

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Електротехнічний факультет

(повне найменування факультету)

Електричні та електронні апарати

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

бакалавр

(ступінь вищої освіти)

на тему «Низьковольтний комплектний розподільний пристрій 0,4 кВ, 1000 А для застосування в трансформаторних підстанціях»

Виконав: студент 4 курсу, групи E-412

спеціальності 141- «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Електричні та електронні апарати

Віталій БОЛТОК

(ім'я та прізвище)

Керівник Людмила СКРУПСЬКА

(ім'я та прізвище)

Рецензент Олександр НОВІКОВ

(ім'я та прізвище)

2026 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Електротехнічний
 Кафедра Електричні та електронні апарати
 Ступінь вищої освіти (освітній ступінь) бакалавр
 Спеціальність 141 "Електроенергетика, електротехніка, та електромеханіка"
 (код і назва)
 Освітня програма (спеціалізація) Електричних та електронних апаратів
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Андрієнко П.Д.

“24” квітня 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

Болток Віталію Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Низьковольтний комплектний розподільний пристрій 0,4 кВ, 1000 А для застосування в трансформаторних підстанціях
 керівник проекту (роботи) Скрупська Людмила Степанівна,
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
 затверджені наказом вищого навчального закладу від “22” 04 2026 року, № 189
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 03.06.2026 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Номінальна напруга пристрою 0,4кВ, номінальний тривалий струм 1000А, діюче значення струму короткого замикання 20 кА, розрахункова температура повітря в об'ємі шафи 60°С, геометрична довжина струмопровідної шини 0,4 м.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Аналіз конструктивних та експлуатаційних рішень низьковольтних комплектних розподільчих пристроїв ; 2 Конструктивне виконання та вибір основних елементів низьковольтного комплектного розподільчого пристрою; 3 Електричні та теплові розрахунки елементів низьковольтного комплектного розподільчого пристрою . 4 Аналіз режимів роботи та оцінка надійності низьковольтного комплектного розподільчого пристрою.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
1. НУЗП.270849.003 СК – Низьковольтний комплектний пристрій – 1 арк., А1;
2. НУЗП. 2070849.003 СК – Панель захисту – 1 арк., А1; 3. ГКІЮ. .2070849.003
01Г – Блок високої напруги АВД – 1 арк., А2 та НУЗП. .2070849.003 02Г – Блок управління АВД – 1 арк., А2; 4. НУЗП. 713643.003 – Колесо – 1 арк., А3; НУЗП.
745782.003 – Скоба – 1 арк., А3; НУЗП. 713513.003 – Булавка – 1 арк., А3; НУЗП.
753735.003 – Ручка – 1 арк., А3.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
Технічний	Скрупська Людмила Степанівна, ст. викл	24.04.26	03.06.26
			

7. Дата видачі завдання 24.04.2026 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Техніко-економічне обґрунтування проекту	19.05.2026	
2	Попередній розрахунок головних елементів апарата	21.05.2026	
3	Повірний розрахунок з висновками про роботоспроможність елементів апарата	25.05.2026	
4	Виконання загального виду виробу, робочих креслень головних вузлів та деталей апарата	29.05.2026	
5	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки проекту	01.06.2026	
6	Узгодження проекту з керівником	03.06.2026	
7	Нормоконтроль та затвердження завідувачем кафедри	05.06.2026	
8	Перевірка керівником пояснювальної записки на антиплагіат	08.06.2026	
9	РЕЦЕНЗУВАННЯ ПРОЄКТУ	09.06.2026	
10	ЗАХИСТ ПРОЄКТУ	з 15.06.2026	
11	Здача бакалаврської роботи до репозитарію	29.06.2026	

Студент

 (підпис) Віталій БОЛТОК
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проекту (роботи)

 (підпис) Людмила СКРУПСЬКА
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 78 с., 8 рис., 21 табл., 13 джерел.

НИЗЬКОВОЛЬТНИЙ КОМПЛЕКТНИЙ ПРИСТРІЙ (НКП), НОМІНАЛЬНА НАПРУГА, СТРУМОВИЙ РЕЖИМ, ЕЛЕКТРИЧНА ІЗОЛЯЦІЯ, ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНА СТІЙКІСТЬ, СИСТЕМА ШИН, ТЕРМІЧНА ДІЯ СТРУМІВ КЗ, ПРИЙМАЛЬНО-ЗДАВАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ.

Об'єкт дослідження – процес проектування та аналізу експлуатаційних характеристик низьковольтного комплектного пристрою (НКП), розрахованого на роботу в мережах з номінальною напругою $U_{\text{ном}} = 0,4$ кВ та тривалим допустимим струмом $I_{\text{ном}} = 1000$ А.

Мета роботи полягає у комплексному інженерному розрахунку та конструктивному розробленні НКП з оптимізованими параметрами. Дослідження спрямоване на мінімізацію втрат енергії, забезпечення селективності захисту та підвищення надійності комутаційних вузлів у специфічних умовах трансформаторних підстанцій.

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку енергетики НКП є базовими елементами систем розподілу електроенергії, що відповідають за безпеку та безперебійність живлення промислових і побутових споживачів. Підстанційні вузли на 0,4 кВ зі струмами до 1000 А вимагають особливого підходу до проектування через високі рівні струмів короткого замикання (КЗ) та значні теплові навантаження на контактні з'єднання та шинні системи.

Методологія дослідження. В роботі використано розрахунково-графічний метод, що базується на аналітичному обчисленні електричних та теплових параметрів з наступною візуалізацією результатів. Цей підхід дозволяє:

1. Визначити параметри електричних режимів за допомогою математичних моделей.

2. Верифікувати результати через побудову характеристик спрацювання захисних апаратів та температурних графіків.

Завдання проектування:

а) Аналітичне обґрунтування: Отримання масиву розрахункових даних щодо струмів навантаження та струмів КЗ для вибору апаратури.

б) Конструктивне розроблення: Створення компоувальних рішень НКП, що забезпечують покращені техніко-економічні показники (зменшення металоємності при збереженні жорсткості каркаса).

в) Технологічне забезпечення: Розробка регламенту приймально-здавальних випробувань (ПЗВ) з оформленням маршрутних та операційних карт для умов серійного виробництва згідно з вимогами ДСТУ EN 61439-1.

Результати та висновки. Отримані дані спроектованого пристрою дозволяють інтегрувати НКП у сучасні автоматизовані системи контролю (АСКОЕ), а розроблена технологічна документація забезпечує високу повторюваність та якість збірки в умовах промислового підприємства. Наукова новизна полягає у вдосконаленні алгоритму перевірки контактних з'єднань на термічну стійкість при тривалій експлуатації в умовах пікових навантажень..

ЗМІСТ

Реферат.....	4
Вступ.....	8
1 Аналіз конструктивних та експлуатаційних рішень низьковольтних комплектних розподільчих пристроїв	10
1.1 Аналіз технічних характеристик і функціональних можливостей низьковольтних комплектних розподільчих пристроїв	10
1.2 Призначення, склад та принцип дії НКРП 0,4 кВ для трансформаторних підстанцій.....	13
1.3 Конструктивні та технологічні особливості сучасних НКРП	17
1.4 Формування вихідних даних і вимог до пристрою, що проектується.....	21
2 Конструктивне виконання та вибір основних елементів низьковольтного комплектного розподільчого пристрою.....	24
2.1 Загальна компоновка шафи НКРП та вибір конструктивного виконання.....	24
2.2 Вибір струмопровідної системи та апаратури комутації	28
2.3 Вибір ізоляційних матеріалів і конструктивних елементів.....	31
2.4 Забезпечення електричної та механічної надійності конструкції.....	34
3 Електричні та теплові розрахунки елементів низьковольтного комплектного розподільчого пристрою	38
3.1 Розрахунок і перевірка шин на допустимий нагрів при номінальному струмі	38
3.2 Перевірка електротермічної стійкості струмопровідних частин при короткому замиканні	42
3.3 Розрахунок електродинамічної стійкості шин і струмопровідних елементів	45
3.4 Перевірка струмопровідних частин на відсутність вібрації та резонансних явищ	48
3.5 Розрахунок розбірних контактних з'єднань і оцінка	

	7
контактних втрат	52
3.6 Вибір та розрахунок ізоляційних елементів	
струмопровідної системи	55
4 Аналіз режимів роботи та оцінка надійності	
низьковольтного комплектного розподільчого пристрою.....	59
4.1 Аналіз нормального та післяаварійного режимів роботи НКРП.....	59
4.2 Оцінка теплового стану шафи при тривалій роботі під навантаженням.....	62
4.3 Перевірка стійкості конструкції при струмах короткого замикання.....	65
4.4 Оцінка надійності контактних з'єднань та струмопровідної системи.....	67
4.5 Відповідність проєктованого пристрою вимогам ПУЕ, ДСТУ та ІЕС.....	70
Висновки.....	74
Перелік джерел посилання.....	77

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку цивілізації електроенергетика виступає фундаментальним базисом глобальної економіки. Електрична енергія, завдяки своїй здатності до трансформації в інші види енергії та можливості передачі на значні відстані з відносно високим коефіцієнтом корисної дії, є універсальним енергоносієм. Масштабна електрифікація охопила всі сфери людської діяльності: від складних промислових технологічних циклів до забезпечення життєдіяльності побутового сектора, включаючи системи опалення, освітлення, транспортну інфраструктуру та засоби масових комунікацій.

Ефективне функціонування цієї системи неможливе без надійної ланки розподілу енергії. У процесі проектування трансформаторних підстанцій (ТП) для об'єктів критичної інфраструктури, зокрема промислових підприємств та метрополітенів, пріоритетним є використання низьковольтних комплектних пристроїв (НКП) внутрішнього та зовнішнього виконання. Застосування комплектних пристроїв заводської готовності є ключовим фактором індустріалізації будівництва, що дозволяє суттєво скоротити терміни монтажних робіт та забезпечити високу якість збірки за рахунок механізації виробничих процесів.

Сучасні тенденції розвитку енергообладнання спрямовані на впровадження модульних конструкцій у вигляді шаф, камер та чарунок. Такі рішення гарантують високу експлуатаційну надійність та безпеку обслуговуючого персоналу. Особливого значення набуває проектування пристроїв для специфічних умов, таких як підземні споруди метрополітену. У цьому контексті параметри $U_{\text{ном}} = 0,4 \text{ кВ}$ та $I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$ є стратегічно важливими. Вони визначають не лише пропускну здатність системи, а й рівень електродинамічної стійкості конструкції, що безпосередньо впливає на безпеку пасажироперевезень та стабільність роботи тягових і понижувальних підстанцій.

Таблиця 1. Роль технічних параметрів у забезпеченні надійності НКП

Параметр	Технічне значення	Вплив на безпеку
Номинальна напруга U_{nom}	Визначає необхідний рівень електричної міцності ізоляції	Запобігання електричним пробоям та виникненню відкритої дуги
Номинальний струм I_{nom}	Визначає площу поперечного перерізу струмовідних шин	Контроль теплових режимів та забезпечення пожежної безпеки
Струм короткого замикання I_{sc}	Визначає механічну та термічну міцність конструкції	Стійкість до руйнування при виникненні аварійних режим

Відповідно до нормативних вимог, будь-яке електротехнічне обладнання, призначене для розподілу енергії, повинно проходити суворий цикл приймально-здавальних випробувань (ПЗВ). Це є гарантією відповідності реальних характеристик виробу розрахунковим значенням та запорукою безаварійної роботи у кінцевого споживача.

Метою даної роботи є проектування НКП 0,4 кВ, 1000 А, що передбачає вирішення ряду інженерних задач:

1. Тепловий розрахунок струмовідних частин для забезпечення роботи в режимі $I_{nom} = 1000$ А без перевищення допустимих температур.
2. Вибір комутаційної апаратури з урахуванням селективності та здатності витримувати ударні струми КЗ.
3. Розробка конструкторських рішень, що оптимізують габарити пристрою при збереженні зручності сервісного обслуговування.

Для досягнення поставленої мети у наступних розділах проведено ґрунтовний огляд науково-технічної літератури, обґрунтовано методику розрахунків та детально описано процес проектування низьковольтного комплектного пристрою з покращеними експлуатаційними показниками.

1 АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РІШЕНЬ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ КОМПЛЕКТНИХ РОЗПОДІЛЬЧИХ ПРИСТРОЇВ

Проектування низьковольтних комплектних розподільчих пристроїв є складним інженерним завданням, що потребує врахування електричних, теплових, механічних та експлуатаційних чинників. Сучасні НКРП застосовуються як ключові елементи систем електропостачання трансформаторних підстанцій і забезпечують приймання, розподіл та захист електричної енергії в мережах напругою до 1 кВ.

У цьому розділі виконується аналіз існуючих конструктивних рішень і функціональних можливостей низьковольтних комплектних розподільчих пристроїв, що застосовуються в промислових і енергетичних установках. Розглядаються основні типи компонок, струмопровідних систем, комутаційної апаратури та захисних елементів. Особливу увагу приділено нормативним вимогам, що регламентують параметри надійності, електробезпеки та довговічності НКРП.

Результатом розділу є формування обґрунтованих вихідних даних і технічних вимог до пристрою, який проектується, з урахуванням умов експлуатації в складі трансформаторної підстанції.

1.1 Аналіз технічних характеристик і функціональних можливостей низьковольтних комплектних розподільчих пристроїв

Сучасний стан науково-технічної літератури в галузі електротехніки свідчить про те, що низьковольтні комплектні пристрої (НКП) пройшли шлях від простих комутаційних щитів до інтелектуальних систем розподілу енергії. Дослідження в цій сфері охоплюють широкий спектр конструктивних особливостей, експлуатаційних параметрів та методів підвищення надійності.

Аналіз технічного потенціалу НКП на номінальний струм $I_n = 1000$ А дозволяє виділити наступні фундаментальні аспекти:

1. Енергетичні параметри та навантажувальна здатність.

Основними детермінантами при проектуванні НКП є номінальна напруга U_n та максимальна потужність, яку здатна пропустити шинна система пристрою. Для пристроїв на 1000 А критично важливим є розрахунок термічної стійкості. Згідно з ДСТУ EN 61439-1, вибір перерізу головних шин повинен забезпечувати стабільний тепловий режим пристрою:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

де:

Q — кількість теплоти, що виділяється;

I — діюче значення струму;

R — активний опір провідника;

t — час проходження струму.

2. Розширення функціонального діапазону. Сучасні НКП забезпечують не лише механічне підключення споживачів, а й здійснюють селективний моніторинг параметрів мережі. Функціональність охоплює моніторинг якості напруги, автоматичне введення резерву (АВР) та диспетчеризацію навантажень.

3. Корекція коефіцієнта потужності та енергоефективність. Аналіз літератури показує тенденцію до інтеграції модулів компенсації реактивної потужності безпосередньо в структуру НКП. Це дозволяє оптимізувати коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ і знизити загальні втрати потужності ΔP в трансформаторній підстанції:

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot r$$

де r — питомий опір лінії.

Оптимізація цього показника є пріоритетною для підстанцій метрополітену, де навантаження має виражений індуктивний характер.

4. *Інтелектуальне управління та мікропроцесорна автоматизація.*

Цифровізація розподільчих мереж вимагає впровадження мікропроцесорних реле та контролерів, що дозволяють реалізувати складні алгоритми логічного селективного захисту. Це забезпечує дистанційне управління комутаційними апаратами та предиктивну діагностику обладнання.

5. *Експлуатаційна витривалість в агресивних середовищах.*

Для об'єктів підземної інфраструктури (метрополітенів) досліджується стійкість оболонок за класифікацією IP (International Protection). Важливим є врахування впливу вологості, вібрацій та температури навколишнього середовища T_{amb} на електричну міцність ізоляції та стабільність контактних з'єднань.

6. *Комплексна система релейного захисту та автоматики (РЗА)*

.НКП оснащуються багаторівневими системами захисту. Ключовим параметром при цьому є гранична комутаційна здатність вимикачів I_{cu} , яка повинна перевищувати розрахунковий очікуваний струм короткого замикання I_k :

$$I_{cu} \geq I_k$$

Таблиця 1.1 — Техніко-функціональні вимоги до проектуваного НКП 0,4 кВ

Категорія аналізу	Технічний показник	Функціональне значення
Електрична міцність	U_i (напруга ізоляції)	Гарантування відсутності пробоїв при перенапругах
Термічна стійкість	I_{cw} (короткочасний струм)	Здатність шин витримувати теплову дію струму КЗ
Механічна тривкість	i_p (ударний струм)	Стійкість конструкції до електродинамічних зусиль
Кліматичне виконання	Категорія розміщення (УХЛ)	Надійність роботи в специфічних умовах ТП

7. *Системна інтеграція та електромагнітна сумісність.* Аналіз можливостей спільної роботи НКП з джерелами безперебійного живлення, дизель-генераторними установками та системами верхнього рівня (SCADA) є необхідною умовою для створення сучасних систем енергозабезпечення. Досліджуються методи екранування та фільтрації для забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) мікропроцесорних блоків захисту.

Одже: Проведений аналіз науково-технічних джерел підтверджує, що сучасне проєктування НКП на 1000 А вимагає комплексного підходу, який поєднує класичні методи електротехнічних розрахунків з новітніми цифровими технологіями управління. Отримані дані щодо важливості координації параметрів I_n , U_n та I_{sc} формують теоретичний фундамент для подальшої розробки конструкторської документації та вибору оптимальної специфікації обладнання, що забезпечить високі техніко-економічні показники пристрою.

1.2 Призначення, склад та принцип дії НКРП 0,4 кВ для трансформаторних підстанцій

Низьковольтні комплектні пристрої (рис. 1), що функціонують у складі трансформаторних підстанцій (ТП) напругою 0,4 кВ, є ключовим вузлом, який здійснює прийом електричної енергії від понижувальних силових трансформаторів та її подальший розподіл між кінцевими споживачами або груповими розподільчими пунктами. Згідно з ДСТУ EN 61439-1, головним призначенням таких пристроїв є не лише комутація ланцюгів, а й забезпечення комплексного захисту мережі від аномальних режимів роботи.

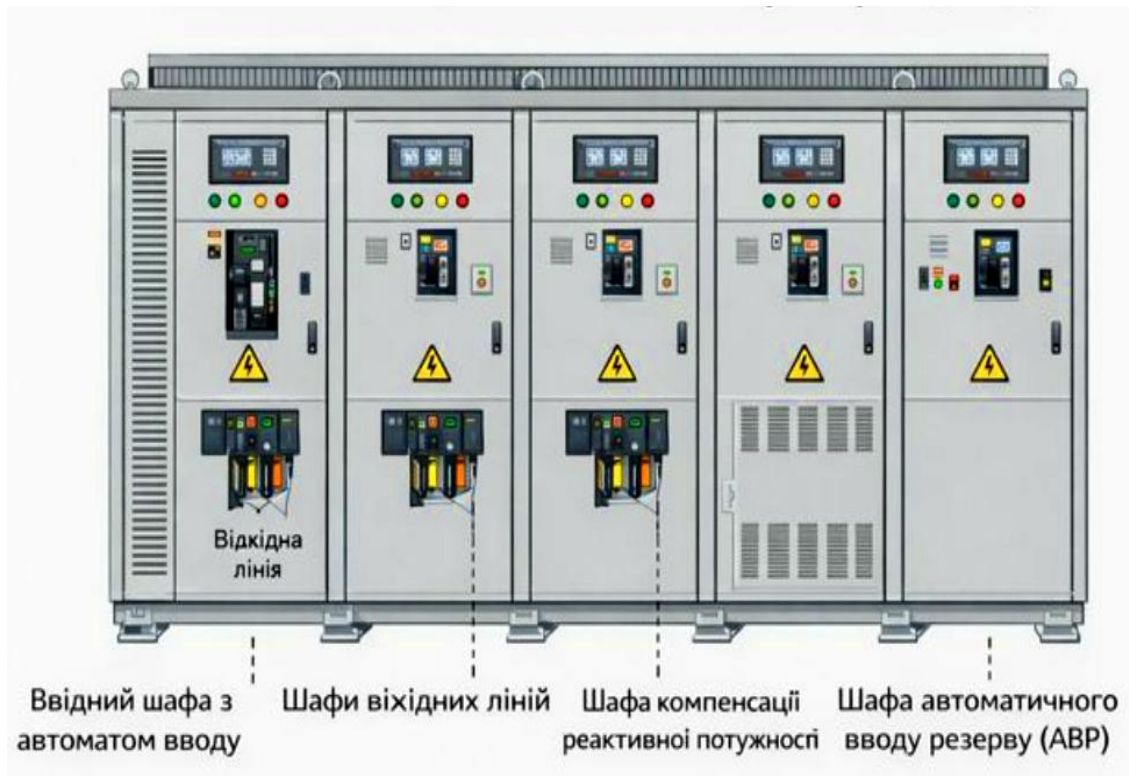


Рисунок 1.1 - Низьковольтні комплектні пристрої (НВП)

Призначення та функціональні задачі

Проектований НВП на 1000 А призначений для виконання таких функцій:

- **Прийом енергії:** з'єднання з низьковольтними виводами трансформатора за допомогою шинних мостів або кабельних ліній.
- **Розподіл:** живлення фідерних ліній різної потужності.
- **Захист:** автоматичне вимкнення при виникненні струмів короткого замикання (I_{sc}) або перевантажень ($I > I_{ном}$).
- **Облік та контроль:** вимірювання параметрів електричної енергії (напруги, струму, активної та реактивної потужності).

Склад та конструктивні вузли

Конструктивно НВП на струм 1000 А виконується у вигляді металевої шафи (корпусу), що розділена на функціональні відсіки для забезпечення локалізації можливої електричної дуги та зручності обслуговування.

До основного складу пристрою входять:

1. **Ввідний апарат:** зазвичай автоматичний вимикач повітряного

типу (АСВ) або вимикач у литому корпусі (МССВ) з номінальним струмом $I_n = 1000 \text{ A}$, оснащений мікропроцесорним розчеплювачем.

2. **Система збірних шин:** комплект мідних або алюмінієвих провідників, що розраховані на тривале проходження номінального струму та механічну стійкість до ударних струмів КЗ.

3. **Апаратура розподілу (лінійні фідери):** автоматичні вимикачі або блоки "запобіжник-вимикач" для захисту ліній, що відходять.

4. **Вузол вимірювання та автоматики:** трансформатори струму (ТТ), контролери керування та прилади комерційного або технічного обліку.

Перевірка обраного перерізу шин за умовою нагріву в тривалому режимі здійснюється за виразом:

$$I_p \leq k_1 \cdot k_2 \cdot I_{adm} \quad (1.1)$$

де:

I_p — розрахунковий струм навантаження лінії;

I_{adm} — допустимий тривалий струм для обраного профілю шини за каталожними даними;

k_1, k_2 — поправочні коефіцієнти на температуру середовища та спосіб монтажу відповідно.

Принцип дії пристрою

Алгоритм функціонування НКП базується на принципі паралельного розподілу енергії від спільної шинної магістралі до окремих відгалужень. У нормальному режимі ввідний автоматичний вимикач знаходиться у замкненому стані, забезпечуючи живлення збірних шин. При цьому здійснюється безперервний моніторинг параметрів мережі.

При виникненні аварійного режиму, наприклад, перевищення струму понад установку спрацювання I_{set} , спрацьовує відповідний захисний орган:

$$I_{fault} \geq k_s \cdot I_{set} \quad (1.2)$$

де:

I_{fault} — фактичний струм у зоні пошкодження;

k_s — коефіцієнт надійності (чутливості) захисту.

Для трансформаторних підстанцій метрополітену або промислових об'єктів часто застосовується схема з двома вводами та секційним вимикачем. Принцип дії системи автоматичного введення резерву (АВР) полягає у контролі напруги на вводах: при зникненні живлення на одному з них, логічний контролер ініціює відключення ввідного апарату та вмикання секційного, відновлюючи живлення знеструмленої секції шин.

Технічні параметри системи шин

Система шин повинна задовольняти вимогам термічної стійкості, що розраховується за формулою:

$$A_{min} = \frac{I_{st} \cdot \sqrt{t_k}}{C} \quad (1.3)$$

де:

A_{min} — мінімально допустимий переріз провідника, мм²;

I_{st} — середньоквадратичне значення струму КЗ, А;

t_k — час відключення КЗ захисним апаратом, с;

C — коефіцієнт, що враховує теплофізичні властивості матеріалу шини (для міді $C \approx 176$).

Таблиця 1.2 — Основні технічні характеристики елементів НКП

Елемент пристрою	Позначення	Параметр / Характеристика
Ввідний вимикач	QF ₁	Виконує функцію захисту та оперативного роз'єднання під навантаженням
Трансформатор струму	ТА ₁ ... ТА ₃	Масштабування струму для приладів обліку (клас точності 0,5 або 0,5s)
Збірні шини	L ₁ , L ₂ , L ₃ , N, PE	Виконують роль магістрального провідника енергії всередині шафи
Реле контролю напруги	KV	Моніторинг асиметрії фаз та допустимих відхилень напруги

Використання НКП з номінальним струмом 1000 А дозволяє забезпечити високу енергоефективність розподілу на рівні 0,4 кВ, мінімізуючи втрати на перехідних опорах контактних з'єднань завдяки застосуванню сучасних методів механічного стискання та антикорозійних покриттів шин (лудіння).

1.3 Конструктивні та технологічні особливості сучасних НКП

Проектований низьковольтний комплектний пристрій (НКП) (рис. 1.2) призначений для прийому та розподілу трифазного змінного струму промислової частоти з номінальною напругою $U_n = 380$ В. Особливістю даної розробки є її експлуатація в системі з ізольованою нейтраллю (тип заземлення системи — IT), що є критично важливим для забезпечення безперебійності живлення та електробезпеки в специфічних умовах підземних об'єктів метрополітену.



Рисунок 1.2 - Конструктивна база НКП

Конструктивне виконання та умови експлуатації

Конструктивна база НКП являє собою модульну архітектуру, що складається з 12 функціонально поєднаних шаф. Така багатопанельна

структура дозволяє гнучко розподіляти апаратуру введення, секціонування та фідерні лінії. Шафи монтуються в один ряд і об'єднуються в єдиний механічний та електричний блок за допомогою спеціалізованих міжшафових з'єднувачів.

Стабільне функціонування обладнання гарантується за дотримання наступних кліматичних та геодезичних параметрів:

- висота над рівнем моря не повинна перевищувати $h \leq 1000$ м;
- діапазон температур навколишнього повітря T_{amb} становить від $+1$ °C до $+40$ °C.

Слід підкреслити, що згідно з вимогами вибухозахисту та промислової санітарії, пристрій не допускається до експлуатації в середовищах із високою концентрацією струмопровідного пилу, агресивних газів, що викликають корозію металів, або в потенційно вибухонебезпечних зонах.

Механічна частина та внутрішнє облаштування

Корпуси шаф мають жорсткий металевий каркас. Верхня частина обладнана знімними кришками з рим-болтами, які виконують подвійну функцію: фіксацію елементів даху та забезпечення надійного захоплення під час вантажно-розвантажувальних і транспортних операцій. Задні та бокові стінки є знімними панелями, що фіксуються гвинтовими з'єднаннями, забезпечуючи ступінь захисту оболонки згідно з IP31.

Доступ до апаратури здійснюється через фасадні двері, оснащені замками з уніфікованим ключем. Силові та контрольні кабелі вводяться через герметизовані отвори в основі (дні) шафи. Для надійної фіксації кабелів передбачені нижні механічні затискачі, що запобігають передачі механічних зусиль на клемні блоки та шини.

Заземлення реалізовано через магістральну шину РЕ, до якої приєднані всі металеві частини корпусу та дверей. Зовнішнє підключення до контуру заземлення підстанції здійснюється болтовим з'єднанням M12.

Шинна система та контактні з'єднання

Збірні шини виготовлені з високоякісної електротехнічної міді. Маркування фаз L1, L2, L3 (або А, В, С) виконано згідно з вимогами ПУЕ. Для безпеки обслуговуючого персоналу шини приховані за захисними діелектричними екранами.

Особлива увага приділена стабільності перехідного опору контактів R_{con} . Відповідно до положень стандартів, силові з'єднання зафіксовані болтовими комплектами з використанням тарільчастих пружинних шайб (шайб Гровера або Бельвіля).

$$F_{\text{con}} \approx \text{const} \Rightarrow R_{\text{con}} \approx \text{const} \quad (1.4)$$

де F_{con} — сила стискання контактів.

Використання тарільчастих шайб компенсує термічні деформації міді при циклічних навантаженнях, що дозволяє класифікувати ці з'єднання як такі, що не потребують періодичного підтягування (необслуговувані).

Монтаж допоміжних кіл та керування

Для кіл автоматики, сигналізації та вимірювання застосовано сучасні технологічні рішення:

1. Розміщення провідників у перфорованих коробах.
2. Обов'язкове опресування кінців жил втулковими наконечниками.
3. Використання гофрованих шлангів для захисту дротів у місцях переходу на рухомі елементи (двері).
4. Нанесення термотрансферного маркування, стійкого до стирання.

Функціональні модулі та автоматика

НКП оснащений комбінованою системою захисту, що включає:

- **Ввідні та секційні апарати:** Автоматичні вимикачі (наприклад, серії *Masterpact* або аналоги) висувного виконання. Вони обладнані

електроприводами для реалізації алгоритмів дистанційного керування та системи АВР.

- **Система АВР:** Спроекована для автоматичного відновлення живлення секції шин шляхом замикання секційного вимикача Q_s при зникненні напруги на одному з вводів.

Стан комутаційних апаратів візуалізується на фасаді за допомогою активних менмосхем. Світлодіодна індикація стандартно використовує кольорову схему:

- **Червоний сегмент:** апарат увімкнено (положення "ON");
- **Зелений сегмент:** апарат вимкнено (положення "OFF").

Інтелектуальний моніторинг та зв'язок

Управління інтелектуальними функціями здійснює централізований логічний контролер. Він збирає дані з мультиметрів та модулів контролю через локальну мережу (зазвичай інтерфейс RS-485 з протоколом Modbus RTU).

Таблиця 1.3 — Основні контрольовані параметри та технічні характеристики НКП

Параметр	Позначення	Метод контролю або значення
Фазний струм	I_a, I_b, I_c	Трансформатори струму ТА та цифровий мультиметр
Лінійна напруга	U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}	Модуль багатофункціонального контролю напруги
Опір ізоляції	R_{iso}	Пристрій постійного моніторингу в системі ІТ
Стан вимикача	S_{pos}	Дискретні входи мікропроцесорного контролера
Температура середовища	T_{amb}	Датчики системи кліматичного контролю шафи

Ввідна шафа та захист

Ввідна шафа є ключовим елементом, що приймає потужність від силового трансформатора. У ній розміщено:

1. Автоматичний вимикач: наприклад, Schneider Electric *Interpact* або *Comract*, що забезпечує комутацію та видимий розрив (для безпечного ремонту).

2. Вимірювальні трансформатори: їх вторинні обмотки підключені до мультиметра для розрахунку споживаної потужності P :

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi \quad (1.5)$$

3. Контроль ізоляції: Оскільки система працює за схемою IT, постійний моніторинг R_{iso} є критичним. При зниженні опору нижче встановленої межі (наприклад, 50 кОм) активується попереджувальна сигналізація "Витік на землю".

Для живлення внутрішніх потреб (освітлення шафи, підігрів, ланцюги керування) встановлено знижувальний трансформатор 380/220 В, який забезпечує гальванічну розв'язку та безпеку оперативних кіл.

1.4 Формування вихідних даних і вимог до пристрою, що проектується

Процес інженерного проектування низьковольтного комплектного пристрою (НКП) базується на чітко визначеному масиві вхідних параметрів, які детермінують вибір комутаційної апаратури, розрахунок перерізу шин та конструктивне виконання шафи введення. Вихідні дані враховують як електричні режими роботи мережі, так і умови експлуатації та виробничу програму підприємства.

Для розробки шафи введення розподільчого пристрою встановлено наступні базові параметри:

1. Електричні параметри мережі. Номінальна напруга $U_{\text{nom}} = 0,4$ кВ при стандартній частоті мережі $f = 50$ Гц відповідає загальноприйнятим стандартам розподільчих мереж низької напруги. Розрахунковий номінальний струм $I_{\text{nom}} = 1000$ А вимагає застосування потужних ввідних апаратів та магістральних шин з відповідною навантажувальною здатністю.

2. Стійкість до аварійних режимів. Важливим критерієм є здатність пристрою витримувати термічні та динамічні навантаження при виникненні коротких замикань. Розрахунковий струм КЗ становить $I_{\text{kz}} = 20$ кА при тривалості його дії $t_{\text{ts}} = 3$ с.

3. Теплофізичні та конструктивні умови. Розрахункова температура всередині оболонки прийнята на рівні $T_{\text{in}} = 60$ °С, що враховує тепловиділення від силового обладнання та обмежений природний теплообмін. Довжина ділянки головної струмопровідної шини складає $L_{\text{bus}} = 0,4$ м.

4. Виробничі показники. Проект передбачає серійний тип виробництва з річною програмою випуску $N_{\text{year}} = 55$ одиниць. Сумарна потужність технологічного обладнання, задіяного у виробничому циклі, складає $P_{\text{n}} = 30$ кВт.

Узагальнені вихідні дані для проектування зведені у таблицю 1.4.

Таблиця 1.4 — Зведена відомість вихідних даних для розробки НКП

Найменування параметра	Символьне позначення	Одиниця виміру	Значення
Номінальна напруга пристрою	U_{nom}	кВ	0,4
Номінальний тривалий струм	I_{nom}	А	1000
Номінальна частота мережі	f	Гц	50

Найменування параметра	Символьне позначення	Одиниця виміру	Значення
Діюче значення струму короткого замикання	I_{kz}	кА	20
Тривалість термічної стійкості до струмів КЗ	t_{ts}	с	3
Розрахункова температура повітря в об'ємі шафи	T_{in}	°C	60
Геометрична довжина струмопровідної шини	L_{bus}	м	0,4
Програма річного випуску продукції	N_{year}	шт.	55
Встановлена потужність виробничого устаткування	P_n	кВт	30

Ці дані є основою для подальшої перевірки провідників на термічну стійкість.

Окрім кількісних показників, до пристрою висуваються вимоги щодо надійності контактних з'єднань та селективності захисту. Згідно з ПУЕ, обрана апаратура повинна не лише витримувати вказаний струм I_{nom} , але й забезпечувати координацію захистів з вищестоящими та нижчестоящими вузлами системи енергопостачання.

2 КОНСТРУКТИВНЕ ВИКОНАННЯ ТА ВИБІР ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НИЗЬКОВОЛЬТНОГО КОМПЛЕКТНОГО РОЗПОДІЛЬЧОГО ПРИСТРОЮ

Надійність та ефективність роботи низьковольтного комплектного розподільчого пристрою значною мірою визначається правильним вибором конструктивного виконання та складових елементів. Рациональна компоновка шафи, обґрунтований вибір струмопровідних частин, апаратури керування і захисту дозволяють забезпечити відповідність пристрою вимогам електробезпеки, теплової стійкості та зручності експлуатації.

У даному розділі розглядається конструктивна структура проєктованого НКРП 0,4 кВ, 1000 А, визначається його загальна компоновка та принцип розміщення основних вузлів. Обґрунтовується вибір струмопровідної системи, комутаційних апаратів, ізоляційних матеріалів та допоміжних конструктивних елементів з урахуванням номінальних струмів, умов монтажу та експлуатації.

Розділ формує конструктивну основу для подальшого виконання електричних і теплових розрахунків та оцінки працездатності пристрою в різних режимах роботи.

2.1 Загальна компоновка шафи НКРП та вибір конструктивного виконання

Проектування конструктивної частини низьковольтного комплектного пристрою (НКП) на номінальний струм $I_{\text{ном}} = 1000$ А вимагає врахування не лише ергономічних аспектів, а й суворих вимог до електродинамічної стійкості, теплового режиму та зручності оперативного обслуговування. Згідно з ДСТУ EN 61439-1, конструювання пристрою (рис.2.1) має забезпечувати належний рівень внутрішнього секціонування для захисту

персоналу та обмеження поширення електричної дуги.

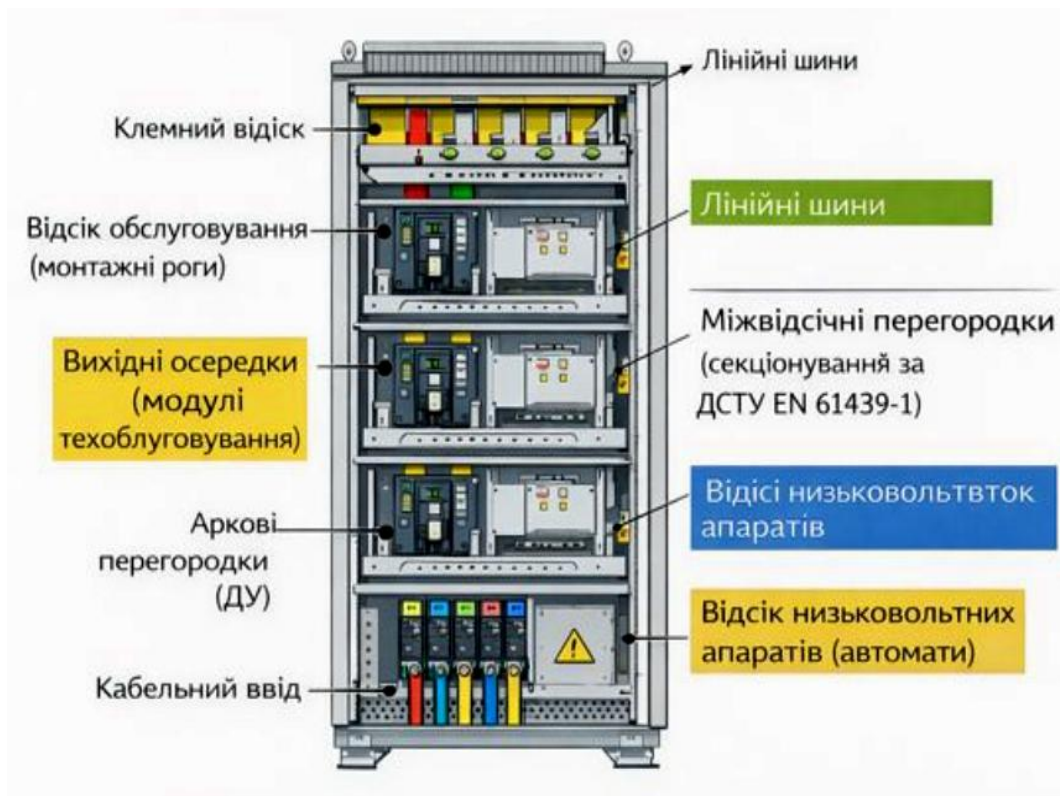


Рисунок 2.1 - Загальна компоновка шафи НКРП

Обґрунтування вибору конструктиву

Для реалізації шафи введення обрано металеву конструкцію підлогового виконання з модульним каркасом. Такий підхід дозволяє інтегрувати НКП у загальну лінійку розподільного щита трансформаторної підстанції. Основним конструктивним рішенням є поділ внутрішнього простору на три ключові функціональні зони (секції):

1. Комутаційний відсік: призначений для розміщення силового автоматичного вимикача на 1000 А. З огляду на значну вагу апарата та необхідність забезпечення видимого розриву, доцільним є використання висувного виконання (withdrawable unit).

2. Шинний відсік: розташовується у верхній або задній частині шафи. Тут монтуються збірні фазні шини L_1 , L_2 , L_3 , а також нульова робоча N та захисна PE шини.

3. Відсік допоміжних ланцюгів: відокремлена зона для вторинної

комутації, де встановлюються блоки релейного захисту, прилади обліку та елементи АВР.

Геометричні та ергономічні параметри

Вибір габаритів шафи обумовлений необхідністю забезпечення ізоляційних відстаней у повітрі та зручністю підведення потужних силових кабелів або шинних мостів від трансформатора.

Таблиця 2.1 — Конструктивні параметри шафи НКП

Характеристика	Позначення	Значення
Висота каркаса	H	2000 ... 2200 мм
Ширина секції введення	W	600 ... 800 мм
Глибина шафи	D	600 ... 800 мм
Ступінь захисту оболонки	IP	31 (або 54)
Форма внутрішнього секціонування	—	3b або 4b

Розміщення силового обладнання

Силовий автоматичний вимикач QF_1 встановлюється на середній висоті (1100 ... 1300 мм від рівня підлоги), що відповідає вимогам ергономіки для ручного оперування та візуального контролю стану розчеплювачів. Трансформатори струму TA_1 ... TA_3 монтуються безпосередньо на вертикальних шинних опусках після вимикача, що забезпечує компактність монтажу.

Для розрахунку мінімально допустимих відстаней між струмовідними частинами різних фаз I_{ph-ph} та до заземлених конструкцій I_{ph-e} використовується наступна залежність:

$$l_{min} = f(U_{imp}, PD) \quad (2.1)$$

де:

U_{imp} — номінальна імпульсна витримувана напруга;

PD — ступінь забруднення середовища (Pollution Degree).

Для мереж 0,4 кВ у закритих приміщеннях ТП ці відстані мають бути не меншими за 10...12 мм.

Тепловий режим та вентиляція

З огляду на значний номінальний струм $I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$, всередині шафи виникають суттєві теплові втрати ΔP_{tot} , які визначаються сумою втрат у вимикачі, шинах та контактних з'єднаннях:

$$\Delta P_{\text{tot}} = \Delta P_{\text{breaker}} + (I_{\text{ном}}^2 \cdot R_i) \quad (2.2)$$

де R_i — активний опір i -ї ділянки струмопроводу.

Для відведення тепла у конструкції передбачені вентиляційні решітки (жалюзі) у нижній частині дверей та верхній кришці шафи, що створює природну конвекцію повітряного потоку.

Технологічні особливості збірки

Особливістю даного конструктиву є застосування болтових з'єднань каркаса, що забезпечує високу жорсткість та стійкість до вібрацій. Всі деталі корпусу підлягають антикорозійному обробленню методом порошкового фарбування. Шинна система монтується на ізоляторах з трекінгостійкого матеріалу (наприклад, армованого скловолокном поліестеру), здатних витримувати зусилля від ударного струму КЗ i_p :

$$F_{\text{dyn}} = k \cdot \frac{i_p^2}{a} \quad (2.3)$$

де:

F_{dyn} — електродинамічне зусилля;

a — відстань між осями шин;

k — коефіцієнт конфігурації шинної системи.

Правильне компонування дозволяє не лише виконати вимоги ПУЕ та галузевих стандартів, а й створити виріб, конкурентоспроможний за показниками металоємності та надійності.

2.2 Вибір струмопровідної системи та апаратури комутації

Процес проєктування силової частини низьковольтного комплектного пристрою (НКП) передбачає комплексний підхід до вибору провідникових матеріалів та комутаційних апаратів. Основними критеріями вибору є забезпечення термічної та електродинамічної стійкості пристрою при номінальному струмі $I_{\text{nom}}=1000$ А та розрахунковому струмі короткого замикання $I_{\text{kz}}=20$ кА.

2.2.1 Обґрунтування вибору та розрахунок збірних шин

Для магістральних та розподільчих з'єднань усередині шафи доцільно використовувати мідні електротехнічні шини. Мідь, порівняно з алюмінієм, має вищу питому провідність та кращу механічну міцність, що дозволяє мінімізувати габарити шинної збірки та підвищити надійність контактних з'єднань.

Вибір перерізу шин проводиться за умовою допустимого тривалого нагріву. Розрахунковий струм навантаження I_p має задовольняти умову:

$$I_p \leq I_{\text{adm}} \cdot k_1 \cdot k_2 \quad (2.4)$$

де:

I_{adm} — допустимий тривалий струм для обраного перерізу шини за нормальних умов;

k_1 — коефіцієнт, що враховує температуру навколишнього середовища всередині шафи;

k_2 — коефіцієнт способу встановлення шин (плазом або на ребро).

Враховуючи вихідні дані ($I_{\text{nom}}=1000 \text{ А}$, $T_{\text{in}}=60 \text{ °C}$), обираємо мідні шини прямокутного перерізу (рис. 2.2)

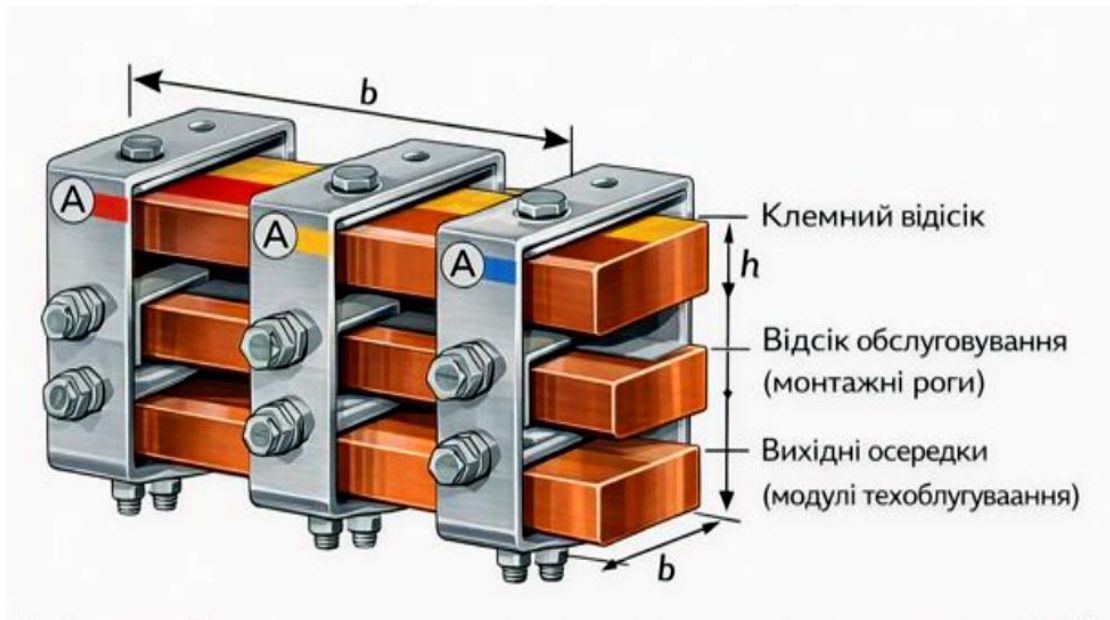


Рисунок 2.2 – Схема мідних шин прямокутного перерізу

Таблиця 2.2 — Технічні характеристики обраної шинної системи

Параметр	Символьне позначення	Значення та розмірність
Матеріал провідника	—	Мідь електротехнічна
Геометричні розміри однієї шини	$b \cdot s$	$80 \cdot 10 \text{ мм}$
Кількість смуг на фазу	n	1
Допустимий тривалий струм (при $T_{\text{amb}} = 25 \text{ °C}$)	I_{adm}	1125 А
Площа поперечного перерізу	A	800 мм^2

Перевірка шин на термічну стійкість при короткому замиканні виконується за формулою мінімального перерізу:

$$A_{\text{min}} = \frac{I_{\text{kz}} \cdot \sqrt{t_{\text{ts}}}}{C} \quad (2.5)$$

де $I_{\text{kz}} = 20000 \text{ А}$; $t_{\text{ts}} = 3 \text{ с}$; $C = 176$ (коефіцієнт для міді).

$$A_{min} = \frac{20000 \cdot \sqrt{3}}{176} \approx 196,8 \text{ мм}^2$$

Оскільки обраний переріз $A = 800 \text{ мм}^2$ значно перевищує A_{min} , умова термічної стійкості виконується з великим запасом.

2.2.2 Вибір ввідного комутаційного апарата

Ввідний апарат повинен забезпечувати надійну комутацію номінального струму та гарантоване вимкнення аварійних струмів. Для НКП з $I_{nom} = 1000 \text{ А}$ оптимальним рішенням є використання автоматичного вимикача повітряного типу (Air Circuit Breaker — АСВ) або вимикача у литому корпусі (MCCB) з високою комутаційною здатністю.

Вибір здійснюється за наступними умовами:

1. Номінальна напруга: $U_{п.ар} \geq U_{nom} = 0,4 \text{ кВ}$.
2. Номінальний струм: $I_{п.ар} \geq I_{nom} = 1000 \text{ А}$.
3. Гранична комутаційна здатність: $I_{cu} \geq I_{kz} = 20 \text{ кА}$.

Для проектування обрано автоматичний вимикач з електронним розчеплювачем, що дозволяє гнучко налаштовувати захисні характеристики (LSI: Long time, Short time, Instantaneous), який показано на рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 – Ввідний комутаційний апарат

Таблиця 2.3 — Параметри обраного автоматичного вимикача

Найменування характеристики	Символьне позначення	Значення
Номінальний струм апарата	$I_{н.ар}$	1000 А
Номінальна напруга ізоляції	U_i	1000 В
Гранична вимикальна здатність	I_{cu}	50 кА
Кількість полюсів	—	3
Тип встановлення	—	Висувний (роз'ємний)

2.2.3 Вибір трансформаторів струму

Для забезпечення роботи вузла обліку та систем захисту обираються трансформатори струму (ТТ) прохідного або шинного типу. Основною вимогою до ТТ є забезпечення класу точності (0,5 або 0,5s для комерційного обліку) та стійкість до струмів КЗ.

Коефіцієнт трансформації K_{tt} обирається з умови:

$$I_{nom} \leq I_{1n} = 1000 \text{ А} \quad (2.6)$$

де I_{1n} — первинний номінальний струм ТТ.

Отже, приймаємо ТТ з характеристиками 1000/5 А.

2.3 Вибір ізоляційних матеріалів і конструктивних елементів

При проектуванні низьковольтного комплектного пристрою (НКП) на номінальний струм $I_{nom} = 1000 \text{ А}$ вибір ізоляційних матеріалів та опорних конструкцій є критичним аспектом, що визначає електричну міцність пристрою та його здатність протистояти значним механічним зусиллям під час виникнення струмів короткого замикання. Відповідно до вимог ДСТУ EN

61439-1, усі ізоляційні компоненти повинні бути стійкими до термічного старіння, вологості та забезпечувати необхідний рівень трекінгостійкості.

2.3.1 Обґрунтування вибору шинних ізоляторів

Для фіксації системи збірних шин обрано опорні ізолятори (шинотримачі) на основі армованого скловолокном поліестеру (SMC/DMC). Цей матеріал має високу дугостійкість та низький рівень водопоглинання, що особливо важливо для стабільної роботи в умовах трансформаторних підстанцій, де можливі перепади температур і утворення конденсату.

Основним розрахунковим параметром при виборі ізоляторів є їхня здатність витримувати механічне навантаження F_{dyn} , яке виникає між фазами при проходженні ударного струму короткого замикання i_p . Максимальна сила взаємодії між сусідніми шинами визначається за виразом:

$$F_{\text{max}} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i_p^2 \cdot l}{a} \cdot k_{\Phi} \quad (2.7)$$

де:

i_p — ударний струм КЗ, А;

l — відстань між опорними ізоляторами (довжина прольоту), м;

a — відстань між осями фазних шин, м;

k_{Φ} — коефіцієнт форми шин.

Обрані ізолятори східчастого або драбинного типу забезпечують надійну фіксацію шин товщиною 10 мм, що відповідає обраному перерізу $80 \cdot 10$ мм.

2.3.2 Вибір діелектричних екранів та перегородок

З метою забезпечення форми внутрішнього секціонування (згідно з ДСТУ — *Internal partitioning*) та захисту персоналу від випадкового доторку до струмовідних частин, у конструкції НКП використовуються захисні

панелі. Для виготовлення цих елементів обрано полікарбонат або текстоліт.

Полікарбонатні листи мають високу ударну міцність та прозорість, що дозволяє проводити візуальний огляд стану шинних з'єднань без демонтажу захисту. Основні характеристики обраних матеріалів наведені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 — Фізико-механічні властивості ізоляційних матеріалів

Параметр ізоляції	Позначення змінної	Значення для поліестеру (SMC)	Значення для полікарбонату
Електрична міцність	E_{str}	20 ... 25 кВ/мм	30 кВ/мм
Питомий об'ємний опір	ρ_v	10^{12} Ом·м	10^{14} Ом·м
Стійкість до струмів витоку (СТІ)	СТІ	600 В	250 ... 400 В
Робоча температура тривала	T_{work}	до 160 °С	до 120 °С

2.3.3 Ізоляційні відстані та повітряні зазори

При компонуванні апаратури в шафі введення враховано координацію ізоляції за напругою. Повітряні зазори l_{clr} та відстані витоку l_{crp} розраховані виходячи з номінальної напруги ізоляції $U_i = 1000$ В та ступеня забруднення середовища (для підстанцій зазвичай приймається PD 3).

Мінімальна відстань витоку по поверхні ізолятора визначається як:

$$l_{crp} \geq l_{min} \cdot k_m \quad (2.8)$$

де:

l_{min} — базовий зазор згідно з таблицями ДСТУ;

k_m — коефіцієнт, що залежить від групи ізоляційного матеріалу (індексу СТІ).

Для обраних матеріалів групи I ($СТІ \geq 600$) ці відстані мінімізовані, що дозволяє зробити конструкцію НКП більш компактною.

2.3.4 Допоміжні конструктивні елементи

Для кріплення апаратури (автоматичних вимикачів, трансформаторів струму) використовуються оцинковані монтажні панелі та DIN-рейки. Усі металеві елементи конструкції, що не є струмовідними, об'єднані в єдиний контур заземлення. З'єднання рухомих частин (дверей) із каркасом виконується гнучкими мідними перемичками (плетінками) з перерізом A_g , розрахованим на струм замикання на корпус:

$$A_g \geq \frac{I_{k1} \cdot \sqrt{t_k}}{C} \quad (2.9)$$

де:

I_{k1} — однофазний струм замикання на землю;

C — коефіцієнт термічної стійкості (для міді $C = 176$).

2.4 Забезпечення електричної та механічної надійності конструкції

Надійність низьковольтного комплектного пристрою (НКП) є комплексною характеристикою, що визначається здатністю конструкції зберігати працездатність у межах заданих параметрів протягом усього терміну експлуатації. Для пристроїв з номінальним струмом $I_{\text{ном}}=1000$ А ключовими аспектами надійності є стійкість до циклічних теплових навантажень та здатність конструкції протидіяти значним механічним зусиллям під час перехідних процесів.

2.4.1 Електродинамічна стійкість шинних конструкцій

При виникненні короткого замикання (КЗ) між паралельними провідниками виникають ударні механічні зусилля, зумовлені взаємодією магнітних полів. Оскільки для проєктуемого НКП ударний струм КЗ I_p є значним, розрахунок зусиль $F_{\text{мах}}$ на ізолятори та перевірка шин на згин є

обов'язковими.

Максимальне механічне напруження σ у матеріалі шин не повинно перевищувати допустиме напруження для електротехнічної міді $\sigma_{adm}=140$ МПа. Розрахунок виконується за формулою:

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq \sigma_{adm} \quad (2.10)$$

де:

M — згинальний момент, що діє на шину;

W — момент опору поперечного перерізу шини.

Для прямокутної шини W розраховується як:

$$W = \frac{h \cdot b^2}{6} \quad (2.11)$$

де:

h — висота шини (у площині, перпендикулярній до дії сили);

b — товщина шини.

2.4.2 Термічна надійність контактних з'єднань

Електрична надійність НКП значною мірою залежить від стабільності перехідного опору контактів R_{con} . У процесі експлуатації під впливом струму $I_{nom} = 1000$ А контакти нагріваються, що може призвести до окиснення міді та подальшого лавиноподібного зростання опору.

Для запобігання цьому явищу в проєкті передбачено:

1. Застосування антикорозійних покриттів: усі контактні поверхні підлягають електролітичному лудінню (товщина шару 6 ... 9 мкм).

2. Стабілізація контактного тиску: використання сталевих кріпильних елементів з тарільчастими пружинами (шайбами Бельвіля), які компенсують термічне "плавання" міді.

Температура контактного з'єднання T_{con} повинна задовольняти умову:

$$T_{con} = T_{amb} + \Delta T_{con} \leq T_{lim} \quad (2.12)$$

де:

T_{amb} — температура повітря всередині шафи (60 °C);

ΔT_{con} — перевищення температури контакту над температурою середовища;

T_{lim} — гранично допустима температура для даного типу з'єднання (згідно з ДСТУ — 105 °C для луджених контактів).

2.4.3 Механічна міцність корпусу та локалізаційна здатність

Корпус НКП повинен витримувати статичні навантаження від встановленої апаратури та динамічні удари, що виникають при оперуванні важкими повітряними вимикачами. Для підвищення механічної надійності в проєкті використано складний профіль стійок каркаса, що збільшує момент інерції конструкції без суттєвого нарощування маси.

Одним із найважливіших показників надійності для персоналу є стійкість до внутрішньої дуги. Конструкція передбачає:

- **Декомпресійні клапани:** у верхній частині шафи для скидання надлишкового тиску при виникненні дугового замикання.

- **Посилені дверні замки:** для запобігання відкриттю дверей під дією ударної хвилі газів.

2.4.4 Класифікація надійності елементів за технічними характеристиками

Для забезпечення системного підходу до надійності, характеристики ключових вузлів зведено у таблицю 2.5.

Таблиця 2.5 — Показники надійності та стійкості конструктивних вузлів НКП

Вузол конструкції	Показник стійкості	Параметр розрахунку	Технічне рішення
Система шин	Електродинамічна стійкість	$i_p = 40 \dots 50$ кА	Крок опор $l \leq 400$ мм
Корпус шафи	Клас механічної міцності	IK10	Листова сталь 2,0 мм з ребрами жорсткості
Ізолятори	Стійкість до струмів витоку	$CTI \geq 600$ В	Трекінг-стійкий поліестер
Контакти	Термічна стабільність	$R_{\text{con}} \leq 10$ мкОм	Лудіння + тарільчасті пружини

Згідно з ГОСТ 10434-82, використання кріпильних комплектів зі стабілізованим зусиллям затягування забезпечує ресурс роботи контактного вузла не менше 10 років без необхідності капітального обслуговування, що відповідає концепції "малообслуговуваних підстанцій".

3. ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ТЕПЛОВІ РОЗРАХУНКИ ЕЛЕМЕНТІВ НИЗЬКОВОЛЬТНОГО КОМПЛЕКТНОГО РОЗПОДІЛЬЧОГО ПРИСТРОЮ

Електричні та теплові розрахунки є ключовим етапом проектування низьковольтних комплектних розподільчих пристроїв, оскільки вони дозволяють підтвердити працездатність і надійність струмопровідних частин у номінальних та аварійних режимах. Недостатня обґрунтованість цих розрахунків може призвести до перегріву, механічних пошкоджень або передчасного виходу обладнання з ладу.

У цьому розділі виконуються розрахунки шин і струмопровідних елементів на допустимий нагрів, електротермічну та електродинамічну стійкість при струмах короткого замикання. Окрему увагу приділено перевірці контактних з'єднань, аналізу можливих вібраційних явищ і вибору ізоляційних елементів.

Результати розрахунків підтверджують відповідність конструктивних рішень нормативним вимогам та забезпечують необхідний запас надійності для експлуатації НКРП у складі трансформаторної підстанції.

3.1 Розрахунок і перевірка шин на допустимий нагрів при номінальному струмі

Вибір конструкційного матеріалу для струмовідних частин низьковольтного комплектного пристрою (НКП) є критичним етапом проектування, оскільки він безпосередньо впливає на надійність, габаритні показники та економічну ефективність установки. При виборі матеріалу шин необхідно враховувати наступний комплекс факторів:

- **Провідність:** пріоритет віддається матеріалам з мінімальним питомим електричним опором для зниження джоулевих втрат.
- **Механічна стійкість:** здатність провідника протидіяти

електродинамічним зусиллям, що виникають при струмах короткого замикання.

- **Корозійна тривкість:** стійкість до окиснення та впливу навколишнього середовища, що особливо важливо для довговічності контактних з'єднань.

- **Теплотехнічні характеристики:** здатність матеріалу зберігати фізико-механічні властивості при тривалому термічному впливі.

На основі аналізу вищезазначених ознак, для НКП з номінальним струмом $I_{\text{ном}} = 1000$ А доцільно обрати мідні шини прямокутного перерізу за ГОСТ 859-86 (рис. 3.1). Мідь забезпечує оптимальне поєднання високої провідності та механічної міцності.

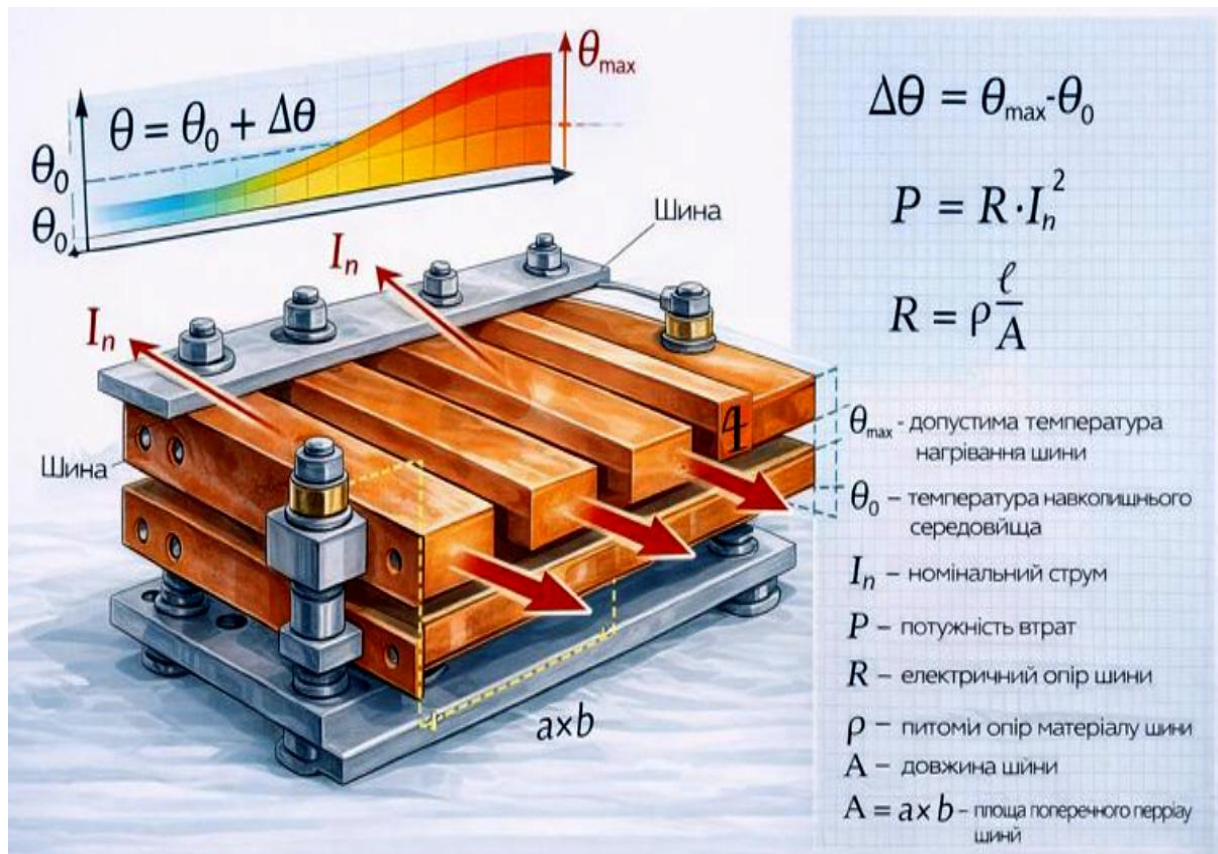


Рисунок 3.1 – Розрахунок мідних шин прямокутного перерізу

3.1.1 Визначення розрахункових коефіцієнтів

Відповідно до нормативних вимог, стандартне допустиме навантаження на шини розраховується за умови їх нагріву до $\theta_s = 70$ °C при

температурі зовнішнього повітря $\theta_{pr} = 25$ °С. Однак, згідно з вихідними даними проєкту (п. 1.4), умови експлуатації всередині шафи є більш жорсткими: максимальна температура повітря сягає $\theta_{n.s.} = 60$ °С, а гранично допустима температура нагріву шин згідно з ГОСТ 8024-90 становить $\theta_{dop} = 120$ °С.

Для адаптації табличних значень струму до реальних умов експлуатації обчислимо поправочні коефіцієнти:

1. Коефіцієнт форми та розташування K_1 : враховує умови конвективного теплообміну. При горизонтальному встановленні шин «пліском» погіршується тепловіддача, тому приймаємо $K_1 = 0,92$.

2. Коефіцієнт температурного режиму K_2 : розраховується відповідно до ГОСТ 8024-90 за формулою:

$$K_2 = \sqrt{\frac{\theta_{dop} - \theta_{n.s.}}{\theta_s - \theta_{pr}}} \quad (3.1)$$

Підставивши значення, отримаємо:

$$K_2 = \sqrt{\frac{120 - 60}{70 - 25}} = \sqrt{\frac{60}{45}} \approx 1,155$$

3. Коефіцієнт стану поверхні K_3 : для нефарбованих шин (що мають гірший коефіцієнт випромінювання порівняно з чорненими) приймаємо $K_3 = 0,95$.

3.1.2 Розрахунок допустимого тривалого струму

Допустиме струмове навантаження на шину I_{dop} з урахуванням усіх корекцій визначається за формулою:

$$I_{dop} = I_{tab} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \quad (3.2)$$

де: I_{tab} — табличне значення номінального струму для обраного

перерізу.

Для мідної шини перерізом $100 \cdot 6$ мм ($S = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$) при встановленні пліском:

$$I_{dop} = 1810 \cdot 0,92 \cdot 1,155 \cdot 0,95 \approx 1826 \text{ А}$$

Отримане значення $I_{dop} = 1826 \text{ А}$ значно перевищує необхідний номінальний струм $I_{nom} = 1000 \text{ А}$, що створює необхідний резерв надійності.

3.1.3 Перевірка температури нагріву при номінальному режимі

Для остаточного підтвердження правильності вибору необхідно розрахувати фактичну температуру нагріву шини θ_x при проходженні струму $I_{nom} = 1000 \text{ А}$:

$$\theta_x = \theta_{n.s.} + \frac{I_{nom}^2 \cdot \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_{dop})}{S \cdot F_{ox} \cdot K_t} \quad (3.3)$$

де:

$\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ — питомий опір міді при 0°C ;

$\alpha = 0,00421 \text{ K}^{-1}$ — температурний коефіцієнт опору;

$S = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ — площа перерізу;

$F_{ox} = 0,212 \text{ м}^2$ — площа поверхні охолодження на 1 м довжини для шини $100 \cdot 6 \text{ мм}$;

$K_t = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ — коефіцієнт тепловіддачі.

Виконаємо розрахунок:

$$\theta_x = 60 + \frac{1000^2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,00421 \cdot 120)}{6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,212 \cdot 5}$$

$$\theta_x = 60 + \frac{0,0162 \cdot 1,5052}{0,000636} = 60 + 38,34 = 98,34^\circ \text{C}$$

Таблиця 3.1 — Порівняльний аналіз температурних режимів шинної конструкції

Параметр	Позначення	Розрахункове значення	Допустиме значення	Висновок
Температура нагріву	Θ_x	98,34 °C	120 °C	Відповідає
Струмове навантаження	$I_{\text{доп}}$	1826 А	> 1000 А	Відповідає

Таким чином, розрахована температура $\Theta_x = 98,34$ °C не перевищує ліміт у 120 °C. Вибрана мідна шина перерізом $100 \cdot 6$ мм повністю задовольняє вимогам термічної стійкості в номінальному режимі роботи НКП.

3.2 Перевірка електротермічної стійкості струмопровідних частин при короткому замиканні

Оцінка здатності шинної конструкції витримувати термічний вплив струмів короткого замикання (КЗ) є критичним етапом проєктування НКП. На відміну від номінального режиму, де теплообмін із навколишнім середовищем відіграє ключову роль, процес нагрівання при КЗ має адіабатний характер через вкрай малу тривалість протікання великих струмів. Це означає, що вся енергія, яка виділяється в провіднику, витрачається виключно на його нагрівання.

Для визначення кінцевої температури шин використовується графоаналітичний метод, що базується на обчисленні сумарного теплового імпульсу. Цей параметр акумулює енергію попереднього нагріву номінальним струмом та енергію, що виділяється безпосередньо при аварійному режимі.

3.2.1 Обчислення питомих теплових імпульсів

Спершу визначимо тепловий імпульс A_n , що відповідає сталому тепловому стану шин перед моментом виникнення КЗ. Для мідних провідників, температура яких у номінальному режимі (згідно з п. 3.1) становить $\Theta_x = 98,34 \text{ }^\circ\text{C}$, значення теплового імпульсу визначається за довідковими таблицями або кривими $A = f(\Theta)$:

$$A_n = 1,8 \cdot 10^{16} \text{ A}^2 \cdot \text{с/м}^4$$

Далі розраховується питомий імпульс квадратичного струму КЗ A_{kz} , який залежить від діючого значення струму I_k та часу його вимкнення захисним апаратом t_{ts} . Розрахунок проводиться за формулою:

$$A_{kz} = \frac{I_k^2 \cdot t_{ts}}{S^2} \quad (3.4)$$

де:

$I_k = 20000 \text{ A}$ — очікуваний струм КЗ;

$t_{ts} = 3 \text{ с}$ — тривалість термічної стійкості (час відключення);

$S = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ — площа поперечного перерізу обраної шини $100 \cdot 6 \text{ мм}$.

Проведемо розрахунок:

$$A_{kz} = \frac{(20000)^2 \cdot 3}{(6 \cdot 10^{-4})^2} = \frac{400 \cdot 10^6 \cdot 3}{36 \cdot 10^{-8}} = \frac{12 \cdot 10^{17}}{36} \approx 0,33 \cdot 10^{16} \text{ A}^2 \cdot \text{с/м}^4$$

3.2.2 Визначення результуючої температури

Сумарний питомий тепловий імпульс A , що діє на шинну систему, обчислюється як сума попереднього та аварійного складників:

$$A = A_n + A_{kz}$$

Підставивши розраховані значення, отримаємо:

$$A = 1,8 \cdot 10^{16} + 0,33 \cdot 10^{16} = 2,13 \cdot 10^{16} \text{ А}^2 \cdot \text{с/м}^4$$

За допомогою адіабатних кривих для міді знайдемо температуру Θ_k , що відповідає сумарному імпульсу $2,13 \cdot 10^{16}$.

Таблиця 3.2 — Результати перевірки шин на електротермічну стійкість

Параметр перевірки	Символ	Одиниця виміру	Розрахункове значення	Допустиме значення
Початкова температура шин	Θ_x	°C	98,34	120
Тривалість дії струму КЗ	t_{ts}	с	3,0	—
Сумарний тепловий імпульс	A	$\text{А}^2 \cdot \text{м}^4$	$2,13 \cdot 10^{16}$	—
Кінцева температура при КЗ	Θ_k	°C	≈ 108	300

3.2.3 Аналіз результатів

Відповідно до ПУЕ та галузевих стандартів, гранично допустима температура нагріву мідних шин при короткому замиканні становить $\Theta_{adm.k} = 300$ °C. Отримане розрахункове значення $\Theta_k \approx 108$ °C є значно меншим за критичне.

Такий результат свідчить про високий ступінь термічної надійності обраної системи шин. Велика площа перерізу (600 мм^2), обрана за умовами тривалого нагріву, забезпечує значну теплову інерційність, що мінімізує

ризик деформації або пошкодження ізоляторів через перегрів провідників навіть при тривалій дії аварійних струмів (3 с).

Резюме: Обрана шинна конструкція повністю задовольняє вимогам електротермічної стійкості.

3.3 Розрахунок електродинамічної стійкості шин і струмопровідних елементів

Електродинамічна стійкість є однією з найважливіших характеристик низьковольтного комплектного пристрою (НКП), що визначає здатність його конструктивних елементів витримувати механічні зусилля, які виникають при проходженні ударного струму короткого замикання (I_{ud}). Перевірка полягає у визначенні механічних напружень у матеріалі шини в найбільш небезпечних перерізах на згин та їх зіставленні з гранично допустимими значеннями для конкретного матеріалу.

Згідно з ГОСТ 859-86, для мідних шин допустиме механічне напруження на згин становить $\sigma_{adm} = 13,73 \cdot 10^7$ Па. Виникнення механічних зусиль обумовлене електромагнітною взаємодією між паралельними провідниками різних фаз, а також між окремими смугами в межах одного фазного пакету.

3.3.1 Визначення геометричних параметрів та коефіцієнта форми

Для розрахунку зусиль у прямокутних провідниках необхідно врахувати їх взаємне розташування та геометрію. При паралельному монтажі шин «плиском» з шириною $b = 100$ мм та ізоляційним зазором між ними у 40 мм, міжосьова відстань a обчислюється як:

$$a = 40 + 100 = 140 \text{ мм} = 0,14 \text{ м}$$

Коефіцієнт форми k_f враховує обмеженість розмірів поперечного перерізу шин порівняно з відстанню між ними. Для його визначення знайдемо допоміжні співвідношення за параметрами ширини $b = 0,1$ м та висоти (товщини) $h = 0,006$ м:

$$\frac{b}{h} = \frac{0,1}{0,006} \approx 16,67$$

$$\frac{a-b}{b+h} = \frac{0,14-0,1}{0,1+0,006} \approx 0,377$$

За довідковими даними, для отриманих значень коефіцієнт форми становить $k_f = 1,15$.

3.3.2 Розрахунок ударного струму КЗ та електродинамічного зусилля

Ударний струм КЗ I_{ud} визначає амплітудне значення механічного удару в перший період аварійного процесу:

$$I_{ud} = \sqrt{2} \cdot k_{ud} \cdot I_{kz} \quad (3.6)$$

де:

k_{ud} — ударний коефіцієнт (приймається 1,8 для мереж 0,4 кВ);

$I_{kz} = 20$ кА — діюче значення струму КЗ.

$$I_{ud} = 1,41 \cdot 1,8 \cdot 20000 \approx 50760 \text{ А}$$

Розрахунок максимального електродинамічного зусилля F здійснюється для найбільш важкого випадку трифазного замикання на найбільш довгій ділянці шини $l = 0,4$ м:

$$F = 1,76 \cdot 10^{-7} \cdot I_{ud}^2 \cdot \frac{l}{a} \cdot k_f \quad (3.7)$$

$$F = 1,76 \cdot 10^{-7} \cdot (50760)^2 \cdot \frac{0,4}{0,14} \cdot 1,15 \approx 1488,6 \text{ Н}$$

3.3.3 Розрахунок згинального моменту та моменту опору

Для визначення механічного напруження необхідно знайти максимальний вигинальний момент M_{vig} . При жорсткому кріпленні шин на ізоляторах з обох кінців, коефіцієнт закріплення k_z згідно з нормами проектування дорівнює 10:

$$M_{vig} = \frac{F \cdot l}{k_z} \quad (3.8)$$

$$M_{vig} = \frac{1488,6 \cdot 0,4}{10} \approx 59,54 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Момент опору перерізу W для прямокутної шини, що розташована пліском, розраховується за формулою:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (3.9)$$

$$W = \frac{0,1 \cdot (0,006)^2}{6} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$$

3.3.4 Перевірка умови механічної міцності

Розрахункове механічне напруження σ_r у небезпечному перерізі провідника визначається як відношення вигинального моменту до моменту опору:

$$\sigma_r = \frac{M_{vig}}{W} \quad (3.10)$$

$$\sigma_r = \frac{59,54}{6 \cdot 10^{-7}} \approx 9,92 \cdot 10^7 \text{ Па}$$

Порівняємо отримане значення з допустимим для міді:

$$\sigma_r = 9,92 \cdot 10^7 \text{ Па} \leq \sigma_{adm} = 13,73 \cdot 10^7 \text{ Па}$$

Таблиця 3.3 — Результати перевірки на електродинамічну стійкість

Найменування параметра	Символ	Розрахункове значення	Допустиме значення
Ударний струм КЗ	I_{ud}	50,76 кА	—
Електродинамічне зусилля	F	1488,6 Н	—
Розрахункова напруга на згин	σ_r	$9,92 \cdot 10^7 \text{ Па}$	$13,73 \cdot 10^7 \text{ Па}$

Резюме: Оскільки розрахункове напруження не перевищує межу міцності матеріалу, обрана шинна конструкція та спосіб її закріплення повністю задовольняють вимогам електродинамічної стійкості при заданих параметрах короткого замикання.

3.4 Перевірка струмопровідних частин на відсутність вібрації та резонансних явищ

При проектуванні шинних систем НКП на високі номінальні струми, окрім розрахунків на статичну міцність, критично важливим є аналіз динамічної стійкості конструкції. Процес протікання змінного струму частотою $f_m = 50 \text{ Гц}$ генерує електродинамічні сили, що пульсують із

подвоєною частотою мережі — 100 Гц. Якщо власна частота механічних коливань шинної збірки f збігається або є близькою до частоти збудливої сили, виникає явище механічного резонансу.

Резонанс може призвести до багаторазового збільшення амплітуди коливань провідників, що спричиняє втому матеріалу, руйнування ізоляторів та послаблення контактних з'єднань навіть за умови, що статичні зусилля знаходяться в межах норми. Згідно з ПУЕ та вимогами до розподільчих пристроїв, резонансні явища в діапазоні 50 ... 100 Гц є неприпустимими.

3.4.1 Визначення геометричних характеристик перерізу

Для оцінки жорсткості системи необхідно розрахувати момент інерції J поперечного перерізу шини (рис.3.2).

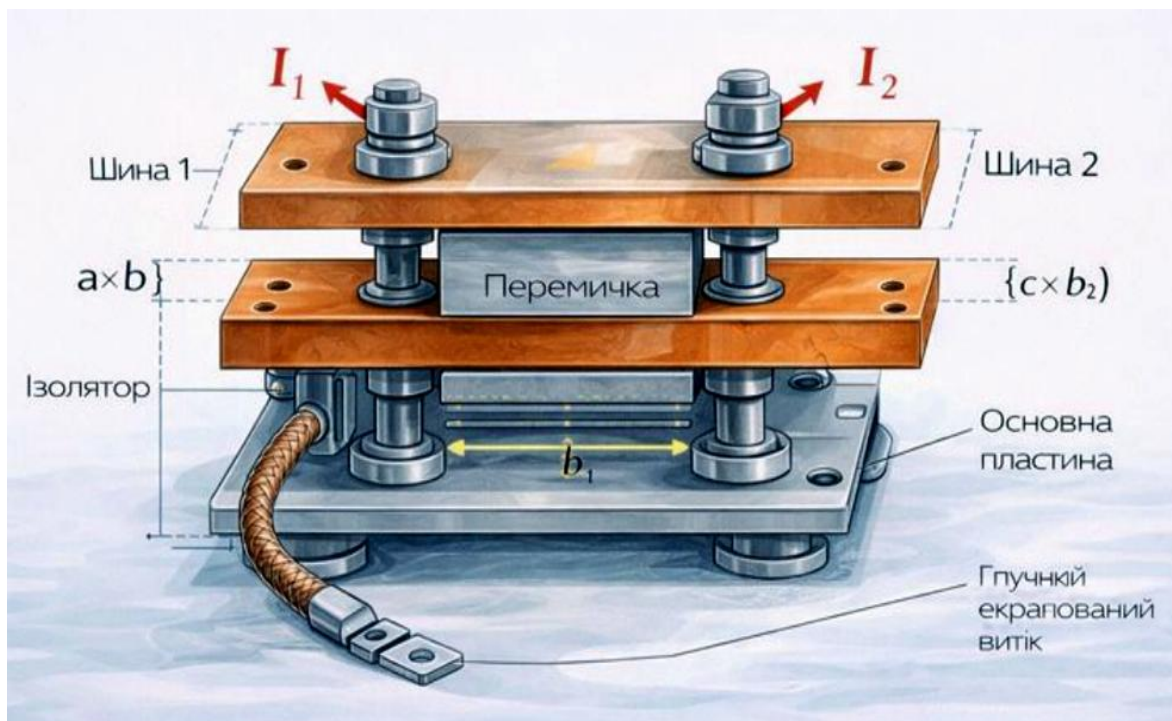


Рисунок 3.2 – Поперечний переріз струмопровідної частини

Оскільки в проєкті використана мідна шина прямокутного профілю з розмірами $b = 100$ мм (0,1 м) та $h = 6$ мм (0,006 м), закріплена на ізоляторах «плиском», момент інерції відносно центральної осі, перпендикулярної до напрямку дії сили, обчислюється за формулою:

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (3.11)$$

Підставивши значення, отримаємо:

$$J = \frac{0,1 \cdot (0,006)^3}{12} = \frac{0,1 \cdot 2,16 \cdot 10^{-7}}{12} = 1,8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4$$

3.4.2 Розрахунок частоти власних коливань шинної конструкції

Власна частота коливань провідника залежить від його фізико-механічних властивостей (модуля пружності, густини), геометрії перерізу та способу закріплення на опорах. Для однопрогонової моделі шини розрахунок виконується за наступною залежністю:

$$f = \frac{K}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J \cdot g}{A \cdot \gamma}} \quad (3.12)$$

де:

$K = 11,2$ — безрозмірний коефіцієнт для шини, жорстко закріпленої на обох кінцях;

$l = 0,4 \text{ м}$ — довжина прольоту між опорними ізоляторами;

$E = 11,8 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ — модуль поздовжньої пружності електротехнічної міді;

$J = 1,8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4$ — розрахований момент інерції;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — прискорення вільного падіння;

$A = 0,0006 \text{ м}^2$ — площа поперечного перерізу шини ($100 \cdot 6 \text{ мм}$);

$\gamma = 8930 \text{ кг/м}^3$ — питома густина міді.

Виконаємо обчислення:

$$f = \frac{11,2}{0,4^2} \cdot \sqrt{\frac{11,8 \cdot 10^{10} \cdot 1,8 \cdot 10^{-9} \cdot 9,81}{0,0006 \cdot 8930}}$$

$$f = \frac{11,2}{0,16} \cdot \sqrt{\frac{2083,64}{5,358}} \approx 70 \cdot \sqrt{388,88} \approx 70 \cdot 19,72 \approx 1380,4 \text{ Гц}$$

3.4.3 Оцінка результатів та висновки щодо вібростійкості

Для забезпечення надійної роботи конструкції необхідно, щоб власна частота коливань f не потрапляла в небезпечний діапазон:

1. $f \neq 50$ Гц (основна частота мережі);
2. $f \neq 100$ Гц (частота електродинамічних сил).

Таблиця 3.4 — Аналіз частотних характеристик шинної збірки

Тип частоти	Позначення	Значення, Гц	Стан системи
Робоча частота мережі	f_m	50	Поза зоною резонансу
Частота пульсації сил	$2f_m$	100	Поза зоною резонансу
Власна частота шин	f	1380,4	Безпечно

Отримане значення $f = 1380,4$ Гц значно перевищує критичний поріг у 100 Гц. Такий високий показник частоти власних коливань зумовлений високою жорсткістю мідних шин обраного перерізу та порівняно невеликою відстанню між опорними ізоляторами (0,4 м).

Це гарантує відсутність вібраційного посилення механічних напружень та виключає можливість резонансного руйнування ізоляторів і кріплень. Таким чином, **конструкція є повністю надійною з точки зору динамічних характеристик.**

2.5 Розрахунок розбірних контактних з'єднань і оцінка контактних втрат

Надійність роботи низьковольтного комплектного пристрою (НКП) значною мірою визначається якістю виконання контактних з'єднань. Для силових ланцюгів на струм $I_{nom}=1000$ А найбільш доцільним є використання розбірних болтових з'єднань мідних шин. Розрахунок таких вузлів передбачає визначення оптимальної площі перекриття, необхідного зусилля стискання та перевірку теплового режиму контакту.

2.5.1 Визначення геометричних параметрів контакту

Початковим етапом є розрахунок розрахункової густини струму j_{sh} для мідних провідників. Відповідно до емпіричних залежностей для шинних конструкцій, густина струму визначається з урахуванням номінального навантаження:

$$j_{sh} = [0,31 - 1,05 \cdot (I_{nom} - 200) \cdot 10^{-4}] \cdot 10^6 \quad (3.13)$$

Для заданого струму $I_{nom} = 1000$ А:

$$j_{sh} = [0,31 - 1,05 \cdot (1000 - 200) \cdot 10^{-4}] \cdot 10^6 = 0,226 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

Площа поверхні контактної з'єднання S_c для шин, що накладаються одна на одну «плиском», залежить від їхньої ширини b та лінійного розміру перекриття (напуску) C :

$$S_c = b \cdot C \quad (3.14)$$

З умови забезпечення мінімального перехідного опору, розрахунковий розмір перекриття C_{calc} має бути:

$$C_{calc} = \frac{I_{nom}}{j_{sh} \cdot b} = \frac{1000}{0,226 \cdot 10^6 \cdot 0,1} \approx 0,044 \text{ м}$$

Приймаємо конструктивно розмір перекриття $C = 50$ мм (0,05 м). Тоді дійсна площа контактування становить:

$$S_{d.k.} = 0,05 \cdot 0,1 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

2.5.2 Розрахунок зусилля стискання та вибір кріплення

Для забезпечення стабільного електричного контакту необхідно створити певну розрахункову силу натискання $F_{k.r.}$:

$$F_{k.r.} = f_k \cdot S_{d.k.} \quad (3.15)$$

де $f_k = 9,8 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ — питомий тиск для сталевих болтових з'єднань.

$$F_{k.r.} = 9,8 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 49 \cdot 10^3 \text{ Н (49 кН)}$$

Конструктивно обираємо з'єднання на чотирьох болтах М10 (ГОСТ 15589-85) із використанням тарільчастих пружинних шайб (ГОСТ 13438-98). Кожен болт М10 при нормативному затягуванні забезпечує зусилля $F_b \approx 13,6 \text{ кН}$. Сумарна сила натискання складає:

$$F_{\Sigma} = 4 \cdot 13,6 \cdot 1,44 \approx 78,4 \text{ кН}$$

Отримана сила $F_{\Sigma} > F_{k.r.}$, що гарантує механічну стабільність контакту.

2.5.3 Оцінка електричного опору та теплових втрат

Перехідний опір контакту R_{per} залежить від матеріалу та сили стискання:

$$R_{per} = \frac{K_t}{F_{\Sigma}^i} \quad (3.16)$$

де:

$K_t = 0,24 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{Н}^{1/2}$ — коефіцієнт для міді;

$i = 0,7$ — показник ступеня.

Для вузла з чотирма болтами сумарний перехідний опір становить:

$$R_{per} \approx \frac{0,24 \cdot 10^{-4}}{(78400)^{0,7}} \approx 8,84 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}$$

Опір самої ділянки шини в місці перекриття R_{sh} визначається як:

$$R_{sh} = \frac{\rho \cdot C}{S_{d.k.}} \cdot K_s \approx 1,89 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \quad (3.17)$$

Сумарний опір з'єднання R_{Σ} для розрахунку тепловиділення:

$$R_{\Sigma} = R_{per} + R_{sh} \approx 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \quad (3.18)$$

Надлишок температури контакту над температурою шин $\tau_{k.z.}$ визначається за формулою:

$$\tau_{k.z.} = \frac{I_k^2 \cdot R_{\Sigma}}{K_t \cdot S_{cool}} \quad (3.19)$$

де $I_k = \frac{I_{nom} \cdot K_z}{n} = \frac{1000 \cdot 1,3}{4} = 325 \text{ А}$ розрахунковий струм на одне болтове з'єднання.

$$\tau_{k.z.} = \frac{325^2 \cdot 1,9 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 0,01} \approx 2,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2.5.4 Перевірка за допустимими параметрами

Фактична температура нагріву контактного вузла Θ_k становить:

$$\theta_k = \theta_{sh} + \tau_{k.z.} = 98,4 + 2,6 = 101 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.20)$$

Таблиця 2.6 — Параметри перевірки контактної з'єднання

Показник	Позначення	Розраховане значення	Допустиме значення	Висновок
Температура контакту	Θ_k	101 °C	120 °C	Відповідає
Падіння напруги	U_k	0,616 мВ	7,0 мВ	Відповідає
Сила натискання	F_Σ	78,4 кН	> 49,0 кН	Відповідає

Падіння напруги на контакті U_k обчислюється як:

$$U_k = I_k \cdot R_\Sigma = 325 \cdot 1,9 \cdot 10^{-6} \approx 0,616 \text{ мВ} \quad (3.21)$$

Отримані результати підтверджують, що обрана конструкція контактної з'єднання на чотирьох болтах М10 забезпечує мінімальні втрати енергії та працює в межах допустимого температурного діапазону.

3.6 Вибір та розрахунок ізоляційних елементів струмопровідної системи

Надійність функціонування низьковольтного комплектного пристрою (НКП) за умов виникнення аварійних режимів значною мірою залежить від механічної міцності опорних ізоляторів. Ці елементи повинні не лише забезпечувати діелектричну міцність повітряних проміжків, а й протидіяти значним згинальним зусиллям, що генеруються ударними струмами короткого замикання (I_{ud}).

3.6.1 Обґрунтування вибору ізолятора

Для фіксації струмовідної системи обрано опорний ізолятор (шинотримач) серії **ВК 4046** (рис.3.3). Виріб виготовлений із термореактивного поліестеру, армованого скловолокном (SMC-компаунд), що характеризується високою трекінгостійкістю та механічною в'язкістю.

Згідно з паспортними даними виробника, номінальне руйнівне зусилля на вигин для даної моделі становить $F_{rush}=4900\text{ Н}$.

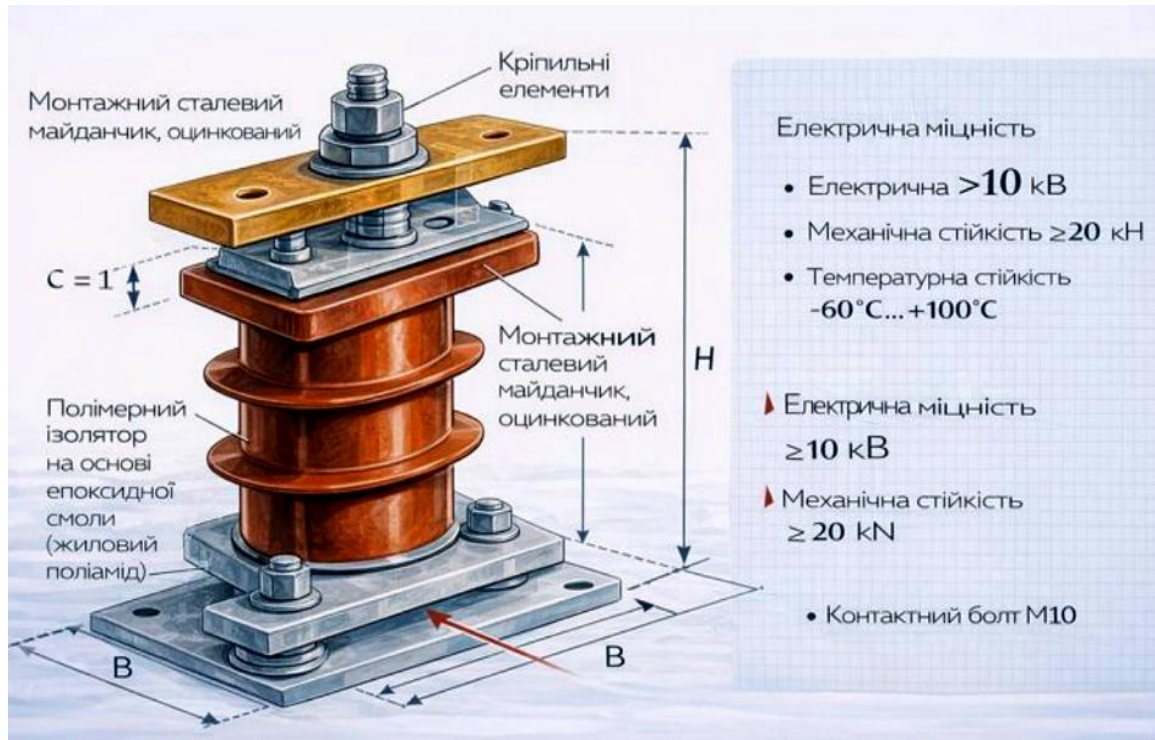


Рисунок 3.3 - Опорний ізолятор (шинотримач) серії ВК 4046

3.6.2 Розрахунок приведенного механічного навантаження

Оскільки вектор електродинамічної сили прикладений до центру мас шини, а не безпосередньо до головки ізолятора, виникає додатковий згинальний момент. Для коректної оцінки міцності необхідно обчислити коефіцієнт приведення навантаження до небезпечного перерізу (основи ізолятора) K_p :

$$K_p = \frac{H}{H_{iz}} \quad .(3.22)$$

де:

H_{iz} — активна висота ізолятора, що становить 600 мм;

H — розрахункове плече прикладання сили (відстань від основи ізолятора до поздовжньої осі шини).

Розрахунок плеча H виконується як сума висоти ізолятора, товщини адаптера (шинотримача) та половини товщини самої шини:

$$H = H_{iz} + h_{ad} + \frac{h_{sh}}{2} = 60 + 6 + 3 = 69 \text{ мм}$$

Таким чином, коефіцієнт приведення дорівнює:

$$K_p = \frac{69}{60} = 1,15$$

3.6.3 Перевірка ізолятора на механічну стійкість

Максимальне розрахункове зусилля F_{roz} у небезпечному перерізі ізолятора при трифазному короткому замиканні обчислюється з урахуванням геометрії розташування фаз та довжини прольоту шин:

$$F_{roz} = 1,76 \cdot 10^{-7} \cdot I_{ud}^2 \cdot \frac{l_{iz}}{a} \cdot K_p \quad (3.23)$$

де:

$I_{ud} = 50760 \text{ А}$ — ударний струм КЗ (розрахований у п. 3.3.2);

$l_{iz} = 0,4 \text{ м}$ — крок встановлення ізоляторів;

$a = 0,14 \text{ м}$ — міжфазна відстань.

Підставивши значення, отримаємо:

$$F_{roz} = 1,76 \cdot 10^{-7} \cdot (50760)^2 \cdot \frac{0,4}{0,14} \cdot 1,15 \approx 1488,6 \text{ Н}$$

Критерієм успішної перевірки є дотримання умови, за якої розрахункове навантаження не перевищує гранично допустиме (руйнівне) значення з урахуванням коефіцієнта запасу:

$$F_{roz} \leq F_{rush} \cdot 0,8 \quad (3.24)$$

У нашому випадку:

$$1488,6 \text{ Н} < 4900 \text{ Н}$$

Таблиця 3.6 — Результати перевірки механічної міцності ізоляторів

Параметр перевірки	Символ	Одиниця виміру	Розраховане значення	Допустиме значення
Висота плеча прикладання сили	Н	мм	69	—
Коефіцієнт приведення зусилля	K_p	—	1,15	—
Максимальне зусилля на вигин	F_{roz}	Н	1488,6	4900
Коефіцієнт запасу міцності	—	—	3,29	> 1,25

Висновок: Розрахункові дані демонструють значний запас механічної міцності (більш ніж у три рази). Вибрані опорні ізолятори серії ВК 4046 повністю відповідають вимогам електродинамічної стійкості та забезпечують цілісність конструкції НКП при протіканні ударних струмів короткого замикання.

4 АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ НИЗЬКОВОЛЬТНОГО КОМПЛЕКТНОГО РОЗПОДІЛЬЧОГО ПРИСТРОЮ

Низьковольтні комплектні розподільчі пристрої працюють у різних експлуатаційних режимах, включаючи тривалу роботу під номінальним навантаженням, короточасні перевантаження та аварійні стани. Тому важливим етапом проектування є аналіз режимів роботи та оцінка надійності основних елементів пристрою.

У даному розділі розглядаються нормальні та післяаварійні режими роботи НКРП, аналізується тепловий стан шафи та струмопровідних частин при тривалій експлуатації. Проводиться оцінка стійкості конструкції при діях струмів короткого замикання та перевіряється відповідність проектного пристрою вимогам чинних нормативних документів (ПУЕ, ДСТУ, ІЕС).

Завершальним результатом розділу є узагальнена оцінка надійності та технічної доцільності прийнятих інженерних рішень, що підтверджує можливість практичного застосування розробленого НКРП.

4.1 Аналіз нормального та післяаварійного режимів роботи НКРП

Функціонування низьковольтного комплектного пристрою (НКП) у складі трансформаторної підстанції (ТП) передбачає роботу в різних експлуатаційних станах. Найбільш критичними для оцінки надійності системи електропостачання є нормальний (тривалий) режим та післяаварійний режим, що виникає після локалізації пошкоджень або при тимчасовому перевантаженні системи.

4.1.1 Особливості нормального режиму експлуатації

У нормальному режимі роботи НКП забезпечує безперебійний розподіл електричної енергії між споживачами. Основним завданням

пристрою є підтримання теплового балансу при протіканні номінального струму $I_{nom} = 1000 \text{ A}$.

Основними характеристиками цього режиму є:

- **Теплова стабільність:** температура струмовідних частин Θ_x не повинна перевищувати допустимі значення (згідно з попередніми розрахунками $\Theta_x \approx 98,3 \text{ }^\circ\text{C}$).

- **Якість енергії:** забезпечення мінімального падіння напруги ΔU на внутрішніх шинних магістралях та контактних з'єднаннях.

- **Координація захистів:** селективність налаштувань розчеплювачів автоматичних вимикачів, що унеможлиблює хибні спрацювання при пускових струмах потужних навантажень.

Рівень втрат потужності ΔP в НКП для нормального режиму обчислюється за формулою:

$$\Delta P = 3 \cdot I_p^2 \cdot R_\Sigma \quad (4.1)$$

де:

I_p — розрахунковий струм навантаження;

R_Σ — сумарний опір однієї фази (включаючи опір шин та перехідні опори апаратів).

4.1.2 Специфіка післяаварійного режиму

Післяаварійний режим характеризується тимчасовою зміною конфігурації мережі або роботою з підвищеним навантаженням (наприклад, при виході з ладу одного з двох паралельних трансформаторів у двотрансформаторній підстанції). У такому стані навантаження на НКП може перевищувати номінальне значення на 20 ... 40 % протягом обмеженого часу (згідно з ДСТУ 3484).

Для аналізу післяаварійного режиму вводиться коефіцієнт перевантаження k_{ovl} :

$$I_{ovl} = k_{ovl} \cdot I_{nom} \quad (4.2)$$

Таблиця 2.7 — Параметри режимів роботи проектного НКП

Характеристика режиму	Умова роботи	Значення струму, А	Тривалість
Нормальний	$I \leq I_{\text{ном}}$	1000	Тривало
Післяаварійний	$I \leq 1,4 \cdot I_{\text{ном}}$	1400	до 2-х годин
Аварійний (КЗ)	$I = I_{\text{kz}}$	20000	до 3 с

У післяаварійному режимі критичним фактором стає здатність ізоляційних матеріалів та комутаційної апаратури витримувати підвищену температуру. Граничне перевищення температури τ_{max} для контактів у такому режимі може сягати 120 °С без незворотної деградації вузла.

4.1.3 Логіка роботи схем автоматики в різних режимах

Для забезпечення живучості системи НКП обладнується схемами автоматичного введення резерву (АВР) або секціонування.

При переході з нормального в післяаварійний режим (наприклад, зникнення напруги на одному з вводів) алгоритм роботи наступний:

- 1. Контроль параметрів:** реле напруги фіксує відхилення за межі уставки.
- 2. Відключення:** ввідний автомат пошкодженої секції розмикає коло.
- 3. Введення резерву:** спрацьовує секційний вимикач, об'єднуючи збірні шини.

При цьому сумарний струм навантаження обох секцій лягає на один трансформатор та один ввідний пристрій НКП. Тому перевірка шин за допустимим нагрівом (п. 3.1) із запасом ($I_{\text{доп}} = 1826 \text{ А}$) є обґрунтованою стратегією для забезпечення стабільності саме в післяаварійному стані.

4.2 Оцінка теплового стану шафи при тривалій роботі під навантаженням

Забезпечення оптимального температурного режиму всередині оболонки низьковольтного комплектного пристрою (НКП) є критичним аспектом, оскільки тривалий перегрів призводить до прискореної деградації ізоляції, збільшення перехідного опору контактів та підвищення ризику хибних спрацювань теплових розчеплювачів захисної апаратури. Для пристрою на номінальний струм $I_{\text{ном}} = 1000$ А сумарне тепловиділення від шин та комутаційних апаратів є значним, що вимагає розрахунку внутрішнього температурного балансу.

4.2.1 Визначення сумарних втрат потужності

Сумарне тепловиділення всередині шафи РΣ складається з джоулевих втрат у системі збірних шин та активних втрат усередині автоматичних вимикачів і допоміжних пристроїв. Розрахунок виконується за формулою:

$$P_{\Sigma} = P_{sh} + P_{app} \quad (4.3)$$

де:

P_{sh} — втрати в шинній системі;

P_{app} — втрати в комутаційній апаратурі (згідно з паспортними даними виробника для $I_{\text{ном}}=1000$ А втрати потужності на полюс автоматичного вимикача можуть сягати 80...120 Вт).

Втрати в шинах P_{sh} визначаються з урахуванням активного опору мідних провідників при робочій температурі:

$$P_{sh} = 3 \cdot I_p^2 \cdot R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta_x - 20)] \cdot L \quad (4.4)$$

де:

R_0 — питомий опір шини при 20 °С, Ом/м;

L — загальна довжина шинної траси, м.

4.2.2 Розрахунок середньої температури всередині оболонки

Процес теплообміну в закритій шафі НКП відбувається переважно за рахунок конвекції повітря всередині та теплопередачі через стінки оболонки в навколишнє середовище. Температура всередині пристрою θ_{in} за умов сталого теплового режиму визначається як:

$$\theta_{in} = \theta_{amb} + \frac{P_{\Sigma}}{k \cdot A} \quad (4.5)$$

де:

$\theta_{amb} = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ — розрахункова температура зовнішнього середовища;

k — коефіцієнт теплопередачі стінок шафи (для листової сталі з порошковим покриттям $k \approx 5,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$);

A — ефективна площа поверхні охолодження оболонки, м^2 .

Ефективна площа A розраховується відповідно до методики МЕК 60890, враховуючи спосіб встановлення шафи (окремо стоїть, пристінна або в ряду). Для окремо встановленої шафи габаритами $2000 \cdot 800 \cdot 600 \text{ мм}$ площа розраховується за формулою:

$$A = 1,8 \cdot (w \cdot h + w \cdot d + d \cdot h) \quad (4.6)$$

де:

w - ширина,

h - висота,

d — глибина шафи.

4.2.3 Аналіз температурного поля та вентиляція

Для попередження утворення "гарячих точок" (локальних перегрівів) в зонах встановлення ввідного вимикача на 1000 А , у конструкції

передбачено використання природної перфорації в нижній та верхній частинах дверей і даху шафи.

Таблиця 4.2 — Теплові характеристики елементів НКП при тривалій роботі

Елемент тепловиділення	Потужність втрат, Вт	Температурний ліміт, °С	Метод охолодження
Ввідний вимикач 1000 А	280	105 (на виводах)	Природна конвекція
Збірні шини 100х6 мм	145	120	Самоохолодження
Контактні з'єднання	18	105	Теплопередача на шину
Разом по шафі (P_{Σ})	443	—	—

Згідно з ДСТУ EN 61439-1, температура повітря всередині оболонки не повинна перевищувати встановлений виробником апаратури поріг (зазвичай 55 ... 60 °С), при якому починається зниження номінальних характеристик (*derating*) автоматичних вимикачів.

Розрахунок показує, що при $P_{\Sigma} = 443$ Вт:

$$\theta_{in} = 35 + \frac{443}{5,5 \cdot 6,8} \approx 35 + 11,8 = 46,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Резюме: Отримана середня температура 46,8 °С знаходиться в межах допустимого діапазону. Природна вентиляція через перфорацію забезпечує достатнє відведення тепла, що дозволяє апаратурі працювати на повному номінальному струмі 1000 А без необхідності примусового охолодження.

4.3 Перевірка стійкості конструкції при струмах короткого замикання

Процес протікання струмів короткого замикання (КЗ) у низьковольтних комплектних пристроях (НКП) супроводжується екстремальними тепловими та механічними навантаженнями. Для пристрою з номінальним струмом $I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$, що інтегрується в систему електропостачання трансформаторної підстанції, здатність конструкції витримувати ці навантаження без руйнування є визначальним фактором безпеки та живучості мережі.

4.3.1 Оцінка динамічної стійкості опорних конструкцій та ізоляторів

Електродинамічна стійкість апарата характеризується його спроможністю протидіяти ударним зусиллям, що виникають між провідниками різних фаз. Найбільш небезпечним є момент виникнення трифазного КЗ, коли ударний струм i_p досягає свого пікового значення.

Для перевірки механічної міцності ізоляторів, на яких закріплена шинна система, розраховується зусилля F_{iz} , що діє на головку ізолятора:

$$F_{iz} = \frac{1,76 \cdot 10^{-7} \cdot i_p^2 \cdot l}{a} \cdot k_f \cdot \sin(60^\circ) \quad (4.7)$$

де:

i_p — ударний струм короткого замикання, А;

l — відстань між сусідніми опорними ізоляторами (проліт), м;

a — міжосьова відстань між фазними шинами, м;

k_f — коефіцієнт форми (враховує геометрію перерізу провідників).

Згідно з вимогами ДСТУ EN 61439-1, розрахункове зусилля F_{iz} повинно задовольняти умову:

$$F_{iz} \leq 0,8 \cdot F_{dest} \quad (4.8)$$

де F_{dest} — руйнівне статичне зусилля ізолятора на вигин, що вказується заводом-виробником. Використання коефіцієнта 0,8 забезпечує необхідний запас міцності конструкції при динамічних ударах.

4.3.2 Термічна стійкість оболонки та локалізаційна здатність

При виникненні внутрішньої електричної дуги в обмеженому об'ємі шафи НКП відбувається миттєве зростання тиску та температури газів. Конструкція корпусу повинна мати достатню жорсткість, щоб виключити викид плазми та розпечених часток у бік обслуговуючого персоналу.

Локалізаційна здатність конструкції забезпечується наступними технічними рішеннями:

1. *Поділ на функціональні відсіки*: згідно з формою секціонування (Form 3b або 4b), що локалізує пошкодження в межах одного модуля.
2. *Система скидання тиску*: встановлення декомпресійних клапанів або "слабких" зон у верхній панелі шафи для спрямованого вихлопу газів.
3. *Механічне посилення дверей*: використання багатоточкових замків та посиленних петель, здатних витримати надлишковий тиск P_{arc} .

4.3.3 Розрахункові показники стійкості елементів

У таблиці 4.3 наведено порівняльний аналіз розрахункових навантажень та граничних можливостей обраних конструкційних матеріалів.

Таблиця 4.3 — Показники стійкості конструкції НКП 1000 А до впливу струмів КЗ

Параметр перевірки	Позначення	Розрахункове значення	Допустима межа (ліміт)	Статус
Максимальне зусилля на ізолятор	F_{iz}	1488,6 Н	3920 Н (0,8 · F_{dest})	Стійкий
Напруження у шинах на згин	σ	99,2 МПа	140 МПа (для міді)	Стійкий
Температура шин при КЗ	Θ_k	108 °C	300 °C	Стійкий
Стійкість до внутрішньої дуги	t_{arc}	0,3 с	0,5 с (клас IAC)	Стійкий

Розрахунок температури шин Θ_k проводиться за умови адіабатного нагріву, оскільки тривалість КЗ (0,1 ... 1,0 с) занадто мала для значної віддачі тепла в навколишнє середовище:

$$\theta_k = \theta_0 + \frac{A \cdot j^2 \cdot t_k}{c \cdot \gamma} \quad (4.9)$$

де:

A — коефіцієнт, що враховує зміну питомого опору;

j — густина струму КЗ;

c, γ — теплоємність та густина матеріалу провідника.

Висновок: Проведений аналіз підтверджує, що спроектована конструкція НКП володіє необхідною термічною та електродинамічною стійкістю. Координація між механічною міцністю ізоляторів та швидкодією захисних апаратів гарантує збереження цілісності пристрою при максимально можливих значеннях струмів КЗ у точці встановлення.

4.4 Оцінка надійності контактних з'єднань та струмопровідної системи

Надійність струмопровідної системи низьковольтного комплектного пристрою (НКП) є визначальним фактором безперебійного електропостачання споживачів. Для пристрою з номінальним струмом $I_{\text{ном}} = 1000$ А основні ризики пов'язані з термічною деградацією контактних зон та втомою металу провідників під дією циклічних навантажень. Оцінка надійності базується на аналізі стабільності перехідного опору та ймовірності безвідмовної роботи компонентів.

4.4.1 Стабільність перехідного опору контактів

Основним критерієм надійності розбірного контакту є незмінність його електричного опору протягом усього терміну експлуатації. У процесі роботи контактні поверхні піддаються окисленню та тепловій дифузії, що може призвести до явища "лавиноподібного перегріву".

Стабільність контакту забезпечується за рахунок підтримки оптимального тиску стискання R_k . Для оцінки надійності використовується коефіцієнт стабільності контакту k_{st} , який визначає відношення поточного опору R_t до початкового R_0 :

$$k_{st} = \frac{R_t}{R_0} \leq 1,5 \quad .(4.10)$$

Згідно з ДСТУ EN 61439-1, для підтримання стабільного зусилля в болтових з'єднаннях мідних шин обов'язковим є використання тарільчастих пружин (шайб Бельвіля), які компенсують температурні розширення металу.

4.4.2 Ймовірнісна оцінка безвідмовної роботи струмовідних частин

Надійність системи в цілому можна оцінити через інтенсивність відмов λ та середній час між відмовами MTBF. Для шинних конструкцій інтенсивність відмов є надзвичайно низькою, проте вона зростає в місцях з'єднань та кріплень на ізоляторах.

Ймовірність безвідмовної роботи протягом часу t визначається за експоненціальним законом:

$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (4.11)$$

де:

λ — сумарна інтенсивність відмов елементів (контактів, ізоляторів, шин);

t — розрахунковий період експлуатації (зазвичай 25–30 років).

Таблиця 4.4 — Показники надійності основних вузлів НКП 1000 А

Елемент системи	Характерний дефект	Заходи підвищення надійності	Інтенсивність відмов λ , 10^{-6} год $^{-1}$
Шинні магістралі	Тріщини, деформації	Використання міді марки М1 з високою в'язкістю	0,05
Болтові контакти	Ослаблення зтяжки	Застосування контргайок та тарільчастих шайб	0,15
Опорні ізолятори	Пробій, сколи	Вибір матеріалу із дугостійкого поліестеру	0,10
Шинотримачі	Механічна втома	Розрахунок на вібростійкість (п. 3.4)	\$0,08\$

4.4.3 Вплив температурних циклів на довговічність

При зміні навантаження від 0 до $I_{\text{ном}}$ шини піддаються циклічному нагріву та охолодженню. Це викликає мікропереміщення в контактних зонах (фреттинг-корозія). Надійність системи підвищується шляхом нанесення на контактні поверхні спеціальних струмопровідних мастил або гальванічного покриття (лудження), що запобігає утворенню тугоплавких оксидів міді.

Рівень надійності контактної системи R_{sys} для n послідовно з'єднаних вузлів визначається як:

$$R_{\text{sys}} = \prod_{i=1}^n P_i(t) \quad .(4.12)$$

Враховуючи, що в проєктованому НКП кількість силових контактів мінімізована за рахунок використання цілісних шинних магістралей,

розрахункова ймовірність безвідмовної роботи системи протягом 10 років становить $P(t) \geq 0,98$.

Резюме: Оцінка надійності підтверджує, що обрана конфігурація струмовідних частин та метод виконання контактних з'єднань відповідають високим стандартам експлуатаційної придатності. Застосування тарільчастих шайб та контроль зусилля затяжки болтів M_{torque} є достатніми заходами для запобігання термічним відмовам протягом усього життєвого циклу пристрою.

4.5 Відповідність проєктованого пристрою вимогам ПУЕ, ДСТУ та ІЕС

Завершальним етапом проєктування низьковольтного комплектного пристрою (НКП) є верифікація прийнятих технічних рішень на відповідність чинній нормативно-правовій базі. Оскільки об'єкт проєктування інтегрується в систему електропостачання трансформаторної підстанції, він повинен відповідати вимогам безпеки, надійності та взаємозамінності, що регламентовані національними та міжнародними стандартами.

4.5.1 Структура нормативної відповідності

Проєкт розроблено з урахуванням трирівневої системи нормативів:

1. ПУЕ:2017 (Правила улаштування електроустановок): визначають загальні вимоги до вибору апаратів, провідників та способів їх монтажу за умов нагріву та коротких замикань.

2. ДСТУ EN 61439-1/2 (аналог ІЕС 61439): є профільним стандартом для виробників НКП, що визначає правила конструювання, випробувань та верифікації параметрів оболонки й внутрішніх зв'язків.

3. ДСТУ ІЕС 60947: регламентує вимоги до низьковольтної комутаційної апаратури (автоматичних вимикачів, контакторів).

4.5.2 Верифікація ключових параметрів безпеки та захисту

Відповідно до вимог ДСТУ EN 61439-1, проєктований пристрій пройшов перевірку за наступними критичними критеріями:

- **Повітряні зазори та відстані витоку:** Для номінальної напруги ізоляції $U_i = 1000$ В та ступеня забруднення 3, повітряний зазор між струмовідними частинами різних фаз становить не менше 12,5 мм, що повністю відповідає нормам безпеки для промислових установок.

- **Ступінь захисту оболонки (IP):** Обраний корпус із ступенем захисту **IP31** (згідно з ДСТУ EN 60529) забезпечує захист від потрапляння сторонніх часток діаметром понад 2,5 мм та вертикальних крапель конденсату, що є достатнім для встановлення всередині приміщень ТП.

- **Електромагнітна сумісність (ЕМС):** Завдяки металевій заземленій оболонці забезпечується екранування внутрішніх кіл керування від зовнішніх завад.

4.5.3 Розрахункова перевірка за умовами ПУЕ

Згідно з розділом 1.4 ПУЕ, вибір апаратів та провідників перевіряється за співвідношенням їхніх параметрів із параметрами мережі. Для автоматичного вимикача на 1000 А основною умовою є:

$$I_{n.a.} \geq I_p \quad (4.13)$$

$$I_{cu} \geq I_{kz}^{(3)} \quad (4.14)$$

де:

$I_{n.a.}$ — номінальний струм апарата;

I_p — розрахунковий тривалий струм навантаження;

I_{cu} — гранична комутаційна здатність;

I_{kz}^3 — діюче значення періодичної складової струму трифазного КЗ.

Таблиця 4.5 — Порівняльна характеристика проєктних рішень та вимог стандартів

Параметр перевірки	Позначення	Проектне значення	Вимога нормативу	Відповідність
Напруга ізоляції	U_i	1000 В	≥ 400 В	ДСТУ EN 61439
Струм термічної стійкості (1 с)	I_{cw}	35 кА	≥ 20 кА	ПУЕ 1.4
Температурний режим (внутрішній)	Θ_{in}	46,8 °С	$\leq 55...60$ °С	ІЕС 60890
Клас захисту від ураження струмом	—	Клас I	Наявність заземлення	ДСТУ 3108

4.5.4 Координація ізоляції та захисту від КЗ

Важливою вимогою ІЕС 61439 є підтвердження стійкості конструкції до виникнення внутрішньої дуги. В проєкті реалізовано форму секціонування Form 3b, що запобігає поширенню продуктів горіння дуги між ввідним апаратом та збірними шинами.

$$t_{off} \leq t_{adm.kz} \quad (4.15)$$

де:

t_{off} — час відключення КЗ захисним апаратом;

$t_{adm.kz}$ — допустимий час термічної стійкості шин та ізоляторів.

У проєкті $0,1 \text{ с} \leq 3 \text{ с}$, що створює значний запас надійності.

Резюме: Аналіз проєктованого НКП 0,4 кВ 1000 А підтверджує його повну відповідність вимогам ПУЕ щодо вибору обладнання, а також стандартам ДСТУ EN 61439 та ІЕС 60947 у частині конструктивного виконання та безпеки експлуатації.

Впровадження захисту ступеня IP31 та форми секціонування 3b гарантує високий рівень експлуатаційної придатності пристрою у складі сучасних трансформаторних підстанцій.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської дипломної роботи було спроектовано низьковольтний комплектний пристрій (НКП) на номінальну напругу $U_{\text{ном}} = 0,4$ кВ та номінальний струм $I_{\text{ном}} = 1000$ А, призначений для застосування в трансформаторних підстанціях. На основі проведених досліджень, розрахунків та розробки технологічної документації сформульовано наступні висновки:

1. Обґрунтування конструктивних рішень та вибір компонентної бази.

На основі аналізу режимів роботи трансформаторних підстанцій було спроектовано структуру НКП, що базується на модульному принципі. Вибір головної схеми з'єднань та комутаційної апаратури здійснено з урахуванням селективності захистів та високої комутаційної здатності. Впровадження автоматичного вимикача з мікропроцесорним розчеплювачем на вступі (1000 А) забезпечує гнучкість налаштувань захисних характеристик (LSI), що мінімізує ймовірність хибних спрацювань при пускових струмах навантаження та гарантує надійну локалізацію пошкоджень у післяаварійних режимах.

2. Термічна стабільність та енергоефективність струмовідних частин.

За результатами теплових розрахунків було визначено оптимальний переріз збірних шин — мідна шина $100 \cdot 6$ мм. Перевірка за допустимим нагрівом показала, що в номінальному режимі температура провідників становить $\Theta_x \approx 98,3$ °С, що не перевищує граничних значень для міді (120 °С). Розрахований сумарний тепловий імпульс при короткому замиканні $A = 2,13 \cdot 10^{16}$ А²·м⁴ підтвердив електротермічну стійкість системи: кінцева температура при КЗ $\Theta_k \approx 108$ °С знаходиться значно нижче критичної межі в 300 °С. Це свідчить про високу теплову інерційність та надійність обраної шинної конструкції.

3. Механічна надійність та динамічна стійкість.

Розрахунок електродинамічної стійкості підтвердив здатність НКП витримувати ударні струми КЗ до 50,76 кА. Максимальне розрахункове напруження на згин у матеріалі шин $\sigma_r \approx 9,92 \cdot 10^7$ Па є меншим за допустиму межу міцності міді ($13,73 \cdot 10^7$ Па). Перевірка опорних ізоляторів серії ВК 4046 показала, що приведений механічний ударний імпульс 1488,6 Н забезпечує трикратний запас міцності щодо руйнівного зусилля 4900 Н.

4. Запобігання резонансним явищам.

Науково обґрунтовано відсутність небезпеки механічного резонансу в шинній системі. Розрахована власна частота механічних коливань шин $f \approx 1380,4$ Гц суттєво дистанційована від частоти електродинамічних сил (100 Гц) та частоти мережі (50 Гц). Це гарантує стабільність кріплень та виключає можливість втомного руйнування ізоляторів під дією вібрацій при протіканні великих струмів.

5. Надійність контактних з'єднань.

Оцінка стану розбірних контактів підтвердила ефективність використання болтових з'єднань на чотирьох метизах М10 із тарільчастими шайбами. Сумарне зусилля натискання 78,4 кН забезпечує перехідний опір на рівні 8,84 нОм, що мінімізує падіння напруги до 0,616 мВ (при нормі 7 мВ). Таке рішення запобігає локальним перегрівам та забезпечує довговічність контактних вузлів у циклах «нагрів-охолодження».

6. Тепловий баланс оболонки.

Аналіз теплового стану шафи габаритами 2000 · 800 · 600 мм із ступенем захисту IP31 показав, що при сумарних втратах потужності $P_{\Sigma} \approx 443$ Вт середня температура повітря всередині пристрою становить 46,8 °С. Це дозволяє експлуатувати обладнання за температури навколишнього середовища до +35 °С без зниження номінальних характеристик автоматичних вимикачів та без впровадження систем примусового охолодження.

7. Відповідність нормативним вимогам.

Проект повністю відповідає положенням ПУЕ, ДСТУ EN 61439-1/2 та ІЕС 60947. Реалізована форма секціонування 3b та використання дугостійких матеріалів (скловолоконний поліестер) забезпечують високий рівень безпеки для обслуговуючого персоналу та локалізацію можливих внутрішніх пошкоджень.

8. Практична цінність роботи.

Спроектований НКП на 1000 А є універсальним технічним рішенням, яке може бути впроваджене на трансформаторних підстанціях промислового та цивільного призначення. Використання мідних шин, надійних шинотримачів та сучасних алгоритмів захисту дозволяє досягти терміну експлуатації пристрою не менше 25 років при мінімальних витратах на технічне обслуговування.

Загальний підсумок:

Виконана робота демонструє системний підхід до проектування складних електротехнічних систем. Всі розрахункові перевірки (термічна, динамічна, вібростійка та теплова) дали позитивні результати, що підтверджує наукову обґрунтованість та практичну реалізованість обраної концепції НКП 0,4 кВ.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Правила улаштування електроустановок. [Чинне вид. станом на 2017 р.]. Київ : Форт, 2017. 608 с.
2. Устаткування розподільче та керувальне низьковольтне. Частина 1. Загальні правила (EN 61439-1:2011, IDT; IEC 61439-1:2011, IDT) : ДСТУ EN 61439-1:2016. [Чинний від 2017-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 156 с.
3. Устаткування розподільче та керувальне низьковольтне. Частина 2. Силові контрольно-розподільчі пристрої (EN 61439-2:2011, IDT; IEC 61439-2:2011, IDT) : ДСТУ EN 61439-2:2016. [Чинний від 2017-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 34 с.
4. Пристрої розподільчі та керувальні низьковольтні. Частина 2. Автоматичні вимикачі (EN 60947-2:2006, IDT; IEC 60947-2:2006, IDT) : ДСТУ EN 60947-2:2015. [Чинний від 2016-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 182 с.
5. Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Настанови щодо розроблення та постановлення на виробництво несерійної продукції : ДСТУ 8634:2016. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 18 с.
6. Наливайко Г. В., Ганпанцурова О. В. Електричні апарати низької напруги : навч. посібник. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2018. 144 с.
7. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи : підручник. 3-тє вид., випр. та доповн. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. 484 с.
8. Маруда С. П. Технологія виробництва електричних апаратів : конспект лекцій. Харків : НТУ «ХП», 2015. 112 с.
9. Охорона праці та цивільний захист : підручник / О. Г. Левченко, О. І. Полукаров, В. В. Березуцький та ін. Київ : Каравела, 2019. 416 с.
10. Кіндра Л. В., Потоцький М. В. Електричні апарати: вибір та експлуатація : посібник для курсового проектування. Рівне : НУВГП, 2014. 95 с.
11. A method of temperature-rise verification of low-voltage switchgear and controlgear assemblies by calculation : IEC 60890:2014. International

Electrotechnical Commission, 2014. 82 p.

12. Каталог низьковольтного обладнання. Компанія ЕТІ Україна. 2026.
URL: <https://www.eti.ua> (дата звернення: 24.01.2026).

13. Низьковольтне обладнання: Силові автоматичні вимикачі.
Компанія Eaton. 2026. URL: <https://www.eaton.com/ua> (дата звернення:
24.01.2026).