

ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ СИЛОВИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗМІННИХ НЕЛІНІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

© Варецький Ю.О., Наконечний Т.І., 2008

Розглянуто особливості вибору фільтро-компенсувальних пристроїв у системах електропостачання змінних нелінійних навантажень на прикладі системи електропостачання з частотно-регульованими електроприводами. Обґрунтовано необхідність врахування можливих відхилень параметрів фільтрів від номінальних під час проектування та вибору фільтро-компенсувальних пристроїв.

The paper describes the peculiarities of multiply filters and capacitor selecting procedure for industrial power systems supplying nonlinear time-varying loads by example of power system consisting of variable speed drives. Necessity of considering possible variation of filter parameters at the time of design of multiply filters is shown.

Постановка проблеми. Останніми роками вищі гармоніки в електричних мережах привертають до себе все більшу увагу. Це пов'язано з тим, що частка споживачів з нелінійними навантаженнями у живильних мережах постійно зростає. Значною мірою це обумовлено стрімким розвитком напівпровідникової техніки та істотною економічною вигодою від її застосування як у промисловій, так і у комунальній сферах. З іншого боку, практично всі електричні мережі характеризуються постійними змінами навантаження, такі зміни можуть мати як добовий чи сезонний характер, так і випадковий, тобто, залежати від потреб виробництва і змінюватись навіть кілька разів протягом хвилини. Якщо ж у такій системі електропостачання застосовують конденсатори для покращання коефіцієнта потужності, то без належного розгляду несинусоїдних режимів проблема гармонік може бути згубною навіть для силового обладнання: конденсаторів, трансформаторів чи двигунів.

Аналіз останніх досліджень. Норми якості електроенергії в системах електропостачання загального призначення [1] контролюють два показники стосовно гармонік – це K_U коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої міжфазної (фазної) напруги та K_{Un} – коефіцієнт n -ї гармонічної складової напруги. Чинні норми встановлюють нормально і граничнодопустимі значення цих показників для різних класів напруг. Ці величини повинні бути зазначені в умовах з користування електричною енергією між енергопостачальною компанією і споживачем, де вказується також відповідальність сторін за їх порушення. Оцінку відповідності показників якості електроенергії вказаним нормам виконують протягом розрахункового періоду часу – 24 год. Найбільше значення коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги та коефіцієнта n -ї гармонічної складової напруги, що визначається протягом вищевказаного періоду часу, не повинно перевищувати встановленого граничнодопустимого значення, а визначене з 95 % імовірністю за цей самий період – нормально допустимого значення.

Незважаючи на те, що технологія виготовлення фільтрів постійно удосконалюється все ж існує відхилення параметрів конденсаторів та реакторів від номінальних значень [2]. Наслідком цього є розлаштування фільтрів. Наприклад, ємність конденсаторів може змінюватись у межах ± 2 % від номінальної залежно від сезонних змін (зима – літо). Крім того, пов'язані з технологією виробництва відхилення параметрів оцінюються значеннями $-5...+10$ %. Отже, ймовірні результуючі зміни ємності конденсаторів є в межах

$$-7 \% \leq \Delta C/C \leq 12 \% . \quad (1)$$

Оскільки більшість реакторів виконується з повітряним сердечником, то їх індуктивність практично не залежить від температури навколишнього середовища. Проте є відхилення параметрів, пов'язане з технологією виробництва і переважно становить $\pm 3\%$.

$$-3\% \leq \Delta L/L \leq 3\% . \quad (2)$$

Окрім змін у номінальних параметрах фільтрів потрібно пам'ятати про можливі коливання частоти мережі, які переважно є в межах $\pm 1\%$.

$$|\Delta f/f| \leq 1\% . \quad (3)$$

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

$$h_{рез} = \frac{1}{2pf\sqrt{LC}} . \quad (4)$$

З (4) очевидно, що відносна резонансна частота налаштування фільтра $h_{рез}$ є функцією від частоти мережі f , індуктивності L та ємності C фільтра, і будь-які відхилення цих параметрів можуть змістити цю частоту. Можливі відхилення частоти налаштування фільтра щодо бажаного значення порядку налаштування h можна отримати, підставивши рівняння (1)–(3) в (4):

$$h \times \frac{1}{1,01 \times \sqrt{1,03 \times 1,12}} \leq h_{рез} \leq h \times \frac{1}{0,99 \times \sqrt{0,97 \times 0,93}} , \quad (5)$$

$$0,92 \times h \leq h_{рез} \leq 1,06 \times h .$$

Тобто, можливі відхилення частоти налаштування фільтрів перебувають в межах від -8 до +6 %. Підставивши у (5) значення бажаної резонансної частоти, отримуємо, що, наприклад, для 5-ї гармоніки можливе відхилення становить від $4,6 \leq 5 \leq 5,3$, а для 7-ї гармоніки – $6,44 \leq 7 \leq 7,42$.

Якщо коливаннями частоти в мережі знехтувати, то отримаємо дещо менші результуючі відхилення

$$h \times \frac{1}{1 \times \sqrt{1,03 \times 1,12}} \leq h_{рез} \leq h \times \frac{1}{1 \times \sqrt{0,97 \times 0,93}} , \quad (6)$$

$$0,93 \times h \leq h_{рез} \leq 1,05 \times h .$$

Отже, під час проектування фільтрів обов'язково необхідно враховувати можливі відхилення параметрів конденсаторів та реакторів від номінальних значень, оскільки це може істотно вплинути на ефективність їх застосування.

Варто також зазначити, що вибір силових фільтрів для систем електропостачання змінних нелінійних навантажень з врахуванням відхилень параметрів від номінальних недостатньо окреслений у дослідженій літературі [2–5]. Тобто проблема вимагає додаткового вивчення.

Завдання дослідження. Завданням дослідження є обґрунтування підходів до вибору засобів компенсації реактивної потужності в системах електропостачання, що містять частотно-регульовані електроприводи (ЧРП). Зміна режимів роботи ЧРП спричиняє необхідність зміни реактивної потужності компенсувальних пристроїв, що накладає особливі вимоги до врахування змін несинусоїдності режиму. При тому необхідно також враховувати можливі відхилення параметрів фільтро-компенсувальних пристроїв від номінальних.

Опис системи електропостачання. Приклад аналізованої системи електропостачання показано на рис. 1. Споживачі живляться від секції шин 6 кВ. Навантаженням секції шин 6 кВ є асинхронні двигуни, навантаження 0,4 кВ, що живиться від трансформатора 10МВА, та частотно регульовані електроприводи, які є джерелом гармонік у цій системі. З боку мережі частотно-регульовані приводи живляться від 12-пульсного перетворювача. Теоретичний спектр такого перетворювача – це гармоніки (12 ± 1) порядку, проте, як зрозуміло з табл. 1, реально такі перетворювачі генерують також 5-ту та 7-му гармоніки.

Двигуни 6 кВ обладнано конденсаторними батареями сумарною потужністю 2,8 Мвар. Для компенсації реактивної потужності ЧРП передбачено компенсувальні пристрої (КП) потужністю

3,6 (2×1,8) Мвар. Режим роботи КП залежить від реактивної потужності ЧРП, що ускладнює проблему компенсації гармонік, оскільки у разі ввімкнення КП максимум частотної характеристики системи зміщується в бік 5-ї гармоніки, зумовлюючи її резонансне підсилення у мережі.

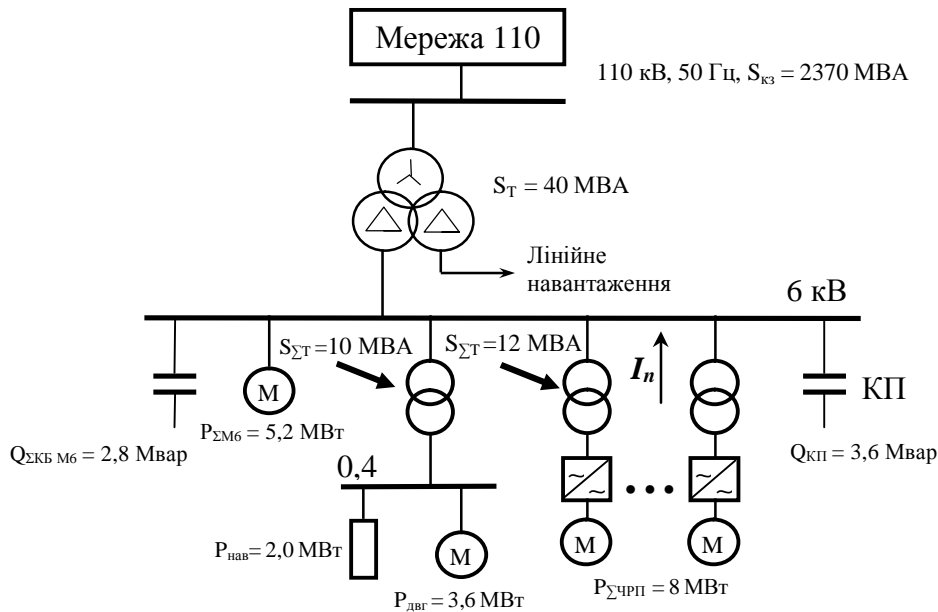


Рис. 1. Досліджувана система електропостачання

Таблиця 1

Струми вищих гармонік ЧРП

Порядок гармоніки	5	7	11	13	17	19	23	25
Струм ЧРП I_n , А	17,5	6,9	22,8	18,7	1,8	1,4	5,4	4,8

Дослідження несинусоїдних режимів системи електропостачання. З метою дослідження несинусоїдних режимів системи електропостачання здійснено моделювання її частотних характеристик для можливих варіантів схем фільтро-компенсувальних пристроїв. Під час побудови заступної схеми системи електропостачання нелінійний споживач подають джерелом струму вищих гармонік, а параметри інших елементів враховують їх частотними характеристиками.

Схема розглядається окремо для кожної гармоніки зведенням опору мережі чи її ділянки щодо джерела гармонік. Заступна схема системи електропостачання показана на рис. 2. Тут усі опори та струми мають індекс n , що вказує на залежність їх величин від частоти.

Аналізуючи частотні характеристики системи електропостачання та використовуючи задані значення струмів гармонік ЧРП, можемо визначити коефіцієнти n -ї гармонічної складової напруги та коефіцієнти спотворення синусоїдності кривої напруги для різних варіантів схем фільтро-компенсувальних пристроїв.

На рис. 3 зображено частотні характеристики досліджуваної системи електропостачання, які характеризують вплив увімкнення компенсувальних пристроїв.

Для кількісної оцінки несинусоїдного режиму визначимо показники якості електроенергії на шинах. Коефіцієнти n -ї гармонічної складової напруги K_{U_n} обчислюють за формулою

$$K_{U_n} = \frac{U_n}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100 = \frac{I_n \cdot Z_n}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100, \quad (7)$$

де I_n – струм n -ї гармоніки частотно-регульованого приводу; Z_n – опір схеми, зведений до виводів ЧРП на частоті n -ї гармоніки; $U_{\text{НОМ}}$ – номінальна фазна напруга.

Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги (K_U) визначається за формулою

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{25} U_n^2}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{25} (I_n \cdot Z_n)^2}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100. \quad (8)$$

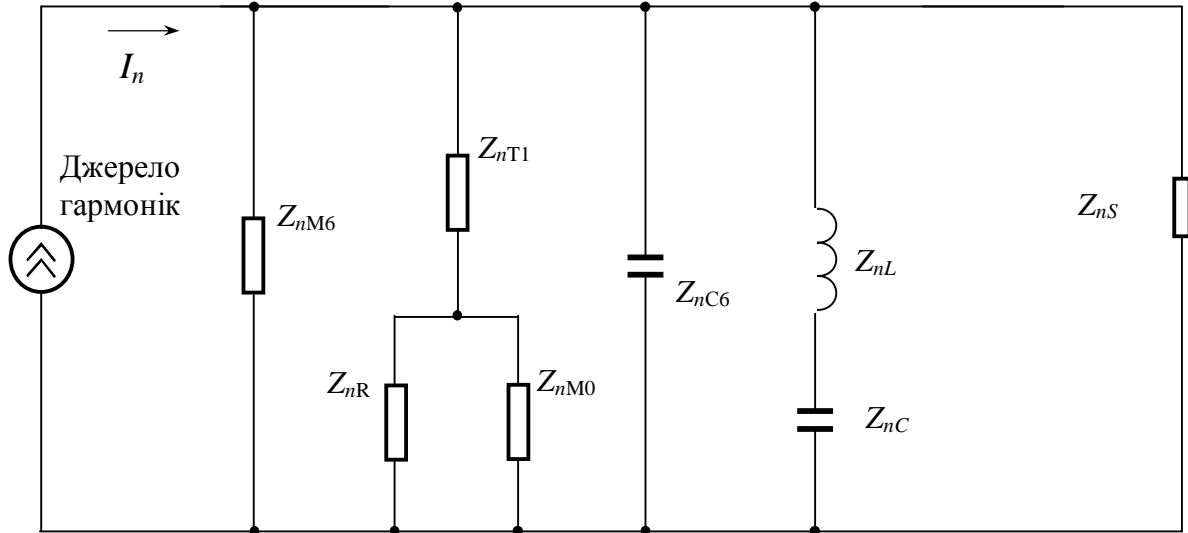


Рис. 2. Заступна схема системи для розрахунку частотних характеристик:
 Z_{nM6} – еквівалентний опір двигунів 6 кВ; Z_{nR} – опір навантаження 0,4 кВ;
 Z_{nM04} – еквівалентний опір двигунів 0,4 кВ; Z_{nT1} – опір трансформатора 6/0,4 кВ;
 Z_{nC6} – опір конденсаторної батареї 6 кВ; $Z_{nLKП}$ та $Z_{nCKП}$ – опори реактора та КБ фільтрокомпенсуючого пристрою 6 кВ; Z_{nS} – сумарний опір системи

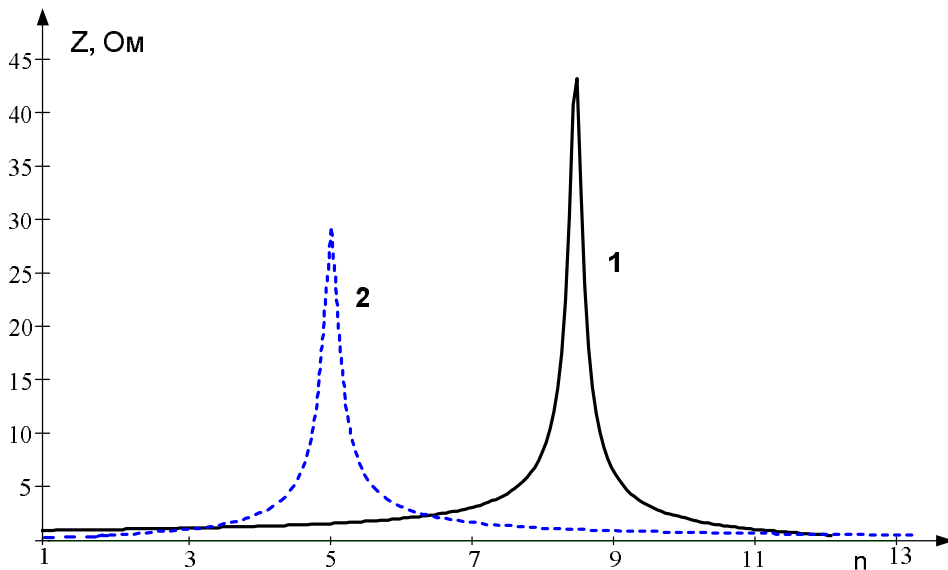


Рис. 3. Частотна характеристика системи електропостачання:
 1 – схема, без увімкнення КП; 2 – схема з увімкненими компенсуючими пристроями потужністю 3,6 Мвар.

Результати розрахунку наведено в табл. 2. Отже, як бачимо з рис. 3 та табл. 2 у разі увімкнення компенсуючих пристроїв на шини 6 кВ відбувається зміщення піка частотної характеристики в зону 5-ї гармоніки і, як наслідок, значне зростання коефіцієнта 5-ї гармонічної

складової напруги та коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги на шинах 6 кВ. Відповідно до [1] нормальнодопустимі значення цих показників для напруги 6 кВ не повинні перевищувати $K_{U(5)} \leq 4,0 \%$ та $K_U \leq 5,0 \%$; граничнодопустимі значення відповідно становлять 6 % та 8 %. Тому зрозуміло, що для цієї системи електропостачання з використанням КП необхідно вживати заходи для зниження рівнів гармонік для покращання показників якості електроенергії відповідно до чинних норм. Тому було розглянуто кілька варіантів використання фільтро-компенсувальних пристроїв з врахуванням можливих відхилень параметрів фільтрів від номінальних.

Таблиця 2

Результати розрахунків впливу КП

Коефіцієнт	K_{Un} , %				K_U , %
	5	7	11	13	
Порядок гармоніки					–
Схема, без увімкнення КП	1,013	1,955	1,540	0,846	2,817
Включено КП потужністю 3,6 Мвар	14,833	0,331	0,431	0,279	14,846

У табл. 3 наведено результати розрахунків коефіцієнтів n -ї гармонічної складової напруги та коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги для випадку налаштування двох фільтрів на 5-ту гармоніку, які реалізовані на базі даного КП ($Q_{КП} = 2 \times 1,8$ Мвар), з розглядом можливих граничних відхилень їх параметрів.

Таблиця 3

Результати розрахунку з встановленням фільтрів 5-ї гармоніки

Коефіцієнт	K_{Un} , %				K_U , %
	5	7	11	13	
Порядок гармоніки					–
Ввімкнено фільтри 5-ї гармоніки, без врахування відхилення параметрів	0,025	0,24	4,632	1,309	4,820
Ввімкнено фільтри 5-ї гармоніки, максимальне відхилення параметрів в сторону зменшення резонансної частоти	0,124	0,276	4,126	1,274	4,329
Ввімкнено фільтри 5-ї гармоніки, максимальне відхилення параметрів в сторону збільшення резонансної частоти	0,122	0,210	5,267	1,346	5,442
Ввімкнено фільтри 5-ї гармоніки, максимальний розкид між параметрами фільтрів	1,056	0,239	4,639	1,309	4,941

Як очевидно з табл. 3, увімкнення лише фільтра 5-ї гармоніки не дозволяє повною мірою вирішити проблему гармонік для цієї системи електропостачання, оскільки під час увімкнення такого фільтра пік частотної характеристики наближається до частоти 11-ї гармоніки, значення струму якої є значним, що призводить до великих значень коефіцієнта 11-ї гармонічної складової напруги. Тривалодопустиме значення цього коефіцієнта для 11-ї гармоніки становить 2 %, граничнодопустиме – 3 %. Проте увімкнення такого фільтра дає змогу обмежити значення коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги нижче від тривалодопустимого значення. Також потрібно зазначити, що за умови максимальних відхилень параметрів фільтра від номінальних, у бік збільшення резонансної частоти, можливе перевищення тривалодопустимого значення коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги. Тому було розглянуто можливість застосування двох фільтрів, налаштованих на 5-ту та 7-му гармоніки; потужність кожного з фільтрів на частоті мережі 1,8 Мвар. Також було враховано вплив відхилення параметрів фільтрів від номінальних. Результати розрахунків наведено в табл. 4.

Ввімкнення фільтрів 5-ї та 7-ї гармоніки зміщує пік частотної характеристики в зону 11-ї та 13-ї гармонік, що призводить до значних спотворень синусоїдності кривої напруги та великих значень коефіцієнтів складових напруг цих гармонік. Якщо при цьому врахувати можливі відхилення параметрів фільтрів від номінальних, то очевидно, що значення коефіцієнта 11-ї гармонічної

складової напруги може сягати майже п'ятикратного перевищення граничнодопустимого значення. Зрозуміло, що працювати в таких умовах є небезпечно, тому було розглянуто варіант включення фільтрів 5-ї і 11-ї гармонік, потужність кожного з фільтрів на частоті мережі 1,8 Мвар. Також було враховано можливість відхилення параметрів фільтрів від номінальних. Результати розрахунків наведено в табл. 5. Аналіз показує, що у цьому разі вдається забезпечити вимоги якості електроенергії на шинах 6 кВ. Проте необхідно ретельно вибирати параметри фільтрів з огляду на конструктивні відхилення ємностей та індуктивностей від номінальних. Враховуючи той факт, що проектуючи задані резонансні властивості фільтра, ці відхилення можуть спричинити його “переналаштування”, тобто дійсна резонансна частота фільтра буде вищою від проектної, варто завжди вибирати цю резонансну частоту нижчою від точної заданої частоти гармоніки мережі. Причому це зниження повинно бути тим більшим, чим більшими є конструктивні відхилення параметрів конденсаторів і реакторів цього фільтра. З іншого боку, розташування фільтрів внаслідок відхилень їх параметрів від номінальних робить проблематичною паралельну роботу однойменних фільтрів (двох фільтрів налаштованих на одну гармоніку), оскільки може викликати перевантаження одного з цих фільтрів. Це особливо небезпечно тоді, коли фільтрові реактори виготовляють з магнітними осердями. Збільшення струму гармоніки налаштування такого фільтра спричиняє істотне зростання втрат від вихрових струмів в обмотках, що може стати причиною його перегрівання.

Таблиця 4

Результати розрахунку впливу встановлення фільтрів 5-ї та 7-ї гармонік

Коефіцієнт	$K_{U(n)}$, %				K_U , %
	5	7	11	13	
Порядок гармоніки	5	7	11	13	–
Ввімкнено фільтри 5-ї та 7-ї гармонік, без врахування відхилення параметрів	0,025	0,01	7,024	2,075	7,325
Ввімкнено фільтри 5-ї та 7-ї гармонік, максимальне відхилення параметрів в сторону зменшення резонансної частоти	0,308	0,068	14,122	1,882	14,251
Ввімкнено фільтри 5-ї та 7-ї гармонік, максимальне відхилення параметрів в сторону збільшення резонансної частоти	0,220	0,072	4,575	2,310	5,130
Ввімкнено фільтри 5-ї та 7-ї гармонік, максимальне відхилення параметрів в сторону зменшення (для фільтра 5-ї) та збільшення (для фільтра 7-ї) резонансної частоти	0,268	0,069	5,198	2,202	5,652
Ввімкнено фільтри 5-ї та 7-ї гармонік, максимальне відхилення параметрів в сторону збільшення (для фільтра 5-ї) та зменшення (для фільтра 7-ї) резонансної частоти	0,198	0,065	10,520	1,960	10,703

Таблиця 5

Результати розрахунку впливу встановлення фільтрів 5-ї та 11-ї гармонік

Коефіцієнт	$K_{U(n)}$, %				K_U , %
	5	7	11	13	
Порядок гармоніки	5	7	11	13	–
Ввімкнено фільтри 5-ї та 11-ї гармонік, без врахування відхилення параметрів	0,025	1,492	0,33	0,485	1,570
Ввімкнено фільтри 5-ї та 11-ї гармонік, максимальне відхилення параметрів в сторону зменшення резонансної частоти	0,259	0,604	0,18	0,816	1,063
Включено фільтри 5-ї та 11-ї гармонік, максимальне відхилення параметрів в сторону збільшення резонансної частоти	0,235	4,175	0,124	0,300	4,194
Включено фільтри 5-ї та 11-ї гармонік, максимальне відхилення параметрів в сторону зменшення (для фільтра 5-ї) та збільшення (для фільтра 11-ї) резонансної частоти	0,249	1,790	0,123	0,302	1,836
Ввімкнено фільтри 5-ї та 11-ї гармонік, максимальне відхилення параметрів в сторону збільшення (для фільтра 5-ї) та зменшення (для фільтра 11-ї) резонансної частоти	0,226	0,903	0,180	0,802	1,241

Висновки. Розглянуто особливості вибору фільтро-компенсуючих пристроїв для компенсації реактивної потужності змінних нелінійних навантажень на прикладі системи електропостачання з частотно регульованими електроприводами. Особливістю цієї системи електропостачання є наявність конденсаторних батарей, що істотно ускладнює проблему вибору фільтрів вищих гармонік.

Показано підхід до вибору можливих варіантів налаштування фільтрів у такій системі електропостачання з урахуванням конструктивних відхилень параметрів конденсаторів та реакторів від номінальних значень. Проаналізовано можливі впливи таких розташувань фільтрів на ефективність покращання показників якості напруги в системі.

1. ГОСТ 13109-97. *Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Межгосударственный стандарт.* – Киев: Госстандарт Украины, 1999.
2. Kun-Ping Lin, Ming-Hoon Lin, and Tung-Ping Lin “An Advanced Computer Code for Single-Tuned Harmonic Filter Design”, *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 34, no. 4, July/August 1998.
3. Medora N.K., Kusko A. *Computer-Aided Design and Analysis of Power-Harmonic Filters // IEEE Transactions on industry applications.* – March/April 2000. – Vol. 36, no. 2. – P. 604–6123
4. Lemieux G. *Power system harmonic resonance – A documented case // IEEE Trans. Ind. Applicat.* – May/June 1990. – Vol. 26. – P. 483–488.
5. Gonzalez D.A. and McCall J.C. *Design of filters to reduce harmonic distortion in industrial power systems // IEEE Trans. Ind. Applicat.* – May/June 1987. – Vol. IA-23. – P. 504–511.

УДК 62-83: 621.382

І.І. Веклинець

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕАП

АНАЛІЗ ТОПОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ АКТИВНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ

© Веклинець І.І., 2008

Проаналізовано відомі топології активних випрямлячів, здійснено їх класифікацію, розроблено рекомендації щодо їх застосування в регульованих електроприводах та наведено їхні основні показники для порівняльного аналізу.

The analysis of the known topologies of active rectifiers is conducted, their classification is carried out, recommendations are developed in relation to their application in adjustable-speeds drive and their basic indexes are resulted for a comparative analysis.

Постановка проблеми. З введенням стандартів [1–3], які регламентують якість струму, що споживається від мережі, появилось велике різноманіття випрямлячів з функцією корекції коефіцієнта потужності та вхідним струмом, близьким до синусоїдального. Активні випрямлячі (АВ), особливо височастотні, наближають форму струмів споживання до синусоїдальної та просто забезпечують потрібне значення $\cos\phi$, наприклад одиничне. Крім цих двох функцій, АВ можуть забезпечувати спрямоване передання енергії, а також дають змогу регулювати напругу в проміжній ланці постійного струму, що є важливим аспектом для регульованих електроприводів (ЕП).

Аналіз останніх досліджень. У зв'язку з розвитком автоматизованих технологічних процесів та з метою енергоощадності все більше сучасних ЕП стають регульованими, причому найчастіше з проміжною ланкою постійного струму в силовому колі. Ланка постійного струму традиційно реалізується у вигляді одно- чи трифазного напівпровідникового (діодного) випрямляча та емніс-