

Дніпродзержинський державний технічний університет

## ЕКСПЛУАТАЦІЙНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СТАТИЧНОГО ТИРИСТОРНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В МЕРЕЖІ ЖИВЛЕННЯ АГРЕГАТУ „ПІЧ-КОВШ”

**Вступ.** Наявність різкозмінних навантажень потребує ретельного підходу до вибору параметрів системи електроживлення та її елементів. Основними питаннями, що виникають при роботі систем електропостачання з різкозмінними навантаженнями, є визначення розрахункових активних і реактивних навантажень, визначення розмахів коливань активної і реактивної потужностей та пов'язаних з ними коливань напруги і частоти, а також вибір типу і параметрів пристроїв, що покращують якість електроенергії.

Саме такі питання виникли при розробці системи електроживлення технологічної установки „піч-ковш”, що працює у конвертерному цеху металургійного комбінату. Загальне призначення статичного тиристорного компенсатора (СТК), встановленого на живильній підстанції, полягає у тому, щоб покращити коефіцієнт потужності системи електропостачання, обмежити гармонічні спотворення та зменшити флуктуації напруги під впливом специфічного навантаження. Поставлені задачі розв'язані способом регулювання реактивної потужності та фільтрації гармонік споживаного струму.

**Постановка задачі.** Визначення ефективності роботи статичного тиристорного компенсатора з керованими реакторами у разі живлення агрегату „піч-ковш”.

**Результати роботи.** Розраховано показники пофазного відхилення напруги на шинах 35 кВ, рівень підвищення коефіцієнта потужності та коефіцієнт несинусоїдальності напруги.

*Схема електропостачання підстанції ФКУ-35 та принципова схема електроживлення установки „піч-ковш”.* Живлення підстанції ФКУ-35 здійснюється від підстанції глибокого вводу, котра отримує напругу 150 кВ від енергосистеми. Понижуючий трансформатор ТДНМ-63000/150/35 кВ має вторинну напругу 35 кВ, яка по кабелю передається на закритий розподільний пристрій ЗРУ-35 підстанції ФКУ-35. Принципова схема електропостачання наведена на рис.1.

За принципом роботи агрегат „піч-ковш” (АПК) працює як звичайна дугова піч (ДСП), але питома потужність трансформаторів значно менша і складає приблизно 100-160 кВА/т. Причина полягає у відсутності такої енергозатратної стадії, як розплавлення шихти, підведена енергія витрачається тільки на розплавлення різних добавок та підтримання належної температури металу.

Величина коефіцієнта потужності  $K_p$  агрегата ПК визначається компромісним вирішенням проблеми нагріву. Так, підвищення  $K_p$  (за рахунок зменшення сили струму й збільшення напруги при незмінній повній потужності пічного трансформатора) призводить до зростання дуги, що зменшує корисне витрачання теплової енергії, а зниження  $K_p$  викликає зменшення активної потужності електричної дуги з одночасним підвищенням її ККД. Таким чином, прийнято вважати за оптимальне значення коефіцієнта потужності АПК величину у межах 0,75-0,80.

Величина потужності пічного трансформатора є основним енерготехнологічним параметром установки дугового нагріву і визначає ефективність її роботи: швидкість нагріву металу, тривалість циклу обробки, а також якість проведення технологічного процесу. Потрібна номінальна потужність трансформатора вибирається з урахуванням періодичності характеру обробки. Якщо типовий час підводу потужності становить 35-40 хвилин, а наступна плавка йде через 60 хвилин, тоді потужність пічного трансформатора необхідно вибирати з урахуванням щонайменше 20% перевантаження.

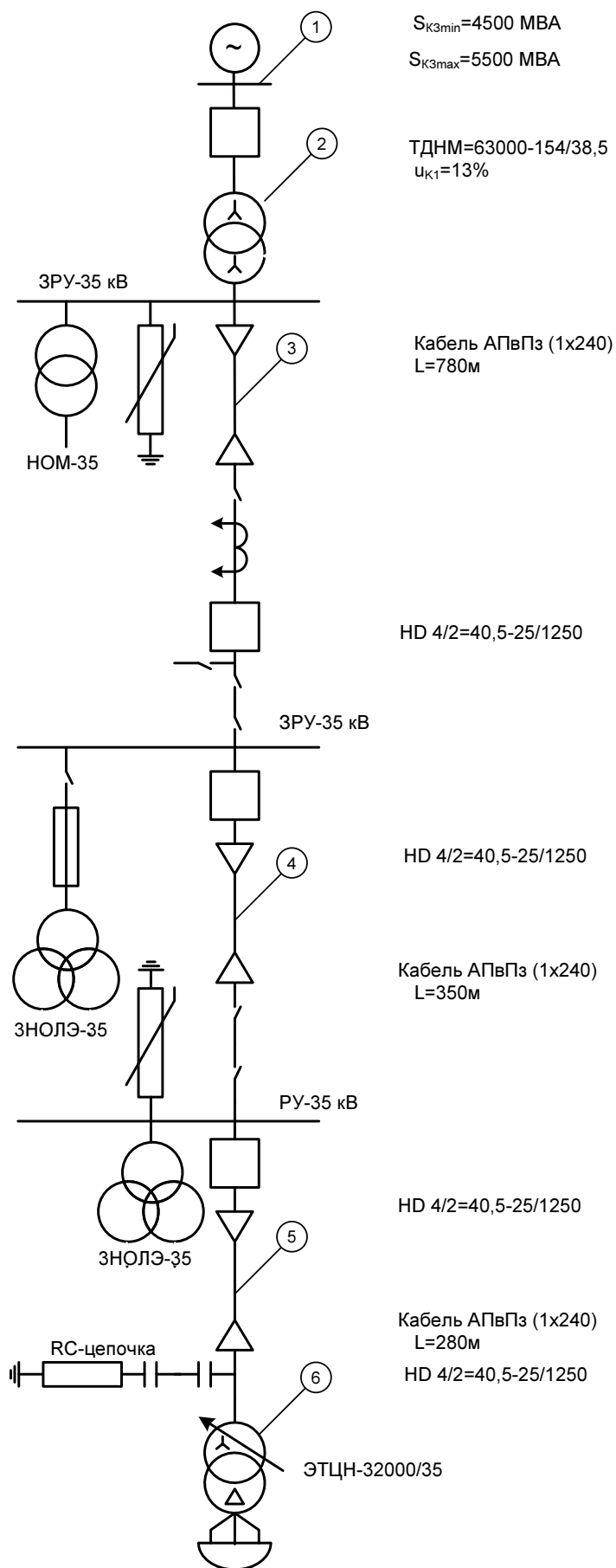


Рисунок 1 – Принципова схема електропостачання

Виходячи з типових розрахунків робочої точки та конструкції трансформатора маємо наступні значення:

- активна потужність – 22 МВт,
- довжина дуги – 100 мм,
- напруга дуги – 135 В,
- вторинна напруга – 370 В,
- потужність дуги – 18 МВт.

Таким чином, номінальна потужність пічного трансформатора буде становити не менше 25 МВт.

*Конструктивне виконання підстанції ФКУ-35.* Підстанція ФКУ-35 напругою 35 кВ за своїм призначенням є розподільною, живить агрегати „піч-ковш” №1 та №2 з пічними трансформаторами потужністю 35 МВА і 40 МВА. Підстанція має обладнання з компенсації реактивної потужності з метою зменшення коливань напруги, а також подавлення вищих гармонік.

Будівля підстанції ФКУ-35 чотириповерхова.

I поверх – ЗРУ-35 кВ, кабельні шахти, камери ТСН, щитові приміщення, вентиляційні та службові приміщення.

II поверх – щит керування і захисту, два трифазних демпферних реактори, два трифазних реактори з тиристорним керуванням, вентиляційні приміщення, кабельні шахти.

III поверх – два трифазних тиристорних блоки, насосні установки водоохолодження, шафи керування системою охолодження, охолоджувачі.

IV поверх – два трифазних фільтри 3-ї гармоніки, два трифазних фільтри 5-ї гармоніки, конденсатори та реактори.

Склад і параметри основного електрообладнання наведено у табл.1.

Таблиця 1 – Найменування і параметри обладнання підстанції ФКУ-35 кВ

Секція шин	I с.ш.					II с.ш.				
	Позн.	потужність, МВАр	струм, А	індукт., мН	ємність, мкФ	Позн.	потужність, МВАр	струм, А	індукт., мН	ємність, мкФ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. Головний понижуючий трансформатор	T-1	ТДНМ-63000/154/38,5; Y <sub>0</sub> /D-11				T-2	ТДНМ-63000/154/38,5; Y <sub>0</sub> /D-11			
2. Пічний трансформатор	LF-1	ЭТЦН-35000/35				LF-2	ЭТЦН-40000/35			
3. Реактори	Два трифазних демпферні (по одному на секцію шин) Два однофазних здвоєних керованих у кожній фазі (TCR 2×117 мН)									
3.1. Регульовані	L5-1÷ L5-6	32,0	367	2×117	–	L12-1÷ L12-6	32,0	367	2×117	–
3.2. Демпферні	L5-7÷ L5-9	–	367	0,4	–	L5-7÷ L5-9	–	367	9	–
4. Фільтри	3-ї та 5-ї гармонік (на кожній секції шин)									
4.1. 3-ї гармоніки	Ф3-1	19,2	390	25,72	45,26	Ф3-2	19,68	390	25,72	45,26
4.2. 5-ї гармоніки	Ф5-1	9,09	186	18,27	22,63	Ф5-2	9,08	186	18,27	22,63

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5. Трансформатори власних потреб	ТМ-250/6/0,4; Y/ Y <sub>H</sub> -0					ТМ-250/6/0,4; Y/ Y <sub>H</sub> -0				
6. Тиристорні блоки	NTV-32/35 (три блоки)					NTV-32/35 (три блоки)				
7. Вимикачі елегазові	YD4/Z-40,5-25-1250					YD4/Z-40,5-25-1250				

Закритий розподільчий пристрій 35 кВ.

1. Комплектний розподільчий пристрій 35 кВ (РП-35 кВ) виконано двосекційним, у його складі 14 шаф серії КУ-35 кВ з електрогазовими вимикачами HD 4/Z-40,5-25-1250 з приводами ESH та мікропроцесорними пристроями захисту, автоматики і управління типу REJ527, REF541, REF543.

2. Два силових понижуючих трансформатори власних потреб ТМ-250/6/0,4 кВ зі схемою з'єднання Y/Y<sub>H</sub>-0, потужністю у 250 кВА кожний.

3. Два трифазних демпферних реактори номінальною напругою 35 кВ, індуктивністю 0,4 мН.

4. Два однофазних здвоєних тиристорно-керовані реактори номінальною потужністю 32 МВАр у кожній фазі.

5. Два трифазних фільтри 3-ї гармоніки потужністю 20 МВАр з трифазним блоком конденсаторів та трьома однофазними реакторами у кожній фазі.

6. Два трифазних фільтри 5-ї гармоніки потужністю 9 МВАр з трифазним блоком конденсаторів та трьома однофазними реакторами у кожній фазі.

7. Система охолодження тиристорних вентилів, що складається з насосної станції теплообмінника, шафи керування і трубопроводів.

*Системи керування і захисту.* Комплекс СТК керується системою керування і захисту. Система розміщується у трьох шафах, має три тиристорні блоки та їх системи охолодження. Шафи включають: шафу керування NCC, шафу релейного захисту NPC та базову шафу вентилів NVB. Шафа керування NCC здійснює усі логічні функції: послідовність пуску і зупинки СТК, аварійну сигналізацію та відключення. Шафа релейного захисту має 96 цифрових каналів вводу і 64 цифрових каналів виводу інформації. *Шафа захисту NPC.* Реле здійснюють захист тиристорно-реакторної групи від коротких замикань і перевантажень, фільтрові батареї – від коротких замикань, перевантажень і струмів небалансу, а також весь СТК від підвищення і пониження напруги та однофазних замикань на землю. Базова шафа вентилів NVB призначена для генерації імпульсів керування для тиристорів, а у разі необхідності виключає СТК при відключенні тиристорного блоку.

Тиристорні блоки керують потужністю тиристорно-реакторної групи (TCR), зміна потужності здійснюється за зміною кута відкриття тиристорів. Тиристорний блок складається з послідовно з'єднаних тиристорних пар, в яких тиристори з'єднанні зустрічно-паралельно. Кожна пара має свою керуючу електроніку та оптичні волокна.

Тиристорний блок охолоджується водою, блок охолодження NCU має два незалежних контури: внутрішній (замкнений) для тиристорних блоків і зовнішній (відкритий) для зовнішньої води охолодження. Система охолодження керується власною PLC-системою.

*Принцип роботи комплексу СТК.* Коливання напруги, що виникають у разі різко змінних навантажень, практично пропорційні коливанням реактивної потужності. Тому для зменшення коливань напруги необхідно застосовувати компенсуючі пристрої, па-

параметри котрих повинні забезпечувати наступні вимоги: швидкодію, компенсацію розмаху коливань реактивної потужності  $\Delta Q$  та швидкості зростання і спаду реактивної потужності  $\Delta Q/\Delta t$ , при можливих несиметричних режимах навантаження здійснювати пофазне регулювання реактивної потужності.

Споживання реактивної потужності піччю дугового типу зумовлено необхідністю достатньо великого кута  $\varphi$  (зсуву по фазі струму  $i$  та напруги  $u$ ) у колі живлення печі. Тільки у цьому разі будемо мати безперервне горіння дуги та задовільний ККД. У нашому випадку величина кута  $\varphi$  дорівнюватиме:

$$\varphi = \arcsin \frac{U_D}{U_2} = \arcsin \frac{135}{370/\sqrt{2}} = 31^\circ,$$

тобто безперервне горіння дуги отримаємо у разі кута зсуву  $\varphi \geq 31^\circ$  та при  $\cos \varphi \leq 0,85$ .

Наявність у контурах дугових печей нелінійних елементів є однією з причин появи вищих гармонік струмів і напруг у мережах живлення. Нелінійність вольт-амперної характеристики дуги викликає спотворення форми кривої струму і генерацію вищих гармонік. Несинусоїдальні струми через пічний трансформатор попадають у систему електропостачання, у результаті чого спотворюється форма кривої живильної напруги. За проведеними дослідженнями визначено, що середній рівень гармонік для періоду рафінування (він відповідає режиму роботи „піч-ковш”) становить:  $v=2$ ,  $U_2=1,5\%$ ;  $v=3$ ,  $U_3=2,2\%$ ;  $v=4$ ,  $U_4=0,5\%$ ;  $v=5$ ,  $U_5=1,7\%$ ;  $v=6$ ,  $U_6=0,5\%$ ;  $v=7$ ,  $U_7=0,8\%$ .

Таким чином, компенсуючий пристрій повинен забезпечити регулювання реактивної потужності згідно з графіком роботи дугової печі, а також мати у своєму складі фільтри 3-ї та 5-ї вищих гармонік.

*Статичні компенсатори непрямого регулювання.* Основними елементами статичного компенсатора непрямого регулювання є шунтові конденсаторні батареї (БК) та регульовані реактори. Регулювання реакторів здійснюється за допомогою тиристорних вентилів або зміною насичення осердя. Конденсаторні батареї можуть бути постійно увімкненими або приєднуватись частинами за комутацією тиристорними ключами.

Режим роботи компенсатора залежить від значення напруги системи. Якщо напруга системи менша або дорівнює нижній межі діапазону регулювання компенсатора, то в мережу повинна надходити максимальна потужність БК компенсатора, а потужність реактора повинна дорівнювати нулю. З підвищенням напруги мережі частина потужності конденсаторів споживається реакторами. У статичних компенсаторів такого типу використовують реактори, керовані тиристорами, реактори з підмагніченням та реактори з насиченням осердя.

На підстанції ФКУ-35 встановлено статичний компенсуючий пристрій з реакторами, керованими тиристорними вентилями. До недоліків схеми з керованими вентилями необхідно віднести наявність вищих гармонік у струмі, який споживає реактор з мережі. У якості БК застосовано конденсатори фільтрів, які налаштовані за допомогою послідовно увімкнених реакторів на резонанс напруги відповідних гармонік. Однолінійна схема підстанції наведена на рис.2.

*Експериментальні дослідження ефективності роботи пристрою СТК.* У ході досліджень необхідно визначити наступні моменти: якість стабілізації напруги на шинах 35 кВ, рівень підвищення коефіцієнта потужності та подавлення вищих гармонік. Вимірювання проводились на підстанції ФКУ-35 за період з 20.07 по 28.08.2014 року на першій секції шин.

1. *Стабілізація напруги.* У зв'язку з тим, що пристрій СТК допускає можливість пофазного регулювання напруги, визначимо якість стабілізації кожної міжфазної напруги (табл.2).

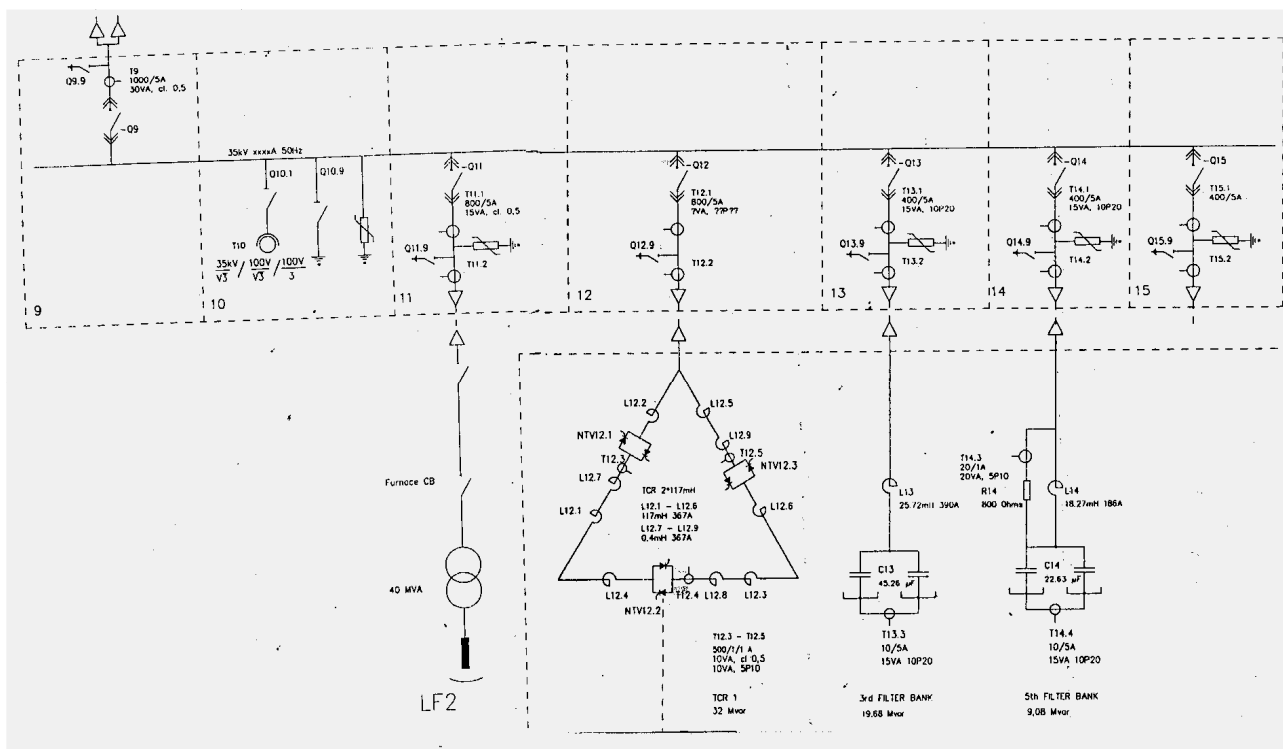


Рисунок 2 – Однолінійна схема підстанції ФКУ-35 (II с.ш.)

Таблиця 2 – Показники пофазної стабілізації напруги

Параметр	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$
Середнє значення, кВ	35,21	35,22	35,10
Середнє квадратичне відхилення, кВ	0,20	0,22	0,25
Межі коливання напруги:	$U_{cp} \pm \Delta U$		
верхня границя, В	35410	35440	35350
нижня границя, В	35010	35000	34850
Відносне відхилення $\Delta U / U_{cp}$ , %	0,57	0,62	0,71

За нормативом допустиме коливання напруги для дугових печей не повинно перевищувати 1% від номінальної напруги, тобто комплекс СТК за даним параметром відповідає нормативу.

2. *Коефіцієнт потужності.* Рівень реактивної потужності у разі роботи СТК можна визначити за показниками лічильників активної і реактивної потужностей, котрі встановлені на всіх приєднаннях кожної секції шин: вводах, фідерах навантаження „піч-ковш”, керованих реакторах та фільтрах 3-ї та 5-ї гармонік.

Показання приладів у разі відключення тиристорно-реакторної групи та відключення фільтрів гармонік (за принципом роботи схеми керування при відключенні ТКР одночасно автоматика вимикає і фільтри):

	<u>Ввод №1</u>	<u>УПК-1</u>
струм	I=543 А	I=599 А
активна потужність	P=25359 кВт	P=24595 кВт
реактивна потужність	Q=17386 кВАр	Q=15131 кВАр
коефіцієнт потужності	tgφ=0,68; cosφ=0,82	tgφ=0,61; cosφ=0,85.

Як бачимо, у цьому режимі з мережі споживається значна реактивна потужність.

Нижче наведено показники вимірювальних приладів за 25.08.2014р. на 11<sup>00</sup> годину (керовані реактори увімкнені):

	<u>Ввод №1</u>	<u>УПК-1</u>	<u>ТКР-1</u>	<u>Ф-3</u>	<u>Ф-5</u>
струм, А	478	451	293	327	151
активна потужність, кВт	28640	28040	165	129	37
реактивна потужність, кВАр	1145	14520	15255	19634	9132
коефіцієнт потужності, cosφ	0,99	0,88	0,02	—	—

Аналіз даних показує, що вмикання в роботу компенсатора дозволяє підняти коефіцієнт потужності майже до одиниці (споживання реактивної потужності з мережі становить усього 1145 кВАр).

3. *Подавлення вищих гармонік.* Звичайні дугові печі працюють у трьох режимах: плавлення, окислення та рафінування. Кожний з режимів характеризується своїм складом вищих гармонік. Так у режимі плавлення переважають друга та третя гармоніки. У період окислення та рафінування пічна дуга горить стало і спокійно, рівень вищих гармонік у напрузі і струмі значно зменшується, особливо у режимі рафінування. Рівність струмів у фазах свідчить про значне зменшення третьої гармоніки. Технологічна установка „піч-ковш” працює з рідким металом, тобто у режимі, близькому до рафінування.

Раніше було вказано на те, що установка „піч-ковш” може працювати без тиристорно-реакторної групи і без фільтрів, така ситуація виникає у разі спрацювання захисту від небалансу струмів (у колі реакторів або конденсаторних батарей).

У цьому режимі відсутня компенсація реактивної потужності та подавлення вищих гармонік, тобто ми маємо наступний склад і рівень гармонік:

v	2	3	4	5	6	7
U <sub>v</sub> %	1,5	2,2	0,5	1,7	0,5	0,8
U <sub>v</sub> , В	303,4	445,1	101,1	343,9	101,1	161,8

Визначимо середню величину коефіцієнта несинусоїдальності напруги за виразом

$$K_{НС} = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{v=2}^{v=7} U_v^2}{U_{\Phi_{ном}}^2}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{455012}{20231}} = 3,35\%.$$

У разі роботи реактора з фільтрами рівень вищих гармонік значно зменшується:

v	2	3	4	5	6	7
U <sub>v</sub> %	0,5	0,7	0,3	0,9	0,3	0,5
U <sub>v</sub> , В	101,1	141,6	54,6	182,1	54,6	101,1

Коефіцієнт несинусоїдальності напруги становить:

$$K_{НС} = 100 \cdot \sqrt{\frac{79801}{20231}} = 1,39\%.$$

Таким чином, коефіцієнт несинусоїдальності напруги в обох випадках не перевищує нормативної у 5%, результати свідчать про ефективну роботу згладжуючих фільтрів.

4. *Загальні висновки з аналізу роботи СТК.* Головною задачею компенсуючого пристрою є обмеження впливу різкозмінного навантаження на режим напруги мережі живлення та підвищення коефіцієнта потужності технологічної установки „піч-ковш”.

Аналіз отриманих показників свідчить, що поставлена задача виконана: пофазне коливання напруги на шинах 35 кВ підстанції не перевищує 1%, а коефіцієнт потужності знаходиться на рівні 0,95...1,0. Відносно вищих гармонік можна сказати наступне:

середнє значення коефіцієнта несинусоїдальності напруги не перевищує нормативного, однак максимальні значення завжди у 2-3 рази перевищують середні показники. Тому робота пристрою СТК неприпустима без силових фільтрів. На жаль, такі ситуації трапляються, коли реле небалансу спрацьовує і вимикає кола реакторів і фільтрів. У цьому разі втрачається джерело регульованої реактивної потужності та пристроїв з обмеження вищих гармонік. Спрацювання реле небалансу обумовлено виходом з ладу високовольтних конденсаторів, а заміну імпортному обладнанню не завжди можна своєчасно підібрати.

Статичний компенсатор цього типу відрізняється значною швидкістю, можливістю та ширшим діапазоном пофазного регулювання. На наш погляд, при проектуванні не було прийнято до уваги наступне. По-перше, технологічна установка „піч-ковш” працює тільки у режимі рафінування, значних кидків потужності немає, тому велика швидкість не потребується. Також немає потреби і у пофазному регулюванні роботи компенсуючого пристрою. По-друге, якщо прийняти до уваги істотний коефіцієнт потужності у межах 0,80-0,85, то зайвим буде широкий діапазон регулювання реактивної потужності.

**Висновки.** Таким чином, за період експлуатації (майже 5 років) технологічної установки „піч-ковш” система з тиристорно-керованим реактором показала свою працездатність і ефективність, однак для технологічних установок цього типу доцільно застосовувати інший тип регулювання реактивної потужності (наприклад, реактор з підмагніченням осердя, поширений на підприємствах Німеччини та Бельгії), що дозволило б значно зменшити обсяг будівлі та скоротити витрати на електричне обладнання.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Статические компенсаторы реактивной мощности / под ред. В.А.Веникова.–М.: Энергия, 1975. – 136с.
2. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности / под ред. Р.М.Матура; пер.с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 160с.
3. Р.В.Михеев. Повышение эффективности электроснабжения электропечей / Р.В.Михеев, А.П.Михеев, Ю.Л.Рыжиев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208с.
4. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / Иванов В.С., Соколов В.И. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336с.
5. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / Жежеленко И.В. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 272с.

*Надійшла до редколегії 03.03.2015.*