

T.V. Mysak

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, Ukraine, 03680

The formation of the sinusoidal output voltage of the power supply unit with an output transformer in the sliding mode
The object of study is the sinusoidal voltage source that is composed of a frequency converter with an output LC-filter and single-phase output transformer. Synthesis of control law by forcing a sliding mode to minimize the impact of disturbances in the load on the output voltage of the source has been performed. Limitations of non-ideal cases that affect the technical feasibility of the obtained control law have been taken into account. The simulation results are presented.

References 5, figures 5.

Key words: frequency converter, output LC-filter, one phase transformer, sliding mode, output voltage form.

Надійшла 11.01.2016

Received 11.01.2016

УДК 621.314

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АКТИВНОГО КОРЕКТОРА ФОРМИ СТРУМУ ПРИ МАЛІЙ ПОТУЖНОСТІ НАВАНТАЖЕННЯ

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

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна
e-mail: uweshka@mail.ru

На основі теорії планування експериментів визначено залежності коефіцієнта спотворень гармонік струму споживання однофазного мостового випрямляча з ємнісним фільтром за наявності активного коректора форми струму при малій потужності навантаження в функції від напруги мережі, ємності фільтра і опору навантаження. Бібл. 5, рис. 7, табл. 4.

Ключові слова: потужність, навантаження, ємність фільтра, активний коректор форми струму, теорія планування експериментів.

Значна кількість навантажень, таких як напівпровідникові перетворювачі з проміжною ланкою постійного струму, комп'ютери тощо, живляться від випрямляча з ємнісним фільтром. Імпульсне споживання струму таких навантажень, масовість їх використання призводять до суттєвого зниження показників якості електроенергії, що споживається від мережі живлення і може мати великі значення неактивних складових вхідної потужності, тобто реактивної потужності і потужності спотворень. Для покращення електромагнітної сумісності мережі живлення і споживачів її енергії останнім часом використовують активні коректори форми струму (АКФС). Суть роботи АКФС полягає в тому, що для компенсації неактивних складових вхідної потужності коректор формує допоміжний струм $i_k(t)$, який при складанні зі струмом навантаження $i_n(t)$ забезпечує отримання мережевого струму $i_M(t)$ синусоїдальної форми. Тому в ідеальному випадку маємо $i_M(t) = i_n(t) - i_k(t) = I_m \sin \omega t$.

У випадку практичного застосування нелінійних навантажень можуть виникати режими роботи, коли споживачі працюють на повну потужність тільки протягом невеликого проміжку часу, а в основному вони працюють на значно меншій потужності, що пов'язано з умовами виконання технологічного циклу або специфіки використання навантаження. Дослідження подібних режимів роботи не проводились. У зв'язку з цим були вивчені всі процеси, що виникають у таких ситуаціях, і визначено значення одного з основних показників якості споживання електроенергії – коефіцієнт гармонік струму THDi на реальному макеті «АКФТ – випрямляч – ємність фільтра (Сф) – навантаження (Rn)». Експериментальні дослідження АКФТ дали змогу також оцінити внесену прийнятими

допущеннями похибку (у напівпровідникових елементах не враховувалися комутаційні втрати, конденсатори і реактори мали нескінченну добротність і всі ці компоненти вважалися ідеальними).

Доцільним виявився спосіб визначення THDi, пов'язаний з проведенням на основі теорії планування цілеспрямованих експериментів на однофазному макеті АКФТ [2] і представлення результатів у вигляді математичної моделі. Силова частина коректора (рис. 1) складається з ланцюга плавного пуску ($R1$, Π), фільтра вищих гармонік ($L1$, $C1$), реактора ($L2$), інвертора і накопичувальної ємності ($C2$). Інвертор коректора керується таким чином, щоб забезпечувати зміну полярності напруги на реакторі ($L2$). Це і викликає збільшення або зменшення струму через реактор і власне за рахунок цього і формується струм коректора $i_k(t)$.

У теорії планування експерименту [2] зазвичай розглядаються завдання, в яких похибка у визначенні функції мети $Y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ є суттєвою і обумовлена дією випадкових факторів, що не враховуються в експерименті. Однак у цьому випадку, коли досліди дозволяють визначити величину THDi практично без помилок, необхідно, щоб розбіжність між експериментальними значеннями і значеннями, представленими апроксимуючим виразом, не перевищувало допустимої величини. Існує декілька шляхів отримання адекватної інформації:

- звуження (зменшення) інтервалів варіювання факторів;
- виділення фактора, що породжує неадекватності, і реалізація для решти $n-1$ факторів «к» планів, в кожному з яких виділена змінна, зафіксована на деякому рівні;
- перехід до плану повного факторного експерименту при великому числі рівнів варіювання факторів, наприклад, до плану 3^n ;
- перетворення метрики факторного простору, тобто перехід до нових чинників, функціонально пов'язаних зі старими;
- добудовування вихідного плану до плану більш високого порядку і визначення коефіцієнтів при квадратах факторів, тобто отримання квадратичного полінома.

Що стосується розглянутої задачі, найбільш доцільним виявився шлях, пов'язаний з побудовою ортогонального плану другого порядку [1, 3], що дає прийнятну адекватність при плануванні експериментів у системах, що містять $L-C$ перетворювачі і випрямлячі з ємнісним навантаженням [4, 5].

Функцією мети є коефіцієнт гармонік струму THDi, а в якості факторів обрані X_1 – ємність фільтра на виході випрямляча, X_2 – напруга живильної мережі. Інтервали варіювання незалежних змінних X_1 , X_2 представлені в табл. 1.

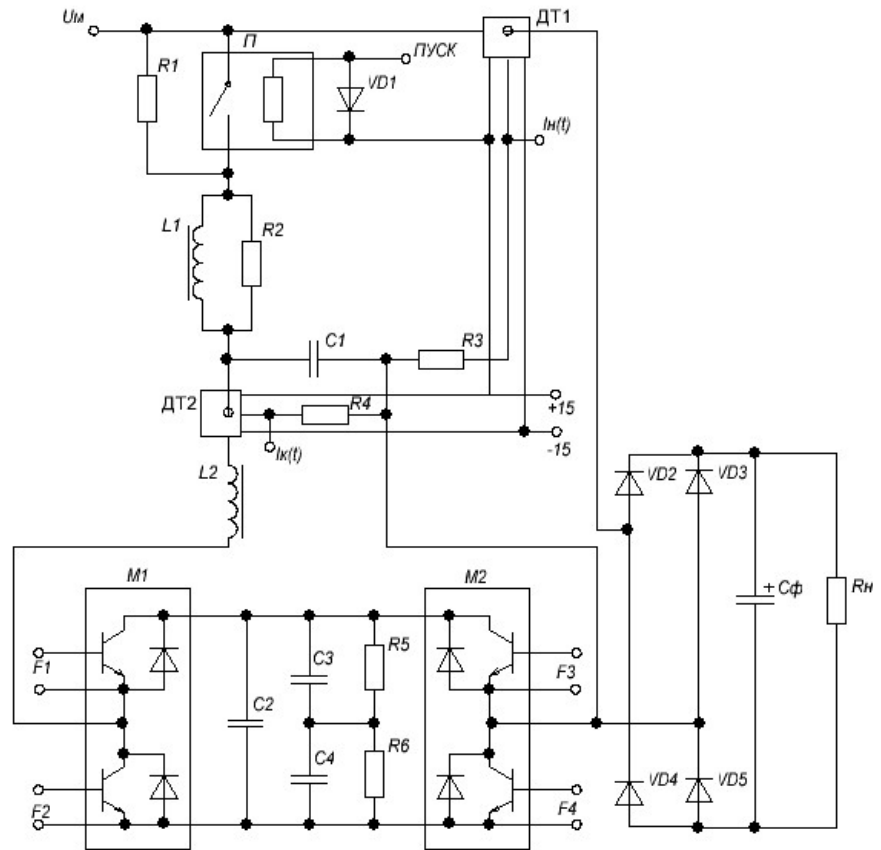


Рис. 1

Таблиця 1

Рівень варіювання	X_1 (мкФ)	X_2 (В)
Основний рівень	$X_{10}=2295$	$X_{20}=220$
Інтервал варіювання	$\Delta X_1=1155$	$\Delta X_2=22$
Верхній рівень	$X_{1\max}=3450$	$X_{2\max}=242$
Нижній рівень	$X_{1\min}=1140$	$X_{2\min}=198$

планом другого порядку.

Матриця планування кодованих значень факторів показана в табл. 2, а також представлено значення функції мети $\widehat{\text{THDi}}$, визначене експериментально, і $\widehat{\text{THDi}}$, обчислене за отриманим поліномом.

Таблиця 2

U	x_i						$Y_u, \%$	
	x_0	x_1	x_2	$x'_3 = x_1^2 - \frac{1}{2}$	$x'_4 = x_2^2 - \frac{2}{3}$	$x_1 \cdot x_2$	THDi	$\widehat{\text{THDi}}$
1	+	-	-	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	+	18,2	18,4
2	+	+	-	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	-	8,5	8,02
3	+	-	+	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	-	15,5	16,12
4	+	+	+	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	+	8,8	8,66
5	+	-	0	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	19,2	18,3
6	+	+	0	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	8,7	9,34
7	+	0	-	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	9,5	9,7
8	+	0	+	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	9,3	8,84
9	+	0	0	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	10,0	10,27

На основі реалізованого ортогонального плану другого порядку були визначені коефіцієнти поліномів кодованих змінних за такою формулою:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^9 x_{iu} \cdot Y_u}{\sum_{u=1}^9 x_{iu}^2}. \quad (1)$$

THDi відповідно до даних табл. 2 представляється поліномом

$$Y = 11,97 - 4,48 \cdot x_1 - 0,43 \cdot x_2 + 3,55 \cdot \left(x_1^2 - \frac{2}{3}\right) - \left(x_2^2 - \frac{2}{3}\right) + 0,75 \cdot x_1 x_2,$$

або, переходячи до звичайного вигляду,

$$Y = 10,27 - 4,48 \cdot x_1 - 0,43 \cdot x_2 + 3,55 \cdot x_1^2 - x_2^2 + 0,75 \cdot x_1 x_2. \quad (2)$$

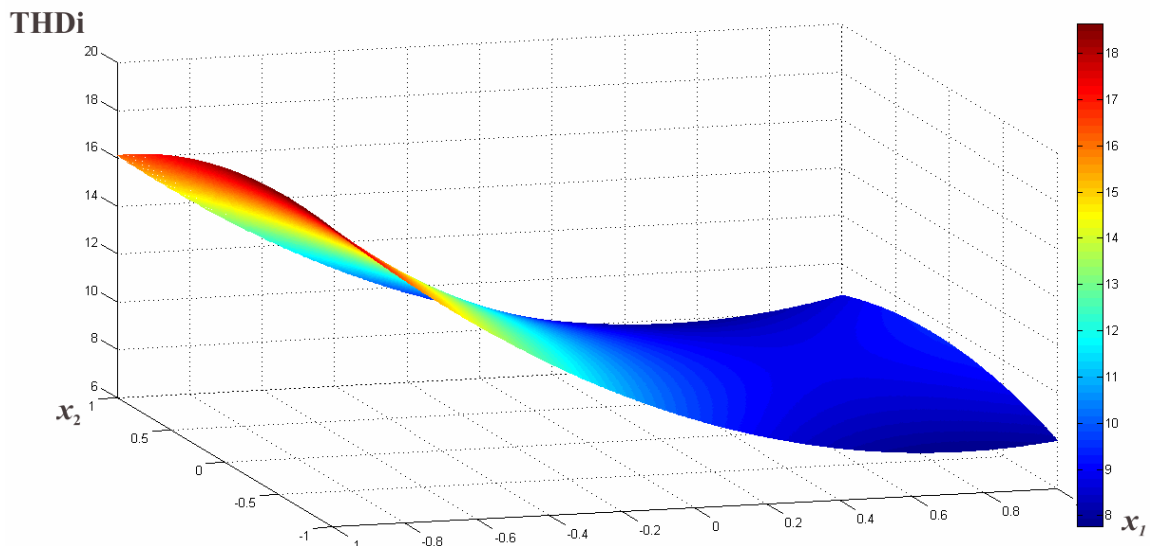


Рис. 2

Середнє відхилення значення \widehat{THDi} від значення $THDi$ становить 3,7 %, максимальне 6,8 % при $X_1 = 3450$ мкФ, $X_2 = 220$ В.

Однією з переваг теорії планування експерименту є наочність отриманих результатів, у чому можна переконатися з рис. 2, на якому зображена поверхня відгуку коефіцієнта гармонік струму $THDi$ у двофакторному просторі x_1, x_2 .

Для зручності використання отриманих результатів на практиці доцільно перейти від кодованих змінних до натуральних значень змінних згідно з формулою

$$x_i = \frac{X_i - X_{i\text{сеп}}}{X_{i\text{макс}} - X_{i\text{сеп}}}. \quad (3)$$

Після перетворення поліном (2) набуде такого вигляду:

$$Y = -47,63 - 22,58 \cdot 10^{-3} X_1 + 81,97 \cdot 10^{-2} X_2 + 2,66 \cdot 10^{-6} X_1^2 - 2,068 \cdot 10^{-6} X_2^2 + 2,95 \cdot 10^{-5} X_1 X_2. \quad (4)$$

Використовуючи поліном (4), визначимо для конкретних значень ємності фільтра $X_1 = 2295$ мкФ і напруги мережі живлення $X_2 = 220$ В значення $THDi$, яке в даному випадку становить 10,27 %.

На рис. 3 наведені залежності коефіцієнта гармонік струму $THDi$ від факторів X_1, X_2 , при фіксованих значеннях фактора X_1 ($C_\phi = 1155$ мкФ, 2295 мкФ, 3000 мкФ). Як видно, при відхиленнях напруги мережі живлення (200...240 В) $THDi$ змінюється незначно при $C_\phi = 2295$ мкФ (менше 1 %) або дещо більше (~ 4 %) при $C_\phi = 1155$ мкФ.

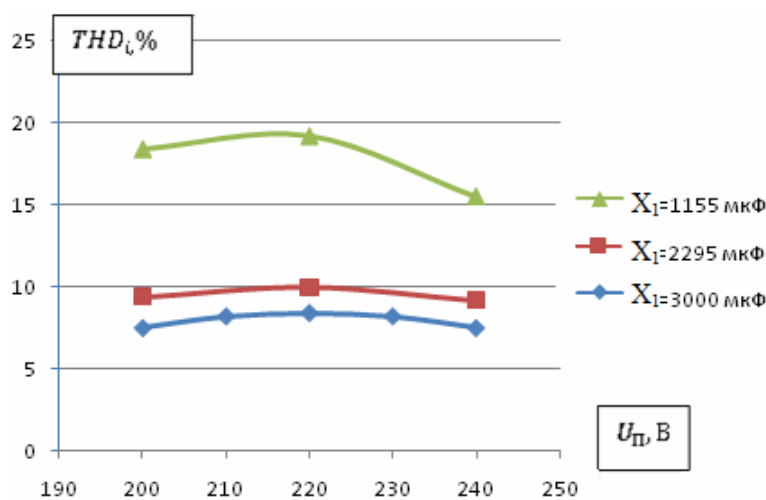


Рис. 3

Більш суттєві зміни $THDi$ (до 10 %) спостерігаються при зміні фактора X_1 при фіксованому значенні фактора $X_2 = 220$, 240 В (рис. 4) і для значення фактора $X_1 = 3000$ мкФ спостерігається мінімальне значення $THDi$.

Одним з факторів, який може застосовуватися в цій системі, є опір навантаження R_n , тому доцільно визначити його вплив на $THDi$. У зв'язку з цим був

організований експеримент за ортогональним планом другого порядку. В якості факторів обрані X_2 – опір навантаження R_n і

X_1 – ємність фільтра C_ϕ , включеного на виході випрямляча. Інтервали варіювання цих факторів наведені в табл. 3. Після операції кодування факторів був проведений експеримент за ортогональним планом дру-

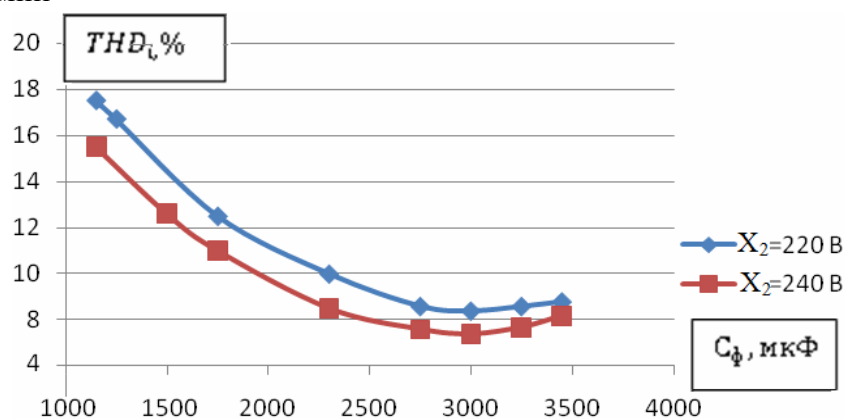


Рис. 4

Таблиця 3

Рівень варіювання	X_1 (мкФ)	X_2 (Ом)
Основний рівень	$X_{10} = 2295$	$X_{20} = 28,0$
Інтервал варіювання	$\Delta X_1 = 1155$	$\Delta X_2 = 21,0$
Верхній рівень	$X_{1 \text{макс}} = 3450$	$X_{2 \text{макс}} = 40,0$
Нижній рівень	$X_{1 \text{мін}} = 1140$	$X_{2 \text{мін}} = 16,0$

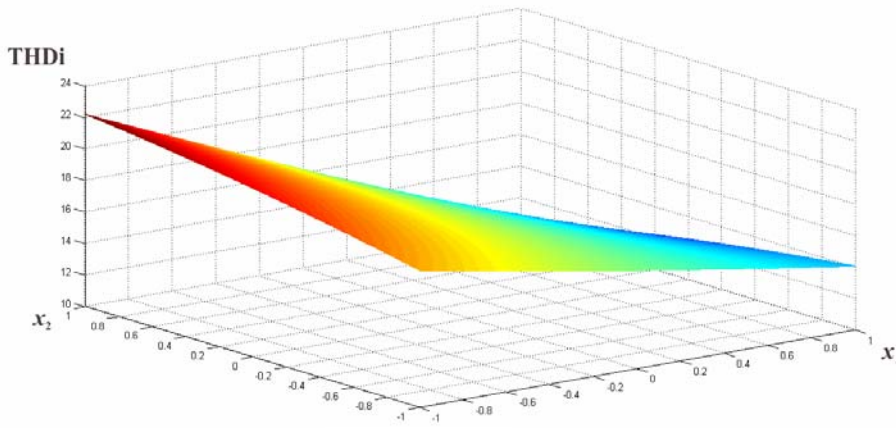


Рис. 5

$$Y = 16,38 - 4,07 \cdot x_1 + 0,133 \cdot \left(x_1^2 - \frac{2}{3}\right) - 0,267 \cdot \left(x_2^2 - \frac{2}{3}\right) - 1,75 \cdot x_1 x_2,$$

і, переходячи до звичайного вигляду,

$$Y = 16,47 - 4,07 \cdot x_1 + 0,133 \cdot x_1^2 - 0,267 x_2^2 - 1,75 \cdot x_1 x_2. \tag{5}$$

У табл. 4 представлено значення \widehat{THDi} , обчислене за останнім поліномом. Середня відмінність \widehat{THDi} від вимірюного значення THDi становить 2,7 %, максимальна в точці з координатами $x_1 = -1, x_2 = 0$ дорівнює 5 %.

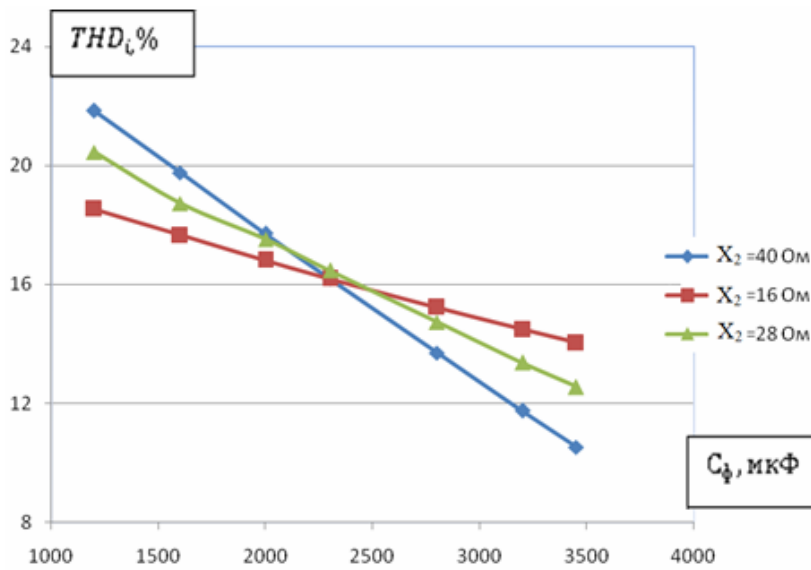


Рис. 6

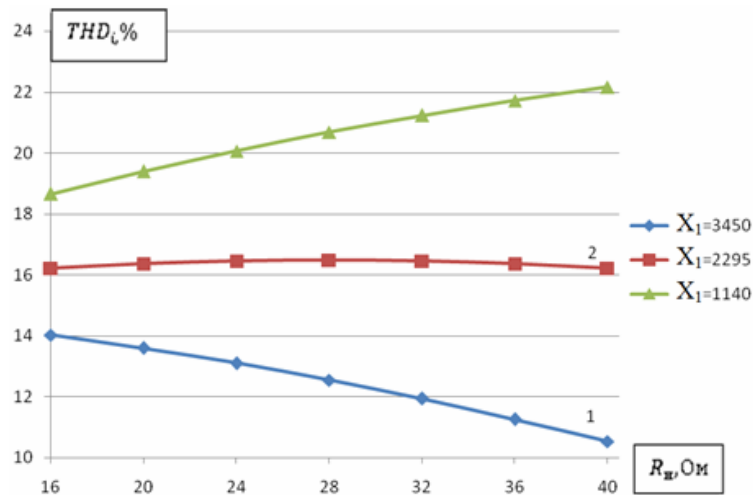


Рис. 7

гого порядку. Матриця планування кодovаних значень факторів наведена в табл. 4.

На основі реалізованого ортогонального плану другого порядку були визначені коефіцієнти поліномів кодovаних змінних за формулою (1). THDi відповідно до даних таблиці представляється поліномом

На рис. 5 зображено поверхню відгуку для коефіцієнта гармонік струму THDi у двофакторному просторі, по якій можна простежити залежності функції мети від факторів x_1, x_2 .

Відповідно до формули (3) можна перейти від кодovаних змінних до натуральних, які зручніше використовувати на практиці. Після перетворення поліном (5) набуде такого вигляду:

$$Y = 15,52 - 4,435 \cdot 10^{-4} X_1 + 0,3934 X_2 + 9,9567 \cdot 10^{-8} X_1^2 - 1,854 \cdot 10^{-3} X_2^2 - 1,262 \cdot 10^{-4} X_1 X_2.$$

На рис. 6 представлено залежності THDi від ємності фільтра C_ϕ при різних значеннях опору навантаження $R_n = 16, 28, 40$ Ом, з яких видно, що зі збільшенням ємності фільтра знижується THDi при всіх значеннях опору навантаження, що є природною закономірністю роботи випрямляча на навантаження $R - C$.

На рис. 7 ця закономірність підтверджується для кривої 1, у той же час крива 2 показує не-

значну залежність THDi від опору навантаження.

Висновки. Зростання ємності фільтра призводить до зменшення коефіцієнта гармонік спотворення струму. Відхилення напруги живлення несуттєво впливає на коефіцієнт гармонік спотворення струму. Чим менший опір навантаження, тим менший діапазон зміни THDi як

при збільшенні R_n , так і при збільшенні C_ϕ . Існує значення ємності фільтра (у нашому випадку $C_\phi = 2295$ мкФ), при якому коефіцієнт спотворення гармонік струму майже не змінюється при зміні опору навантаження. Якщо при цьому THDi буде вище бажаного, то можна підключити пасивний фільтр, тобто перейти до варіанту гібридного фільтра, відкоригувавши бажані значення THDi при потрібному діапазоні зміни опору навантаження.

Таблиця 4

U	x_i						$Y_u, \%$	
	x_0	x_1	x_2	$x'_3 = x_1^2 - 1/2$	$x'_4 = x_2^2 - 2/3$	$x_1 \cdot x_2$	THDi	$\widehat{\text{THDi}}$
1	+	-	-	1/3	1/3	+	18	19,9
2	+	+	-	1/3	1/3	-	14	14,02
3	+	-	+	1/3	1/3	-	22	22,16
4	+	+	+	1/3	1/3	+	11	10,52
5	+	-	0	1/3	-2/3	0	21,4	20,41
6	+	+	0	1/3	-2/3	0	12	12,53
7	+	0	-	-2/3	1/3	0	17	16,2
8	+	0	+	-2/3	1/3	0	16	16,2
9	+	0	0	-2/3	-2/3	0	16	16,47

1. *Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П.* Планирование эксперимента в электромеханике. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
2. *Комаров М.С., Головки О.О., Булатов А.Ю., Подейко П.П.* Энергозберігаючі технології в комп'ютерних класах та навчальних лабораторіях закладів освіти // Вісник КНУТД. – 2013. – № 6. – С. 278–286.
3. *Налимов В.В., Чернова Н.А.* Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
4. *Спирин В.М., Курач А.М.* Определение коэффициентов преобразования выпрямителя, питающегося от источника стабилизированного тока при зарядке емкостного накопителя // Методы и технические средства стабилизации тока. – К.: Наук. думка, 1980. – С. 37–45.
5. *Спирин В.М., Курач А.М., Вильский Г.Б.* Энергетические характеристики зарядного устройства с индуктивно-емкостным преобразователем источника напряжения в источник тока // Оптимизация устройств энергетической электроники. – К.: Наук. думка, 1982. – С. 30–32.

УДК 621.314

В.М. Спири́н, докт. техн. наук, **В.Н. Губаре́вич**, канд. техн. наук, **В.Г. Гребенюк**, вед. инж., **С.В. Салко**, инж., **Ю.В. Мару́ня**, инж.

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03680, Украина

Исследование работы активного корректора формы тока при малой мощности нагрузки

На основе теории планирования экспериментов определены зависимости коэффициента искажений гармоник по току потребления однофазного мостового выпрямителя с емкостным фильтром при наличии активного корректора формы тока при малой мощности нагрузки в функции от напряжения сети, емкости фильтра и сопротивления нагрузки. Библ. 5, рис. 7, табл. 4.

Ключевые слова: мощность, нагрузка, емкость фильтра, активный корректор формы тока, теория планирования экспериментов.

V.M. Spirin, V.M. Hubarevych, V.G. Grebenyuk, S.V. Salko, Yu.V. Marunya

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Research of the active corrector current form work at low power load

Using the theory of planning of experiments there are determined dependencies of the total harmonic distortion of current of a single-phase bridge rectifier with a capacitive filter in the presence of the current waveform active corrector at low power load as a function of voltage, capacity of the filter and load resistance. References 5, figures 7, tables 4.

Key words: power, load, capacity of the filter, current waveform active corrector, theory of planning of experiments.

Надійшла 13.07.2015

Received 13.07.2015