

**ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ АКТИВНОГО КОРЕКТОРА ФОРМИ СТРУМУ
У СКЛАДІ ГІБРИДНОГО ФІЛЬТРУ АЛГОРИТМОМ ПЕРЕКЛЮЧЕННЯ
ТРАНЗИСТОРІВ ІНВЕРТОРА**

В.М. Спірін*, докт.техн.наук, **В.М. Губаревич****, канд.техн.наук, **П.П. Подейко*****, канд.техн.наук,
Ю.В. Маруня****

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: sspirin@ied.org.ua

Визначено алгоритм переключення транзисторів інвертора активного коректора форми струму, який дає змогу зменшити максимальну частоту їхнього переключення або індуктивність реактора інвертора активного коректора форми струму у гібридному фільтрі, що складається з каскадного з'єднання паралельного активного фільтра та послідовно-паралельного пасивного LMC-фільтра. Бібл. 10, рис. 5.

Ключові слова: активний коректор форми струму, гібридний фільтр, інвертор.

Проблемі покращення показників якості електроенергії присвячено багато праць у світовій літературі, адже частка нелінійних навантажень в енергосистемі останнім часом зростає, і пристрої фільтрації вищих гармонік струму повинні відповідати все більш суворим нормативним обмеженням показників параметрів електричної енергії [1-3]. Задля покращення показників якості електроенергії виникає необхідність в використанні додаткових засобів, наприклад, паралельних активних фільтрів вищих гармонік струму [4-8].

У статтях [4, 9] проаналізовано роботу активного коректора форми струму (АКФС) на однофазний мостовий випрямляч з ємнісним фільтром та активним навантаженням за $Ll=3$ мГн та $Cf=4700$ мкФ і максимального амплітудного значення його струму $I_{max}=50$ А. Принцип дії АКФС полягає у формуванні струму, що є різницею між бажаною синусоїдою споживаного струму основної частоти і миттєвим значенням струму навантаження.

Останнім часом з'явилися публікації, в яких наголошується, що найбільш доцільним є використання у потужних однофазних навантаженнях гібридних фільтрів. Ці гібридні фільтри складаються з каскадного з'єднання паралельних активних фільтрів та послідовно-паралельних пасивних LMC-фільтрів [10].

У разі використання гібридних фільтрів показники якості електроенергії мережі живлення в основному обумовлені властивостями активного коректора, а його потужність залежить від характеристик пасивного фільтра, який ефективно пригнічує вищі гармоніки випрямляча та зменшує амплітуду струму на своєму вході.

Метою роботи є оптимізація елементів АКФС у складі гібридного фільтра завдяки вибору належного алгоритму переключення транзисторів інвертора.

У роботі [9] проведено оптимізацію електромагнітних елементів-реакторів з різними матеріалами осердь та визначено формулу для частоти імпульсної модуляції

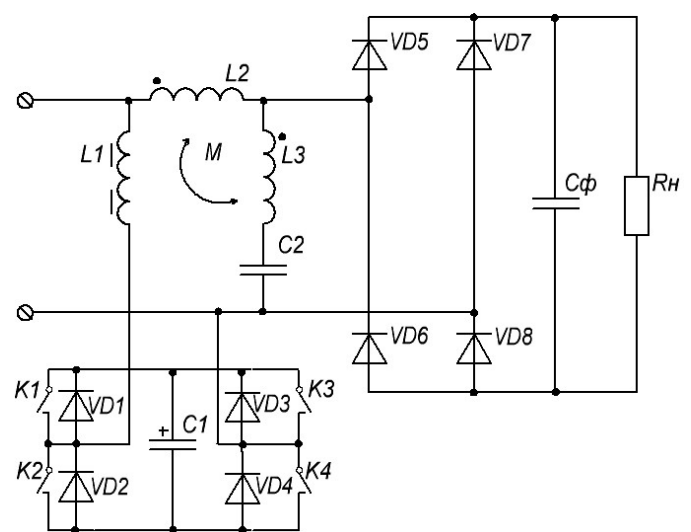


Рис. 1

© Спірін В.М., Губаревич В.М., Подейко П.П., Маруня Ю.В., 2020
 ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0002-8065-1051>, ** <https://orcid.org/0000-0003-2416-9858>,
 *** <https://orcid.org/0000-0001-9201-102X>, **** <https://orcid.org/0000-0003-0071-1702>

$F_m = \frac{U_c}{2L_1 \cdot \Delta I} [1 - (a \cdot \sin x)^2]$, яка пов'язує такі параметри схеми, як індуктивність реактора L_1 , коефіцієнт високочастотних пульсацій $mI = \Delta I / 2I_{max}$, де ΔI – ширина зони гістерезису релейного елемента, $a = U_m / U_{C1}$, U_{C1} – напруга на конденсаторі C_1 та $x = \omega t$ – кругова частота. З цієї формули визначено також максимальну частоту імпульсної модуляції за $x = 0$, яка має вигляд $F_{max} = u_{C1} / 2L_1 \cdot \Delta I$.

На рис. 1 показано принципову схему гібридного фільтру, який складається з активного коректора форми струму та пасивного LMC-фільтру та має за навантаження однофазний мостовий випрямляч з ємнісним фільтром і активним опором. АКФС в такій схемі може працювати в наступних станах реактора L_1 : «накопичення енергії – прискорена її віддача», «прискорене

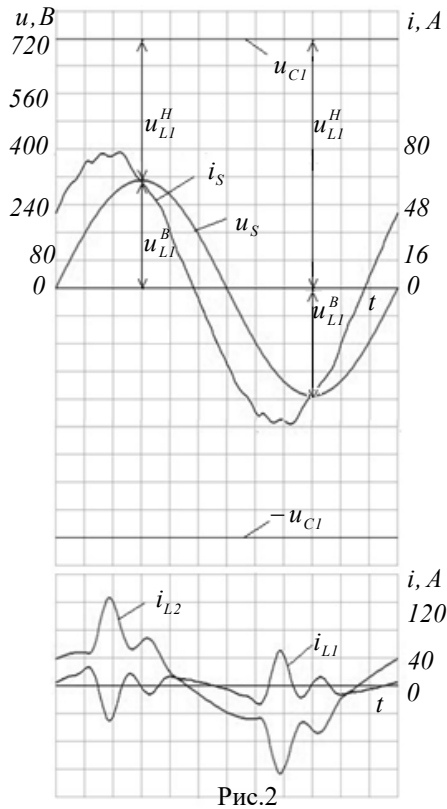


Рис.2

накопичення енергії – її віддача», «накопичення енергії – її віддача». Саме останній стан розглядається у цій роботі. Для його реалізації пропонується новий алгоритм роботи ключів мостового інвертора, який полягає у тому, що на інтервалі накопичення енергії вмикаються ключі K_1 та K_4 , а на інтервалі віддачі вмикаються ключі K_2 та K_4 . При цьому ключ K_3 залишається незадіяним під час роботи, і він може бути вилучений зі схеми, тобто досягається зменшення на чверть кількості напівпровідникових елементів.

Комп'ютерне моделювання такої схеми було реалізовано в спеціалізованій програмі *Omega 2010*, розробленій в Інституті електродинаміки НАН України. Параметри схеми для моделювання обиралися для проведення порівняння АКФС з [9] за умови забезпечення рівності максимального амплітудного значення струму АКФС $I_{L1 max} = 50$ А, ($I_{L1 rms} = 16,91$ А) і були наступними: напруга живлення 230 В, частота напруги 50 Гц, потужність навантаження 10 кВт ($U_H = 300 \pm 10\%$ В), $L_1 = 3$ мГн та $C_1 = 4700$ мкФ, ємність конденсатора фільтра $C_f = 10000$ мкФ; LMC-фільтр, представлений реактором з індуктивностями $L_2 = 3$ мГн, $L_3 = 8$ мГн та конденсатором з ємністю $C_2 = 170$ мкФ, має $THDi = 30\%$. В результаті проведеного моделювання було отримано епюри струмів через реактори L_1 та L_2 під час імпульсної модуляції, які наведено на рис. 2.

Як видно з рис. 2, струм i_{L2} на вході LMC-фільтра має значні спотворення у діапазоні $x = \pi/6 - 5\pi/6$, тому максимум частоти імпульсної модуляції має бути у цьому діапазоні. На інтервалі накопичення енергії, коли увімкнені ключі K_1 та K_4 , напруга на реакторі L_1 $u_{L1}^H = U_{C1} - u_S$. В режимі віддачі при увімкнених ключах K_2 та K_4 напруга на реакторі L_1 дорівнює $u_{L1}^B = u_S$. Тривалість інтервалів накопичення ΔT_H та віддачі ΔT_B визначається наступними формулами $\Delta T_H = L_1 \cdot \Delta I / u_{L1}^H$ та $\Delta T_B = L_1 \cdot \Delta I / u_{L1}^B$. Частота імпульсної модуляції визначається як

$$F_m = 1 / (\Delta T_H + \Delta T_B), \quad F_m = u_S (U_{C1} - u_S) / U_{C1} L_1 \cdot \Delta I.$$

Напруга мережі живлення змінюється відповідно формули $u_S = U_m \sin \omega t$ і, за позначенням відношень $U_m / U_{C1} = a$ та $\omega t = x$, частота імпульсної модуляції буде мати наступний вираз:

$$F_m = (U_{C1} / L_1 \cdot \Delta I) (a \sin x - a^2 \sin^2 x) \quad (1)$$

Формула (1) дає параболічний, неоднозначний по аргументу a характер зміни функції F_m і має максимальне значення за $x = \pi/2$ та $U_{C1} = 720$ В, $L_1 = 3,0$ мГн, $\Delta I = 6$ А, $a = 0,5$

$$F_{max} = u_{C1} / 4L_1 \cdot \Delta I \quad (2)$$

Слід зазначити, що це значення $F_{max} = 10$ кГц, отримане з формули (2), вдвічі менше за аналогічне

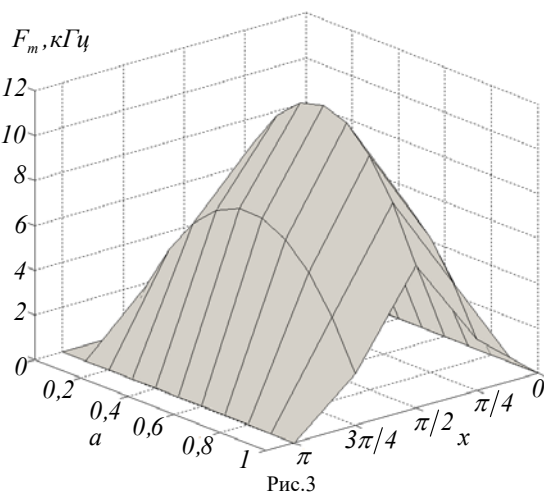
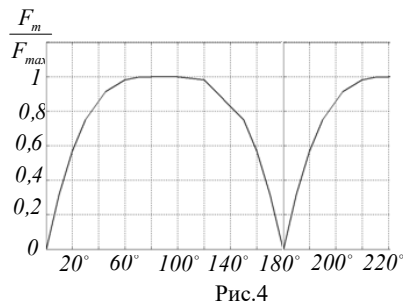


Рис.3

значення $F_{max}=20$ кГц, що визначене за формулою $F_{max} = u_{C1}/2L1 \cdot \Delta I$ за тих самих значеннях $U_{C1}=720$ В, $a=0,472$, $L1=3,0$ мГн, $\Delta I =6$ А. На рис. 3 та 4 відповідно показано поверхню відгуку функції F_m та графічну залежність зміни функції F_m/F_{max} за постійного значення $a=0,5$.



Для розрахунку втрат в магнітопроводі дроселя практичний інтерес представляє середнє значення частоти імпульсної модуляції F_S за період мережевої напруги. З (1) находимо

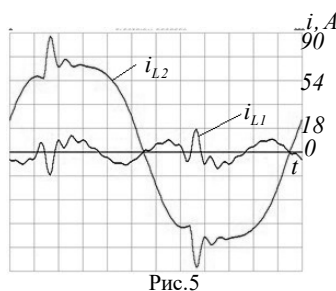
$$F_S = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_m dx, \quad F_S = F_{max}(8a/\pi - 2a^2).$$

Для однофазного активного коректора форми струму за максимальної амплітуди напруги $U_m=340$ В, $U_{C1}=720$ В, $a=0,5$, $F_{max}=10$ кГц середня частота імпульсної модуляції складає $F_S=7,73$ кГц. Це значення значно менше за частоту імпульсної модуляції, яка визначена, коли активний коректор форми струму працює в

стані реактора «накопичення – прискорена віддача енергії», який було розглянуто у роботі [9], і складає $F_S=16,8$ кГц за $U_m=340$ В, $U_{C1}=720$ В, $a=0,5$.

З метою підвищення ефективності використання встановленої потужності АКФС у складі гібридного фільтра було досліджено можливість впливу на його показники зміни параметрів пасивного фільтра. Проведено моделювання зі скоригованими параметрами реакторів $L2$ та $L3$ за незмінного значення $C2$ та початкових параметрів схеми (рис. 2). За $L2=5,3$ мГн, $L3=1,23$ мГн маємо $THDi=12\%$, а максимальне амплітудне значення струму АКФС склало $I_{L1 max}=16,98$ А та діюче

$I_{L1 rms}=6,5$ А. Результати моделювання наведено на рис. 5, де i_{L1} та i_{L2} – струми АКФС та пасивного



LMC -фільтра відповідно. Ці значення струмів АКФС майже втричі менші за аналогічні (за тих же параметрах навантаження), коли використовувався АКФС з максимальним амплітудним значенням струму $I_{L1 max}=50$ А, ($I_{L1 rms}=16,91$ А) в поєднанні з LMC -фільтром, результати моделювання якого наведено на рис. 2. Потужність АКФС за рахунок нових обраних параметрів пасивного LMC -фільтра вдалося зменшити з 4 кВт до 1,5 кВт. Формулу (2) можна записати у наступному вигляді: $F_{max} \cdot L1 = u_{C1}/4 \cdot \Delta I$. З неї видно, що добуток

$F_{max} \cdot L1$ має розмірність опору і його доцільно розглядати як

внутрішній опір АКФС. В свою чергу, максимальна частота імпульсної модуляції F_{max} зумовлює втрати безпосередньо в транзисторах інвертора та у реакторі $L1$. Таким чином встановлено, що запропонований в цій роботі алгоритм переключення транзисторів інвертора дає змогу зменшити максимальну і середню частоту імпульсної модуляції вдвічі та втрати потужності у транзисторах інвертора на 62,5% в порівнянні з алгоритмом переключення, який був застосований у роботі [9]. Оптимізація параметрів у пасивному LMC -фільтрі дає змогу зменшити в три рази струм через елементи АКФС. Цей алгоритм можливо використовувати як в АКФС, так і в гібридному фільтрі.

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» (шифр «Розплав»), номер держ. реєстрації 0117Г002584, КПКВК 6541030.

1. Muhammad H. Rashid. Power Electronics Handbook. N.Y: Academic Press, 2001. 876 p.
2. Electromagneticcompatibility. Part 3-2: Limits. Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current >16A and ≤ 75A per phase. IEC 61000-3-12:2011.
3. 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.
4. Комаров М.С., Головка О.О., Булатов А.Ю., Подейко П.П. Енергозберігаючі технології в комп'ютерних класах та навчальних лабораторіях закладів освіти. Вісник КНУТД. 2013. № 6. С. 278-286.
5. Кулинич Ю.А., Духовников В.К. Активный компенсатор реактивной мощности как средство улучшения качества потребляемой энергии. Наука и транспорт. 2010. № 3 (28). С. 38-40.
6. Кучеренко Д.В., Сафронов П.С. Паралельный активный фильтр высших гармоник тока. Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2013. № 18 (991). С. 41-46.

7. Стаценко О.В. Аналіз роботи паралельного активного коректора струму з релейним керуванням. *Вісник КНУТД*. 2015. № 5 (90). С. 113-117.
8. Bose B. K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall PTR, 2002. 711 p.
9. Комаров М.С., Спірін В.М., Губаревич В.М., Подейко П.П., Маруня Ю.В. Оптимізація електромагнітних вузлів –реакторів з різними матеріалами осердь для активних коректорів форми струму. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. № 4 (2). Спец. вип. Том 2. С. 71-74.
10. Волков І.В., Стяжкін В.П., Подейко П.П. Топологія фільтрокомпенсуючих пристроїв для покращення спектра вхідного струму джерел живлення в електротермічних установках із виробництва базальтового супертонкого волокна. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 6. С. 85-88.
DOI: <https://doi.org/10.15.407/techned2018.06.085>

УДК 621.314

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АКТИВНОГО КОРРЕКТОРА ФОРМЫ ТОКА В СОСТАВЕ ГИБРИДНОГО ФИЛЬТРА АЛГОРИТМОМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ ИНВЕРТОРА

В.М. Спири́н, докт.техн.наук, **В.М. Губаревич**, канд.техн.наук, **П.П. Подейко**, канд.техн.наук, **Ю.В. Маруня**
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: sspirin@ied.org.ua

Определен алгоритм переключения транзисторов инвертора активного корректора формы тока, который позволяет уменьшить максимальную частоту их переключения или индуктивность реактора инвертора активного корректора формы тока в гибридном фильтре, состоящем из каскадного соединения параллельного активного фильтра и последовательно-параллельного пассивного LMC-фильтра. Библиограф. 10, рис. 5.

Ключевые слова: активный корректор формы тока, гибридный фильтр, инвертор.

OPTIMIZATION OF ACTIVE CORRECTOR ELEMENTS OF CURRENT FORM IN COMPOSITION OF HYBRID FILTER BY ALGORITHM OF SWITCHING OF INVERTER TRANSISTORS

V.M. Spirin, V.M. Gubarevich, P.P. Podieko, Yu.V. Marunya
Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine,
56, Peremohy Ave., Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: sspirin@ied.org.ua

The algorithm for switching transistors of the inverter of the active corrector of current form is defined, which allow to reduce the maximum frequency of their switching or the inductance of the reactor of the active corrector of current form in a hybrid filter, which consists of a cascade connection of a parallel active filter and a series-parallel passive LMC-filter. References 10, Figures 5.

Keywords: active corrector of current form, hybrid filter, inverter.

1. Muhammad H. Rashid. *Power Electronics Handbook*. N.Y.: Academic Press, 2001. 876 p.
2. Electromagneticcompatibility. Part 3-2: Limits. Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input currents >16A and ≤ 75A per phase. IEC 61000.3.12:2011.
3. Zharkin A.F., Palachev S.O., Novsky V.A. *Regulatory regulation of voltage quality in electric networks with sources of dispersed generation*. Kyiv: Nash format, 2018. 160 p. (Ukr)
4. Komarov M.S., Golovko O.O., Bulatov A.Yu., Podyeko P.P. Energy-saving technologies in computer classrooms and educational labs in educational institutions. *Visnyk KNUVD*. 2013. No 6. Pp. 278-286. (Ukr)
5. Kulinich Yu.A., Dukhovnikov V.K. Active reactive power compensator as a means of improving the quality of energy consumed. *Nauka i Transport*. 2010. No 3 (28). Pp. 38-40. (Rus)
6. Kucherenko D.V., Safronov P.S. Parallel active filter of higher harmonics of current. *Visnyk NTU KhPI. Series: Novi rishennia v suchasnykh tekhnologiiakh*. 2013. No 18 (991). Pp.41-46. (Rus)
7. Statsenko O.V. Analysis of parallel active current corrector operation with relay control. *Visnyk KNUVD*. 2015. No 5 (90). Pp. 113-117. (Ukr)
8. Bose B. K.. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall PTR, 2002. 711 p.
9. Komarov M.S., Spirin V.M., Gubarevich V.M., Podyeko P.P., Marunya Yu.V. Optimization of electromagnetic units-reactors with different core materials for active correctors of current form. *Electrical Engineering and Electromechanics*. 2016. No 4 (2). Special edition. Vol. 2. Pp. 71-74. (Ukr)
10. Volkov I.V., Styazhkin V.P., Podyeko P.P. Topology of filter compensating devices for improving the input current range of power sources in electrothermal installations for the production of basalt superfine. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 6. Pp. 85-88. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15.407/techned2018.06.085>

Надійшла 28.02.2020

Остаточний варіант 21.05.2020