

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

## ВПЛИВ ФІЛЬТРІВ ВИЩИХ ГАРМОНІК НА РІВЕНЬ НАПРУГИ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ВУЗЛА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

**Вступ.** Системи електропостачання великих промислових підприємств характеризуються наявністю споживачів з нелінійним і несиметричним навантаженням. Найбільша частка таких споживачів – це вентиляльні перетворювачі різних типів, тобто навантаження з нелінійними вольт-амперними характеристиками, що обумовлює споживання з мережі несинусоїдального струму, спотворення кривої напруги та генерування вищих гармонік (ВГ).

Другою особливістю вентиляльних перетворювачів є застосування системи фазового керування для регулювання напруги, що погіршує коефіцієнт потужності мережі. За даними [1] зміна напруги на 1% призводить до зміни споживання реактивної потужності на 1-1,5%, тому усі показники якості електроенергії за напругою залежать від споживання електроприймачами реактивної потужності. Чим більший діапазон регулювання напруги, тим більший кут керування вентилями, отже і більше споживання реактивної потужності при одночасній генерації вищих гармонік. Тому питання якості електроенергії та електромагнітної сумісності вентиляного електропривода необхідно розглядати у безпосередньому зв'язку компенсації реактивної потужності та обмеження рівня вищих гармонік.

**Постановка задачі.** Визначивши зв'язок процесу регулювання напруги фазовим методом зі споживанням реактивної потужності та погіршенням коефіцієнта потужності, приходимо висновку, що найбільш простим варіантом вирішення цієї проблеми для вузла електропостачання підстанції КРЗ-5 металургійного комбінату є застосування батарей конденсаторів (БК). Однак робота БК у мережах з несинусоїдальною напругою можлива тільки у разі їх послідовного вмикання із захисними реакторами, тому експлуатація систем електропостачання промислових підприємств з вентиляльними перетворювачами у даний час базується на застосуванні батарей конденсаторів як елементів силових фільтрів з резонансною настройкою.

Таким чином, метою дослідження є визначення складу фільтрокомпенсуючого пристрою (ФКП) у залежності від рівня напруги на шинах 10 кВ підстанції за умови необхідного обмеження рівня ВГ.

**Результати роботи.** Аналіз добових витрат електроенергії у вузлі підстанції КРЗ-5 протягом двох місяців дозволив визначити середні активні і реактивні навантаження, розрахувати рівні напруги на шинах 10 кВ для різної комбінації вмикання силових фільтрів, а також величину коефіцієнта потужності. У роботі розглянуто режим максимального навантаження головного трансформатора; визначено, що вмикання силових фільтрів вищих гармонік з генерацією реактивної потужності в обсязі 13,72 МВАр дозволило розвантажити понижуючий трансформатор на 23,9% за повною потужністю, що забезпечило нормальну роботу прокатних станів у всіх технологічних режимах.

**Загальна характеристика вузла електропостачання.** У якості розрахункової розглядається підстанція глибокого вводу КРЗ-5, яка в основному живить групу прокат-них цехів (ПС-3, МС-4 та МС-5) напругою 10 кВ від понижуючих трансформаторів (Т-3 та Т-4) потужністю 31,5 МВА напругою 150/10 кВ кожний. Навантаження цехів складають вентиляльні перетворювальні агрегати, потужність і схему з'єднань яких наведено у табл.1.

Таблиця 1 – Навантаження понижуючих трансформаторів Т-3 та Т-4 за варіантами живлення цехових підстанцій

Потужність агрегата Цехова ПС	Схеми з'єднання і потужності перетворювальних агрегатів	
	$\Delta/Y-Y$	$Y/Y-Y$
<u>МС-4 + ПС-3</u> (тр-р Т-3)	A1. 11×1000	A2. 7×1000
	A3. 3×1600	A4. 4×1600
	A5. 4×1600	A6. 2×1600
<u>МС-5 + ПС-3</u> (тр-р Т-4)	A1. 12×1000	A2. 12×1000
	A3. 2×1000	A4. 4×1600
	A5. 6×630	A6. 2×630

*Примітка:* підстанція ПС-3 у різних режимах роботи може живитися від трансформатора Т-3 або трансформатора Т-4.

Підстанція глибокого вводу КРЗ-5 має дві системи шин, на кожну з яких ввімкнені силові резонансні фільтри 3-5-7-11 гармонік, паралельна робота фільтрів не передбачається.

**Основний зміст роботи.** У дослідженні [2] наведено аналіз роботи фільтрокомпенсуючого пристрою вузла електропостачання КРЗ-5, основна увага була приділена проблемі подавлення вищих гармонік у залежності від режиму роботи станів та комбінації вмикання фільтрів різних гармонік. Однак, поза увагою залишились важливі для експлуатації питання про коливання рівня напруги у разі вмикання фільтрів різних гармонік та втрати потужності у мережі, що і планується розглянути далі.

**1. Коливання напруги на шинах підстанції у різних комбінаціях вмикання силових фільтрів.** Баланс реактивної потужності (РП) у системі визначає деякий рівень напруги у кожному вузлі навантаження, порушення балансу РП призводить до зміни рівня напруги в мережі. Якщо дефіцит активної потужності у системі можна поновити за рахунок суміжних енергосистем, то дефіцит реактивної потужності ефективніше поповнити за рахунок власних джерел, якими у даному випадку є фільтрокомпенсуючі пристрої. При цьому передавальні елементи мережі розвантажуються за РП, чим досягається зниження втрат активної потужності і напруги. При незмінній потужності навантаження струм у лінії зменшується – лінія розвантажується за реактивною потужністю через те, що

$$\Delta P_{\text{Л}} = \frac{P_{\text{Н}}^2 + (Q_{\text{Н}} - Q_{\text{К}})^2}{U^2}; \quad \Delta U_{\text{Л}} = \frac{P_{\text{Н}} \cdot r_{\text{Л}} + (Q_{\text{Н}} - Q_{\text{К}}) \cdot X_{\text{Л}}}{U}. \quad (1)$$

На основі аналізу даних добового електроспоживання за два місяці у вузлі електропостачання (табл.2) встановлено, що навантаження змінюється незначно за винятком днів профілактики та ремонту. Найвні статичні дані дозволили визначити середньодобове значення споживаної активної та реактивної потужностей, у тому числі максимальні і мінімальні відхилення потужності для різних режимів живлення підстанцій МС-4, МС-5 і ПС-3. Результати обробки статистичних даних наведено у табл.3, де вказані і основні варіанти вмикання силових фільтрів.

Таблиця 2 – Добові витрати електроенергії ПС КРЗ-5

Актив-на	МС-4			МС-5			ПС-3			МС-4			МС-5			ПС-3		
	Реак-тивна	tg	Актив-на	Реак-тивна	tg	Актив-на	Реак-тивна	tg	Актив-на	Реак-тивна	tg	Актив-на	Реак-тивна	tg	Актив-на	Реак-тивна	tg	
212	160	0,75	132,8	180	1,36	170	168	0,988	139,2	168	1,21	132,2	168	1,27	176,6	192	1,09	
200	160	0,80	130	168	1,29	168	164	0,976	144,4	176	1,22	138,4	188	1,36	167,4	186	1,11	
204,8	204	0,99	118,4	160	1,35	168	160	0,952	130,8	160	1,22	137,6	180	1,31	163,2	180	1,10	
212,8	176	0,83	130,4	176	1,35	173,6	172	0,991	130	156	1,20	142,4	184	1,29	195	198	1,02	
204,4	168	0,82	139,6	180	1,29	170	164	0,965	128,4	156	1,22	142,8	184	1,29	197,4	204	1,03	
209,2	172	0,82	132	176	1,33	156	168	1,077	126,8	148	1,17	145,2	176	1,21	193,2	192	0,99	
213,2	172	0,81	139,6	176	1,26	156	148	0,949	132	160	1,21	155,6	192	1,23	184,2	192	1,04	
217,2	176	0,81	135,2	176	1,30	148,8	152	1,022	139,6	164	1,17	149,2	188	1,26	190,2	198	1,04	
209,6	168	0,80	134	176	1,31	124,4	136	1,093	125,6	152	1,21	152,8	188	1,23	192,1	198	1,03	
218,4	176	0,81	126	128	1,02	138	152	1,101	124,8	152	1,218	149,6	192	1,28	183	186	1,02	
230,4	184	0,80	132	172	1,30	126,8	144	1,136	134	160	1,19	141,6	184	1,30	188,4	198	1,05	
211,6	170	0,80	126	156	1,24	126	136	1,079	134	160	1,19	146,4	180	1,23	178,8	180	1,67	
220,8	180	0,82	136	168	1,24	143,6	160	1,114	140	160	1,14	72,8	180	1,04	183	186	1,02	
224	184	0,82	139,2	160	1,15	149,4	164	1,098	138,4	160	1,16	171,6	180	1,05	181	192	1,06	
220	188	0,85	131,2	160	1,22	146,4	164	1,120	134,4	160	1,19	150,8	164	1,089	193,8	204	1,05	
223,2	188	0,84	131,2	164	1,25	134	148	1,104	134,4	156	1,16	138,8	160	1,15	187,8	174	0,93	
216,9	184	0,85	134	160	1,19	148	160	1,081	134,4	168	1,25	135,2	156	1,15	188,4	150	0,08	
228,4	196	0,86	135,5	164	1,21	124,8	140	1,122	141,2	176	1,25	129,6	148	1,42	189,6	162	0,85	
228,8	192	0,84	127,2	156	1,23	129,2	144	1,115	136,8	172	1,26	156,4	172	1,10	201	162	0,81	
225,6	196	0,87	134,8	160	1,19	140	156	1,114	141,2	176	1,25	150,4	168	1,12	221,4	174	0,79	
213,6	188	0,88	126,4	152	1,20	154,8	172	1,111	136	176	1,29	147,2	160	1,09	215,4	168	0,78	
229,6	200	0,87	131,2	164	1,25	155,6	188	1,208	131,2	164	1,25	134,4	144	1,07	204,4	156	0,76	
216,4	188	0,87	122,8	152	1,24	145,6	176	1,209	135,6	168	1,24	143,6	148	1,03	207,6	162	0,78	
214,4	192	0,90	128	156	1,22	159,6	172	1,078	144,8	176	1,22	144,4	144	0,99	215,4	168	0,78	
Середнє значення																		
216,9	181,8	0,84	131,2	163,5	1,25	148,1	159,0	1,080	135,9	164,8	1,21	147,5	169,9	1,16	190,6	182,3	0,72	

Добові значення реактивного навантаження кожного споживача визначають необхідну величину потужності, яка генерується фільтрами. Тому для кожного варіанта навантаження можна встановити необхідну комбінацію вмикання фільтрів, що і відображено у табл.3.

Таблиця 3 – Середнє навантаження прокатних станів і варіанти вмикання силових фільтрів

Варіанти навантаження	$\Sigma P_n$ , МВт	$\Sigma Q_n$ , МВАр	$\Delta U_n$ , кВ		Варіанти вмикання СФР
			Т-3	Т-4	
МС-4	$5,60^{+0,7}_{-0,4}$	$6,75^{+0,75}_{-1,50}$	0,30	0,29	Ф-5; Ф-5+Ф-7
МС-5	$6,25^{+1,0}_{-1,0}$	$7,00^{+0,9}_{-0,8}$	0,32	0,30	Ф-5; Ф-5+Ф-7
ПС-3	$9,00^{+0,55}_{-1,0}$	$7,80^{+0,7}_{-1,0}$	0,34	0,33	Ф-5; Ф-5+Ф-7
МС-4+ ПС-3	14,60	14,35	0,63	0,60	Ф-5+Ф-7; Ф-5+Ф-11; Ф-5+ Ф-7+Ф-11
МС-5+ ПС-3	15,25	14,80	0,64	0,61	Ф-5+Ф-7; Ф-5+Ф-11; Ф-5+Ф-7+Ф-11
МС-4+ МС-5	11,85	13,75	0,59	0,57	Ф-5+Ф-7; Ф-5+Ф-11; Ф-5+Ф-7+Ф-11
МС-4+ МС-5+ПС-3	20,85	21,55	0,90	0,87	Ф-5+Ф-11; Ф-5+Ф-7+Ф-11

Вмикання того чи іншого навантаження призводить до зниження напруги на шинах 10 кВ підстанції, результати цих розрахунків також представлено в табл.3 з урахуванням трансформатора живлення Т-3 чи Т-4.

Вище було відмічено, що вмикання силових фільтрів підвищує напругу у вузлі навантаження, оскільки знижуються втрати напруги в реактивних елементах трансформаторів і лінії живлення. Підвищення напруги визначається виразом

$$\Delta U = \frac{\Delta Q_\Phi \cdot X'_\Sigma}{U}, \quad (2)$$

де  $\Delta Q_\Phi$  – зміна реактивної потужності, яка відповідає вмиканню силового фільтра;  $X'_\Sigma$  – сумарний приведений реактивний опір ділянки від ліній енергосистеми до шин 10 кВ;  $U$  – лінійна напруга на шинах 10 кВ після вмикання силових резонансних фільтрів (СФР).

Перетворимо вираз (2), представивши  $U$  у вигляді суми  $U = U_0 + \Delta U$ , де  $U_0$  – величина напруги до вмикання фільтрів. Тоді рівняння (2) запишемо як

$$\Delta U = \frac{\Delta Q_\Phi \cdot X'_\Sigma}{U_0 + \Delta U}. \quad (3)$$

Розв'язання цього рівняння має вигляд [3]

$$\Delta U = \sqrt{\left(\frac{U_0}{2}\right)^2 + \Delta Q_\Phi \cdot X'_\Sigma} - \frac{U_0}{2}. \quad (4)$$

Враховуючи, що перемикачі пристрою регулювання напруги під навантаженням (РПН) трансформаторів Т-3 і Т-4 знаходяться у положенні II та I відповідно, тоді величини реактивних опорів дорівнюють:

$$X_{T-3} = 85,53 \text{ Ом}; \quad X_{T-4} = 86,96 \text{ Ом}.$$

Реактивний опір живильної енергосистеми для трансформатора Т-3  $X_{\Sigma} = 10,59$  Ом, для трансформатора Т-4  $X_{\Sigma} = 9,517$  Ом. Тоді сумарний реактивний опір для Т-3  $X_{\Sigma} = 96,12$  Ом; для Т-4 –  $X_{\Sigma} = 96,47$  Ом.

Визначимо величину коефіцієнта трансформації з урахуванням положення РПН:

$$\text{трансформатора Т-3 } K_T = \frac{159}{11} = 14,45; \quad \text{трансформатора Т-4 } K_T = \frac{162}{11} = 14,73.$$

Приведений до шин 10 кВ сумарний реактивний опір дорівнює:

$$\begin{aligned} - \text{ для III с.ш. } X'_{\Sigma} &= \frac{96,12}{14,45^2} = 0,46 \text{ Ом}; \\ - \text{ для IV с.ш. } X'_{\Sigma} &= \frac{96,47}{14,73^2} = 0,44 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Прийнявши значення  $U_0=10$  кВ, за виразом (4) розраховуємо збільшення напруги на шинах 10 кВ при вмиканні силових фільтрів для III і IV секцій шин. За даними експериментальних вимірювань визначено діапазон коливання струму в колі кожного фільтра, що дозволило розрахувати величину втрат потужності  $\Delta P$ , взявши з [2] значення активного опору кола фільтрів. Результати розрахунків наведено у табл.4.

Таблиця 4 – Розрахункові значення збільшення напруги і зниження втрат потужності при вмиканні силових фільтрів

Варіанти вмикання СФР	$\Delta Q_{\phi}$ , МВАр	$\Delta U_n$ , кВ		$I_{\phi}$ , А	$\Delta P_{\phi}$ , кВт
		III с.ш.	IV с.ш.		
Ф-3	2,09	0,10	0,09	105-110	9,30-11,8
Ф-5	3,95	0,18	0,17	200-220	9,2-11,4
Ф-7	2,32	0,11	0,10	120-130	4,8-5,6
Ф-11	5,36	0,23	0,22	280-300	7,4-8,8
Ф-5+Ф-11	9,31	0,41	0,39	480-530	16,6-20,4
Ф-5+Ф-7+Ф-11	11,63	0,50	0,48	600-640	21,4-25,8
Ф-3+Ф-5+Ф-7+Ф-11	13,72	0,60	0,57	705-750	30,7-37,6

Наведені вище розрахунки виконані без врахування впливу рівня напруги на величину РП, що генерується фільтрами, але при невеликому діапазоні зміни  $U_0$  похибка розрахунків мала.

## 2. Аналіз режиму максимального завантаження силового трансформатора.

Режим максимального завантаження відповідає живленню прокатних станів МС-4, МС-5 і ПС-3 від одного силового трансформатора. При відсутності ФКП сумарне навантаження станів близьке до номінальної потужності силового трансформатора, а в окремих режимах навіть перевищує її, тому у даному випадку представляє інтерес визначення ступеня розвантаження силового трансформатора при вмиканні силових фільтрів.

Для розрахунку сумарного максимального навантаження скористаємося даними табл.3, з якої визначимо найбільше значення середньодобових потужностей.

Активна:  $\Sigma P_H = (5,6 + 0,7) + (6,25 + 1) + (9 + 0,55) = 23,1$  МВт.

Реактивна:  $\Sigma Q_H = (6,75 + 0,75) + (7,0 + 0,9) + (7,8 + 0,7) = 23,9$  МВАр.

Повна:  $\Sigma S_H = \sqrt{32,1^2 + 23,9^2} = 33,2$  МВА.

У якості прикладу виконаємо розрахунок для живлення усіх станів від трансформатора Т-3.

Якщо при живленні станів МС-4 і ПС-3 прийняти найбільш імовірну величину напруги на шинах  $U_0=10$  кВ, то додаткове навантаження від МС-5 створює додаткове падіння напруги, що дорівнює  $\Delta U_H=0,32$  кВ (табл.3). Тоді напруга на III с.ш. буде дорівнювати:

$$U_2 = U_0 - \Delta U_H = 10 - 0,32 = 9,68 \text{ кВ.}$$

Первинна напруга  $U_1$  з урахуванням коефіцієнта трансформації Т-3, а також величини падіння напруги від сумарного навантаження на низькій стороні, що дорівнює  $\Delta U_H=0,9$  кВ, складе

$$U_1 = (U_2 + \Delta U_H) = 10(9,68 + 0,9) = 14,45 = 152,8 \text{ кВ.}$$

Середньодобові струми трансформатора Т-3, виходячи з найбільшого значення повної потужності навантаження, дорівнюють

$$I_{1cp} = \frac{\Sigma S_H}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{33,2 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 152,8} = 125,6 \text{ А;}$$

$$I_{2cp} = \frac{\Sigma S_H}{\sqrt{3} \cdot U_2} = \frac{33,2 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 9,68} = 1982 \text{ А,}$$

що вище номінальних значень, які відповідно дорівнюють 116,2 А і 1680 А.

Однохвилинні значення навантажень (рис.1) різкозмінні, а максимальне значення струму відрізняється від середньодобового на 20...30%. Тоді максимальні однохвилинні значення струму трансформатора складуть

$$I_{1max} = 1,3 \cdot I_{1cp} = 1,3 \cdot 125,6 = 163 \text{ А;}$$

$$I_{2max} = 1,3 \cdot I_{2cp} = 1,3 \cdot 1982 = 2577 \text{ А,}$$

що вище струму уставки захисту від перенавантаження, яка дорівнює  $I_{Iycr}=150$  А (захист з витримкою часу 9 с і дією на сигнал).

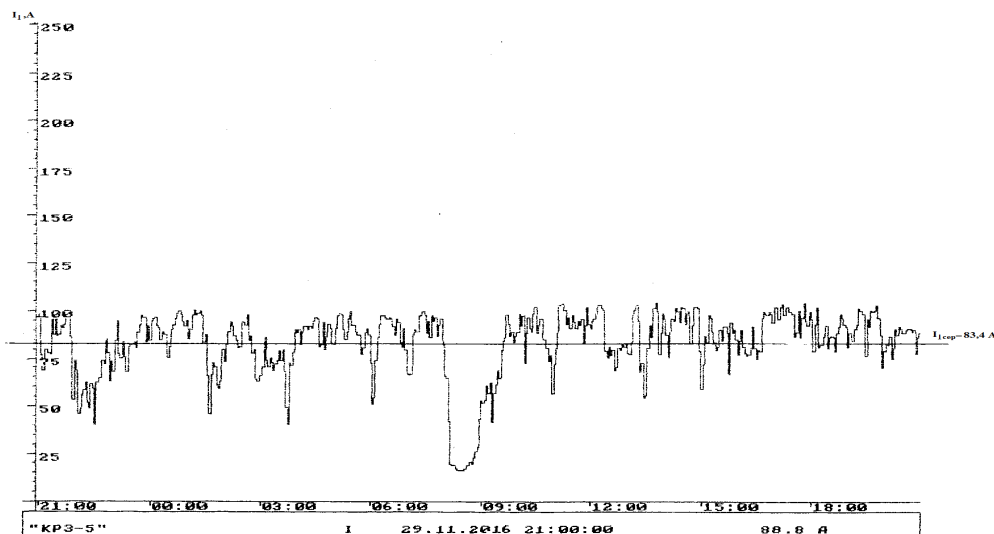


Рисунок 1 – Графік однохвилинних значень первинного струму трансформатора Т-3

При вмиканні фільтрів 3-ї, 5-ї, 7-ї, 11-ї гармонік розрахункова компенсуюча потужність дорівнює  $\Delta Q_{\phi}=13,72$  МВАр. Тоді некомпенсована реактивна потужність

$$Q_{HK} = 23,90 - 13,72 = 10,18 \text{ МВАр.}$$

Повна потужність сумарного навантаження при працюючих фільтрах

$$\Sigma S_H^K = \sqrt{\Sigma P_H^2 + Q_{HK}^2} = \sqrt{23,1^2 + 10,18^2} = 25,2 \text{ МВА.}$$

Підвищення напруги на шинах 10 кВ, що відповідає потужності компенсації у 13,72 МВАр, складе  $\Delta U_{\phi}=0,60$  кВ (табл.4), тоді напруга III с.ш. при працюючих фільтрах дорівнюватиме

$$U_H^K = U_2 + \Delta U_{\phi} = 9,68 + 0,60 = 10,28 \text{ кВ.}$$

Середні струми трансформатора у режимі компенсації

$$I_{1cp}^K = \frac{25,2 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 152,8} = 95,3 \text{ А;}$$

$$I_{2cp}^K = \frac{25,2 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10,28} = 1417 \text{ А.}$$

З урахуванням нерівномірності графіка навантаження

$$I_{1max}^K = 1,3 \cdot I_{1cp}^K = 1,3 \cdot 95,3 = 124 \text{ А;}$$

$$I_{2max}^K = 1,3 \cdot I_{2cp}^K = 1,3 \cdot 1417 = 1842 \text{ А,}$$

що нижче струму уставки захисту від перевантаження трансформатора.

Таким чином, ступінь розвантаження трансформатора за розрахунковими даними при вмиканні усіх фільтрів складе:

$$\frac{163 - 124}{163} \cdot 100\% = 23,9\%,$$

якщо фільтр 3-ї гармоніки буде знаходитись у резерві, то ступінь розвантаження зменшиться до 20,8%.

Для експериментальної перевірки розвантаження трансформатора проведено вимірювання, коли на III с.ш. вмикали фільтри Ф-5+Ф-11, а навантаження визначали стани МС-5+ПС-3 (табл.5).

Таблиця 5 – Контрольні вимірювання добових витрат електроенергії ПС КРЗ-5 при вмиканні силових фільтрів

Активна	Реактивна	Повна	tgφ	cosφ
205,8	42	210,04	0,2	0,98
206,4	36	209,52	0,17	0,99
198,6	30	200,85	0,15	0,99
193,8	42	198,3	0,22	0,98
середнє значення				
201,15	37,5	204,68	0,19	0,98
відхилення				
6,0473135	5,7446	5,9862	0,03	0,01

Дані електроспоживання показали, що середньочасове споживання реактивної енергії склало 1,56 тис. кВАр·год., при відсутності фільтрів вона знаходилась в межах 7,46 тис. кВАр·год.

Так як графік навантаження трансформаторів має різко змінний характер, то нагрів визначається середньоквадратичним значенням струму. Розрахунки показали, що середньоквадратичне значення струму на 5-6% більше середнього, тобто

$$I_{\text{ср.кв.}} = 1,06 \cdot I_{\text{ср}} = 1,06 \cdot 95,3 = 101 \text{ А} < I_{\text{ном}} = 116,2 \text{ А}.$$

Таким чином, понижуючі трансформатори мають значний резерв згідно з повною потужністю.

**3. Пропозиції щодо покращення режиму напруги вузла електропостачання сортопрокатних цехів.** Аналіз електроспоживання у вузлі ПС КРЗ-5 показав, що навіть при відносно стабільному навантаженні напруга на шинах 10 кВ коливається у значних межах (максимально – 11,3 кВ). Однак у деяких ситуаціях, коли рівень вищих гармонік перевищує допустиму величину, а напруга на шинах підстанції підвищена, необхідно вимкнути деякі фільтри (у даному разі це стосується фільтра 11-ї гармоніки з БК потужністю 6,3 МВАр). Вимкання Ф-11 призведе до зниження напруги, але одночасно зросте коефіцієнт несинусоїдальності за рахунок гармонік  $n \geq 21$ . Таке рішення не можна вважати раціональним. У даній ситуації доцільно мати компенсуючий елемент у системі електропостачання, щоб зменшення напруги здійснилося за рахунок зменшення генерації реактивної потужності, але без вимкання фільтрів. Таким елементом може бути тиристорний компенсатор реактивної потужності (ТКРП). Компенсатор [5] складається з напівпровідникового стабілізатора потужності (НСП), компенсуючих реакторів (РК) та фільтрів гармонік (ФГ). Однак у нашому варіанті можна обмежитись тільки НСП потужністю приблизно 5 МВАр, а фільтр Ф-3 доцільно демонтувати через його низьку ефективність [2]. Тиристорний компенсатор стабілізує споживану реактивну потужність та напругу на шинах 10 кВ підстанції, а фільтри 5-7-11 гармонік працюватимуть у нормальному режимі.

**Висновки.** Проведені експериментальні дослідження та аналітичні розрахунки визначили наступне: конденсатори фільтрів виконують дві функції: підвищують коефіцієнт потужності та обмежують рівень вищих гармонік. Вмикання силових фільтрів підвищує рівень напруги у точці приєднання та знижує втрати потужності. Аналіз режиму максимального навантаження показав, що у разі живлення від одного понижуючого трансформатора трьох прокатних станів можливо його перевантаження. Однак вмикання фільтрів 3-5-7-11-гармонік розвантажує трансформатор за повною потужністю на 23,9%. З метою стабілізації напруги на шинах 10 кВ доцільно замість неефективного фільтра 3-ї гармоніки встановити стабілізатор потужності тиристорного компенсатора.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С.Иванов, В.И.Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336с.
2. Визначення ефективності фільтрів вищих гармонік у мережах 10 кВ металургійного комбінату // Хмельницький Є.Д., Ключев О.В. – Збірник наукових праць ДДТУ (технічні науки). – Кам'янське. – 2017. – Вип. 1 (30). – С.104-111.
3. Статические источники реактивной мощности / В.А.Веников, Л.А.Жуков, И.И.Карташов, Ю.П.Рыжов. – М.: Энергия, 1975. – 136с.
4. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / Жежеленко И.В. – К.: Техніка, 1974. – 184с.
5. Тиристорные компенсаторы реактивной мощности серии ТКРМ. Тех.документация. ООО НПП «Преобразователь – комплекс». – Запорожье, 2009. – 18с.

Надійшла до редколегії 20.02.2018.