

**Yu.V. Rudenko, V.V. Martynov**

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

### INVESTIGATION OF PROCESSES AND SELECTION OF PARAMETERS FOR PULSE BOOST CONVERTER WITH AUTO-TRANSFORMER INDUCTOR

*Using the method of averaging in the state space, a mathematical model of DC pulse boost converter with imperfectly magnetically coupled auto-transformer inductor was obtained. Analytical expressions for calculating the parameters of magnetically coupled inductor of converter are determined, which provide the required values of output voltage and current at the allowable voltage loads on the switching element. As a result of the analysis, a technique has been developed for determining the coefficient of transformation and inductance of the inductor windings, selecting the range of variation in the relative duration of control pulses of switching element. To illustrate the calculation procedure, the parameters of converter for high-voltage application are determined. References 6, figure, tables 2.*

**Key words:** method of averaging in the state space, pulse boost converter, auto-transformer inductor.

1. Zinoviev G.S. Power Electronics: A Training Manual for Bachelors. Moskva: Izdatel'stvo Yurayt, 2012. 667 p. (Rus)
2. Kadatsky A.F., Rusu A.P. Mathematical model of electric processes in pulsed DC converters with pulse-width method of regulation. *Naukovi pratsi ONAZ im. O.S. Popova*. 2004. № 3. P. 10–16. (Rus)
3. Meleshin V.I. Transistor converter technology. Moskva: Tekhnosfera, 2006. 632 p. (Rus)
4. Mohr Malte, Fuchs Friedrich W. Clamping for current-fed dc/dc converters with recovery of clamping energy in fuel cell inverter systems. Proc. 12th European Conference on *Power Electronics and Applications EPE 2007*. Aalborg, Germany, 2007. P. 1–10. (Eng)
5. Rudenko Yu.V. Mode of averaging of pulse DC converter model. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. № 3. P. 42–48. (Rus)
6. Rusin Ju.S. Transformers of audio- and ultrasonic frequency. Leningrad: Energija, 1973. 152 p. (Rus).

Надійшла 05.03.2018

Received 05.03.2018

УДК 621.314

### ПОКРАЩЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ОДНОФАЗНОГО МОСТОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА З ПАРАЛЕЛЬНИМ АКТИВНО-ЄМНІСНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

**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-57, 03057, Україна  
e-mail: sspirin@ied.org.ua

*Розглянуто напрямки покращення електромагнітної сумісності однофазного мостового випрямляча з активно-ємнісним навантаженням, що базуються на використанні ЛМС-фільтра та індуктивно-ємнісного перетворювача джерела напруги в джерело струму за схемою ГІ-ЛС. Досліджено електромагнітні процеси в мостовому випрямлячі з активно-ємнісним навантаженням при живленні його від індуктивно-ємнісного перетворювача. Бібл. 9, рис. 4, таблиця.*

**Ключові слова:** випрямляч, активно-ємнісне навантаження, індуктивно-ємнісний перетворювач, електромагнітна сумісність.

**Вступ.** Дослідженню електромагнітних процесів в однофазному мостовому випрямлячі з паралельним активно-ємнісним навантаженням, а також покращенню електромагнітної сумісності такого випрямляча з мережею живлення присвячено багато робіт [1, 2, 5, 6, 8]. Одночасно зовсім мало публікацій з дослідження розглянутого в статті випрямляча при живленні його від джерела струму. В роботі [7] розглянуто електромагнітні процеси у випрямлячі з активно-ємнісним навантаженням у разі живлення безпосередньо від джерела синусоїдального струму і визначено коефіцієнт перетворення випрямляча за струмом  $k_i = 0,9$ . Це значення коефіцієнта  $k_i$  визначено для ідеальних випрямлячів та джерела

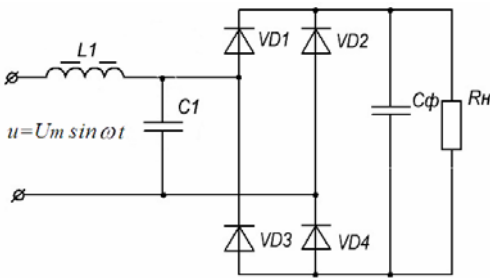
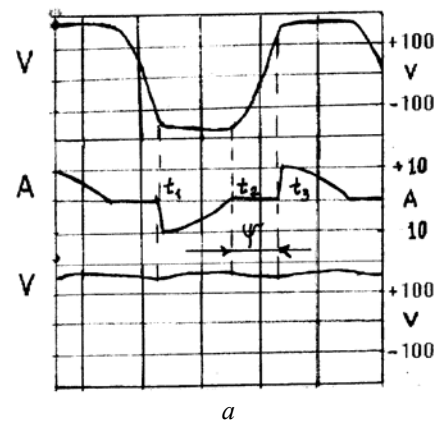


Рис. 1



а

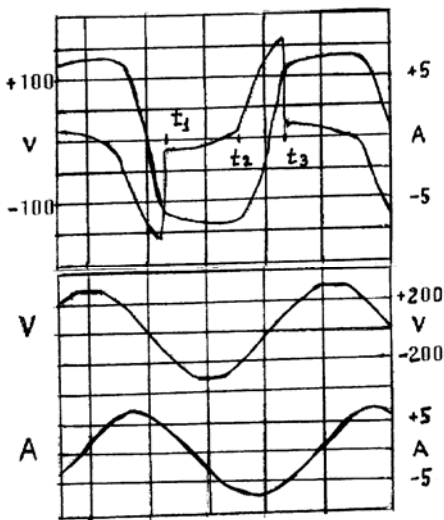


Рис. 2

$L1=155,2$  мГн, ємність конденсатора ІЄП  $C1=70$  мкФ, ємність конденсатора фільтра  $Cφ = 900$  мкФ. Опір навантаження змінювався в ході експерименту від нуля до 80 Ом. Для оптимального значення опору навантаження  $R_n = 44$  Ом були зняті осцилограми струмів та напруг на елементах ІЄП, на вході та виході випрямляча, а також коефіцієнт гармонік струму ( $THD_i$ ) пристроєм С.А.8335 Power & Quality Analyzer.

Випрямляч працює в двох режимах: перший, коли напруга на вході випрямляча більша напруги на ємності конденсатора фільтра  $Cφ$  і діоди  $VD1$ ,  $VD4$  ( $VD2$ ,  $VD3$ ) відкриті за проміжок часу ( $t_1 - t_2$ ) (рис. 2 а); другий – всі діоди закриті, оскільки напруга на вході випрямляча менша напруги на ємності конденсатора фільтра  $Cφ$ , яка знижується за експонентою протягом часу ( $t_2 - t_3$ ). За цей час струм проходить через індуктивність  $L1$  і ємність конденсатора  $C1$  ІЄП. На рис. 2 а зображено (зверху вниз) графіки – напруга на вході випрямляча, струм на вході випрямляча і напруга на ємності конденсатора фільтра. На рис. 2 б відповідно

синусоїдального струму  $i = I_m \sin \omega t$ . У цьому випадку випрямляч працює в режимі, коли спостерігається рівність відповідно напруг і струмів на вході та виході випрямляча за абсолютними значеннями:

$$u_d = |u|; i_d = |i|,$$

$$u_d = \frac{I_m \sin(\omega t - \varphi)}{y} + \frac{2I_m \sin \varphi}{y \left[ 1 - \exp\left(-\frac{x_c \pi}{R_n}\right) \right]} \cdot \exp\left(-\frac{x_c}{R_n} \omega t\right),$$

де  $i$  та  $i_d$  – миттєві значення струму на вході та виході випрямляча;  $u$  та  $u_d$  – миттєві значення напруги на вході та виході випрямляча;  $x_c = 1 / \omega Cφ$  – ємнісний опір;  $\omega = 2\pi f$  – кругова частота струму живлення;  $R_n$  – опір навантаження;  $\varphi = \arctg R_n / x_c$ ;  $y = (R_n^2 + x_c^2)^{0,5} / R_n x_c$ ,  $0 < \omega t < \pi$ .

Такий випрямляч має синусоїдальний струм на вході й теоретично може мати коефіцієнт гармонік струму, близький до нуля. Для практичної реалізації джерела синусоїдального струму потрібен перетворювач системи незмінної напруги у систему незмінного струму. Функцію такого перетворювача може виконувати індуктивно-ємнісний перетворювач (ІЄП) джерела напруги в джерело струму [4], який є специфічним класом електричних ланцюгів з резонансними та квазірезонансними властивостями, які відрізняються особливістю електромагнітних процесів, що протікають в його реактивних елементах – реакторах та конденсаторах, а також у випрямлячах.

**Мета роботи** – дослідження електромагнітних процесів і визначення електромагнітної сумісності системи однофазний індуктивно-ємнісний перетворювач джерела напруги в джерело струму – мостовий випрямляч з паралельним активно-ємнісним навантаженням.

На рис. 1 представлена схема випрямляча, на вході якого включений ІЄП за схемою Г1-ЛС [4]. Для отримання якісних характеристик і дослідження електромагнітних процесів схеми було проведено ряд експериментів. Результати експериментів наведено у таблиці під номерами 4 і 5. У четвертому варіанті індуктивність реактора ІЄП

зображено напругу на вході випрямляча, струм через ємність конденсатора ІЄП, вхідну напругу мережі живлення і вхідний струм ІЄП.

Для схеми, що зображена на рис. 1, було визначено коефіцієнт перетворення випрямляча за струмом  $k_i$  як відношення середнього значення струму на виході випрямляча до діючого значення струму на вході випрямляча:

$$k_i = \frac{\frac{1}{\pi} \int_{\psi}^{\pi} I_m \sin \omega t d\omega t}{\sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\psi}^{\pi} I_m^2 \sin^2 \omega t d\omega t}} ; \quad (1)$$

$$k_i = (1 + \cos \psi)[0,5\pi(\pi - \psi + 0,5 \sin 2\psi)]^{-0,5}, \quad (2)$$

де  $\omega = 2\pi f$  – кругова частота напруги живлення;  $\psi = \omega(t_3 - t_2)$  – кут, протягом якого напруга на фільтруючому конденсаторі зменшується за експонентою  $U_{C_{\min}} = U_{C_{\max}} e^{-\frac{t}{C_{\phi} R_n}}$ .

Значення коефіцієнта  $k_i$  розраховано за формулою (2) і змінюється від 0,9 у разі  $\psi = 0$  до 0,64 у разі  $\psi = 90^\circ$ .

Індуктивно-ємнісний перетворювач є не лише джерелом незмінного струму, але і хорошим фільтром гармонік струму, що споживається з мережі живлення. Це наочно можна продемонструвати у разі порівняння його з  $L$  і LMC фільтрами, які використовуються для покращення гармонічного складу струму споживання у випрямлячах з паралельним активно-ємнісним навантаженням при живленні від промислової мережі. У роботі [5] проаналізовано три варіанти роботи випрямляча для активного навантаження потужністю 10 кВт. Варіант перший – безпосереднє ввімкнення випрямляча в мережу. У варіанті другому – на вхід випрямляча вмикався лінійний 3 %-вий реактор з індуктивністю 2,24 мГн.

Варіант третій – ввімкнення на вході випрямляча LMC-фільтра (рис. 3) з двома обмотками з індуктивностями  $L1=5,3$  мГн,  $L2=1,23$  мГн і ємністю конденсатора  $C1 = 170$  мкФ. Ємність конденсатора вихідного фільтра в усіх варіантах однакова і дорівнює  $C_{\phi} = 10^4$  мкФ. Варіанти четвертий, п'ятий є результатами експериментальних досліджень випрямляча з ввімкненням на вході ІЄП, налагодженого на резонанс (рис. 1). У варіанті п'ятому ІЄП має індуктивність реактора  $L1=184$  мГн, ємність конденсатора  $C1 = 50$  мкФ. Ємність конденсатора фільтра  $C_{\phi} = 900$  мкФ. Результати експериментальних досліджень всіх варіантів наведено в таблиці.

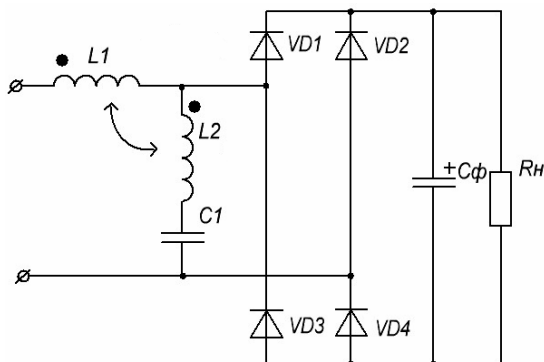


Рис. 3

Варіант	Uн, В	Ін, А	ТНДі, %	I <sub>3</sub> , %	I <sub>5</sub> , %	I <sub>7</sub> , %	I <sub>9</sub> , %	ΔUн, %	PF	cos φ	
1	експер.	280	36,7	91,6	71,5	41,2	25,4	12,1	10,7	0,744	0,99
	модель	275	36,24	108,3	84,7	58,7	31,0	9,3	10,2	0,751	0,99
2	експер.	250	32,0	50,9	49,7	9,0	5,8	1,7	8,0	0,786	0,88
	модель	248,7	32,77	52,4	50,7	9,8	7,2	3,1	7,2	0,791	0,90
3	експер.	300	39	14,9	14,6	0,9	-	-	6,0	0,956	0,97
	модель	295,7	38,4	12,2	11,24	2,6	2,5	3,0	5,0	0,941	0,97
4	експер.	139,4	3,3	1,1	-	-	-	-	2,2	0,375	0,375
5	експер.	300	3,25	4,8	-	-	-	-	7,0	0,639	0,64

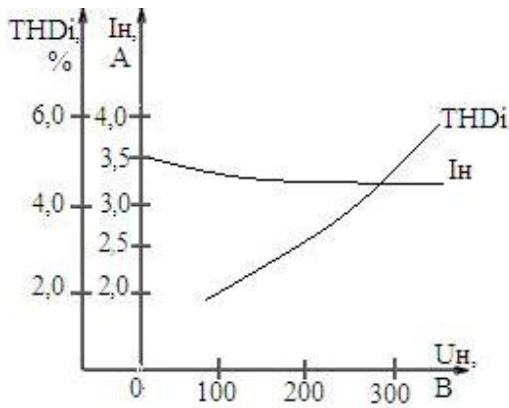


Рис. 4

ження.

Для п'ятого варіанта було знято навантажувальну характеристику і залежність  $THD_i$  від напруги навантаження. Статизм струму навантаження ( $(\Delta I_n / I_n) \cdot 100\%$ ) при зміні напруги для вказаного діапазону навантаження від нуля до номінального значення ( $U_n \approx 300$  В) складає менше 10 %, у цьому разі коефіцієнт гармонік струму  $THD_i$  змінюється від нуля до 5,4 % (рис. 4).

Навантажувальна характеристика розглянутої системи живлення має лінійний характер на відміну від системи з LMC-фільтром, яка має суттєвий недолік – нелінійну навантажувальну характеристику. А саме в режимах, близьких до холостого ходу (за малих струмів навантаження), виникає різке підвищення напруги на вході і виході випрямляча, що призводить до такого ж підвищення напруги на конденсаторі LMC-фільтра (C1 на рис. 3). Ця напруга може перевищувати максимальне допустиме значення на навантаженні і елементах схеми. Для запобігання небезпечній перенапрузі застосовуються різні способи, оптимальний з яких полягає в дискретних змінах ємності конденсатора C1 LMC-фільтра [2]. Варто зазначити, що і системи з ІСП критичні до режимів, близьких до холостого ходу. Для захисту такої системи від перенапруг на її елементах використовують як параметричні методи – настроювання ІСП у нерезонансний режим, виконання реактора ІСП з режимом насичення або насичення погоджувального трансформатора при досягненні визначеного рівня напруги на навантаженні, так і структурні методи з використанням ключових напівпровідникових і релейних елементів, які при перевищенні напруги на виході системи замикають вихід ІСП [3].

**Висновок.** Проведено дослідження електромагнітних процесів у системі ІСП – однофазний мостовий випрямляч з паралельним активно-ємнісним навантаженням, які дали змогу продемонструвати, що ця система має хорошу електромагнітну сумісність з мережею живлення ( $THD_i < 6\%$ ), а навантажувальна характеристика має лінійний характер для робочого діапазону навантаження. Розглянута система живлення, що є одночасно стабілізатором вихідного струму і фільтром гармонік струму, може успішно застосовуватися безпосередньо для живлення різноманітних технологічних навантажень, наприклад, для живлення електророзрядних навантажень з від'ємним диференціальним опором [3]. Також можливе її використання для живлення інверторів струму [9].

1. Архангельский Н.Л., Виноградов А.Б. Электропривод постоянного тока с импульсным преобразователем: учебн. пособ./ Иван. гос. энерг. ун-т. Иваново, 1995. – 92 с.
2. Волков И.В., Губаревич В.М., Спирін В.М., Салко С.В. Регулювання вихідної напруги у випрямних установках з вхідними LMC-фільтрами. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2008. Вип. 19. С. 106–110.
3. Волков И.В., Вакуленко В.М. Источники электропитания лазеров. Киев: Техніка, 1976. 176 с.
4. Волков И.В., Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П. Принципы построения и оптимизация схем индуктивно-емкостных преобразователей. Киев: Наук. думка, 1981. 173 с.

5. Губаревич В.Н., Маруня Ю.В. Однофазный широкополосный ЛМС-фильтр на входе выпрямителя с емкостной нагрузкой. *Вестник НТУ «Харьковский политехнический институт»*. 2015. Вып. 12 (1121). С. 398–401.
6. Жаркін А.Ф., Пазеев А.Г. Однофазні активні коректори коефіцієнта потужності для багатомодульних систем електроживлення. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2014. 212 с.
7. Комар В.Г. Работа полупроводниковых выпрямителей в цепях управления. Москва-Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1952. 256 с.
8. Попков О.З., Чаплыгин Е.Е. Расчет выпрямителей с емкостным фильтром. *Практическая силовая электроника*. 2007. Вып. 25.
9. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. Киев: Вища школа, 1978. – 424 с.

УДК 621.314

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

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы 56, Киев-57, 03057, Украина

### **УЛУЧШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ОДНОФАЗНОГО МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ АКТИВНО-ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКОЙ**

*Рассмотрены направления улучшения электромагнитной совместимости однофазного мостового выпрямителя с активно-емкостной нагрузкой, основанные на использовании ЛМС-фильтра и индуктивно-емкостного преобразователя источника напряжения в источник тока по схеме Г1-ЛС. Исследованы электромагнитные процессы в мостовом выпрямителе с активно-емкостной нагрузкой при питании от индуктивно-емкостного преобразователя. Библи. 9, рис. 4, таблица.*

**Ключевые слова:** выпрямитель, активно-емкостная нагрузка, индуктивно-емкостный преобразователь, электромагнитная совместимость.

**V.M. Spirin, V.M. Gubarevych, Yu.V. Marunya, S.V. Salko**

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

Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

### **IMPROVEMENT OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF A SINGLE PHASE BRIDGE RECTIFIER WITH PARALLEL ACTIVE-CAPACITIVE LOAD**

*The directions of improving the electromagnetic compatibility of a single-phase bridge rectifier with an active-capacitive load are considered, which based on the use of an LMC filter and an inductive capacitive voltage source converter in a current source in accordance with the G1-LC scheme. Electromagnetic processes in bridge rectifiers with active-capacitive loading are investigated at a feed from an inductive-capacitive converter. References 9, figures 4, table.*

**Key words:** rectifier, active-capacitive load, inductive capacitive converter, electromagnetic compatibility.

1. Arkhangel'skiy N.L., Vinogradov A.B. DC electric drive with pulse converter. Study Guide. Ivan. state. power. University of Ivanovo, 1995. 92 p. (Rus)
2. Volkov I.V., Gubarevych V.M., Spirin V.M., Salko S.V. Adjustment of output voltage in rectifier units with input LMC filters. *Pratsi IED of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2008. No. 19. P. 106–110. (Ukr)
3. Volkov I.V., Vakulenko V.M. Power supplies for lasers. Kiev: Tekhnika, 1976. 176 p. (Rus)
4. Volkov I.V., Gubarevich V.N., Isakov V.N., Kaban V.P. Principles of construction and optimization of inductive-capacitive converter circuits. Kiev: Naukova dumka, 1981. 173 p. (Rus)
5. Gubarevich V.N., Marunia Yu.V. Single-phase wide-band LMC filter at the input of a rectifier with a capacitive load. *Vestnik NTU "Kharkiv Polytechnic Institute"*. 2015. Issue. 12 (1121). P. 398–401. (Rus)
6. Zharkin A.F., Paseev A.G. Single-phase active correctors of power factor for multimodular power supply systems. Kiev: IED of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2014. 212. p.
7. Komar V.G. The work of semiconductor rectifiers in control circuits. Moskva-Leningrad: State Energy Publishing House, 1952. 256 p. (Rus)
8. Popkov O.Z., Chaplygin E.E. Calculation of rectifiers with a capacitive filter. *Prakticheskaya silovaya elektronika*. 2007. Issue. 25 p. (Rus)
9. Rudenko V.S., Senko V.I., Chizhenko I.M. Conversion technology. Kiev: Vishcha shkola, 1978. 424 p. (Rus)

Надійшла 30.05.2018

Received 30.05.2018