

УДК 621.314

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.011>

## ОДНОФАЗНИЙ ГІБРИДНИЙ ФІЛЬТР НА ВХОДІ ВИПРЯМЛЯЧА З ЄМНІСНИМ ФІЛЬТРОМ ТА АКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Ю.В. Маруня

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [Uweshka@i.ua](mailto:Uweshka@i.ua)

Розглянуто способи покращення якості електричної енергії однофазного мостового випрямляча з ємнісним фільтром та активним навантаженням. Проведено математичне моделювання пристроїв фільтрації струму для такої установки і наведено їх розрахункові характеристики. Встановлено переваги використання гібридного фільтра, що складається з активного фільтра та пасивного LMC-фільтра. Бібл. 8, рис. 3, таблиця.

**Ключові слова:** гібридний фільтр, реактивні елементи, активне навантаження, ємність.

**Вступ.** В електричних мережах, особливо в автономних системах електроживлення за нелінійних навантажень, проблема електромагнітної сумісності (ЕМС) споживачів є дуже актуальною, адже емісія вищих гармонік струму спотворює форму струму живлення, що негативно впливає на надійність та стабільність роботи обладнання, призводить до додаткових втрат потужності та до зростання встановленої потужності первинних джерел енергії в таких системах електроживлення. Цьому питанню присвячено велику кількість праць світової наукової літератури, адже частка нелінійних навантажень в енергосистемі останнім часом зростає, і пристрої фільтрації вищих гармонік струму мають відповідати все більш жорстким нормативним обмеженням показників параметрів електричної енергії [1, 2]. У сукупності всі ці чинники сприяють пошуку оптимальних варіантів для досягнення покращення ЕМС споживача з мережею електроживлення, а саме: можливостей зменшення нелінійних завад, втрат енергії, впливу на чутливість обладнання, збільшення його продуктивності та терміну служби.

Одним із способів покращення ЕМС може бути використання гібридних фільтрів [3],

що поєднують у собі переваги пасивних (ПФ) та активних (АФ) фільтрів. У роботі [4] проведено порівняльний аналіз застосування ПФ для покращення якості електричної енергії, що споживається випрямлячем з ємнісним фільтром та активним навантаженням. Порівнювались два варіанти ПФ, встановлених на вході випрямляча,

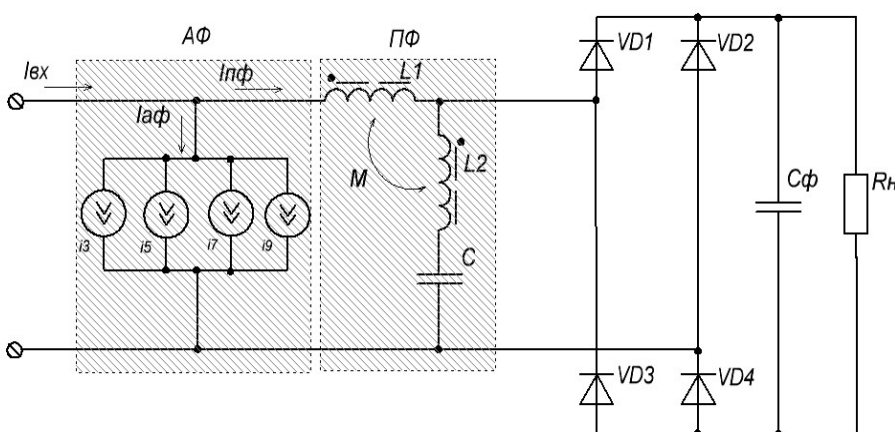


Рис. 1

випрямляча, а саме лінійного реактора та широкосмугового LMC-фільтра [5].

**Метою даної роботи** є порівняльний аналіз використання для фільтрації струмів споживання випрямлячем тільки ПФ та гібридного фільтра, що поєднує у своєму складі активний фільтр та пасивні фільтри, що розглядалися в роботі [4]. На рис. 1 наведено схему гібридного фільтра, що складається з пасивного LMC-фільтра та активного фільтра паралельного типу [6, 7]. Для спрощення моделювання активний фільтр представлений паралель-

ним з'єднанням джерел струму, що генерують струм  $I_{a\phi}$ , який можна виразити рядом Фур'є як суму гармонік різної амплітуди та фази. Миттєве значення  $I_{a\phi}$  генерується як різниця між миттєвими значеннями повного струму навантаження та його першої гармоніки. Індуктивності  $L1$ ,  $L2$  та взаємодуктивність  $M$  пасивного фільтра реалізуються реактором із загальним магнітним осердям та немагнітним зазором. Індуктивність  $L2$  включена послідовно з ємністю конденсатора  $C$   $LMC$ -фільтра, на вихід якого включено однофазний мостовий випрямляч (діоди  $VD1$ - $VD4$ ) з ємнісним фільтром  $C\phi$  і опором навантаження  $R_n$ .

Складання струму активного фільтра ( $I_{a\phi}$ ) зі струмом пасивного фільтра ( $I_{n\phi}$ ) забезпечує споживання з мережі живлення вхідного струму ( $I_{вх}$ ) синусоїдальної форми, що за фазою збігається з напругою мережі. Розглянемо детальніше результати моделювання процесів, що виникають у цій схемі та в інших варіантах підключення такого випрямляча.

У таблиці наведено параметри, що характеризують варіанти використання за напруги живлення 220 В однофазних випрямлячів для активного навантаження потужністю 5 кВт з ємністю конденсатора фільтра  $C\phi=5000$  мкФ для всіх п'яти варіантів. Найбільш значущими вважались третя, п'ята, сьома та дев'ята гармоніки.

Варіант		$I_{вх}$ , А	$I_{г.м.с.а\phi}$ , А	$I_{mа\phi}$ , А	$U_n$ , В	$I_n$ , А	$THDi$ , %	$I_3$ , %	$I_5$ , %	$I_7$ , %	$I_9$ , %
1	Без фільтру	40,3	-	-	288,6	17,4	132,6	90,3	73,0	51,6	30,3
2	<i>Лл.р.</i>	33,8	-	-	284,8	17,8	95,1	79,2	47,5	19,0	6,6
3	<i>LMC</i>	31,6	-	-	303,8	16,5	18,3	15,7	2,5	3,1	3,2
4	<i>Лл.р. +AF</i>	24,2	23,3	48,8	285,1	17,6	2,6	0,8	0,4	0,3	0,3
5	<i>LMC+AF</i>	31,1	5,6	10,1	303,9	16,5	2,7	0,2	0,05	0,11	0,04

Ці параметри визначено за допомогою математичних моделей, реалізованих пакетами програм *Micro-Cap* та *Omega*. Адекватність цих моделей підтверджено експериментально в роботі [4].

У варіанті № 1 розглядається безпосереднє увімкнення навантаження через випрямляч до мережі. Коефіцієнт гармонік струму ( $THDi$ ) перевищує 130 %, що свідчить про споживання з мережі струму імпульсної форми та внесення в мережу значних спотворень. Для другого варіанту використовується як найпростіший фільтр 3 % лінійний реактор (*Лл.р.*) з індуктивністю 0,5 мГн (що обирається з міркувань балансу між напругою навантаження та граничним падінням напруги на цьому реакторі [8]). Цей варіант теж не вносить суттєвих покращень у форму вхідного струму та має неприпустимо високий  $THDi=95,1$  %. У разі використання  $LMC$ -фільтра [4] з параметрами  $L1=5,3$  мГн,  $L2=1,23$  мГн та  $C=170$  мкФ за напруги навантаження  $300\pm 10$  % В отримати нормативні показники також неможливо:  $THDi$  хоч і покращується, але знаходиться на рівні 18 %. Звичайно ж, можна використовувати якісніший  $LMC$ -фільтр, але неприпустимо великі ціна та масогабаритні показники такого фільтра обмежують їх використання.

Оскільки попередні варіанти фільтрації струму не забезпечують нормативні показники ЕМС, розглянемо як можна цього досягти з допомогою гібридних фільтрів (додамо до цих варіантів активний фільтр). У процесі моделювання задамося величиною  $THDi < 3$  % при 5 кВт з  $U_n=300\pm 10$  % В.

Підключимо паралельно до входу випрямляча активний фільтр у конфігурації з 3 % реактором. Слід зазначити, що без обмежуючого реактора на етапі перехідних процесів у схемі виникає пусковий сплеск струму, що в разі перевищує номінальний, і призводить до виведення з ладу АФ. Тому робота активного фільтра без спеціальних засобів обмеження струму на момент запуску неможлива. На рис. 2 зображено вхідний струм  $I_{вх}$  близької до синусоїдальної форми, отриманий після корекції струму  $I_{n\phi}$  струмом  $I_{a\phi}$ , а також спектрограми, де за віссю абсцис відкладено номери гармонік, а за віссю ординат – їх відсоткові величини відносно основної частоти. Спектральний аналіз вхідного струму до корекції (масштаб 80 %) та після (масштаб 2 %, рис. 2) показує, що коефіцієнт гармонік струму знижується в 37 разів. З таблиці (варіант 2 та 4) видно, що коефіцієнт гармонік струму вдалося знизити

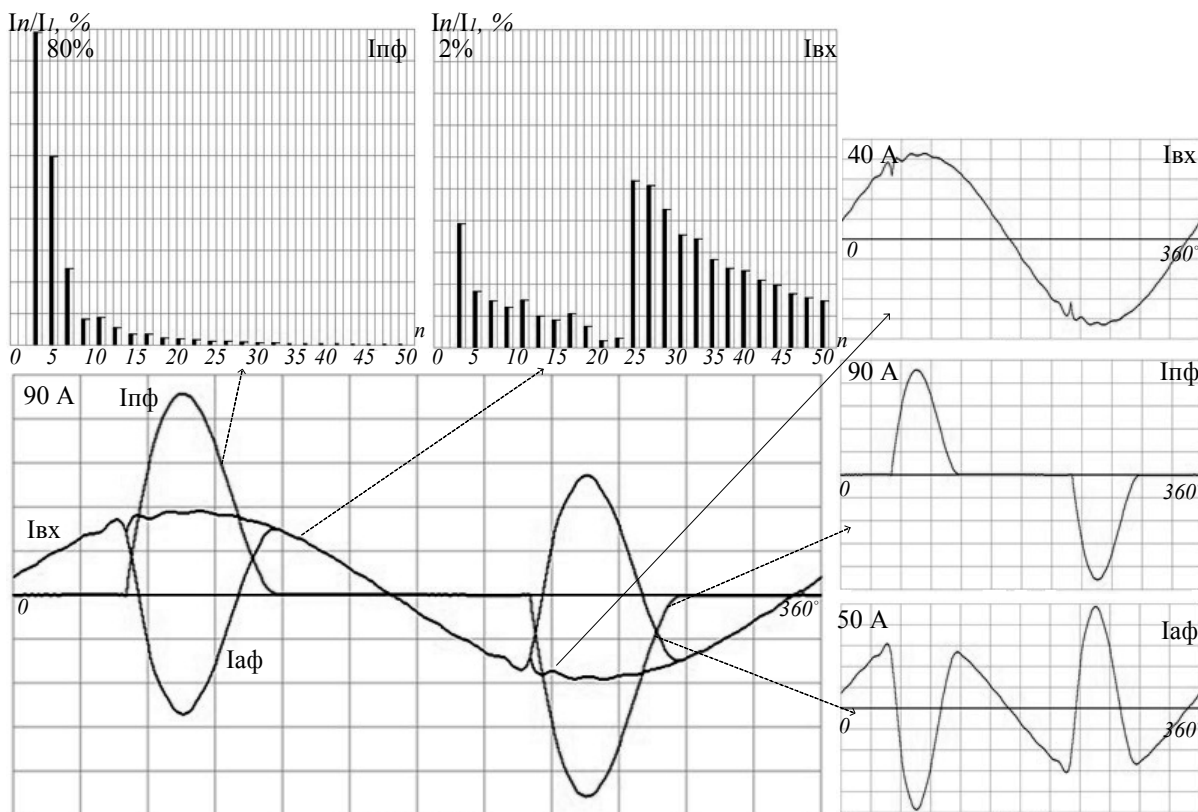


Рис. 2

ти до рівня, меншого за 3 %, не змінюючи навантажувальну характеристику. Проте для досягнення такого рівня фільтрації потрібно підключати активний фільтр з діючим значенням струму в 23,3 А, а максимальне миттєве значення струму, що слід подати в протифазі, складає майже 50 А. Для того, щоб знизити діюче значення (*r.m.s.*) струму активного фільтра, а

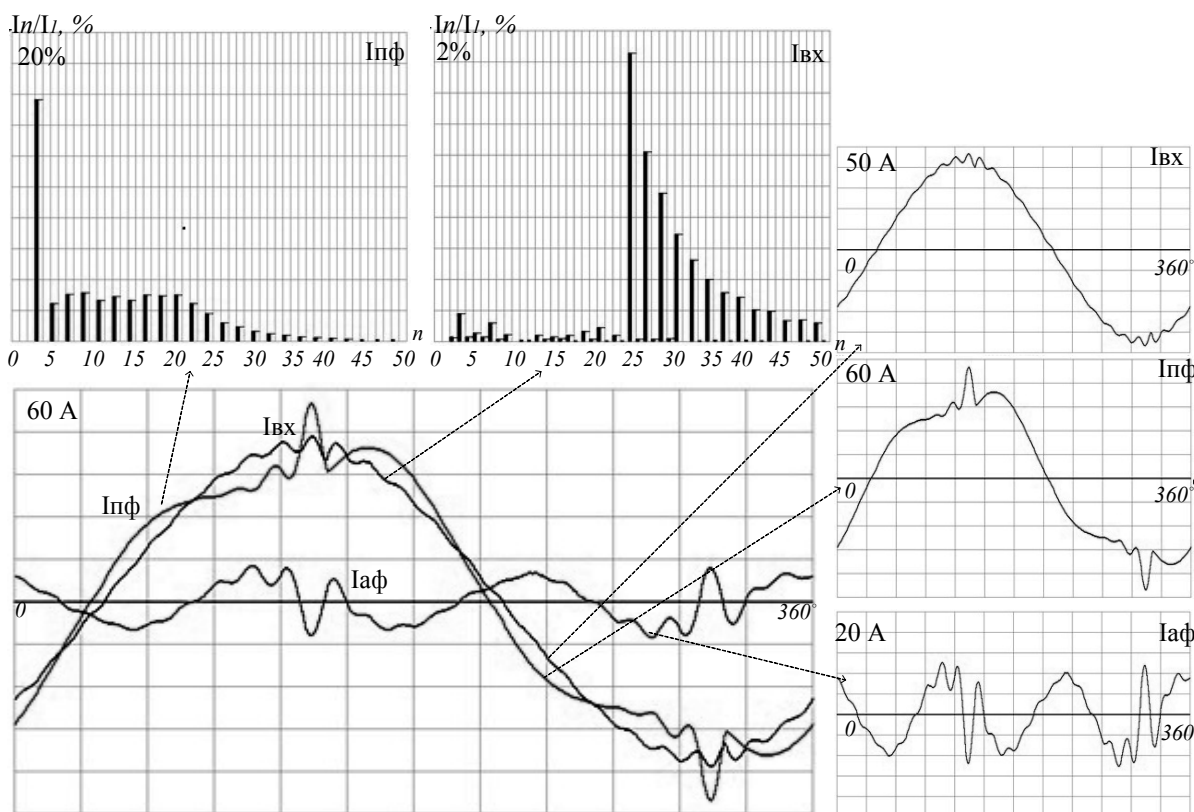


Рис. 3

отже, його масогабаритні показники і відповідно вартість, промодельюємо варіант гібриду, до складу якого включений раніше досліджений пасивний ЛМС-фільтр. На рис. 3 зображено епюри струму живлення пасивного фільтра  $In\phi$  з характерним комутаційним сплеском струму активного фільтра  $Ia\phi$ , який є в протифазі до  $In\phi$ . Сформований таким чином результуючий струм  $I_{\Sigma}$  є близьким до синусоїдального. Спектр такого струму до (масштаб 20 %) та після підключення АФ (масштаб 2 %, див. рис. 3) свідчить, що коефіцієнт гармонік струму знизився з 18,3 до 2,7 %, що є відмінним результатом. Водночас діюче значення струму активного фільтра вдалося знизити порівняно з використанням 3 % реактора з 23,3 А до 5,6 А, а амплітудне – з 48,8 до 10,1 А.

Предметом наступних досліджень має бути пошук оптимального співвідношення активної та пасивної частин однофазного гібридного фільтра з погляду подальшого покращення коефіцієнта потужності, масогабаритних та вартісних показників цих фільтрів.

**Висновки.** Моделювання показало, що підвищення якості електричної енергії найбільш ефективно досягається шляхом використання гібридних, а не виключно активних фільтрів. У варіанті 5, що забезпечує нормативні (і навіть кращі) показники THDi, досягнуто зменшення діючого значення струму активного фільтра в 4 рази, а амплітудного – у 5 разів за рахунок використання у функції ПФ ЛМС-фільтра замість 3 % реактора.

*Фінансується за держбюджетною темою: "Розробка електронного та електротехнічного обладнання для нової технології плавлення та обробки скла та гірських порід індукційними струмами середнього діапазону частот" (шифр «Розплав»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ Президії НАН України 05.07.2016 р., протокол № 11. Державний реєстраційний номер теми 0117U002584.*

1. IEC 61000-3-12:2011. Electromagnetic compatibility. Part 3-2: Limits.-Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current  $>16A$  and  $\leq 75A$  per phase. (дата звернення 10.09.2019).
2. Жаркін А.Ф., Палачов С.О., Новський В.О. Нормативно-правове регулювання якості напруги в електричних мережах з джерелами розосередженої генерації. Київ: Наш формат. 2018. 160 с.
3. Rashid Muhammad H.. Power Electronics Handbook. N.-Y. Academic Press. 2001. 876 p.
4. Губаревич В.Н., Маруня Ю.В. Однофазний широкополосний ЛМС-фільтр на вході випрямителя с емкостной нагрузкой. *Вестник НТУ Харьковський політехнічний інститут*. 2015. Вип. 12 (1121). С. 398–401.
5. Levin M, Volkov I. Patent USA 2006/0197385b A1, Sep.7, 2006.
6. Волков И.В., Стяжкін В.П., Подейко П.П. Подавление гармоник тока питания мощных однофазных нагрузок. *Технічна електродинаміка*. 2019. Вип. 5. С. 36–49.
7. Волков И.В., Стяжкін В.П., Подейко П.П. Топология фильтрокомпенсирующих устройств для улучшения спектра входного тока источников питания в электротермических установках из производства базальтового супертонкого волокна. *Технічна електродинаміка*. 2018. Вип. 6. С. 85–88.
8. Волков И.В. Новая концепция построения силовых цепей частотно-регулируемых асинхронных электроприводов. *Технічна електродинаміка*. 1999. Вип. 4. С. 21–26.

УДК 621.314

## ОДНОФАЗНЫЙ ГИБРИДНЫЙ ФИЛЬТР НА ВХОДЕ ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ЕМКОСТНЫМ ФИЛЬТРОМ И АКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

Ю.В. Маруня

Институт электродинамики НАН Украины  
пр. Победы 56, Киев, 03057, Украина

*Рассмотрены способы улучшения качества электрической энергии однофазного мостового выпрямителя с емкостным фильтром и активной нагрузкой. Проведено математическое моделирование устройств фильтрации тока для такой установки и приведены их расчетные характеристики. Установлены преимущества использования гибридного фильтра, состоящего из активного фильтра и пассивного ЛМС-фильтра. Библиограф. 8, рис. 3, таблица.*

**Ключевые слова:** гибридный фильтр, реактивные элементы, активная нагрузка, емкость.

**SINGLE-PHASE HYBRID FILTER AT THE INPUT OF THE RECTIFIER WITH A CAPACITIVE FILTER AND ACTIVE LOAD**

**Yu.V. Marunya**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

*Ways to improve the electrical energy quality of single-phase bridge rectifier with capacitive filter and active load are considered. Mathematical modeling of current filtration devices for such installation is performed and their calculation characteristics are given. The advantages of using a hybrid filter consisting of an active filter and a passive LMC filter have been established. References 8, figures 3, table.*

**Key words:** hybrid filter, reactive elements, active load, capacity.

1. IEC 61000-3-12: 2011. Electromagnetic compatibility. Part 3-2: Limits.-Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input currents  $> 16\text{A}$  and  $\leq 75\text{A}$  per phase. (accessed 10.09.2019).
2. Zharkin A.F., Palachev S.O., Novsky V.A. Regulatory regulation of voltage quality in electrical networks with sources of dispersed generation. Kyiv: Our format. 2018. 160 p.(Ukr)
3. Rashid Muhammad H.. Power Electronics Handbook. N.-Y. Academic Press. 2001. 876p.
4. Hubarevich V.N., Marunya Yu.V. Single-phase wideband LMC filter at the input of a rectifier with capacitive load. Vestnik NTU. *KhPI*. 2015. No 12 (1121) Pp. 398–401.(Rus)
5. Levin M., Volkov I.. US Patent 2006 / 0197385b A1, Sep 7, 2006.
6. Volkov I.V., Styazhkin V.P., Podayko P.P. Suppression of harmonics of current of supply of powerful single-phase loadings. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 5. Pp. 36–49. (Rus)
7. Volkov I.V., Styazhkin V.P., Podayko P.P. Topology of filter compensating devices for improving the input current spectrum of power sources in electrothermal installations for the production of basalt superfine. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 6. Pp. 85–88. (Ukr)
8. Volkov I.V. New concept of construction of power circuits of frequency-controlled asynchronous electric drives. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 1999. No 4. Pp. 21–26. (Rus)

Надійшла 16.10.2019  
Received 16.10.2019