

3. Стогній Б.С. Енергетична безпека України. Світовий та національний виклики [ТЕКСТ] / Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. – Київ.: Українські енциклопедичні знання, 2006. – 408с.
4. Каневский Л.М. О системе основных экономических показателей технического прогресса / Каневский Л.М. // Электротехника. – 1971. – №3. – С.49-52.

*Надійшла до редколегії 27.02.2017.*

УДК 658.26:621.316.1

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ Є.Д., к.т.н., доцент  
КЛЮЄВ О.В., к.т.н., доцент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

### **ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФІЛЬТРІВ ВИЩИХ ГАРМОНІК У МЕРЕЖІ 10 КВ МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМБІНАТУ**

**Вступ.** Аналізуючи ситуації з виникненням однофазних замикань на землю в мережах промислових підприємств, доводиться стикатися з тим фактом, що кількість uszkodжень кабельних мереж (пробоїв ізоляції, виникнення пожеж в кабельних тунелях) тісно пов'язана з рівнем вищих гармонік (ВГ) в цих мережах. Негативний вплив ВГ проявляється в тому, що височастотні електричні поля викликають іонізаційні процеси в ізоляції кабеля, внаслідок чого знижується її електрична міцність і виникає пробій – однофазне замикання на землю. Вказаний вплив ВГ залежить від спектра генеруючих тиристорних перетворювачів частоти і рівня гармонік. Найбільш раціональним способом зниження рівня гармонік є установка силових резонансних фільтрів.

Існуюча практика застосування резонансних фільтрів ґрунтується на використанні комплекту фільтрів, налагоджених в резонанс по можливості точно на частоті гармонік, що переважають в амплітудному спектрі струмів нелінійних навантажень. Такий підхід застосовний у разі фільтрів малої і середньої потужності, коли відношення потужності батареї фільтра до потужності короткого замикання (КЗ.) в точці підключення менше  $0,5 \cdot 10^{-2}$ . Більш високе значення цього параметра дозволяє уникнути посилення окремих гармонік напруги, перевантаження фільтрів за струмом і інших несприятливих явищ. Окрім цього застосування потужних фільтрів дозволяє понизити вимоги до точності налаштування, визначити прийнятні межі зниження коефіцієнта несинусоїдальності напруги. Відомо, що фільтри ВГ покращують баланс реактивної потужності у вузлі навантаження, а отже, впливають на режим напруги в мережі. Усі ці процеси взаємно пов'язані, до того ж залежать від характеру навантаження, яке змінюється за кількістю і якістю в широких межах.

**Постановка задачі.** На підставі параметрів активних і реактивних елементів фільтрів визначити коефіцієнти завантаження силових фільтрів за струмом і коефіцієнти ефективності роботи фільтрів, а також обґрунтувати доцільність застосування фільтра третьої гармоніки.

**Результати роботи.** Розраховано коефіцієнти завантаження за струмом і коефіцієнти ефективності фільтрів 3-5-7-11 гармонік, запропоновано заходи із зміни структури фільтро-компенсуючого пристрою.

**Загальна характеристика вузла електропостачання.** Вузол сортопрокатних цехів металургійного комбінату живиться від підстанції глибокого вводу КРЗ-5, де встановлено понижуючі трансформатори потужністю  $2 \times 32$  МВАр напругою 150/10 кВ.

Вузол електропостачання має 3 цехових підстанції, які живлять групу сортопркатних цехів, де встановлено перетворювальні агрегати, з'єднанні за 6-ти фазною схемою випрямлення, загальною потужністю майже 47 тисяч кВт. Спеціальні пристрої з компенсації реактивної потужності відсутні, тому коефіцієнт потужності вузла становить 0,63-0,72.

Рівень вищих гармонік в період максимального навантаження перевищує граничнодопустиму величину у 9%. Середньодобова реактивна потужність дорівнює близько 24 МВАр, при максимальному навантаженні сягає до 30 МВАр. Згідно з діючими рекомендаціями [1], у разі наявності вищих гармонік, установка батарей конденсаторів без захисних реакторів не рекомендується (на період дослідження компенсуюча установка такого типу вийшла з ладу із-за перевантаження конденсаторів вищими гармоніками). Таким чином, проблему підвищення коефіцієнта потужності та подавлення вищих гармонік можна вирішити тільки із застосуванням силових резонансних фільтрів.

**Вибір типу і потужності фільтро-компенсуючих пристроїв.** За результатами проектної розробки було запропоновано на підстанції КРЗ-5 встановити індуктивно-ємнісні фільтри, налаштовані у резонанс на 3-5-7-11 гармоніки. При виборі параметрів фільтрів, а саме ємності, проектувальники керувалися необхідністю максимальної компенсації реактивної потужності навантаження з метою підвищення коефіцієнта потужності вузла електроживлення, тому загальна встановлена потужність фільтро-компенсуючих пристроїв (ФКУ) становить  $Q_{\phi} = 16,2$  МВАр (табл. 1).

1. **Параметри силових фільтрів.** В якості прикладу розглянемо визначення параметрів фільтрів для даної підстанції металургійного комбінату.

Основні параметри фільтрів наведено в табл.1. Відповідно до технічних умов експлуатації батарей конденсаторів (БК) тривало допустимі перевищення напруги і струму понад номінальних значень складають  $C_U = 1,1$  і  $C_I = 1,3$ . Проте для конденсаторів, працюючих в схемах силових фільтрів, доцільно мати  $C_U = 1$ .

Таблиця 1 – Основні параметри фільтрів

Номинальна напруга фільтрів, кВ	Номер фільтрівної гармоніки	Встановлена потужність, МВАр	Номинальний струм, А*	Вимірювана ємність фази, мкФ	Індуктивність реактора фази фільтра на номінальній відпайці, мГн	Величина вимірювання індуктивності на номінальній відпайці, мГн	Генеруюча потужність фільтра, МВАр
10,5	3	2,7	140	$53,8^{+5,4}_{-2,7}$	$20,94 \pm 1,05$	0,510	2,09
	5	4,5	280	$109,6^{+11,0}_{-5,5}$	$3,2 \pm 0,19$	0,08	3,95
	7	2,7	165	$65,8^{+6,6}_{-3,3}$	$3,14 \pm 0,16$	0,08	2,32
	11	6,3	380	$153,8^{+15,4}_{-7,7}$	$0,55 \pm 0,033$	0,033	5,36

Примітка: \* – найбільший струм фільтра з урахуванням гармонійних складових

У даному разі ця умова виконується, тому зробимо тільки перевірку конденсаторної батареї на перевантаження за струмом.

Умова неприпустимих навантажень БК за струмом запишеться у вигляді

$$\sqrt{I_{1Б}^2 + I_{vБ}^2} \leq C_i \cdot I_{н.Б.} \quad \text{або} \quad \frac{I_{vБ}}{I_{н.Б.}} \leq \sqrt{C_i^2 - \alpha_v^2 \cdot K_v^2}.$$

Виконавши деякі перетворення і ввівши  $C_1^2 \sqcup 1,6$ , остаточно отримаємо умову вибору БК за струмом

$$Q_B \geq \frac{3U_{н.Б.} \cdot I_{vБ}}{\sqrt{1,6 - \alpha_v^2 \cdot K_v^2}}. \quad (1)$$

Умову (1) можна трактувати як мінімальну потужність батареї, яка виключає перевантаження за струмом.

Використовуючи отримані значення струмів гармонік, визначимо мінімальну потужність батареї для кожного з фільтрів:

3-я гармоніка:  $Q_{\min} = 942 \text{ кВАр} < Q_{\text{уст}} = 2700 \text{ кВАр};$

5-а гармоніка:  $Q_{\min} = 2050 \text{ кВАр} < Q_{\text{уст}} = 4500 \text{ кВАр};$

7-а гармоніка:  $Q_{\min} = 650 \text{ кВАр} < Q_{\text{уст}} = 2700 \text{ кВАр};$

11-а гармоніка:  $Q_{\min} = 865 \text{ кВАр} < Q_{\text{уст}} = 6300 \text{ кВАр}.$

Розрахунки показують, що перевантаження батарей фільтрів за струмом не буде; проте слід враховувати вплив на величину струму у батареї відхилення параметрів фільтра від значень, що відповідають резонансному налаштуванню.

*Коефіцієнти розладу фільтрів.* На підставі технічно-обґрунтованих відхилень [2] за індуктивністю  $\alpha_L$ , ємністю  $\alpha_C$  і частотою  $\alpha_\omega$  розрахуємо для кожної гармоніки відносне відхилення реактивного опору фільтра від величини ідеального резонансного налаштування

$$\alpha = \frac{\Delta X_{\phi v}}{v \cdot \omega \alpha_{\text{ном}}} = \frac{(1 + \alpha_L)(1 + \alpha_\omega)^2(1 + \alpha_t \cdot \Delta t) - 1}{(1 + \alpha_C)(1 + \alpha_\omega)(1 + \alpha_t \cdot \Delta t)}. \quad (2)$$

Виконаємо вказані розрахунки для кожної з гармонік, використовуючи табл.1:  
3-я гармоніка

$$L_{\text{ном}} = 20,94 \text{ мГн}; \quad \alpha_L = \frac{0,51}{20,94} = 0,024; \quad \alpha_t = 6 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^0\text{С}; \quad \text{причому } \Delta t = 20^0;$$

$$C_{\text{ном}} = 53,8 \text{ мкФ}; \quad \alpha_C = \frac{-2,7}{53,8} = -0,05; \quad \alpha_\omega = \frac{0,5}{50} \text{ - для всіх гармонік.}$$

Коефіцієнт розладу  $\alpha_3 = 0,0587$ .

5-а гармоніка

$$L_{\text{ном}} = 3,7 \text{ мГн}; \quad \alpha_L = \frac{0,08}{3,7} = 0,0216; \quad \alpha_t = 6 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^0\text{С};$$

$$C_{\text{ном}} = 109,6 \text{ мкФ}; \quad \alpha_C = \frac{-5,5}{109,6} = -0,05; \quad \alpha_\omega = 0,01.$$

Коефіцієнт розладу  $\alpha_5 = 0,0562$ .

$$L_{\text{ном}} = 3,14 \text{ мГн}; \quad \alpha_L = \frac{0,08}{3,14} = 0,0255; \quad \alpha_t = 6 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^0\text{С};$$

7-а гармоніка

$$C_{\text{ном}} = 65,8 \text{ мкФ}; \quad \alpha_C = \frac{-3,3}{65,8} = -0,05; \quad \alpha_\omega = 0,01.$$

Коефіцієнт розладу  $\alpha_7 = 0,0604$ .

11-а гармоніка

$$L_{\text{НОМ}} = 0,55 \text{ мГн}; \quad \alpha_L = \frac{0,015}{0,55} = 0,0273; \quad \alpha_t = 6 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^0\text{C};$$

$$C_{\text{НОМ}} = 153,5 \text{ мкФ}; \quad \alpha_C = \frac{-7,7}{153,5} = -0,05; \quad \alpha_\omega = 0,01.$$

Коефіцієнт розладу  $\alpha_{11} = 0,0624$ .

Коефіцієнти розладу будуть використані при визначенні коефіцієнтів завантаження фільтрів за струмом.

2. *Активні опори фільтрів.* Активний опір навіть при незначній абсолютній величині робить помітний вплив на ефективність роботи фільтра. Активний опір обумовлено опором реактора, виводів конденсаторів, сполучних шин і кабелів.

Розрахунково-аналітичний метод передбачає: розрахунок активного опору конденсаторів на основі кривих питомих активних втрат потужності у батареї конденсаторів

$$R_C = \frac{\Delta P_\Phi}{I_\Phi^2} = \frac{P_{\text{уд}} \cdot Q_\Phi}{I_\Phi^2} = \frac{P_{\text{уд}} \cdot I_\Phi^2 \cdot X_C}{I_\Phi^2} = P_{\text{уд}} \cdot X_C. \quad (3)$$

Значення  $p_{\text{уд}}$  дане в технічній документації заводу-постачальника і дорівнює 1 кВт/МВАр. Омичний опір реактора вимірювався мостом постійного струму типу МО-62; додатковий опір від впливу поверхневого ефекту на частоті 1-ої гармоніки враховувався у розмірі 10%.

Опір ошиновки і кабелю розраховувався з урахуванням фактичних довжин і перерізів для кожної гармоніки.

Загальний активний опір фільтра для кожної гармоніки отримано підсумовуванням величин

$$R_{\Phi\Sigma} = R_C + R_{L1} + R_{\text{ош+каб}}, \text{ Ом} \quad (4)$$

Розрахунок активного опору силових фільтрів для 1-ї гармоніки:

$R_{\Phi\Sigma}, \text{ Ом}$	0,2972	0,0768	0,1106	0,0335
$R_{\text{експер.}}, \text{ Ом}$	0,3068	0,087	0,110	0,045

Порівнявши значення  $R_{\Phi\Sigma}$  і  $R_{\text{експер.}}$  бачимо, що значних відмінностей у вимірах немає, тому в подальших розрахунках використовуватимемо дані розрахунково-аналітичного методу, як достовірніші.

*Добротність кола фільтрів.* Вираз для активного опору фільтра може бути записаний у вигляді

$$R = \sqrt{\nu} \cdot \frac{\omega \alpha_p}{Q_r}, \quad (5)$$

де  $Q_r$  – умовна добротність фільтра, визначувана відношенням реактивного опору реактора і активного опору кола фільтра на частоті першої гармоніки; добротність кола фільтра дорівнює  $Q_{r\nu} = \sqrt{\nu} \cdot Q_r$ .

З урахуванням отриманих величин  $R_{\Phi\Sigma}$  маємо:

$$3\text{-я гармоніка: } Q_r = 22,1; \quad Q_{r3} = 38,3.$$

5-а гармоніка:  $Q_r = 13,0$ ;  $Q_{r5} = 29,0$ .

7-а гармоніка:  $Q_r = 8,9$ ;  $Q_{r7} = 40,8$ .

11-а гармоніка:  $Q_r = 5,15$ ;  $Q_{r11} = 29,5$ .

Добротність кола фільтра в кінцевому результаті визначає ефективність його роботи.

3. Коефіцієнти завантаження і ефективності роботи фільтрів. Ідеальний фільтр повністю споживає струм гармоніки  $I_v$  генерованим нелінійним навантаженням, на яке він налаштований. Фактично споживаний струм може бути більшим або меншим від струму гармоніки  $I_v$ . Введемо позначення відношення вказаних струмів  $I_{fv}/I_v$  і назвемо його коефіцієнтом  $K_{iv}$  завантаження фільтра за струмом. Величина коефіцієнта  $K_{iv}$  залежить від опору живлячої енергосистеми і коефіцієнта  $K_1$ , що відбиває зміну цього опору на різних частотах; потужності батареї конденсаторів фільтра  $Q_B$ , яка входить у вираз для коефіцієнта завантаження через коефіцієнт  $K_p$ , що визначається відношенням потужності батареї фільтра до потужності короткого замикання живильної мережі в точці підключення фільтра, тобто параметра  $K_p = Q_B/S_{к.з.}$ .

Якщо нехтувати активним опором живлячої мережі, зважаючи на його незначну величину, то вираз для  $K_{iv}$  запишеться у вигляді

$$K_{iv} = \frac{\beta}{\sqrt{\frac{1}{v_p \cdot Q_r^2} + \left( \alpha \pm \frac{\beta^2}{K_1 \cdot K_p \cdot v_p^2} \right)}}, \quad (6)$$

де  $\alpha$  і  $\beta$  – коефіцієнти відхилення параметрів фільтра від проектних значень,  $Q_r$  – добротність кола фільтра  $v$ -ої гармоніки,  $v_p$  – резонансна частота, на яку налаштований фільтр.

Визначимо значення параметра  $\beta_i$  коефіцієнта  $K_p$  для кожного фільтра, прийнявши величину потужності короткого замикання в точці підключення фільтрів, тобто на шини 10 кВ підстанції КРЗ-5, рівною 430 мВА:

3-я гармоніка:  $\alpha_3=0,0507$ ;  $Q_r=38,2$ ;  $\beta=0,0508$ ;  $K_p = 0,63 \cdot 10^{-2}$ .

5-а гармоніка:  $\alpha_5=0,0486$ ;  $Q_r=29,0$ ;  $\beta=0,0510$ ;  $K_p 1,04 \cdot 10^{-2}$ .

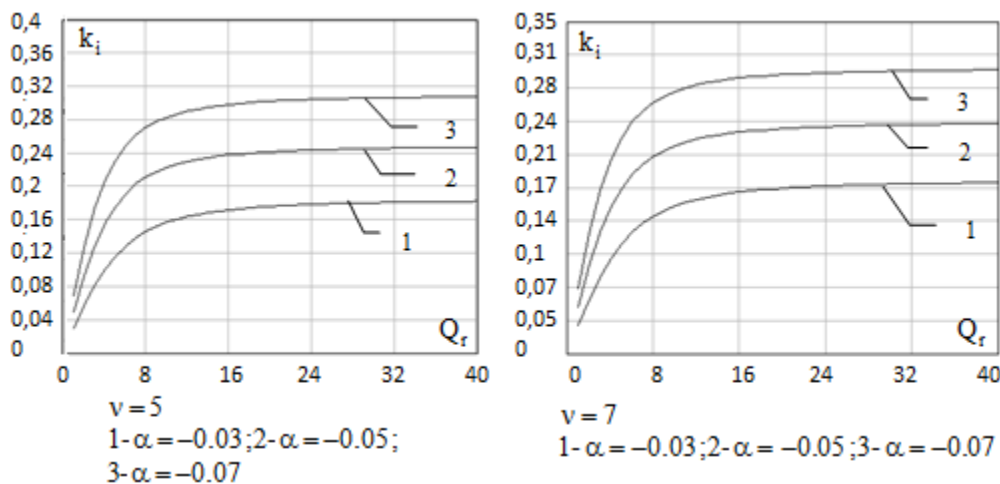


Рисунок 1 – Коефіцієнти завантаження фільтрів за струмом при ( $\alpha < 0$ )

7-а гармоніка:  $\alpha_7=0,052$ ;  $Q_r=23,6$ ;  $\beta=0,0543$ ;  $K_p = 0,63 \cdot 10^{-2}$ .

11-а гармоніка:  $\alpha_{11}=0,0538$ ;  $Q_r=17,1$ ;  $\beta=0,0566$ ;  $K_p = 1,46 \cdot 10^{-2}$ .

Залежності  $K_{iv}(Q_r)$  для випадку  $\alpha < 0$  наведено на рис.1, а нижче – їх короткий аналіз.

Коефіцієнт ефективності роботи фільтра  $K_{ev}$  характеризує відносне зменшення гармоніки напруги в мережі і визначається відношенням провідності мережі до еквівалентної провідності мережі і фільтра. Вираз для  $K_{ev}$  має вигляд:

$$K_{ev} = \frac{\beta_r \cdot K_{iv}}{K_1 \cdot K_p \cdot v_p^2}, \quad (7)$$

недолік якого полягає в тому, що параметр добротності  $Q_r$  не входить сюди в явному вигляді. Аналіз показує, що ефективність роботи фільтра тим вища, чим менша величина  $K_{ev}$ , тобто чим менша залишкова напруга гармоніки в мережі, де встановлено силовий фільтр цієї гармоніки. За виразом (7) розраховано і побудовано графіки коефіцієнтів ефективності  $K_{ev}(Q_r)$  (рис.2).

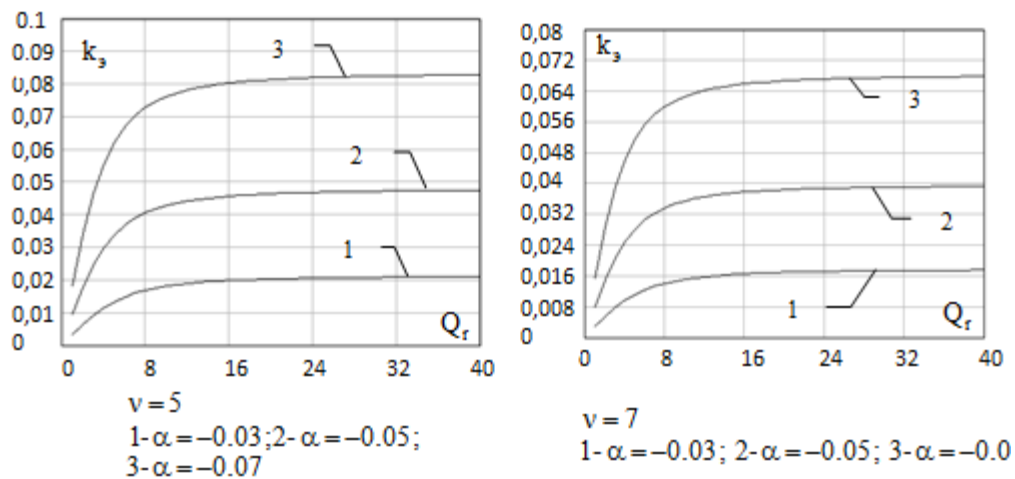


Рисунок 2 – Коефіцієнти ефективності фільтрів при ( $\alpha < 0$ )

Аналіз залежностей  $K_{iv}(Q_r)$  і  $K_{ev}(Q_r)$  дозволив зробити ряд важливих висновків:

1. На величину завантаження фільтра  $K_{iv}$  істотний вплив здійснює потужність батареї конденсаторів (через коефіцієнт  $K_p$ ), тому при позитивному значенні  $\alpha$  фільтри 5-ої і 7-ої гармонік необхідно проектувати з великою батареєю конденсаторів ( $K_p > 0,4 \cdot 10^{-2}$ ), що в нашому випадку і виконується.

2. Перевантаження фільтрів 5-ої і 7-ої гармонік за струмом може настати тільки у разі негативного відхилення  $\alpha > 0,1$  параметрів фільтрів від проектних значень (відповідно коефіцієнти  $K_{i5} = 1,227$  і  $K_{i7} = 1,43$ ); для фільтра 11-ої гармоніки перевантаження практично відсутнє.

3. При негативних значеннях відхилення ( $\alpha = 0 \dots 0,1$ ) і потужних конденсаторних батареях ефективність фільтрів 5-ої і 7-ої гармонік в межах  $K_e = 0,1$ ; ефективність фільтра 11-ої гармоніки до  $K_{ev} = 0,01$ , оскільки батарея конденсаторів має значну потужність ( $K_p = 1,46 \cdot 10^{-2}$ ).

4. Вмикання фільтрів у схему електропостачання вузла дозволило підвищити коефіцієнт потужності до 0,95-0,98.

**Аналіз ефективності роботи фільтра 3-ї гармоніки.** У роботах [2, 3] показано, що у разі застосування тиристорних перетворювачів різних типів виникають вищі гармоніки  $\nu = 5-7-11-13$  (табл.2).

Таблиця 2 – Значення вищих гармонік напруги ПС КРЗ-5 при різних комбінаціях вмикання ФКУ,  $I_{\text{наб}} = 1,1-1,4$  кА

Частота $\nu$	$U_{\nu}^{\%}$				
	ФКУ – відімк. $K_{\text{НС}}=(5,1-7,1)\%$ $U_{\text{Ш}}=9,6$ кВ	ФКУ – 5,7 $K_{\text{НС}}=(3,1-4,4)\%$ $U_{\text{Ш}}=9,8$ кВ $I_5=210$ А $I_7=120$ А	ФКУ – 5,11 $K_{\text{НС}}=(2,1-3,8)\%$ $U_{\text{Ш}}=9,8$ кВ $I_5=210$ А $I_{11}=280-290$ А	ФКУ – 5,7,11 $K_{\text{НС}}=(1,8-2,3)\%$ $U_{\text{Ш}}=10,0$ кВ $I_5=210$ А $I_7=120$ А $I_{11}=280$ А	ФКУ – 3,7,11 $K_{\text{НС}}=(7,3-9,1)\%$ $U_{\text{Ш}}=10,25$ кВ $I_3=115$ А $I_7=200$ А $I_{11}=290$ А
3	0,3-0,4	0,4	0,5-0,7	0,6-0,9	0,1
4	0,0-0,1	0,3-0,5	0,1-0,4	1,3-1,6	0,2
5	0,3-1,5	0,4-0,5	0,3-0,7	0,4-0,6	3,1-8,1
7	0,2-0,8	0,1-0,2	1,5-3,4	0,1-0,2	0,1-0,2
11	1,4-1,9	0,8-1,1	0,1	0,1	ФКУ –
13	1,1-1,4	0,5-0,9	0,1	0,1	відімкнуті
17	0,8-1,3	0,5-0,9	0,3	0,1-0,3	через
19	0,5-1,1	0,5-0,7	0,3	0,0	перевантаження
23	1,2-1,6	0,5-0,6	0,2	0,1-0,2	ФКУ-7
25	1,2-1,5	0,4-0,6	0,2	0,1-0,2	струмом
26	0,0-0,5	0,3-0,4	0,1	0,1	5-ї гармоніки
27	0,1-0,5	0,3-0,4	0,1-0,2	0,1	
29	0,1-0,5	0,3-0,4	0,2	0,1	
30	0,0-0,6	0,3	0,1	0,1	
31	0,7-1,2	0,5-0,7	0,2	0,1-0,2	
32	0,1-0,6	0,2-0,6	0,1-0,2	0,1	
33	0,7-0,8	0,3-0,5	0,1	0,1	
34	0,2-0,6	0,2	0,1	0,1	
35	1,2-1,7	0,5-0,7	0,1-0,2	0,1-0,2	
36	0,2-0,9	0,3-0,4	0,1	0,1	
37	0,9-1,6	0,4-0,8	0,2	0,1	
38	1,6-1,9	0,5-0,7	0,1-0,2	0,1	
39	0,0-1,4	0,1-0,2	0,1	0,1	
40	0,1-0,8	0,3	0,0	0,1	

Однак, у нашому випадку проектувальники замість фільтра Ф-13 запропонували фільтр Ф-3, тобто для обмеження 3-ї гармоніки. Виміри вищих гармонік в різних режимах навантаження при різних схемах живлення споживачів показали, що рівень 3-ї гармоніки у середньому складає 0,25%, при деяких комбінаціях вмикання фільтрів збільшується до величини 0,6-0,9%. З табл.2 видно, що при комбінації фільтрів 3-7-11 пристрій ФКУ автоматично вимикається з-за перевантаження фільтра Ф-7, коли

струм зростав до 200 А, коефіцієнт несинусоїдальності значно перевищував допустиме значення ( $K_{нс} \geq 11,1\%$ ).

Таким чином, доцільно було б внести у проект наступне коректування:

1) не встановлювати фільтр Ф-3, що значно зменшило б розміри фільтрокомпенсуючого пристрою, прийнявши до уваги його малу ефективність;

2) замість фільтра Ф-11 застосувати конденсаторну батарею без захисного реактора (не змінюючи її потужність), такий варіант можливий у разі наявності фільтрів Ф-5 та Ф-7, потужна конденсаторна батарея значно зменшить рівень гармонік  $v \geq 23$ .

**Висновки.** Вказані недоліки проектування можна пояснити недостатнім обсягом попередніх експериментальних досліджень, проведених на підприємстві. Наші дослідження роботи технологічної установки [5] показали ефективну роботу фільтрокомпенсуючого пристрою у разі наявності тільки фільтрів 5-ї та 7-ї гармонік, навіть без окремої конденсаторної батареї.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / Жежеленко И.В. – 4-е изд., перераб. и дополн. – К.: Техніка, 2000. – 231с.
2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / Жежеленко И.В. – К.: Техніка, 1974. – 184с.
3. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Железко Ю.С. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 135с.
4. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С.Иванов, В.И.Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336с.
5. Хмельницький Є.Д. Експлуатаційне дослідження роботи статичного тиристорного компенсатора реактивної потужності в мережі живлення агрегату «під-ковш» / Хмельницький Є.Д. // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2015. – Випуск 1(26). – 373с. – С.130-137.

УДК 621.313.322

Надійшла до редколегії 11.04.2017.

ХОМЕНКО В.І., аспірант

НІЗІМОВ В.Б., д.т.н., професор

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

### ЕНЕРГООБМІННІ ПРОЦЕСИ МІЖ КОНТУРАМИ АВТОНОМНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

**Вступ.** На даний час у світовій енергетиці спостерігається зростання автономних генеруючих установок (АГУ) на базі синхронних генераторів (СГ), які є незмінним джерелом електричної енергії у малонаселених місцевостях, де прокладання ліній електропостачання є недоцільним, а також у місцевостях, доступ до яких ускладнений (гірські місцевості, острова і т.д.) [1].

Суттєвим недоліком СГ є інерційність обмотки збудження (ОЗ).

Для підвищення стійкості автономних СГ та стабілізації вихідної напруги на за тискачах статора застосовують релейне або параметричне форсування напруги збудження та системи автоматичного регулювання збудження (АРЗ).