

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»

Інститут Електроенергетики  
(інститут)  
Електротехнічний факультет  
(факультет)  
Кафедра електроенергетики  
(повна назва)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
**кваліфікаційної роботи ступеню магістра**  
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента Грищенка Богдана Сергійовича  
(ПІБ)  
академічної групи 141М-22-1  
(шифр)  
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код і назва спеціальності)

за освітньо-професійною програмою Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(офіційна назва)

**на тему: «Дослідження показників якості напруги в системі електропостачання металургійного комбінату з дуговими сталеплавильними печами»**

(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	академік НАН України Півняк Г.Г.			
розділів:				
Спеціальний	академік НАН України Півняк Г.Г.			
Економічний	доц. Тимошенко Л.В.			
<b>Рецензент</b>				
<b>Нормоконтролер</b>	доц. Олішевський Г.С.			

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**  
завідувач кафедри  
електроенергетики  
(повна назва)

\_\_\_\_\_ Папаїка Ю.А.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**ЗАВДАННЯ**  
**на кваліфікаційну роботу**  
**ступеня магістра**  
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

Студенту Гриценку Б.С. академічної групи 141М-22-1  
(прізвище та ініціали) (шифр)  
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

за освітньо-професійною програмою Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(офіційна назва)

на тему: «Дослідження показників якості напруги в системі електропостачання металургійного комбінату з дуговими сталеплавильними печами»

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

Розділ	Зміст	Термін виконання
<i>Спеціальний</i>	ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	02.10.23-25.10.23
	РОЗРОБКА ОПТИМАЛЬНОЇ СХЕМИ ПІДСТАНЦІЇ РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ	23.10.23-01.12.23
<i>Економічний</i>	ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ПРОЕКТУ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ НА ВИРОБНИЦТВІ	02.12.23-10.12.23

Завдання видано \_\_\_\_\_  
(підпис керівника)

Півняк Г.Г.  
(прізвище, ініціали)

Дата видачі 01 вересня 2023

Дата подання до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_

Прийнято до виконання \_\_\_\_\_  
(підпис студента)

Гриценко Б.С.  
(прізвище, ініціали)

## Реферат

*Пояснювальна записка:* 74 с., 13 табл., 20 рис., 15 використаних джерел інформації.

*Об'єкт розробки:* підстанція глибокого вводу 330/35/10 кВ «Пічна» МЗ «Дніпросталь».

*Мета кваліфікаційної роботи:* розробка заходів покращення електроенергії в системі електропостачання металургійного комбінату.

*В спеціальному розділі* дана характеристика основного технологічного устаткування. Проведений аналіз електроспоживання та наведені заходи енергозбереження. Виконані основні технічні розрахунки, які доводять правильність вибору фільтрокомпенсуючого пристрою. Описані проблеми, які спричиняє основне обладнання заводу. Обґрунтування впровадження заходів підвищення якості електроенергії.

*В економічному розділі* розрахований економічний ефект від встановлення фільтрокомпенсуючого пристрою.

ДУГОВА ПЧ, ПІДСТАНЦЯ, ТРАНСФОРМАТОР,  
ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИЙ ПРИСТРІЙ, ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ,  
ГАРМОНІКА, СТК.

## ЗМІСТ

Вступ.....	5
1. Спеціальний розділ.....	7
1.1 Загальні дані.....	8
1.2 Характеристика основного технологічного устаткування.....	9
1.3 Аналіз електроспоживання, основні показники електрогосподар- ства ЕСПК і витрати електроенергії.....	13
1.4 Заходи енергозбереження.....	16
1.5 Вплив дугових сталеплавильних печей на якість електроенергії.....	20
1.6 Компенсація реактивної потужності та якість електроенергії.....	25
1.7. Аналіз втрат електроенергії в електричних мережах підприємства.....	30
1.8 Дослідження та розрахунок ФКП.....	42
2. Економічний розділ.....	63
2.1 Вступ.....	64
2.2 Розрахунок капітальних вкладень.....	65
2.3 Розрахунок експлуатаційних витрат.....	66
2.4 Визначення річної економії.....	67
2.5 Визначення показників економічної ефективності проекту.....	67
2.6 Висновки щодо ефективності проекту.....	69
Висновки.....	70
Перелік використаних джерел.....	72
Додатки.....	74

**ВСТУП**

Проблема якості електроенергії знаходиться у центрі уваги багатьох дослідників і практичних працівників енергетики і електрифікації. Важливе місце тут займає пошук нових рішень цієї актуальної наукової задачі. Кінцевим результатом в цьому пошуку повинно бути упровадження передових методів оптимального планування, які знаходять все більше застосування у всіх ланках народного господарства.

У системах електропостачання промислових підприємств дуже часто зустрічаються такі приймачі електричної енергії, трифазне симетричне виконання яких або неможливе, або через низку причин недоцільне.

Дугові сталеплавильні печі є потужним і «неприємним» споживачем для енергосистеми. Вони працюють з низьким коефіцієнтом потужності рівним 0,7 – 0,8, споживана з мережі потужність міняється протягом плавки, а електричний режим характеризується частими поштовхами струму, аж до обриву дуги при експлуатаційних коротких замиканнях. Дуги генерують високочастотні гармоніки, небажані для інших споживачів і викликаючих додаткові втрати в живлячій мережі.

Для підвищення коефіцієнта потужності можна включати конденсатори на шини головної живлячої підстанції, що живить групи печей, оскільки при поштовхах струму реактивна потужність коливається у великих межах, необхідно забезпечити можливість швидкої зміни цієї ємності. Для такого регулювання можна використовувати високовольтні ключі тиристорів. Для боротьби з вищими гармоніками використовуються фільтри, налаштовані на найбільш інтенсивні гармоніки.

При застосуванні фільтрів одночасно вирішуються два завдання: зниження діючого значення вищих гармонійних і компенсація постійної складової реактивної потужності.

## **1. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ**

## 1.1 Загальні дані

Об'єм виробництва комплексу – 1320 тис.т в рік безперервнолитої заготівки круглого перетину  $\varnothing$  150÷470 мм для виробництва труб, залізничних коліс, бандажів.

На підприємстві представлені об'ємно-планувальні рішення по складу і розміщенню основного технологічного устаткування в ЕСПЦ; розглянуті основні положення технології виплавки, позапічної обробки і розливання сталі; склад і розміщення об'єктів комплексу ЕСПЦ на генплані; розроблені заходи щодо підготовки і забезпечення комплексу витратними матеріалами, енергопостачання; утилізації відходів виробництва; захисту навколишнього середовища, вирішення по організації будівництва, включаючи методи виробництва робіт і терміни будівництва.

Тривалість будівництва об'єктів комплексу в огорожі заводу, включаючи споруджувані «під ключ» – 26 місяців.

Розроблене виробництво відповідає нормам, що діють в Україні, і правилам, зокрема по безпеці праці і вибухо-пожежобезпеки.

Для виплавки, позапічної обробки і розливання сталі передбачається установка нового високотехнологічного устаткування – електродугової сталеплавильної печі (ДСП) ємністю 186 т з трансформатором 140 МВА; двопозиційної установки ківш-піч (УКП) для ковша ємністю 160 т з трансформатором 28 МВА; двохпостановочного камерного вакууматора з пароежекторним насосом для ковша ємністю 160 т; п'ятиструмкової сортової машини безперервного литва заготовок (МБЛЗ) (діаметр відливаних заготовок 150-290 мм); чотирьохструмкової сортової МБЛЗ (діаметр відливаних заготовок 385-470 мм).

Виплавка сталі передбачається на шихті, що складається з 100 % сталевого лома або 80 % сталевого лома і 20 % чушкового чавуну.



У ЕСПЦ передбачається виплавка наступних марок сталі: вуглецевих, кремній-марганцевих і низьколегованих.

Визначено, що для виплавки сталі передбачається одна електродугова сталеплавильна піч, а розливання сталі, враховуючи великий діапазон потрібних споживачами перетинів, здійснюється на двох спеціалізованих МБЛЗ.

Для виплавки і розливання сталі в ЕСПЦ встановлюється нове сучасне високотехнологічне устаткування, що поставляється «Danieli».

Технологічна схема виробництва безперервнолитих заготовок включає:

- виплавку сталі в ДСП;
- позапічну обробку сталі на УКП і вакууматорі;
- розливання сталі на МБЛЗ;
- відвантаження готових заготовок для відправки споживачам.

Споруда двопозиційної установки ківш-піч з електродуговим підігрівом, призначеними для обробки сталі в ковші забезпечить вищу якість металу за змістом неметалічних включень, однорідності хімічного складу за всім обсягом заготовки, вищі механічні характеристики.

Спорудження вакууматора дозволить здійснити технологічні процеси по зневуглицюванню, дегазації, розкислюванню, легуванню, коректуванню хімічного складу, усереднюванню металу по складу і температурі.

## **1.2 Характеристика основного технологічного устаткування**

Для виплавки і розливання сталі в ЕСПЦ, встановлюється нове сучасне високотехнологічне устаткування постачання італійської фірми «Danieli».

### *1.2.1 Дугова сталеплавильна піч (ДСП)*

Конструкція електропечі і технологія виплавки сталі відповідають сучасному рівню електросталеплавильного виробництва і забезпечують отримання якісної сталі.

Основні функції печі:

- розплавлення твердої металошихти і нагрів розплаву до температури зливу металу в сталерозливний ківш;
- окислення вуглецю, кремнію, марганцю, фосфору і інших домішок, що містяться в металошихті.

До складу устаткування ДСП входять наступні основні вузли:

- платформа печі з опорними роликками і спрямовувачі;
- корпус печі;
- опорні балки зводу;
- механізм нахилу печі;
- система контролю положення печі;
- пристрій фіксації печі в горизонтальному положенні;
- водоохолоджуваний звід печі з газовідвідним патрубком;
- механізм повороту зводу і електродної колони;
- механізм підйому електродів (електродна колона);
- механізм підйому зводу;
- направляючі ролики електродної колони;
- пристрій для затиску електродів;
- система електродугового нагріву металу з пічним трансформатором номінальною потужністю 140 МВА;
- система ексцентрично розташованого донного випуску сталі з обслуговуючим майданчиком;
- водоохолоджені панелі кожуха;
- система подачі легуючих і шлакотворних матеріалів;
- газокисневі пальники;
- система вдування вуглецьвмісних матеріалів;
- пристрій механізованого виміру температури і відбору проб;

- стени для зберігання і згинання електродів;
- система продування металу в ковші аргонном через донні пористі пробки при випуску плавки;
- гідравлічна система;
- пневматична система;
- система водяного охолодження;
- система подачі енергоносіїв;
- система змащення;
- сталевоз, обладнаний системою управління і пристроєм, що зважує;
- система управління і контролю технологічних параметрів процесу (КВПіА, АСК ТП);
- система видалення димових газів;
- електроустаткування;
- робочий і обслуговуючі майданчики.

### *1.2.2 Установка ківш-піч (УКП)*

Двопозиційна установка призначена для позапічної обробки сталі в ковші ємкістю 160т. з метою доведення по хімічному складу і температурі перед розливанням.

До складу устаткування УКП входять наступні основні вузли:

- водоохолоджені кришки з витяжними парасольками, обладнані механізмом підйому, опускання і переміщення в позицію обробки сталі;
- підйомно-несуча конструкція;
- система електродугового підігріву металу в ковші з пічним трансформатором номінальною потужністю 28 МВА;
- механізм підйому і опускання електродів;
- пристрій для затиску електродів;
- сталевози для сталековшів, обладнані пристроєм, що зважує;

- система продування металу в ковші аргоном через донні пористі пробки;
- система подачі сипких матеріалів і феросплавів;
- устаткування введення проволочи в ківш – чотирьохструмковий трайб-апарат;
- стенди для зберігання і згвинчення електродів;
- система водяного охолодження;
- система подачі енергоносіїв;
- система гідравліки;
- система змащування;
- система контролю технологічних параметрів і управління (КВПіА, АСУ ТП);
- електроустаткування;
- робочий майданчик і металоконструкції.

### *1.2.3 Машина безперервного литва заготовок (МБЛЗ)*

Для виробництва безперервнолитої заготовки в ЕСПЦ встановлюються дві сортові МБЛЗ.

До складу устаткування кожної МБЛЗ входять наступні основні вузли:

- розливний підйомно-поворотний стенд, обладнаний пристроєм, що зважує, і призначений для установки сталековша в робочу і резервну позиції, з механізмом накриття сталерозливного ковша кришкою;
- промковши з кришками;
- системи зважування промковшів;
- візки для транспортування проміжних ковшів в робочу і резервну позиції;
- механізми кріплення вогнетривких труб і стаканчиків для захисту струменя металу від вторинного окислення;
- кристалізатори гільзові для перетинів Ø150, Ø170, Ø210, Ø250, Ø290, Ø385, Ø410, Ø450, Ø470;

- механізми гойдання кристалізаторів з гідравлічним приводом;
- пристрій подачі теплоізолюючої суміші в промковш і кристалізатори;
- пристрої електромагнітного перемішування;
- зони вторинного охолодження з системою зрошування форсункою заготовки водоповітряною сумішшю;
- тягнуче-правильні машини з затравками для витягування заготовок;
- машина газового різання;
- транспортні рольганги для передачі заготовки;
- клеймувачі заготовки (маркувальні машини);
- рольганг розвантаження заготовок;
- крокуючий стіл охолодження заготовок;
- накопичувальний стіл;
- система водяного охолодження устаткування;
- гідравлічна система з устаткуванням насосно-акумуляторної станції;
- пневматична система;
- централізована система густого змащування;
- система подачі енергоносіїв (кисню, природного газу, аргону, азоту);
- система управління і контролю технологічних параметрів процесу (АСУ ТП, КВПіА);
- електроустаткування;
- розливний і обслуговуючі майданчики, опорні металоконструкції.

### 1.3 Аналіз електроспоживання, основні показники електрогосподарства ЕСПК і витрати електроенергії

Основні показники електрогосподарства проєктованого електросталеплавильного комплексу по виробництву безперервнолитої заготовки приведені в таблиці 1.1.

Як впливає з приведених основних показників електрогосподарства і витрат електроенергії по проєктованих об'єктах і виробництвах комплексу з сумарного електроспоживання комплексом 7,1 % або  $65842 \cdot 10^3$  кВт·г складає електроспоживання на природоохоронні заходи – газоочистки, уловлювання і очищення неорганізованих викидів, оборотне водопостачання і ін.

Значні збільшення споживання електроенергії на природоохоронні заходи ЕСПК обумовлено розміщенням майданчика будівництва в міській місцевості поблизу житлової забудови м. Дніпропетровська.

Таблиця 1.1 Основні показники електрогосподарства проєктованого будівництва електросталеплавильного комплексу по виробництву безперервнолитої заготовки МЗ «Дніпросталь» (з урахуванням киснево-компресорної станції)

Найменування показника	Одиниця виміру	Значення показника	Примітки
1 Напруга зовнішнього електропостачання енергосистеми	кВ	330, 150	
2 Напруга підстанцій глибокого вводу:			
- живляча – від існуючих джерел «Дніпроенерго»;	кВ	330, 150	
- живлення печі ДСП і установки ківш-пічч УКП;	кВ	35	
- загальноцехових високовольтних споживачів і КТП	кВ	10	
3 Напруга живлення від КТП:			
- низьковольтних загальноцехових;	В	380/220	
- освітлення;	В	380/220	
- ремонтна	В	12,36	

4 Частота струму і напруги	Гц	50	
5 Встановлена потужність	кВт	186460	
6 Максимальне навантаження по комплексу ЕСПЦ, в тому числі: - пічне навантаження на термічні процеси для технологічних потреб	кВт кВт	169900 137500	
7 Максимальне загальнозаводське «спокійне» навантаження комплексу на стороні 10 кВ, в тому числі: - низьковольтна	кВт кВт	32400 14900	
8 Коефіцієнт попиту	-	0,91	
9 Річне електроспоживання комплексу ЕСПЦ	т кВт. г	928415	
10 Річне електроспоживання по власне ЕСПЦ, в тому числі: - на термічні процеси для технологічних потреб	т кВт. г т кВт. г	821105 749880	
11 Річне електроспоживання загальнозаводських споживачів («спокійних»)	т кВт. г	178535	
12 Кількість годин використання максимального навантаження	-	5464	
13 Кількість встановлених електродвигунів	шт	983	
14 Середня потужність електродвигуна (електроспоживача)	кВт	190	
15 Питоме електроспоживання в цілому по комплексу ЕСПЦ на 1т литої заготовки, в тому числі: - по власне ЕСПЦ; - лише на термічні процеси для технологічних потреб	кВт. ч/г кВт. ч/г кВт. ч/г	703,3 622 568	Річний обсяг виробництва безперервно литої заготовки складає – 1320 тис т/рік

Питоме електроспоживання по власне ЕСПЦ складає 622 кВт·г/т литої заготовки, а на термічні процеси для технологічних потреб 568 кВт·г/т.

Слід зазначити, що приведені в таблиці 1.1 показники електрогосподарства проектного електросталеплавильного комплексу будуть покращені при установці в живлячій мережі 35 кВ дугової печі ДСП і УКП і введення в експлуатацію регульованих фільтрокомпенсуючих пристроїв з установкою динамічної компенсації реактивної потужності

виробництва фінської фірми «NOKIAN CAPACITORS», які є одним з ефективних енергозбережних заходів і практично обгрунтовують:

1 Протікання раціональних режимів електроспоживання:

- нульове перетікання реактивної потужності на межі балансової приналежності живлячої електромережі;
- скорочення втрат активної електроенергії по перетіканнях реактивної;
- підвищення величини активної потужності, що вводиться в піч;
- зниження навантаження мережевих трансформаторів і живлячих кабельних ліній.

2 Оптимізацію ведення технологічного процесу плавки в печах:

- скорочення циклу плавки;
- зниження величини питомих витрат активної електроенергії;
- скорочення витрати електродів;
- стабілізацію протікання ізотермічних процесів в печах;
- підвищення продуктивності пічних агрегатів.

3 Електромагнітну сумісність сталеплавильних печей з живлячою їх електричною мережею:

- нейтралізацію вищих гармонік струму, що генеруються електропічними агрегатами;
- стабілізацію напруги мережі;
- симетрування напруги мережі;
- збільшення терміну служби ізоляції елементів електричної мережі (кабелів, трансформаторів і ін.) і її електроприймачів (конденсаторних установок і ін.);
- підвищення надійності роботи релейного захисту.

Високий технічний рівень намічених рішень забезпечується наступним:

- застосуванням сучасного сертифікованого електроустаткування із зниженими значеннями втрат потужності, габаритів і маси, з високими показниками надійності;



- раціональною компоновкою устаткування в будівлях і розміщення підстанції на генплані, що дозволяє здійснити найбільш короткі кабельні зв'язки між устаткуванням і об'єктами електропостачання, а також зручностями їх обслуговування;

- використання кабелів з підвищеною пропускною спроможністю;

- максимальне використання комплектних пристроїв;

- оптимальна компенсація реактивної потужності і підтримка потрібних по ГОСТ 13109-97 показників якості електроенергії з використанням установки УДК і ФКУ, що забезпечують підтримку оптимального коефіцієнта потужності і придушення вищих гармонік струму і напруги і що є одним з ефективних енергозбережних заходів.

#### **1.4 Заходи енергозбереження**

Передбачені заходи енергозбереження згідно ДБН А.2.2-3-2004, доповнення І, п. 5.

Розроблена проектна документація згідно вимогам ДБН В.2.5-20-2001 «Газопостачання», СНіП II-35-76 «Котельні установки», СНіП 2.04.07-86 «Теплові мережі», СНіП II-3-79\* «Будівельна теплотехніка», СНіП 2.04.05-91 «Опалювання, вентиляція і кондиціонування» « Правила улаштування електроустановок», ВСН-205-84 «Інструкція по проектуванню електроустановок систем автоматизації технологічних процесів» і інших нормативних документів, що діють в Україні, і вимог технічних умов підприємств-виробників устаткування.

Запроектовано енергоефективне устаткування, економні технологічні системи.

Енергоспоживаюче устаткування, матеріали, труби, сполучні деталі, зварні і ізоляційні матеріали відповідають діючим вимогам Державного стандарту України, імпортоване устаткування має сертифікати УКРСЕПРО.

Траси і матеріали підземних газопроводів запроектовані згідно вимог ДБН В.2.5-20-2001, розділ 4.

Передбачений облік витрати природного газу (загального і технологічного) згідно вимог ДБН В.2.5-20-2001,п.п. 6.106,6.107,6.108,6.110,11.58.

Перед лічильниками газу встановлюються фільтри, вимірники температури і тиску.

Передбачено використання устаткування по утилізації тепла газів казанів, що виходять.

Передбачена автоматизована система контролю і управління технологічними процесами згідно вимог ДБН В.2.5-20-2001,розділ 12.

Передбачений вибір контрольно-вимірювальних приладів (КВП) згідно вимогам ДБН В.2.5-20-2001,п.11.57.

Матеріали і вироби прийняті в проекті системи газопостачання, відповідають вимогам ДБН В.2.5-20-2001,розділ 11.

Передбачені високоефективні теплоізоляційні матеріали для ізоляції трубопроводів, устаткування, арматури і фланцевих з'єднань теплових мереж, що включають теплову ізоляцію трубопроводів гарячого водопостачання згідно вимог СНіП 2.04.14-88, СНіП 2.04.01-85, СНіП II-35-76.

Значення опору теплопередачі і паропроникнення конструкцій (зовнішніх стін, підлоги, покриття, вікон, дверей), що захищають, прийняті згідно СНіП II-3-79\*\* изм. 1, затверджених наказом «Держбуду» від 27.06.1966г. №117.

Захисні конструкції адміністративно - побутової будівлі утеплені теплоізоляційними матеріалами, які забезпечують питоме споживання теплової енергії в межах встановлених нормативів. СНіП 2.04.05-91, зм №1, доповнення 25; ДБН В 2.2-9-99, п.8.2.

Перед кожним зовнішнім входом будівель запроектовані тамбури для захисту втрат тепла і захисту від вітру згідно вимог ДБН В.2.2-9-99,п.3.3.

Застосована замкнута система водопостачання без скидання промислових стоків у водоймища з частковим підживленням системи.

Система опалювання оснащена автоматичними регуляторами теплового потоку згідно вимог СНіП 2.04.05-91, зм 2, п. 3.15.

Передбачено при опалюванні приміщень регулювання використання теплової енергії автоматичними терморегуляторами згідно СНіП 2.04.05-91, зм №2, п.3.14.

Система опалювання адміністративно – побутової будівлі з фіксованою тривалістю робочого дня оснащена приладами зменшення теплового потоку в неробочий час згідно СНіП 2.04.05-91, зм 1, п. 3.16.

Передбачено автоматичне управління вмикання та вимикання зовнішнього і внутрішнього освітлення сходових кліток і коридорів згідно вимог ДБН В.25-23-2003, п.п. 9.20, 9.22.

## **1.5 Вплив дугових сталеплавильних печей на якість електроенергії**

### ***Виплавка сталі в ДСП***

Технологічний процес плавки металу в ДСП передбачає плавку на «болоті» (ємність печі – 186 т, зливаний метал – 160 т, «болото» – 26 т) з інтенсифікацією процесу плавлення киснево-паливними пальниками з вдуванням пиловугільного палива і наведенням пінявого шлаку.

Після завалення першої корзини насувається звід, вмикається система аспірації, опускаються електроди, запалюється дуга і починається розплавлення металошихти. Процес плавлення і нагріву інтенсифікують киснево-паливними пальниками з вдуванням пиловугільного палива. Після розплавлення першої корзини металошихти в піч завалюється друга корзина, далі процес повторюється. Під час плавлення і нагріву додаються шлакотворні матеріали, наводиться шлак, відбувається зневуглецювання і перегрів металу. Відбір проб здійснюється після розплавлення першої корзини, другої корзини, в середині продування рідкої ванни і перед випуском металу.

Регулювання потужності, що віддається, виконується зміною положення електродів (довжини електричної дуги) або напруги на електродах. Тривалість циклу плавки складає в середньому 60 хвилин.

Метал під електродами розігрівається, плавиться і стікає вниз, збираючись в центральній частині піддону. Електроди прорізають в шихті колодязі, в яких ховаються електричні дуги. Особливістю стадії розплавлення є неспокійне горіння електричної дуги. Низька стійкість дуги пояснюється низькою температурою в печі.

Під електроди закидають вапно для наведення шлаку, який закриває голий метал, оберігаючи його від окислення. Поступове озеро металу під електродами стає все більше. Воно підправляє шматки шихти, які падають в рідкий метал і розплавляються в ньому. Рівень металу в печі підвищується, а електроди під дією автоматичного регулятора піднімаються вгору. В період розплавлення трансформатор працює з повним навантаженням і навіть з 15 % перевантаженням, що допускається паспортом, на найвищому ступені напруги. У цей період потужні дуги не небезпечні для футерування звоу і стін, оскільки вони закриті шихтою. Футерування, що застигло під час завантаження, може прийняти велику кількість тепла без небезпеки її перегріву.

Для прискорення розплавлення шихти використовують різні методи. Найбільш ефективним є застосування потужних трансформаторів. Так, на печах місткістю 186 т встановлені трансформатори потужністю 140 МВА, на двопозиційній установці ківш-піч (УКП) для ковша ємністю 160 т встановлений трансформатор потужністю 28 МВА. Тривалість плавлення при вико-ристанні потужних трансформаторів зменшується до 1–1,5 г. Крім того, для прискорення розплавлення застосовують паливні мазутні або газові пальники, які вводять в піч через робоче вікно. Застосування пальників прискорює нагрів і розплавлення шихти, особливо в холодних зонах печі.

Ефективним методом є застосування газоподібного кисню. Кисень подають в піч як через сталеві футеровані трубки у вікно печі, так і за допомогою

фурми, що опускається в піч зверху через отвір в зводі. Завдяки екзотермічним реакціям окислення домішок і заліза виділяється додатково велика кількість тепла, яке нагріває шихту, прискорює її повне розплавлення. Використання кисню зменшує тривалість нагріву ванни. Період розплавлення скорочується на 20—30 хв, а витрата електроенергії на 60—70 кВт·г на 1 т сталі.

### *Електроустаткування дугових печей*

Установка дугової печі включає в свій склад, окрім власне печі і її механізмів з електро- або гідроприводом, також комплектуюче електрообладнання: пічний трансформатор, струмопроводи від трансформатора до електродів дугової печі — так звану коротку мережу, розподільний пристрій (РП) на стороні вищої напруги трансформатора з пічними вимикачами; регулятор потужності; щити і пульти управління, контролю і сигналізації; програмуючий пристрій для управління режимом роботи печі та ін.

Установки дугових печей — крупні споживачі електроенергії, їх одиничні потужності вимірюються тисячами і десятками тисяч кіловат. Витрата електроенергії на розплавлення тонни твердого завалення досягає 400—600 кВт·г. Тому живлення печей виконується від мереж 6, 10 і 35 кВ через понижуючі пічні трансформатори (максимальні значення вторинної лінійної напруги трансформаторів лежать зазвичай в межах до 320 В у печей малої і середньої ємності і до 510 В у крупних печей).

В зв'язку з цим для установок печей характерна наявність спеціальної пічної підстанції з трансформатором і РП. У нових установках застосовуються шафи комплектних розподільчих пристроїв (КРП), виконаних по уніфікованих схемах. Пічні підстанції розташовують в безпосередній близькості від печей. Щити і пульти управління для установок дугових сталеплавильних печей ємністю до 12 т розміщують в межах пічної підстанції з обслуговуванням пульта з цеху (з робочого майданчика). Для

крупніших печей можуть передбачатися окремі пультові приміщення із зручним, оглядом робочих вікон печей.

Електричні дугові печі споживають значні струми, вимірювані тисячами і десятками тисяч ампер. Такі струми створюють великі падіння напруги навіть на малих активних і індуктивних опорах ланцюгів живлення електродів. Внаслідок цього пічний трансформатор розміщують в безпосередній близькості від печі в спеціальній пічній підстанції.

Коротка мережа дугової печі складається з ошиновки в трансформаторній камері, гнучкої кабельної гірлянди, трубошин, електродотримача і електроду, що переміщаються разом з кареткою. На дугових печах ємністю до 10 т використовують схему «зірка на електродах», коли вторинні обмотки пічного трансформатора сполучені в трикутник на виході з ка-мери. Інші схеми короткої мережі, що дозволяють зменшити її реактивний опір, застосовують на потужніших печах.

### ***Пічні трансформаторні агрегати***

В установках дугових печей використовуються спеціально призначені для них трифазні – масляні трансформатори. Потужність пічного трансформатора є другим після ємності найважливішим параметром дугової печі і визначає тривалість розплавлення металу, що в значній мірі позначається на продуктивності печі. Повний час плавки сталі в дуговій печі складає до 1—1,5 г для печей ємністю до 10 т і до 2,5 г для печей ємністю до 40 т.

Напругу на дуговій печі в ході плавки потрібно змінювати в досить широких межах. На першому етапі плавки, коли відбувається розплавлення скрапу, в піч повинна вводитися максимальна потужність, щоб прискорити цей процес. Але при холодній шихті дуга нестійка. Тому для збільшення потужності необхідно підвищувати напругу. Тривалість етапу розплавлення складає 50% і більше від загального часу плавки, при цьому споживається 60—80% електроенергії. На другому і третьому етапах — при окисленні і

рафінуванні рідкого металу (видаленні шкідливих домішок і випалюванні зайвого вуглецю) дуга горить спокійніше, температура в печі вища, довжина дуги збільшується.

Щоб уникнути передчасного виходу з ладу футеровки печі дугу укорочують, знижуючи напругу.

### *Дугові печі як споживачі електроенергії*

Дугові сталеплавильні печі є потужним і «складним» споживачем для енергосистеми. Вони працюють з низьким коефіцієнтом потужності рівним 0,7 – 0,8, споживана з мережі потужність міняється протягом плавки, а електричний режим характеризується частими поштовхами струму, аж до обриву дуги при експлуатаційних коротких замиканнях. Дуги генерують високочастотні гармоніки, небажані для інших споживачів і викликаючих додаткові втрати в живлячій мережі.

Для підвищення коефіцієнта потужності можна включати конденсатори на шини головної живлячої підстанції, що живить групи печей, оскільки при поштовхах струму реактивна потужність коливається у великих межах, необхідно забезпечити можливість швидкої зміни цієї ємності. Для такого регулювання можна використовувати високовольтні ключі тиристорів, керована схемою підтримка КМ. близьким до 1. Для боротьби з вищими гармоніками використовуються фільтри, налаштовані на найбільш інтенсивні гармоніки.

## **1.7 Компенсація реактивної потужності та якість електроенергії**

Основними споживачами електроенергії проектного електросталеплавильного комплексу по виробництву безперервнолитої заготовки є: дугова електросталеплавильна піч з пічним трансформатором потужністю 140 МВА і первинною напругою 35 кВ і установка ківш-піч з пічним трансформатором потужністю 28 МВА і первинною напругою 35 кВ, трифазні високовольтні електродвигуни технологічної газоочистки ЕСПЦ,

аспіраційної пиловловлюючої установки складу сипких матеріалів і феросплавів, повітряних компресорів компресорної станції з осушенням повітря, синхронні електродвигуни компресорів киснево-компресорної станції (ККС), високовольтні асинхронні двигуни з к.з.р. насосів водопідготовки ЕСПЦ, низьковольтні асинхронні двигуни з к.з.р. підйомно-транспортного устаткування, аспіраційних установок, насосних агрегатів водопідготовки, технологічних механізмів ДСП, УКП, МНЛЗ №№ 1 і 2, АБК з їдальні, лабораторії, внутрішнє і зовнішнє освітлення, споживачі установок пожежогасінні і ін.

Дугові сталеплавильні печі ДСП і УКП відносяться до так званих «специфічних» навантажень, що негативно впливають на якість електричної енергії. Характер режиму електроспоживання ДСП відповідає її різкозмінному, повторно-короткочасному режиму роботи.

Робота печей з нестабільним споживанням реактивної потужності, супроводжується виникненням в електричній мережі коливань напруги мережі, а нелінійність струму, споживаного піччю, приводить до спотворення форми кривою струму і напруги.

ГОСТ 13109-97 «Електрична енергія» накладає обмеження на рівень завад що привносяться споживачами електричної енергії в мережу, що живить їх, і зобов'язує при перевищенні норм, що допускаються стандартом, упроваджувати засоби по нейтралізації цих завад.

Для вирішення проблем забезпечення належної якості електроенергії і компенсації реактивної потужності в системах електропостачання ДСП і УКП встановлюються пристрої динамічної компенсації реактивної потужності (УДК) і фільтрокомпенсуючі пристрої (ФКП) для пригнічення вищих гармонік струму і напруги. Враховуючи великий досвід: у розрахунках показників якості електроенергії (ПЯЕ) і режимів електропостачання ДСП і УПК із застосуванням УДК і ФКУ, їх експлуатації, виготовлення і монтажу, а також невелику вартість, передбачається виготовлення і постачання пристрою динамічній компенсації реактивній



потужності і фільтрокомпенсируючих пристроїв фірми «NOKIAN Capacitors», Фінляндія. Установка системи УДК і ФКУ передбачається на ПГВ «Пічна» – 330/35 кВ.

Компенсацію реактивної потужності «спокійних» споживачів комплексу передбачено здійснити установкою регульованих батарей статичних конденсаторів в проєктованих РП-10 кВ і КТП-10/0,4 кВ, з урахуванням режимів роботи синхронних електродвигунів 10 кВ з випереджаючим коефіцієнтом потужності. Вказаними заходами передбачається досягти нормативного коефіцієнта потужності, рівного 0,98.

Орієнтовна потужність статичних конденсаторів складає:

*на РП-ЕСПЦ – 7200 кВар;*

*на РП-ВП – 3600 кВар.*

### **Обладнання ФКП**

Конструктивно система компенсації реактивної потужності і фільтрації гармонійних складових складається з наступних частин (рис. 1.1):

- фільтру 3-ої гармоніки потужністю 45,99 Мвар;
- фільтру 4-ої гармоніки потужністю 65,20 Мвар;
- фільтру другої гармоніки потужністю 41,74 Мвар;
- реактори з управлінням тиристора потужністю 150 Мвар.

Все основне силове устаткування за винятком тиристорів розміщене на відкритому розподільному пристрої (рис. 1.2). Фільтри 3-ої і 4-ої гармонік через роз'єднувачі Р-Ф-3-Г і Р-Ф-4-Г об'єднуються у ФКП. Фільтри другої гармоніки і реактори з тиристорним керуванням через роз'єднувачі Р-СКРМ і Р-Ф-2-Г об'єднуються в систему компенсації реактивної потужності (СКРП). Для заземлення устаткування передбачені заземляючі ножі закріплені на валах вищеперелічених роз'єднувачів. ФКП отримує живлення по фідеру Р-ФКУ ЗРУ35/10кВ, СКРП отримує живлення по фідеру Р-СКРМ ЗРУ35/10кВ. Для можливості автоматичного управління системою

передбачені силові елегазові вимикачі навантаження EB-31ФКУ і EB-31СКРМ встановлені в кімнаті №1 закритого приміщення ФКП.

### ***Вентилі тиристорів***

Вентиль тиристора призначений для управління струмом приєднаного до лінії реактора (реактор, керований тиристорами, – РУТ), що дозволяє безперервно регулювати реактивну потужність.

Вентиль тиристора складається з двох плечей послідовно сполучених тиристорів, кожне для своєї півхвилі струму. Обидва плечі у вентилі тиристора сполучено один з одним на кожному рівні тиристора. Таким чином, вентиль складається з послідовних пар антипаралельно включених тиристорів. Вентиль тиристора містить 19 послідовно включених тиристора, зокрема два резервних. Кожна пара тиристора забезпечена демпфуючим ланцюгом, що складається із сполучених послідовно, резистора R101.119 і конденсатора С101.119.

Тиристори управляються електронікою тиристора А201.220, яка перетворює оптичні імпульси, отримані через оптоволоконні лінії від базової електроніки вентиля (шафа NVB) в електричні імпульси необхідні для управління тиристорами. Електроніка тиристора живиться від блоку відбору потужності ЕС-unit, який отримує енергію від демпфуючого ланцюга вентиля.

Елементи модуля, які виділяють тепло (тиристори, демпфуючі резистори), охолоджуються глибоко очищеною деіонізованою водою.

Перед проведенням ремонтних робіт необхідно переконатися, що з устаткування знята напруга, і включені всі заземлюючі ножі ВРП 35кВ ФКП, і на фідерах Р-ФКУ, що відходять, і Р-СКРМ ЗРП 35/10 кВ.



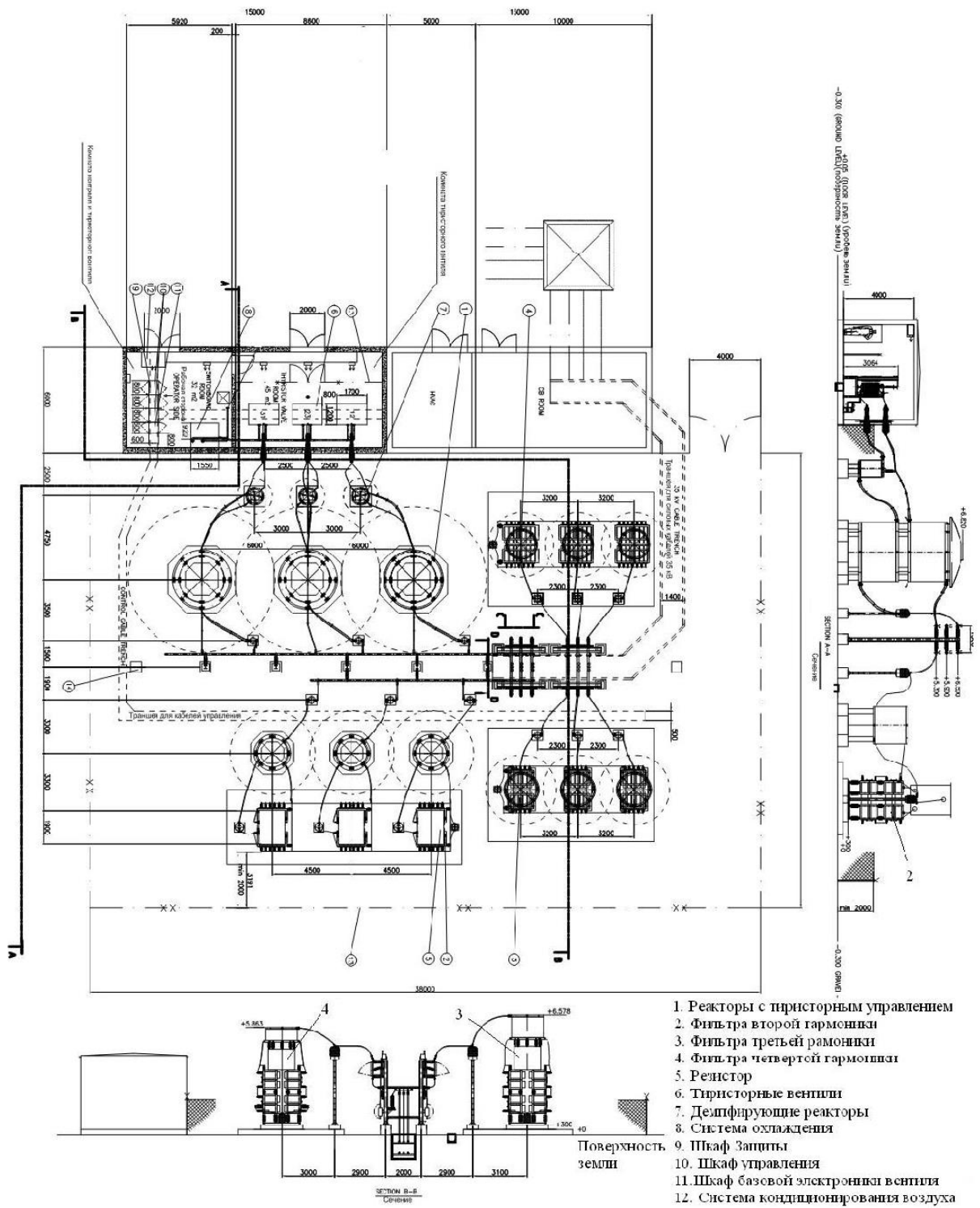


Рисунок 1.2 – План розміщення основного обладнання ФКП

### ***Практична користь від використання ФКП***

Установка в живлячій мережі 35 кВ ДСП і УКП і введення в експлуатацію регульованих фільтрокомпенсуючих пристроїв з установкою

динамічної компенсації реактивної потужності виробництва фінської фірми «NOKIAN CAPACITORS» практично обґрунтовує важливі показники.

1. Протікання раціональних режимів електроспоживання:

- нульове перетікання реактивної потужності на межі балансової приналежності живлячої електромережі;
- скорочення втрат активної електроенергії по перетіканнях реактивної;
- підвищення величини активної потужності, що вводиться в печі;
- зниження навантаження мережевих трансформаторів і живлячих кабельних ліній.

2. Оптимізацію ведення технологічного процесу плавки в печах:

- скорочення циклу плавки;
- зниження величини питомих витрат активної електроенергії;
- скорочення витрати електродів;
- стабілізацію протікання ізотермічних процесів в печах;
- підвищення продуктивності пічних агрегатів.

3. Електромагнітну сумісність сталеплавильних печей з живлячою електричною мережею:

- нейтралізацію вищих гармонік струму, що генеруються електропічними агрегатами;
- стабілізацію напруги мережі;
- симетрування напруги мережі;
- збільшення терміну служби ізоляції елементів електричної мережі (кабелів, трансформаторів і ін.) і її електроприймачів (конденсаторних установок і ін.);
- підвищення надійності роботи релейного захисту.

Оптимальна компенсація реактивної потужності і підтримка потрібних по ГОСТ 13109-97 показників якості електроенергії з використанням

установки УДК і ФКП, підтримка оптимального коефіцієнта потужності і пригнічення вищих гармонік струму і напруги є одним з ефективних заходів з енергозбереження.

### **1.7. Аналіз втрат електроенергії в електричних мережах підприємства**

#### ***Принципи розрахунку втрат енергії в електричних мережах методом графічного інтегрування***

Найбільш точним методом розрахунку втрат електроенергії в елементах електричної мережі є метод графічного інтегрування. Метод досить трудомісткий, оскільки вимагає частої реєстрації показань приладів обліку електроенергії. Результати розрахунку втрат за даним методом вважаються еталонними та за ними перевіряють точність інших методів. Як вихідна інформація для розрахунків втрат в електричних мережах «МЗ Дніпросталь» є графіки навантажень, представлені у вигляді півгодинного споживання електроенергії за такими вводами. Номери вводів відповідають номерам на спрощеній схемі (рис.1.3).

- 1 - лінія 330 кВ ввід №1;
- 2 - лінія 330 кВ ввід №2;
- 3 - ЗРУ 35 кВ ввід №1;
- 4 - ЗРУ 35 кВ ввід №2;
- 5 - ЗРУ 10 кВ ввід №1;
- 6 - ЗРУ 10 кВ ввід №2;
- 7 - ЗРУ 10 кВ ввід №3;
- 8 - ЗРУ 10 кВ ввід №4.

Значення втрат електроенергії в будь-якому елементі електричної мережі за методом графічного інтегрування є наступною залежністю:

$$\Delta A = \frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i + \sum_{i=1}^n Q_i^2 t_i}{U_{ном}^2} R \quad (1.1)$$

де  $P_i, Q_i$  - значення активної та реактивної потужності на  $i$ -й ступені графіка,  $t_i$  - тривалість  $i$ -й ступені графіку,  $U_{ном}$  - номінальна напруга мережі,  $R$  - активний опір елемента.

Оскільки графік представлений у вигляді півгодинного споживання активної та реактивної енергії, зробимо перетворення формули до зручного для розрахунку виду.

З теоретичних основ електротехніки відомо, що активна енергія дорівнює  $A = P \cdot t$ , реактивна енергія  $W = Q \cdot t$ . У добовому графіку 48 ступенів. Тривалість ступеня графіка активного та реактивного навантаження дорівнює 0,5 години.

Звідси добові втрати електроенергії:

$$\Delta A_0 = \frac{\sum_{i=1}^{48} \left( \frac{A_i}{t_i} \right)^2 t_i + \sum_{i=1}^{48} \left( \frac{W_i}{t_i} \right)^2 t_i}{U_{ном}^2} R = \frac{2 \left( \sum_{i=1}^{48} A_i + \sum_{i=1}^{48} W_i \right)}{U_{ном}^2} R \quad (1.2)$$

Таким чином, отримана залежність адаптована до розрахунків за наявними півгодинними значеннями витрати електроенергії. Наступний етап розрахунку – отримання активних опорів елементів електричної мережі. Елементи електричної мережі, в яких проводиться розрахунок втрат енергії, представлені на спрощеній схемі електропостачання підприємства (рис.1.3).

Активний опір повітряної або кабельної лінії електропередач визначається за залежністю:

$$R_{ЛЕП} = r_0 \cdot L_{ЛЕП}, \quad (1.3)$$

де  $r_0$  - питомий опір, Ом/км,  $L_{ЛЕП}$  - довжина ЛЕП, км.

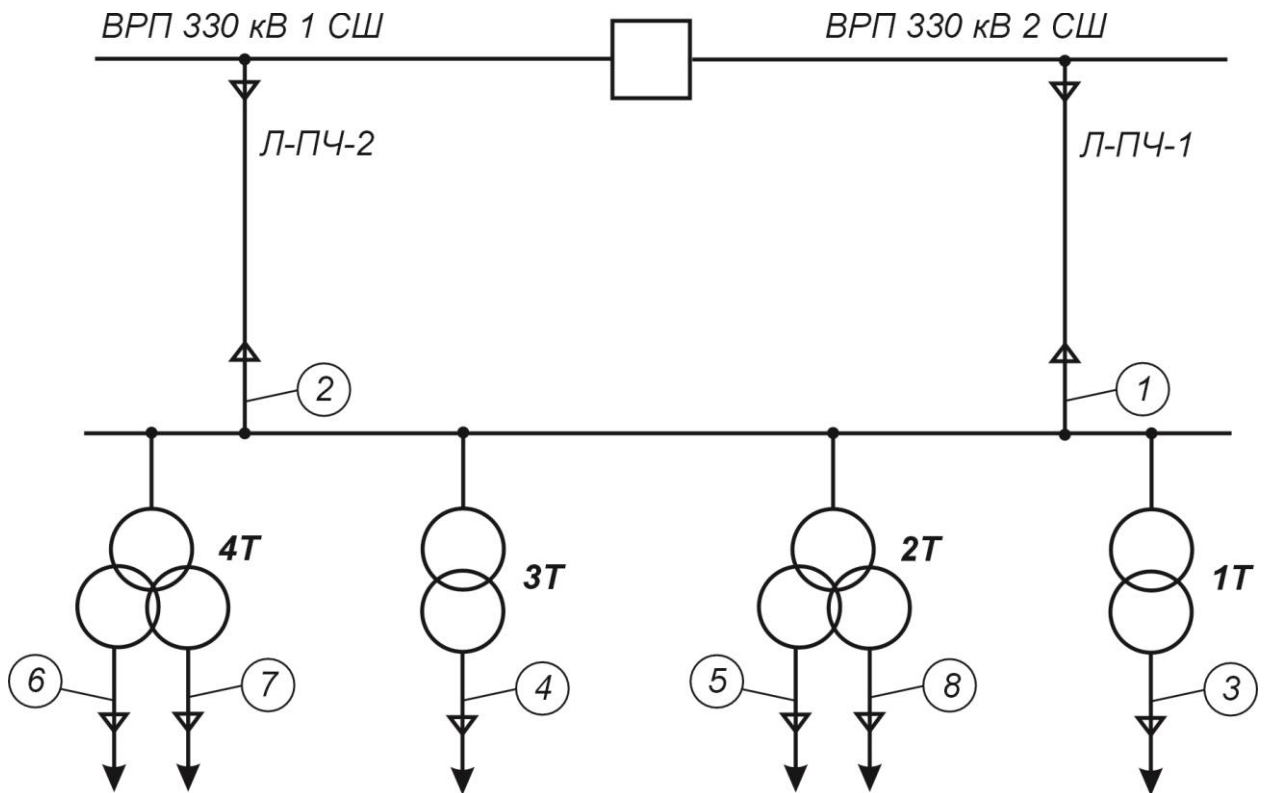


Рисунок 1.3 - Спрощена схема ПС 330/35/10 кВ «Пічна»

### *Аналіз добових та місячних графіків споживання електроенергії.*

Визначення параметрів схем заміщення кабельних ліній та силових трансформаторів

Добові графіки електричних навантажень отримані за допомогою АСКУЕ і є півгодинними значеннями активної та реактивної енергії. Для прикладу подаємо графік за 1 січня 2022 року за введенням №1 330 кВ (рис. 1.4-1.5).



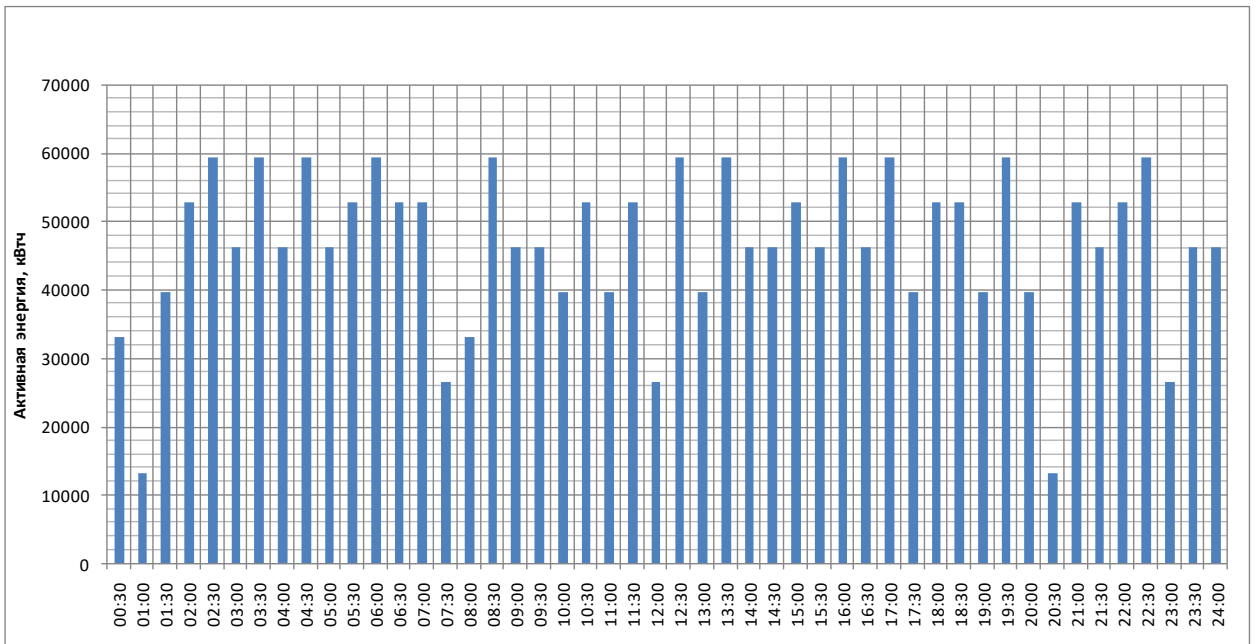


Рисунок 1.4 - Добовий графік активної енергії по вводу №1 330 кВ

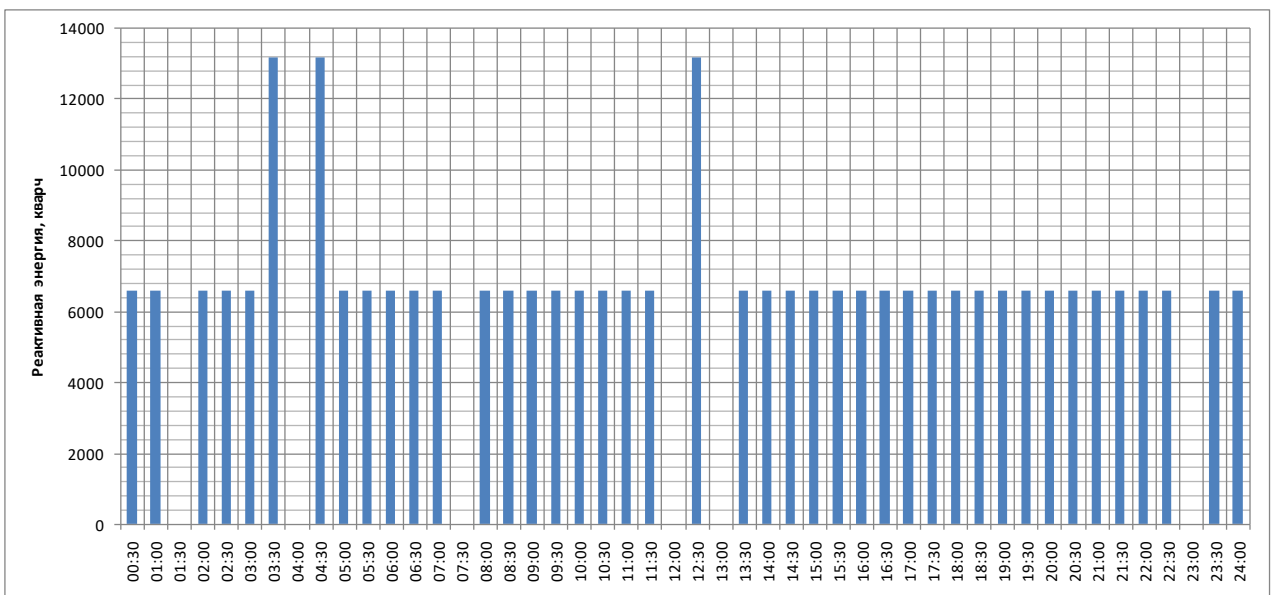


Рисунок 1.5 - Добовий графік реактивної енергії по вводу №1 330 кВ

Графіки електричних навантажень за місяць отримані за сумарними добовими витратами електроенергії за вводами 1-8. Для прикладу подаємо графік за січень 2022 року за вводами №1 330 кВ (рис. 1.6).

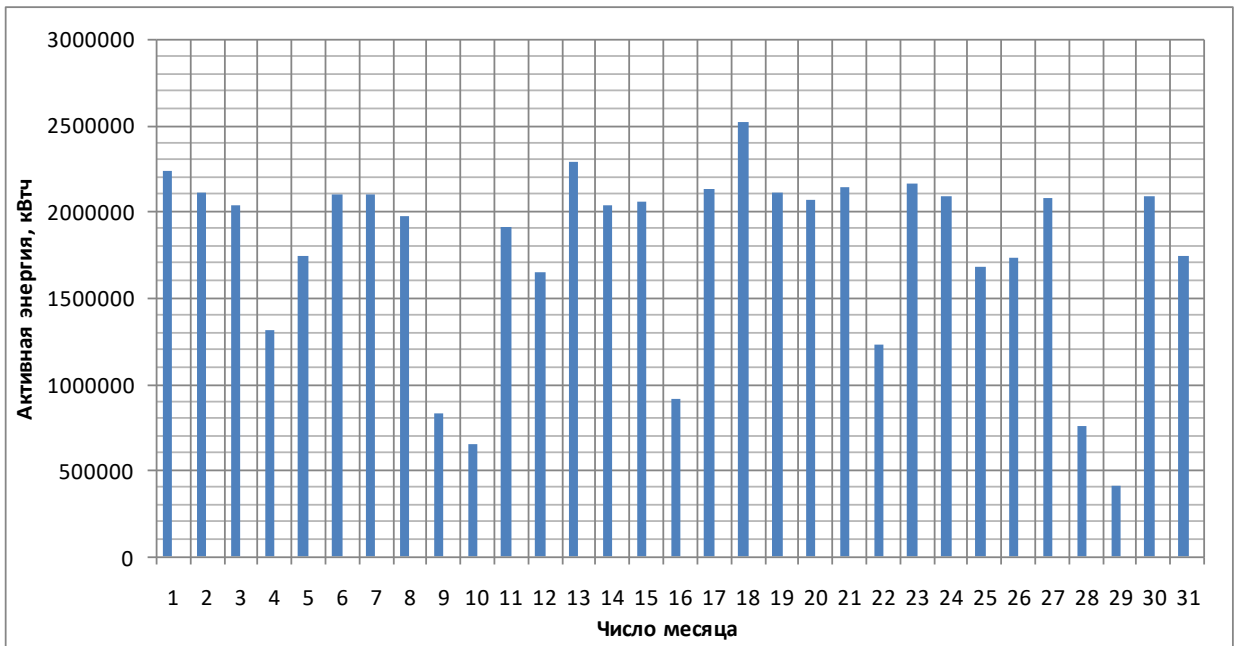


Рисунок 1.6 - Місячний графік по вводу №1 330 кВ

Для розрахунку втрат електроенергії необхідно отримати значення активних опорів кабельних ліній (КЛ) та силових трансформаторів. Необхідно відзначити, що опори трансформаторів повинні бути приведені до того боку напруги, де отримані графіки електричних навантажень методом графічного інтегрування.

За відсутності довідкових даних для питомих опорів КЛ використовують точну формулу:

$$r_0 = \frac{1000}{\gamma \cdot F}, \quad (1.4)$$

де  $\gamma = 31,7 \frac{М}{Ом \cdot мм^2}$  - питома провідність матеріалу,  $F$  - перетин жили кабелю,  $мм^2$ .

Розрахунок питомих та активних опорів для КЛ 330, 35 та 10 кВ «МЗ Дніпросталь» представимо у вигляді таблиці.

Табл.1. Розрахунок активних опорів КЛ

Точка на схемі	Номер вводу	Марка кабелю	Довжина кабелю, км	$r_0$ , Ом/км	$R$ , Ом
1	линия 330 кВ Ввод №1		12,7	0,039	0,5
2	линия 330 кВ Ввод №2		12,7	0,039	0,5
3	ЗРУ 35 кВ Ввод №1	АПВЭВНГ-35 6х1х630 АПВЭВНГ-35 6х1х630	0,055 0,07	0,05	0,002
4	ЗРУ 35 кВ Ввод №2	АПВЭВНГ-35 6х1х630 АПВЭВНГ-35 6х1х630	100 100	0,05	0,002
5	ЗРУ 10 кВ Ввод №1	АПВЭВНГ-10 9х1х500	0,065	0,063	0,004
6	ЗРУ 10 кВ Ввод №2	АПВЭВНГ-10 9х1х500	0,07	0,063	0,0044
7	ЗРУ 10 кВ Ввод №3	АПВЭВНГ-10 9х1х500	0,08	0,063	0,005
8	ЗРУ 10 кВ Ввод №4	АПВЭВНГ-10 9х1х500	0,075	0,063	0,0047

Опір силових трансформаторів залежить від їх типу і з'єднання обмоток вторинної напруги. У цій схемі присутні трансформатори двох типів: двообмоткові напругою 330/35 кВ та двообмоткові з розщепленням обмотки НН напругою 330/10 кВ.

Опір двообмоткового трансформатора без розщеплення:

$$R_T = \frac{\Delta P_{K3} \cdot U_{ном.ср}^2}{S_{ном}^2}, \quad (1.5)$$

де  $\Delta P_{K3}$  - втрати КЗ, Вт;  $U_{ном.ср}$  - середня номінальна напруга, кВ;  $S_{ном}$  - номінальна потужність трансформатора, кВА.

Опір трансформаторів ТДНМ-160000/330:

$$R_{T1,3} = \frac{428000 \cdot 347,5^2}{160000^2} = 2,02 \text{ Ом}$$

Опір трансформаторів ТРДН-63000/330:

$$R_{T2,4} = \frac{223000 \cdot 347,5^2}{63000^2} = 6,78 \text{ Ом.}$$

Розрахунок втрат виконаємо для чотирьох силових трансформаторів 1Т, 2Т, 3Т, 4Т за середньодобовим та місячним графіком електричних навантажень, а також для кабельних ліній зовнішнього електропостачання 330 кВ, а також для КЛ 35 та 10 кВ вводів у ЗРП. Розрахунки подаємо у вигляді таблиці за січень 2022 року (табл. 1.2).

Для оцінки сезонних змін втрат електроенергії здійснено розрахунок втрат за серпень 2021 року (табл. 1.3).

Табл.1.2. Розрахунок місячних втрат електроенергії (зимовий місяць)

Тип обладнання	Втрати $\Delta A$ , кВт·ч	
	по добовому графіку	по місячному графіку
КЛ 330 кВ ввід №1	608	20652,8
КЛ 35 кВ ввід №1	142	4835,7
КЛ 35 кВ ввід №2	0	0
КЛ 10 кВ ввід №1	13	352
КЛ 10 кВ ввід №2	90,5	2716
КЛ 10 кВ ввід №3	7	200
КЛ 10 кВ ввід №4	37	976
1Т	2455 2642,4 (холостий хід)	83438 (холостий хід)
2Т	2642,4 (холостий хід)	81914,4 (холостий хід)
3Т	125 1471,2 (холостий хід)	3940 45607,2 (холостий хід)
4Т	210 1471,2 (холостий хід)	6100 45607,2 (холостий хід)

Табл.1.3. Розрахунок місячних втрат електроенергії (літній місяць)

Тип обладнання	Втрати $\Delta A$ , кВт·ч	
	по добовому графіку	по місячному графіку
КЛ 330 кВ ввід №2	610	19671,3
КЛ 35 кВ ввід №1	0	0
КЛ 35 кВ ввід №2	164	5342
КЛ 10 кВ ввід №1	15	380
КЛ 10 кВ ввід №2	93	3100
КЛ 10 кВ ввід №3	10	230
КЛ 10 кВ ввід №4	42	1050
1Т	2708 2642,4 (холостий хід)	92455 81914,4 (холостий хід)
2Т	2642,4 (холостий хід)	81914,4 (холостий хід)
3Т	127 2472 (холостий хід)	4126 76632 (холостий хід)
4Т	219 2472 (холостий хід)	6870 76632 (холостий хід)

## *Методика розрахунку додаткових втрат потужності в елементах електричної мережі при несиметрії та насинусоїдності напруги живлення*

Негативні наслідки для системи електропостачання за наявності вищих гармонійних складових струму та напруги.

Вищі гармоніки в електричних мережах небажані через цілий ряд наслідків системи електропостачання заводу – вони негативно впливають на технічний стан електрообладнання та погіршують економічні показники його роботи. Все це визначає наявність додаткових втрат потужності та енергії, які погіршують тепловий режим електроустаткування, ускладнюють компенсацію реактивної потужності за допомогою батарей статичних конденсаторів, скорочується термін роботи електричних машин та апаратів через прискорене старіння ізоляції, спостерігаються збої у роботі пристроїв системної та мережевої автоматики, засобів телемеханіки

Дія вищих гармонік неявно виражена і має кумулятивний ефект, тому їх наслідки у вигляді руйнування ізоляції електричних машин і кабелів виявляються через певний проміжок часу. Спотворення форми кривої напруги впливає на виникнення та протікання іонізаційних процесів в ізоляції. За наявності газових включень в ізоляції виникає іонізація, фізичний зміст якої полягає у створенні об'ємних зарядів та подальшої їх нейтралізації. Нейтралізація зарядів пов'язана з розсіюванням енергії, наслідком є електричний, механічний і хімічний вплив на навколишній діелектрик. Все це спричиняє розвиток місцевих дефектів в ізоляції, що призводить до скорочення терміну служби ізоляції. За наявності вищих гармонік у кривій напругі процес старіння ізоляції протікає інтенсивніше, особливо у кабелях та конденсаторах. Деякі автори стверджують, що при значенні вищих гармонік в 5% через два роки експлуатації конденсаторів  $\text{tg}\delta$  збільшується в два рази.

При протіканні струмів вищих гармонік за елементами електричних мереж та електроустаткування споживачів виникають додаткові втрати активної потужності та електричної енергії.

Найбільше значення втрат активної потужності від вищих гармонік спостерігається у трансформаторах, двигунах, генераторах, повітряних та кабельних лініях електропередач. Збільшення активних опорів зазначених елементів із збільшенням частоти пропорційні величині, незважаючи на те, що це дещо неточне наближення. У деяких випадках додаткові втрати можуть призвести до неприпустимого перегріву та виходу з ладу електрообладнання. Значення додаткових втрат активної потужності та енергії визначається режимом роботи електрообладнання та рівнем вищих гармонік у мережі.

*Додаткові втрати активної потужності від вищих гармонік у кабельних лініях*

Значення додаткових втрат активної потужності повітряних і кабельних ЛЕП визначається так:

$$\Delta P_{\text{донv}} = 3 \sum_{v=3}^n I_v^2 R_v, \quad (1.6)$$

де  $I_v$  - струм  $v$ -ї гармоніки;  $R_v$  - опір КЛ на частоті  $v$ -ї гармоніки.

Загалом активний опір кабельних ЛЕП рекомендується визначати за залежністю:

$$R_v = R_2 K_r K_{rv},$$

де  $R_2 = r_0 l$  - активний опір зворотньої послідовності ЛЕП;  $K_r = \sqrt{v}$  - коефіцієнт, що враховує зміну активного опору частоти;  $K_{rv}$  - поправочний коефіцієнт, який враховує розподіл параметрів у схемі заміщення (оскільки довжини кабелів менше 1 км, то розподіл параметрів можна не враховувати, тому  $K_{rv} = 1$ ).

*Додаткові втрати активної потужності від вищих гармонік у силових трансформаторах*

Втрати у трансформаторах на частотах ВГ пропорційні значенню:

$$\sum_{n=2}^n \frac{U_{nx}}{n\sqrt{n}} = \sum_{n=2}^n \Lambda_n U_{nx}, \quad (1.7)$$

де  $\Lambda_n = \frac{1}{n\sqrt{n}}$  – коефіцієнт гармонійних втрат.

Значення коефіцієнту  $\Lambda_n$ , в залежності від номеру гармоніки, показані у таблиці 1.4.

Табл. 1.4. Залежність коефіцієнту  $\Lambda_n$

$n$	5	7	11	13
$\Lambda_n$	0,089	0,054	0,027	0,021

Втрати на частотах ВГ:

$$\Delta P_n = \Delta P_{\text{ном}} \rho \sum_{n=2}^n \Lambda_n U_{nx} \quad (1.8)$$

Індекс ВГ для Тр:  $\rho_{\text{Тр}}^{(\text{ВГ})} = \frac{0,6}{u_k^2}$ , де  $u_k$  – напруга КЗ.

**Несиметрія напруг** в СЕП підприємства обумовлена наявністю потужного трифазного навантаження тривало працює в несиметричному режимі - дугова сталеплавильна піч.

При несиметрії напруг у трифазних мережах з'являються додаткові втрати в елементах електромереж, скорочується термін служби ламп та електроустаткування та знижуються економічні показники його роботи.

В електричних машинах змінного струму виникають магнітні поля, що обертаються із синхронною швидкістю у напрямку обертання ротора та з

подвійною синхронною швидкістю в протилежному. В результаті виникає гальмівний електромагнітний момент, а також додаткове нагрівання активних частин машини, головним чином ротора, за рахунок струмів подвійної частоти.

В асинхронних двигунах (АТ) при коефіцієнтах зворотної послідовності напруг, що зустрічаються на практиці зниження крутного моменту АТ виявляється дуже малим. Вплив несиметрії на втрати електродвигуна і, отже, нагрівання і скорочення терміну служби ізоляції його виявляються більшою мірою.

При несиметрії напруги мережі в синхронних двигунах (СД) поряд з виникненням додаткових втрат і нагріванням статора і ротора можуть виникнути небезпечні вібрації в результаті появи знакозмінних обертових моментів і тангенційних сил, що пульсують з подвійною частотою мережі.

При значній несиметрії вібрація може виявитися небезпечною, особливо при недостатній міцності або дефектів зварних з'єднань. При несиметрії струмів, що не перевищує 30%, небезпечні перенапруги в елементах конструкцій зазвичай не виникають.

Електромагнітні втрати при несиметрії напруги в мережі:

$$\Delta P_{\text{нс}} = \Delta P_{\text{ном}} \rho_{\text{нс}} K_{2u}^2, \quad (1.9)$$

де  $K_{2u}$  – коефіцієнт несиметрії, в.о.

Для Тр:  $\rho_{\text{Тр}}^{(\text{нс})} = \frac{1}{u_{\text{к}}^2}$ , где  $u_{\text{к}}$  – напруга КЗ.

Аналізуючи дані про технологічні перекося фазних первинних струмів трансформатора ДСП можна стверджувати, що несиметрія напруги при розплавленні металу становить до 4%, а при відключенні дуги на одному з електродів може досягати 10% (рис. 1.7-1.8). Причому встановлено, що неповнофазні режими горіння дуги можуть становити 10% часу плавки.



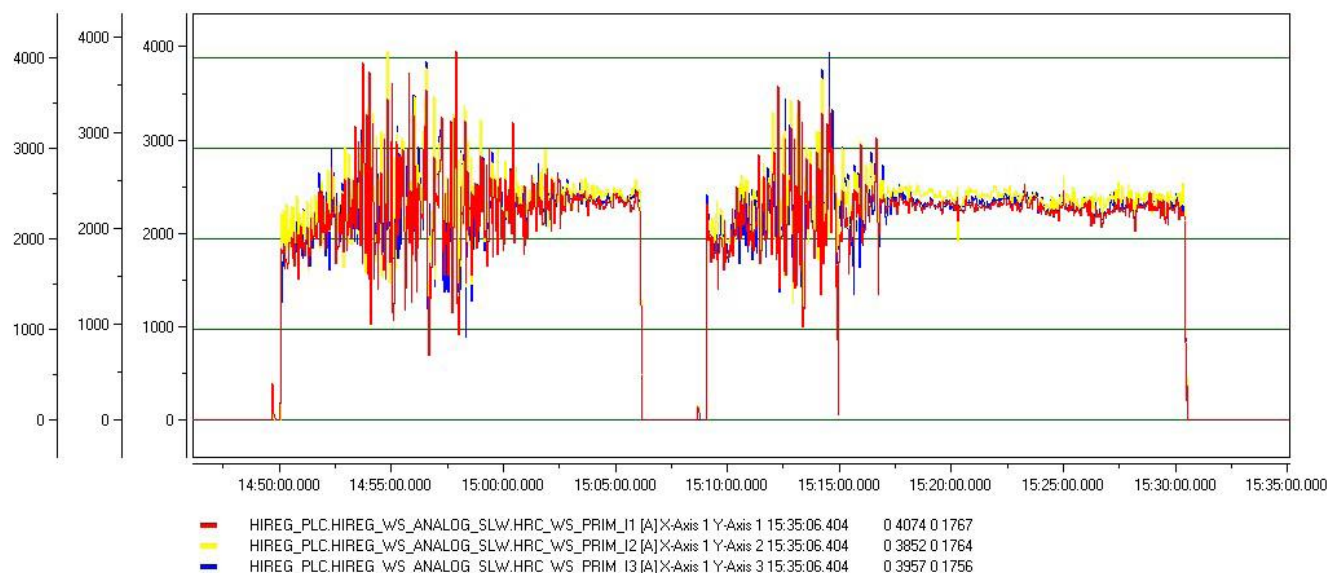


Рисунок 1.7 – Фазні первинні струми ДСП

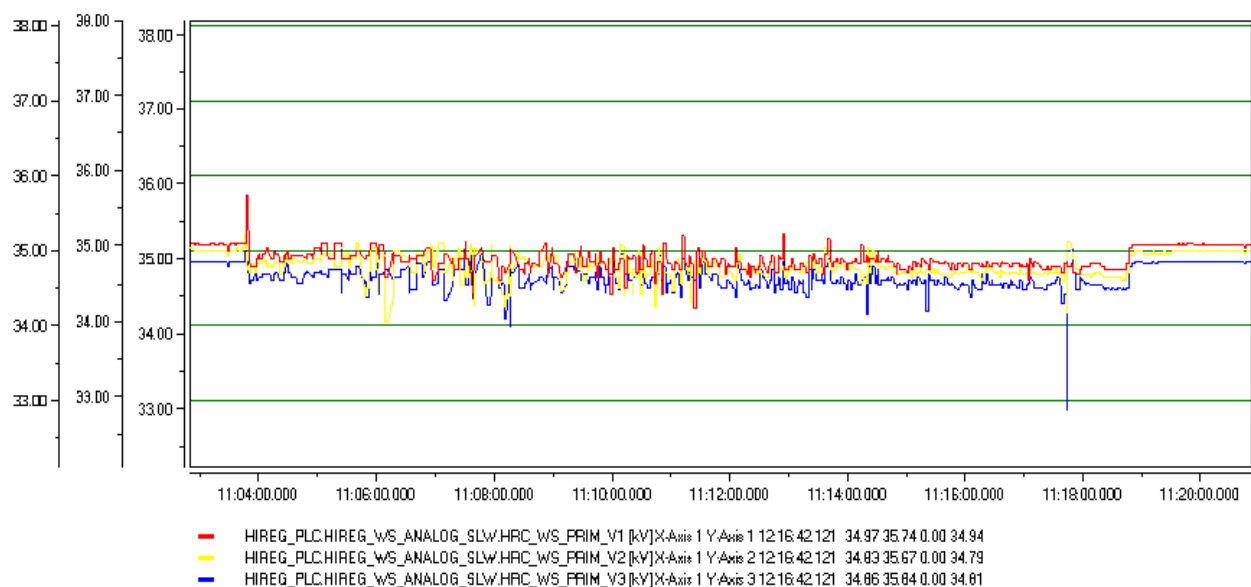


Рисунок 1.8 – Фазні первинні напруги ДСП

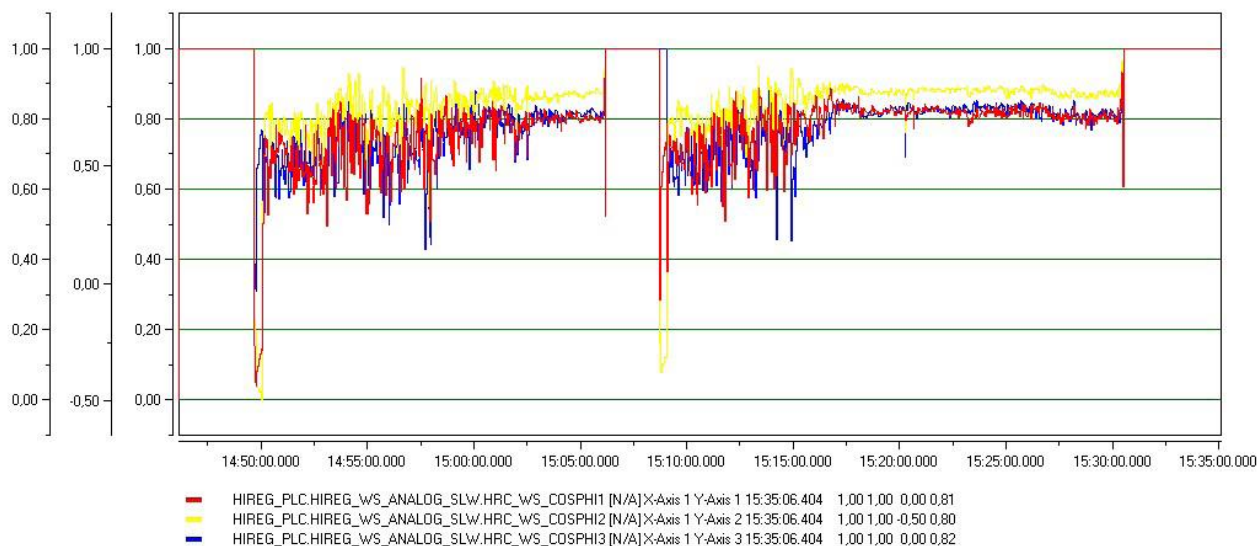


Рисунок 1.9 – Зміна фазних  $\cos\varphi$  за час однієї плавки

Зробимо розрахунок додаткових втрат потужності у трансформаторах заводу від несиметрії у нормальних режимах (плавка на трьох фазах) та режимах плавки на двох фазах (анормальний режим).

При цьому оцінимо, на скільки зміняться втрати потужності в електрообладнанні.

*Значення втрат при несиметрії у трансформаторі 1Т:*

$$\Delta P_{нс1} = \Delta P_{ном} \rho_{нс} K_{2U}^2 = 280,8 \cdot \frac{1}{0,095^2} \cdot 0,04^2 = 44,9 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{нс2} = \Delta P_{ном} \rho_{нс} K_{2U}^2 = 280,8 \cdot \frac{1}{0,095^2} \cdot 0,1^2 = 280 \text{ кВт}$$

де  $\Delta P_{ном} = k_3^2 \Delta P_{кз} = 0,81^2 \cdot 428 = 280,8 \text{ кВт}$  - втрати потужності при симетричній напрузі;

*Значення втрат при несиметрії у трансформаторі 2Т:*

$$\Delta P_{нс1} = \Delta P_{ном} \rho_{нс} K_{2U}^2 = 10,8 \cdot \frac{1}{0,105^2} \cdot 0,04^2 = 1,6 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{нс1} = \Delta P_{ном} \rho_{нс} K_{2U}^2 = 10,8 \cdot \frac{1}{0,105^2} \cdot 0,1^2 = 9,8 \text{ кВт}$$

де  $\Delta P_{ном} = k_3^2 \Delta P_{кз} = 0,22^2 \cdot 223 = 10,8 \text{ кВт}$  - втрати потужності при симетричній напрузі.

## 1.8. Дослідження та розрахунків ФКП

На об'єкті є навантаження від дугової (EAF) і ковшової печі (LF), які СТК повинен компенсувати. Живлення навантажень здійснюється через знижувальний трансформатор 330/35 кВ, 160 МВА  $u_k=12.5\%$ . Потужність короткого замикання на шині складає 15090 МВА. Додатково є трансформатор дугової печі потужністю 140 МВА+15%, 35 кВ/1300-740 В  $u_k=10\%$ , і трансформатор ковшової печі потужністю 30 МВА  $u_k=8.5\%$ , 35 кВ/390-270 В.

Загальна потужність конденсаторної батареї розділена між трьома фільтровими ланцюгами для забезпечення необхідного ступеня фільтрації гармонік, що поступають в систему. Основна конфігурація системи для сталеплавильного заводу показана в наступному рисунку.

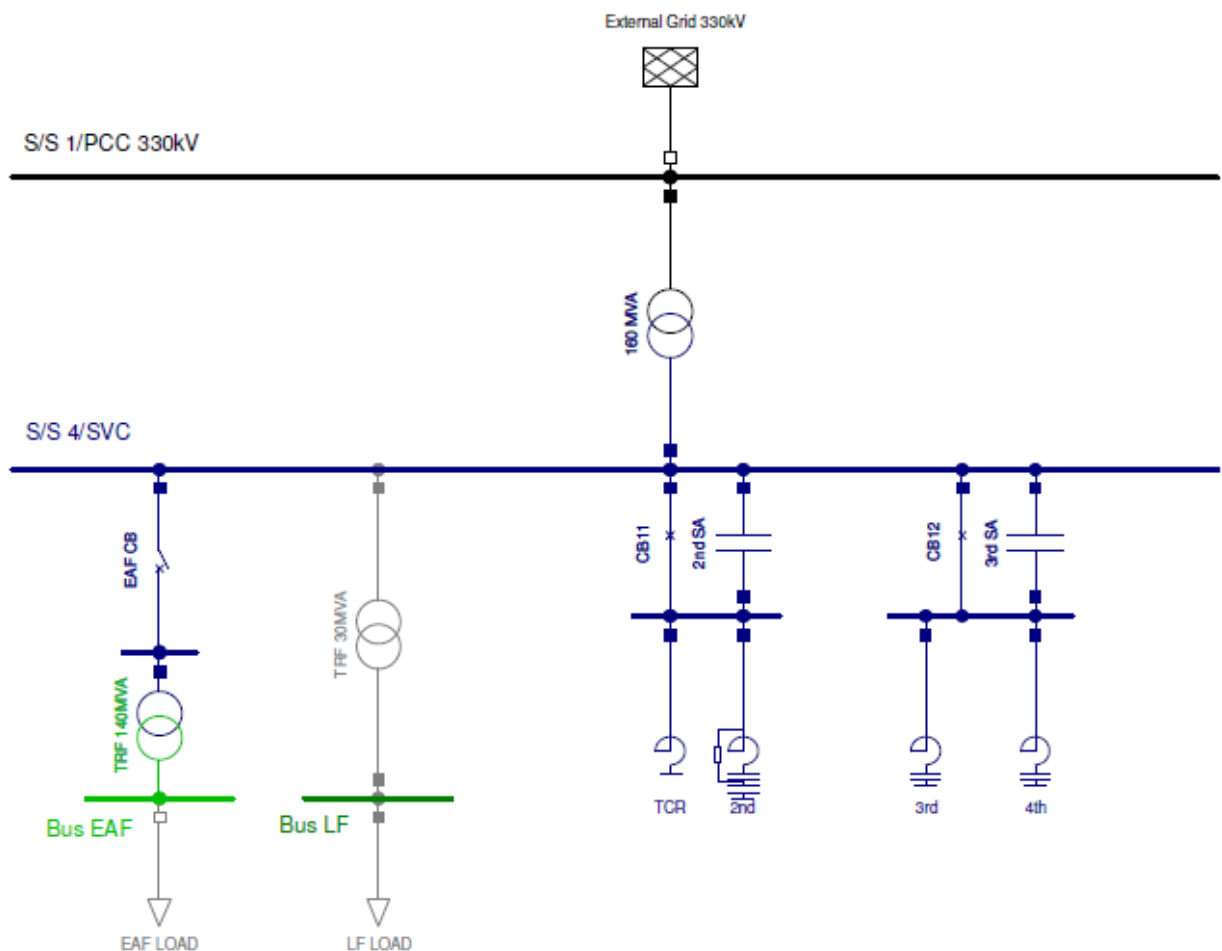


Рисунок 1.10 – Мережа, що використовується для досліджень

Гармонійне спотворення напруги на шині 330 кВ

Порядок	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
U <sub>h</sub> / %	0.5	0.75	0.3	1.5	0.2	1.0	0.2	0.2	0.2	1	0.2	0.7
Порядок	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
U <sub>h</sub> / %	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Загальне гармонійне спотворення –  $U_{згс}=2.0\%$

1. Середній коефіцієнт потужності 15 хв. повинен бути витриманий в межах 0,95 і 1,0 протягом 24 годин.

2. Флікер  $P_{st}(95\%)<1.0$  р.и. відповідає зниженню флікера на 38 % за допомогою системи СТК.

3. Розбаланс напруги -  $U_{p6(95\%)}<2.0\%$  в періоді 10 хвилин.

Потужність короткого замикання на шині 330 кВ складає 15090 МВА.

***Розрахунки по флікеру і реактивній потужності.***

Методика розрахунків і результати

Розрахунки флікера засновані на методі UIE. В розрахунках використовувався коефіцієнт  $K_{st}=65$ . Слід зазначити, що цей коефіцієнт залежить від характеристик печі, наприклад, циклу роботи печі, шихти, завантаження ковшів і так далі. Ці умови повинні бути оптимізовані для стабільної роботи печі.

Вплив ковшової печі на рівень флікера незначний, і тому він не був взятий до уваги в цьому розрахунку. Реактивний опір кабелю не був взятий до уваги і таким чином є деякий запас безпеки.

При ступені компенсації 0,8-1 СТК може обмежити флікер коефіцієнтом, близьким до 2. Коефіцієнт зменшення флікера 2 – це практично максимум, який можна отримати, використовуючи технологію СТК. Ступінь компенсації 1 (100%) означає, що потужність СТК рівна

максимальній реактивній потужності при трифазному замиканні в дуговій печі плюс сталий реактивній потужності ковшової печі. Перевищення потужності СТК в принципі не дозволяє досягти максимального зменшення флікера.

Потреба в реактивній потужності, необхідній для компенсації в тривалому періоді часу складає:

1. Дугова піч 118.4 МВт,  $\cos\varphi=0.76$ , реактивна потужність – 101.3 Мвар
  2. Ковшова піч 19.9 МВт,  $\cos\varphi=0.68$ , реактивна потужність – 22.9 Мвар
- Всього: 124.2 Мвар

З погляду максимального обмеження флікера максимальна потужність системи СТК складає:

$$Q_{SVC}=0.8 \cdot 233 \text{ Мвар} + 22.9 \text{ Мвар} = 209.3 \text{ Мвар.}$$

Ємнісна складова потужності СТК повинна складати 150 Мвар відповідно до прийнятого ступеня компенсації 68%. Потужність СТК достатня для зниження флікера приблизно до ~ 40% і підтримки коефіцієнта потужності в заданих межах.

### Розрахунок флікера

Таблиця 1.6

#### Результати розрахунку флікера

Розрахунок флікера	Позначення	Величина	ЕАФ
Потужність к.з. на шині (S/S 1 /PCC)	$S_k$	МВА	15 090
<b>Понижуючий трансформатор:</b>			
- первинна напруга	$U_{trp}$	кВ	
- вторинна напруга	$U_{trs}$	кВ	35
- потужність	$S_{tr}$	МВА	160
- реактивна напруга к.з. %	$x_s$	%	12.5
<b>Пічний трансформатор:</b>			
- первинна напруга	$U_p$	кВ	
- вторинна напруга	$U_s$	кВ	1.189
- потужність	$S_{ftr}$	МВА	140
- реактивна напруга к.з. %	$x_{ftr}$	%	11.5

<b>Вторинний реактивний опір печі</b>	$X_{arc}$	МОм	
- вторинний закритий трикутник (припущення)		1.4	3.7
- вторинні кабелі (припущення)		1.2	
- електроди (припущення)		1.1	
<b>Струмообмежуючий реактор на НН</b>	$X_r$	Пм	0.000
<b>Реактанс, приведений до шин 330 кВ</b>			
- мережа	$X_{net}$	Ом	7.2
- лінія	$X_{sulin}$	Ом	0
- мережа плюс лінія	$X_{net}+X_{sulin}$	Ом	7.2
- знижувальний трансформатор	$X_s$	Ом	0.0
- знижувальний трансформатор	$X_s$	Ом	85.1
- трансформатор дугової печі	$X_{ftr}$	Ом	89.5
- пічний трансформатор	$X_{arcpsc}$	Ом	285.0
- струмообмежувальний реактор	$X_r$	Ом	0
Сумарний реактанс, приведений до шин 330кВ	$X_{sum}$	Ом	467
$X_{sum} = X_{net} + X_{sulin} + X_s + X_{ftr} + X_{arcpsc} + X_r$			
<b>Максимальна реактивна потужність на РСС <math>Q_{max}</math></b>	$U_{trp} 2/X_{sum}$	Мвар	233
Флікер Pst без СТК	$Kst \cdot Q_{max}/S_k$		1.00
Потужність СТК	$Q_{svc}$	Мвар	150
Коефіцієнт флікера дугової печі (припущення)	$Kst$		65
Флікер Pst без СТК			1.00
Коефіцієнт зниження по досліді			1.67
Флікер Pst (95% ) із СТК			0.75
Флікер Plt (95% ) із СТК			0.64

### *Розбаланс напруги*

Максимальний розбаланс напруги, викликаний дуговою піччю на шині 330 кВ, може бути розрахований таким чином:

$$I_{k2} = \frac{U}{2 \cdot X_t} = \frac{330 \cdot 10^3}{2 \cdot 467} = 353 \text{ A}$$

$$\Delta U = \frac{I_{k2} \cdot X_N}{\sqrt{3}} = \frac{353 \cdot 7,22}{\sqrt{3}} = 1,472 \text{ кВ}$$

$$U_{ub(\%)} = 1 - \frac{190,5 - 1,472}{190,5} \cdot 100 = 0,77\%$$

де  $I_{k2}$  – незбалансований струм на шині 330 кВ, коли в електродах дугової печі є двофазне коротке замикання

$X_L$  - загальний реактивний опір дугової печі (див. розділ 2.3.3 розрахунок флікера)

$X_N$  – реактивний опір мережі (при 15090 МВА на шині 330 кВ)

У разі компенсації тільки реактивної потужності у вище вказаній обстановці за допомогою СТК, залишкова незбалансована напруга склала б:

$$\Delta U = \frac{(I_{k2} - I_{svC}) \cdot X_N}{\sqrt{3}} = \frac{(353 - 152) \cdot 8,1}{\sqrt{3}} = 0,842 \text{ кВ}$$

$$U_{ub(\%)} = 1 - \frac{190,5 - 0,842}{190,5} \cdot 100 = 0,44\%$$

Цей метод розрахунку дає явну індикацію про можливий абсолютний максимальний рівень розбалансу напруги.

Незбалансоване незаземлене трифазне навантаження може бути переведене на баланс з погляду джерела за допомогою системи компенсації реактивної потужності.

$$B_C^{ab} = -B_L^{ab} + \frac{(G_L^{ca} - G_L^{bc})}{\sqrt{3}}$$

$$B_C^{bc} = -B_L^{bc} + \frac{(G_L^{ab} - G_L^{ca})}{\sqrt{3}}$$

$$B_C^{ca} = -B_L^{ca} + \frac{(G_L^{bc} - G_L^{ab})}{\sqrt{3}}$$

$B_C$  – реактивна провідність компенсаційної системи

$B_L$  – реактивна провідність навантаження (дугова піч)

$G_C$  – провідність навантаження (дугова піч)

Як можна побачити по формулі, для балансування навантаження, реактивна провідність компенсаційної системи повинна бути більше ніж реактивна провідність навантаження. Для забезпечення можливості компенсаційної системи балансувати навантаження, вона повинна мати 20% індуктивної потужності від номінальної ємнісної вихідної потужності.

Параметр надмірної ємкості заснований на досвіді по застосуваннях дугових печей.

### ***Конфігурація СТК***

#### **Фільтрові ланцюги і ємнісна видача системи СТК**

Система СТК призначена для підключення до шин 35 кВ. Ємнісна потужність 150 Мвар розподілена між трьома фільтровими ланцюгами.

Пропонована схема наступна:

- 2<sup>ий</sup> фільтр 41.6 Мвар на 35 кВ – 50Г ц, тип С з демпферним резистором 150 Ом;

- 3<sup>ий</sup> фільтр 46.0 Мвар на 35 кВ – 50Гц;

- 4<sup>ий</sup> фільтр 65.2 Мвар на 35 кВ – 50Г ц

Параметри компонентів фільтрів визначені в розділі 1.8, номінальні струми і напруга фільтрових ланцюгів.

#### **Реактор, тиристорний вентиль і індуктивна потужність СТК**

Номінальна потужність реакторів СТК складає 150 Мвар на напрузі 35 кВ відповідно до номінального струму 1428 А в реакторі, сполученому в трикутник. Максимальне тривале перевантаження складає +10%, що відповідає струму 1571 А. Перевантажувальна здатність індуктивної складової СТК необхідна для можливості балансувати навантаження дугових печей. Необхідні параметри для тиристорно-реакторної групи повинні забезпечувати можливість 20% перевантажень і відповідати струму 1713 А.

Тиристори і система охолодження розраховані на тривалу роботу при максимальному перевантаженні реакторів.

### ***Розрахунок компенсації гармонік***

Розрахунок гармонік виконаний на самий гірший випадок. Максимальний струм від всіх джерел був підсумований арифметично, а неспівпадання гармонік по фазі не враховувалося. Також не враховувався той



факт, що максимум струму індивідуальної гармоніки СТК не може існувати водночас. Такий метод приводить до нереалістично високому  $U_{згс}$ , але індивідуальний максимум може вважатися реалістичним.

Таблиця 1.8

Розрахунок компенсації струмів гармонік

Порядо	Част.	Р-р		ДСП		Ківш-піч		Сумма	
		n	Hz	%/FUND	IGEN /	%/FUN	IGEN /	%/FUN	IGEN /
2	100			7.5	199.2	1.5	7.4	207	30.90
3	150	8	282.8	7	185.9	3.5	17.3	486	72.70
4	200			3.5	93.0	0.7	3.5	96	14.42
5	250	5.1	180.3	4.5	119.5	2.8	13.9	314	46.91
6	300			2	53.1	0.5	2.5	56	8.32
7	350	2.6	91.9	2.5	66.4	1.5	7.4	166	24.79
8	400			2.3	61.1	0.2	1.0	62	9.28
9	450	1	35.3	1.2	31.9	0.1	0.5	68	10.13
10	500			1	26.6		0.0	27	3.97
11	550	1.1	38.9	1	26.6	0.1	0.5	66	9.86
12	600			0.8	21.2		0.0	21	3.18
13	650	0.75	26.5	0.8	21.2	0.1	0.5	48	7.22
14	700			0.5	13.3		0.0	13	1.99
15	750	0.5	17.7	0.5	13.3		0.0	31	4.63
16				0.5	13.3			13	1.99
17	850	0.44	15.6	0.5	13.3		0.0	29	4.31
18				0.5	13.3			13	1.99
19	950	0.35	12.4	0.5	13.3		0.0	26	3.84
20				0.5	13.3			13	1.99
21	1050	0.2	7.1	0.5	13.3		0.0	20	3.04
22				0.5	13.3			13	1.99
23	1150	0.24	8.5	0.5	13.3		0.0	22	3.26
24				0.5	13.3			13	1.99
25	1250	0.2	7.1	0.5	13.3		0.0	20	3.04

Сумарна компенсація гармонік повинна розраховуватися відповідно до рекомендацій МЕК, таким чином, напруга гармонік повинна порівнюватися з основною напругою. Цей метод дає достатню гарантію при розрахунку фільтрів. Струм реакторів розраховувався виходячи з гіршого випадку, відповідно до методики.

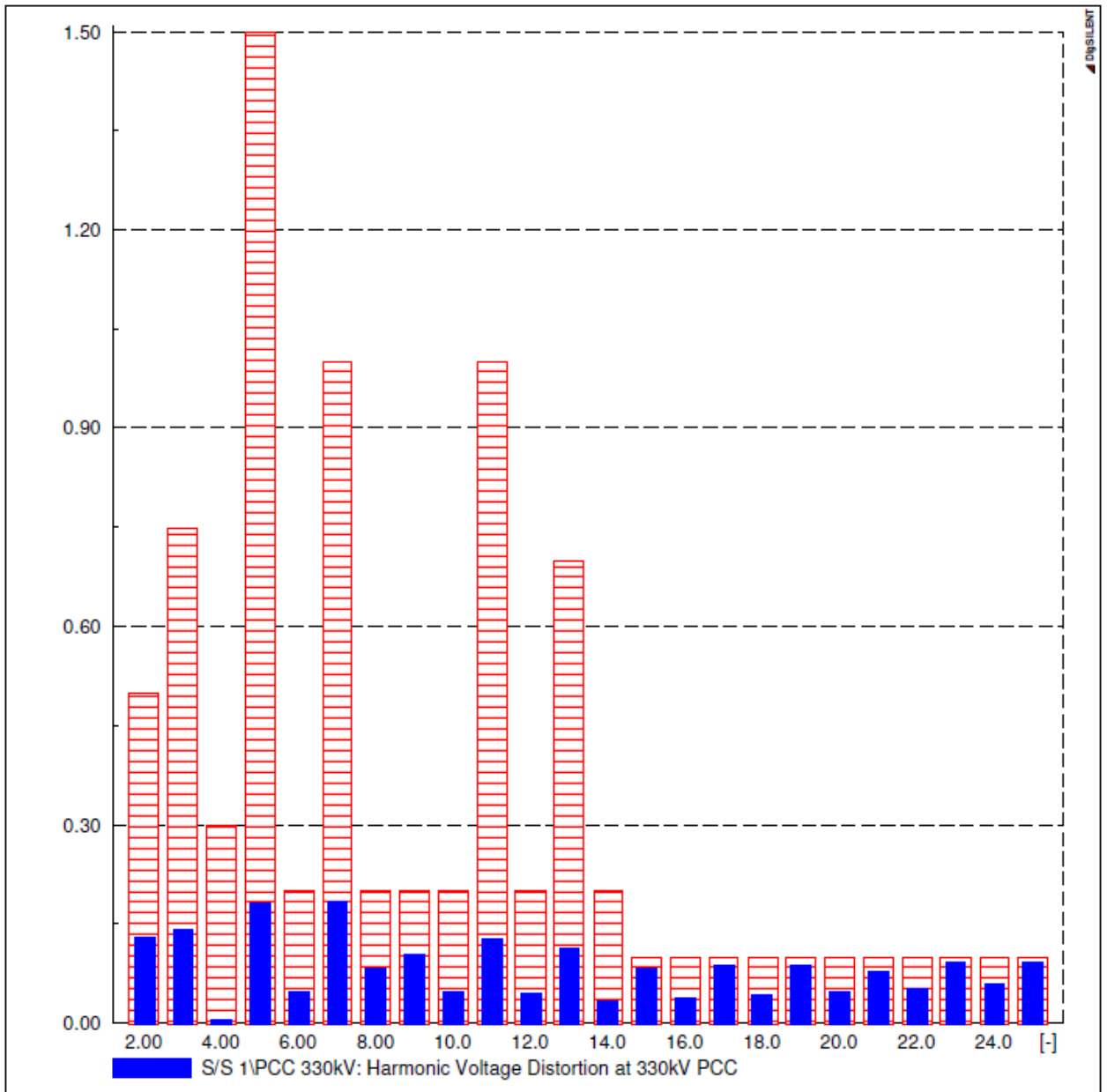


Рисунок 1.11 – Обмеження гармонік в трьох різних режимах роботи

В таблиці 1.8 дані результати розрахунків компенсації гармонік на шині 330 кВ.

За наслідками розрахунків максимальне значення гармонік складає на шині прибл. 0,47 %. Все індивідуальні гармоніки значно нижчі за норму.

### Параметри фільтрових ланцюгів по напрузі і струму

Найгірший сценарій по навантаженню від струмів і напруги гармонік для компонентів СТК складає комбінацію роботи СТК, дугових і ковшових печей і існуючих задалегідь на шині гармонік на основі стандарту МЕК. Попередньо існуюча гармоніка передбачалася згідно стандарту ІЕС61000-3-6, табл. 1.9, стовпчик HV.

Таблиця 1.9

Задалегідь існуючі гармоніки згідно стовпчика HV

Непарні гармоніки некрратні трьом			Непарні гармоніки кратні трьом			Парні гармоніки		
Порядок n	Напруга гармоніки %		Порядок n	Напруга гармоніки %		Порядок n	Напруга гармоніки %	
	MV	HV-EHV		MV	HV-		MV	HV-
5	5	2	3	4	2	2	1.6	1.5
7	4	2	9	1.2	1	4	1	1
11	3	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.5
13	2.5	1.5	21	0.2	0.2	8	0.4	0.4
17	1.6	1	>21	0.2	0.2	10	0.4	0.4
19	1.2	1				12	0.2	0.2
23	1.2	0.7				>12	0.2	0.2
25	1.2	0.7						
>25	0.2+ 0.5*(25/n)	0.2+ 0.5*(25/n)						

Увага: Загальне гармонійне спотворення: 6.5 в мережі МУ і 3 % в мережі НУ

Параметри фільтрових ланцюгів по струму і напрузі ґрунтуються на вимогах МЕК 60871-1. Напруга, що впливає на конденсатори, була визначена як арифметична сума напруги основної частоти і напруги гармонік, що впливають на конденсатор. Розрахунки дають результат від внеску гармонік. При розрахунку на моделі була прийнята схема системи рис. 1.9 і струми гармонік з табл.1.10 Результати розрахунків приведені в наступних таблицях.

Таблиця 1.10

Струми для фільтру 2-ої гармоніки. Шунт типу R-L-C1-C2, Rp

				1250 Гц		Ном	
Струм індуктора				754,43 А		801,88 А	
Струм ємкості				754,92 А		802,9 А	
Струм пар. опори				0,49 А		27,99 А	
Втрати індуктора				167,6 кВт		180,9 кВт	
Втрати пар. опори				0,11 кВт		224,32 кВт	
F, Hz	U <sub>гl</sub> , p.u	U <sub>Rp</sub> , p.u	U <sub>c2</sub> , p.u	U <sub>c1</sub> , p.u	I <sub>l</sub> , А	I <sub>Rp</sub> , А	I <sub>c</sub> , А
50	0,366	0,004	1,1	0,366	754,43	0,49	754,92
100	0,263	0,197	0,198	0,066	270,29	26,53	271,77
150	0,034	0,03	0,011	0,004	23,27	4,06	23,64
200	0,001	0,001	0	0	0,46	0,11	0,47
250	0,029	0,028	0,004	0,001	11,93	3,75	12,51
300	0,007	0,007	0,001	0	2,56	0,98	2,75
350	0,024	0,024	0,002	0	7,16	3,21	7,85
400	0,011	0,011	0,001	0	2,95	1,52	3,32
450	0,015	0,015	0,001	0	3,49	2,03	4,04
500	0,006	0,006	0	0	1,25	0,81	1,49
550	0,019	0,019	0,001	0	3,53	2,52	4,34
600	0,006	0,006	0	0	1,04	0,81	1,32
650	0,016	0,016	0	0	2,47	2,09	3,23
700	0,004	0,004	0	0	0,66	0,6	0,89
750	0,011	0,011	0	0	1,5	1,46	2,09
800	0,005	0,005	0	0	0,65	0,68	0,94
850	0,013	0,013	0	0	1,52	1,69	2,27
900	0,006	0,006	0	0	0,66	0,77	1,01
950	0,013	0,013	0	0	1,38	1,71	2,2
1000	0,006	0,006	0	0	0,66	0,86	1,08
1050	0,01	0,01	0	0	0,99	1,36	1,68
1100	0,007	0,007	0	0	0,66	0,95	1,15
1150	0,013	0,013	0	0	1,14	1,72	2,07
1200	0,008	0,008	0	0	0,66	1,03	1,22
1250	0,013	0,013	0	0	1,08	1,76	2,06

Таблиця 1.11

Струми для фільтру 3-ої гармоніки. Шунт типу R-L-C

			1250 Гц	Ном
Струм індуктора			833,86 А	994,48 А
Струм ємкості			833,86 А	994,48 А
Втрати індуктора			187,62 кВт	250,07 кВт
F, Hz	U <sub>rl</sub> , p.u	U <sub>c</sub> , p.u	I <sub>l</sub> , А	I <sub>c</sub> , А
50	0,149	1,249	833,86	833,86
100	0,019	0,039	52,58	52,58
150	0,287	0,268	536,86	536,86
200	0,001	0,001	1,99	1,99
250	0,037	0,012	41,23	41,23
300	0,009	0,002	8,12	8,12
350	0,027	0,005	21,65	21,65
400	0,012	0,002	8,69	8,69
450	0,016	0,002	10,1	10,1
500	0,006	0,001	3,57	3,57
550	0,02	0,001	10,02	10,02
600	0,006	0	2,93	2,93
650	0,016	0,001	6,92	6,92
700	0,005	0	1,85	1,85
750	0,011	0	4,17	4,17
800	0,005	0	1,81	1,81
850	0,013	0	4,22	4,22
900	0,006	0	1,81	1,81
950	0,013	0	3,81	3,81
1000	0,006	0	1,81	1,81
1050	0,01	0	2,73	2,73
1100	0,007	0	1,81	1,81
1150	0,013	0	3,15	3,15
1200	0,008	0	1,81	1,81
1250	0,013	0	2,96	2,96

Таблиця 1.12

## Струми для фільтру 4-ої гармоніки. Шунт типу R-L-C

			1250 Гц	Ном
Струм індуктора			1182,3 А	1215,53 А
Струм ємкості			1182,3 А	1215,53 А
Втрати індуктора			90,48 кВт	94,76 кВт
F, Hz	U <sub>rl</sub> , p.u	U <sub>c</sub> , p.u	I <sub>л</sub> , А	I <sub>c</sub> , А
50	0,076	1,76	1182,3	1182,3
100	0,007	0,028	55,93	55,93
150	0,026	0,045	136,01	136,01
200	0,022	0,022	87,24	87,24
250	0,064	0,04	200,6	200,6
300	0,012	0,005	30,39	30,39
350	0,033	0,01	72,96	72,96
400	0,014	0,003	27,69	27,69
450	0,018	0,003	31,12	31,12
500	0,007	0,001	10,77	10,77
550	0,021	0,003	29,72	29,72
600	0,007	0,001	8,58	8,58
650	0,017	0,002	20,11	20,11
700	0,005	0,0	5,33	5,33
750	0,012	0,001	11,98	11,98
800	0,005	0,0	5,18	5,18
850	0,013	0,001	12,02	12,02
900	0,006	0,0	5,15	5,15
950	0,013	0,001	10,81	10,81
1000	0,007	0	5,13	5,13
1050	0,01	0	7,7	7,7
1100	0,007	0	5,11	5,11
1150	0,013	0	8,88	8,88
1200	0,008	0	5,09	5,09
1250	0,013	0	8,32	8,32

У таблицях 1.10 – 1.12 визначаються вимоги для фільтрових ланцюгів відносно струмів гармонік, а також визначається перенапруження, що впливає на конденсатори.

### ***Пусковий імпульсний струм при включенні дугової печі***

Для визначення енергоємності демпферного резистора і перевірки перенапружень, що впливають на конденсатори другого фільтрового ланцюга, враховані перехідні процеси в пічному трансформаторі. Максимальний пусковий імпульсний струм трансформатора передбачається в сім разів більше номінального.

#### **Демпферний резистор**

Тривала потужність складає  $224 \text{ кВт}/3=75 \text{ кВт}$  на фазу, що відповідає струму при бл. 23 А 150 Ом, як показано в таблиці 1.12. Додатково резистор повинен витримувати в нагрітому стані п'ять разів протягом години імпульсне навантаження 1400 кДж. Максимальне пікове значення струму повинне бути не менше 250А, як показано на рис. 1.12.

#### **Конденсатор фільтру 2-ої гармоніки**

В результаті великого вмісту другої гармоніки в пусковому імпульсному струмі трансформатора, на конденсатори другого фільтру можуть впливати значні перенапруження. Додатковий конденсатор С2 другої фільтрової батареї випробовує перенапруження 19,7 кВ (макс) при перехідних процесах, приведених на рис 1.12.

Відповідно до стандарту МЕК ІЕС60187 максимально допустимі перенапруження на конденсатор складають:

$$\sqrt{2} \cdot U_N \cdot 2 = \sqrt{2} \cdot 10000 = 28,3 \text{ кВ},$$

що означає, що вибраний конденсатор витримає ці дії.

#### ***Вимикачі***

До вимикачів фільтрових батарей пред'являються дві спеціальні вимоги. Здатність відключати ємнісні струми і не допускати повторних запалень.

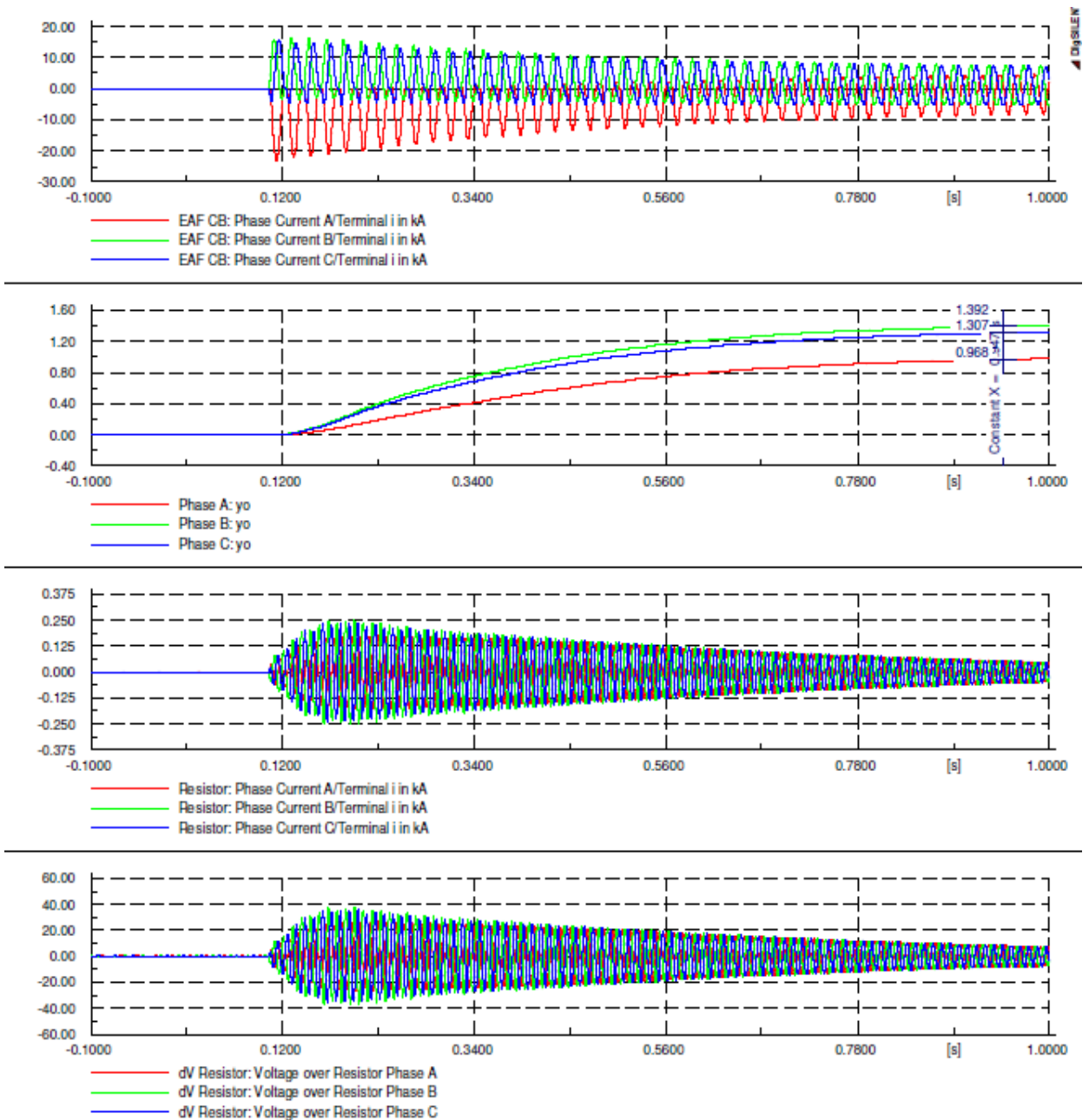


Рисунок 1.12 – Перехідні процеси в демпферному резисторі другого фільтрового ланцюга при включенні дугової печі

### Ємнісні струми

Розрахункові ємнісні струми фільтрів на базі 35 кВ + 10% складають:

- 2-а фільтрова батарея 41.6 Мвар на 35 кВ - 50 Гц 802 А
- 3-а фільтрова батарея 46.0 Мвар на 35 кВ - 50 Гц 995 А
- 4-а фільтрова батарея 65.2 Мвар на 35 кВ - 50 Гц 1230 А

Розрахункові струми повинні розглядатися як мінімально потрібні і до них повинен бути доданий відповідний запас.



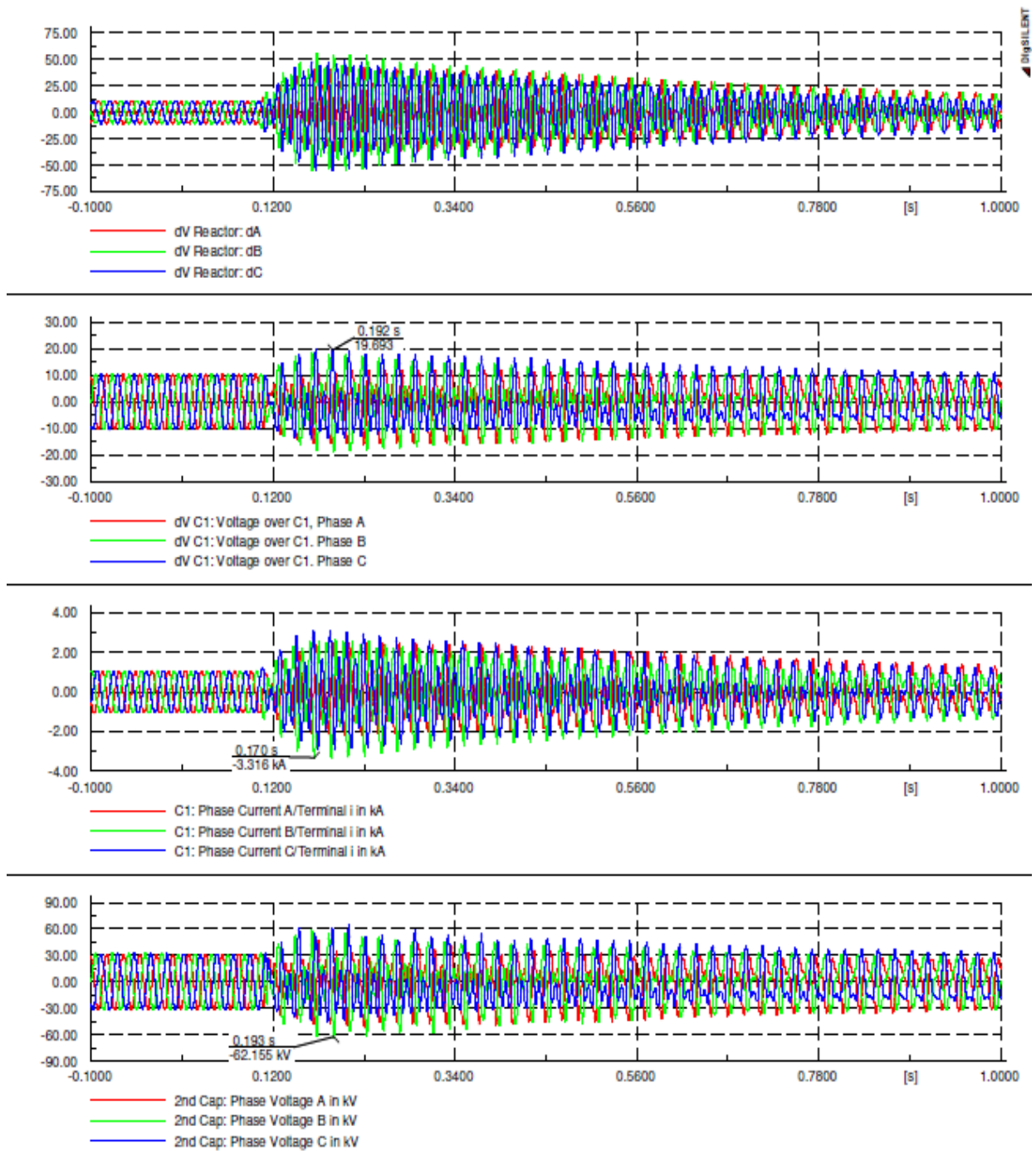


Рисунок 1.13 – Перехідні процеси конденсатора і реактора другої гармоніки при включенні дугової печі

Очікувана перехідна відновлювана напруга автоматичних вимикачів

Максимальна очікувана перехідна відновлювана напруга автоматичного вимикача фільтру залежить від настройки фільтрової батареї і максимальної напруги системи. Найвища ОПВН з'являється при відкритті вимикача фільтрової батареї другої гармоніки.

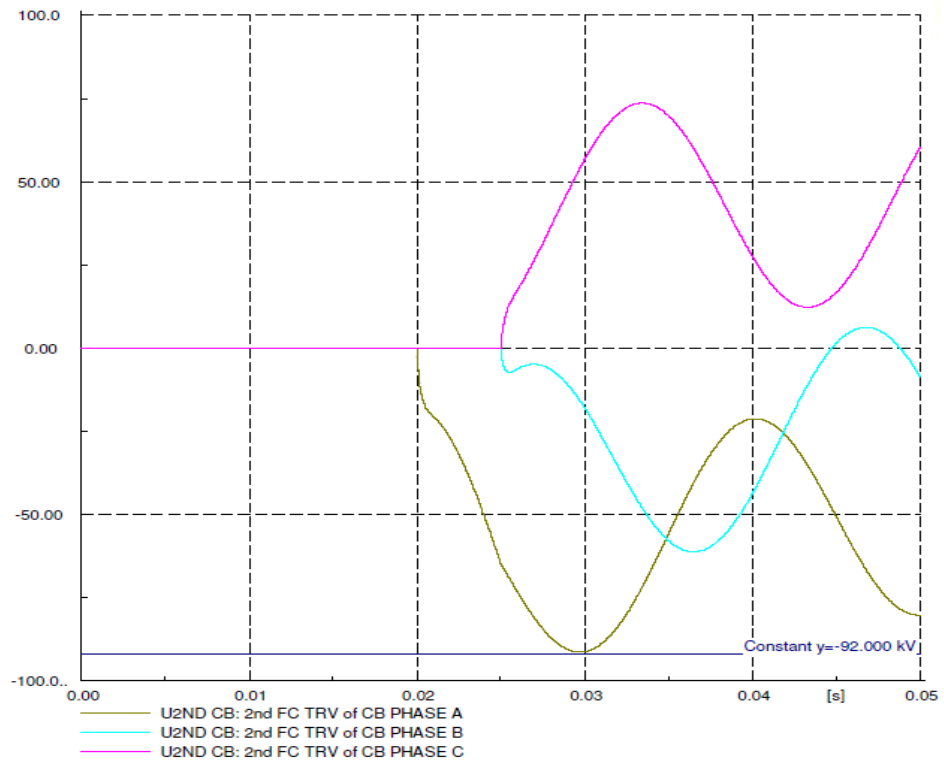


Рисунок 1.14 – Очікувана відновлювана напруга на автоматичний вимикач другого фільтру

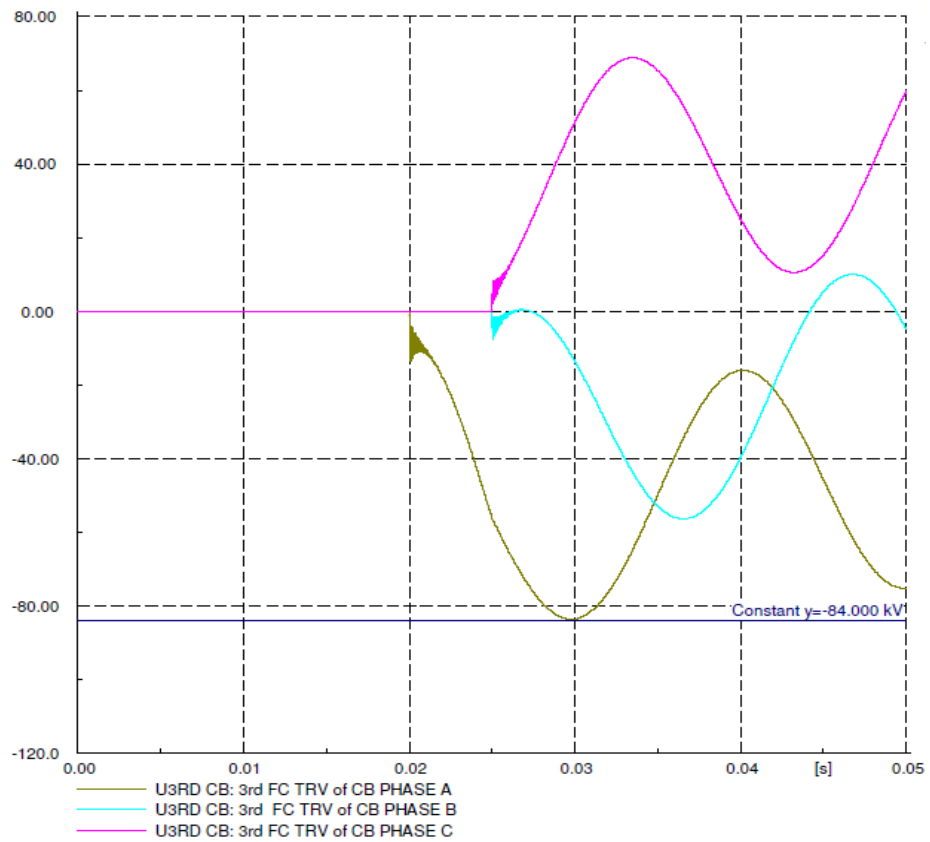


Рисунок 1.15 – Очікувана відновлювана напруга на автоматичний вимикач третього фільтру

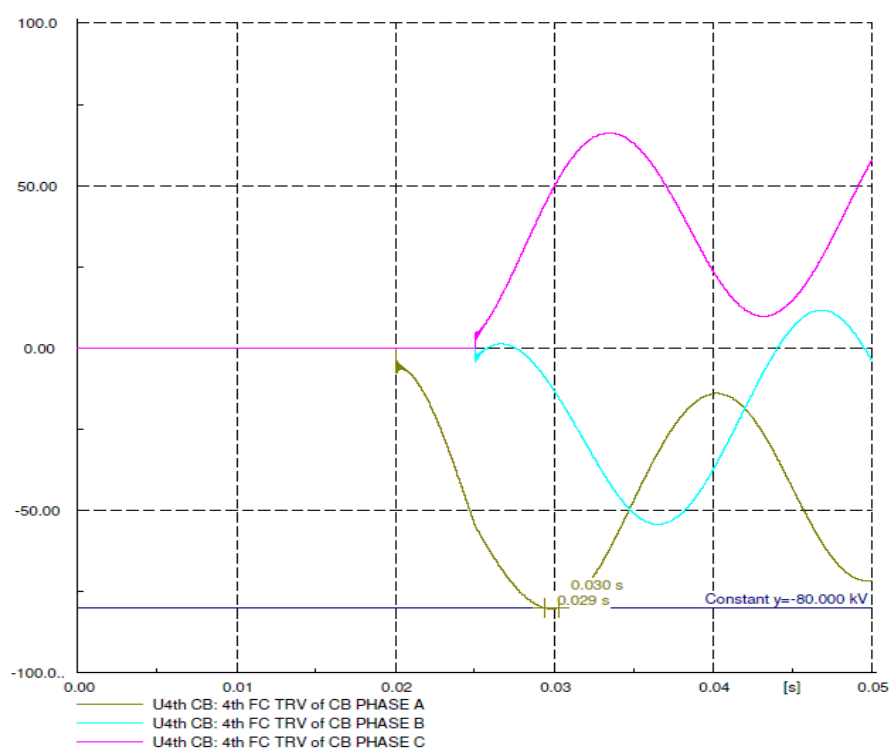


Рисунок 1.16 – Очікувана відновлювана напруга на автоматичний вимикач четвертого фільтру

### Пусковий імпульсний струм фільтрових ланцюгів

Фільтрова конденсаторна батарея повинна бути розряджена до 75 В протягом 600 секунд. Проте, конденсаторна батарея може бути включена, коли залишкова напруга постійного струму в конденсаторах складає 10 % від максимальної можливої залишкової напруги. У гіршому разі, зарядка постійного струму має протилежну полярність відносно напруги лінії, і таким чином викликає вищий пусковий імпульсний струм.

Максимальна залишкова напруга всієї конденсаторної батареї може по припущенню складати 10 % від номінальної напруги батареї. Залишкова напруга складає:

$$U_{RES\ 2nd} = \frac{69,3}{\sqrt{3}} \cdot 10\% = 4,0 \text{ кВ}$$

$$U_{RES\ 3rd} = \frac{55,4}{\sqrt{3}} \cdot 10\% = 3,2 \text{ кВ}$$

$$U_{RES\ 4th} = \frac{51,9}{\sqrt{3}} \cdot 10\% = 3,0 \text{ кВ}$$

З метою додавання впливу залишкової напруги в модель, розрахункова напруга додана на максимальну напругу шини. Вживана напруга шини складає:

- Для включення 2-го фільтра 42,5 кВ
- Для включення 3-го фільтра 41,7 кВ
- Для включення 4-го фільтра 41,5 кВ

Максимальний пусковий імпульсний струм залежить від точки хвилі включення. Для виявлення гіршого випадку використаний статистичний метод. Застосовувалося десять (10) точок хвилі включення, і таким чином досліджувалося тридцять (30) випадків.

Використовувався максимальний рівень короткого замикання (25 кА) шини MV.

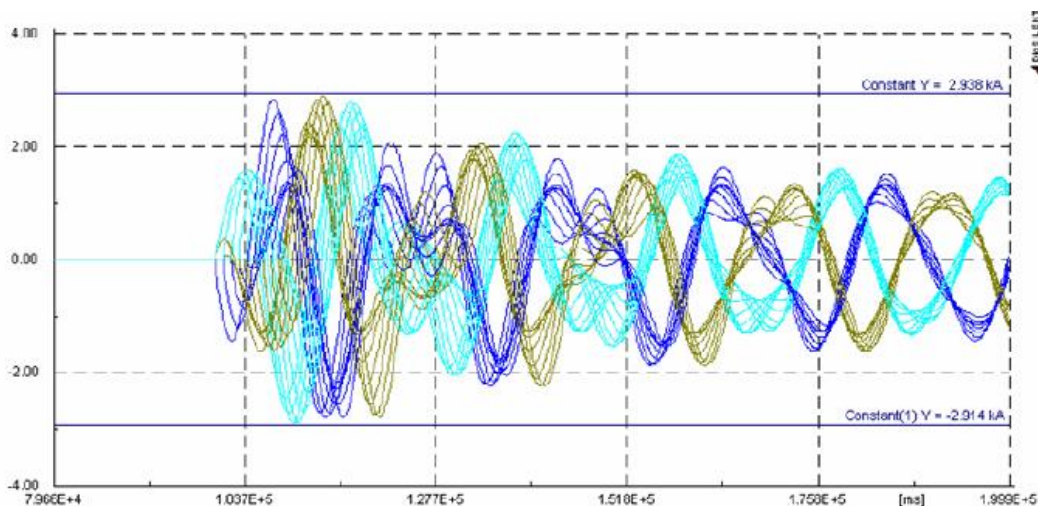


Рисунок 1.17 – Пусковий імпульсний струм другого фільтра

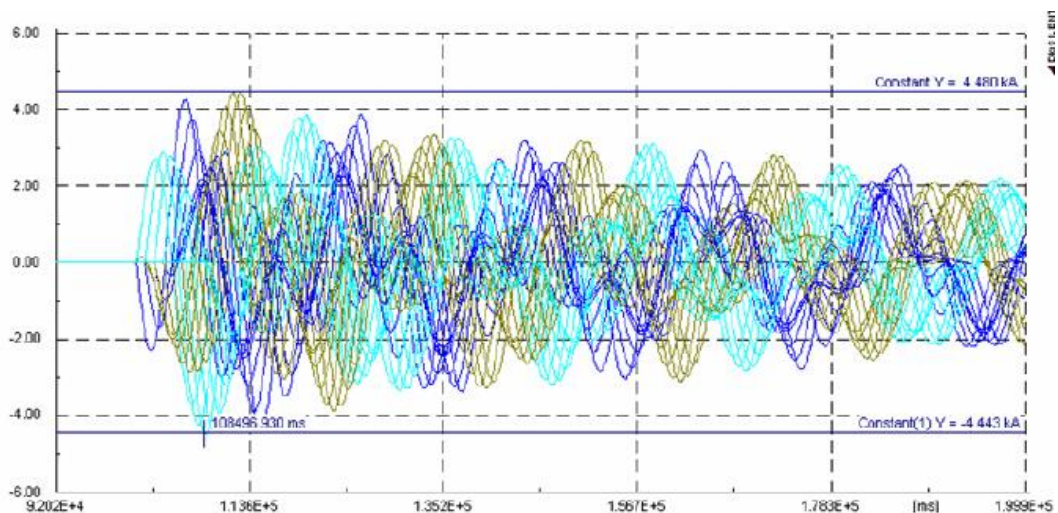


Рисунок 1.18 – Пусковий імпульсний струм третього фільтра

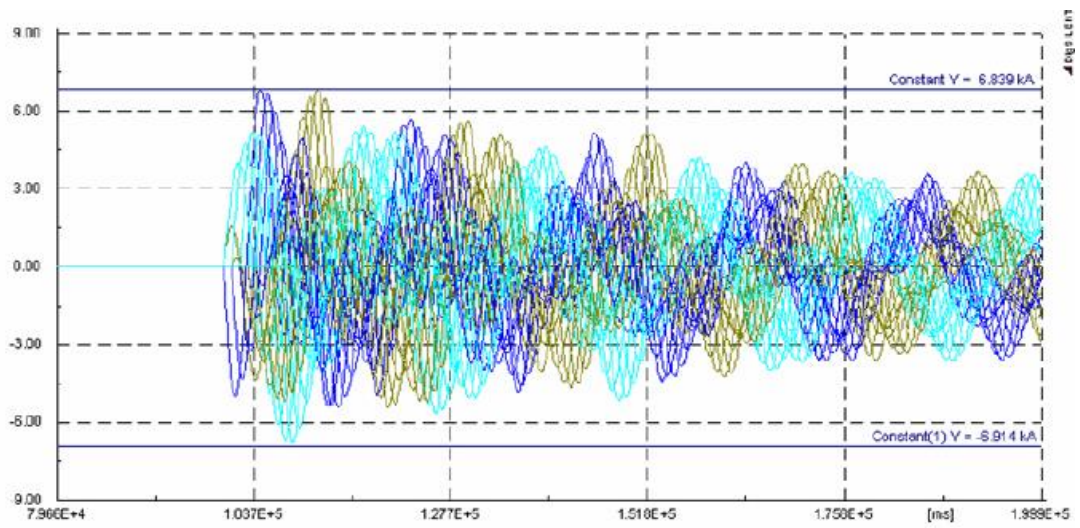


Рисунок 1.19 – Пусковий імпульсний струм четвертого фільтра

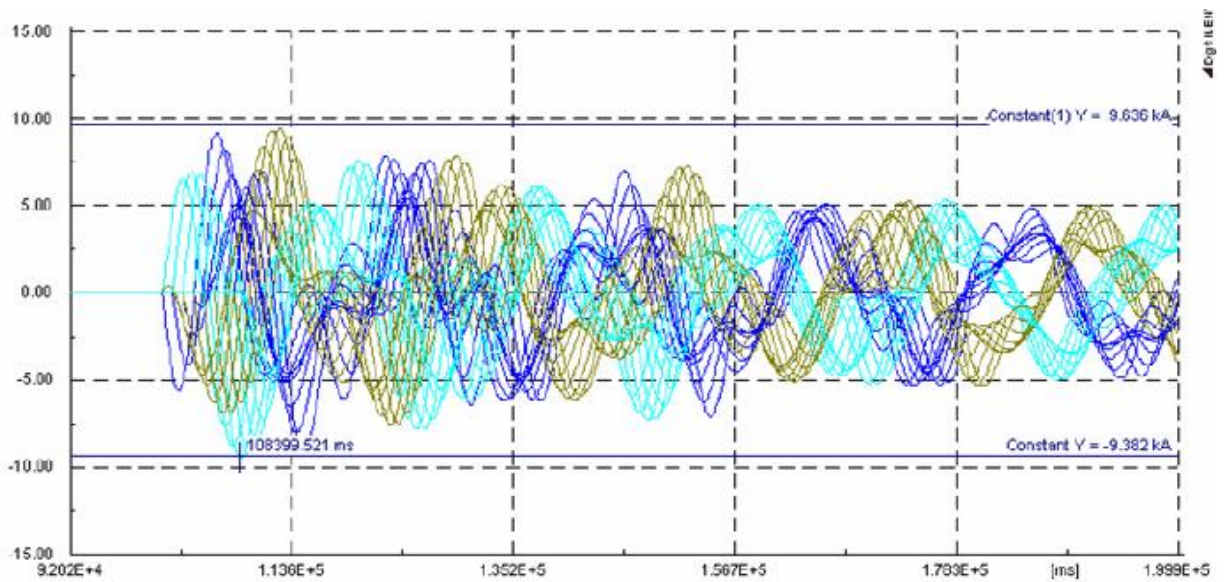


Рисунок 1.20 – Пусковий імпульсний струм живильника третього і четвертого фільтрів

## Підсумки дослідження

Для надійної роботи вентилів тиристорів і устаткування системи управління в приміщенні повинні підтримуватися температура, вологість, а також бути відсутнім пил і бруд. Особливо небезпечна наявність провідних частинок для силових шаф, вентилів тиристорів і системи управління. У будівлі щита управління є устаткування, що виділяє тепло, яке необхідно видалити з приміщень вентилів тиристорів і щита управління.

Вимоги для устаткування системи управління:

- Макс. температура усередині приміщення 35С
- Мин. температура усередині приміщення 5С
- Температура, що рекомендується, усередині приміщення 20-25С
- Макс. відносна вологість 80%

Для забезпечення вимог системи управління ФКП по параметрах навколишнього середовища встановлені кондиціонери, система опалювання і вентиляції.

Живлення споживачів ФКП здійснюється від щита власних потреб, розміщеного в приміщенні N3.

Дане дослідження показало, що система СТК потужністю 150 Мвар (емн.) .30 Мвар (інд., тимчасовий прийом) придатна для:

1. досягнення необхідного рівня компенсації реактивній потужності протягом 24-х годинного періоду вимірювань
2. зниження гармонік до необхідного рівня
3. зниження флікера до допустимого рівня
4. збереження балансу напруги в допустимих рамках

Остаточне значення флікера на шині 330 кВ визначено такими параметрами, як потужність короткого замикання в мережі, загальний опір дуговій печі і коефіцієнт печі.

## **2. ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ**

## 2.1 Вступ

У кваліфікаційній роботі передбачено встановлення регульованих фільтрокомпенсуючих пристроїв з динамічною компенсацією реактивної потужності виробництва фінської фірми «NOKIAN CAPACITORS» на території підстанції «Пічна» заводу «Інтрерайп Сталь». Введення їх в експлуатацію є одним з ефективних енергозбережних заходів і практично забезпечує:

- нульове перетікання реактивної потужності на межі балансової приналежності живлячої електромережі;
- зниження навантаження мережевих трансформаторів і живлячих кабельних ліній;
- скорочення циклу плавки;
- стабілізацію протікання ізотермічних процесів в печах;
- нейтралізацію вищих гармонік струму, що генеруються електропічними агрегатами;
- стабілізацію напруги мережі;

## 2.2 Розрахунок капітальних вкладень

Виробником і постачальником обладнання для ФКП є компанія AREVA T&D Ltd (колишня Nokian Capacitors Ltd.).

Ціни взяті з сайту: [www.nokiancapacitors.ua](http://www.nokiancapacitors.ua).

Капітальні інвестиції розраховуємо за формулою:

$$K = K_{об} + K_{мн} + K_{пл} + K_{тр} ,$$

де  $K_{об} = 90,84$  млн. грн – вартість обладнання (табл. 4.1);

$K_{мн} = 4,30$  млн. грн – вартість монтажно-налагоджувальних робіт згідно договору з компанією-виробником AREVA T&D Ltd;



$K_{\text{шт}} = 1,30$  млн. грн – планові накопичення (30% вартості монтажних робіт);

$K_{\text{тр}} = 1,00$  млн. грн – вартість транспортно–заготівельних витрат згідно договору з компанією-виробником AREVA T&D Ltd.

Таблиця 2.1

Зведення капітальних інвестицій

Найменування	Тип	Одиниці виміру	Кількість	Вартість за одиницю виробу, млн.	Вартість з урахуванням кількості, млн.
Фільтр 2-ї гармоніки	ХУКР 31.2 мН /776А	шт.	1	26,00	26,00
Фільтр 3-ї гармоніки	ХУКР 11.02 мН /977 А	шт.	1	28,00	28,00
Фільтр 4-ї гармоніки	ХУКР 4.1 мН /1230А	шт.	1	36,00	36,00
Демпферний реактор	ХУVP 0.4 мН /1624А	шт.	3	0,12	0,36
Реактор	ХУTR 27 мН /1624А	шт.	6	0,08	0,48
Всього					90,84

Таким чином капітальні інвестиції становлять:

$$K = 90,84 + 4,30 + 1,00 + 1,30 = 97,44 \text{ млн. грн.}$$

### 2.3 Розрахунок експлуатаційних витрат

Витрати при експлуатації ФКП визначаємо за формулою:

$$C_E = C_a + C_{\text{т.о}} + C_z + C_c + C_e + C_{\text{ін}},$$

де  $C_a$  – амортизаційні відрахування;

$C_{\text{т.о}}$  – витрати на технічне обслуговування і ремонт обладнання;

$C_z$  – заробітна плата (ЗП) обслуговуючого персоналу. Оскільки кількісний і якісний склад обслуговуючого персоналу та обсяг виконуваних робіт не змінюється, відповідно і заробітна плата для проектного та альтернативного варіанта не буде змінюватися, тому  $C_z$  в подальших розрахунках не враховується;

$C_c$  – відрахування на соціальні заходи від ЗП – відрахування на соціальні заходи визначається на основі установленого діючим законодавством відсотка від суми основної і додаткової ЗП. Так як заробітна плата не враховується, то і відрахування на соціальні заходи не враховуються;

$C_e$  – вартість електроенергії, споживаної об'єктом проектування. Оскільки після встановлення ФКП кількість спожитої активної енергії не зміниться, то  $C_e$  не враховується;

$C_{ін}$  – інші витрати по експлуатації об'єкта проектування. Включають затрати по охороні праці, на спецодяг та інше. Ці витрати визначаються в розмірі 4% від головного фонду ЗП обслуговуючого персоналу. Так як фонд ЗП не враховується, то і інші витрати не враховуються.

### **2.3.1 Амортизаційні відрахування**

Обладнання ФКП належать до четвертої групи [Податковий кодекс України, п. 145.1] основних фондів (мінімальний строк використання 5 років), тому амортизаційні відрахування складають:

$$n_a = \frac{1}{5} = 0,2$$

$$C_a = n_a \cdot K = 0,2 \cdot 97,44 = 19,49 \text{ млн. грн}$$

### **2.3.2 Витрати на технічне обслуговування і ремонт обладнання**

Річні витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт електричного обладнання і мереж визначається у відсотках від капітальних затрат (для підстанцій, у тому числі і електрообладнання – 1 %).

$$C_{т.о} = 0,01 \cdot K = 0,01 \cdot 97,44 = 0,97 \text{ млн. грн}$$

Отже експлуатаційні витрати для проектного варіанту складають:

$$C_E = C_a + C_{т.о} = 19,49 + 0,97 = 20,46 \text{ млн. грн}$$

## 2.4 Визначення річної економії

Основним економічним ефектом від застосування ФКП є пряма економія на штрафних платежах за споживання та генерацію реактивної потужності з урахуванням експлуатаційних затрат на утримання ФКП:

$$E = P_A - P_{\Pi} - C_E$$

де  $P_A$  та  $P_{\Pi}$  – плата за споживання та генерацію реактивної потужності відповідно для альтернативного та проектного варіанта.

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

де  $P_1$  – плата за споживання реактивної потужності;

$$P_1 = WQ \cdot D \cdot C_0$$

$WQ_A=847$  млн. квар – кількість спожитої реактивної потужності без ФКП [ПЗ, п. 2.2];

$WQ_{\Pi}=302$  млн. квар – кількість спожитої реактивної потужності з ФКП [ПЗ, п. 2.2];

$D=0,06$  кВт/квар – економічний еквівалент реактивної потужності, що характеризує частку впливу реактивного перетоку в точці обліку на техніко-економічні показники (<http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0093-02>);

$C_0=4,98$  грн/кВт·г – тариф на електроенергію за даними НКРЕ станом на 2023 рік з ПДВ (<http://www.nerc.gov.ua/?id=6568>);

$P_2$  – надбавка за недостатню кількість пристроїв для компенсації реактивної потужності.

$$P_2 = P_1 \cdot C_{\text{баз}} \cdot (K_{\varphi} - 1)$$

$C_{\text{баз}}$  – нормативне значення коефіцієнта струмування капітальних вкладень в засоби компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживача, для підстанцій  $C_{\text{баз}}=1$ .

$K_{\phi} = f\left(\frac{WQ}{WP}\right)$  – розрахунковий коефіцієнт який показує залежність  $K_{\phi}$  від  $f(\text{tg}\phi)$ ;

$\Pi_3$  – знижка за участь споживача в регулюванні режиму енергосистеми по реактивній потужності. Оскільки підстанція не приймає участь в регулюванні режиму енергосистеми, даний коефіцієнт не враховуємо.

Використання ФКП дозволить знизити річне споживання реактивної потужності з 847 млн. квар (альтернативний варіант) до 302 млн. квар (проектний варіант).

Альтернативний варіант (без ФКП):

$$\Pi_{1A} = 847 \cdot 0,06 \cdot 1,98 = 100,62 \text{ млн. грн}$$

$$\Pi_{2A} = 100,62 \cdot 1 \cdot (1,39 - 1) = 39,24 \text{ млн. грн}$$

$$K_{\phi} = f\left(\frac{WQ}{WP}\right) = f\left(\frac{847}{908}\right) = 1,39.$$

$WP=908$  млн. квар – річне споживання активної енергії.

$$\Pi_A = \Pi_{1A} + \Pi_{2A} = 100,62 + 39,24 = 139,86 \text{ млн. грн}$$

Проектний варіант:

$$\Pi_{1\Pi} = 302 \cdot 0,06 \cdot 1,98 = 35,88 \text{ млн. грн}$$

$$\Pi_{2\Pi} = 35,88 \cdot 1 \cdot (1,01 - 1) = 0,36 \text{ млн. грн}$$

$$K_{\phi} = f\left(\frac{WQ}{WP}\right) = f\left(\frac{302}{908}\right) = 1,01.$$

$$\Pi_{\Pi} = \Pi_{1\Pi} + \Pi_{2\Pi} = 35,88 + 0,36 = 36,24 \text{ млн. грн}$$

Річна економія:

$$E = 139,86 - 36,24 - 20,46 = 83,16 \text{ млн. грн}$$

## 2.5 Визначення показників економічної ефективності проекту

Визначаємо розрахунковий коефіцієнт ефективності:

$$E_p = \frac{E}{K_s} = \frac{83,16}{97,44} = 0,85.$$

Визначаємо розрахунковий термін окупності:

$$T_{\text{окр.}} = \frac{K_3}{E} = \frac{97,44}{83,16} = 1,17 \text{ роки.}$$

## 2.6 Висновки щодо ефективності проекту

Встановлення на підстанції ФКП призведе до зниження штрафів за споживання та генерацію реактивної потужності з урахуванням експлуатаційних витрат на 83,16 млн. грн.

Коефіцієнт економічної ефективності проекту складає 85 %.

Термін окупності капітальних вкладень складає 1,17 роки, що відповідає нормам встановленим в електроенергетиці.

На основі вищесказаного можна зробити висновок, що встановлення на підстанції ФКП економічно доцільним.

## **ВИСНОВКИ**

Результатом виконання кваліфікаційної роботи магістра є пояснювальна записка і графічна частина. У відповідності до поставленого завдання в даному дипломному проекті було розроблено заходи з підвищення якості електроенергії в системі електропостачання МЗ «Дніпросталь».

Основою даних заходів стало: обґрунтування впровадження на підстанції «Пічна» фільтрокомпенсуючого пристрою на 2-гу, 3-ю та 4-у гармоніки. Було проведено відповідні розрахунки. Застосування ФКП відповідає вимогам економічності, надійності системи електропостачання та якості електроенергії, яка надходить до споживача.

Для техніко-економічного обґрунтування вищезгаданих заходів в економічній частині проекту було виконано розрахунки з визначення економії від впровадження ФКП, які довели доцільність та економічну вигідність проведення даних заходів.

Підбиваючи підсумок можна зазначити, що система електропостачання заводу «Дніпросталь» в цілому та підстанції «Пічна» зокрема відповідає головним вимогам: якості електричної енергії, економічності, надійності системи електропостачання та безпеки її експлуатації.

Виконана кваліфікаційна робота може бути використаний при виконанні реальних проектних робіт, а також при практичній діяльності на підприємствах.

## Перелік використаних джерел

1. Правила улаштування електроустановок. – Київ, 2017. -617 с.
2. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, Л.І. Несен; за ред. Г.Г. Півняка; М-во освіти і науки України, Нац. Гірн. Ун-т. – 5-те вид., доопрац. і допов. – Дніпро: НГУ, 2016. – 600 с.
3. Папаїка Ю.А., Півняк Г.Г., Жежеленко І.В. Енергетична ефективність систем електропостачання. – Д.: НТУ «ДП», 2018. – 149 с.
4. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання: Підручник / І.В. Жежеленко, А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, Ю.Л. Саєнко. – Д.: Нац. гірнич. ун-т, 2009. – 319 с.: іл.
5. Півняк Г.Г., Шидловский А.К., Кігель Г.А., Рыбалко А.Я., Хованська О.І. Особливі режими електричних мереж. – Дніпропетровськ: НГА України, 2004. – 375 с.
6. Г.Г. Півняк, М.М. Білий, Г.М. Бажін. Електропостачання гірничих підприємств: Довідковий посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2008, - 550 с.
7. Перехідні процеси в системах електропостачання. Підручник. Вид. 2-е, 3-є, доопрац. та допов. / Г.Г.Півняк, В.М.Вінославський, А.Я.Рибалко, Л.І.Несен / за ред. академіка НАН України Г.Г.Півняка. – Дніпропетровськ: НГАУ, 2000, 2003. – 597 с.
8. Transients in Electric Power Supply Systems. Textbook for institutions of higher education: under the editorship of G.G.Pivnyak / G.G.Pivnyak, I.V.Zhezhelenko, Y.A.Papaika; Ministry of Education and Science of Ukrainian, National Mining University – 5-th edition, revised and expanded: Translation from Ukrainian. – Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2016. – 382 p.
9. Transients in Electric Power Supply Systems. Volume 1: the textbook for institutions of higher education / G. Pivnyak, V. Vinoslavskiy, A. Rybalko, L. Nesen; under the general editorship of G. Pivnyak, Academician of National



Academy of Sciences of Ukraine. Editorship of the English version and terminology by Professors O. Ivanov and S. Kostritskaya – 4th edition: Translation from Ukrainian. – Dnipropetrovsk: National Mining University. – 2005. – 248 pp.

10. Transients in Electric Power Supply Systems. Textbook for institutions of higher education / G. Pivnyak, V. Vinoslavskiy, A. Rybalko, L. Nesen, V. Procopenko; under the general editorship of G. Pivnyak, Academician of National Academy of Sciences of Ukraine. Editorship of the English version and terminology by Professors O. Ivanov and S. Kostritskaya – 5th edition: Translation from Ukrainian. – Dnipropetrovsk: National Mining University. – 2009. – 406 pp.

11. Півняк Г.Г., Волотковська Н.С., Кігель Г.А. Розрахунки електричних мереж систем електропостачання. – НГУ, 2011.

12. Кігель Г.А, Півняк Г.Г. Електричні мережі систем електропостачання. – НГУ, 2011.

13. Експлуатація електроустановок: Навч. посібник / Г.Г. Півняк, А.В. Журахівський, Г.А. Кігель, Б.М. Кінаш, А.Я Рибалко, Ф.П. Шкрабець, З.М. Бахор; За ред. академіка НАН України Г.Г. Півняка. –Дніпропетровськ, НГУ, 2005.

14. Перхач В.С. Математичні задачі електроенергетики. Л.: Вища шк., 1981.

15. Сегеда М.С. Електричні мережі та системи. – Л.: НМК ВО «Каменяр», 1999.

## Додаток А

### Матеріали кваліфікаційної роботи

№		Позначення	Назва	Кіл. лис.	Прим.
1	A4	ЕЕ.КР.23.ПЗ	Пояснювальна записка	74	
Графічні матеріали					
1	A1	ЕЕ.КР.23.ГЧ	Презентація	1	