

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПАСИВНИХ, АКТИВНИХ ТА ГІБРИДНИХ ФІЛЬТРІВ
ГАРМОНІК СТРУМУ ДЛЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУІ. В. Волков¹, чл.-кор. НАН України, С. В. Подольний^{2**}, канд.техн.наук, Ю.В. Маруня^{1***},¹ Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

² Sentinel Power Quality FZE, UAEe-mail: ig.volkov@ukr.net

Проведено аналіз трьох типів фільтрів гармонік струму мережі, які використовуються в системах електропостачання асинхронних електроприводів з частотним керуванням. Виконано математичне моделювання типових варіантів такої системи, яка живить електропривод потужністю 250 кВт від промислової мережі 0.4 кВ, 50 Гц. Проведено порівняння спектрограм і епюр струму активного і гібридного фільтрів та визначено істотні відмінності величин струмів транзисторів, необхідних для однакового рівня придушення вищих гармонік. Описано основні фактори, що впливають на ціноутворення і оптимізацію реактивних і напівпровідникових елементів. Встановлено суттєвий вплив співвідношення між реактивностями короткого замикання мережі і додаткового реактора гібридного фільтра на його ефективність і вартість. Бібл. 11, рис. 6, табл.1

Ключові слова: коефіцієнт гармонік струму, THDi, пасивний фільтр, активний фільтр паралельного типу, гібридний фільтр, електропривод, компенсація спотворень.

Вступ. У зв'язку з посиленням вимог міжнародних і вітчизняних стандартів щодо якості електричної енергії [1], зокрема, на рівень гармонік струму, що генеруються в мережу електроустаткування з потужними напівпровідниковими перетворювачами та іншими нелінійними навантаженнями, проблема фільтрації цих гармонік набуває істотного значення. Особливо гостро вона стоїть у разі експлуатації електроприводів з частотним керуванням асинхронних електродвигунів, що широко використовуються сьогодні у промисловості та на транспорті [2].

Традиційно ця проблема вирішувалася за допомогою пасивних фільтрів (ПФ), що містять реактори і батареї конденсаторів, зібраних за різними схемами, частотні характеристики реактивних елементів яких дають змогу в тій чи іншій мірі покращувати спектр струму споживаного нелінійним навантаженням з мережі. Сьогодні десятки фірм, у тому числі такі відомі як *ABB, Siemens, Danfoss, Schneider, Mirus* та ін., випускають такі фільтри на потужностях від 5 кВА до 3 МВА [3-7].

З розвитком елементної бази силової електроніки і, зокрема, *IGBT*-транзисторів, з'явилася можливість створювати так звані активні фільтри (АФ), які формують споживаний з мережі струм, близький за формою до синусоїди. Досягається це одним з двох методів: або оцінкою (виміром) спектрального складу струму нелінійного навантаження, генеруванням струму такого ж спектра, але без першої гармоніки (тобто основної частоти) і відніманням другого з першого; або відстеженням миттєвих значень струму навантаження і формуванням додаткового струму з такими миттєвими значеннями, щоб їхня різниця наближалася до синусоїди основної частоти. АФ такого типу зараз серійно випускаються багатьма фірмами на потужності до 500 кВА [7].

Конкуренція між різними типами цих фільтрів зумовлюється співвідношенням їхніх переваг і недоліків. ПФ прості у виготовленні і експлуатації, надійні, стійкі до перевантажень, порівняно дешеві, але мають незадовільні масо-габаритні показники та обмеження щодо зниження коефіцієнта гармонік струму. АФ, навпаки, мають відмінні масо-габаритні показники, забезпечують будь-який рівень зниження коефіцієнта гармонік струму, здатні працювати на групу навантажень, але критичні до перевантажень, вимагають кваліфікованої експлуатації і, головне, мають істотно більшу ціну.

В останнє десятиліття починає застосовуватися третій тип фільтрів гармонік струму – т.зв. гібридні фільтри (ГФ) [8], що поєднують переваги АФ і ПФ і, в значній мірі, позбавлені їхніх

недоліків. Вони являють собою схемне об'єднання фільтрів перших двох видів, параметри яких відрізняються від параметрів, які вони мали б у випадку роздільного їхнього застосування у разі роботі на те ж навантаження. Концепція ГФ перспективна як для індивідуальних навантажень, що розглядаються у даній статті, так і для варіативних поєднань на рівні всієї енергосистеми.

Метою статті є з'ясування можливості за допомогою ГФ зниження вартості фільтра зі збереженням головної переваги АФ – здатності забезпечити будь-яку якість фільтрації гармонік струму за будь-якого навантаження. При цьому ми не будемо аналізувати якусь конкретну схему АФ, а для загального порівняння представимо його як паралельне з'єднання для кожної фази фільтра ідеальних джерел струму основних вищих гармонік струму, починаючи з 5-ої, як показано на рис. 1. На ньому мережа представлена джерелами ЕРС e_A, e_B, e_C з внутрішнім опором короткого замикання Z_{K3} , що задається індуктивностями $L7-L9=0,055$ мГн ($Z_{K3}^*=3\%$). Активний фільтр т.зв. паралельного типу представлено для кожної фази трьома джерелами струму $I_{A\Phi}$ 5-ої, 7-ої, 11-ої гармонік, що цілком достатньо для поставленої мети (на рисунку таке з'єднання показано тільки для фази A). Навантаженням є трифазний випрямний міст з резистором R_H , які еквівалентують інвертор, двигун електроприводу з частотним керуванням і згладжуючу пульсації випрямленої напруги батарею конденсаторів $C4$ великої ємності на виході. Як пасивний фільтр використовується двохлапторна ($L1, L2, L3$ і $L4, L5, L6$) схема типу *Lineator* з батареєю конденсаторів $C1, C2, C3$, включених в "трикутник" [9, 10].

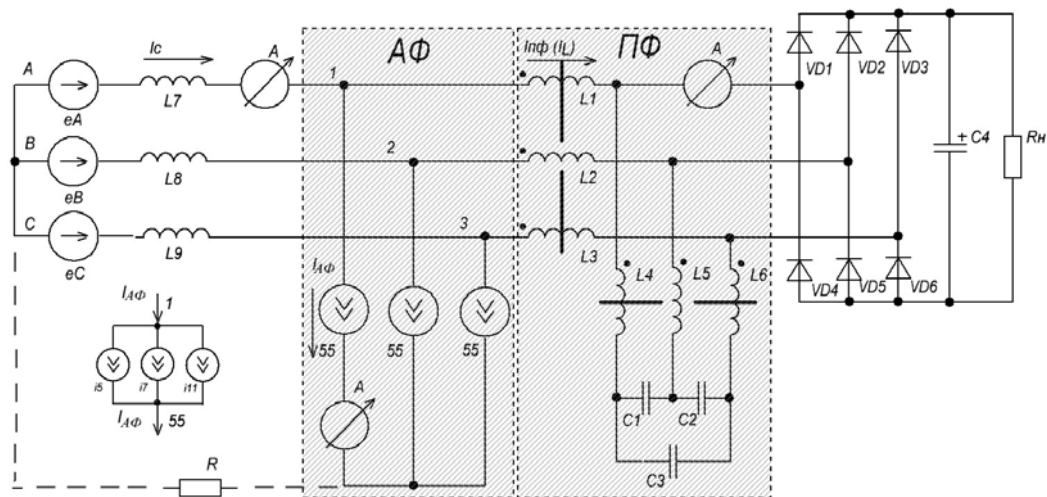


Рис.1

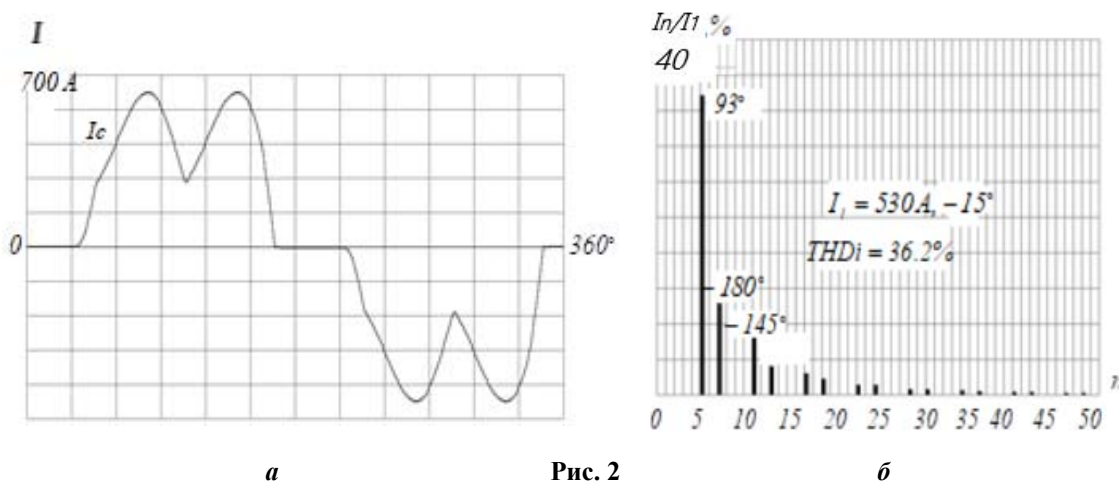
Комп'ютерне моделювання цієї схеми та її модифікацій проводилося за допомогою спеціалізованої програми *Omega 2010*, розробленої у *Інституті електродинаміки НАН України*. Параметри елементів схеми обиралися, виходячи з використання трифазної мережі 0.4 кВ, 50 Гц з Z і активного навантаження потужністю 250 кВт.

На першому етапі АФ і ПФ виключалися і визначалися форма, спектральний склад і фазові кути гармонік споживаного з мережі струму за наявності тільки 2%-го лінійного реактора з відповідними індуктивностями $L1=L2=L3=0.037$ мГн, який застосовується зазвичай як мінімальний захід щодо поліпшення спектра струму. Використання такого реактора дає змогу зменшити коефіцієнт нелінійних спотворень струму $THDi$ з $\sim (100-110)\%$ (у разі відсутності реактора) до $\sim (30-40)\%$ (за його наявністю), що істотно зменшує вимоги до струму АФ або кількості паралельних модулів. Результати моделювання наведено на рис. 2. Амплітуда 1-ої гармоніки струму мережі I_C становить 530 А, і цей струм відстає по фазі від ЕРС мережі на 15 ел.градусів. Амплітуди трьох найбільших гармонік показано у відсотках від основної і вказані кути зсуву фаз в ел.градусах.

Як бачимо, коефіцієнт гармонік струму мережі неприпустимо високий, $THDi=36.2\%$ за нормативом не більше 5% в точці загального з'єднання навантажень відповідно до стандартів *IEEE519-2014*. Таким чином, застосування тих чи інших фільтрів у даному випадку обов'язкове.

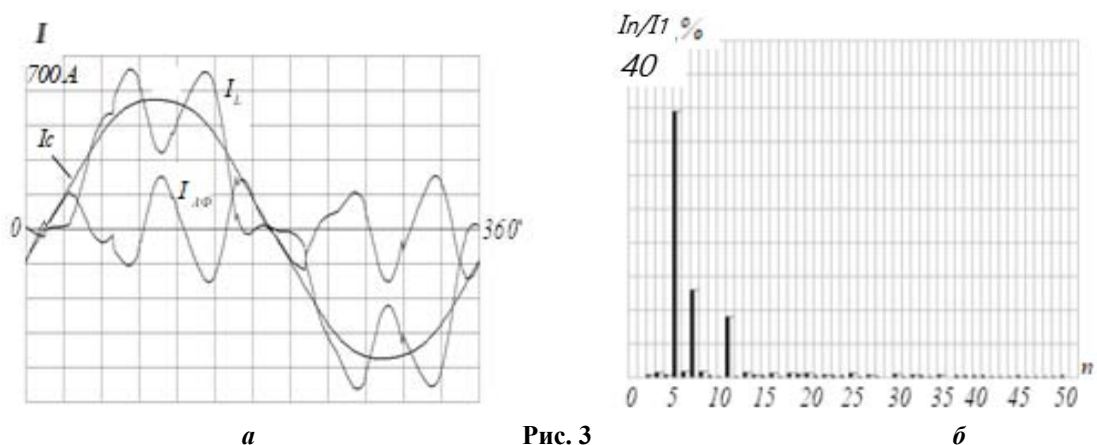
На другому етапі розглянемо застосування активного фільтра, еквівалентованого джерелами струму, як показано на рис. 1. При цьому вважаємо, що АФ налаштований таким чином, що реагує тільки на перші три гармоніки – 5-ту, 7-му і 11-ту, і амплітуди цих гармонік для фази A беремо

такими, якими їх зображено на рис. 2, б, але в протифазі з кутами, зазначеними на тому ж рисунку. Наприклад, для одинадцятої гармоніки цей кут буде $+145^\circ - 180^\circ = -35^\circ$, що при підсумовуванні струмів у вузлі I забезпечить нейтралізацію цієї гармоніки (той же результат має місце при заміні знаку амплітуди гармоніки на протилежний, тобто в цьому конкретному випадку $+34$ А на -34 А).



Аналогічна ситуація і з іншими гармоніками. Для фаз B і C фазові кути збільшуються на 240° і 120° для 7-ої гармоніки струму, і відповідно на 120° і 240° – для 5-ої і 11-ої гармонік, оскільки вони мають зворотний порядок чергування фаз.

Результати моделювання на цьому етапі наведено на рис. 3. Як бачимо (рис. 3, а), форма струму мережі I_C як результат віднімання від споживаного навантаженням струму I_L струму $I_{A\Phi}$, що генерується активним фільтром, наближається до синусоїдальної навіть при врахуванні тільки трьох гармонік струму $I_{A\Phi}$. Відсоткова величина гармонік струму $I_{A\Phi}$, що генеруються (по відношенню до амплітуди першої гармоніки струму I_C), показана на рис. 3, б. $THDi$ мережевого струму I_C не перевищує 2.5%, тобто нижче максимального нормативного значення у 2 рази. Цей запас зроблено навмисно, щоб компенсувати можливу несинусоїдальність напруги живлення, що, як правило, має місце на практиці. Врахування більш високих гармонік, що цілком можливе сучасними АФ, призводить до зниження $THDi$ практично до будь-якої малої величини.



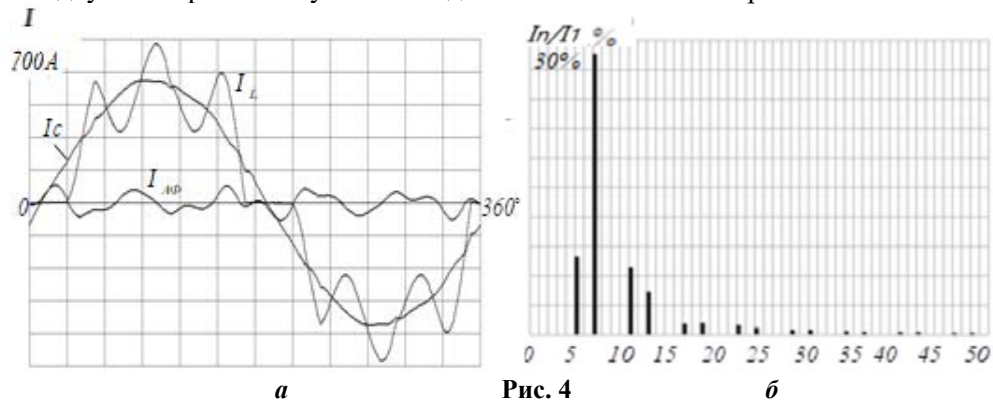
Для розглянутого пристрою діюче значення струму $I_{A\Phi}$ (*r.m.s.*) таке:

$$I_{A\Phi} = \sqrt{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2} = 123 \text{ А}, \quad (1)$$

де $I_5 \dots I_{11}$ – діючі значення струмів гармонік, амплітуди яких відзначено на рис. 3, б. Таким чином, встановлена потужність розглянутого активного фільтра $S_{A\Phi} = 3 \times 123 \times 230 = 85 \text{ кВА}$, тобто становить 34% потужності навантаження. Саме вона визначає високу вартість активного фільтра.

На третьому етапі розглянемо можливості зменшення $I_{A\Phi}$ і $S_{A\Phi}$ за допомогою підключення до нього ПФ з істотно заниженим (а тому і більш дешевим) власним $THDi$ (тобто таким, що мав би бути при відсутності АФ), наприклад, 12%. Параметри такого фільтра за схемою, зображеною на рис. 1,

такі: $L1 = L2 = L3 = 0.22 \text{ мН}$; $L4 = L5 = L6 = 0.4 \text{ мН}$; $C1 = C2 = C3 = 120 \text{ мФ}$. Додатковий лінійний реактор у цьому випадку не потрібен. Результати моделювання показано на рис. 4.



Обчислення струму і потужності активного фільтра за формулою (1) з використанням даних рис. 2, б дає наступні значення: $I_{AФ} = 50 \text{ А}$, $S_{AФ} = 3 \times 50 \times 230 = 34.5 \text{ кВА}$, що становить всього 14% потужності навантаження, тобто в 2.5 рази менше, ніж у варіанті без ПФ. Результати розрахунку цього варіанту наведено у таблиці в рядку під номером 3. Результати моделювання гібридних фільтрів для того ж навантаження і з таким же $THDi = 2.5\%$, але з іншими значеннями власного $THDi$ його пасивної частини, наведено у тій же таблиці в рядках під номерами 2 і 4.

№	THDi	$I_{AФ}$, А r.m.s.	$S_{AФ}$, кВА	I_5 , А	I_7 , А	I_{11} , А	Ціна АФ, тис. \$	Ціна ПФ, тис. \$	Ціна ГФ, тис. \$
1	Без ПФ Rated	123	85	113	39	24	–	–	–
1*	Без ПФ Derated	196	111	161	78	80	23.8	–	–
2	ПФ-10% Rated	39	26.9	35	4	12	–	–	–
2*	ПФ-10% Derated	64	44.2	50	8	40	10.4	3.3	13.7
3	ПФ-12% Rated	50	34.7	46.8	5.7	17.7	–	–	–
3*	ПФ-12% Derated	89	61.4	67	11	59	11.0	2.5	13.5
4	ПФ-14% Rated	66.7	46	64	3	16	–	–	–
4*	ПФ-14% Derated	119	82	91	10	77	12.0	2.0	14.0

Фактично перевага гібридних фільтрів є ще більшою завдяки наступним обставинам. Фірма, що виробляють активні фільтри з використанням *IGBT*-транзисторів, передбачають тепловий захист транзисторів як у разі роботи на підвищених частотах модуляції, так і у разі генерації компенсуючих вищих гармонік, в зв'язку з перегрівом транзисторів через збільшення динамічних втрат в них на підвищених частотах (т.зв. *derating*, тобто зниження рівня номінального струму).

Наприклад, фірма *Danfoss* [4] за допомогою спеціальної програми теплового захисту автоматично знижує рівень 5-ої гармоніки, що генерується, до 0.7 (тобто до 70%) від розрахункового, 7-ої – до 50%, 11-ої – до 30% і т.д. Звичайно, це призводить до збільшення $THDi$ фільтра при його роботі в області номінальних, тобто заявлених, $I_{AФ}$ (r.m.s.) струмів, на що споживач піти не може і змушений купувати фільтр з пропорційно завищеним номіналом струму. Так, для розглянутого вище варіанту активного фільтра з розрахунковим номінальним струмом $I_{AФ} = 123.0 \text{ А}$ необхідно завищити допустимі рівні амплітуд 5-ої гармоніки до $I_5 = 113/0.7 = 161 \text{ А}$, 7-ої – до $I_7 = 39/0.5 = 78 \text{ А}$, 11-ої – до $I_{11} = 24/0.3 = 80 \text{ А}$, що означає завищення номінального струму активного фільтра з 123 А до 196 А, тобто у 1.6 рази. Цей результат відображено у рядку 1* таблиці. Аналогічні результати, що враховують *derating* активних фільтрів у складі гібридних наведено в рядках 2*, 3* та 4* (виділені фоном) для варіантів пасивних складових гібридного фільтра з $THDi$ відповідно 10, 12 і 14%.

Орієнтовна вартість фільтрів з урахуванням *derating* вказана відповідно до прайс-листів фірм *Comsys* і *Elhand*, які виробляють АФ [7] і ПФ [11] відповідних струмів і потужності. У вартість активного фільтра (без ПФ) включена також вартість 2%-го лінійного реактора, без якого АФ суттєво менш ефективний (див. про це нижче). При розрахунку варіанта 1* автори орієнтувалися на використання паралельного з'єднання двох 100-амперних АФ *ADFP100 Comsys*, варіанта 3* – одного такого ж фільтра, варіанта 2* – 50-амперного пропорційно дещо завищеного за потужністю і ціною і варіанта 4* – 100-амперного, так само дещо завищеного за потужністю та ціною.

Як бачимо, розрахункова вартість всіх розглянутих варіантів ГФ практично однакова та істотно менша вартості АФ тієї ж потужності – у 1.8 разу. Формально найкращим в цьому сенсі є варіант, який використовує ПФ з $THDi = 12\%$, фактично ж кожен з трьох розглянутих варіантів може бути кращим в залежності від конкретної кон'юнктури.

Слід зазначити, що істотний вплив лінійного реактора і внутрішнього опору короткого замикання джерела живлення $Z_{кз}$ на роботу АФ часто не враховується. Хоча такі АФ і називаються паралельними, безпосереднє їхнє під'єднання паралельно до випрямного мосту (що було б дуже зручно) вкрай недоцільно. Розглянемо цю ситуацію стосовно до варіанту №1. Розрахункове значення номінального струму АФ $I_{АФ} = 123.0$ А отримано при фіксованому значенні відносного опору короткого замикання джерела живлення (мережі) $Z_{кз}^* = 4\%$ і відносного індуктивного опору (*reactance*) додаткового реактора $Z_{д}^* = 2\%$. При цьому коефіцієнт гармонік по міжфазній напрузі мережі (між точками 1 і 2) $THDu = 7.6\%$, тобто не перевищує нормативних (для мереж 0.4 кВ) 8%. За інших поєднаннях $Z_{кз}^*$, $Z_{д}^*$ таке неприпустиме перевищення можливе. На рис. 5 показано у вигляді поверхні залежність $THDu = f_1(Z_{кз}^*, Z_{д}^*)$, ізолінія на якій, що має незмінний рівень $THDu = 8\%$, ілюструє, що правіше цієї ізолінії будь-яке поєднання параметрів $Z_{кз}^*$, $Z_{д}^*$ неприпустиме, а вибір повинен здійснюватися тільки в лівій частині цієї поверхні.

Кожній парі значень $Z_{кз}^*$ і $Z_{д}^*$ цієї частини відповідає певна величина номінального струму активного фільтру, розрахунки якої виконувалися за допомогою тієї ж програми *Omega 2010*. Результати показано на рис. 6 – залежність $I_{аф}^* = f_2(Z_{кз}^*, Z_{д}^*)$, де $I_{аф}^*$ – відносне значення номінального струму АФ (по відношенню до струму $I_{АФ} = 123.0$ А з першого рядка наведеної вище таблиці). Як бачимо, при «сильній» мережі (з малим $Z_{кз}^* \leq 4\%$) і малій величині індуктивного опору додаткового реактора ($Z_{д}^* \leq 2\%$) струм активного фільтру різко зростає аж до величини $I_{аф}^* = 3.5$. Таке багаторазове збільшення номінального струму АФ, звичайно ж, неприпустимо, і тому доводиться збільшувати $Z_{д}^*$ (а також і габарити, і вартість додаткового реактора). Але і за «слабкої» мережі ($Z_{кз}^* > 4\%$) задля зниження $THDu$ до допустимого рівня також доводиться збільшувати $Z_{д}^*$. Так, наприклад, за мережі з $Z_{кз}^* = 6\%$ знизити $THDu$ до 8% можливо тільки у разі збільшення $Z_{д}^*$ до 7%.

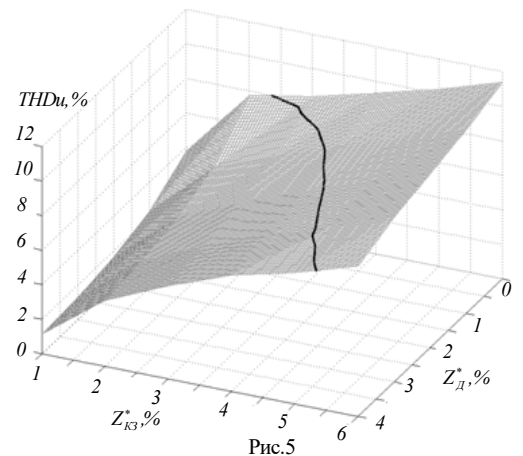


Рис.5

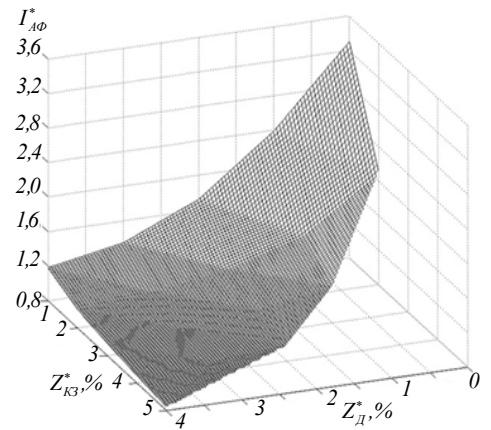


Рис.6

Висновки

1. Гібридні фільтри, зберігаючи такі ж можливості поліпшення спектрального складу споживаного з мережі струму й активні фільтри, дають змогу істотно, у 1.5 – 2 рази знизити загальну вартість фільтруючої установки.

2. Як пасивну складову гібридного фільтра доцільно використовувати електромагнітні елементи (реактори, конденсатори) за схемами патентів [10, 11].

3. Суттєве значення у розрахунку активної частини гібридних фільтрів має вибір співвідношення між реактивним опором короткого замикання електромережі і реактивним опором додаткового лінійного реактора. Оптимізація таких співвідношень з урахуванням пасивної частини ГФ має бути досліджена окремо.

Роботу виконано за бюджетною темою "Розробка електронного та електротехнічного обладнання для нової технології плавлення та обробки скла та гірських порід індукційними струмами середнього діапазону частот" №0117U002584 (2017-2021р).

1. Жаркин А.Ф., Новский В.А., Палачев С.А. Нормативные и технические аспекты обеспечения стандартных характеристик напряжения в системах электроснабжения Украины. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2012. № 52. С. 76-83.

2. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М: Академия, 2004. 256 с.
3. Siemens drive option partner. URL: <https://siemens-product-partner.schaffner.com> (Дата звернення 20.01.2020).
4. AC Drives. URL: https://www.danfoss.com/en/products/ac-drives/?sort=default_sort (Дата звернення 20.01.2020).
5. High-voltage capacitors and filters. URL: <https://new.abb.com/high-voltage/capacitors/hv> (Дата звернення 20.01.2020).
6. Proper selection of passive and active power quality filters for the mitigation of mains harmonics. URL: <https://www.eetimes.com/proper-selection-of-passive-and-active-power-quality-filters-for-the-mitigation-of-mains-harmonics/> (Дата звернення 20.01.2020).
7. Активные динамические фильтры гармоник Comsys. URL: http://www.esto.pro/comsys_adf (Дата звернення 20.01.2020).
8. Lam C. S., Wong M.C. Design and Control of Hybrid Active Power Filters. Springer, 2014. 217 p.
9. Levin M., Volkov I. Universal harmonic mitigating system. Patent USA 6127743, 2000.
10. Levin M., Volkov I. Combined harmonic filter and phase converter. Patent USA 2006/0197385b A1, 2006.
11. Elhand transformatory. URL: <https://ru.elhand.pl/> (Дата звернення 20.01.2020).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАССИВНЫХ, АКТИВНЫХ И ГИБРИДНЫХ ФИЛЬТРОВ ГАРМОНИК ТОКА ДЛЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

И. В. Волков¹ чл.-корр. НАН Украины, С. В. Подольный², канд.техн.наук, Ю.В. Маруня¹,

¹Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: ig.volkov@ukr.net

²SentinelPowerQualityFZE, UAE.

Проведен анализ трех типов фильтров гармоник сетевого тока, используемых в системах электроснабжения асинхронных электроприводов с частотным управлением. Выполнено математическое моделирование типового варианта такой системы, питающей электропривод мощностью 250 кВт от промышленной сети 0.4 кВ, 50 Гц. Проведено сравнение спектрограмм и эюр тока активного и гибридного фильтра и определены существенные различия величин токов транзисторов, необходимых для одинакового уровня подавления гармоник. Описаны основные факторы, влияющие на ценообразование и оптимизацию реактивных и полупроводниковых элементов. Установлено существенное влияние соотношения между реактивностями КЗ сети и добавочного реактора гибридного фильтра на его эффективность и стоимость. Библи. 11, рис. 6, табл. 1.

Ключевые слова: коэффициент гармоник тока, $THDi$, пассивный фильтр, активный фильтр параллельного типа, гибридный фильтр, электропривод, компенсация искажений.

COMPARATIVE ANALYSIS OF PASSIVE, ACTIVE AND HYBRID CURRENT HARMONICS FILTERS FOR FREQUENCY-REGULATED ELECTRIC DRIVE

I.V. Volkov¹, S.V. Podolny², Yu.V. Marunya¹

¹Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

56 Peremohy Ave., Kyiv, 03057, Ukraine,

email: ig.volkov@ukr.net

²Sentinel Power Quality FZE, UAE.

The analysis of three types of harmonic filters of the mains current used in power supply systems of asynchronous electric drives with frequency control is carried out. Mathematical modeling of a typical version of such a system is carried out, supplying an electric drive with a capacity of 250 kW from an industrial network of 0.4 kV, 50 Hz. The spectrograms and diagrams of the current of the active and hybrid filters are compared and significant differences in the values of the transistor currents necessary for the same level of harmonic suppression are determined. The main factors affecting the pricing and optimization of reactive and semiconductor elements are described. A significant effect of the relationship between the reactivity of the short circuit of the network and the additional reactor of the hybrid filter on its efficiency and cost has been established. References 11, Figures 6, Table 1.

Keywords: current harmonic ratio, $THDi$, passive filter, active parallel-type filter, hybrid filter, electric drive, distortion compensation.

1. Zharkin A.F., Novsky V.A., Palachev S.A. Regulatory and technical aspects of ensuring standard voltage characteristics in power supply systems of Ukraine. *Vistnyk NTU KhPI*. 2012. No. 52. Pp. 76-83. (Rus)
2. Braslavsky I.Ya. Energy-saving asynchronous electric drive. Moskva: Academy, 2004. 256 p. (Rus)
3. Siemens drive option partner. URL: <https://siemens-product-partner.schaffner.com> (Accessed at 20.01.2020).
4. AC Drives. URL: https://www.danfoss.com/en/products/ac-drives/?sort=default_sort (Accessed at 20.01.2020).
5. High-voltage capacitors and filters. URL: <https://new.abb.com/high-voltage/capacitors/hv> (Accessed at 20.01.2020).
6. Proper selection of passive and active power quality filters for the mitigation of mains harmonics. URL: <https://www.eetimes.com/proper-selection-of-passive-and-active-power-quality-filters-for-the-mitigation-of-mains-harmonics/> (Accessed at 20.01.2020).
7. Active dynamic harmonic filters Comsys. URL: http://www.esto.pro/comsys_adf (Accessed at 20.01.2020). (Rus)
8. Lam C. S., Wong M.C. Design and Control of Hybrid Active Power Filters. Springer, 2014. 217 p.
9. Levin M., Volkov I. Universal harmonic mitigating system. Patent USA 6127743, 2000.
10. Levin M., Volkov I. Combined harmonic filter and phase converter. Patent USA 2006/0197385b A1, 2006.
11. Elhand transformatory. URL: <https://ru.elhand.pl/> (Accessed at 20.01.2020).

Надійшла 27.01.2020
Остаточний варіант 28.02.2020