантаженню  $Z_{\text{н}} \geq Z_{2\Sigma}$
- розрахункова перевірка по кривим граничної кратності (повна погрішність  $\leq 10 \%$ ) перевірка на термічну стійкість згідно з виразом:

$$\left(k_{\text{тер.}} \cdot I_{1\text{н.}}\right)^2 \cdot t_{\text{тер.}} \geq B_{\text{к}} \quad (2.18)$$

де  $k_{\text{тер.}}$  - кратність термічної стійкості,

$I_{1\text{н}}$  - номінальний струм первинної обмотки, кА.

Проведемо перевірку на динамічну стійкість[2]:

$$i_{\text{дин.}} = k_{\text{ед}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1\text{н.}} \geq i_{\text{у.}} \quad (2.19)$$

Порівняємо три можливих варіанти виконання трансформаторів струму 220 кВ (Таблиця 2.5).

Таблиця 2.5 - Порівняльна технічна характеристика трансформаторів струму 220 кВ

Порівняльні величини	ТФМ-220	ТФНД-220М	ТДФМ-220
Тип ізоляції	Масляний	Масляний	Елегазовий
Номинальна напруга, кВ	220	220	220
Кратність трисекундного струму стійкості, А	70	65	75
Кратність струму електродинамічної стійкості, А	115	140	150
Клас точності вторинної обмотки для вимірювань	0,5	0,5	0,5
Маса, кг	930	958	810

Слід віддати перевагу трансформаторам струму серії ТДФМ-220 зважаючи на кращі техніко-експлуатаційні характеристики та сучасніші конструкції (елегазові).

Перевірка по номінальній напрузі:

$$U_{н.ан.} = 220 \text{ кВ} \geq U_{н.уст} = 220 \text{ кВ}.$$

Перевірка по максимальному робочому струму:

$$I_{1н.} = 1000 \text{ А} \geq I_{раб. max.} = 820,386 \text{ А}.$$

Виконуємо перевірку на термічну стійкість по формулі (2.18):

$$(75 \cdot 1,0)^2 \cdot 3 = 16875 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \geq 688 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

Виробляємо перевірку на динамічну стійкість по формулі (2.19):

$$150 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,0 = 212,1 \text{ кА} \geq 38,96 \text{ кА}$$

Виконуємо перевірку по опорі вторинної навантаження, яким визначається з наступного виразу (для схеми повної зірки) [12]:

$$Z_{2\Sigma} = Z_{приб} + Z_{пров.} + Z_{конт.} \quad (2.20)$$

де  $Z_{приб}$  - сумарний опір послідовно включених приборів вторинного навантаження, Ом;

$Z_{пров.}$  - опір сполучних проводів, Ом;

$$Z_{\text{пров.}} = \frac{l_{\text{пров.}} \cdot \rho}{S_{\text{пров.}}}, \quad (2.21)$$

де  $l_{\text{пров.}}$  – довжина сполучних проводів, м;

$\rho$  – питома опір сполучних проводів, для мідних проводів 0,0175 Ом·мм<sup>2</sup>/м;

$S_{\text{пров.}}$  – переріз сполучних проводів, мм<sup>2</sup>

$Z_{\text{конт.}}$  – сумарний опір контактних з'єднань, який можна прийняти рівним 0,1 Ом.

$$Z_{\text{приб.}} = \frac{S_{\text{приб.}}}{I_{\text{н.приб.}}^2}, \quad (2.22)$$

де  $S_{\text{приб.}}$ ,  $I_{\text{н.приб.}}^2$  – відповідно споживана потужність, В·А, і мінімальний струм приладу, А, відповідно.

Вторинна обмотка ТС, із класом точності 10Р, задіяна у схемі багатофункціонального пристрою РЗА потужністю 1 ВА. Обчислюємо опір пристрою по формулою (2.22):

$$Z_{\text{приб.}} = \frac{1}{5^2} = 0,04 \text{ Ом.}$$

Приймаємо довжину з'єднувальних проводів 25 м [11]. Вибираємо контрольний кабель КВВГнг із жилами перетином 4 мм<sup>2</sup>. Розраховуємо опір сполучних проводів по формулою (2.21):

$$Z_{\text{пров.}} = \frac{25 \cdot 0,0175}{4} = 0,109 \text{ Ом}$$

Разом сумарний опір вторинного навантаження находимо по формулі (2.20):

$$Z_{2\Sigma} = 0,04 + 0,109 + 0,1 = 0,249 \text{ Ом.}$$

Проводимо перевірку за кривими граничної кратності [15]. Кратність первинного струму по відношенню до номінального не повинна перевищувати 21,5 при  $Z_{2\Sigma} = 0,249 \text{ Ом}$ . Повна похибка ТС буде до 10%.

Вибрані трансформатори струму ТГФМ-220 проходять перевірку по всім параметрів.

### 2.2.3 Вибір і перевірка високочастотних загороджувачів

По каталогу високочастотних загороджувачів (ВЗ) 220 кВ обираємо ВЗ номінальний струм не менше розрахункового 820,386 А.

На введеннях ОРП 220 кВ обираємо ВЗ серії ВЗ 1250 на номінальний струм 1250 А. Перевірка високочастотних загороджувачів зведена в таблицю 2.6.

Таблиця 2.6 - Перевірка високочастотних загороджувачів 220 кВ

Каталожні дані	Розрахункові дані
$U_{\text{ном}} = 220 \text{ кВ}$	$U_{\text{уст}} = 220 \text{ кВ}$
$I_{\text{ном}} = 1250 \text{ А}$	$I_{\text{р.мах}} = 820,386 \text{ А}$
$I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} = 25^2 \cdot 3 = 1875 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{\text{к}} = 15,139^2 \cdot 3 = 688 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$
$i_{\text{дин}} = 80 \text{ кА}$	$i_{\text{в}} = 38,96 \text{ кА}$

### 2.2.4 Вибір і перевірка обмежувачів перенапруги

Вибираються обмежувачі перенапруги серії ГНН. Для захисту від перенапруг попередньо вибираємо ОПНп-220/154/10/550, для цього проводимо перевірки:

1. Перевірка по найбільшому довго допустимій робочій напрузі  $U_{\text{д}}$ .

Для мереж напругою 220 кВ найбільша робоча напруга мережі, відповідно до ГОСТ 1516.3-96:  $U_{\text{НС}} = 145,7 \text{ кВ}$ .

По умові забезпечення електричної міцності ізоляції[17]:

$$U_{\text{НС}} = 1,05 \cdot U_{\text{НС}} ,$$

$$U'_{\text{НС}} = 1,05 \cdot 145,7 = 152,99 \text{ кВ}$$

Для ОПНп-220/154/10/550:  $U_{\text{д}} = 154 \text{ кВ} \geq 152,99 \text{ кВ}$ .

Умова виконується.

2.Перевірка по умовам вибухобезпеки.

Номинальний вибухобезпечний струм повинен бути не менше, чим на 20% більше максимального струму КЗ в місці установки ГНН:

$$I_{ВБ} \geq I_{Кзмакс} ,$$

$$I_{ВБ} \geq 1,2 \cdot 15,139 = 18,17 \text{ кА}$$

Для ОПНп-220/154/10/550:  $I_{ВБ} = 40 \text{ кА} \geq 18,17 \text{ кА}$

Умова виконується.

### 3. Перевірка по грозовим перенапругам.

Максимальне значення напруги, що залишається на ГНН при грозовому імпульсі з амплітудою 10 кА для обмежувачів мереж 220 кВ не повинно перевищувати 570 кВ [12].

Для ОПНп-220/154/10/550:  $U_{зал.гр} = 425 \text{ кВ} < 570 \text{ кВ}$ .

### 4. Перевірка по комутаційним перенапруг

Залишкова на ОПН напруга  $U_{зал.ком}$  при дії комутаційного імпульсу повинна бути не менше, чим на 20% меншою випробувальної напруги  $U_{вип.ком}$  і відповідно до ДСТУ її значення нормується для обладнання починаючи з 330 кВ. Для класу напруг 6-220 кВ нормуються однохвилинна дослідницькі напруги частотою 50 Гц  $U_{вип..50}$ . У даному у разі значення випробувальної напруги комутаційного імпульсу визначається по формулі:

$$U_{зал.ком.} = K_{имп} \cdot K_{к} \sqrt{2} \cdot U_{вип..50}, \quad (2.23)$$

де  $K_{имп}$  - коефіцієнт імпульсу, який враховує зміцнення ізоляції при короткому імпульсі в порівнянні з випробувальним, приймається рівним 1,35 [12];

$K_{к}$  - коефіцієнт кумулятивності, враховує можливу багатократність імпульсів та старіння ізоляції, приймається рівним 0,9 [21].

У даному випадку:

$$U_{зал.ком.} = 1,35 \cdot 0,9 \cdot \sqrt{2} \cdot 252 = 432,9 \text{ кВ}$$

Для ОПНп-220/154/10/550:  $U_{зал.ком} = 305 \text{ кВ} < 432,9 \text{ кВ}$ .

Умова виконується.

#### 5. Перевірка по довжині шляхи витоку зовнішньої ізоляції.

Згідно ГОСТ 9920-89 для району зі II ступенем забрудненості зовнішнього середовища питома довжина шляху витоку повинна бути не менше 2,0 см/кВ. Тобто в даному випадку мінімальна довжина шляхи витоку для ГНН буде дорівнювати:

$$L_{\text{мін.ШВ}} = 2,0 \cdot 252 = 504 \text{ см}$$

Для ОПНп-220/154/10/550:  $L_{\text{мін.ШВ}} = 550 > 504 \text{ см}$ .

Умова виконується.

Вибраний тип ОПНп-220/154/10/550 відповідає необхідним параметрам, визначеним згідно з умовами експлуатації.

### **Висновки по другому розділу**

Проведено розрахунок струмів короткого замикання КЗ у максимальному режимі живильної енергосистеми (для вибору та перевірки обладнання вводів доповненьних джерел живлення по режиму КЗ на термічну і електродинамічну стійкість). Проведено розрахунок струмів КЗ в мінімальному режимі живильною енергосистеми (для перевірки чутливості релейного захисту).

Вибрано і перевірено за допустимими параметрами обладнання, що замінюється. Для ОРП 220 кВ, складено однолінійну схему ОРУ після часткової заміни обладнання та наведена на рисунку 2.2.



## РОЗДІЛ 3

### ВИБІР ОБЛАДНАННЯ РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТУ І АВТОМАТИКИ, РОЗРАХУНОК УСТАВОК

#### 3.1 Вибір терміналів мікропроцесорного релейного захисту і автоматики

Релейний захист силових автотрансформаторів виконуємо на базі мікропроцесорних терміналів серії «РЗЛ-5.АЕ-ХХ» виробництва ТОВ «Науково-виробниче підприємство «РЕЛСІС»». Мікропроцесорна частина дозволяє задати струми спрацьовування програмно[8]. Зовнішній вид терміналів серії «РЗЛ-5» показаний на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 - Зовнішній вид терміналу серії «РЗЛ-5.АЕ-ХХ»

Пристрої серії «РЗЛ-5.АЕ-ХХ» для приєднань 6-35 кВ трифазного та двофазного виконання дозволяють реалізувати широкий спектр функцій релейного захисту й придатні для всіх випадків, що вимагають застосування ненаправленого захисту від міжфазних КЗ, ненаправленого / направленого

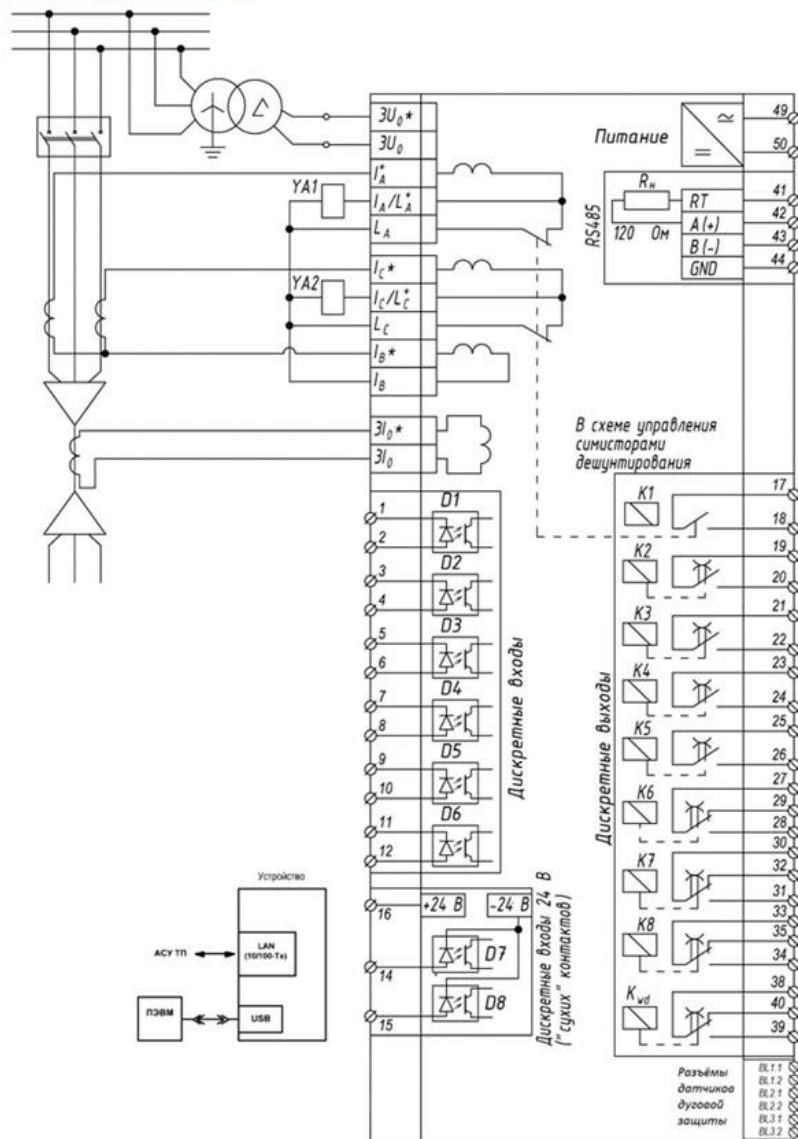


захисту від замикань на землю та функції АПВ та для резервного захисту і автоматики для приєднань 110-220 кВ. Також пристрої мають захисти по напрузі й можливість реалізації дугового захисту за допомогою оптоволоконних датчиків [13].

Дані термінали являють собою останнє покоління мікропроцесорних пристроїв релейного захисту та забезпечують усі необхідні види захистів відходять ліній 6–35 кВ і виконані на базі апаратно-програмної платформи РЗЛ-5.

Схема підключення мікропроцесорної захисту термінала ліній напругою 10 кВ які відходять показана на рис.3.2.

Схема підключення РЗЛ-05.



### Рисунок 3.2. Схема підключень терміналу серії РЗЛ-5

Типові рішення щодо застосування МП пристроїв РЗА серії РЗЛ -5 для підстанцій 110(220)/35/10(6) кВ показані на рис. 3.3.

## 3.2 Релейна захист силових автотрансформаторів

### 3.2.1 Диференційна захист силових автотрансформаторів

Диференційний захист застосовується як основна швидкодія захисту трансформаторів і автотрансформаторів. При паралельній роботі трансформаторів і автотрансформаторів диференційна захист забезпечує не тільки швидке, а й селективне відключення пошкодженого трансформатора (автотрансформатора) [11].

Номінальні розрахункові дані автотрансформаторів ПС показано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Номінальні розрахункові дані трансформаторів ПС

Величина	Позначення	Результати
Номінальна потужність автотрансформатора, який захищається, кВА	$S_n$	32000
Номінальна напруга автотрансформатора, кВ	$U_{вн}$	220
	$U_{нн}$	6
Первинні номінальні струми автотрансформатора, А	$I_{вн}$	83,981
	$I_{нн}$	3079,292
Первинні номінальні струми ТТ, А	$n_{вн}$	150
	$n_{нн}$	5000

Розрахунок уставок диференціальної захисту.

1) Визначення придатності встановлених трансформаторів струму (ТС).

1. за умові вирівнювання вторинних струмів по величині[24]:

$$0,1 \cdot I_{НОМ.Т} < I_{НОМ.ТС} < I_{НОМ.Т} \quad (3.1)$$

де  $I_{НОМ.Т}$  - первинний номінальний струм обмотки автотрансформатора, А;

$I_{НОМ.ТС}$  - номінальний струм первинної обмотки ТС, А.

Номінальний струм трансформатора  $I_{ВН}=83,981$  А.



Для ТС зі сторони 220 кВ , проведемо розрахунок по формулі (3.1):

$$0,1 \cdot 83,981 < 150 < 2,5 \cdot 83,981 = 210 \text{ A}$$

Номинальний струм трансформатора  $I_{HH} = 3079,292 \text{ A}$

Для ТС зі сторони 10 кВ , проведемо розрахунок по формулі (3.1):

$$0,1 \cdot 3079,292 < 5000 < 2,5 \cdot 3079,292 = 7698,2 \text{ A}$$

Умова виконується.

2. За умові відбудови від кидка струму намагнічування

Приведений опір трансформатора при повному насиченні визначається по формулі [11]:

$$X_{*B}^{(1)} = 0,94 + \frac{0,74 \cdot U_K}{100}, \quad (3.2)$$

$$X_{*B}^{(1)} = 0,94 + \frac{0,74 \cdot 10,5}{100} = 0,172 \text{ y.o.}$$

Базисний опір визначається по формулі:

$$X_{\sigma} = \frac{U_{BH}^2}{S_{н.т}}, \quad (3.3)$$

$$X_{\sigma} = \frac{242^2}{32} = 1830,1 \text{ Ом}$$

Опір ПЛ 220 кВ, нехтуючи активним опором, визначається по формулі:

$$X_L = x_0 \cdot L, \quad (3.4)$$

де  $x_0$  – питомий індуктивний опір лінії, Ом/км.

$$X_L = 0,42 \cdot 1,48 = 0,622 \text{ Ом}$$

Опір лінії, наведений до базисних умов, буде дорівнювати

$$X_{*L} = 0,622 / 1830,1 = 0,00034 \text{ y.o.}$$

Опір контуру включення визначається по формулі:

$$X_* = X_L + K_1 \cdot X_{*B}^{(1)}, \quad (3.5)$$

де  $K_1 = 1,1..1,15$  - коефіцієнт, який враховує збільшення індуктивного опору з точки зору неповного насичення магнітопроводу.

$$X_* = 0,00034 + 1,1 \cdot 0,172 = 0,1892 \text{ у.о.}$$

Або в іменованих одиницях

$$X = 0,1892 \cdot 1830,1 = 346,277 \text{ Ом.}$$

Амплітудне значення кидка струму намагнічування визначається по формулі[1]:

$$I_{ампл} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{лін} \cdot (1 + A)}{\sqrt{3} \cdot X}, \quad (3.6)$$

де  $A$  - зміщення осі синусоїди поточкозчеплення, для трансформаторів з гарячекатаною сталлю, приймається рівним 0,39 [1].

$$I_{ампл} = \frac{\sqrt{2} \cdot 242 \cdot (1 + 0,39)}{\sqrt{3} \cdot 346,277} = 793,063 \text{ А}$$

Кратність струму по відношенню до амплітудному значення номінального струму ТС визначається за формулі:

$$K_{ТС} = \frac{I_{ампл}}{\sqrt{2} \cdot I_{ВН.ТС}}, \quad (3.7)$$

де  $I_{ВН.ТС}$  - номінальний струм первинної обмотки ТС, А.

$$K_{ТС} = \frac{793,063}{\sqrt{2} \cdot 150} = 3,739 \leq 6,7$$

За умовою відбудови від кидка струму намагнічування гранична кратність ТС з сторони 220 кВ повинна бути:  $K_{10} \geq 20$  [1]. Визначаємо граничну кратність ТС при заданому навантаженні ТС зі сторони 220 кВ. Опір навантаження визначається по формулі:

$$R_{наван} = R_{к} + R_{пров} + R_{ex.терм} \quad (3.8)$$

де  $R_{к}$  - опір контрольного кабелю, Ом;

$R_{перех}$  - перехідний опір сполучних контактів в струмових колах, дорівнює 0,05 Ом [1];

$R_{вх.терм}$  - вхідний опір терміналу, дорівнює 0,01 Ом [1].

Опір контрольного кабелю визначається по формулі:

$$R_k = \rho L / S_k, \quad (3.9)$$

де  $\rho$  - питомий опір матеріалу жил кабелю, для мідного кабелю 0,029 Ом мм<sup>2</sup>/м [15];

$S_k$  - переріз жили кабелю, мм<sup>2</sup>.

$$R_k = 0,029 \cdot 50 / 2,5 = 0,58 \text{ Ом}$$

Опір навантаження ТС, по формулі (3.8):

$$R_{наван} = 0,58 + 0,05 + 0,01 = 0,64 \text{ Ом}$$

Для ТС типу ТФНД-220 для  $R_{наван} = 0,64$  Ом:  $K_{10} = 24 \geq 20$  [1]. Отже, вимога виконується.

Наведена гранична кратність для даного ТС визначається по формулі:

$$K' = K_{10} \cdot I_{НОМ.ТС} / I_{НОМ.Т} \geq 20, \quad (3.10)$$

або за формулою

$$K_{10} = K' \cdot I_{НОМ.ТС} / I_{НОМ.Т} \leq 24, \quad (3.11)$$

$$K_{10} = 20 \cdot 83,981 / 150 = 11,197 \leq 24,$$

Умова відбудови від перехідних режимів виконується.

2) Перевірка можливості використання самоадаптованого гальмування.

Самоадаптоване гальмування забезпечується при умові, що амплитудне значення кидка струму намагнічування не перевищує 8-кратного первинного струму обмотки ВН трансформатора. В даному випадку:

$$I_{амп} / I_{ном} = 793,063 / 83,981 = 9,443 > 8$$

Відповідно, використовується традиційне гальмування.

3) Визначення мінімального струму спрацювання виконується по

формулі:

$$I_{C3} > 1,1 \left( K_{nep} \cdot \varepsilon + \frac{\Delta U_{pez}}{1 - \Delta U_{pez}} + 0,02 \right), \quad (3.12)$$

де  $\varepsilon$  - похибка ГТ, приймається рівною 0,1 [1];

$K_{nep}$  - коефіцієнт, враховує перехідний режим, приймається рівним 1,0 [1];

$\Delta U_{pez}$  – діапазон регулювання пристрою РПН.

$$I_{C3} > 1,1 \left( 1,0 \cdot 0,1 + \frac{0,16}{1 - 0,16} + 0,02 \right) = 0,34$$

4) Визначення крутості першого нахилу ділянки гальмівної характеристики.

Крутизна першого похилу ділянки гальмівної характеристики визначається по формулі:

$$\frac{I_d}{I_t} = 1,1 \left( K_{nep} \cdot \varepsilon + \frac{\Delta U_{pez}}{1 - \Delta U_{pez}} + 0,02 \right), \quad (3.13)$$

$$\frac{I_d}{I_t} = 1,1 \left( 2,0 \cdot 0,1 + \frac{0,16}{1 - 0,16} + 0,02 \right) = 0,45$$

Приймаємо  $\frac{I_d}{I_t} = 45\%$

5) Визначення крутості другого похилого ділянки гальмівний характеристики  $\frac{I_d}{I_{t2}}$ . Значення  $\frac{I_d}{I_{t2}}$  по рекомендації виробника приймається

рівним 60-70%. Приймаємо до установки  $\frac{I_d}{I_t} = 65\%$

б) Визначення струму спрацьовування диференціальної відсічення.

1. Відбудова від кидка намагнічування.

Відбудова від кидка намагнічування виготовляється по формулі:

$$I_{d\max} \geq K_{vid} \cdot K_{TC}, \quad (3.14)$$

де  $K_{від}$  - коефіцієнт відбудови, дорівнює 1,4 для МУ РЗА [1].

$$I_{d\max} \geq 1,4 \cdot 3,739 = 5,235 \text{ А}$$

2. Відбудова від максимального значення зовнішнього короткого замикання.

Максимальне значення зовнішнього КЗ буде при 3-фазному пошкодженні на боці 10 кВ, значення якого визначається за формулі:

$$I_{d\max} \geq K_{від} \cdot K_{НБ} \cdot I_{кз.макс} , \quad (3.15)$$

де  $K_{від}$  - коефіцієнт відбудови, приймається рівним 1,2 для МУ РЗА;

$K_{НБ}$  - коефіцієнт небалансу, приймається рівним 0.7 для МУ РЗА;

$I_{кз.макс}$  - максимальне значення періодичної складової струму зовнішнього К.З., кА.

$$I_{d\max} \geq 1,2 \cdot 0,7 \cdot 2,855 = 2,398 \text{ кА}$$

7) Уставки блокувань по другій і п'ятій гармонікам.

Уставки приймаються згідно рекомендаціям виробника МУ РЗА:

$$\frac{I_{2f}}{I_{1f}} = 15\% \text{ - з поперечним блокуванням.}$$

$$\frac{I_{5f}}{I_{1f}} = 15\% \text{ - з пофазним блокуванням.}$$

### 3.2.2 Максимальна струмова захист від зовнішніх багатofазних КЗ

Струм спрацьовування захисту відбудовується від максимального робочого струму силового трансформатора по формулі[18]:

$$I_{сз} \geq \frac{K_H \cdot K_{сз}}{K_{п}} \cdot I_{НОМ.Т}, \quad (3.16)$$

де  $K_H$  - коефіцієнт надійності, прийнятий рівним 1,1 для МУ РЗА;

$K_{п}$  - коефіцієнт повернення приймаємо 0,935 для МУ РЗА [1];

$K_{сз}$  - коефіцієнт самозапуску навантаження, згідно з паспортом МУ РЗА.



Кратність струму самозапуску розраховується по формулі:

$$K_{I.C3} = \frac{I_{НОМ.Т}}{I_{К.МАХ}^3}, \quad (3.17)$$

$$K_{I.C3} = \frac{83,981}{2855} = 0,0294$$

По кривій залежності знаходимо  $K_{C3} = 1,16$  [1].

Розрахунковий струм спрацьовування захисту визначимо по формулі (3.18):

$$I_{C3} \geq \frac{1,1 \cdot 1,6}{0,935} \cdot 83,981 = 114,609 \text{ A}$$

Приймаємо струм спрацьовування захисту 114,61 А.

### 3.2.3 Струмовий захист від перевантажень

Захист виконано з допомогою МСЗ, встановленою зі сторони живлення.

Струм спрацьовування захисту визначається по формулі:

$$I_{C3} = \frac{K_H}{K_B} \cdot I_{НОМ.Т}, \quad (3.18)$$

$$I_{C3} = \frac{1,1}{0,935} \cdot 83,981 = 98,801 \text{ A}$$

Приймаємо струм спрацьовування захисту 98,8 А.

### 3.2.4 Газовий захист

Дія захисту заснована на тому, що всякі, навіть незначні, по- ушкодження, а також підвищені нагрівання всередині бака трансформатора визи- ють розкладання олії та органічної ізоляції, що супроводжується виділенням- ням газу [6]. Захист виконується на основі реле ВФ-80/Q.

## 3.3 Захист відходять ліній напругою 10 кВ

Захист ліній напругою 10 кВ виконується на сучасних мікропроцесорних терміналах РЗЛ-5.АЕ.

Захист від багатофазних КЗ.

Струмова відсікання виконується на мікропроцесорній базі. Струм

спрацювання відсічки визначається за формулі:

$$I_{C3} \geq K_{від} \cdot I_{НОМ.Т}, \quad (3.19)$$

де  $K_{від}$  – коефіцієнт відбудови, дорівнює 5,0 для МУ РЗА;

Струм спрацювання МСЗ вибираємо по формулі [17]:

$$I_{C3} \geq \frac{K_H \cdot K_{3С}}{K_B} \cdot I_{р.макс}, \quad (3.20)$$

де  $I_{р.макс}$  – максимальний робочий струм лінії, А.

Розрахунковий струм спрацювання реле визначається по виразу:

$$I_{CP} = I_{C3} \cdot \frac{k_{cx}}{n_T}, \quad (3.21)$$

де  $k_{cx} = 1$  – коефіцієнт схеми підключення ТС;

$n_T$  – коефіцієнт трансформації ТС.

Коефіцієнт чутливості захисту можна, можливо знайти по формулі:

$$k_{\chi} = \frac{I_K^{(2)}}{I_{C3}}, \quad (3.22)$$

де  $I_K^{(2)}$  – струм двофазного КЗ в кінці лінії, кА.

Захист від замикань на землю (ЗНЗ).

Струм спрацювання захисту визначається по формулі:

$$I_{C3} \geq k_{вд} \cdot k_K \cdot I_C, \quad (3.23)$$

де  $k_{вд}$  – коефіцієнт відбудови, приймається рівним 1,2 для МУ РЗА [1];

$k_K$  – коефіцієнт, враховує кидок власного ємнісного струму, приймається рівним 2,5 для МУ РЗА [1];

$I_C$  – власний ємнісний струм приєднання самого споживача  $I_{CD}$  та лінії, яка з'єднує його з РУ і ємнісний струм вхідна в зону дії захисту лінії  $I_{CL}$ .

Ємнісний струм приєднання визначається по формулі:

$$I_C = I_{CD} + I_{CL}, \quad (3.24)$$

Значенням  $I_{CD}$  зазвичай можна, можливо знехтувати. Тоді формула (3.24)

прийме вигляд:

$$I_C = I_{CI} + I_{CO} \cdot L \cdot m, \quad (3.25)$$

де  $I_{CO}$  - значення власного ємнісного струму 1 км кабелю, А/км;

$L$  – довжина лінії, км;

$m$  - число проводів в фазі лінії, шт.

Наведемо приклад розрахунку уставок РЗ фідерів 6 кВ для фідера 1. Токова відсікання, струм спрацьовування захисту, формулі (3.19):

$$I_{C3} \geq 5 \cdot 0,092 = 0,462 \text{ кА}$$

Струм спрацьовування МСЗ, по формулі (3.20):

$$I_{C3} \geq \frac{1,1 \cdot 1,18}{0,935} \cdot 184,8 = 256,546 \text{ А}$$

Струм спрацьовування реле МСЗ, по формулі (3.21):

$$I_{CP} = 256,546 \cdot \frac{1}{40} = 6,414 \text{ А}$$

Коефіцієнт чутливості захисту, формулі (3.22):

$$k_{\text{ч}} = \frac{1548}{256,546} = 6,0 \geq 1,5$$

Ємнісний струм приєднання, за формулі (3.23):

$$I_C = 1,0 \cdot 0,08 = 0,08 \text{ А}$$

Струм спрацьовування захисту від ЗНЗ, по формулі (3.24):

$$I_{C.3} \geq 1,2 \cdot 2,5 \cdot 0,08 = 0,24 \text{ А}$$

Приймаємо уставку захисту від ЗНЗ 0,25 А.

Для решти ліній 10 кВ розрахунки аналогічні та зведені в таблицю 3.2.

### Висновки по третьому розділу

Заміна зношеного та застарілого обладнання РЗА на сучасні мікропроцесорні термінали серії «РЗЛ-5.АЕ-ХХ» виробництва ТОВ

«Науково-виробниче підприємство «РЕЛСіС»» призведе до зниження ризику пошкодження обладнання ПС та інших найближчих елементів енергосистеми.

Таблиця 3.2 - Розрахунок уставок релейний захисту ліній 10 кВ

Фідери 10 кВ	$I_{ном}, \text{кА}$	$I_{сз} \text{ СВ}, \text{кА}$	$I_{макс}, \text{А}$	$I_{сз} \text{ МСЗ}, \text{А}$	$I_{ср} \text{ МСЗ}, \text{А}$	$K_{ч}(\text{МТЗ})$	$I_{с}, \text{А}$	$I_{сз} \text{ ЗНЗ}, \text{А}$
фідер 1	0,092	0,462	184,8	256,546	6,414	6,0	0,080	0,240
фідер 2	0,098	0,488	195,0	270,706	6,768	7,0	0,100	0,300
фідер 3	0,089	0,445	177,8	246,828	6,171	10,0	0,080	0,240
фідер 4	0,188	0,941	376,2	522,254	6,528	4,6	0,732	2,197
фідер 5	0,171	0,856	342,4	475,332	5,942	5,2	0,722	2,166
фідер 6	0,184	0,919	367,6	510,315	6,379	4,8	1,028	3,084
фідер 7	0,187	0,937	374,8	520,311	6,504	4,7	0,900	2,701
фідер 8	0,171	0,853	341,0	473,388	5,917	5,2	1,047	3,141
фідер 9	0,151	0,756	151,2	209,901	5,248	11,7	0,809	2,427
фідер 10	0,108	0,541	108,2	150,207	5,007	16,3	0,908	2,724

## ВИСНОВКИ

У ході виконання роботи проведено дослідження можливості модернізації релейний захисту і автоматики і часткової заміни обладнання ОРП 220 кВ електричної підстанції 220/10 кВ «Стрий» Західної енергосистеми.

У результаті роботи розроблені наступні питання:

- 1) Систематизовано та проаналізовано характеристики ПС, її діючої електричної схеми та діючої РЗА;
- 2) Наведено обґрунтування необхідності модернізації РЗА;
- 3) Здійснено розрахунок струмів короткого замикання, що впливають на вибір електроустаткування ОРП 220 кВ та уставок роботи РЗА, у ключових точках електричної мережі;
- 4) Вибрано сучасні пристрої релейного захисту та автоматики, розлічені уставки передбачених видів захистів;

На даний момент обладнання релейного захисту та автоматики ПС «Стрий» має критичний ступінь зносу та недостатні за сучасними вимоги техніко-експлуатаційні показники. Це викликає хибні спрацювання захистів і аварійні ситуації, що супроводжується недовідпусткою електроенергії споживачам та відключенням інших елементів електроенергетичної системи.

Заміна зношеного та застарілого обладнання РЗА на сучасні мікропроцесорні термінали серії «РЗЛ-5.АЕ-ХХ» виробництва ТОВ «Науково-виробниче підприємство «РЕЛСіС» призведе до зниження ризику пошкодження обладнання ПС та інших найближчих елементів енергосистеми.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2013. – 533 с
2. Апарати релейного захисту. Режим доступу: <http://images.google.ua>
3. Литвиненко, А.А. Системи захисту трансформаторів. Мікропроцесорний захист силових понижаючих трансформаторів / А.А. Литвиненко. — Текст: // Молодий вчений. — 2018. — № 8 (194). — С. 19-21.
4. Все про релейний захист. <https://rza.org.ua/search/r-201894.html>
5. Офіційний сайт «Шнайдер Електрик Україна». <https://schneider.net.ua/uk/>
6. Посилання на мікропроцесори Seram компанії Schneider Electric. <https://www.se.com/ua/ru/product-category/4700>
7. Віртуальне представництво НВП «ЕКРА». <https://b2bingo.com/uk/page/inn2126001172/publications>
8. Механотроніка. Інтелектуальні пристрої релейного захисту. <https://www.mtrele.ua/shop/relejnaya-zashhita/bmrz/bm>
9. Офіційний сайт ВО «Укрспецкомплект». [http://usk.ua/about\\_us.html](http://usk.ua/about_us.html)
10. Аржанніков Б.А., Набойченко І.О., Ушаков А.Г., Фролов Л.А. Комплектна трансформаторна підстанція з однофазним трансформатором з литою ізоляцією. УрДУПС, Єкатеринбург. - 2006.
11. Александров, А.М. Дифференциальная защита трансформаторов: Учебник / А.М. Александров. – СПб: ПЕИПК, 2007. – 222 с.
12. Електрична частина станцій та підстанцій: курс лекцій [Електронний ресурс]: /уклад.: О.В. Остапчук, П.Л. Денисюк, Ю.П. Матеєнко / КПІ ім. Ігоря Сікорського, – Електронні текстові дані (1 файл: 4,62 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 183 с.
13. <https://relsis.ua/ua/products/relay-protection-automation/rzl-05/rzl-05m>
14. ПУЕ Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання)/ Наказ від 1.07.2017 № 476 Про затвердження Правил улаштування електроустановок

15. Ачкасов А.Є., Лушкін В.А., Охріменко В.М., Кузнецов А.І., Чернявська М.В., Воронкова Т.Б. Електротехніка у будівництві: Навчальний посібник. — Харків: ХНАМГ, 2009—363 с
16. Обладнання електричних підстанцій і ліній електропередачі. <http://ukrelektrik.com/oborudovanie>
17. Козлов В. Д. Електричні апарати. Вимірювальні, контрольні та захисні апарати : посібник / В. Д. Козлов, С. В. Єнчев. – К. : НАУ, 2007. – 72 с
18. І.Ю. Литвин. Електричні апарати. Курс лекцій для студ. напряму 80252923 “Електротехніка і електротехнології” денної та заочної форм навчання. – К.: НУХТ, 2232 – 88с.
19. Кирик В.В., Абдулаєв С.А. Визначення оптимальних місць встановлення ОПН // Міжнародний науково-технічний журнал молодих вчених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики». – 2016. – С. 104-106. 25. Бардик, Є.І. Електрична частина станцій та підстанцій. Основне електрообладнання/ Є.І. Бардик, М.П. Лукаш / К.: "Політехніка" НТУУ "КПІ" 2012. 250 с.
20. Офіційний партнер компанії АВВ. <https://abbua.com.ua/>
21. Дмитренко О. О. Розрахунок параметрів спрацювання захистів за струмом електричних мереж 6–35 кВ: Методичні вказівки. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2014. - 49 с.
22. Оробчук Б., Іванків А. Адаптивна система керування режимами електропостачання. Актуальні питання розвитку агропромислового комплексу. ВП НУБІП України «Бережанський агротехнічний інститут». - Бережани, 2016 р
23. М.С. Сегеда «Електричні мережі та системи». Підручник - Львів. Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2007.
24. Релейний захист і автоматика в системах електропостачання [Текст] : навч. посібник для студ. електротехнічних спец. вищ. навч. закладів України / П. П. Говоров [та ін.] ; Харківська держ. академія міського господарства. — К. : [б.в.], 1996. — 228 с.

25. <https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2020/03/napl%D1%91kov-zhygalov-2020.pdf>

26. Рой В. Ф. Системи діагностування, контролю, керування та захисту електроенергетичних установок і комплексів : конспект лекцій для аспірантів першого року навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / В. Ф. Рой, Ю. П. Кравченко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 128 с.

27. Дар К.Е. Статистические данные по аварийности энергетического оборудования распределительных устройств 220 кв и выше / К.Е. Дар, В.Н. Таран // Вісники НТУ ХП. – 2010. – Вісник № 45. – С. 111-115.