

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ СТРУМОПАРАМЕТРИЧНОГО МОСТОВОГО ОДНОФАЗНОГО ВИПРЯМЛЯЧА З ПАРАЛЕЛЬНИМ АКТИВНО-ЄМНІСНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

В.М. Спірін*, докт.техн.наук, **В.М. Губаревич****, канд.техн.наук, **Ю.В. Маруня*****,
С.В. Салко, В.Г. Гребенюк
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: sspirin@ied.org.ua

Проведено експерименти згідно з теорією планування по ортогональному плану другого порядку для електротехнічної системи: індуктивно-ємнісний перетворювач (ІЄП) джерела напруги в джерело струму – однофазний мостовий випрямляч – паралельне активно-ємнісне навантаження. Як фактори обрано наступні відносні показники: для першого фактору ємність конденсатора вихідного фільтра, що віднесена до величини ємності конденсатора ІЄП, для другого – відношення опору навантаження до вхідного опору ІЄП. Функціями цілі в реалізованому плані є: коефіцієнти перетворення випрямляча за струмом та напругою, коефіцієнти пульсацій та гармонік струму $THDi$. Отримані значення коефіцієнтів перетворення струмопараметричного однофазного мостового випрямляча за струмом і напругою дають змогу розрахувати та визначити вихідні характеристики ІЄП. Бібл. 5, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: випрямляч, індуктивно-ємнісний перетворювач, коефіцієнт перетворення, активно-ємнісне навантаження.

Вступ. В роботі [1] розглянуто електромагнітні процеси в однофазному мостовому випрямлячі з активно-ємнісним навантаженням при живленні від індуктивно-ємнісного перетворювача джерела напруги в джерело струму. Такий випрямляч з ІЄП на вході ще називають струмопараметричним [2], що пояснюється формуванням вихідної струмової характеристики за рахунок резонансного налагодження параметрів реактивних елементів ІЄП. Система живлення (рис.1), розглянута в роботі [1], є одночасно стабілізатором вихідного струму і фільтром гармонік струму споживання. В цій роботі також визначено коефіцієнт перетворення випрямляча за струмом k_i як співвідношення середнього значення струму на виході випрямляча I_{cp} до діючого значення струму на його вході I_ω

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

де $\omega = 2\pi f$ – кругова частота напруги живлення, $\psi = \omega \Delta t$ – значення кута, за яким напруга на фільтруючому конденсаторі $u_{C\phi} = u_{вих.в}$ більша за напругу на вході випрямляча $u_{вх.в} = u_{C_1}$ і діоди $VD1 \div VD4$ не проводять струм. Для розрахунку струмопараметричного випрямляча потрібно знати також значення коефіцієнту перетворення випрямляча по напрузі k_u , яке визначається як співвідношення середнього значення напруги U_{cp} на виході випрямляча до діючого значення напруги на його вході U_ω .

Метою роботи є визначення коефіцієнтів перетворення по струму та напрузі струмопараметричного мостового однофазного випрямляча шляхом проведення цілеспрямованих експериментів на макеті розглянутої системи живлення (рис. 1), відображення результатів у вигляді універсальної моделі процесу та порівняння результатів теоретичних і експериментальних досліджень.

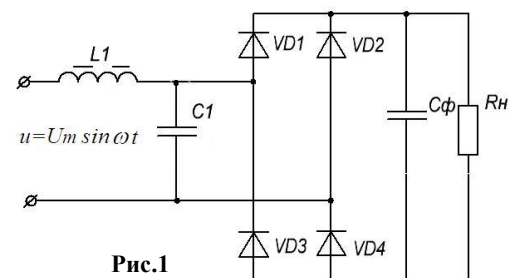


Рис.1

© Спірін В.М., Губаревич В.М., Маруня Ю.В., Салко С.В., Гребенюк В.Г., 2019
ORCID ID: * <http://orcid.org/0000-0002-8065-1051>, ** <http://orcid.org/0000-0003-2416-9858>,
*** <http://orcid.org/0000-0003-0071-1702>

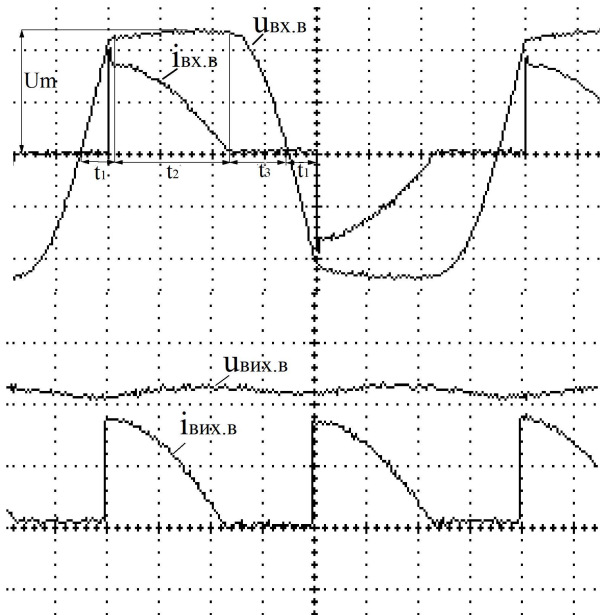


Рис.2

ня 220 В, частота напруги 50 Гц, потужність навантаження варіювалась від 0,3 до 1,2 кВт. ІЄП виконано за схемою Г1-LC [6] з індуктивністю $L_I=184$ мГн і ємністю $C_I=50$ мкФ. Струм і напруга на вході та виході випрямляча реєструвалися та вимірювалися приладом CA PowerQualityAnalyzer.

Перший фактор X_1 змінювався від $X_{1min}=9$ до $X_{1max}=18$ за рахунок зміни ємності фільтру 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 $X_{2min}=0,415$, а $X_{2max}=1,87$.

Після кодування факторів, з урахуванням обраних інтервалів варіювання, було проведено експерименти по ортогональному плану другого порядку. Матриця планування кодованих значень факторів наведена у таблиці (стовбці x_1, x_2).

Результатами кожного дослідження були значення струмів (I_δ – діюче та I_{cp} – середнє значення) і напруг (U_δ – діюче та U_{cp} – середнє значення) на вході та виході випрямляча та значення кута ψ . На рис. 2 для дослідження $N=9$ (табл.) наведено осцилограми цих струмів та напруг. Результати вимірювань та обчислень наведено у таблиці (де $x'_3 = x_1^2 - 2/3$ та $x'_4 = x_2^2 - 2/3$).

N	x_i						Y_N						
	x_0	x_1	x_2	x'_3	x'_4	$x_1 \cdot x_2$	ψ , град.	k_i	\hat{k}_i	k_u	\hat{k}_u	THDi	k_n
1	+	-	-	1/3	1/3	+	48,4	0,807	0,804	0,965	0,96	0,9	10,4
2	+	+	-	1/3	1/3	-	53,1	0,81	0,804	0,976	0,969	1,3	5,7
3	+	-	+	1/3	1/3	-	83,2	0,701	0,695	1,08	1,073	5,4	4,5
4	+	+	+	1/3	1/3	+	85,3	0,713	0,706	1,08	1,071	5,5	1,9
5	+	-	0	1/3	-2/3	0	71,5	0,733	0,746	1,03	1,04	3,8	5,5
6	+	+	0	1/3	-2/3	0	73,8	0,738	0,753	1,03	1,044	3,9	2,7
7	+	0	-	-2/3	1/3	0	50,8	0,805	0,798	0,976	0,986	1,0	7,2
8	+	0	+	-2/3	1/3	0	85,3	0,7	0,696	1,08	1,094	5,2	2,4
9	+	0	0	-2/3	-2/3	0	76,1	0,733	0,745	1,09	1,064	3,8	3,4

На підставі реалізованого ортогонального плану другого порядку було визначено коефіцієнти поліномів кодованих змінних за формулою

$$b_i = \left(\sum_{N=1}^9 x_{iN} Y_N \right) \left(\sum_{N=1}^9 x_{iN}^2 \right)^{-1}.$$

Коефіцієнти перетворення випрямляча у відповідності з даними таблиці представлено поліномами

$$k_i = 0,7495 + 3,33 \cdot 10^{-3} x_1 - 5,13 \cdot 10^{-2} x_2 + 4,33 \cdot 10^{-3} x_1^2 + 2,13 \cdot 10^{-3} x_2^2 + 2,25 \cdot 10^{-3} x_1 x_2; \quad (2)$$

$$k_u = 1,061 + 1,833 \cdot 10^{-3} x_1 + 5,38 \cdot 10^{-2} x_2 - 2,18 \cdot 10^{-3} x_1^2 - 2,38 \cdot 10^{-2} x_2^2 - 2,75 \cdot 10^{-3} x_1 x_2; \quad (3)$$

$$\psi = 74,56 + 1,52 x_1 + 16,92 x_2 - 1,52 x_1^2 - 6,12 x_2^2 - 0,65 x_1 x_2. \quad (4)$$

Отримане значення k_i відрізняється від значення \hat{k}_i , яке розраховано за поліномом (2), на 3%.
Значення k_u відрізняються від значень \hat{k}_u , визначених за поліномом (3), не більше, як на 1,5%.

Для зручності використання отриманих коефіцієнтів перетворення випрямляча доцільно перейти від кодovаних значень факторів до їхніх натуральних значень за наступною формулою:

$$x_i = \frac{X_i - X_{icp}}{X_{imax} - X_{icp}},$$

де $X_{icp} = \frac{X_{imax} - X_{imin}}{2}$, X_{icp} – основний рівень варіювання незалежної змінної X_i .

Після перетворення поліномів (2, 3) маємо

$$k_i = 0,869 - 5,81 \cdot 10^{-3} X_1 - 8,86 \cdot 10^{-2} X_2 + 2,13 \cdot 10^{-4} X_1^2 + 4 \cdot 10^{-3} X_2^2 + 6,84 \cdot 10^{-4} X_1 X_2, \quad (5)$$

$$k_u = 0,881 + 4,26 \cdot 10^{-3} X_1 + 0,187 \cdot X_2 - 1,07 \cdot 10^{-4} X_1^2 - 4,47 \cdot 10^{-2} X_2^2 - 8,36 \cdot 10^{-4} X_1 X_2. \quad (6)$$

Слід зазначити, що отримані поліноми (5, 6) можна використовувати лише у розглянутому діапазоні двофакторного простору. Якщо значення факторів X_1 та X_2 випадають з цього простору, доцільно користуватися аналітично отриманими значеннями коефіцієнтів k_i та k_u . Тому розглянемо, як визначити коефіцієнт перетворення випрямляча по напрузі k_u .

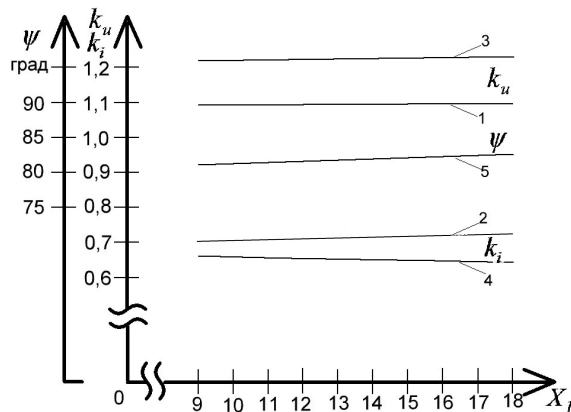


Рис. 3

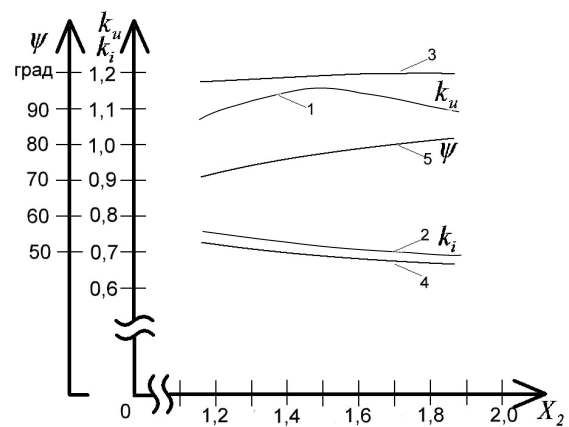


Рис. 4

Як видно з рис. 2, осцилограма напруги на вході випрямляча $u_{ex.6}$ має вигляд трапеції. Для трапецеїдальної форми напруги обчислимо її діюче значення за формулою [4]

$$U = U_m \sqrt{\frac{t_1 + 3t_2 + t_3}{1,5T}}, \quad (7)$$

де t_1 – час зростання напруги; t_2 – час постійного значення напруги; t_3 – час спадання напруги; $T = 2\pi / \omega$ – період напруги.

В нашому випадку $\omega(t_1 + t_3) = \psi$, $\omega t_2 = \pi - \psi$ і формула (7) набуває наступного вигляду:

$$U = U_m \left(1 - \frac{2\psi}{3\pi} \right)^{0,5}.$$

Кут ψ вираховується за поліномом (4) і на рис. 3, 4 представлений кривою 5.

При допущенні, що середнє значення напруги на виході випрямляча при малих пульсаціях дорівнює максимальному значенню напруги на виході випрямляча $U_{C\phi} \approx U_m$, аналітичний вираз коефіцієнта перетворення випрямляча по напрузі набуває наступного вигляду:

$$k_u = \left(1 - \frac{2\psi}{3\pi}\right)^{-0.5}. \quad (8)$$

На рис. 3 наведено графічну залежність коефіцієнта перетворення випрямляча по напрузі для незмінного значення фактору $X_2=1,87$ ($R_n=110$ Ом) при зміні фактору X_1 від 9 до 18. Значення коефіцієнту k_u , визначені по формулі (8) (пряма 3) і по поліному (6) (пряма 1) відрізняються не більше, ніж на 10%. Коефіцієнт перетворення випрямляча по струму (пряма 4) розрахований за формулою (1) відрізняється від значення, визначеного по поліному (5) (пряма 2) не більше, ніж на 10%.

На рис. 4 зображено графічні залежності коефіцієнтів перетворення випрямляча по напрузі і струму при постійному значенні фактору $X_1=18$ ($C_\phi=\text{const}$) і зміні фактору X_2 від 1,16 до 1,9, що відповідає робочому діапазону вихідної напруги (200÷340 В) для даної системи живлення. Криві 1, 2 побудовані по значеннях, отриманих експериментально, криві 3, 4 розраховано відповідно по формулах (8) і (1). Розбіжності у значеннях, визначених експериментально та аналітично, для k_u становить 10%, а для k_i – 8%.

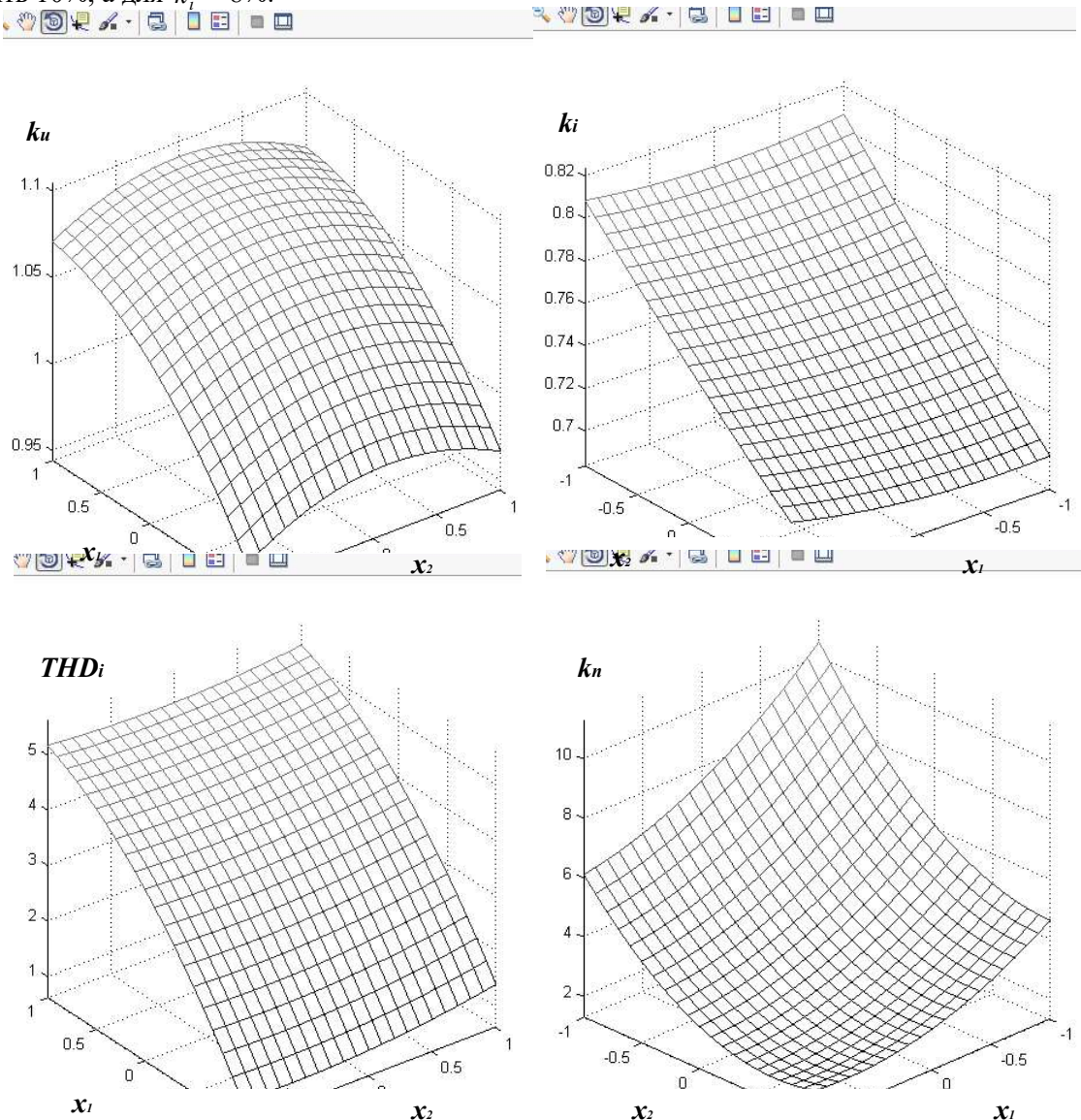


Рис. 5

Однією з переваг теорії планування експериментів є наочність отриманих результатів, в чому можна пересвідчитись при розгляді поверхонь відгуку на рис. 5 для коефіцієнтів перетворення випрямляча по струму k_i та напрузі k_u у двофакторному просторі x_1, x_2 .

У таблиці наведено значення коефіцієнту гармонік струму ($THDi$). По ортогональному плану другого порядку для кодованих змінних було визначено коефіцієнти поліному для $THDi$

$$THDi = 3,68 + 0,1x_1 + 1,99x_2 + 0,133x_1^2 - 0,617x_2^2 - 0,075x_1x_2.$$

На рис. 5 наведено поверхню відгуку $THDi$, яка дає більш повну картину залежності від факторів x_1, x_2 .

Розглянемо ще один показник якості системи – коефіцієнт пульсації струму k_n . Як видно з таблиці, при мінімальних значеннях C_ϕ і R_n $k_n=10,4\%$, а при максимальних – $k_n=1,9\%$. Величину коефіцієнту пульсацій k_n , згідно з даними таблиці, було визначено за поліномом

$$k_n = 3,61 - 1,68x_1 - 2,42x_2 + 0,78x_1^2 + 1,48x_2^2 + 0,525x_1x_2.$$

Поверхню відгуку для коефіцієнту пульсацій струму k_n наведено на рис. 5.

Таким чином, визначено коефіцієнти перетворення по напрузі та струму однофазного мостового випрямляча при живленні від ІСП, виконаного по схемі Г1-ЛС. Значення цих коефіцієнтів дозволяють виконати розрахунок струмопараметричного однофазного мостового випрямляча з паралельним активно-ємнісним навантаженням та є основою для подальшого розрахунку і оптимізації параметрів реактивних елементів ІСП. Отримані результати дають змогу оцінити якісні характеристики системи такі, як $THDi$ і k_n .

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" (номер держ. реєстрації 0117Г002584).

1. Спирін В.М., Губаревич В.М., Салко С.В., Маруня Ю.В. Покращення електромагнітної сумісності однофазного мостового випрямляча з паралельним активно-ємнісним навантаженням. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2018. Вип. 50. С. 83-87.

2. Бидеев Г.А., Мендыбаев С.А., Обухов С.Г., Павлов Ф.В., Ухарський М.В. Система управління регулируемым реверсивным токопараметрическим вентильным преобразователем. Всес. научно-техн. конф. *Проблемы преобразовательной техники*, Киев, 1979. С. 190-193.

3. Пинчук С.И. Организация эксперимента при моделировании и оптимизации технических систем. Днепропетровск: Дива, 2008. 248 с.

4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1978. 720 с.

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

6. Спирін В.М. Системи живлення для електродугових пристроїв з від'ємним диференціальним опором: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.09.03. Інститут електродинаміки НАН України. Київ. 2013. 35 с.

УДК-621.314

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТОКОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОСТОВОГО ОДНОФАЗНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ АКТИВНО-ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКОЙ

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

Институт электродинамики НАН Украины

пр. Победы 56, Киев, 03057, Украина.

e-mail: sspirin@ied.org.ua

В работе проведены эксперименты согласно теории планирования по ортогональному плану второго порядка для электротехнической системы: индуктивно-емкостной преобразователь (ИЕП) источника напряжения в источник тока - однофазный мостовой выпрямитель - параллельная активно-емкостная нагрузка. В качестве факторов выбраны следующие относительные показатели: для первого фактора емкость конденсатора выходного фильтра, отнесенная к величине емкости конденсатора ИЕП, для второго – отношение сопротивления нагрузки к входному сопротивлению ИЕП. Функциями цели в реализованном плане были коэффициенты преобразования выпрямителя по току и напряжению, коэффициенты пульсаций (k_n) и гармоник тока ($THDi$). Для этих функций цели получены полиномы второго порядка, отличающиеся от экспери-

ментальных значений меньше, чем на 3%, что и подтверждает правильность выбранного плана экспериментов. Получена формула для расчета коэффициента преобразования выпрямителя по напряжению, которая дает различие с экспериментальными значениями меньше 10%. Рассмотренная электротехническая система стабилизированного источника тока имеет хорошую электромагнитную совместимость с сетью питания, что подтверждает еще одна функция цели ($THDi$), реализованная по ортогональному плану второго порядка, ее значение в двухфакторном пространстве не превышает 5,5%. Полученные аналитически и экспериментально значения коэффициентов преобразования токопараметрического однофазного мостового выпрямителя по току и напряжению позволяют провести расчет и определить выходные характеристики ИЕП. Библ. 6, рис. 5, табл.1.

Ключевые слова: выпрямитель, индуктивно-емкостной преобразователь, коэффициент преобразования, активно-емкостная нагрузка.

DETERMINATION OF THE COEFFICIENT OF THE TRANSFORMATION OF A CURRENT PARAMETER BRIDGE OF A SINGLE-PHASE RECTIFIER WITH PARALLEL ACTIVE-CAPACITIVE LOAD

V.M. Spirin, V.M. Hubarevich, Yu.V. Marunya, S.V. Salko, V.G. Grebenyuk
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine.
Pr. Peremohy, 56, Kiev, 03057, Ukraine.
e-mail: sspirin@ied.org.ua

In this work the experiments were carried out in accordance with the theory of planning according to the second order orthogonal plan for the electrical system: inductive-capacitive converter (ICC) of the voltage source in the current source - single-phase bridge rectifier - parallel active-capacitive load. As factors, the following relative indicators are selected: for the first factor, this capacitance of the output filter condenser is assigned to the capacitance value of the capacitor of the ICC, for the second factor of the load resistance relation to the ICC input impedance. The objective functions in the implemented plan were: the coefficient of transformation of the rectifier by current and the conversion factor of the rectifier by voltage, current pulsation coefficient (k_n), current harmonic coefficient ($THDi$). For these functions, the goals are obtained by polynomials of the second order, having a convergence with the values obtained experimentally, less than 3%, and confirm the correctness of the chosen plan of experiments. For the transform coefficient of the rectifier by voltage, an analytical formula is obtained for its calculation, which gives convergence with experimental values less than 10%. The considered electrical system of the source of the stabilized current has good electromagnetic compatibility with the power supply network, which is confirmed by another function of purpose ($THDi$), which was implemented according to an orthogonal plan of the second order and whose value in the two-factor space does not exceed 5,5%. The analytical and experimental values of the transformation coefficients of the current-parameter single-phase bridge rectifier obtained by current and voltage allow to calculate and determine the output characteristics of the ICC. References 6, figures 5, table 1.

Keywords: rectifier, inductive-capacitive converter, conversion factor, active capacitive load.

1. Spirin V.M., Gubarevich V.M., Salko S.V., Maruna Yu.V. Improvement of electromagnetic compatibility of single-phase bridge rectifier with parallel active-capacitive loading. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2018. Vol. 50. Pp. 83-87. (Ukr)
2. Bideev G.A., Mendybayev S.A., Obukhov SG, Pavlov F.V., Ukharsky M.V. Control system for regulated reversing current-voltage valve transducer. Scientific and technical conf. *Problems of the transformational technique*, Kiev, Ukraine, 1979. Pp. 190-193. (Rus)
3. Pinchuk S.I. Organization of the experiment in modeling and optimization of technical systems. Dnepropetrovsk: Diva, 2008. 248 p. (Rus)
4. Korn G., Korn T. The reference book on mathematics. Moskva: Nauka, 1968. 720 p. (Rus)
5. Yudin Yu.V., Maysuradze M.V., Vodolazsky F.V. Organization and mathematical planning of the experiment. Ekaterinburg: Publishing House Ural. University, 2018. 124 p. (Rus)
6. Spirin V.M. Power supply system for electric arc devices with a negative differential resistance: author's abstract of Dr. tech. sci. diss.: 05.09.03. Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. Kyiv. 2013. 35 p. (Ukr)

Надійшла 13.03.2019
Остаточний варіант 02.05.2019