

Міністерство освіти і науки України  
Криворізький національний університет  
Електротехнічний факультет

## **ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до кваліфікаційної роботи бакалавра

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Удосконалення системи релейного захисту трансформатора  
ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» ДТЕК «Дніпровські електромережі»

Здобувач групи ЗЕЕМ-22 \_\_\_\_\_ Роман ЦИВІНСЬКИЙ

Керівник випускної роботи \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. Олександр ІЛЬЧЕНКО

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. Олександр ІЛЬЧЕНКО

Декан ЕТФ \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг

2026

Факультет: *електротехнічний*

Освітній рівень: *бакалавр*

Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**  
**ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**  
Цивінського Романа Сергійовича

1. Тема роботи: Удосконалення системи релейного захисту трансформатора ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» ДТЕК «Дніпровські електромережі»

2. Строк подання здобувачем роботи: 10 червня 2026 р.

3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: полягає у забезпеченні надійного, ефективного та безпечного електропостачання промислових, міських та транспортних споживачів підстанції «ЮГОК-1 150/6 кВ» шляхом впровадження сучасної цифрової релейної захисту

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити): аналіз характеристика підстанції «ЮГОК-1 150/6 кВ» ДТЕК «Дніпровські електромережі»; прорахунок та вибір устаткування електричної частини підстанції «ЮГОК-1 150/6 кВ»; удосконалення релейного захисту трансформатора з розщепленою обмоткою підстанції «ЮГОК-1 150/6 кВ»

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): схема електрична принципова ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ»; схема заміщення для розрахунку струмів короткого замикання; принципові схеми релейного захисту трансформатора на базі мікропроцесорних терміналів

## 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Консультант        | Дата, підпис   |                  |
|--------|--------------------|----------------|------------------|
|        |                    | Завдання видав | Завдання прийняв |
| I      | Олександр ІЛЬЧЕНКО |                |                  |
| II     | Олександр ІЛЬЧЕНКО |                |                  |
| III    | Олександр ІЛЬЧЕНКО |                |                  |

## 7. Календарний план

| № | Етапи роботи                      | Термін виконання  |
|---|-----------------------------------|-------------------|
| 1 | Загальна частина                  | 18.05.26–22.05.26 |
| 2 | Спеціальна частина                | 23.05.26–30.05.26 |
| 3 | Проектно-конструкторська розробка | 31.05.26–07.06.26 |
| 4 | Оформлення пояснювальної записки  | 08.06.26–10.06.26 |
| 5 | Оформлення презентації            | 11.06.26–16.06.26 |
|   |                                   |                   |
|   |                                   |                   |
|   |                                   |                   |
|   |                                   |                   |
|   |                                   |                   |
|   |                                   |                   |
|   |                                   |                   |
|   |                                   |                   |

Дата видачі завдання: 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_

Роман ЦИВІНСЬКИЙ

Керівник роботи \_\_\_\_\_

Олександр ІЛЬЧЕНКО

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Удосконалення системи релейного захисту трансформатора ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» ДТЕК «Дніпровські електромережі» містить 60 с., 10 рис., 8 табл., 12 літературних джерел.

У роботі проведено комплексне технічне обґрунтування та проектування електричної частини підстанції «ЮГОК-1 150/6 кВ» АТ «ДТЕК Дніпровські електромережі» з урахуванням зміни структури споживання (закриття агрофабрики та перспектива будівництва фабрики огрудкування) та необхідності модернізації застарілої системи захисту. Мета полягає у забезпеченні надійного, ефективного та безпечного електропостачання промислових, міських та транспортних споживачів шляхом оптимізації схеми живлення, вибору основного устаткування та впровадження сучасної цифрової релейної захисту.

У роботі використано метод коефіцієнта попиту для визначення розрахункових навантажень, виконано аналіз струмів короткого замикання в характерних точках мережі, проведено вибір та перевірку вимикачів, роз'єднувачів, трансформаторів струму і напруги, ізоляторів та збірних шин за умовами термічної й електродинамічної стійкості. Обґрунтовано доцільність встановлення комплектних конденсаторних установок, що дозволило підвищити коефіцієнт потужності до нормативного значення, розвантажуючи трансформаторне обладнання та збільшуючи пропускну здатність кабелів.

Розроблено багаторівневу схему релейного захисту трансформатора ТРДН-63000/150/6 з розщепленою обмоткою на базі SIPROTEC 5 7UT86, адаптовану до умов полуторної схеми комутації 150 кВ. Виконано повний розрахунок уставок диференційного захисту. Запропоновані рішення усувають критичні недоліки чинної електромеханічної захисту типу ДЗТ-11, забезпечують миттєву селективну локалізацію внутрішніх пошкоджень, стійкість до перехідних процесів та можливості інтеграції в системи автоматизованого диспетчерського керування.

**Ключові слова:** підстанція 150/6 кВ, трансформатор із розщепленою обмоткою, релейний захист, компенсація реактивної потужності, струми короткого замикання, цифровий термінал, SIPROTEC 5, полуторна схема.

|     |      |          |       |      |                             |      |
|-----|------|----------|-------|------|-----------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.Р | Арк. |
|     |      |          |       |      |                             | 4    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                             |      |

## ЗМІСТ

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Розділ 1. Характеристика підстанції «ЮГОК-1 150/6 кВ» та аналіз релейного захисту встановлених трансформаторів .....  | 9  |
| 1.1 Характеристика ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» АТ «ДТЕК Дніпровські електромережі» .....                                     | 10 |
| 1.2 Особливості споживачів ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» .....                                                                 | 12 |
| 1.3 Особливості використання трансформаторів з розщепленою обмоткою на підстанціях .....                              | 13 |
| 1.4 Особливості систем релейного захисту трансформаторів з розщепленою обмоткою .....                                 | 15 |
| 1.5 Особливості наявної на ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» системи релейного захисту трансформатора з розщепленою обмоткою ..... | 17 |
| Висновки до розділу .....                                                                                             | 22 |
| Розділ 2. Прорахунок та вибір устаткування електричної частини підстанції «ЮГОК-1 150/6 кВ».....                      | 23 |
| 2.1 Електроспоживачі ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ».....                                                                        | 24 |
| 2.2 Прорахунок електричних навантажень з вибором силових трансформаторів .....                                        | 25 |
| 2.3 Вибір конструктивного виконання схеми електропостачання.....                                                      | 27 |
| 2.4 Розрахунок струмів короткого замикання .....                                                                      | 29 |
| 2.5 Вибір електроустаткування підстанції «ЮГОК-1 150/6 кВ».....                                                       | 34 |
| 2.5.1 Вибір роз'єднувачів ЗРП і ВРП .....                                                                             | 34 |
| 2.5.2 Вибір вимикачів ЗРП і ВРП .....                                                                                 | 35 |
| 2.5.3 Вибір трансформаторів струму ЗРП і ВРП .....                                                                    | 36 |
| 2.5.4 Вибір трансформаторів напруги ЗРП і ВРП.....                                                                    | 38 |
| 2.5.5 Вибір опорних ізоляторів .....                                                                                  | 39 |
| 2.5.6 Вибір прохідних ізоляторів.....                                                                                 | 39 |

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.3М | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 5    |

|                                                                                                           |                                                                                      |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5.7                                                                                                     | Вибір шини збірних на стороні 6 кВ.....                                              | 39 |
| 2.6                                                                                                       | Компенсація реактивних навантажень.....                                              | 41 |
|                                                                                                           | Висновки до розділу .....                                                            | 42 |
| Розділ 3. Удосконалення релейного захисту трансформатора з розщепленою обмоткою ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ»..... |                                                                                      | 44 |
| 3.1                                                                                                       | Загальний огляд системи релейного захисту трансформатора з розщепленою обмоткою..... | 45 |
| 3.2                                                                                                       | Вибір схеми захисту трансформатора підстанції ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ»                   | 47 |
| 3.3                                                                                                       | Прорахунок уставок релейного захисту трансформатора SIPROTEC 5 7UT86 .....           | 51 |
|                                                                                                           | Висновки до розділу .....                                                            | 56 |

/

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.3М | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 6    |

## ВСТУП

Актуальність модернізації релейного захисту трансформатора з розщепленою обмоткою зумовлена сучасними вимогами до надійності, селективності та швидкодії систем електропостачання, особливо в умовах зростання навантажень і ускладнення режимів роботи електричних мереж. Такі трансформатори широко застосовуються на промислових підприємствах, де навіть короточасні порушення електропостачання можуть призводити до значних економічних втрат, аварій технологічного обладнання та зниження безпеки виробництва, тому забезпечення їх ефективного захисту є критично важливим завданням.

Особливості конструкції трансформаторів з розщепленою обмоткою, зокрема наявність паралельних гілок та внутрішніх електромагнітних зв'язків між ними, створюють складні умови для виявлення пошкоджень, оскільки аварійні режими можуть супроводжуватися незначними змінами струмів, які важко відрізнити від нормальних робочих відхилень. Традиційні системи релейного захисту, що базуються на електромеханічних або застарілих мікропроцесорних пристроях, часто не забезпечують необхідної чутливості до таких пошкоджень, зокрема міжвиткових замикань або несиметрій між гілками, що може призводити до їхнього пізнього виявлення і розвитку аварії.

Зростання рівнів струмів короткого замикання в сучасних електромережах також підвищує вимоги до швидкодії захисту, оскільки затримка у відключенні пошкодженого обладнання призводить до значних термічних і електродинамічних навантажень на трансформатор. У випадку розщеплених обмоток ці навантаження можуть розподілятися нерівномірно між гілками, що підвищує ризик локальних пошкоджень і ускладнює їх діагностику без сучасних засобів контролю.

Модернізація релейного захисту передбачає впровадження цифрових терміналів, які забезпечують більш точне вимірювання електричних параметрів, адаптивне налаштування характеристик захисту та можливість реалізації складних алгоритмів, зокрема диференційного захисту з урахуванням розщеплення обмоток, контролю дисбалансу струмів та аналізу гармонічного

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.ВС | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 7    |

складу сигналів. Це дозволяє значно підвищити чутливість до внутрішніх пошкоджень і водночас уникнути помилкових спрацювань при зовнішніх коротких замиканнях або перехідних процесах.

Додатковим фактором актуальності є необхідність інтеграції систем релейного захисту в сучасні автоматизовані системи керування електропостачанням, що забезпечує дистанційний моніторинг стану трансформатора, реєстрацію аварійних подій та аналіз режимів роботи в реальному часі. Це особливо важливо для підприємств з безперервним циклом виробництва, де оперативне прийняття рішень має вирішальне значення для запобігання аваріям.

Таким чином, модернізація релейного захисту трансформаторів з розщепленою обмоткою є необхідною умовою підвищення надійності та безпеки електропостачання, зменшення ризиків пошкодження дорогого обладнання та забезпечення ефективної роботи енергосистем у сучасних умовах зростаючих технічних і експлуатаційних вимог.

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.ВС | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 8    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

**Розділ 1. Характеристика підстанції «ЮГОК-1  
150/6 кВ» та аналіз релейного захисту  
встановлених трансформаторів**

|          |      |                 |       |      |                                                                                               |         |       |         |
|----------|------|-----------------|-------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------|---------|
|          |      |                 |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.3Ч                                                                  |         |       |         |
|          |      |                 |       |      |                                                                                               |         |       |         |
| Зм.      | Арк. | № докум.        | Підп. | Дата | Характеристика підстанції «ЮГОК-1<br>150/6 кВ» та аналіз релейного захисту<br>трансформаторів | Літ.    | Аркуш | Аркушів |
| Розроб.  |      | Цивінський Р.С. |       |      |                                                                                               | Н       | 9     |         |
| Перевір. |      | Ільченко О.В.   |       |      |                                                                                               | ЗЕЕМ-22 |       |         |
|          |      |                 |       |      |                                                                                               |         |       |         |
| Н.контр. |      | Ільченко О.В.   |       |      |                                                                                               |         |       |         |
| Затверд. |      | Пересунько І.І. |       |      |                                                                                               |         |       |         |

## **1.1 Характеристика ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» АТ «ДТЕК Дніпровські електромережі»**

Підстанція ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ», що належить АТ «ДТЕК Дніпровські електромережі» є ключовим вузлом електропостачання промислового та міського навантаження в районі діяльності Південного гірничо-збагачувального комбінату у місті Кривий Ріг і виконує функції прийому електричної енергії високої напруги 150 кВ з магістральних мереж, її трансформації до рівня 6 кВ та подальшого розподілу між численними споживачами різного характеру. За своїм призначенням підстанція є понижувальною та розподільчою, причому її структура сформована таким чином, щоб забезпечити високу надійність живлення як промислових агрегатів комбінату, так і міської інфраструктури та транспорту.

Особливістю підстанції є наявність шинопроводів, що підключені до розподільчих об'єктів РЗФ-1 та РЗФ-2 АТ «ПівдГЗК». Шинопровід 1, пов'язаний із РЗФ-1, та шинопровід 2, що живить РЗФ-2, забезпечують передачу значних потужностей безпосередньо до основних виробничих споживачів, мінімізуючи втрати та підвищуючи ефективність енергопостачання. Така організація дозволяє розділяти технологічні потоки та створює умови для резервування живлення у випадку аварій або проведення ремонтних робіт. Відзначимо, що від ПС «ЮГОК-1» живиться тільки частина секцій РЗФ.

Окремими фідерами живиться пульпонасосна станція АТ «ПівдГЗК» та насоси оборотної води РЗФ.

Інша система шин напругою 6 кВ підстанції організована з урахуванням поділу навантажень за технологічними та територіальними ознаками, що дозволяє гнучко керувати режимами роботи та підвищує живучість схеми у разі аварійних ситуацій. Від підстанції відходять численні фідери, які забезпечують електропостачання різних категорій споживачів. Частина фідерів, орієнтована на живлення міської електричної мережі, забезпечуючи енергопостачання житлових районів, комунальних об'єктів та інфраструктури.

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.34 | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 10   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

Окремі лінії, призначені для живлення швидкісного трамваю, що є важливим елементом транспортної системи міста, тоді як інший фідер забезпечує електропостачання міського трамваю, формуючи стабільну основу для функціонування електротранспорту.

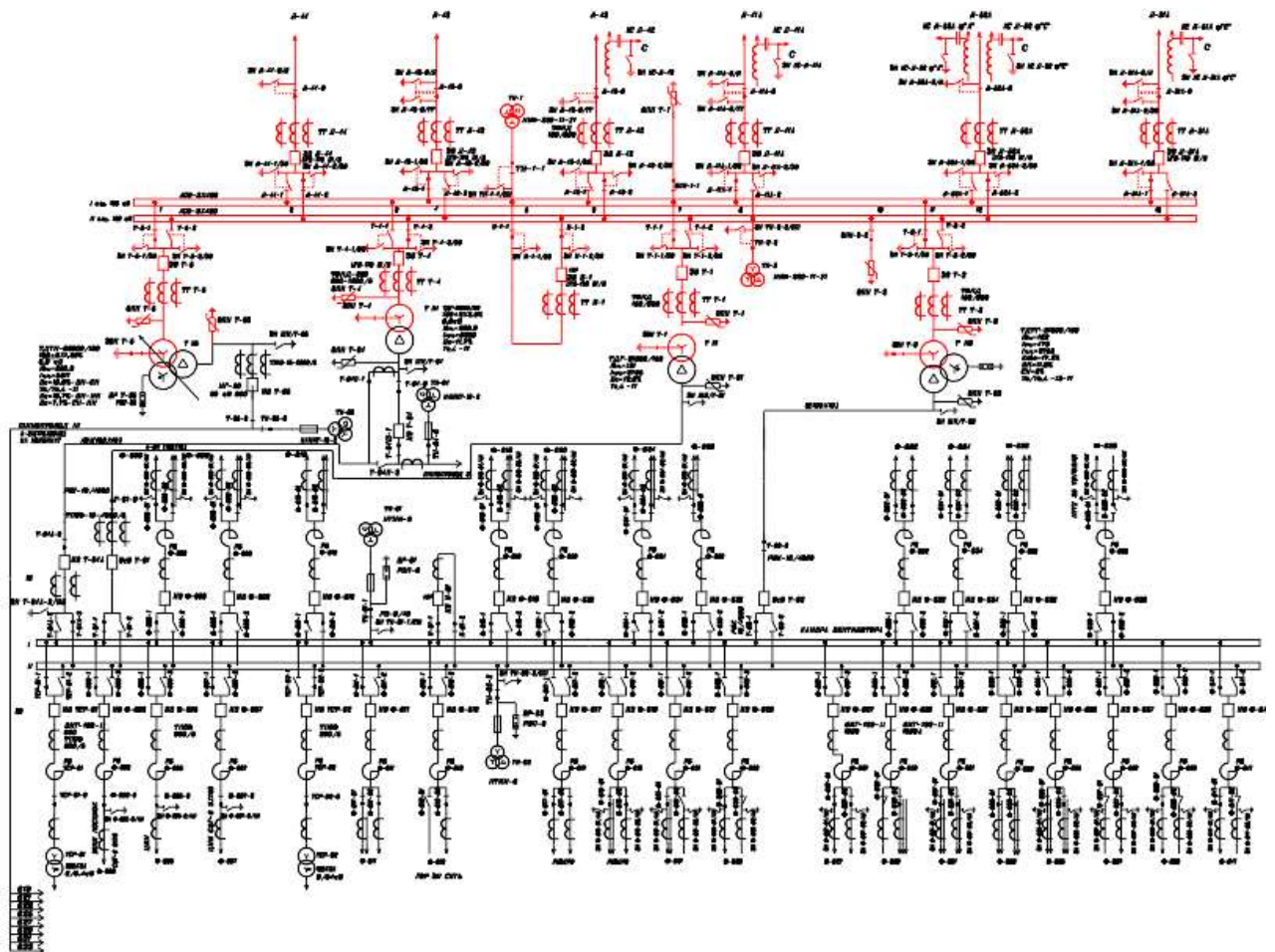


Рисунок 1.1 – Однолінійна схема ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» станом на 2007 р.

Окрім цього, значна кількість фідерів призначена для живлення невеликих підстанцій, що, у свою чергу, розподіляють електроенергію між окремими фабриками, виробничими цехами та допоміжними об'єктами підприємства. Така багаторівнева система електропостачання дозволяє оптимально розподіляти навантаження та забезпечувати необхідну якість електроенергії для різних технологічних процесів.

Загалом підстанція ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» характеризується складною розгалуженою структурою, орієнтованою на одночасне забезпечення потреб важкої промисловості, транспорту та міської інфраструктури. Вона працює в

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.34 | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 11   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

умовах змінного навантаження, що зумовлено циклічністю виробничих процесів гірничо-збагачувального комбінату, і тому вимагає високого рівня автоматизації, надійного релейного захисту та ефективної системи оперативного керування режимами. Завдяки цьому підстанція виконує роль стратегічного енергетичного центру, від якого залежить безперебійність виробництва та стабільність електропостачання значної частини міста і промислового району.

## 1.2 Особливості споживачів ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ»

Споживачі електроенергії підстанції характеризуються різноманітністю режимів роботи, рівнем відповідальності та вимогами до якості електропостачання. Пульпонасосна станція належить до енергоємних споживачів безперервної дії, робота яких пов'язана з транспортуванням пульпи на значні відстані, тому для неї характерні значні пускові струми, тривалі навантаження з незначними коливаннями та підвищені вимоги до надійності живлення, оскільки зупинка насосів може призвести до порушення технологічного процесу та аварійних ситуацій. Рудозбагачувальна фабрика є складним комплексом із великою кількістю електроприводів різної потужності, що працюють у змінних та часто несиметричних режимах, із наявністю як безперервних, так і циклічних процесів, що обумовлює значні коливання навантаження, підвищений рівень реактивної потужності та чутливість до якості напруги, особливо в частині провалів і гармонік.

Швидкісний трамвай характеризується динамічним і різкозмінним характером споживання електроенергії, що пов'язано з частими пусками, розгонами та гальмуваннями рухомого складу, можливою наявністю рекуперативного гальмування та значним впливом на якість електроенергії в мережі, включаючи імпульсні навантаження та гармонічні спотворення, при цьому він належить до споживачів підвищеної надійності через соціальну значущість. Міський трамвай має подібні електротехнічні характеристики, проте працює в більш щільному графіку з частішими зупинками та меншими швидкостями, що зумовлює ще більш виражену циклічність навантаження,

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.34 | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 12   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

нерівномірність споживання та підвищені вимоги до стабільності напруги, оскільки відхилення можуть впливати на роботу тягових підстанцій і рухомого складу, при цьому також висуваються високі вимоги до безперервності електропостачання.

### 1.3 Особливості використання трансформаторів з розщепленою обмоткою на підстанціях

Основним силовим агрегатом ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» є трансформатор з розщепленою вторинною обмоткою, котрий провадить трансформацію одразу з напруги 150 кВ до напруги 6(10) кВ без проміжної ступені 35 кВ.

Трансформатори з розщепленою обмоткою являють собою спеціальний різновид силових трансформаторів, у яких одна з обмоток, найчастіше вторинна, поділяється на дві або більше паралельних гілок, що мають однакові електричні параметри і розташовуються на одному магнітопроводі. Така конструкція застосовується переважно в системах електропостачання з підвищеними вимогами до надійності, гнучкості роботи та обмеження струмів короткого замикання, особливо в промислових мережах великих підприємств, зокрема металургійних комбінатів або гірничодобувних комплексів.

Схема заміщення триобмоткового трансформатора з розщепленою вторинною обмоткою показана на рис. 1.1.

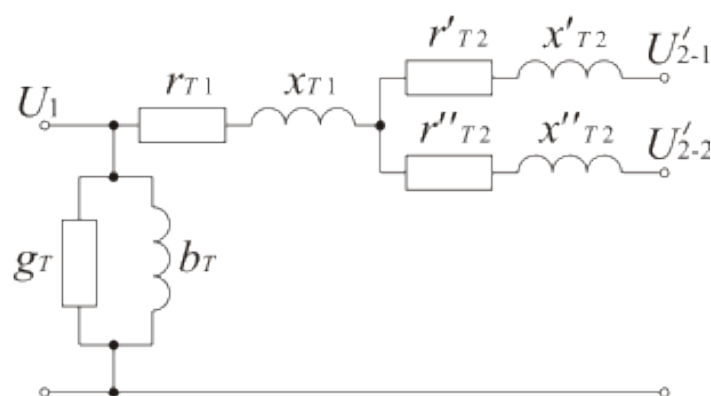


Рисунок 1.2 – Схема заміщення трансформатора з розщепленою вторинною обмоткою

Головною особливістю цих трансформаторів є те, що розщеплення обмотки дозволяє підключати навантаження до кожної гілки окремо, при цьому

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.3Ч | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 13   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

електричний зв'язок між гілками зберігається через спільний магнітний потік. Це означає, що за нормальних умов обидві гілки працюють синхронно, розподіляючи навантаження між собою приблизно рівномірно, однак при несиметрії навантаження або пошкодженні однієї з гілок виникають циркуляційні струми, які можуть призводити до додаткових втрат і локальних перегрівів. Саме тому при проектуванні таких трансформаторів особлива увага приділяється точності симетрії параметрів гілок, включаючи їхній опір, індуктивність і розташування відносно магнітопроводу.

Ще однією важливою особливістю є підвищений рівень електромагнітних взаємодій між гілками розщепленої обмотки. Оскільки вони знаходяться в одному магнітному полі, будь-які зміни струму в одній гілці безпосередньо впливають на іншу. Це проявляється у вигляді взаємної індукції, яка може як покращувати рівномірність розподілу навантаження, так і ускладнювати режими роботи при аваріях. Наприклад, при короткому замиканні в одній гілці друга гілка також зазнає впливу, що призводить до складних перехідних процесів і потребує більш чутливих і селективних систем релейного захисту.

З точки зору експлуатації, трансформатори з розщепленою обмоткою дозволяють реалізувати живлення кількох незалежних споживачів від одного джерела без встановлення окремих трансформаторів. Це значно знижує капітальні витрати і підвищує компактність підстанцій, однак водночас ускладнює схеми керування і захисту. У разі пошкодження однієї з гілок часто виникає можливість часткового збереження роботи трансформатора за рахунок відключення лише пошкодженої частини, що підвищує надійність електропостачання відповідальних споживачів.

Важливою характеристикою таких трансформаторів є їхній вплив на рівень струмів короткого замикання в мережі. Розщеплення обмотки призводить до збільшення еквівалентного опору між окремими приєднаннями, що дозволяє обмежувати струми короткого замикання без використання додаткових реакторів. Це особливо важливо для мереж з великою кількістю потужних електроприймачів, де надмірні струми КЗ можуть перевищувати допустимі значення для комутаційної апаратури.

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.34 | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 14   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

Разом з тим конструкція таких трансформаторів є більш складною з технологічної точки зору, оскільки вимагає точного виконання намотування і ізоляції кожної гілки, а також забезпечення однакових умов охолодження. Нерівномірність охолодження може призводити до різниці температур між гілками, що, у свою чергу, викликає нерівномірність їх електричних параметрів і додаткові втрати. Тому системи охолодження таких трансформаторів проектуються з урахуванням рівномірного тепловідведення для всіх частин обмотки.

Особливу увагу приділяють режимам несиметричного навантаження, які для трансформаторів з розщепленою обмоткою є більш критичними, ніж для звичайних. Навіть незначна різниця струмів між гілками може викликати появу внутрішніх циркуляційних струмів, що не беруть участі у корисній передачі енергії, але спричиняють додаткові втрати і нагрівання. У зв'язку з цим часто застосовуються спеціальні засоби контролю і балансування навантаження.

Таким чином, трансформатори з розщепленою обмоткою характеризуються поєднанням високої функціональної гнучкості, можливості обмеження струмів короткого замикання та підвищеної надійності електропостачання, але водночас потребують більш складного підходу до проектування, експлуатації та релейного захисту через наявність внутрішніх електромагнітних зв'язків і підвищену чутливість до несиметричних режимів роботи.

#### **1.4 Особливості систем релейного захисту трансформаторів з розщепленою обмоткою**

Релейний захист трансформатора з розщепленою обмоткою має складнішу структуру порівняно зі звичайними силовими трансформаторами, оскільки така конструкція передбачає наявність двох або більше паралельних гілок вторинної (або первинної) обмотки, що працюють спільно або роздільно. Це обумовлює необхідність контролю не лише міжфазних та внутрішніх пошкоджень, але й несиметрії між гілками розщепленої обмотки.

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.3Ч | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 15   |

Основним видом захисту є диференційний струмовий захист трансформатора, який реагує на внутрішні короткі замикання в обмотках, включаючи міжвиткові пошкодження та замикання між гілками розщепленої обмотки. У випадку трансформатора з розщепленою обмоткою диференційний захист виконується з урахуванням окремого вимірювання струмів у кожній гілці, що дозволяє виявляти локальні пошкодження навіть при незначних відхиленнях струмів.

Важливу роль відіграє поздовжній диференційний захист гілок розщепленої обмотки, який спеціально призначений для виявлення внутрішніх пошкоджень між паралельними вітками однієї фази. Такий захист реагує на різницю струмів між гілками і дозволяє швидко відключити трансформатор при виникненні міжвиткових або міжгілкових коротких замикань.

Максимальний струмовий захист використовується як резервний і реагує на зовнішні короткі замикання або перевантаження, коли основний диференційний захист не спрацював. Він може бути виконаний із витримкою часу для забезпечення селективності з іншими елементами мережі.

Газовий захист (типу реле Бухгольца) застосовується для трансформаторів з масляним охолодженням і дозволяє виявляти внутрішні пошкодження, що супроводжуються виділенням газу або рухом масла, зокрема міжвиткові замикання, пробої ізоляції та локальні перегріву.

Захист від перевантаження реалізується на основі теплових моделей трансформатора і забезпечує відключення або сигналізацію при тривалому перевищенні допустимого струму, що може призвести до перегріву обмоток, у тому числі розщеплених гілок.

Захист від замикань на землю (нульової послідовності) застосовується для виявлення однофазних пошкоджень, особливо у мережах із заземленою нейтраллю. У трансформаторах з розщепленою обмоткою цей захист може бути організований як для всієї обмотки, так і окремо для її гілок.

Також може застосовуватися струмовий захист від несиметрії або дисбалансу між гілками розщепленої обмотки, який дозволяє виявляти нерівномірний розподіл навантаження або часткові пошкодження, що не

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.34 | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 16   |

викликають значних струмів короткого замикання, але призводять до небезпечних режимів роботи.

Додатково використовуються захисти від перенапруг (наприклад, обмежувачі перенапруг у поєднанні з релейним контролем), а також дистанційний або резервний захист з боку мережі, що забезпечує відключення трансформатора при аваріях поза його межами.

Таким чином, система релейного захисту трансформатора з розщепленою обмоткою є багаторівневою і включає як основні швидкодіючі захисти внутрішніх пошкоджень, так і резервні та допоміжні функції, що забезпечують надійну та селективну роботу обладнання в різних аварійних режимах.

### **1.5 Особливості наявної на ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» системи релейного захисту трансформатора з розщепленою обмоткою**

На ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» захист трансформаторів виконаний на базі реле ДЗТ-11.

Реле серії ДЗТ-11 – це спеціальне реле для диференційного захисту трансформатора, яке оснащено однією гальмівною обмоткою, інтегрованою у коло трансформатора струму, що дозволяє формувати гальмівний вплив на основі сигналу від одного вимірювального комплексу або від сумарного струму групи трансформаторів струму (ТС). Крива спрацьовування пристрою  $F_{роб} = f(F_{гальм})$  за умови дії гальмування не є однозначною, оскільки її поведінка безпосередньо залежить від фазового зсуву між векторами робочого та гальмівного струмів, що проходять через ТС. Наявність гальмівної обмотки унеможливорює потребу відбудовувати мінімальний поріг спрацьовування захисту від струмів небалансу під час зовнішніх пошкоджень, де гальмування активне, адже саме ця функція гарантує утримання пристрою від хибного відпрацювання в таких режимах. Завдяки цьому загальна чутливість захисної системи значно підвищується [7, 8].

Принципова схема релейного захисту трансформатора з розщепленою обмоткою показана на рис. 1.2.

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.34 | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 17   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

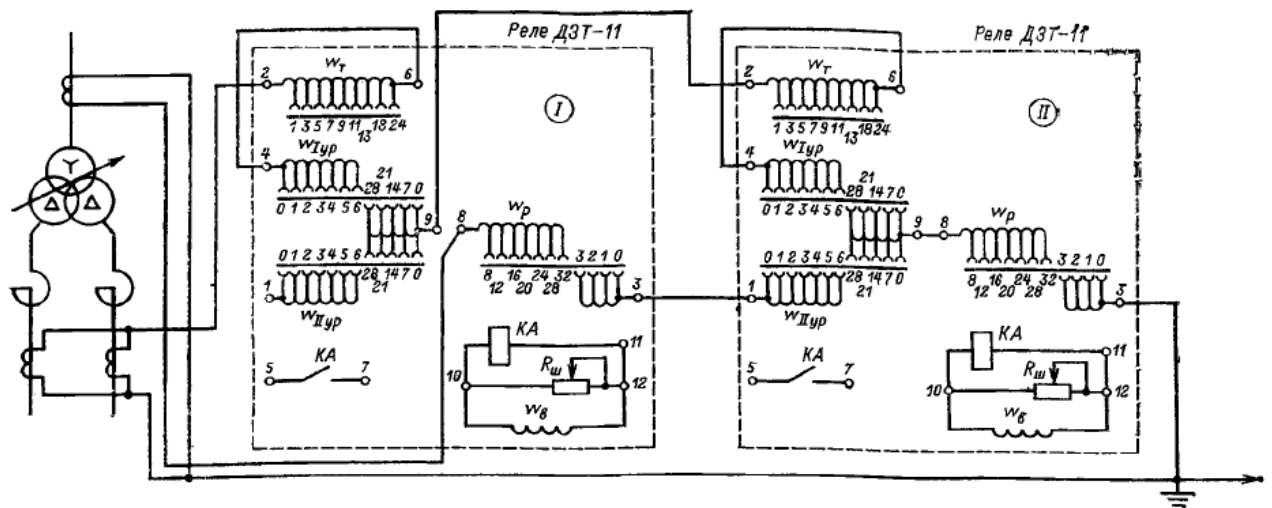


Рисунок 1.3 – Диференціальний захист трансформатора на реле ДЗТ-11 [8]

Коли зовнішнє коротке замикання не активує гальмівний ланцюг (наприклад, через відключення ділянки мережі з відповідною обмоткою вимірювального трансформатора) або відбувається подача напруги на агрегат без підключеного споживача, спрацювання захисного пристрою блокується шляхом коректного встановлення порогового значення  $I_{c.3 \min}$ . Цей параметр визначається двома критеріями. По-перше, він має перекривати максимальний прогнозований струм небалансу  $I_{c.3} \geq k_{\text{відб}} I_{\text{неб розр}}$ , який генерується під час перехідних процесів зовнішніх аварій; із  $k_{\text{відб}} = 1,5$ . По-друге, необхідно врахувати пусковий намагнічувальний струм, що формується при первинній комутації трансформатора  $I_{c.3} \geq k k_{\text{виг}} I_{\text{ном}}$ , де коригувальний коефіцієнт  $k$  зазвичай беруть у межах 1,2–1,5, хоча за технічної доцільності його дозволяється зменшувати згідно з вимогами. Такі завищені множники зумовлені відсутністю короткозамкненої котушки в колі вимірювального ТС, що погіршує стійкість системи до перехідних струмових кидків і вимагає додаткового запасу надійності [7, 8].

Порогове значення струму на первинній стороні, що визначає мінімальну межу спрацювання захисного пристрою для запобігання хибному відпрацюванню під час пускових намагнічувальних кидків у момент подачі напруги на агрегат, який працює в холостому режимі, допускає корекцію в бік

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.34 | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 18   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

зменшення. Така оптимізація реалізується шляхом індивідуального розрахунку відповідного коригувального множника  $k$ , котрий підбирається з урахуванням особливостей конкретного енергооб'єкта та фактичних умов його комутації.

Кількість витків у робочих котушках вимірювального трансформатора реле ( $w_{осн}, w_{I_{розр}}, w_{I_{прозр}}$ ), що корелює з пороговим струмом спрацювання  $I_{с.з\ min}$ , обчислюється із застосуванням виразів [7, 8]:

$$\begin{aligned} w_{осн} &= \frac{F_{с\ з\ розр}}{I_{с\ з\ осн}}; \\ w_{I_{розр}} &= w_{осн} \frac{I_{осн\ в}}{I_{I\ в}}; \\ w_{I_{прозр}} &= w_{осн} \frac{I_{осн\ в}}{I_{II\ в}}, \end{aligned} \quad (1.1)$$

де  $F_{с\ з\ розр}$  – магніторушійна сила спрацювання;  $I_{с\ з\ осн}$  – струм спрацювання основного боку;  $I_{осн\ в}, I_{I\ в}, I_{II\ в}$  – вторинні струми основного і неосновних боків.

Визначення оптимального місця підключення гальмівної обмотки до ТС певної сторони має базуватися на прагненні досягти максимальної чутливості системи, що реалізується через поєднання двох критеріїв: забезпечення найнижчого можливого рівня  $I_{с.з\ min}$  та мінімізації гальмівного впливу під час розрахункового глухого замикання всередині контрольованої зони, за умови що друге не суперечить першому. Нерідко раціональний варіант комутації вдається встановити шляхом безпосереднього візуального аналізу принципової електричної схеми, зокрема для триобмоткових трансформаторів (або з розщепленою обмоткою) гальмівну котушку зазвичай доцільно приєднувати до вимірювальних трансформаторів, що обмежують контрольовану ділянку з того боку, де зовнішні аварії породжують найбільший струм небалансу, але лише за умови що поріг  $I_{с.з\ min}$  визначається за залежністю  $I_{с.з} \geq k k_{виг} I_{ном}$ . Якщо ж пріоритетною залишається формула  $I_{с.з} \geq k_{відб} I_{неб\ розр}$ , підключення слід виконувати на підсумовуючий ланцюг трансформаторів низького класу напруги, проте це допустимо лише тоді, коли немає необхідності враховувати

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.34 | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 19   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

сценарій зовнішнього пошкодження на низьковольтному виводі при розімкненому вимикачі високої напруги, або коли відбудова від струмів небалансу за такого режиму не виступає ключовим обмежувальним фактором при обраному варіанті монтажу [7, 8].

У ситуаціях, коли комутація гальмівної обмотки до підсумовуючого ланцюга вимірювальних трансформаторів низького класу напруги спричиняє надмірне зниження чутливості або технічно неможлива через обмежену кількість доступних витків, оптимальним рішенням стає диференційоване підключення, за якого для кожної зі сторін відводиться різна кількість витків гальмівної котушки [7, 8].

Стабільне утримання захисного пристрою від помилкового відпрацювання під час зовнішніх замикань із активним гальмівним впливом забезпечується шляхом орієнтації на робочу характеристику реле, побудовану для умов найменшого гальмування. Надійний блок спрацьовування гарантується лише за тієї умови, що всі розрахункові точки, які відповідають допустимим співвідношенням робочої та гальмівної магніторушійної сили під час зовнішніх аварій, у координатній площині  $F_{роб}, F_{гальм}$  стабільно розташовуються нижче цієї граничної кривої.

Якщо в схемі диференційного захисту триобмоткового трансформатора реалізовано підключення неоднакової кількості витків гальмівної котушки до вимірювальних трансформаторів низького класу напруги розщеплених обмоток, що фактично означає організацію додаткового контуру, то необхідну кількість цих витків визначають на основі параметрів зовнішніх замикань для кожної конкретної лінії [7, 8]:

$$w_{гальм HH2} \geq k_{відб} \frac{I_{неб розр} w_{роб HH2}}{I_{гальм HH2} tg\alpha} + \frac{I_{гальм HH1в}}{I_{гальм HH2в}} \frac{I_{HH1в}}{I_{HH2в}} w_{гальм HH1}. \quad (1.2)$$

Оцінка ефективності спрацьовування захисної системи під час глухих замикань усередині контрольованого простору за умови вимкненого гальмівного впливу базується на розрахунку спеціального коефіцієнта [7, 8]:

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.34 | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 20   |

$$k_q = \frac{I_{K3 \min} k_{cx}}{I_{c3} k_{cx}} \quad (1.3)$$

Коли ж внутрішнє пошкодження виникає в умовах активного проходження струму через гальмівну котушку вимірювального трансформатора, робочий поріг пристрою перевіряють за характеристикою, що відповідає сценарію найвищого гальмівного навантаження, а числова оцінка надійності системи виконується за допомогою параметра  $k_{q \text{ гальм}}$  [7, 8]:

$$k_{q \text{ гальм}} = \frac{F_{\text{роб}}}{F_{c \text{ роб}}} \quad (1.4)$$

де  $F_{c \text{ роб}}$  – магніторухійна сила, коли реле знаходиться на межі спрацювання від КЗ.

Електромеханічні реле диференційного захисту серії ДЗТ-11, попри свою історичну надійність, мають низку конструктивних обмежень, які в сучасних умовах експлуатації електроенергетичних систем стають критичними факторами, що стримують підвищення загальної ефективності захисту. Зокрема, відсутність у схемі трансформатора струму короткозамкненої обмотки погіршує здатність пристрою фільтрувати аперіодичну складову струму небалансу, що вимагає застосування завищених коефіцієнтів відбудови та, як наслідок, знижує чутливість захисту до внутрішніх пошкоджень. Додатково, характеристика спрацьовування таких реле суттєво залежить від кута зсуву фаз між робочим і гальмівним струмами, що ускладнює прогнозування поведінки пристрою в перехідних режимах і вимагає ретельного ручного підбору кількості витків обмоток для кожної конкретної схеми. Механічна інерційність виконавчого органу обумовлює відносно великий час спрацьовування, який може сягати 100 мілісекунд, тоді як сучасні мікропроцесорні термінали забезпечують реакцію менш ніж за 20 мілісекунд, що критично важливо для збереження обладнання при швидкорозвиваючих аваріях.

Впровадження мікропроцесорних пристроїв релейного захисту дозволяє усунути зазначені недоліки шляхом застосування цифрової обробки сигналів,

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.34 | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 21   |

яка забезпечує ефективне пригнічення аперіодичних складових без необхідності фізичного підбору параметрів магнітопроводу. Програмна реалізація гальмівних характеристик дає змогу адаптувати алгоритм роботи до реального кута між струмами, усуваючи неоднозначність спрацьовування, притаманну аналоговим схемам. Крім того, цифрові рішення пропонують функції самодіагностики, реєстрації осцилограм аварійних подій, дистанційного керування уставками та інтеграції в загальну систему автоматизації підстанції через стандартизовані протоколи обміну даними, що є принципово недосяжним для електромеханічних конструкцій типу ДЗТ-11. Завдяки відсутності рухомих частин та використанню сучасної елементної бази, мікропроцесорні захисти також виграють у надійності, довговічності та компактності, зменшуючи потребу у періодичному технічному обслуговуванні та кваліфікованій ручній наладці, яка була обов'язковою для реле минулих поколінь.

### **Висновки до розділу**

Дано характеристику підстанції «ЮГОК-1 150/6 кВ» ДТЕК «Дніпровські електромережі». Визначено, що вона є ключовим енерговузлом, що живить різномірних споживачів: від потужних промислових агрегатів АТ «ПівдГЗК» до міського електротранспорту та інфраструктури. Для забезпечення надійного живлення тут застосовано трансформатори з розщепленою вторинною обмоткою, що ускладнює побудову релейного захисту через необхідність контролю несиметрії між гілками та циркуляційних струмів. Чинна система на базі електромеханічних реле ДЗТ-11, попри наявність гальмівної обмотки, має принципові обмеження: залежність характеристики спрацьовування від кута між струмами, механічну інерційність та недостатню фільтрацію аперіодичних складових, що вимагає завищених уставок і знижує чутливість до внутрішніх пошкоджень. Тому подальше підвищення надійності електропостачання можливе лише за умови модернізації захисту шляхом впровадження мікропроцесорних реле, які забезпечать швидшу та селективнішу локалізацію аварій, адаптивне гальмування та інтеграцію підстанції в систему SCADA.

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.34 | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 22   |

## Розділ 2. Прорахунок та вибір устаткування електричної частини підстанції «ЮГОК-1 150/6 кВ»

|            |             |                 |              |             |                                                                                         |             |              |                |
|------------|-------------|-----------------|--------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------|----------------|
|            |             |                 |              |             | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ                                                            |             |              |                |
|            |             |                 |              |             |                                                                                         |             |              |                |
| <b>Зм.</b> | <b>Арк.</b> | <b>№ докум.</b> | <b>Підп.</b> | <b>Дата</b> | Прорахунок та вибір устаткування<br>електричної частини підстанції<br>«ЮГОК-1 150/6 кВ» | <b>Літ.</b> | <b>Аркуш</b> | <b>Аркушів</b> |
| Розроб.    |             | Цивінський Р.С. |              |             |                                                                                         | Н           | 23           |                |
| Перевір.   |             | Ільченко О.В.   |              |             |                                                                                         | ЗЕЕМ-22     |              |                |
| Н.контр.   |             | Ільченко О.В.   |              |             |                                                                                         |             |              |                |
| Затверд.   |             | Пересунько І.І. |              |             |                                                                                         |             |              |                |

## 2.1 Електроспоживачі ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ»

Характеристики споживачів електроенергії ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» зведені до таблиці табл. 2.1. Зауважимо, що у 2021 році припинила своє існування агломераційна фабрика АТ «ПівдГЗК» [2], котра була майже головним споживачем ЕЕ підстанції. На її місці передбачається будівництво фабрики огрудкування, тому в розрахунок закладаємо цю перспективу. Також через закриття інформацію про ПС через безпекові обмеження, точна схема підстанції, число споживачів і їх потужності невідомі, тому прорахунок є орієнтовним.

Таблиця 2.1 – Характеристики електроприймачів підстанції

| Споживач                              | $P_n$ ,<br>кВт | $U$ , кВ | $\cos\varphi$ |      | $\kappa_n$ | Категорія |
|---------------------------------------|----------------|----------|---------------|------|------------|-----------|
| 1                                     | 2              | 3        | 4             |      | 5          | 6         |
| МШЦ 4500х6000 (РЗФ)                   | 24             | 2500     | 6             | 0.9  | 0.96       | II        |
| Насос оборотної води (РЗФ)            | 4              | 2500     | 6             | 0.9  | 0.94       | I         |
| Пульпонасос (ПНС-1)                   | 6              | 3200     | 6             | 0.9  | 0.94       | I         |
| Дренажний насос (ПНС-1)               | 3              | 500      | 6             | 0.87 | 0.925      | II        |
| Швидкісний трамвай ПС 25              | 1              | 3200     | 6             | 0.9  | 0.92       | II        |
| Міський трамвай                       | 1              | 1600     | 6             | 0.9  | 0.92       | II        |
| Фабрика огрудкування<br>(перспектива) | 1              | 20000    | 6             | 0.9  | 0.92       | II        |
| 1КСН-24 (РЗФ)                         | 12             | 30       | 0.4           | 0.89 | 0.915      | II        |
| ПБМ-П-90/250 (РЗФ)                    | 48             | 4        | 0.4           | 0.87 | 0.855      | II        |
| ПБМ-ПП-90/250 (РЗФ)                   | 66             | 4        | 0.4           | 0.87 | 0.825      | II        |
| МД-9 (РЗФ)                            | 18             | 3        | 0.4           | 0.8  | 0.825      | II        |
| ДУ-68-2,5 (РЗФ)                       | 36             | 4.75     | 0.4           | 0.85 | 0.81       | II        |
| Щитовий затвор (ПНС-1)                | 1              | 11.8     | 0.4           | 0.78 | 0.85       | II        |
| Донний затвор (ПНС-1)                 | 6              | 6.3      | 0.4           | 0.78 | 0.85       | II        |
| Засувки (ПНС-1)                       | 6              | 1.32     | 0.4           | 0.8  | 0.8        | II        |

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 24   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

|                    |   |     |     |      |      |    |
|--------------------|---|-----|-----|------|------|----|
| Вентилятор (ПНС-1) | 2 | 7.5 | 0.4 | 0.86 | 0.87 | II |
| Власні потреби     | 1 | 175 | 0.4 | 1    | 0.9  | II |

## 2.2 Прорахунок електричних навантажень з вибором силових трансформаторів

Розрахунок електричних навантажень методом коефіцієнта попиту ґрунтується на визначенні розрахункової потужності споживачів як частки від їх встановленої потужності з урахуванням імовірності одночасної роботи обладнання. Суть методу полягає у множенні сумарної встановленої потужності електроприймачів на коефіцієнт попиту, який відображає ступінь їх фактичного використання в максимумі навантаження. Цей коефіцієнт враховує режим роботи, технологічні особливості та нерівномірність вмикання споживачів, тому його значення визначається за довідковими даними або на основі експлуатаційного досвіду для конкретного типу об'єкта.

Коефіцієнти попиту для гірничо-збагачувальних фабрик беремо з [3].

Активна потужність однотипних електроприймачів:

$$P_p = n \cdot P_n \cdot \kappa_n. \quad (2.1)$$

Реактивна потужність однотипних електроприймачів:

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi = P_p \cdot \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi}. \quad (2.2)$$

Повна потужність:

$$S_p = \sqrt{\sum P_p^2 + \sum Q_p^2}, \quad (2.3)$$

Обчислені за коефіцієнтом попиту навантаження 0,4 кВ зведені у табл. 2.2.

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 25   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

Таблиця 2.2 – Прораховані потужності електроприймачів 0,4 кВ

| Обладнання             | $P_p$ ,<br>кВт | $\operatorname{tg} \varphi$ | $Q_p$ ,<br>квар | $S_p$ ,<br>кВА |
|------------------------|----------------|-----------------------------|-----------------|----------------|
| 1КСН-24 (РЗФ)          | 288            | 0,51                        | 147,55          |                |
| ПБМ-П-90/250 (РЗФ)     | 96             | 0,57                        | 54,41           |                |
| ПБМ-ПП-90/250 (РЗФ)    | 217,8          | 0,57                        | 123,43          |                |
| МД-9 (РЗФ)             | 43,2           | 0,75                        | 32,40           |                |
| ДУ-68-2,5 (РЗФ)        | 119,7          | 0,62                        | 74,18           |                |
| Щитовий затвор (ПНС-1) | 4,72           | 0,802                       | 3,79            |                |
| Донний затвор (ПНС-1)  | 15,12          | 0,80                        | 12,13           |                |
| Засувки (ПНС-1)        | 2,376          | 0,75                        | 1,78            |                |
| Вентилятор (ПНС-1)     | 11,25          | 0,59                        | 6,68            |                |
| Власні потреби         | 157,5          | 0,00                        | 0,00            |                |
| Загалом                | 955,67         |                             | 456,34          | 1059,03        |

Ту ж процедуру проводимо й для електроприймачів 6 кВ. Результати зводимо до табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Прораховані потужності електроприймачів 6 кВ

| Обладнання                 | $P_p$ ,<br>кВт | $\operatorname{tg} \varphi$ | $Q_p$ ,<br>квар | $S_p$ ,<br>кВА |
|----------------------------|----------------|-----------------------------|-----------------|----------------|
| МШЦ 4500х6000 (РЗФ)        | 48000          | 0,48                        | 23247,46        |                |
| Насос оборотної води (РЗФ) | 8000           | 0,48                        | 3874,58         |                |
| Пульпонасос (ПНС-1)        | 15360          | 0,48                        | 7439,19         |                |
| Дренажний насос (ПНС-1)    | 600            | 0,57                        | 340,04          |                |
| Швидкісний трамвай ПС 25   | 2880           | 0,48                        | 1394,85         |                |
| Міський трамвай            | 1440           | 0,48                        | 697,42          |                |
| Фабрика огрудкування       | 14000          | 0,48                        | 6780,51         |                |
| Електроприймачі 0,4 кВ     | 955,67         |                             | 456,34          |                |
|                            | 91235,67       |                             | 44230,38        | 101391,68      |

Намічаємо два трансформатори типу ТРДН-63000/150/6 (див. табл. 2.3).

Таблиця 3.1 – Параметри трансформатора ТРДН-63000/150/6

| $S_n, \text{кВА}$ | $\Delta P_{xx}, \text{кВт}$ | $\Delta P_{кз}, \text{кВт}$ | $U_{кз}, \%$ | $I_{xx}, \%$ |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|--------------|
| 63000             | 52                          | 235                         | 20           | 0,65         |

Втрати ТРДН-63000/150/6:

$$\begin{aligned}\Delta P_m &= 2\Delta P_{xx} + \beta^2 \cdot \frac{\Delta P_{кз}}{2} = \\ &= 2 \cdot 52 + 0,8047^2 \cdot \frac{235}{2} = 180,09 \text{ кВт},\end{aligned}\quad (2.4)$$

$$\begin{aligned}\Delta Q_m &= S_n (I_{xx}, \% + \beta^2 U_{кз}, \%) \cdot 10^{-2} = \\ &= 2 \cdot 63000 (0,65 + 0,8047^2 \cdot 20) \cdot 10^{-2} = \\ &= 17136,9 \text{ квар},\end{aligned}\quad (2.5)$$

де

$$\beta = \frac{S_p}{S_n} = \frac{101391,68}{2 \cdot 63000} = 0,8047, \quad (2.6)$$

Потужність ТРДН-63000/150/6 з втратами:

$$\begin{aligned}S_p &= \sqrt{(\sum P_p + \Delta P_m)^2 + (\sum Q_p + \Delta Q_m)^2} = \\ &= \sqrt{(91235,67 + 180,09)^2 + (44230,38 + 17136,9)^2} = \\ &= 110103,51 \text{ кВА}.\end{aligned}\quad (2.7)$$

Трансформатори ТРДН-63000/150/6 забезпечують роботу електроприймачів навіть з урахуванням втрат.

## 2.3 Вибір конструктивного виконання схеми електропостачання

Для живлення РЗФ АТ «ПівдГЗК» використовуються дві ЛЕП від однієї ПС 330/150 кВ із забезпеченням резервної лінії для надійності. У одному

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 27   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

випадку для забезпечення надійності системи живлення шин на боці 150 кВ ставлять секційні вимикачі і АПВ.

Схема підключення ПС до ЛЕП 150 кВ від ПС 330 кВ.

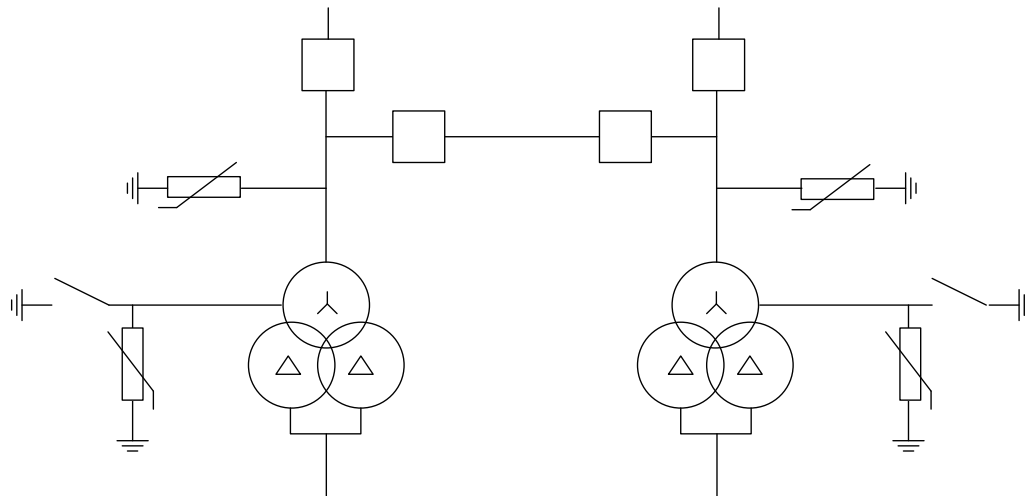


Рисунок 2.1 – Сторона ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» ВН: кількість приєднаних ЛЕП – дві

Два блоки з віддільниками і неавтоматичною перемичкою з боку ЛЕП. Ця схема відповідає всім вимогам, тобто забезпечує надійне живлення приєднаних споживачів в нормальному, ремонтному і післяаварійному режимах відповідно до категорій навантаження і з урахуванням відсутності незалежних резервних джерел живлення і надійність транзиту потужності в нормальному, ремонтному і післяаварійному режимах відповідно до його значення для даної ділянки мережі. Окрім цього ця схема проста і економічна.

Компоновка ГПП і РП вище 1 кВ.

Схему електричних з'єднань ПС вибираємо на підставі загальної схеми електропостачання підприємства з урахуванням перспектив розвитку мережевого району енергосистеми.

На РП секціонування система шин, від них живляться трансформатори РЗФ, міських електромереж та ПС швидкісного та міського трамваїв.

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 28   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

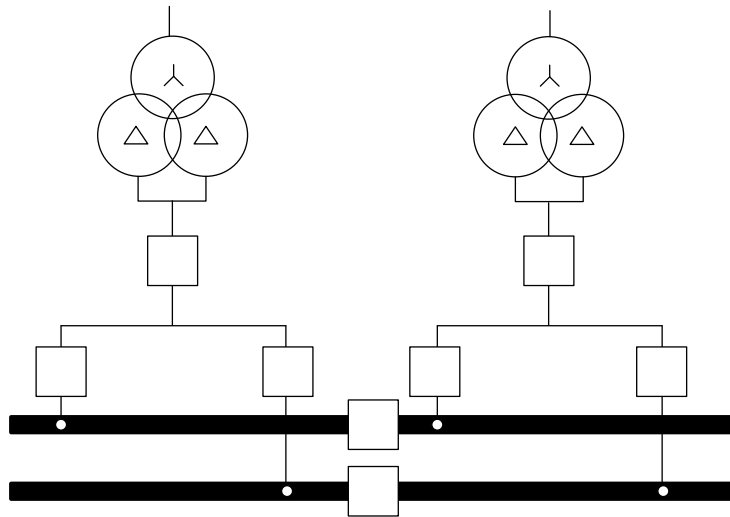


Рисунок 2.2 – Сторона підстанції ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» НН

До шин РП живлення здійснюється шинопроводом від ПС. Від шин РП живлення по кабельних лініях поступає до споживачів вище 1кВ і до шин ТП з НН до 1кВ і далі по кабельних лініях до споживачів напругою 0,4кВ.

Групи споживачів до 1кВ живиться (кожна) від свого ЩСУ. РУ цехових ПСт виконані з секційним вимикачем. У нормальному режимі секції працюють роздільно – кожна від свого трансформатора або введення 6кВ. При виході з ладу одного введення секція за допомогою пристрою АВР на секційному вимикачі підключається до введення, що залишилося в роботі. Пропускна спроможність введень вибирається з умови забезпечення 100% всього навантаження, підключеного до шин РУ.

## 2.4 Розрахунок струмів короткого замикання

Розрахунок струмів короткого замикання (СКЗ) виконуємо для того, щоб забезпечити надійну та безпечну роботу системи електропостачання, частиною якої є ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ». Насамперед це потрібно для правильного вибору та перевірки електрообладнання за термічною та динамічною стійкістю, оскільки при КЗ струми можуть у десятки разів перевищувати номінальні значення і викликати руйнування шин, апаратів і кабелів. Крім того, розрахунок СКЗ необхідний для налаштування і перевірки релейного захисту та автоматики, щоб захист спрацював чітко, селективно і швидко відключав пошкоджену ділянку. Також ці розрахунки використовують для вибору

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 29   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

вимикачів за відключаючою здатністю, визначення параметрів заземлення, оцінки рівнів напруги дотику і кроку, а також для аналізу режимів роботи мережі при аваріях [5].

На ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» СКЗ, як правило, розраховують у трьох характерних точках, які відповідають найбільш небезпечним режимам. Першою точкою є шини високої напруги 150 кВ, де визначають максимальні СКЗ, оскільки ця точка найближча до джерела живлення і саме тут перевіряється вимикаюча здатність високовольтних вимикачів та стійкість шин. Другою точкою є шини низької напруги (6 кВ), де СКЗ менші, але важливі для вибору апаратури розподільчих пристроїв та налаштування захисту відгалужень. Третьою точкою зазвичай є кінець відходячої лінії або найбільш віддалена точка мережі, яка живиться від підстанції, де визначають мінімальні СКЗ для перевірки чутливості релейного захисту, щоб навіть при найменших аварійних струмах захист гарантовано спрацював.

Спираючись на сказане позначимо ці точки на однолінійній схемі підстанції (рис. 2.3), базуючись на якій створимо заступну схему для прорахунку СКЗ (рис. 2.4). Для спрощення на рис. 2.3 частина опущена частина високовольтних вивикачів.

За базисну потужність беремо  $S_{\phi} = 1000 \text{ МВА}$ , а за базисну напругу – робочу напругу ступені  $U_{\phi 1} = 150 \text{ кВ}$ ,  $U_{\phi 2} = 6,3 \text{ кВ}$  тоді базисні струми:

$$I_{\phi 1} = \frac{S_{\phi}}{\sqrt{3} \cdot U_{\phi 1}} = \frac{1000 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 150 \cdot 10^3} = 3849 \text{ А};$$

$$I_{\phi 2} = \frac{S_{\phi}}{\sqrt{3} \cdot U_{\phi 2}} = \frac{1000 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 96225,04 \text{ А}.$$

Живлення до ПС «ЮГОК-1 35/6 кВ» йде ЛЕП 150 кВ проводом АС-300/39 довжиною 4,24 км. Опори проводу:

$$x_{ЛЕП1} = x_{nut} \cdot \frac{S_{\phi}}{U_{\phi 1}^2} \cdot l = 0,414 \cdot 4,24 \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{(150 \cdot 10^3)^2} = 0,078 \text{ в. о.};$$

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 30   |

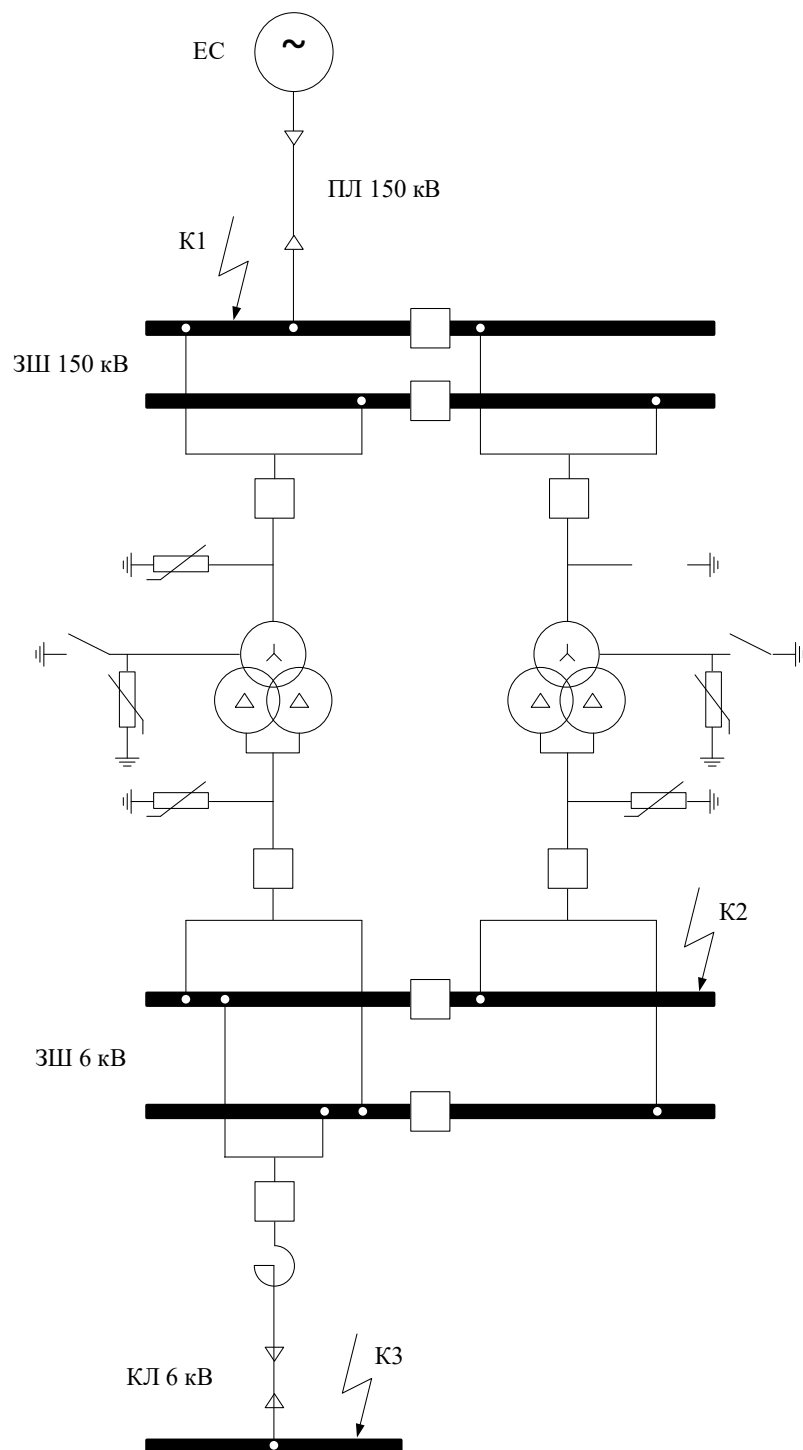


Рисунок 2.3 – Схема електричних з'єднань ПС «ЮГОК-1»

$$r_{ЛЕП1} = r_{num} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}1}^2} \cdot l = 0,0958 \cdot 4,24 \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{(150 \cdot 10^3)^2} = 0,0181 \text{ в. о.};$$

Опори до прорахункової точки  $K_1$ :

$$x_{\Sigma K1} = x_{ЛЕП1} = 0,078 \text{ в. о.};$$

$$r_{\Sigma K1} = r_{ЛЕП1} = 0,0181 \text{ в. о.}.$$

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 31   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

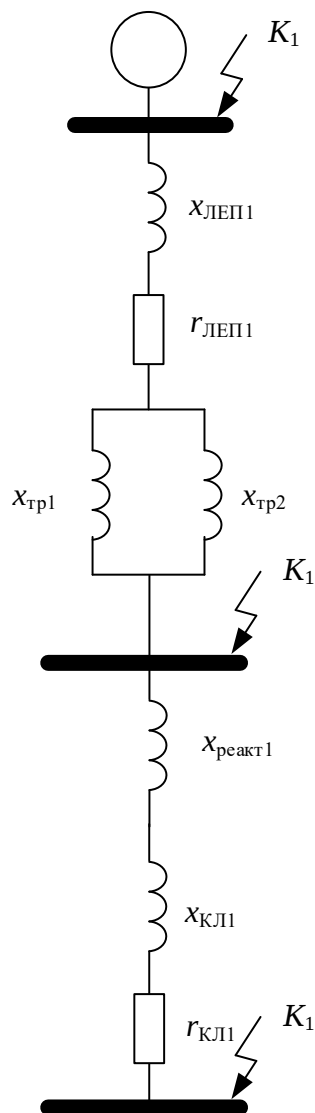


Рисунок 2.4 – Заступна схема для прорахунку СКЗ

Індуктивний опір ТРДН-63000/150/6:

$$x_{mp1} = x_{mp2} = \frac{U_{\kappa}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{нmp}} = \frac{20}{100} \cdot \frac{1000}{63/2} = 6,349 \text{ в.о.}$$

Опори до прорахункової точки  $K_1$ :

$$x_{\Sigma K2} = x_{\Sigma K1} + \frac{x_{mp1} \cdot x_{mp2}}{x_{mp1} + x_{mp2}} = 0,078 + \frac{3,175 \cdot 3,175}{3,175 + 3,175} = 3,253 \text{ в.о.};$$

$$r_{\Sigma K2} = r_{\Sigma K1} = 0,0181 \text{ в.о.}$$

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 32   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

Опір реактора:

$$x_{реакт1} = x_{p ном} \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 2}^2} = 0,28 \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} = 7,778 в.о.$$

Опори кабельної лінії від ПС «ЮГОК-1 35/6 кВ» до РЗФ АТ «ПівдГЗК» довжиною 795 м:

$$x_{К/Л1} = x_{num} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 2}^2} \cdot l = 0,076 \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} \cdot 0,795 = 1,678 в.о.;$$

$$r_{К/Л1} = r_{num} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 2}^2} \cdot l = 0,153 \cdot \frac{1000 \cdot 10^6}{(6 \cdot 10^3)^2} \cdot 0,795 = 3,379 в.о.;$$

Опори до прорахункової точки  $K_1$ :

$$x_{\Sigma K3} = x_{\Sigma K2} + x_{реакт1} + x_{К/Л1} = 3,253 + 7,778 + 1,678 = 12,709 в.о.;$$

$$r_{\Sigma K3} = r_{\Sigma K2} + r_{К/Л1} = 0,0181 + 3,379 = 3,3971 в.о.$$

СКЗ в прорахункових точках:

$$I_{K3}^{K1} = \frac{I_{\delta 1}}{\sqrt{x_{\Sigma K1}^2 + r_{\Sigma K1}^2}} = \frac{3849}{\sqrt{0,078^2 + 0,0181^2}} = 48068,92 A;$$

$$I_{K3}^{K2} = \frac{I_{\delta 2}}{\sqrt{x_{\Sigma K2}^2 + r_{\Sigma K2}^2}} = \frac{96225,04}{\sqrt{3,253^2 + 0,0181^2}} = 29579,94 A;$$

$$I_{K3}^{K2} = \frac{I_{\delta 2}}{\sqrt{x_{\Sigma K2}^2 + r_{\Sigma K2}^2}} = \frac{96225,04}{\sqrt{11,122^2 + 3,3971^2}} = 8274,41 A.$$

Ударні струми в прорахункових точках:

$$i_{y\delta}^{K1} = k_{y\delta 1} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{K3}^{K1} = 1,43 \cdot \sqrt{2} \cdot 48068,92 = 97210,99 A;$$

$$i_{y\delta}^{K2} = k_{y\delta 2} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{K3}^{K2} = 1,95 \cdot \sqrt{2} \cdot 29579,94 = 81573,08 A;$$

$$i_{y\delta}^{K1} = k_{y\delta 1} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{K3}^{K1} = 1,35 \cdot \sqrt{2} \cdot 8274,41 = 15797,41 A,$$

де:

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 33   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

$$\frac{x_{\Sigma K1}}{r_{\Sigma K1}} = \frac{0,078}{0,0181} = 4,3 \Rightarrow k_{y\partial 1} = 1,43;$$

$$\frac{x_{\Sigma K2}}{r_{\Sigma K2}} = \frac{3,253}{0,0181} = 179,72 \Rightarrow k_{y\partial 2} = 1,95;$$

$$\frac{x_{\Sigma K3}}{r_{\Sigma K3}} = \frac{11,122}{3,3971} = 3,27 \Rightarrow k_{y\partial 2} = 1,35.$$

Значення СКЗ вказують на потребу у встановленні струмообмежуючих реакторів для обмеження СКЗ до допустимих значень для захисту електроприймачів, що експлуатуються в електромережі. Так як ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» має розгалужену структуру з великою кількістю приєднань, струмообмежуючі реактори можна встановити в ланцюгах ЛЕП, трансформаторів або на збірних шинах, забезпечуючи локалізацію аварійних режимів і зниження впливу СКЗ на суміжні елементи системи.

Вважатимемо, що реактори обмежують струми на рівнях 63 і 31,5 кА на сторонах 150 і 6 кВ відповідно.

## 2.5 Вибір електроустаткування підстанції «ЮГОК-1 150/6 кВ»

### 2.5.1 Вибір роз'єднувачів ЗРП і ВРП

Вибираємо роз'єднувачі, які встановлені в комірках вводу в ЗРП – 6 кВ типа КРУ-6 кВ і секційні, а також роз'єднувачі вводів ВРП – 150 кВ.

Номінальні робочі струми:

$$I_{роб150кВ} = \frac{S_{mp330}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{400000}{\sqrt{3} \cdot 150} = 1539,6 \text{ A}, \quad (2.8)$$

$$I_{роб6кВ} = \frac{S_{mp150}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{63000/2}{\sqrt{3} \cdot 6} = 3031,09 \text{ A}, \quad (2.9)$$

де  $S_{mp330}$  – сумарна потужність автотрансформаторів на ПС 330 кВ.

Потужність трансформатора на боці 6 кВ зменшується вдвічі так як потужність вторинних обмоток ТРДН ділиться навпіл від номінальної потужності.

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 34   |

Вибір виконуємо в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Вибір роз'єднувачів підстанції «ЮГОК-1 150/6 кВ»

| Умови вибору і перевірки                               | ЗРП-6 кВ     |                 | ВРП-150 кВ   |                 |
|--------------------------------------------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
|                                                        | номінал      | прорахунок      | номінал      | прорахунок      |
| $U_{ном\ p} \geq U_{ном}, \text{кВ}$                   | 6            | 6               | 150          | 150             |
| $I_{ном\ p} \geq I_{ном\ розр}, \text{А}$              | 4000         | 3031,09         | 4000         | 1539,6          |
| $I_{уд\ p} \geq i_{уд}, \text{кА}$                     | 31,5         | 31,5            | 100          | 97,2            |
| $I_{тс} \sqrt{t_{тс}} \geq I_{\infty} \sqrt{t_{\phi}}$ | $40\sqrt{3}$ | $29\sqrt{1,02}$ | $40\sqrt{3}$ | $48\sqrt{1,04}$ |
| Тип роз'єднувача                                       | ABB NALF 12  | -               | ABB GW54     | -               |

де  $t_{\phi} \approx t_{КЗ} = t_{вимик} + t_{захист} = 0,04 + 1 = 1,04 \text{ с}$  – для 150 кВ;

$t_{\phi} \approx t_{КЗ} = t_{вимик} + t_{захист} = 0,02 + 1 = 1,02 \text{ с}$  – для 6 кВ.

## 2.5.2 Вибір вимикачів ЗРП і ВРП

Вибираємо вимикачі, які встановлені в комірках вводу в ЗРП – 6 кВ типу КРУ-6 кВ і секційні, а також вимикачі вводів в ВРП – 150 кВ і секційні.

Вибір виконуємо у табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Вибір вимикачів підстанції «ЮГОК-1 150/6 кВ»

| Умови вибору і перевірки                               | ЗРП-6 кВ     |                 | ВРП-150 кВ   |                 |
|--------------------------------------------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
|                                                        | номінал      | прорахунок      | номінал      | прорахунок      |
| $U_{ном\ в} \geq U_{ном}, \text{кВ}$                   | 6            | 6               | 150          | 150             |
| $I_{ном\ в} \geq I_{ном\ розр}, \text{А}$              | 1250         | 3031,09         | 3150         | 1539,6          |
| $I_{відкл} \geq I'', \text{кА}$                        | 29           | 31,5            | 48           | 63              |
| $I_{уд\ в} \geq i_{уд}, \text{кА}$                     | 100          | 81,6            | 100          | 97,2            |
| $I_{тс} \sqrt{t_{тс}} \geq I_{\infty} \sqrt{t_{\phi}}$ | $40\sqrt{3}$ | $29\sqrt{1,02}$ | $40\sqrt{3}$ | $48\sqrt{1,04}$ |

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 35   |

|              |     |   |          |   |
|--------------|-----|---|----------|---|
| Тип вимикача | VD4 | - | LTB D1/B | - |
|--------------|-----|---|----------|---|

### 2.5.3 Вибір трансформаторів струму ЗРП і ВРП

Вибираємо трансформатори струму, які встановлені в комірках вводу в ЗРП – 6 кВ типа КРУ-6 кВ і секційні, а також ТС вводів ВРП – 150 кВ.

Вибір виконуємо у табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Вибір трансформаторів струму

| Умови вибору і перевірки                               | ЗРП-6 кВ             |                 | ВРП-150 кВ              |                 |
|--------------------------------------------------------|----------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
|                                                        | номінал              | прорахунок      | номінал                 | прорахунок      |
| $U_{ном\text{ТС}} \geq U_{ном}, \text{кВ}$             | 6                    | 6               | 150                     | 150             |
| $k_{тр}$                                               | 3000/5               | -               | 2000/5                  | -               |
| $k_m = \frac{I_{\infty} \sqrt{t_{\phi}}}{I_{1н}}$      | -                    | 13,23           | -                       | 32,25           |
| $I_{мс} \sqrt{t_{мс}} \geq I_{\infty} \sqrt{t_{\phi}}$ | $40\sqrt{3}$         | $29\sqrt{1,02}$ | $40\sqrt{3}$            | $48\sqrt{1,04}$ |
| $k_{дин} = \frac{i_y}{\sqrt{2} I_{1н}}$                | -                    | 19,22           | -                       | 34,36           |
| $I_{yp} \geq i_y, \text{кА}$                           | 100                  | 81,6            | 100                     | 97,2            |
| Тип трансформатора струму                              | Vector VS<br>VCTB130 | -               | FRER<br>TAT101<br>2000A | -               |

Виконуємо перевірку ТС з класу точності. Клас точності ТС повинен бути для ТС, передбачених для живлення лічильників активної і реактивної енергій з яких виконуються розрахунки з енергосистемою (ТС, вводи ПС) – 0,5. При класі точності 0,5 максимально припустимий опір  $Z_{дон} = 0,4 \text{ Ом}$ , максимально припустиме навантаження  $S_{2ном} = 10 \text{ ВА}$ , її можливо розрахувати:

$$S_{2ном} = I_{2ном}^2 Z_{дон} = 52 \cdot 0,4 = 10 \text{ ВА}.$$

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 36   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

Перевірку виконуємо з найбільш навантаженого трансформатора струму в ф. А, в коло вторинної обмотки якого послідовно увімкнути амперметр TENSE, DJ-A96T з потужністю  $S = 3BA$ , лічильник активної/реактивної енергії NIK 2303 AP3T.1202.MC.11 5(120)A  $S = 1,5BA$ .

Розрахунок номінального перерізу проводу від ТС до вимірювальних приладів можливо виконати, використовуючи навантаження в ВА або в Ом.

Дані для розрахунків навантаження записуємо в таблицю 4.

Таблиця 2.7 – Споживачі трансформаторів струму

| №<br>п/п | Наіменув. приладів                          | Тип приладу                                         | Навантаження |     |     |
|----------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------|-----|-----|
|          |                                             |                                                     | ф.А          | ф.В | ф.С |
| 1        | Амперметр                                   | TENSE, DJ-A96T                                      | 3            | -   | -   |
| 2        | Лічильник<br>активної/реактивної<br>енергії | NIK 2300<br>ARTT.2800.MC.11<br>5(10)A<br>3x220/380B | 0,5          | 0,5 | 0,5 |
| Всього   |                                             |                                                     | 3,5          | 0,5 | 0,5 |

Тому  $S_{\text{прип А}} = 3,5 A$ .

Для послідовних котушок приладів коефіцієнти потужності прийняти рівними одиниці. Припустиме навантаження витрат складає:

$$S_{\text{дрот}} = S_{2\text{ном}} - (S_{\text{прип}\Sigma} + I_{2\text{ном}}^2 r_{\text{конт}}) = \\ = 10 - (3,5 + 52 \cdot 0,1) = 1,3 BA.$$

Припустимий опір дротів:

$$r_{\text{дрот}} = \frac{S_{\text{дрот}}}{I_{2\text{ном}}^2} = \frac{3,7}{5^2} = 0,148 \text{ Ом}.$$

Приймаємо  $I_{\text{розр}} = 15 \text{ м}.$

Визначаємо мінімально припустимий переріз дротів з умов припустимого навантаження при класі точності 0,5:

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 37   |

$$S_{\min} = \frac{I_{\text{розр}}}{\gamma \cdot r_{\text{дрот}}} = \frac{15}{32 \cdot 0,148} = 3,17 \text{ мм}^2.$$

З умов механічної стійкості слід залучати мідні дроти перерізом не менше 2,5 мм<sup>2</sup> і алюмінієві дроти перерізом не нижче 4 мм<sup>2</sup>. Вибираємо алюмінієві дроти перерізом 4 мм<sup>2</sup>.

Трансформатор Vector VS VCTB130 задовольняє цим умовам.

#### 2.5.4 Вибір трансформаторів напруги ЗРП і ВРП

Передбачаємо до установки по одному трансформатору напруги до кожної секції шин-6 кВ. Номінальна потужність трансформатора напруги типу НТМИ-6 в класі точності 0,5S дорівнює 75 ВА, в класі точності 1S дорівнює 150 ВА.

Складаємо таблицю навантажень трансформатора напруги.

Таблиця 2.8 – Таблиця навантажень трансформатора напруги

| №<br>п/п | Наіменув.<br>приладів                       | Тип                                                 | cosφ<br>sinφ | Загальна<br>потужність |        |
|----------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------|------------------------|--------|
|          |                                             |                                                     |              | Р, Вт                  | Q, вар |
| 1        | Вольтметр                                   | АСКО-УКРЕМ U-ADM-V                                  | 1/0          | 2                      | -      |
| 2        | Лічильник<br>активної/реактивної<br>енергії | NIK 2300<br>ARTT.2800.MC.11<br>5(10)A<br>3x220/380V | 0,38/0,93    | 12                     | 29,4   |
| 4        | Реле напруги                                | РН-51                                               | 1/0          | 0,6                    | -      |
| Всього   |                                             |                                                     |              | 14,6                   | 29,4   |

$$S_{2z} = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2} = \sqrt{14,9^2 + 29,4^2} = 32,96 \text{ ВА.}$$

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 38   |

У класі точності 0,5 номінальна потужність трансформатора напруги типу НТМИ-6  $S_{2н} = 75 \text{ ВА}$ .

$$S_{2н} = 75 \text{ ВА} \geq S_{2з} = 49 \text{ ВА}.$$

Тому приймаємо до установки 2 трансформатора напруги типу НТМИ-6. Від СКЗ трансформатор напруги захищений запобіжниками типу ПКТ-6.

### 2.5.5 Вибір опорних ізоляторів

Вибираємо опорні ізолятори, котрі встановлені в ЗРП–6 кВ в комірках КРУ-6 кВ:

1. По напрузі  $U_{н.із} \geq U_{ном} = 6 \text{ кВ}$ .

2. По припустимому механічному навантаженню

$$F_{роз} \geq F_{прип};$$

$$F_{руйн} = 3750 \text{ Н};$$

$$F_{прип} = 0,6 F_{руйн};$$

$$F_{прип} = 0,6 \cdot 3750 = 2250 \text{ Н};$$

$$117,15 \text{ Н} < 2250 \text{ Н}.$$

3. По місцю розташування.

Вибираємо ізолятор типу ІО–6–3,75 УЗ. Ізолятор вибрано вірно.

### 2.5.6 Вибір прохідних ізоляторів

Вибираємо прохідні ізолятори типу ІП-6/400–375–1 УХЛ.

Ізолятор для внутрішнього встановлення

$$U_{н.із} = 6 \text{ кВ};$$

$$F_{руйн} = 3750 \text{ Н};$$

$$0,6 F_{прип} \approx 0,5 F_{руйн};$$

$$0,6 \cdot 3750 \text{ Н} = 2250 \text{ Н} \geq 0,5 \cdot 117,15 \text{ Н} = 58,57 \text{ Н}.$$

Ізолятор ІП-6/400-3750-1 УХЛ вибраний вірно.

### 2.5.7 Вибір шини збірних на стороні 6 кВ

Намічаємо 3 алюмінієві шини на фазу перерізом 100х8 з  $I_{дон} = 3050 \text{ А}$ .

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 39   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

Перевірка алюмінієвих шин на термічну та електродинамічну стійкість є обов'язковою частиною проєктування та аналізу роботи електричних установок, зокрема підстанцій високої напруги, оскільки саме шини сприймають на себе дію струмів короткого замикання, які значно перевищують номінальні значення і створюють як теплові, так і механічні навантаження.

Перевіряємо шини на електродинамічну стійкість:

$$\begin{aligned} F_{\max}^{(3)} &= 0,176 \cdot \frac{l}{a} \cdot i_{yd}^2 \cdot k_{\phi} \cdot 10^{-7} = \\ &= 0,176 \cdot \frac{150 \cdot 10^{-2}}{20 \cdot 10^{-2}} \cdot (159271,14)^2 \cdot 1 \cdot 10^{-7} = \\ &= 3348,48 \text{ Н}, \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$M_{\max} = F_{\max}^{(3)} \frac{l}{10} = 3348,48 \frac{150}{10} = 50227,25 \text{ Н} \cdot \text{см}. \quad (2.11)$$

Встановлюємо шини на ребро, тому:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{(3 \cdot 0,8) \cdot 10^2}{6} = 40 \text{ см}^3. \quad (2.12)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{50227,25}{40} = 1255,68 \text{ Н/см}^2. \quad (2.13)$$

Умові  $\sigma_{\max} = 1255,68 \text{ Н/см}^2 < \sigma_{\text{дон}} = 7 \cdot 10^3 \text{ Н/см}^2$  задовольняє. По електродинамічній стійкості шини проходять.

Перевіряємо на термічну стійкість:

$$S_{TC} = \alpha \cdot I_{\infty}^{(3)} \cdot \sqrt{t_n} = 11 \cdot 1,34 \cdot \sqrt{2,5} = 23,3 \text{ мм}^2.$$

Перевіряємо вибрані шини 100×6 на термічну стійкість при струмах к.з.:

$$S_{\max} = \frac{I_{K3}^{(3)}}{C} \cdot \sqrt{t_{K3}} = \frac{57754,72}{91} \cdot \sqrt{2,5} = 1003,49 \text{ мм}^2. \quad (3.1)$$

$$\text{де } C = 85 \dots 91 \frac{A}{C^{1/2} \cdot \text{мм}^2}$$

Умові  $S_{\text{шин}} = (3 \cdot 8) \cdot 1000 = 24000 \text{ мм}^2 < S_{\max} = 1000,3 \text{ мм}^2$  задовольняє. По термічній стійкості шини проходять.

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 40   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

## 2.6 Компенсация реактивных навантажений

Компенсация реактивных навантажений або підвищення коефіцієнта потужності має велике значення для роботи підприємства, енергосистеми. Підвищення коефіцієнта потужності, або зменшення споживання реактивної потужності елементами системи електропостачання, зменшує також витрати активної потужності та збільшує навантаження.

Там, де споживання реактивної потужності зменшується, збільшується, крім того, пропускна здатність елементів системи електропостачання, при проектуванні нових ліній є можливість використання дротів або кабелів з меншим перетином при передачі такої ж активної потужності.

Тому, при проектуванні підстанції необхідно проводити заходи з компенсації реактивної потужності. Тут ці питання вирішуються установкою комплектних конденсаторних установок.

Спочатку вирішуємо питання чи необхідна така установка, тому розраховуємо коефіцієнт потужності  $tg\varphi_p$  для наших споживачів електроенергії:

$$tg\varphi_p = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{pi}}{\sum_{i=1}^N P_{pi}} = \frac{44230,38}{91235,67} = 0,485.$$

Енергосистема задає для підстанцій необхідний коефіцієнт потужності  $tg\varphi = 0,232$ .

Тому, так як  $tg\varphi = 0,232 < tg\varphi_p = 0,485$ , то необхідна установка компенсуючи пристроїв.

Розраховуємо потужність компенсуючих пристроїв:

$$\begin{aligned} Q_{\kappa n} &= k_n \sum_{i=1}^N P_{pi} (tg\varphi_p - tg\varphi) = \\ &= 0,9 \cdot 91235,67 \cdot (0,485 - 0,232) = \\ &= 20774,36 \text{ квар.} \end{aligned}$$

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 41   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

де  $k_n = 0,9$ .

Визначаємо потужність та тип комплектних компенсуючих пристроїв, кількість яких визначаємо таким чином, щоб на кожній з двох секцій шин були однакові пристрої.

Вибираємо з [10] комплектні компенсуючі пристрої: 10 шт. УК-6/10Н-1800 Л,П з  $Q_{кп} = 1800$  квар і 2 шт. УК-6/10Н-1350 Л,П  $Q_{кп} = 1350$  квар.

Тоді:

$$Q_{кп\Sigma} = 10 \cdot 1800 + 2 \cdot 1350 = 20700 \text{ квар.}$$

В зв'язку з тим, що встановлені компенсуючі пристрої зменшують реактивну потужність, зменшується загальна повна потужність підстанції, тому виконуємо перерахунок повної розрахункової потужності з урахуванням установки компенсуючих пристроїв:

$$\begin{aligned} S_{p1} &= \sqrt{(\sum P_p)^2 + (\sum Q_p - \Delta Q_{кп\Sigma})^2} = \\ &= \sqrt{(91235,67)^2 + (44230,38 - 20700)^2} = \\ &= 94221,17 \text{ квар.} \end{aligned}$$

Падіння повної потужності склало 14,42%.

### Висновки до розділу

У результаті виконаного розділу проведено аналіз електроприймачів ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» з урахуванням закриття аглофабрики та перспективи будівництва фабрики огрудкування. Розрахунок навантажень методом коефіцієнта попиту дозволив обґрунтувати вибір двох трансформаторів ТРДН-63000/150/6, які забезпечують живлення споживачів із урахуванням втрат. Для надійного електропостачання прийнято схему з двома ввідними лініями 150 кВ та секціонованими шинами 6 кВ, що відповідає вимогам для споживачів I–II категорій. Розрахунок струмів короткого замикання підтвердив необхідність установлення струмообмежуючих реакторів для захисту обладнання. На основі розрахункових даних виконано вибір комутаційної апаратури, вимірювальних трансформаторів, ізоляторів та збірних шин із перевіркою на термічну й

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 42   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

електродинамічну стійкість. Компенсація реактивної потужності за допомогою конденсаторних установок дозволила підвищити коефіцієнт потужності до нормативного значення та зменшити повну розрахункову потужність підстанції на 14,42 %. Запропоновані технічні рішення забезпечують надійне та економічно ефективне електропостачання об'єктів від ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ».

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.СЧ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 43   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

### Розділ 3. Удосконалення релейного захисту трансформатора з розщепленою обмоткою ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ»

|            |             |                 |              |             |                                                                                            |             |              |                |
|------------|-------------|-----------------|--------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------|----------------|
|            |             |                 |              |             | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.ПР                                                               |             |              |                |
|            |             |                 |              |             |                                                                                            |             |              |                |
| <b>Зм.</b> | <b>Арк.</b> | <b>№ докум.</b> | <b>Підп.</b> | <b>Дата</b> | Удосконалення релейного захисту трансформатора з розщепленою обмоткою ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» | <b>Літ.</b> | <b>Аркуш</b> | <b>Аркушів</b> |
| Розроб.    |             | Цивінський Р.С. |              |             |                                                                                            | Н           | 44           |                |
| Перевір.   |             | Ільченко О.В.   |              |             |                                                                                            | ЗЕЕМ-22     |              |                |
| Н.контр.   |             | Ільченко О.В.   |              |             |                                                                                            |             |              |                |
| Затверд.   |             | Пересунько І.І. |              |             |                                                                                            |             |              |                |

### 3.1 Загальний огляд системи релейного захисту трансформатора з розщепленою обмоткою

Для захисту трансформаторів з розщепленою обмоткою (триобмоткового) застосовується комплекс релейних функцій, кожна з яких виконує свою роль у виявленні внутрішніх і зовнішніх пошкоджень та ненормальних режимів роботи (див. рис. 3.1).

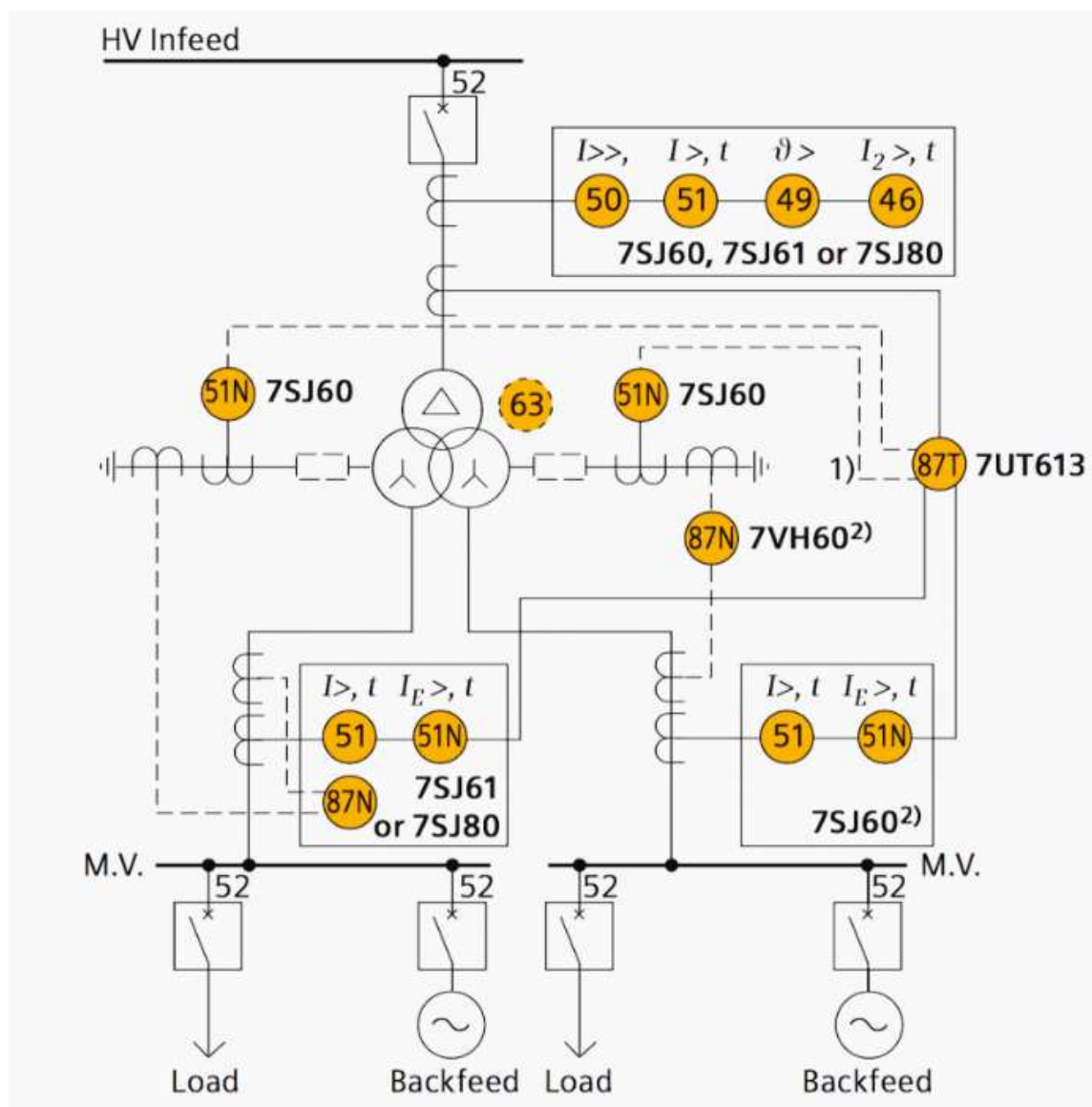


Рисунок 3.1 – Узагальнена схема захисту триобмоткового трансформатора з залученням мікропроцесорних реле Siemens SIPROTEC [9]

Диференційний захист трансформатора 87Т є основним швидкодіючим захистом, який реагує на різницю струмів на всіх трьох сторонах трансформатора і забезпечує миттєве відключення при внутрішніх коротких

замиканнях, включаючи міжфазні та замикання на землю в обмотках, причому для триобмоткового виконання він враховує перетворення струмів з трьох сторін до єдиної системи координат і компенсацію фазових зсувів. Додатково використовується диференційний захист нульової послідовності 87N, який підвищує чутливість до внутрішніх замикань на землю, особливо в умовах заземлених або компенсованих нейтралей, де звичайний диференційний захист може бути менш чутливим.

Максимальний струмовий захист миттєвої дії 50 застосовується для швидкого відключення при великих струмах короткого замикання, як правило, у ближній зоні або при відмові основних захистів, тоді як струмовий захист із витримкою часу 51 виконує резервну функцію для зовнішніх пошкоджень у мережі і координується з іншими захистами за часом спрацювання. Захист від замикань на землю 51N контролює струми нульової послідовності і дозволяє виявляти однофазні замикання на землю як у самому трансформаторі, так і в приєднаних мережах, забезпечуючи резервування або селективне відключення залежно від налаштувань.

Тепловий захист 49 призначений для контролю нагріву обмоток трансформатора на основі моделі теплового стану або вимірювання температури і спрацьовує при перевантаженнях, які можуть призвести до прискореного старіння ізоляції або пошкодження трансформатора. Захист від несиметрії струмів 46 реагує на появу складових зворотної послідовності, що виникають при несиметричних режимах або обриві фаз і можуть викликати додатковий нагрів ротуючих машин у мережі або самого трансформатора, тому він забезпечує відключення або сигналізацію при перевищенні допустимого рівня несиметрії.

Газовий захист 63 є одним із найчутливіших до внутрішніх пошкоджень трансформатора і реагує на виділення газу або швидкий рух масла в баку, що виникає при міжвиткових замиканнях, локальних перегрівах або пробоях ізоляції, забезпечуючи як сигналізацію на ранніх стадіях дефекту, так і відключення при інтенсивних аварійних процесах. Сукупне застосування цих реле дозволяє створити багаторівневу систему захисту триобмоткового

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.ПР | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 46   |

трансформатора, де диференційні захисти забезпечують швидке відключення внутрішніх пошкоджень, струмові та земляні захисти виконують резервні функції, а теплові, несиметрійні та газові захисти контролюють експлуатаційний стан і запобігають розвитку аварій.

### **3.2 Вибір схеми захисту трансформатора підстанції ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ»**

Так як для ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ» обрана полуторна схема, тому захист трансформатора, що працює у такій схемі має підвищені вимоги до селективності, швидкодії та чутливості, оскільки така схема характеризується наявністю двох систем шин і комутацією кожного приєднання через два вимикачі, що ускладнює як режими нормальної роботи, так і аварійні стани. Основним видом захисту триобмоткового трансформатора є диференційний струмовий захист, який забезпечує миттєве відключення внутрішніх пошкоджень трансформатора, таких як міжфазні короткі замикання, замикання на землю в обмотках та пошкодження виводів. Для триобмоткового трансформатора диференційний захист виконується з урахуванням трьох сторін живлення, при цьому струми з кожної сторони приводяться до єдиної бази з урахуванням коефіцієнтів трансформації та групи з'єднання обмоток, а також компенсації зсуву фаз, що є критично важливим для уникнення помилкових спрацювань.

У полуторній схемі особливістю є те, що трансформатор приєднується до шин через два вимикачі, і тому зона дії диференційного захисту повинна охоплювати не тільки сам трансформатор, але й струмоведучі частини між трансформатором і вимикачами, включаючи струмові трансформатори, що потребує правильного розміщення вимірювальних органів і врахування можливих режимів обходу одного з вимикачів. При цьому важливо забезпечити коректну роботу захисту при різних конфігураціях схеми, коли один із вимикачів може бути виведений у ремонт, а навантаження перерозподіляється через інші елементи.

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.ПР | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 47   |

Окрім диференційного захисту застосовується газовий захист, який реагує на внутрішні пошкодження, що супроводжуються виділенням газу або інтенсивним рухом масла, і є особливо ефективним для виявлення міжвиткових замикань та локальних дефектів із повільним розвитком. Максимальний струмовий захист використовується як резервний для відключення зовнішніх коротких замикань у разі відмови основних захистів суміжних елементів, причому його витримка часу координується з іншими ступенями захисту в мережі. Також застосовується захист від перевантаження, який контролює тепловий стан трансформатора і діє з витримкою часу, а також захист від перенапруги та перевищення напруги, що можуть виникати внаслідок аварійних режимів у мережі.

Умови роботи в полуторній схемі вимагають додаткової уваги до резервування захистів і їх взаємодії з автоматикою, зокрема з автоматикою повторного включення та протиаварійною автоматикою, оскільки відключення одного вимикача не завжди призводить до повного знеструмлення приєднання. Тому схеми захисту будуються таким чином, щоб забезпечити надійне відключення пошкодженого трансформатора незалежно від стану вимикачів і конфігурації шин, а також виключити помилкові дії при зовнішніх коротких замиканнях або перехідних процесах.

Зважаючи на означене взята для задіяння така схема релейного захисту ТРДН-63000/150/6 (див. рис. 3.2) на базі SIPROTEC 5 7UT86 [11]. Алгоритм практичної реалізації інтегровано у шаблон релейного захисту триобмоткового силового трансформатора, увімкненого за полуторною схемою. Наведена схема демонструє три ключові функціональні блоки, які відповідають кожній зі сторін трансформатора, інтегровану структуру селективного захисту від КЗ і внутрішні алгоритмічні цикли й додаткові опції. Разом з тим, з боку ВН передбачено встановлення трансформатора напруги. Зокрема, така конфігурація дозволяє здійснювати моніторинг граничних параметрів частоти та напруги. Конкретні параметри налаштування (уставки) захисних пристроїв визначаються безпосередньо конфігурацією та вимогами енергосистеми.

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.ПР | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 48   |

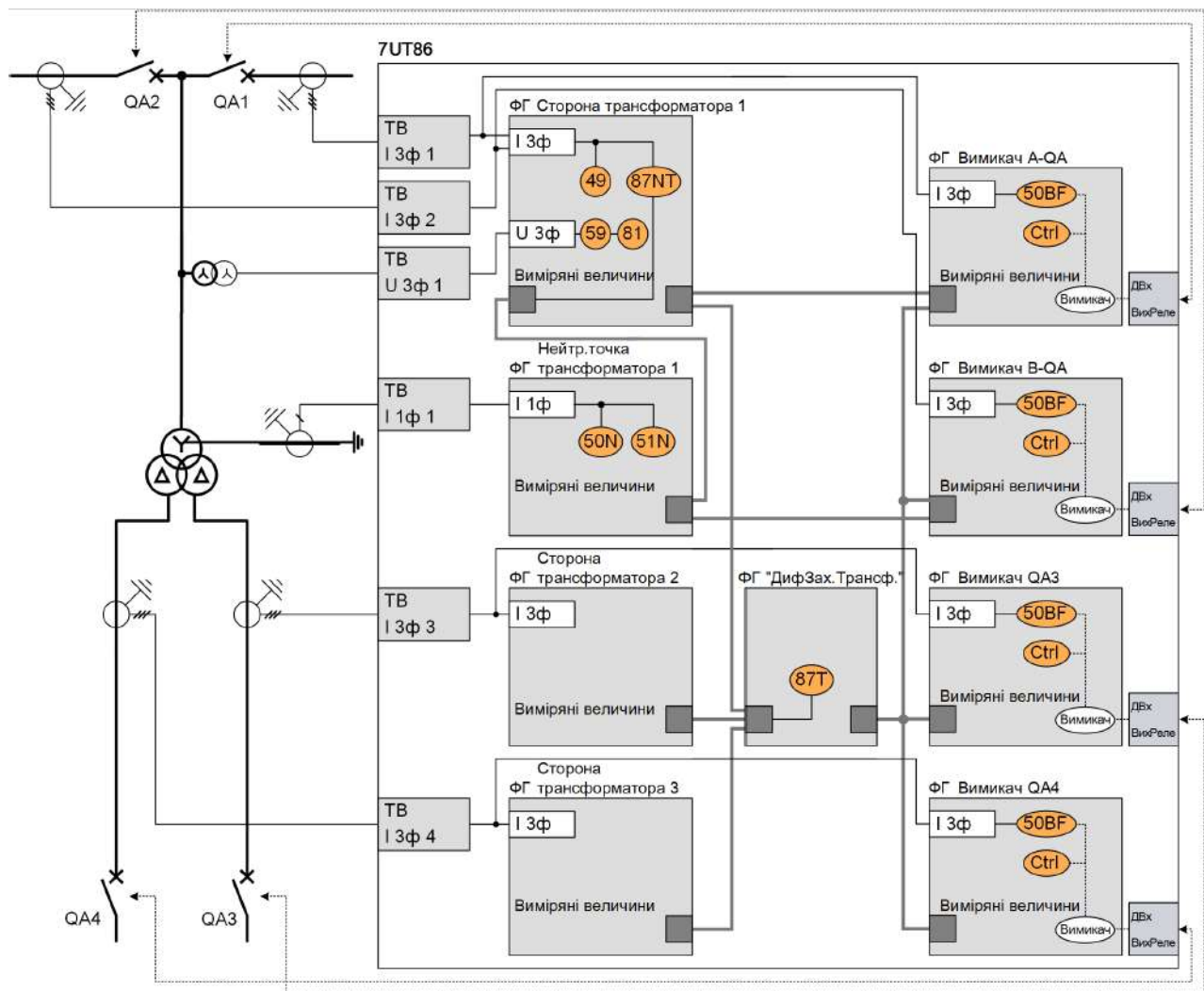


Рисунок 3.2 – Релейний захист трансформатора з розщепленою обмоткою із застосування мікропроцесорного реле SIPROTEC 5 7UT86 [11]

Специфіка ТРДН-63000/150/6 полягає в наявності пари незалежних вторинних обмоток, призначених для розподілу енергії на дві окремі системи шин. Величини напруг на вихідних ланцюгах таких трансформаторів можуть повністю збігатися або мати різні номінальні значення. Попри існування модифікацій із двома перемикачами відгалужень, стандартне виконання передбачає наявність лише одиничного пристрою РПН, змонтованого на первинному боці (див. рис. 3.3). Через таку архітектуру виникає потреба в комутації обох вторинних напруг до вимірювальних каналів ( $U_1$ ,  $U_2$ ) задля подальшого визначення із них головного регульованого параметра з огляду на поточний стан систем шин.

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.ПР | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 49   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

Під час роботи триобмоткового трансформатора здійснюється безперервний моніторинг напруги одночасно на першій та другій сторонах, при цьому керуючий пристрій здатний самостійно визначати, який саме показник використовувати для регулювання, орієнтуючись на величину струмів навантаження або на єдиний заданий параметр. Паралельно з основним контуром керування відбувається спостереження за напругою на тій обмотці, яка не задіяна в регулюванні, що дозволяє своєчасно фіксувати вихід показників за допустимі межі. Коли вимірювальний канал струму прив'язаний до конкретної функціональної групи, система автоматично адаптує контроль напруги відповідно до фактичного розподілу навантаження.

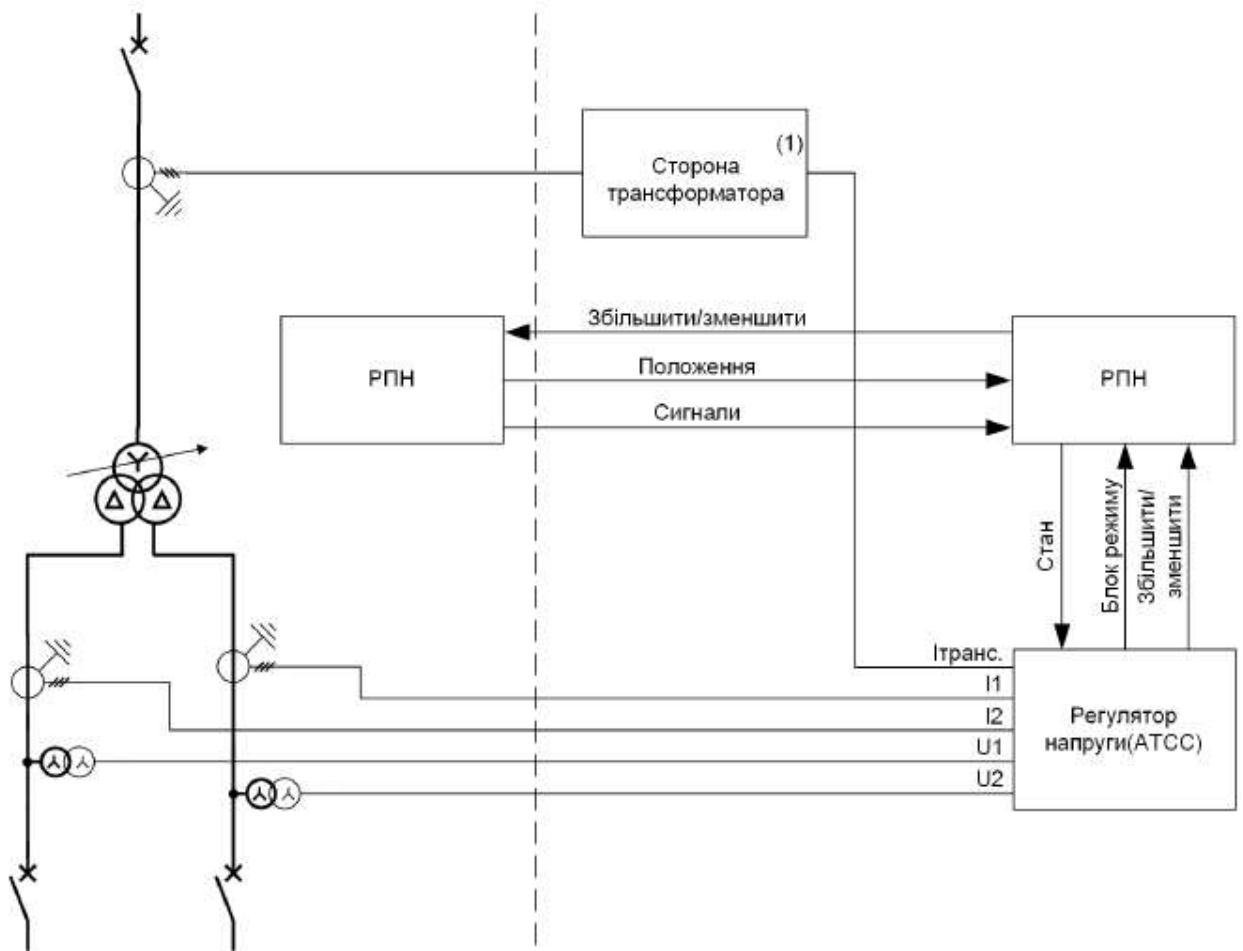


Рисунок 3.3 – Регулювання під навантаженням трансформатора з розщепленою обмоткою [11]

У режимі автоматичного регулювання пріоритет завжди віддається стороні з найбільшим струмом, а напруга на резервній обмотці паралельно

перевіряється на предмет перевищення або падіння нормативних значень. У разі виявлення завищеної напруги на неконтрольованій стороні пристрій автоматично забороняє подальше підвищення та блокує швидке перемикання регулятора на нижчі ступені. Якщо ж фіксується зниження напруги, то за умови активації відповідної функції моніторингу всі команди щодо зміни положення регулятора тимчасово призупиняються для запобігання нестабільності роботи електромережі.

### 3.3 Прорахунок уставок релейного захисту трансформатора SIPROTEC 5 7UT86

Методику розрахунку уставок беру з [12].

Прийнято схему з'єднання ТС та струмових входів пристрою в зірку з групою з'єднання 11. Так як  $K_{cx}^{(3)} = 1$ , то його при розрахунках не вказуємо [12].

Трансформатор із розщепленими обмотками захищається SIPROTEC 5 7UT86 [11], якщо струми від розщеплених обмоток підсумувати шляхом паралельного з'єднання вторинних обмоток ТС.

Обчислення налаштувань захисту силового трансформатора з розщепленими обмотками виконується за спеціальною послідовністю, де першочергово аналізується ділянка з найбільшим струмовим навантаженням. Саме для неї, виходячи з очікуваних режимів роботи, визначається потрібний коефіцієнт перетворення встановлених струмових трансформаторів, тоді як аналогічні показники на решті відгалужень мають бути чітко узгоджені з отриманим значенням, обов'язково враховуючи власне співвідношення напруг захищуваного апарата. У даній конфігурації найбільш навантаженою виявляється високовольтна частина, розрахована на експлуатацію при рівні 150 кВ.

Коефіцієнти трансформації ТС  $n_{TC\epsilon}$  та  $n_{TCн}$  [12]:

$$n_{TC\epsilon} \geq \frac{I_{\max \epsilon}}{I_{ном \epsilon}}; \quad (3.1)$$

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.ПР | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 51   |

$$n_{TC\ H} \approx \frac{n_{TC\ B} \cdot U_{сер\ BH}}{U_{HH}}; \quad (3.2)$$

$$n_{TC\ H} \geq \frac{I_{\max\ H}}{I_{ном\ H}}, \quad (3.3)$$

де  $I_{\max\ B}$  – максимальний робочий струм ТС з боку ВН, А;

$I_{ном\ B}$  – номінальний вторинний струм ТС з боку ВН;

$U_{HH}$  – номінальна напруга з боку НН трансформатора;

$U_{сер\ BH}$  – номінальна напруга в середньому положенні РПН з боку ВН трансформатора.

Коефіцієнт вирівнювання з боку ВН [12]:

$$K_{вр\ B} = n_{TC\ B} \frac{I_{ном\ B}}{I_{\max\ B}}. \quad (3.4)$$

Коефіцієнт вирівнювання з боку НН [12]:

$$K_{вр\ H} = K_{вр\ B} \frac{n_{TC\ H} U_{HH}}{n_{TC\ B} U_{сер\ BH}}. \quad (3.5)$$

Максимальний робочий і номінальний струм з боку ВН, а також сумарний номінальний струм з боку НН трансформатора (потужність НН не ділимо навпіл) [12]:

$$\begin{aligned} I_{\max\ BH} &= \left( I_{\max\ HH1} + I_{\max\ HH2} \right) \frac{U_{HH}}{U_{сер\ BH}} = \\ &= (1500 + 2000) \frac{6}{150} = 140\ A; \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$I_{BH} = \frac{S}{\sqrt{3} U_{сер\ BH}} = \frac{63000}{\sqrt{3} \cdot 150} = 242,49\ A; \quad (3.7)$$

$$I_{HH\Sigma} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{HH}} = \frac{63000}{\sqrt{3} \cdot 6} = 6062,18\ A. \quad (3.8)$$

Вибір коефіцієнтів трансформації трансформаторів струму:

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.ПР | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              | 52   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              |      |

$$n_{TC\ BH} \geq \frac{I_{\max\ BH}}{I_{\text{ном}\ BH}} = \frac{140}{5} = 28 \text{ приймаємо } \frac{200}{5} = 40.$$

$$n_{TC\ HH} \approx \frac{n_{TC\ BH} \cdot U_{\text{сер}\ BH}}{U_{\text{сер}\ HH}} = \frac{40 \cdot 150}{6} = 1000 \quad \text{приймаємо} \quad \frac{2000}{5} = 400 \quad \text{це}$$

допустимо, оскільки умова  $n_{TC\ HH} \geq \frac{I_{\max\ HH}}{I_{\text{ном}\ HH}} = \frac{1500}{5} = 300$  виконується.

Для трансформатора з розщепленою обмоткою  $n_{TC\ BH}$  відносно струмів навантаження кожної з обмоток НН виявляється сильно завищеним, але це необхідно для правильної роботи диференційного захисту при наскрізних струмах [12].

Коефіцієнт вирівнювання з боку ВН [12]:

$$k_{\text{вир}\ BH} = n_{TC\ BH} \frac{I_{\text{ном}\ BH}}{I_{\max\ BH}} = 40 \frac{5}{140} = 1,43. \quad (3.9)$$

Коефіцієнт вирівнювання з боку НН [12]:

$$k_{\text{вир}\ HH} = k_{\text{вир}\ BH} \frac{n_{TC\ HH}}{n_{TC\ BH}} \frac{U_{HH}}{U_{\text{сер}\ BH}} = 1,43 \frac{400}{40} \frac{6}{150} = 0,572. \quad (3.10)$$

Перевірка коефіцієнтів вирівнювання на відхилення від прорахунку [12]:

$$\begin{aligned} \delta I_{\partial} &= \frac{k_{\text{вир}\ BH} \frac{I_{BH}}{n_{TC\ BH}} - k_{\text{вир}\ HH} \frac{I_{HH}}{n_{TC\ HH}}}{k_{\text{вир}\ BH} \frac{I_{BH}}{n_{TC\ BH}}} = \\ &= \frac{1,43 \frac{242,49}{40} - 0,572 \frac{6062,18}{400}}{1,43 \frac{242,49}{40}} = 1,155 \cdot 10^{-5}; \\ 1,155 \cdot 10^{-5} &< 0,01. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Уставка початкового струму спрацьовування  $I_{\partial 0}$  (2 ступень захисту) [12]:

$$I_{\partial 0} = 0,3 \cdot k_{\text{вир}\ BH} \frac{I_{BH}}{n_{TC\ BH}} = 0,3 \cdot 1,43 \frac{242,49}{40} = 2,6\text{ A}. \quad (3.12)$$

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.ПР | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 53   |

Уставка обмеження струму гальмування  $I_{с\text{ обм}}$  (2ступень захисту) [12]:

$$I_{с\text{ обм}} = \frac{I_{k\text{ max}}}{n_{ТС\text{ НН}}} = \frac{81573,08}{400} = 203,93\text{ А.} \quad (3.13)$$

Струм небалансу  $I_{НБ}$  приведений до НН [12]:

$$I_{НБ} = I_{НБ}^1 + I_{НБ}^2 + I_{НБ}^3. \quad (3.14)$$

Складова небалансу  $I_{НБ}^1$ , викликана похибками ТС [12]:

$$I_{НБ}^1 = K_{АП} K_{одн} e I_{КЗ\text{ max}} = 1 \cdot 0,2 \cdot 0,1 \cdot 81573,08 = 1631,46\text{ А}, \quad (3.15)$$

де  $K_{АП} = 1$ ,  $K_{одн} = 0,2$ ,  $e = 10\%$ .

Складова небалансу, викликана змінами коефіцієнта трансформації трансформатора при роботі РПН [12]:

$$I_{НБ}^2 = \Delta U_{РПН} I_{КЗ\text{ max}} = 0,18 \cdot 81573,08 = 14683,15\text{ А.} \quad (3.16)$$

Складова небалансу  $I_{НБ}^3$ , викликана неточністю вирівнювання вибраних коефіцієнтів трансформації трансформаторів струму [12]:

$$I_{НБ}^3 = \delta I_{\delta} I_{КЗ\text{ max}} \quad (3.17)$$

При  $\delta I_{\delta} = 1,155 \cdot 10^{-5}$  складовою можна знехтувати.

Струм небалансу:

$$I_{НБ} = I_{НБ}^1 + I_{НБ}^2 + I_{НБ}^3 = 1631,46 + 14683,15 = 16314,61\text{ А.} \quad (3.18)$$

Струм спрацьовування 2 ступені захисту в точці обмеження струму гальмування (рис. 3) визначається з урахуванням відбудови від  $I_{НБ}$  [12]:

$$I_{обм} = \frac{K_{над} K_{вир\text{ НН}} I_{НБ}}{n_{ТС\text{ НН}}} = \frac{1,2 \cdot 1,7 \cdot 16314,61}{400} = 83,2\text{ А}, \quad (3.19)$$

де  $K_{над} = 1,2$  – коефіцієнт відбудови.

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.ПР | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 54   |

Уставка коефіцієнта гальмування:

$$K_{\text{гальм}} = \frac{I_{\text{обм}} - I_{\text{дт0}}}{I_{\text{т обм}} - I_{\text{т0}}} = \frac{9,93 - 1,94}{30,75 - 4} = 0,3. \quad (3.20)$$

Коефіцієнт чутливості 2 ступені диференційного захисту  $K_{\text{ч диф зт}}$  визначається при мінімальному струмі КЗ на шинах НН трансформатора [12].

Струм гальмування  $I_{\text{гальм ч}}$ , при якому визначається коефіцієнт чутливості, ( $I = I_{\text{кз min}}$ ) при пошкодженні в зоні захисту (ТС з боку НН не обтікаються струмом КЗ) [12].

У нашому виконанні гальмування йде тільки за струмом сторони нижчої напруги трансформатора ( $K = 1$ ).

$$I_{\text{гальм ч}} = \frac{I_{\text{р max}}}{n_{\text{ТС НН}}} = \frac{2000}{400} = 5 \text{ A}. \quad (3.21)$$

Струм спрацювання захисту в точці характеристики, в якій визначається коефіцієнт чутливості, оскільки умова  $I_{\text{гальм ч}} \geq I_{\text{т0}}$  не виконується, то приймається [12]:

$$I_{\text{д сер ч}} = I_{\text{дт0}} = 2,6 \text{ A}. \quad (3.22)$$

Струм спрацювання захисту [12]:

$$I_{\text{д ч}} = I_{\text{кз min}} \frac{U_{\text{НН}}}{U_{\text{серВН}}} \cdot \frac{K_{\text{в ВН}}}{n_{\text{ТС ВН}}} = 29579,94 \frac{6}{150} \cdot \frac{1,43}{40} = 42,29 \text{ A}. \quad (3.23)$$

Коефіцієнт чутливості 2 ступені захисту [12]:

$$K_{\text{ч диф зт}} = \frac{I_{\text{д ч}}}{I_{\text{д сер ч}}} = \frac{42,29}{2,6} = 16,27. \quad (3.24)$$

Уставка струму спрацювання диференційного відсікання (1 ступені) [12]:

$$I_{\text{д відс}} = 3,5 K_{\text{в ВН}} k_{\text{сх}}^{(3)} \frac{I_{\text{НВ}}}{n_{\text{ТС ВН}}} = 3,5 \cdot 1,43 \cdot 1 \cdot \frac{242,49}{40} = 30,34 \text{ A}. \quad (3.25)$$

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.ПР | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 55   |

Коефіцієнт чутливості диференційного відсікання  $K_{ч відс}$  [12]:

$$K_{ч відс} = \frac{I_{дч}}{I_{д відс}} = \frac{42,29}{30,34} = 1,39. \quad (3.26)$$

Всі уставки прораховані.

### Висновки до розділу

У результаті виконання третього розділу обґрунтовано комплексну систему релейного захисту трансформатора ТРДН-63000/150/6 з розщепленою обмоткою, що експлуатується на ПС «ЮГОК-1 150/6 кВ». Основним захистом прийнято диференційний струмовий захист 87Т, що забезпечує миттєве відключення внутрішніх пошкоджень, доповнений захистом нульової послідовності 87N для підвищення чутливості до замикань на землю. Резервні функції покладено на максимальний струмовий захист 50/51, захист від замикань на землю 51N, тепловий захист 49, захист від несиметрії 46 та газовий захист 63, що формує багаторівневу систему безпеки. Для практичної реалізації обрано мікропроцесорне реле SIPROTEC 5 7UT86, яке дозволяє автоматично обирати напругу для регулювання залежно від розподілу навантаження між розщепленими обмотками. Виконано розрахунок уставок захисту: визначено коефіцієнти трансформації струмових трансформаторів, коефіцієнти вирівнювання з урахуванням групи з'єднання обмоток та роботи РПН, струм спрацьовування диференційного захисту з урахуванням небалансу. Проведено перевірку чутливості захистів за мінімальними струмами короткого замикання, підтверджено виконання умов селективності та надійності в усіх експлуатаційних режимах.

|     |      |          |       |      |                              |      |
|-----|------|----------|-------|------|------------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.ПР | Арк. |
|     |      |          |       |      |                              |      |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                              | 56   |

## ВИСНОВКИ

1. Проведено комплексну оцінку електроприймачів підстанції «ЮГОК-1 150/6 кВ» з урахуванням ліквідації агломераційної фабрики та перспективи введення фабрики огрудкування. На основі розрахунків методом коефіцієнта попиту обґрунтовано застосування двох силових трансформаторів ТРДН-63000/150/6 з розщепленою вторинною обмоткою, що забезпечує збалансоване та резервоване живлення промислових, транспортних та міських споживачів I–II категорій надійності.

2. Сформовано надійну конструктивну схему на базі полуторної комутації на стороні 150 кВ та секціонованих шин 6 кВ, яка гарантує безперервне живлення у нормальному, ремонтному та післяаварійному режимах. Розрахунок струмів короткого замикання підтвердив необхідність встановлення струмообмежуючих реакторів, а також дозволив виконати повний вибір та перевірку вимикачів, роз'єднувачів, трансформаторів струму і напруги, ізоляторів та збірних шин за умовами термічної й електродинамічної стійкості.

3. Обґрунтовано технічну доцільність впровадження комплектних конденсаторних установок для корекції низького початкового коефіцієнта потужності. Реалізовані заходи дозволили підвищити  $\cos \varphi$  до нормативного рівня, заданого енергосистемою, та знизити повну розрахункову потужність підстанції на 14,42 %, що суттєво розвантажує трансформаторне обладнання, знижує втрати активної енергії та вивільняє пропускну здатність кабельних ліній.

4. Виявлено критичні обмеження чинної системи на базі електромеханічних реле ДЗТ-11 (механічна інерційність, залежність характеристики спрацьовування від кута між струмами) та запропоновано перехід на цифрові технології. Розроблено багаторівневу схему захисту трансформатора з розщепленою обмоткою на базі мікропроцесорного терміналу SIPROTEC 5 7UT86, адаптовану до умов полуторної схеми, з функціями автоматичного вибору напруги для регулювання, адаптивного гальмування та інтеграції в загальну систему автоматизації підстанції.

|     |      |          |       |      |                             |      |
|-----|------|----------|-------|------|-----------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.В | Арк. |
|     |      |          |       |      |                             | 57   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                             |      |

5. Виконано повний інженерний розрахунок налаштувань релейного захисту: визначено коефіцієнти трансформації струмових трансформаторів, коефіцієнти вирівнювання з урахуванням групи з'єднання обмоток та положення регулювання під навантаженням, а також струми спрацьовування диференційного захисту з детальним аналізом складових небалансу. Перевірка чутливості за мінімальними струмами короткого замикання підтвердила надійне відмежування внутрішніх пошкоджень, стійкість до зовнішніх КЗ та пускових струмів намагнічування, що гарантує селективну, швидку та безаварійну експлуатацію модернізованого комплексу підстанції.

|     |      |          |       |      |                             |      |
|-----|------|----------|-------|------|-----------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.В | Арк. |
|     |      |          |       |      |                             | 58   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                             |      |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сергєєв П.В. Збагачення руд чорних металів. Донецьк: ДонНТУ, 2008. 68 с.
2. Південний ГЗК закрив агломераційний цех. *Metinvest*. URL: <https://metinvest.media/ua/page/yuzhnyy-gok-zakryl-aglomeracionnyy-ceh>
3. Мілих В.І., Павленко Т.П. Електропостачання промислових підприємств: Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей. Харків: ФОП Панов А.М., 2016. 272 с.
4. Козирський В.В., Волошин С.М. Основи електропостачання: підручник. К.: Компрінт, 2021. 497 с.
5. Пантелєєва І.В., Варшамова І.С. Розрахунок струмів коротких замикань на приєднаннях знижувальної підстанції 110/35/10 кВ. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2025. Вип. 2, № 14. С. 71–76. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2025.2.11>
6. Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем: навчальний посібник. Ч. 2 / укл.: Д.П. Козярьський, Е.В. Майструк, І.П. Козярьський. Чернівці: ЧНУ, 2019. 133 с.
7. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник. Львів: Львівська політехніка, 2013. 533 с.
8. Керівні вказівки щодо релейного захисту. Вип. 13Б. Релейний захист знижувальних трансформаторів та автотрансформаторів 110–500 кВ: Розрахунки. 1985. 96 с.
9. Eight typical transformer protection schemes with correctly selected relays. *Electrical Engineering Portal*. URL: <https://electrical-engineering-portal.com/transformer-protection-schemes> (дата звернення 21.05.2026)
10. Конспект лекцій з дисципліни «Електрична частина станцій і підстанцій» для студентів напряму 6.050701 – електротехніка та електротехнології / укл.: Хмельницький Є.Д. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2014. 104 с.

|     |      |          |       |      |                             |      |
|-----|------|----------|-------|------|-----------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.Л | Арк. |
|     |      |          |       |      |                             | 59   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                             |      |

11. SIPROTEC 5 Диференційний захист трансформатора 7UT82, 7UT85, 7UT86, 7UT87. Посібник. 2858 с.

12. Методичні вказівки по вибору уставок диференційного захисту трансформаторів, що реалізується за допомогою пристроїв РС83-ДТ2. К.: РЗА Системз, 2012. 36 с.

|     |      |          |       |      |                             |      |
|-----|------|----------|-------|------|-----------------------------|------|
|     |      |          |       |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с.12.Л | Арк. |
|     |      |          |       |      |                             | 60   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                             |      |