

**ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ СИЛОВИХ ФІЛЬТРІВ У СИСТЕМІ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИВОДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

© Варецький Ю.О., Павлишин Р.І., 2012

Наведено результати дослідження режимів роботи силових фільтрів гармонік у діючій системі електропостачання гірничого підприємства, яка містить потужні приводи постійного струму для витягу шахтних скіпів. Показано, що під час проектування силових фільтрів гармонік, котрі призначені для компенсації реактивної потужності та зниження несинусоїдності в системі електропостачання, необхідно здійснювати ретельний аналіз можливих режимів і конфігурацій системи електропостачання з врахуванням технологічних відхилень параметрів фільтрів.

Ключові слова: електроприводи постійного струму, силові фільтри гармонік, компенсація реактивної потужності, технологічні відхилення параметрів фільтрів.

The paper presents the study results on power filters operation within real mining power supply system. The system includes powerful DC drives for skip hoisting. It is shown that during procedure of designing power harmonic filters used for reactive power compensation and harmonic mitigation in a power supply system the careful analysis of possible system operating conditions and configurations considering technological filter parameter deviations should be carried out.

Key words: DC drives, power harmonic filters, reactive power compensation, technological filter parameters deviations

Постановка проблеми

Приводи постійного струму можуть становити істотну частину навантаження в багатьох виробництвах. Їх зазвичай використовують у нафтопереробній, хімічній, металургійній та гірничій промисловості. Ці приводи – все ще найпоширеніший спосіб регулювання швидкості механізмів, що потребують точного регулювання з широким діапазоном змін швидкості та високими обертовими моментами. Компенсація реактивної потужності в системах електропостачання таких приводів є особливо важливою внаслідок їх низького коефіцієнта потужності, особливо коли двигун працює зі зменшеними швидкостями. Іншою проблемою є значний рівень гармонік струму, які генерує привод [1]. Гармоніки істотно ускладнюють проблему компенсації реактивної потужності. Силові конденсатори у цьому разі можуть спричиняти небажані резонанси. Фільтри вищих гармонік є альтернативним підходом, що дозволяє зменшити гармонічні спотворення напруги, зумовлені нелінійним навантаженням. Проте потрібно розглянути можливі конфігурації системи перед прийняттям остаточного рішення. Вибір номінальних значень струмів та напруг компонентів фільтра повинен враховувати найнесприятливіші умови взаємовпливу фільтра і системи.

Аналіз останніх досліджень

Проблемі компенсації реактивної потужності в системі електропостачання з нелінійним навантаженням присвячено багато досліджень [1–6], проте автори не виявили в періодичній літературі досліджень, пов'язаних з впливом технологічних відхилень параметрів фільтрів та можливих конфігурацій системи електропостачання на ефективність і надійність роботи силових фільтрів гармонік.

Завдання дослідження

Завданням роботи є дослідження режимів роботи фільтрів вищих гармонік у діючій системі електропостачання та виявлення причин їх перевантаження з врахуванням можливих режимів і конфігурацій системи електропостачання та технологічних відхилень параметрів фільтрів.

Виклад основного матеріалу

На рис. 1 показано принципову схему досліджуваної системи електропостачання гірничого підприємства [7], яка містить потужні приводи постійного струму для витягу шахтних скіпів. Електроприводи отримують живлення від шестипульсних випростувачів, які генерують гармоніки струму значної величини. У результаті в напрузі системи електропостачання спостерігається істотне гармонічне спотворення і коефіцієнт потужності навантаження без компенсації є низьким.

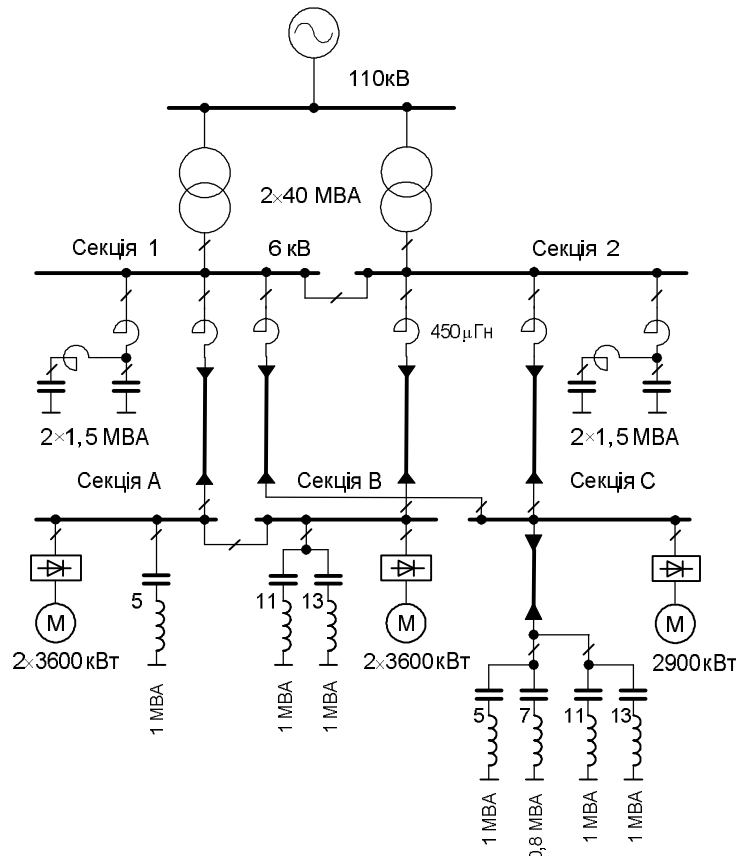


Рис. 1. Принципова схема системи електропостачання

Для часткової компенсації реактивної потужності в системі електропостачання до головних секцій шин системи 1 і 2 приєднано конденсаторні батареї з встановленою потужністю $2 \times 1,5$ МВА але, як показав досвід експлуатації, це може спричинити істотне підсилення гармонік у певних режимах. Секції шин А, В і С можуть отримувати живлення від головних секцій шин 1 чи 2. Для збільшення міри компенсації реактивної потужності та обмеження впливу гармонік струму випростувачів на систему електропостачання до секцій шин А, В і С під'єднано пасивні силові фільтри вищих гармонік як це показано на рис. 1.

Специфікацію фільтрів наведено в табл. 1. У колі фільтрів встановлено трифазні фільтрові реактори з феромагнітними осерддями, виконаними з холодно-вальцьованої електротехнічної сталі. Осердя мають декілька повітряних проміжків. Така конструкція реакторів дозволяє забезпечити незначні втрати активної потужності, незначні відхилення індуктивності від проектних значень і лінійність вольт-амперної характеристики реактора в межах проектних значень струмів та напруг. Перевагою таких реакторів порівняно з реакторами без магнітних осердь є істотно менші габаритні

розміри і потоки розсіювання, що є особливо важливим в умовах обмежених закритих приміщень. Проте значна частотна залежність втрат, спричинених вихровими струмами в осердях та обмотках, вимагає ретельного аналізу умов застосування цих фільтрів. Незважаючи на те, що технологія виготовлення фільтрів постійно удосконалюється, все ж має місце відхилення параметрів конденсаторів та реакторів від номінальних значень. Наслідком цього є розлаштування фільтрів. Наприклад, ємність конденсаторів може змінюватись у межах $\pm 2\%$ від номінальної залежно від сезонних змін (зима – літо) [5]. Крім того, як це видно з табл. 1, пов'язані з технологією виробництва відхилення параметрів конденсаторів від номінальних оцінюються значеннями $-5\% \dots +10\%$. Подібно, технологічні відхилення індуктивності застосовуваних реакторів сягають $\pm 5\%$

Таблиця 1

Специфікація параметрів фільтра

Фільтр та частота налаштування	Конденсаторна батарея			Реактор		
	Параметр	Значення	Одиниця	Параметр	Значення	Одиниця
F5 $n_5 = 4,81$	Номінальна потужність	2×500	квар	Номінальна напруга	7,2	кВ
	Номінальна напруга	6,6	кВ	Номінальний струм	120,0	А
	Номінальний струм	87,4	А	Номінальний струм к.з.	14,0	кА
	Ємність	73,1	μФ	Індуктивність	6,0	мГн
	Відхилення ємності	-5...+10	%	Відхилення індуктивності	± 5	%
F7 $n_7 = 6,98$	Номінальна потужність	2×400	квар	Номінальна напруга	7,2	кВ
	Номінальна напруга	6,6	кВ	Номінальний струм	100,0	А
	Номінальний струм	70,0	А	Номінальний струм к.з.	14,0	кА
	Ємність	58,4	μФ	Індуктивність	3,54	мГн
	Відхилення ємності	-5...+10	%	Відхилення індуктивності	± 5	%
F11 $n_{11} = 10,94$	Номінальна потужність	2×500	квар	Номінальна напруга	7,2	кВ
	Номінальна напруга	6,6	кВ	Номінальний струм	130,0	А
	Номінальний струм	87,4	А	Номінальний струм к.з.	14,0	кА
	Ємність	73,1	μФ	Індуктивність	1,16	мГн
	Відхилення ємності	-5...+10	%	Відхилення індуктивності	± 5	%
F13 $n_{13} = 13,02$	Номінальна потужність	2×500	квар	Номінальна напруга	7,2	кВ
	Номінальна напруга	6,6	кВ	Номінальний струм	130,0	А
	Номінальний струм	87,4	А	Номінальний струм к.з.	14,0	кА
	Ємність	73,1	μФ	Індуктивність	0,82	мГн
	Відхилення ємності	-5...+10	%	Відхилення індуктивності	± 5	%

Якщо розглянути фільтр, налаштований на певну гармоніку, то відносну резонансну частоту можна обчислити за формулою

$$n_r = \frac{1}{2\pi f \sqrt{LC}}, \quad (1)$$

де f – промислова частота; L, C – індуктивність та ємність фільтра.

З (1) видно, що відносна резонансна частота (порядок) налаштування фільтра є функцією від частоти мережі f , індуктивності L та ємності C фільтра і будь-які відхилення цих параметрів можуть змістити цю частоту [5].

Так, можливі відхилення відносної резонансної частоти від проектного значення можна розрахувати за формулою (1) з такою нерівністю:

$$\frac{n_d}{(1 + \Delta f_*) \sqrt{(1 + \Delta L_*)(1 + \Delta C_*)}} \leq n_r \leq \frac{n_d}{(1 - \Delta f_*) \sqrt{(1 - \Delta L_*)(1 - \Delta C_*)}}, \quad (2)$$

де Δf_* – відхилення частоти системи, в.о.; $\Delta L_*, \Delta C_*$ – відхилення індуктивності та ємності, в.о.; n_d – проектне значення відносної резонансної частоти фільтра.

Приймаючи $\Delta f_* \approx 0$, можливі відхилення відносної резонансної частоти n_r від проектного значення для досліджуваних фільтрових кіл можуть бути визначені, використовуючи значення $\Delta L_*, \Delta C_*$ з табл. 1:

$$0,93n_d \leq n_r \leq 1,05n_d. \quad (3)$$

Для досліджуваної системи електропостачання отримаємо такі можливі відхилення резонансної частоти фільтрів:

- фільтр 5-ї гармоніки – $4,3 \leq n_r \leq 5,1$;
- фільтр 7-ї гармоніки – $6,5 \leq n_r \leq 7,4$;
- фільтр 11-ї гармоніки – $10,2 \leq n_r \leq 11,5$;
- фільтр 13-ї гармоніки – $12,1 \leq n_r \leq 13,7$.

Очевидним є те, що розлаштування фільтрів вищих порядків є істотнішим для заданих значень технологічних відхилень ємностей та індуктивностей фільтра, ніж фільтрів нижчих порядків. Тому розподіл гармонік струму в системі електропостачання відрізнятиметься від очікуваного на проектній стадії. У досліджуваній системі електропостачання можуть працювати різні комбінації фільтрів та конденсаторних батарей залежно від робочої схеми системи електропостачання. Як показали експериментальні дослідження в деяких режимах спостерігається перевантаження окремих фільтрів [7]. Тому необхідно здійснити ретельний аналіз умов роботи фільтрів у можливих експлуатаційних режимах системи.

Дослідження режимів роботи системи електропостачання

Під час досліджень використовувався програмний комплекс для розрахунку режимів електричних мереж у часовій області [8], який дав можливість проаналізувати вплив змін параметрів фільтрів та схеми електропостачання на характер навантаження фільтрів. З іншого боку, для відображення загальних тенденцій зміни показників несинусоїдного режиму в різних конфігураціях системи електропостачання використано частотний метод аналізу. Наведемо деякі характерні результати дослідження.

Ізольована робота секції В. У цьому режимі можна спостерігати істотні перевантаження фільтрових реакторів за умови різних параметрів та конфігурацій системи електропостачання. У табл. 2 наведено результати моделювання цих режимів. Тут показано значення струмів (амплітудне та діюче значення) фільтрів 11 і 13 гармонік за умови граничного додатного відхилення резонансної частоти, коли у системі електропостачання увімкнено різні комбінації конденсаторних батарей.

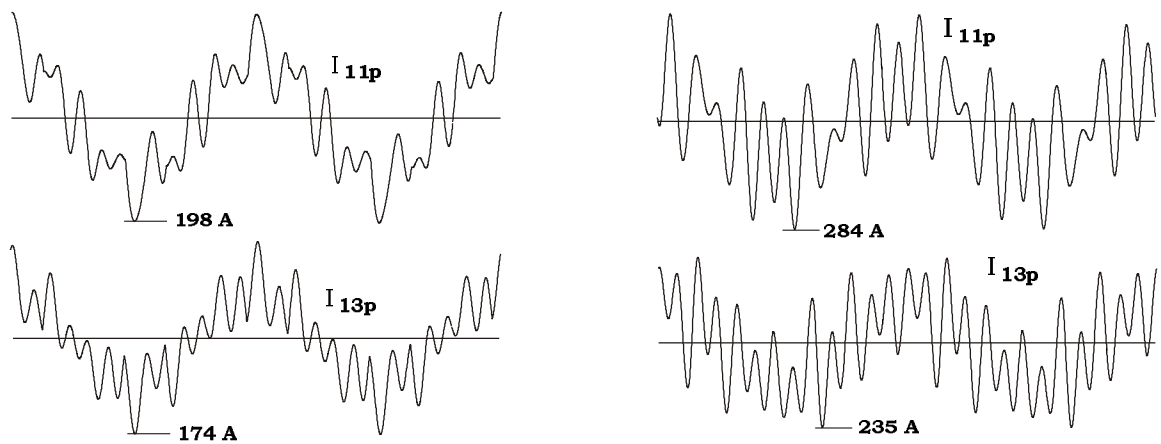
Таблиця 2

Струми фільтрів та коефіцієнти несинусоїдності на секції шин В

Фільтр		Конфігурація системи компенсації		
Відносна частота налаштування	Струм	Без КБ; фільтри F11, F13	КБ 1,5 МВА; фільтри F11, F13	КБ 2×1,5 МВА; фільтри F11, F13
F11р $n_r=11,5$	$I_{діюче}, A$	85	128	89
	I_{max}, A	198	284	163
F13р $n_r=13,7$	$I_{діюче}, A$	84	118	95
	I_{max}, A	174	235	224
$K_U, \%$		4,1	6,8	7,3

Відсутність фільтрів 5 та 7 гармонік у такому режимі роботи системи електропостачання призводить до істотного погіршення коефіцієнта несинусоїдності напруги. Підімкнення конденсаторних батарей погіршує спотворення напруги на шинах і призводить до перевантаження окремих фільтрів. На рис. 2 показані осцилограми струмів фільтрів, отримані на моделі, які

показують вплив під'єднання конденсаторної батареї на завантаження фільтрів 11 та 13 гармонік. Індекс “p” у табл. 2 та на рис. 3 означає умову максимального “переналаштування” фільтра за заданих технологічних відхилень його ємності та індуктивності. У табл. 2 у заштрихованих комірках видно, що струми конденсаторів фільтрів перевищують номінальні.



Без конденсаторних батарей

З конденсаторною батареєю 1,5 МВА

Рис. 2. Струми фільтрів 11 та 13 гармонік секції шин В

Паралельна робота секцій В і С. У цьому режимі паралельно вмикаються два фільтри 11 та два фільтри 13 гармонік. Розподіл струмів між однойменними фільтрами залежатиме від міри розлаштування фільтрів. Найнесприятливіші умови виникають, коли між однойменними фільтрами спостерігається максимальне розлаштування. У табл.3 наведено значення струмів фільтрів 11 і 13 гармонік у розглянутому режимі роботи системи електропостачання. У цьому випадку видно позитивний вплив підімкнення конденсаторних батарей на значення коефіцієнта несинусоїдності напруги на секціях шин. Проте спостерігаються істотні перевантаження фільтрів 11 і 13 гармонік та конденсаторних батарей в окремих режимах.

Таблиця 3

Струми фільтрів та коефіцієнти несинусоїдності на секціях В і С

Фільтр		Конфігурація системи компенсації		
Відносна частота налаштування	Струм	Без КБ; фільтри F5, F7 + 2×(F11, F13)	КБ 1,5 МВА; фільтри F5, F7 + 2×(F11, F13)	КБ 2×1,5 МВА; фільтри F5, F7 + 2×(F11, F13)
F11m $n_r = 10,2$	$I_{діюче}, A$	104,2	100	82
	I_{max}, A	204	209	143
F11p $n_r = 11,5$	$I_{діюче}, A$	94	96	91
	I_{max}, A	216	192	157
F13m $n_r = 12,1$	$I_{діюче}, A$	108	120	96
	I_{max}, A	250	239	187
F13p $n_r = 13,7$	$I_{діюче}, A$	143	92	102
	I_{max}, A	304	195	204
$K_U, \%$		4,5	3,3	0,8

Для ілюстрації навантаження однойменних фільтрів у цьому режимі на рис. 3 наведено модельні осцилограми струмів цих фільтрів, де індексом “m” позначено фільтр за умови максимального “недолаштування”.

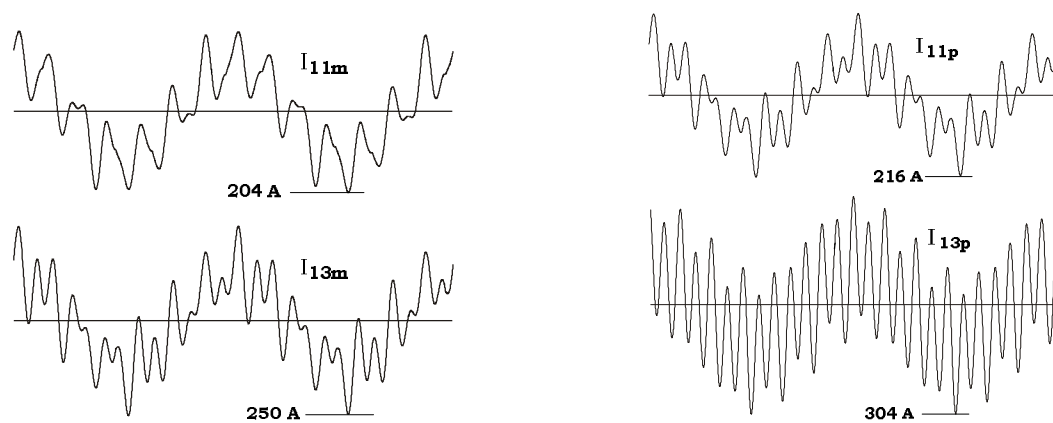


Рис. 3. Струми однойменних фільтрів 11 та 13 гармонік секцій шин В і С

Осцилограми характеризують завантаження однойменних фільтрів в умовах паралельної роботи шин з їх розлаштуванням при максимальних технологічних відхиленнях параметрів конденсаторів та реакторів фільтрів.

Висновки

Досліджено несинусоїдні режими системи електропостачання потужних приводів постійного струму. Проаналізовано вплив конфігурації системи електропостачання та технологічних відхилень параметрів фільтрів на показники несинусоїдності напруги на завантаження фільтрів вищих гармонік. Показано, що технологічні відхилення ємностей та індуктивностей фільтрів можуть бути причиною перевантаження фільтрів та конденсаторних батарей. Тому під час проектування фільтрових кіл повинен здійснюватися ретельний аналіз можливих режимів і конфігурацій систем електропостачання з обов'язковим врахуванням технологічних відхилень параметрів фільтрів.

1. Жежеленко И.В. *Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий.* – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с. 2. *Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 13109-97.* – К.: Госстандарт Украины, 1999. 3. Duffey C. K. and Stratford R. P. *Update of harmonic standard IEEE-519: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems.* – *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 25, pp. 1025–1034, November/December 1989. 4. Lin K.-P., Lin M.-H., and Lin T.-P. *An advanced computer code for single-tuned harmonic filter design.* – *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 34, pp. 640–648, July/August 1998. 5. Варецький Ю.О., Наконечний Т.І. *Особливості вибору силових фільтрів для систем електропостачання змінних нелінійних навантажень // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка".* – 2008. – № 647: *Електроенергетичні та електромеханічні системи.* – С. 15–23. 6. Варецький Ю.О., Наконечний Т.І. *Моделювання гармонічних режимів у системах електропостачання промислових підприємств // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка".* – 2005. – № 544: *Електроенергетичні та електромеханічні системи.* – С. 25–30. 7. Varetsky Y. and Hanzelka Z., "Filter Characteristics in DC Drive Supplying Power System," *Proc. of 13th IEEE Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power.* – Wollongong, Australia, 2008. 8. Ravlyk A. and Gretchyn T. *Digital complex for modelling transient processes in electric circuits, Proc. of III Int. Symp. on Mathematical Methods in Power Engineering,* – Zakopane, 1993. – P. 17–20.