

УДК-621.314

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.023>

**ЯКІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОФАЗНОГО МОСТОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА
З АКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ТА ЄМНІСНИМ ФІЛЬТРОМ
У РАЗІ ЖИВЛЕННЯ ВІД ДЖЕРЕЛА СТРУМУ**

В.М. Спирін*, докт.техн.наук, **В.М. Губаревич****, канд.техн.наук, **Ю.В. Маруня*****, **С.В. Салко**,
Інститут електродинаміки НАН України
пр. Перемоги 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: sspirin@ied.org.ua

Досліджено електромагнітні процеси в однофазному мостовому випрямлячі з активним навантаженням та ємнісним фільтром при живленні його від симетричного індуктивно-ємнісного перетворювача (ІЄП), виконаного за схемою T1-LCL, та проведено порівняння його якісних характеристик з ІЄП за схемою Г1-LC. Схема T1-LCL має кращі показники електромагнітної сумісності ($\cos \varphi = 0,95 \div 0,99$, $THDi < 3\%$), ніж схема з Г1-LC, але у неї більша питома потужність конденсатора. Бібл. 10, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: випрямляч, активне навантаження, ємнісний фільтр, індуктивно-ємнісний перетворювач, електромагнітна сумісність.

Вступ. Дослідженню електромагнітних процесів в однофазному мостовому випрямлячі з активним навантаженням та ємнісним фільтром, а також покращенню електромагнітної сумісності такого випрямляча з електричною мережею живлення, присвячено багато робіт [1–4]. В той же час, зовсім мало публікацій по дослідженню розглянутого в статті випрямляча при живленні його від джерела струму. В роботах [5–6] розглянуто електромагнітні процеси в випрямлячі з активним навантаженням та ємнісним фільтром при живленні від індуктивно-ємнісного перетворювача (ІЄП) джерела напруги в джерело струму по схемі Г1-LC згідно з класифікацією, наведеною у роботі [7].

Дослідження електромагнітних процесів в системі «ІЄП – однофазний мостовий випрямляч з активним навантаженням та ємнісним фільтром» дозволило продемонструвати, що ця система має хорошу електромагнітну сумісність з мережею живлення ($THDi < 3\%$), але низький $\cos \varphi = 0,29 \div 0,67$ в діапазоні варіювання потужності навантаження від 0,3 до 1,2 кВт.

Метою даної роботи є визначення якісних характеристик в системі «однофазний симетричний індуктивно-ємнісний перетворювач – мостовий випрямляч з активним навантаженням та ємнісним фільтром» та порівняння питомих потужностей реактивних елементів – реакторів та конденсаторів ІЄП по схемам T1-LCL та Г1-LC, що дозволяє отримати $\cos \varphi = 1$.

Для вирішення цієї задачі було використано елементи теорії систем незмінного струму на основі ІЄП [8]. А саме теорема, яка визначає, що коефіцієнт потужності ІЄП має максимальне значення $\cos \varphi = 1$ і не залежить від значення опору навантаження у тому випадку, коли останнє є чисто активним, а сам перетворювач виконується симетричним. На рис. 1 показано схему випрямляча, на вході якого включений симетричний ІЄП по схемі T1-LCL. Задля отримання якісних характеристик і дослідження електромагнітних процесів схеми було проведено ряд експериментів із застосуванням одного з методів математичної теорії планування експерименту [5, 9–10], а саме, ортогонального плану другого порядку, який дає достатню адекватність моделі об'єкту дослідження.

Функціями цілі Y_N є $THDi$, $\cos \varphi$, абсолютні Q та питомі q потужності Q_{L1} , q_{L1} , Q_{L2} , q_{L2} , Q_C , q_C , $S_{НІЄП}$ реакторів $L1$, $L2$ та конденсатора C , де

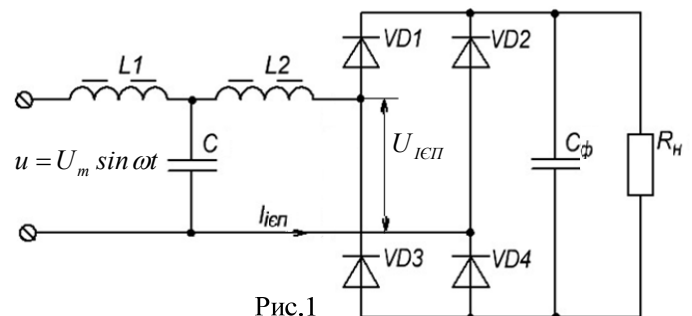


Рис.1

© Спирін В.М., Губаревич В.М., Маруня Ю.В., Салко С.В., 2020

ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0002-8065-1051>; ** <https://orcid.org/0000-0003-2416-9858>;

*** <https://orcid.org/0000-0003-0071-1702>

$$q_L = I_L^2 x_L / I_{\text{ІЄП}} \cdot U_{\text{ІЄП}} = Q_L / S_{\text{ІЄП}}, \quad q_C = I_C U_C / I_{\text{ІЄП}} \cdot U_{\text{ІЄП}} = Q_C / S_{\text{ІЄП}}, \quad S_{\text{ІЄП}} = I_{\text{ІЄП}} \cdot U_{\text{ІЄП}}.$$

За фактори, що варіюються, обрано: X_1 – відношення ємності C_Φ конденсатора фільтра до ємності C конденсатора ІЄП та X_2 – відношення опору навантаження R_H до опору реактора ІЄП $x_L = \omega L$, (де $L_1=L_2=L$). Експеримент проводився за схемою, зображеною на рис. 1, з наступними параметрами: напруга живлення 230 В, частота напруги 50 Гц, потужність навантаження варіювалась від 0,3 до 1,2 кВт. ІЄП виконано по схемі Т1-LCL з індуктивністю реакторів $L=184$ мГн і ємністю конденсатора $C=50$ мкФ. Струм і напруга на вході та виході випрямляча реєструвалися та вимірювалися приладом *CA PowerQualityAnalyzer*. Результати вимірювань та обчислень наведено у таблиці.

N	x_i						Y_N								
	x_0	x_1	x_2	x'_3	x'_4	$x_1 \cdot x_2$	THDi	cos φ	q_{L1}	q_{L2}	q_C	Q_{L1}	Q_{L2}	Q_C	$S_{\text{ІЄП}}$
1	+1	-1	-1	1/3	1/3	+1	2,7	0,963	0,342	2,6	2,62	100,72	765,82	770	294,84
2	+1	+1	-1	1/3	1/3	-1	2,7	0,974	0,345	2,64	2,67	100,72	770	781	292
3	+1	-1	+1	1/3	1/3	-1	1,4	0,95	0,98	0,648	2,13	1068,82	708	2328	1092
4	+1	+1	+1	1/3	1/3	+1	1,4	0,945	1,04	0,657	2,16	1119,0	708	2328	1078
5	+1	-1	0	1/3	-2/3	0	2,0	0,991	0,675	0,675	1,91	520,2	749	1470	770,4
6	+1	+1	0	1/3	-2/3	0	2,0	0,988	0,704	0,986	1,89	520,2	728,4	1398,4	738,4
7	+1	0	-1	-2/3	1/3	0	3,0	0,969	0,343	2,63	2,71	97,7	749	770	284,4
8	+1	0	+1	-2/3	1/3	0	1,5	0,949	1,05	0,655	2,26	1068,82	668,2	2304	1020
9	+1	0	0	-2/3	-2/3	0	2,1	0,989	0,732	0,968	1,99	520,2	688	1416,8	710,7

За попередніми дослідженнями [5], за основу були прийняті значення для діапазонів змін факторів X_1 та X_2 , що широко використовуються на практиці. Перший фактор X_1 змінювався в діапазоні від $X_{1\min}=9$ до $X_{1\max}=18$ за рахунок зміни ємності конденсатора C_Φ від 450 мкФ до 900 мкФ (основний рівень 675 мкФ, інтервал варіювання 225 мкФ). У другому факторі X_2 змінювався опір навантаження від 24 Ом до 110 Ом, (основний рівень 67 Ом, інтервал варіювання 43 Ом). При цьому $X_{2\min}=0,415$, а $X_{2\max}=1,87$.

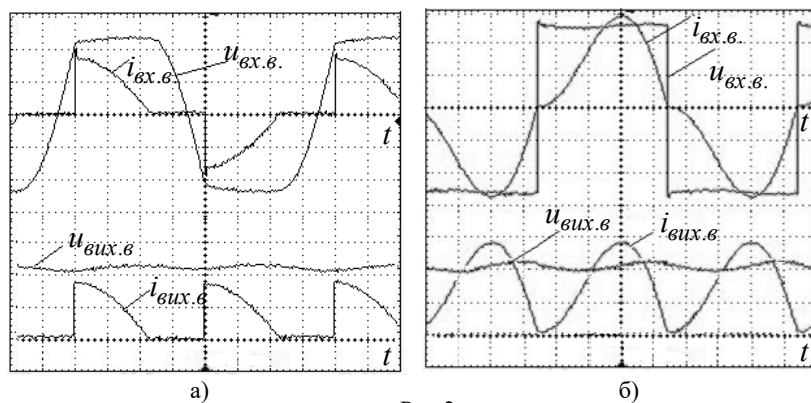


Рис.2

Як приклад для досліду № 9 (таблиця) наведено осцилограми струмів та напруг на вході та виході випрямляча, що живиться від ІЄП за схемою Г1-LC (рис. 2, а) [6], а також для порівняння такі самі струми і напруги для випадку, коли використовується симетричний ІЄП (рис. 2, б). Характер струмів для ІЄП за схемою Г1-LC має перервний вигляд, в той час симетрична схема має майже синусоїдальну форму

струму, що дозволяє розглядати її як джерело струму $i = I_m \sin \omega t$.

Після кодування факторів з урахуванням обраних інтервалів варіювання було проведено експерименти по ортогональному плану другого порядку. Матрицю планування кодованих значень факторів наведено у таблиці (розділ x_i , в якому $x'_3 = x_1^2 - 2/3$ та $x'_4 = x_2^2 - 2/3$).

На підставі реалізованого ортогонального плану другого порядку було визначено коефіцієнти поліномів b_i за формулою $b_i = \left(\sum_{N=1}^9 x_{iN} Y_N \right) \left(\sum_{N=1}^9 x_{iN}^2 \right)^{-1}$, і отримано наступні поліноми:

$$\hat{Q}_{L1} = 513,95 + 8,36x_1 + 492,92x_2 + 9,37x_1^2 + 72,43x_2^2 + 12,55x_1x_2; \quad (2)$$

$$\hat{Q}_{L2} = 697,49 - 2,74x_1 - 33,44x_2 + 36,47x_1^2 + 6,37x_2^2 - 1,045x_1x_2; \quad (3)$$

$$\hat{Q}_C = 1417,98 - 10,1x_1 + 773,17x_2 + 15,63x_1^2 + 118,43x_2^2 - 2,75x_1x_2; \quad (4)$$

$$\hat{Q}_{L\Sigma} = 1211,44 + 5,62x_1 + 459,48x_2 + 45,84x_1^2 + 78,8x_2^2 + 11,505x_1x_2; \quad (5)$$

$$\hat{S}_{\text{нїєп}} = 713,67 - 8,14x_1 + 386,46x_2 + 39,24x_1^2 - 62,96x_2^2 - 2,79x_1x_2; \quad (6)$$

$$\hat{q}_{L1} = 0,722 + 1,53 \cdot 10^{-2}x_1 + 0,34x_2 - 2,73 \cdot 10^{-2}x_1^2 - 2,03 \cdot 10^{-2}x_2^2 + 1,43 \cdot 10^{-2}x_1x_2; \quad (7)$$

$$\hat{q}_{L2} = 0,91 + 6 \cdot 10^{-2}x_1 - 0,99x_2 - 5 \cdot 10^{-2}x_1^2 + 0,76x_2^2 - 7,75 \cdot 10^{-3}x_1x_2; \quad (8)$$

$$\hat{q}_C = 1,99 + 1 \cdot 10^{-2}x_1 - 0,24x_2 - 9 \cdot 10^{-2}x_1^2 + 0,495x_2^2 - 5 \cdot 10^{-3}x_1x_2; \quad (9)$$

$$\hat{q}_{L\Sigma} = 1,6317 + 7,53 \cdot 10^{-2}x_1 - 0,645x_2 - 7,73 \cdot 10^{-2}x_1^2 + 0,7417x_2^2 + 0,65 \cdot 10^{-2}x_1x_2; \quad (10)$$

Отримані експериментально значення $Q_{L1}, q_{L1}, Q_{L2}, q_{L2}, Q_C, q_C$ відрізняються від значень $\hat{Q}_{L1}, \hat{q}_{L1}, \hat{Q}_{L2}, \hat{q}_{L2}, \hat{Q}_C, \hat{q}_C$, які розраховано за поліномами (2–4, 7–9) не більше, як на 5%.

Для зручності використання отриманих коефіцієнтів перетворення випрямляча доцільно перейти від кодованих значень факторів до їхніх натуральних значень за формулою $x_i = (X_i - X_{i\text{cp}})/(X_{i\text{max}} - X_{i\text{cp}})$, де $X_{i\text{cp}} = (X_{i\text{max}} + X_{i\text{min}})/2$, $X_{i\text{cp}}$ – основний рівень незалежної змінної X_i .

Після перетворення поліномів (2–10) маємо

$$\hat{Q}_{L1} = 39,22 - 14,97X_1 + 314,15X_2 + 0,46X_1^2 + 135,94X_2^2 + 3,82X_1X_2; \quad (11)$$

$$\hat{Q}_{L2} = 1096,72 - 48,83X_1 - 68,75X_2 + 1,79X_1^2 + 11,96X_2^2 - 0,32X_1X_2; \quad (12)$$

$$\hat{Q}_C = 658,14 - 22,11X_1 + 564,32X_2 + 0,77X_1^2 + 222,28X_2^2 - 0,84X_1X_2; \quad (13)$$

$$\hat{Q}_{L\Sigma} = 1135,96 - 63,8X_1 + 245,38X_2 + 2,25X_1^2 + 147,9X_2^2 + 3,5X_1X_2; \quad (14)$$

$$\hat{S}_{\text{нїєп}} = 322,09 - 53,11X_1 + 810,04X_2 + 1,93X_1^2 - 118,17X_2^2 - 0,85X_1X_2; \quad (15)$$

$$\hat{q}_{L1} = -0,083 + 3,48 \cdot 10^{-2}X_1 + 0,49X_2 - 1,3 \cdot 10^{-3}X_1^2 - 3,8 \cdot 10^{-2}X_2^2 + 4,3 \cdot 10^{-3}X_1X_2; \quad (16)$$

$$\hat{q}_{L2} = 3,64 + 8,26 \cdot 10^{-2}X_1 - 4,57X_2 - 2,46 \cdot 10^{-3}X_1^2 + 1,43X_2^2 - 2,36 \cdot 10^{-3}X_1X_2; \quad (17)$$

$$\hat{q}_C = 2,7 + 0,12X_1 - 2,43X_2 - 4,4 \cdot 10^{-3}X_1^2 + 0,93X_2^2 - 1,5 \cdot 10^{-3}X_1X_2; \quad (18)$$

$$\hat{q}_{L\Sigma} = 3,56 + 11,74 \cdot 10^{-2}X_1 - 4,08X_2 - 3,76 \cdot 10^{-3}X_1^2 + 1,39X_2^2 + 1,94 \cdot 10^{-3}X_1X_2. \quad (19)$$

На рис. 3 наведено графічні залежності питомих потужностей $\hat{q}_{L1}, \hat{q}_{L2}, \hat{q}_{L\Sigma}, \hat{q}_C$ схеми П1-LCL, які розраховані за поліномами (16–19) при постійному значенні фактора $X_1=18$. Для схеми П1-LC графічні залежності питомих потужностей \hat{q}_L, \hat{q}_C (позначено в дужках) було взято з роботи [6] також при постійному значенні фактора $X_1=18$. В поліномах (11–19) значення коефіцієнтів при факторі X_1 майже на порядок менші за значення коефіцієнтів при факторі X_2 , тому було визначено значення питомих потужностей $\hat{q}_{L1}, \hat{q}_{L2}, \hat{q}_{L\Sigma}, \hat{q}_C$ при одному постійному значенні фактора $X_1=18$.

Визначення похідних від фактора X_2 у поліномах (16–19) при постійних значеннях фактора $X_1=18$ вказують на те, що мінімум є у функціях $\hat{q}_{L2}, \hat{q}_{L\Sigma}, \hat{q}_C$. Це підтверджують графіки на рис. 3. Для порівняння зі схемою П1-LC було визначено похідні для функцій $\hat{q}_{L\Sigma}, \hat{q}_C$ і значення фактора X_2 , при яких ці функції мають мінімум для конденсаторів $\hat{q}_C = 1,83$ при $X_2 = 1,32$ і для реакторів $\hat{q}_{L\Sigma} = 1,51$ при $X_2 = 1,46$.

Для схеми П1-LC з рис. 3. видно, що функція \hat{q}_C тільки зростає з підвищенням опору навантаження, тому її значення обрано, орієнтуючись на мінімум функції \hat{q}_L . Цей мінімум маємо $\hat{q}_L = 1,97$ за $X_2 = 1,57$ і $X_1=18$ і $\hat{q}_C = 0,95$. Таким чином, у схемі П1-LCL сума потужностей реакторів $L1, L2$ дорівнює $\hat{q}_{L\Sigma} = 1,51$, що на 0,46 в.о. менше, ніж у ІЄП П1-LC, але остання схема має меншу потужність конденсаторів

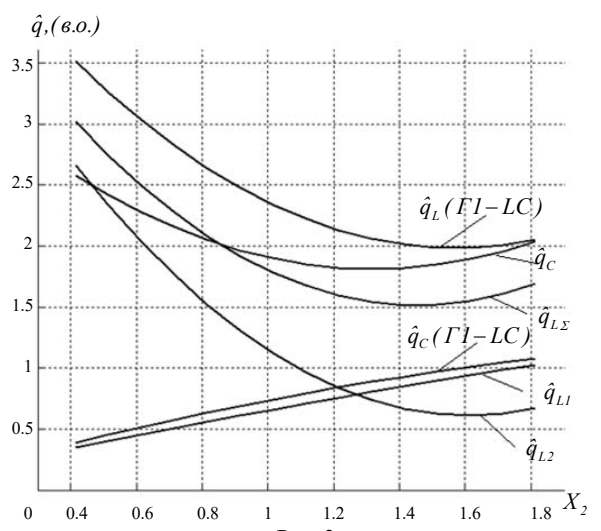


Рис. 3

($\hat{q}_C = 0,95$, що на 0,88 в.о. менша у порівнянні із схемою T1-LCL $\hat{q}_C = 1,83$ в.о.).

Це підвищення потужності до $\hat{q}_C = 1,83$ в.о. компенсується покращенням коефіцієнта потужності схеми (рис. 1) $\cos \varphi = 0,963 \div 0,99$, для отримання якого виконано умови теореми, а саме навантаження є чисто активним (рис. 2, б), а сам перетворювач являється симетричним. На рис. 4 наведено графіки залежностей \hat{Q}_{L1} , \hat{Q}_{L2} , $\hat{Q}_{L\Sigma}$, \hat{Q}_C і $\hat{S}_{\text{ІСП}}$ від фактора X_2 за постійного значення фактора $X_1 = 18$. Однією з переваг теорії планування експериментів є наочність отриманих результатів, в чому можна пересвідчитись при розгляді поверхні відгуку у двохфакторному просторі на рис. 5 для питомої потужності \hat{q}_C як одного з найбільш енергоємного елемента схеми T1-LCL – конденсатора С.

Слід зазначити, що розглянута система живлення має струмову навантажувальну характеристику [5] і може використовуватися для живлення електродугових пристроїв з від'ємним диференціальним опором.

Висновки. Однофазний мостовий випрямляч з активним навантаженням та ємнісним фільтром при живленні від симетричного індуктивно-ємнісного перетворювача, що виконано за схемою T1-LCL, в порівнянні з аналогічним випрямлячем з ІСП за схемою Г1-LC має кращі показники електромагнітної сумісності ($\cos \varphi = 0,95 \div 0,99$, $THDi < 3\%$), менше значення потужності реакторів L1 та L2 $\hat{q}_{L\Sigma} = 1,51$ в.о. ($\hat{q}_L = 1,97$ в.о. в Г1-LC), але йому притаманне більше значення питомої потужності конденсатора С $\hat{q}_C = 1,83$ в.о. ($\hat{q}_C = 0,95$ в.о. в Г1-LC).

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 (2017-2021 рр.).

1. Чаплыгин Е.Е. Активный фильтр с индуктивным накопителем для компенсации неактивной мощности выпрямителей с емкостным фильтром. *Электротехника*. 2017. №1. С. 22-27.

2. Архангельский Н.Л., Виноградов А.Б. Электропривод постоянного тока с импульсным преобразователем. Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т, 1995. 92 с.

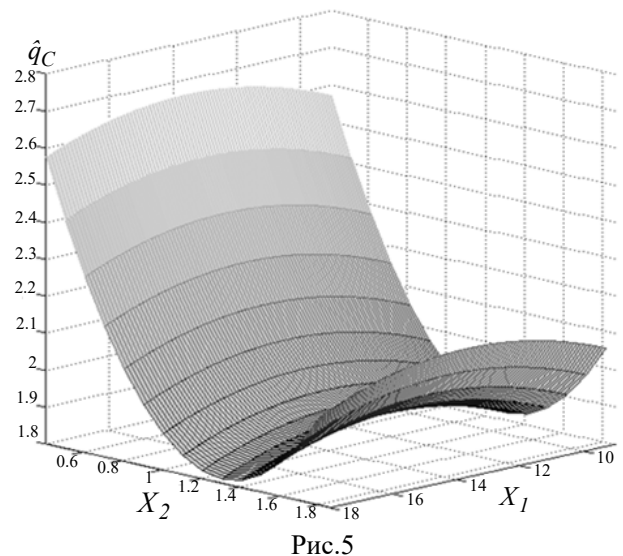
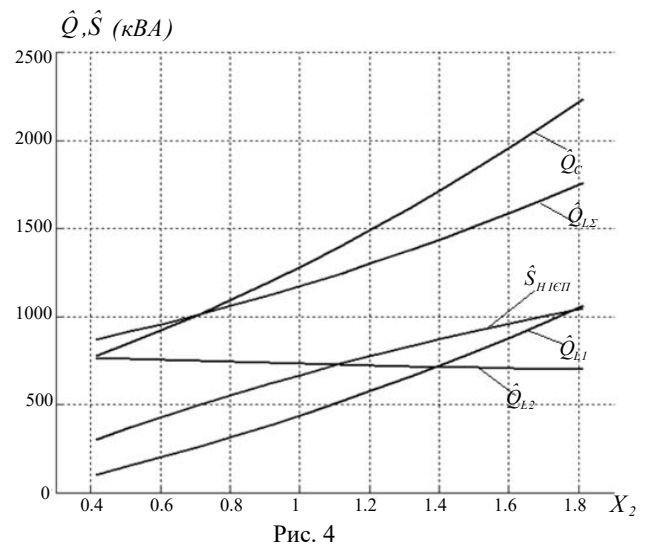
3. Попков О.З., Чаплыгин Е.Е. Расчет выпрямителей с емкостным фильтром. *Практическая силовая электроника*. 2007. Вып. 25. С. 15-19.

4. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. К: Вища школа, 1978. 424 с.

5. Спірін В.М., Губаревич В.М., Маруня Ю.В., Салко С.В., Гребенюк В.Г. Визначення коефіцієнтів перетворення мостового однофазного випрямляча з живленням від індуктивно-ємнісного перетворювача та паралельним активно-ємнісним навантаженням. *Техн. електродинаміка*. 2019. № 5. С. 43-48. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.043>

6. Спірін В.М., Губаревич В.М., Маруня Ю.В., Салко С.В., Гребенюк В.Г. Оптимізація індуктивно-ємнісного перетворювача з мостовим однофазним випрямлячем, ємнісним фільтром та активним навантаженням за питомими потужностями електромагнітних елементів. *Техн. електродинаміка*. 2019. № 6. С. 25-29. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.025>

7. Волков И.В., Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П. Принципы построения и оптимизация схем индуктивно-емкостных преобразователей. К.:



Наукова думка, 1981. 173 с.

8. Милья А.Н., Волков И.В. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. К.: Наукова думка, 1974. 216 с.

9. Ивоботенко Б.А., Ильинский И.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. М.: Энергия, 1975. 184 с.

10. Юдин Ю.В., Майсурадзе М.В., Водолазский Ф.В. Организация и математическое планирование эксперимента. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 124 с.

УДК-621.314

КАЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОФАЗНОГО МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С АКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ И ЕМКОСТНЫМ ФИЛЬТРОМ ПРИ ПИТАНИИ ОТ ИСТОЧНИКА ТОКА

В.М. Спирин докт.техн.наук, **В.М. Губаревич**, канд.техн.наук, **Ю.В. Маруня**, **С.В. Салко**

Институт электродинамики НАН Украины

пр. Победы 56, Киев, 03057, Украина.

E-mail: sspirin@ied.org.ua

Исследованы электромагнитные процессы в однофазном мостовом выпрямителе с активной нагрузкой и емкостным фильтром при питании его от симметричного индуктивно-емкостного преобразователя (ИЕП), выполненного по схеме T1-LCL, и проведено сравнение его качественных характеристик с ИЕП по схеме Г1-LC. Схема T1-LCL имеет лучшие показатели электромагнитной совместимости ($\cos \varphi = 0,963 \div 0,99$, $THDi < 3\%$), чем схема с Г1-LC, но у нее большая удельная мощность конденсатора. Библи. 10, рис. 5, табл. 1.

Ключевые слова: выпрямитель, активная нагрузка, емкостной фильтр, индуктивно-емкостной преобразователь, электромагнитная совместимость.

QUALITY CHARACTERISTICS OF SINGLE-PHASE BRIDGE RECTIFIER WITH ACTIVE LOAD AND CAPACITARY FILTER FOR POWER FROM THE CURRENT SOURCE

V.M. Spirin, V.M. Hubarevich, Yu.V. Marunia, S.V. Salko

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine

Pr. Peremohy, 56, Kiev, 03057, Ukraine.

E-mail: sspirin@ied.org.ua

The electromagnetic processes in a single-phase bridge rectifier with active load and a capacitive filter at power supply from a symmetric inductive-capacitive converter (ICC), made according to the scheme T1-LCL, are compared and its qualitative characteristics are compared with the Г1-LC scheme of ICC. The T1-LCL scheme has better electromagnetic compatibility ($\cos \varphi = 0,963 \div 0,99$, $THDi < 3\%$), than the Г1-LC scheme, but it has higher specific capacitance of the capacitor. References 10, figures 5, table 1.

Keywords: rectifier, active load, capacitive filter, inductive-capacitive converter, electromagnetic compatibility.

1. Chaplygin E.E. An inductive drive active filter to compensate for the inactive power of capacitors with a capacitive filter. *Elektrotehnika*. 2017. No 1. Pp. 22-27. (Rus)

2. Arkhangelsky N.L., Vinogradov A.B. Direct current drive with pulse converter. Ivanovo: Ivanovskiy gosudarstvennyi energeticheskiy universitet, 1995. 92 p. (Rus)

3. Popkov O.Z., Chaplygin E.E. Calculation of rectifiers with capacitive filter. *Prakticheskaya silovaya elektronika*. 2007. No 25. Pp. 15-19. (Rus)

4. Rudenko V.S., Senko V.I., Chizhenko I.M. Conversion technology. Kiev, Vysshaya Shkola, 1978. 424 p. (Rus).

5. Spirin V.M., Gubarevich V.M., Salko S.V., Marunia Yu.V., Grebenyuk V.G. Determination of the coefficient of conversion of the bridge of single-phase rectifier with power from the inductive capacitor converter and parallel active capacity load. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No. 5. Pp. 43-48. (Ukr)

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.043>

6. Spirin V.M., Gubarevich V.M., Salko S.V., Marunia Yu.V., Grebenyuk V.G. Optimization of inductive-capacital converter with bridge one-phase rectifier, capacitary filter and parallel active load. *Tekhnichna Elektrodynamika*. No. 6. Pp. 25-29. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.025>

7. Volkov I., Gubarevich V.N., Isakov V.N., Kaban V.P. Principles of construction and optimization of inductive-capacitive converters. Kiev: Naukova Dumka, 1981. 173 p. (Rus)

8. Milyah A.N., Volkov I.V. Systems of constant current which based on inductive-capacitive converters. Kiev: Naukova Dumka, 1974. 216 p. (Rus)

9. Ivobotenko B.A., Ilinsky I.F., Kopylov I.P. Planning an experiment in electrical engineering. Moskva: Energiya, 1975. 184 p. (Rus)

10. Yudin Yu.V., Maysuradze M.V., Vodolazsky F.V. Organization and mathematical planning of the experiment. Ekaterinburg: Uralskiy gosudarstvennyi universitet, 2018. 124 p. (Rus)

Надійшла 09.12.2019