

Ю. Г. Ведміцький
В. В. Захарченко
С. В. Шевчук
І. О. Рожко
О. А. Грибовський

МАТЕМАТИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЗАЛЕЖНОСТІ АМПЛІТУДИ ОСНОВНОЇ ГАРМОНІКИ КОНВЕРТОВАНОЇ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ ВІД КУТА ВМИКАННЯ ТА ЇЇ ДІЮЧОГО ЗНАЧЕННЯ В РЕГУЛЯТОРАХ ЗМІННОГО СТРУМУ (ДОПОВІДЬ №5)

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі з метою дослідження показників якості процесу конвертування вихідної напруги, яка формується під час силового перетворення параметрів електричної енергії в електронних регуляторах змінного струму (перетворювачах типу АС-АС), проведено математичну ідентифікацію залежностей амплітуди її основної гармоніки від фазового кута вмикання і діючого значення цієї напруги. Залежності представлено у відносних одиницях.

Ключові слова: електротехніка, електроніка, регулятор змінного струму, одновимірні 2π -періодичні функції, регульовальна характеристика, функціональний простір, коефіцієнти та ряди Фур'є, спектр, амплітудно-частотна характеристика, основна гармоніка

Abstract

In the work aimed at researching quality indicators of the output voltage conversion process, which is formed during the power conversion of electrical energy parameters in electronic current change regulators (AC-AC type converters), a mathematical identification of the independence of the amplitude of its fundamental harmonic from the phase angle of switching on and the level of its active value. The dependence is presented in units relative.

Keywords: electrical engineering, electronics, AC regulator, one-dimensional 2π -periodic functions, adjustment characteristic, functional space, Fourier coefficients, Fourier series, spectrum, amplitude-frequency characteristic, fundamental harmonic

Вступ

Клас 2π -періодичних функцій, сформованих над полями значень тригонометричних синуса або косинуса, має винятково важливе значення у вихідному базисі сучасної силової електроніки та відновлювальної електроенергетики [1-14].

Прикладом може слугувати *одновимірною* 2π -періодична функція конвертованої вихідної напруги $u_{\text{вих}}(\alpha; \theta)$, де $\theta = \omega t$, (рис. 1, а), яку сформовано *регулятором змінного струму*. Відповідно до алгоритму його роботи *діюче значення вихідної напруги* перебуває в прямій залежності від *кута вмикання* α (рис. 1, б), заданого системою імпульсно-фазового керування (СІФК) [1-6]:

$$U_{\text{вих}}(\alpha) = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_{\text{вих}}^2(\alpha; \theta) d\theta} = \frac{U_m}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha}. \quad (1)$$

Проте водночас в безпосередній залежності від кута вмикання α перебувають і інші можливі функціонали зазначених 2π -періодичних функцій, з-поміж яких і ті, які або наразі визначають, або потенційно здатні визначати якість конвертованої напруги, отриманої під час силового перетворення параметрів електричної енергії в регуляторі змінного струму.

До таких показників якості, як відомо [1-7], відносять зокрема і амплітудно-частотну та фазово-частотну спектральні характеристики досліджуваного силового процесу, залежність яких від кута вмикання α є очевидною.

Водночас опис аналітичного характеру такої функціональної залежності в зазначених літературних джерелах висвітлений недостатньо, а подекуди і взагалі відсутній.

Тому метою наявної роботи і має стати *математична ідентифікація залежностей амплітуди основної (першої) гармоніки конвертованої вихідної напруги в функції від кута вмикання α та її діючого значення, представлених у відносних одиницях*, які формуються під час силового перетворення параметрів електричної енергії в електронних регуляторах змінного струму (перетворювачах типу АС-АС).

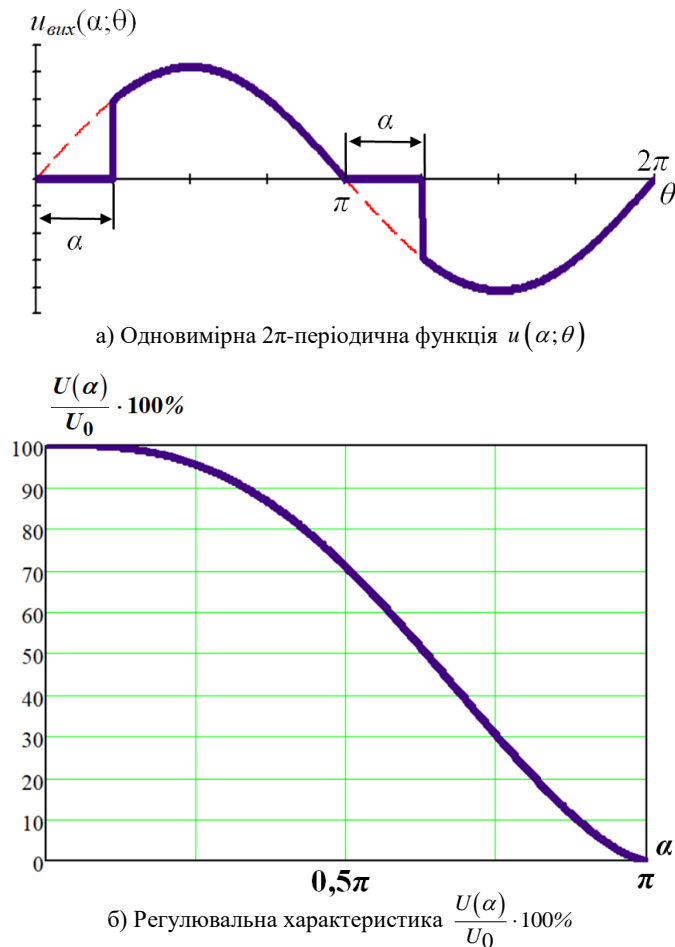


Рис. 1. Одновимірні 2π -періодична функція конвертованої напруги $u(\alpha; \theta)$ силового перетворювача типу АС-АС та його регулювальна характеристика

Основна частина

Розглянемо клас одновимірних 2π -періодичних функцій $u_{вих}(\alpha; \theta)$ (див. рис. 1, а), які побудовано над полями значень тригонометричного синуса вхідної напруги $u_{вх}(\theta) = U_m \sin \theta$.

Розкладемо кожну з них в тригонометричний ряд Фур'є

$$u_{вих}(\alpha; \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} [A^{(n)}(\alpha) \cos n\theta + B^{(n)}(\alpha) \sin n\theta], \quad (2)$$

основною (першою) гармонікою якого в спектральному складі досліджуваного силового процесу є

$$u_{вих}^{(1)}(\alpha; \theta) = A^{(1)}(\alpha) \cos \theta + B^{(1)}(\alpha) \sin \theta = U_m^{(1)}(\alpha) \sin [\theta + \psi_u^{(1)}(\alpha)], \quad (3)$$

де коефіцієнти Фур'є $A^{(1)}(\alpha)$ та $B^{(1)}(\alpha)$ виявляють себе залежними від кута вмикання α .

Розкриємо ці залежності.

Для коефіцієнта $A^{(1)}(\alpha)$ маємо

$$\begin{aligned}
 A^{(1)}(\alpha) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u_{\text{вих}}(\alpha; \theta) \cos \theta \, d\theta = \\
 &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin \theta \cos \theta \, d\theta + \frac{1}{\pi} \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} U_m \sin \theta \cos \theta \, d\theta = 2 \times \frac{U_m}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sin \theta \cos \theta \, d\theta.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Або, узявши інтеграл, отримуємо

$$A^{(1)}(\alpha) = -\frac{U_m}{\pi} \sin^2 \alpha.
 \tag{5}$$

Коефіцієнт Фур'є $B^{(1)}(\alpha)$ визначаємо як

$$\begin{aligned}
 B^{(1)}(\alpha) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u_{\text{вих}}(\alpha; \theta) \sin \theta \, d\theta = \\
 &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin \theta \sin \theta \, d\theta + \frac{1}{\pi} \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} U_m \sin \theta \sin \theta \, d\theta = 2 \times \frac{U_m}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \theta \, d\theta,
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

звідки

$$B^{(1)}(\alpha) = \frac{U_m}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right).
 \tag{7}$$

Оскільки амплітуда основної гармоніки $U_m^{(1)}(\alpha)$ досліджуваного силового процесу дорівнює кореню від суми квадратів її коефіцієнтів Фур'є

$$U_m^{(1)}(\alpha) = \sqrt{\left[A^{(1)}(\alpha) \right]^2 + \left[B^{(1)}(\alpha) \right]^2},
 \tag{8}$$

то з урахуванням співвідношень (5) та (7) маємо

$$U_m^{(1)}(\alpha) = \frac{U_m}{\pi} \sqrt{(\pi - \alpha)^2 + (\pi - \alpha) \sin 2\alpha + \sin^2 \alpha}.
 \tag{9}$$

Подамо залежність (9) у відносних до амплітуди вхідної напруги одиницях. Тоді для відносної амплітуди основної гармоніки конвертованої вихідної напруги в функції від кута вмикання остаточно записуємо

$$J_m^{(1)}(\alpha) = \frac{U_m^{(1)}(\alpha)}{U_m} = \frac{1}{\pi} \sqrt{(\pi - \alpha)^2 + (\pi - \alpha) \sin 2\alpha + \sin^2 \alpha}.
 \tag{10}$$

Графічна інтерпретація функції (10) представлена на рис. 2.

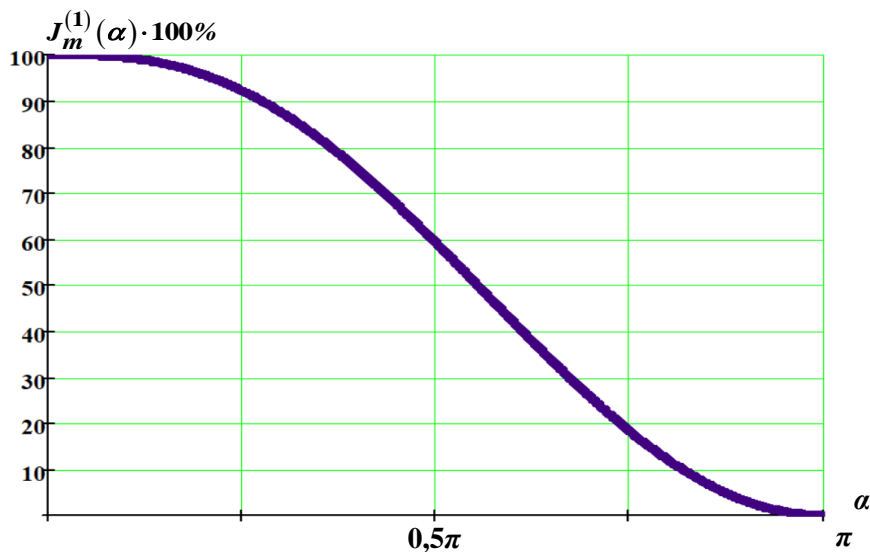


Рис. 2. Залежність представленої у відносних одиницях амплітуди основної гармоніки напруги від кута вмикання

Оскільки і діюче значення $U(\alpha)$ конвертованої вихідної напруги, і амплітудне значення основної гармоніки з її спектрального складу $U_m^{(1)}(\alpha)$ є функціями *спільної* незалежної змінної – фазового кута вмикання α , то значення останнього на проміжку від 0 до π встановлюють відповідно до співвідношень (1) і (9) функціональну залежність поміж зазначеними двома напругами. В аналітичній формі відобразити цей зв'язок доволі складно. Водночас система комп'ютерної математики, наприклад, MathCAD, у разі графічної інтерпретації характер такої залежності відображає явно і безпосередньо. Достатньо лише в системі комп'ютерної математики розрахунок обох значень напруг провести по спільним вузловим точкам значень фазового кута вмикання.

Для зручності розрахунок проведемо у відносних одиницях, а саме діюче значення конвертованої напруги подамо у відношенні до діючого значення вхідної синусоїдної напруги $\frac{U(\alpha)}{U_0} \times 100\%$, де

$U_0 = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, а амплітуду основної (першої) гармоніки вихідної напруги – у відношенні до амплітуди

вхідної напруги $\frac{U_m^{(1)}(\alpha)}{U_m} \times 100\%$. В обох випадках результат відобразимо у відсотках.

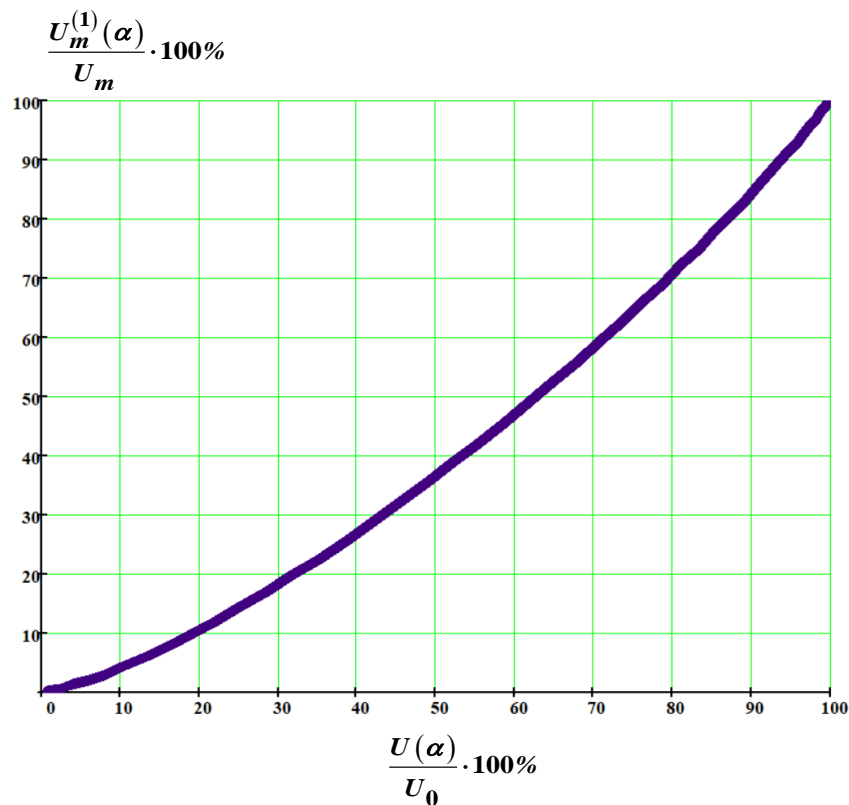


Рис. 3. Залежність представленої у відносних одиницях амплітуди основної гармоніки напруги від представленого у відносних одиницях діючого значення конвертованої вихідної напруги

Висновки

В роботі з метою дослідження показників якості процесу конвертування вихідної напруги, яка формується під час силового перетворення параметрів електричної енергії в електронних регуляторах змінного струму (перетворювачах типу АС-АС), проведено математичну ідентифікацію залежностей амплітуди її основної гармоніки від кута вмикання та від діючого значення цієї напруги, представлених у відносних одиницях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електроніка і мікросхемотехніка. Силова електроніка. Том 4. Кн. 1 / В. І. Сенько, М. В. Панащенко, Є. В. Сенько, М. М. Юрченко, Л. І. Сенько, В. В. Ясинський. – Київ: «Каравела», 2012 р. – 640 с.
2. Електроніка і мікросхемотехніка. Силова електроніка. Том 4. Кн. 2 / В. І. Сенько, М. В. Панащенко, Є. В. Сенько, М. М. Юрченко, Л. І. Сенько, В. В. Ясинський. – Київ: «Каравела», 2013 р. – 316 с.
3. Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic. Fundamentals of Power Electronics. – 2020.
4. Rashid M. Power electronics. Handbook. – 2017.
5. Sudipta Chakraborty, Marcelo G. Simões, William E. Kramer. Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems. A Sourcebook of Topologies, Control and Integration. – 2020.
6. Промислова електроніка / В. С. Руденко, В. Я. Ромашко, В. В. Трифонюк. – Київ: Либідь, 1993 р. – 432 с.
7. ТОЕ. Перехідні процеси в лінійних колах. Синтез лінійних кіл. Електричні та магнітні нелінійні кола: підручник / Ю. О. Карпов, Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацев, за ред. проф. Ю. О. Карпова. – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2019. – 456 с.
8. ТОЕ. Методи розрахунку нелінійних електричних і магнітних кіл в прикладах та задачах: навч. посібник / Ю. О. Карпов, Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук. – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2017. – 262 с.
9. Ведміцький Ю. Г. Узагальнені електричні схеми-аналоги неперервних динамічних систем довільного порядку / Ю. Г. Ведміцький // Вісник Інженерної академії України. — 2010. — Випуск 2. — С. 63-69.
10. Ведміцький Ю. Г. Тектологія динамічних систем і явище гіперсилової взаємодії в структурних рівняннях узагальненого електричного кола / Ю. Г. Ведміцький // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. — 2018. — №2. — С. 1-11. — Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/547/532>.
11. Ведміцький Ю. Г. Узагальнене електричне коло і фізичне явище гіпервалентної взаємодії / Ю. Г. Ведміцький // Вісник Інженерної академії України. — 2016. — Випуск 4. — С. 207-213.
12. Ведміцький Ю. Г. Узагальнене електричне коло з урахуванням фізичного явища гіпервалентної взаємодії / Ю. Г. Ведміцький // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — Хмельницький. — №2(58). — 2017. — С. 29-36.
13. Ведміцький Ю. Г. Контроль моменту інерції на основі удосконаленої теорії електродинамічних аналогій: монографія / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук. — Вінниця: ВНТУ, 2015. — 196 с.
14. Ведміцький Ю. Г. Вимірювальне перетворення і контроль моменту інерції механічних та електромеханічних систем в процесі їх експлуатації. Теорія і практика / Ю. Г. Ведміцький // Вісник Хмельницького національного університету. — 2008. — №4(113). — С. 47-55.

Юрій Григорович Ведміцький — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, ВНТУ, м. Вінниця, wjg@ukr.net

Yurii G. Vedmitskyi — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrical Measurements, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, wjg4224@gmail.com

Віктор Вікторович Захарченко — студент, гр. Е-21мс, ФЕЕЕМ, ВНТУ, м. Вінниця
Viktor V. Zaharchenko — student, gr. E-21mc, FPEEM, VNTU, Vinnytsia

Сергій Володимирович Шевчук — студент, гр. Е-21мс, ФЕЕЕМ, ВНТУ, м. Вінниця
Sergii V. Shevchuk — student, gr. E-21mc, FPEEM, VNTU, Vinnytsia

Іван Олександрович Рожко — студент, гр. Е-22мс, ФЕЕЕМ, ВНТУ, м. Вінниця
Ivan O. Roshko — student, gr. E-22mc, FPEEM, VNTU, Vinnytsia

Олександр Анатолійович Грибовський — студент, гр. 1ЕМ-19, ФЕЕЕМ, ВНТУ, м. Вінниця
Olexandr A. Gribovskii — student, gr. 1EM-19, FPEEM, VNTU, Vinnytsia