УДК-621.314 DOI: https://doi.org/10.15407/techned2019.06.025

ОПТИМІЗАЦІЯ ІНДУКТИВНО-ЄМНІСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З МОСТОВИМ ОДНОФАЗНИМ ВИПРЯМЛЯЧЕМ, ЄМНІСНИМ ФІЛЬТРОМ ТА АКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ЗА ПИТОМИМИ ПОТУЖНОСТЯМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

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 оптимізацію за питомими потужностями реактивних елементів індуктивно-ємнісного перетворювача за схемою Г1-LC, що живить однофазний мостовий випрямляч з ємнісним фільтром та активним навантаженням. Оптимізацію виконано згідно з теорією планування експериментів за ортогональним планом другого порядку. Отримані результати дають змогу розрахувати параметри реактивних елементів ІЄП, які мають мінімальні питомі потужності. Бібл. 4, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: випрямляч, індуктивно-ємнісний перетворювач, питома потужність, реактивні елементи, активне навантаження, ємність.

Вступ. Дослідження електромагнітних процесів в однофазному мостовому випрямлячі з ємнісним фільтром та активним навантаженням у разі живлення від індуктивно-ємнісного перетворювача (ІЄП) за схемою Г1-*LC*, що проведені у роботі [1], дало змогу визначити коефіцієнти перетворення та виконати розрахунок випрямляча. Це дає можливість подальшого розрахунку та оптимізації параметрів реактивних елементів ІЄП – реактора *L* і конденсаторної батареї *C* (рис. 1).

Для визначення абсолютних значень потужностей реактивних елементів Q_L, Q_C та потужності навантаження $P_{\text{Н}}$ користуються відповідними формулами

$$Q_L = \left|\dot{I}_L\right|^2 x_L, \qquad Q_C = \left|\dot{I}_C\right|^2 x_C, \qquad P_{\text{Н}} = \left|\dot{I}_H\right|^2 R_{\text{Н}}, \tag{1}$$

де $\dot{I}_L$, $\dot{I}_C$, $\dot{I}_{\text{Н}}$ – струми, що протікають через реактор з опором x_L, батарею конденсатора з опором x_C, навантаження $R_{\text{Н}}$.

У процесі порівняльного аналізу схем ІЄП доцільно користуватися питомими значеннями реактивних потужностей *q*, які є відношенням поточного значення абсолютної реактивної потужності до потужності навантаження при такому самому значенні відносного опору навантаження *n* [2].

Слід зазначити, що формули (1) можна використовувати для синусоїдальних струмів, а в нашому випадку синусоїдальним є лише струм через реактор *L* (рис. 2). Для несинусоїдальних струмів через батарею конденсатора і умовне навантаження ІЄП ($z_{\text{Н ІЄП}}$) слід користуватися діючими значеннями струмів та напруги на цих елементах і визначати потужності як добуток діючих значень

$$Q_C = I_C \cdot U_C, \qquad S_{\text{Н ІЄП}} = I_{\text{ІЄП}} \cdot U_{\text{ІЄП}}, \tag{2}$$

де I_C, $I_{\text{ІЄП}}$ – діючі значення струмів через конденсатор *C* та на виході ІЄП; $U_C = U_{ІЄП}$ – діюче значення напруги на конденсаторі *C*, а

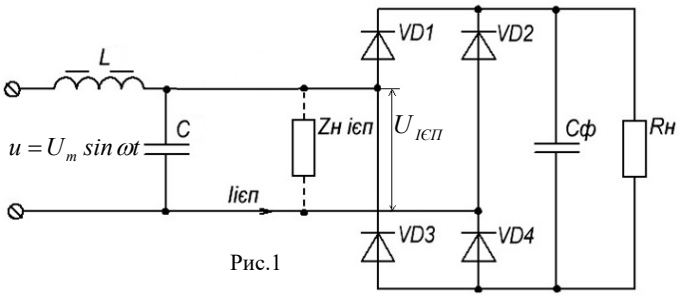

Рис.1

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

також на виході ІЄП.

Метою роботи є визначення абсолютних потужностей електромагнітних елементів та оптимального відносного опору навантаження, що забезпечує мінімальну питому потужність реактора ІЄП, який живить мостовий однофазний випрямляч з ємнісним фільтром та активним навантаженням. Для вирішення цієї задачі скористаємося одним із підрозділів математичної теорії планування експериментів [1, 3, 4], а саме – проведення експериментів за ортогональним планом другого порядку, що є доречним через параболічну залежність потужностей реактивних елементів ІЄП від опору навантаження [2].

Функціями цілі Y є абсолютні та питомі потужності реактора L та конденсатора C: Q_L, q_L, Q_C, q_C, де $q_L = I_L^2 x_L (I_{\text{ІЄП}} \cdot U_{\text{ІЄП}})^{-1} = Q_L (S_{\text{НІЄП}})^{-1}$, $q_C = I_C U_C (I_{\text{ІЄП}} \cdot U_{\text{ІЄП}})^{-1} = Q_C (S_{\text{НІЄП}})^{-1}$.

Рис.2

За фактори, що варіюються, обрано: X_1 – відношення ємності $C_ф$ конденсатора фільтра до ємності C конденсатора ІЄП та X_2 – відношення опору навантаження $R_{\text{Н}}$ до опору реактора ІЄП $x_L = \omega L$. Експеримент проводився за схемою, зображеною на рис. 1, з наступними параметрами: напруга живлення 220 В, частота напруги 50 Гц, потужність навантаження варіювалася від 0,3 до 1,2 кВт. ІЄП виконано за схемою Г1-*LC* [2] з індуктивністю реактора L=184 мГн і ємністю конденсатора C=50 мкФ. Струм і напруга на вході та виході випрямляча реєструвалися та вимірювалися приладом *CA PowerQualityAnalyzez*.

За попередніми дослідженнями [1] 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_{1min}=9 до X_{1max}=18 за рахунок зміни ємності конденсатора $C_ф$ від 450 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 за ортогональним планом другого порядку. Матрицю планування кодованих значень факторів наведено у таблиці (розділ x_i, в якому $x_3' = x_1^2 - 2/3$ та $x_4' = x_2^2 - 2/3$).

Результатами кожного досліду були значення струмів I_L, I_C, $I_{\text{ІЄП}}$ та напруги $U_{\text{ІЄП}}$. На рис. 2 для досліду N=9 (таблиця) наведено осцилограми цих струмів і напруги. Результати вимірювань та обчислень наведено у таблиці.

N	x_i						Y_N							
	x_0	x_1	x_2	x_3'	x_4'	$x_1 \cdot x_2$	$I_{ІЄП}$, (A)	$U_{ІЄП}$, (B)	I_C, (A)	I_L, (A)	q_L	q_C	Q_L, (Вт)	Q_C, (Вт)
1	+1	-1	-1	1/3	1/3	+1	4,25	85	1,7	4,6	3,38	0,4	1223	144,5
2	+1	+1	-1	1/3	1/3	-1	4,2	82	1,75	4,6	3,55	0,42	1223	143,5
3	+1	-1	+1	1/3	1/3	-1	4,7	327	5,3	7,5	2,11	1,13	3251	1733
4	+1	+1	+1	1/3	1/3	+1	4,6	331	5,3	7,45	2,11	1,15	3208	1754
5	+1	-1	0	1/3	−2/3	0	4,5	213	3,75	6,0	2,17	0,83	2081	799
6	+1	+1	0	1/3	−2/3	0	4,5	210	3,75	5,9	2,13	0,83	2012	788
7	+1	0	-1	−2/3	1/3	0	4,25	83	1,74	4,6	3,47	0,41	1223	144
8	+1	0	+1	−2/3	1/3	0	4,8	328	5,2	7,4	2,01	1,08	3165	1706
9	+1	0	0	−2/3	−2/3	0	4,5	210	3,75	6,0	2,2	0,83	2081	788

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:

$$\hat{Q}_L = 2{,}051 - 1{,}9\cdot 10^{-2} x_1 + 0{,}993 x_2 - 1\cdot 10^{-2} x_1^2 + 0{,}158 x_2^2 - 1{,}1\cdot 10^{-2} x_1 x_2, \quad (3)$$

$$\hat{q}_L = 2{,}156 + 2{,}16\cdot 10^{-2} x_1 - 0{,}695 x_2 + 1{,}5\cdot 10^{-2} x_1^2 + 0{,}605 x_2^2 - 4{,}25\cdot 10^{-2} x_1 x_2, \quad (4)$$

$$\hat{Q}_C = 0{,}817 + 6{,}2\cdot 10^{-3} x_1 + 0{,}355 x_2 + 1{,}95\cdot 10^{-2} x_1^2 - 6{,}55\cdot 10^{-2} x_2^2 + 3\cdot 10^{-3} x_1 x_2, \quad (5)$$

$$\hat{q}_C = 0{,}777 + 6{,}16\cdot 10^{-3} x_1 + 0{,}355 x_2 + 1{,}95\cdot 10^{-2} x_1^2 - 6{,}55\cdot 10^{-2} x_2^2 + 0{,}75\cdot 10^{-4} x_1 x_2. \quad (6)$$

Отримані експериментально значення Q_L, q_L, Q_C, q_C відрізняються від значень $\hat{Q}_L$, $\hat{q}_L$, $\hat{Q}_C$, $\hat{q}_C$, які розраховано за поліномами (3)–(6), не більше як на 5%.

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

Після перетворення поліномів (3)–(6) маємо

$$\hat{Q}_L = 0{,}801 + 1{,}3\cdot 10^{-2} X_1 + 0{,}73 X_2 - 5\cdot 10^{-4} X_1^2 + 0{,}297 X_2^2 - 3{,}34\cdot 10^{-3} X_1 X_2, \quad (7)$$

$$\hat{q}_L = 4{,}576 - 5\cdot 10^{-4} X_1 - 3{,}357 X_2 + 7{,}4\cdot 10^{-4} X_1^2 + 1{,}14 X_2^2 - 1{,}29\cdot 10^{-2} X_1 X_2, \quad (8)$$

$$\hat{Q}_C = 0{,}275 - 2{,}57\cdot 10^{-2} X_1 + 0{,}754 X_2 + 9{,}6\cdot 10^{-4} X_1^2 - 0{,}123 X_2^2 + 9{,}1\cdot 10^{-4} X_1 X_2, \quad (9)$$

$$\hat{q}_C = 0{,}221 - 2{,}46\cdot 10^{-2} X_1 + 0{,}767 X_2 + 9{,}6\cdot 10^{-4} X_1^2 - 0{,}123 X_2^2 + 2{,}28\cdot 10^{-5} X_1 X_2. \quad (10)$$

У поліномах (7)–(10) значення коефіцієнтів при факторі X_1 можна не враховувати через те, що вони майже на порядок менші за аналогічні коефіцієнти при факторі X_2. Визначення похідних від фактора X_2 у поліномах (7–10) за постійних значень фактора X_1 від 9 до 18 у визначеному вище факторному просторі вказують на те, що мінімум є тільки у функції q_L.

Підтвердженням цього є графіки, показані на рис. 3 та 4: рис. 3 – графіки функцій $\hat{q}_L$ і $\hat{Q}_L$ залежно від фактора X_2 у разі двох постійних значень фактора X_1 – 9 та 18. З рисунка видно, що графіки для факторів $X_1 = 9$ та $X_1 = 18$ майже співпадають. На рис. 4 наведено графіки залежностей $\hat{q}_C$ і $\hat{Q}_C$ від фактора X_2 у випадку постійного значення фактора $X_1 = 18$. Видно, що функції $\hat{q}_C$ і $\hat{Q}_C$ тільки зростають із підвищенням опору навантаження, тому їхні значення слід обирати, орієнтуючися на мінімум функції $\hat{q}_L$. Цей мінімум (рис. 3) $\hat{q}_L = 1{,}97$ маємо за значень факторів $X_2 = 1{,}57$ і $X_1 = 18$ та $\hat{q}_L = 1{,}95$ – для $X_2 = 1{,}52$ і $X_1 = 9$.

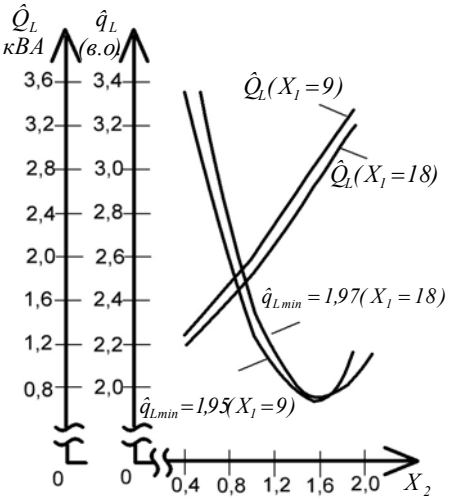

Рис.3

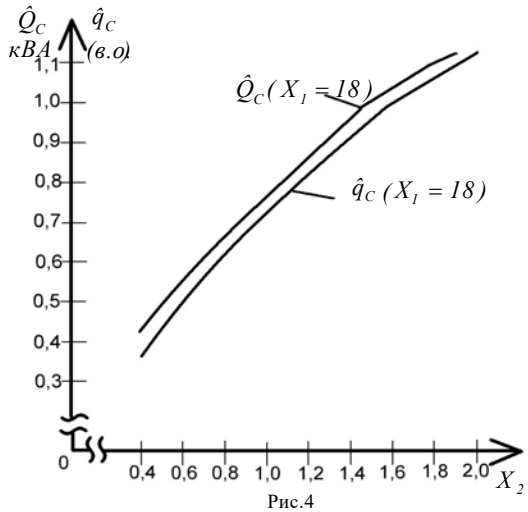

Рис.4

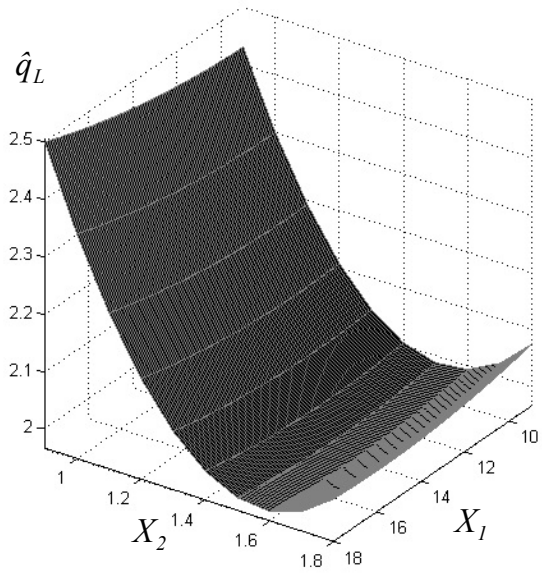

Рис.5

На рис. 5 наведено поверхню відгуку $\hat{q}_L$ у разі зміни X_1 від 9 до 18 та X_2 від 0,9 до 1,8.

У теорії індуктивно-ємнісних перетворювачів розрахунок параметрів ІЄП починається з визначення відносного оптимального значення його опору навантаження [2] за мінімальної відносної потужності одного з реактивних елементів ІЄП. З рис. 3 видно, що визначений відносний опір навантаження $X_{2\text{опт}} = 1{,}57$ як відношення $X_{2\text{опт}} = R_{\text{Н}}/x_L$ є оптимальним з точки зору мінімуму питомої потужності реактора *L* ІЄП. Для того, щоб перейти до визначення еквівалентного опору навантаження безпосередньо ІЄП, скористаємося значеннями коефіцієнтів перетворення випрямляча за струмом і напругою, отриманими в роботі [1].

Визначимо оптимальне значення еквівалентного опору навантаження ІЄП $z_{\text{НІЄП}} = U_{\text{ІЄП}}/I_{\text{ІЄП}}$ через коефіцієнт перетворення випрямляча за опором $k_{R_{\text{Н}}} = k_u/k_i$ або $k_{R_{\text{Н}}} = R_{\text{Н}}/z_{\text{НІЄП}}$, $R_{\text{Н}} = X_{2\text{опт}} \cdot x_L = 90{,}75$ Ом. Задамося значенням першого фактора $X_1 = 18$, за якого маємо мінімальні значення коефіцієнта пульсацій k_n (таблиця в [1]). За формулами (5) та (6) з [1] для значень $X_1 = 18$, $X_{2\text{опт}} = 1{,}57$ визначимо коефіцієнти перетворення випрямляча за струмом $k_i = 0{,}715$ і напругою $k_u = 1{,}14$ та за їхніми значеннями коефіцієнт $k_{\text{R}_{\text{Н}}\text{опт}} = 1{,}59$ і відповідно оптимальне значення еквівалентного опору навантаження ІЄП $z_{\text{НІЄП}} = R_{\text{Н}}/k_{R_{\text{Н}}\text{опт}} = 57{,}07$ Ом.

Таким чином, оптимальне відношення еквівалентного опору навантаження ІЄП до опору реактора $n_{\text{опт}} = z_{\text{НІЄП}}/x_L = 0{,}987$ близьке до одиниці і забезпечує мінімум питомої потужності реактора *L* ІЄП за схемою Г1-*LC*.

Розглянемо конкретний приклад розрахунку ІЄП, що живиться від промислової мережі 220 В, $f = 50$ Гц за схемою Г1-*LC* з однофазним мостовим випрямлячем та активним навантаженням з ємнісним фільтром, в якому максимальна напруга на навантаженні $U_{\text{Н}} = 320$ В, струм через опір навантаження $I_{\text{Н}} = 35$ А, ємність конденсатора $C_{\text{ф}} = 10000$ мкФ. Визначаємо еквівалентний опір навантаження $z_{\text{НІЄП}}$ ІЄП через оптимальне значення коефіцієнта перетворення випрямляча за опором $k_{R_{\text{Н}}\text{опт}} = 1{,}59$ та опір навантаження $R_{\text{Н}} = U_{\text{Н}}/I_{\text{Н}} = 9{,}14$ Ом: $z_{\text{НІЄП}} = R_{\text{Н}}/k_{R_{\text{Н}}\text{опт}} = 5{,}75$ Ом. Індуктивний опір реактора ІЄП визначаємо як $x_L = z_{\text{НІЄП}}/n_{\text{опт}}$, де $n_{\text{опт}} = 1$, $x_L = 5{,}75$ Ом і відповідно індуктивність реактора $L = x_L/\omega = 18{,}3$ мГн та ємність конденсатора ІЄП $C = \left(\omega^2 L\right)^{-1} = 553$ мкФ. Отримані значення x_L та C дають змогу визначити фактори $X_2 = R_{\text{Н}}/x_L = 1{,}59$, $X_1 = C_{\text{ф}}/C = 18{,}1$ та порівняти їхні значення з початковими ($X_2 = 1{,}57$, $X_1 = 18$). Ці значення майже не відрізняються, тому визначені параметри реактивних елементів можна вважати остаточними.

Слід зазначити, що питома потужність q_L визначається фактором X_2 і майже не залежить від фактора X_1, а саме від ємності конденсатора фільтра $C_{\text{ф}}$ (рис. 3, 5, поліном (8), в якому коефіцієнти при X_1 на декілька порядків менші за подібні при X_2), тому $C_{\text{ф}}$ можна обирати з умов необхідних пульсацій струму.

Висновки. Визначено абсолютні потужності електромагнітних елементів та оптимальний відносний опір навантаження ІЄП за схемою Г1-*LC*, який забезпечує мінімальну питому потужність реактора *L* ІЄП. Ця потужність визначається опором навантаження $R_{\text{Н}}$ і не залежить від ємності конденсатора фільтра $C_{\text{ф}}$. Отримано результати, що дають змогу провести розрахунок елементів ІЄП у

випадку його роботи на мостовий однофазний випрямляч з ємнісним фільтром та активним навантаженням.

Роботу виконано в рамках теми "Розробка електронного та електротехнічного обладнання для нової технології плавлення та обробки скла та гірських порід індукційними струмами середнього діапазону частот" №0117U002584 (2017-2021р).

1. 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. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 5. С. 43-48.
DOI: https://doi.org/10.15407/techned2019.05.043

2. Милях А.Н., Волков И.В. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. Киев: Наукова думка, 1974. 216 с.

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

4. 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

ОПТИМИЗАЦИЯ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С МОСТОВЫМ ОДНОФАЗНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ, ЕМКОСТНЫМ ФИЛЬТРОМ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ АКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ ПО УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

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**

Проведена оптимизация по удельным мощностям реактивных элементов индуктивно-емкостного преобразователя по схеме Г1-LC, питающего однофазный мостовой выпрямитель с емкостным фильтром и активной нагрузкой. Оптимизацию выполнено согласно теории планирования экспериментов по ортогональному плану второго порядка. Полученные результаты позволяют рассчитать параметры реактивных элементов ИЕП, имеющие минимальные удельные мощности. Библ. 4, рис. 5, табл. 1.

Ключевые слова: выпрямитель, индуктивно-емкостной преобразователь, удельная мощность, реактивные элементы, активная загрузка, ёмкость.

OPTIMIZATION OF INDUCTIVE-CAPACITAL CONVERTER WITH BRIDGE ONE-PHASE RECTIFIER, CAPACITARY FILTER AND PARALLEL ACTIVE LOAD

V.M. Spirin, V.M. Hubarevich, Yu.V. Marunia, S.V. Salko, V.G. Grebenyuk
Institute of Electrodynamics, National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine. **E-mail: sspirin@ied.org.ua**

The optimization of the specific capacities of the reactive elements of the inductive-capacitive converter according to the scheme G1-LC, which feeds a single-phase bridge rectifier with a capacitive filter and active load, is carried out. The optimization was done according to the theory of planning the experiments on the second order orthogonal plan. The obtained results allow us to calculate the parameters of the reactive elements of the ICC, which have a minimum specific capacities. References 4, figures 5, table 1.

Key words: rectifier, inductive-capacitive converter, specific capacities, reactive elements, active load, capacitive.

1. 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

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

3. Pinchuk S.I. Organization of the experiment in modeling and optimization of technical systems. Dnepropetrovsk: LLC Independent Publishing Organization Diva, 2008. 248 p. (Rus)

4. 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)

Надійшла 03.07.2019
Остаточний варіант 16.09.2019