

Ю. Г. Ведміцький
 Ю. С. Балабак
 А. О. Гресько
 В. О. Кочмарук
 Ю. В. Лащенко

АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНА ХАРАКТЕРИСТИКА СПЕКТРУ ВИЩИХ ГАРМОНІК КОНВЕРТОВАНОЇ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ ЕЛЕКТРОННОГО РЕГУЛЯТОРА ЗМІННОГО СТРУМУ В ФУНКЦІОНАЛЬНІЙ ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ФАЗОВОГО КУТА ЙОГО ВМИКАННЯ (ДОПОВІДЬ №6)

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 сформованої відносно вищих гармонік функціональної залежності її амплітудно-частотної характеристики від фазового кута вмикання.

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

Abstract

In the work aimed at researching the quality indicators of the process of converting the output voltage in electronic alternating current regulators (AC-AC type converters) for higher harmonics, a mathematical identification of the functional dependence of their amplitude-frequency characteristic with respect to the phase angle of switching was carried out.

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, even harmonic, odd harmonic, high harmonic

Вступ

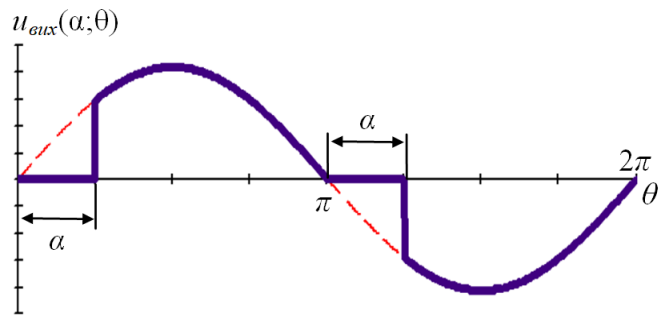
За мету роботи автори обрали математичну ідентифікацію сформованої відносно вищих гармонік функціональної залежності амплітудно-частотної характеристики конвертованої вихідної напруги електронного регулятора змінного струму (силового статичного перетворювача типу АС-АС) від фазового кута вмикання α .

Відповідно до алгоритму роботи електронних регуляторів змінного струму внаслідок формування СІФК вихідної напруги, яка належить класу одновимірних 2π -періодичних функцій $u_{вих}(\alpha; \theta)$, сформованих над полями значень тригонометричного синуса вхідної напруги $u_{вх}(\theta) = U_m \sin \theta$, її діюче значення перебуває в безпосередній залежності від фазового кута вмикання α (рис. 1, а) [1-15]:

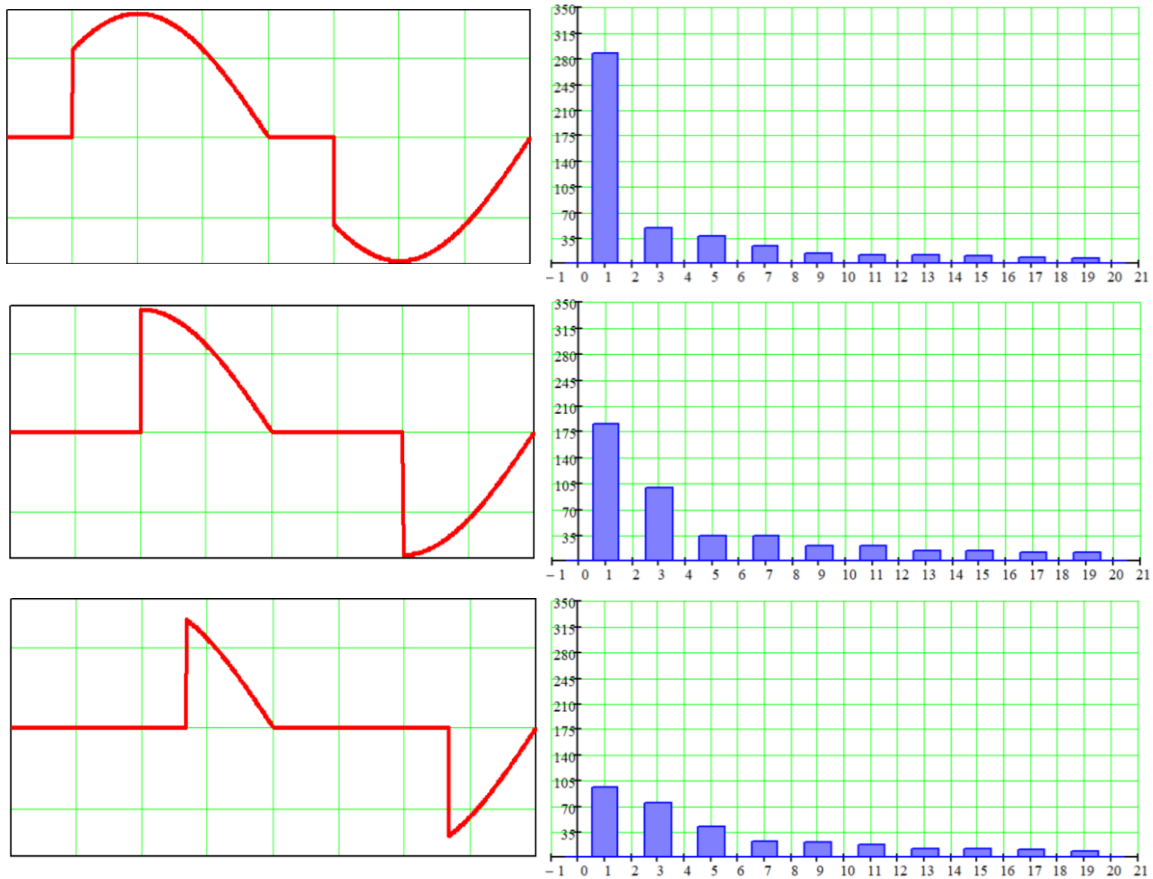
$$U_{вих}(\alpha) = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_{вих}^2(\alpha; \theta) d\theta} = \frac{U_m}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\pi - \alpha + \sin \alpha \cos \alpha}. \quad (1)$$

де $\theta = \omega t = 2\pi f t$.

Водночас в безпосередній залежності від кута вмикання α перебувають і інші можливі функціонали зазначеного класу 2π -періодичних функцій, з-поміж яких і ті, які визначають якість конвертованої напруги, отриманої під час силового перетворення параметрів електричної енергії в регуляторі змінного струму.



а) Одновимірна 2π -періодична функція $u_{vux}(\alpha; \theta)$



б) Спектральна АЧХ одновимірної 2π -періодична функції $u_{vux}(\alpha; \theta)$
за різних значень фазового кута вмикання α

Рис. 1. Одновимірна 2π -періодична функція $u_{vux}(\alpha; \theta)$ та її спектри

До таких функціоналів відносять зокрема і *спектральну амплітудно-частотну характеристику* конвертованої напруги, залежність якої від кута вмикання наочно демонструє рис. 1, б, побудований на підставі математичних співвідношень розкладання 2π -періодичних функцій $u_{vux}(\alpha; \theta)$, як елементів лінійного функціонального простору, по координатах тригонометричного координатного базису

$$u_{vux}(\alpha; \theta) = A^{(0)} + \sum_{k=1}^{\infty} U_m^{(k)}(\alpha) \sin[\theta + \psi_u(\alpha)], \quad (2)$$

де

$$U_m^{(k)}(\alpha) = \sqrt{[A^{(k)}(\alpha)]^2 + [B^{(k)}(\alpha)]^2}, \quad (3)$$

$$A^{(k)}(\alpha) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u_{\text{вих}}(\alpha; \theta) \cos k\theta \, d\theta, \quad (4)$$

$$B^{(k)}(\alpha) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u_{\text{вих}}(\alpha; \theta) \sin k\theta \, d\theta, \quad (5)$$

– відповідно амплітуди та коефіцієнти Фур'є основної (першої) і вищих ($k \geq 2$) гармонік.

Відтак попри те, що в сучасній силовій електроніці та відновлювальній електроенергетиці розглядуваний клас функцій 2π -періодичних функцій має надзвичайно важливе значення і є на сьогодні досить актуальним, характер функціональної залежності амплітуд вищих гармонік таких функцій від фазового кута вмикання в переважній більшості літературних джерел достатньо не розкривається, що разом узяті і спонукало авторів до проведення дослідницької роботи в зазначеному напрямку.

Основна частина

Насамперед варто зазначити, що в спектрах досліджуваних 2π -періодичних функцій $u_{\text{вих}}(\alpha; \theta)$ внаслідок наявності в математичному співвідношенні спектральної АЧХ множника $(1 - \cos k\pi)$ є лише *непарні гармоніки* з частотами $k\omega$, де $k = 1, 3, 5, \dots$, що, власне, і відображає рис. 1, б.

Тому математичну ідентифікацію залежності АЧХ від фазового кута вмикання $U_m^{(k)}(\alpha)$ проведемо над полями непарних вищих гармонік ($k > 1$).

Функціональні залежності щодо амплітуд вищих гармонік подамо у *відносних до амплітуди вхідної напруги одиницях*

$$J_m^{(k)}(\alpha) = \frac{U_m^{(k)}(\alpha)}{U_m}. \quad (6)$$

1. Третя гармоніка

Відповідно до співвідношень (3-5) для амплітудного значення третьої гармоніки конвертованої вихідної напруги та відповідних коефіцієнтів Фур'є маємо:

$$U_m^{(3)}(\alpha) = \sqrt{[A^{(3)}(\alpha)]^2 + [B^{(3)}(\alpha)]^2}, \quad (7)$$

де

$$\begin{aligned} A^{(3)}(\alpha) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u_{\text{вих}}(\alpha; \theta) \cos 3\theta \, d\theta = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin \theta \cos 3\theta \, d\theta + \frac{1}{\pi} \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} U_m \sin \theta \cos 3\theta \, d\theta = 2 \times \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin \theta \cos 3\theta \, d\theta, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} B^{(3)}(\alpha) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u_{\text{вих}}(\alpha; \theta) \sin 3\theta \, d\theta = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin \theta \sin 3\theta \, d\theta + \frac{1}{\pi} \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} U_m \sin \theta \sin 3\theta \, d\theta = 2 \times \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin \theta \sin 3\theta \, d\theta, \end{aligned} \quad (9)$$

Узявши обидва інтеграли, для амплітуди третьої гармоніки отримуємо

$$U_m^{(3)}(\alpha) = U_m \frac{\sqrt{-\sin^2 2\alpha + 4 \sin^2 \alpha}}{2\pi} = U_m \frac{\sin^2 \alpha}{\pi}. \quad (10)$$

Тоді відповідно до співвідношення (6) відносна амплітуда третьої гармоніки буде дорівнювати

$$J_m^{(3)}(\alpha) = \frac{\sqrt{-\sin^2 2\alpha + 4 \sin^2 \alpha}}{2\pi} = \frac{\sin^2 \alpha}{\pi}. \quad (11)$$

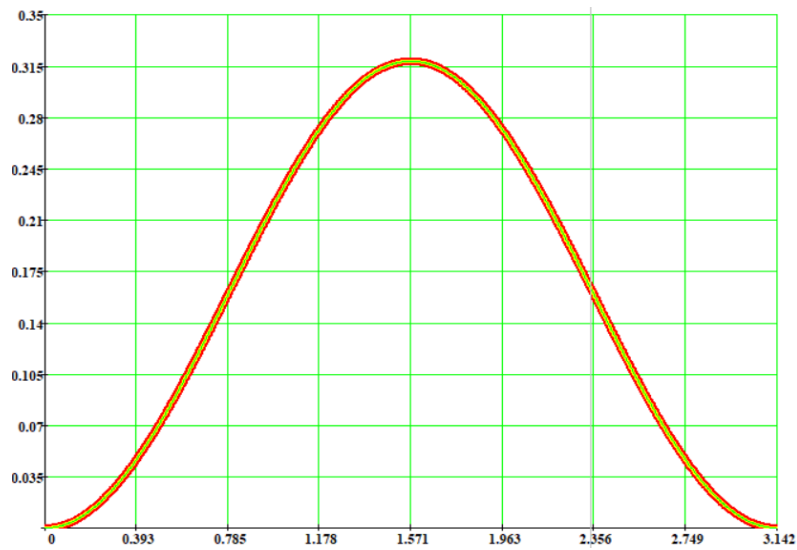
Графік цієї функції наведений на рис. 2, а.

2. П'ята гармоніка

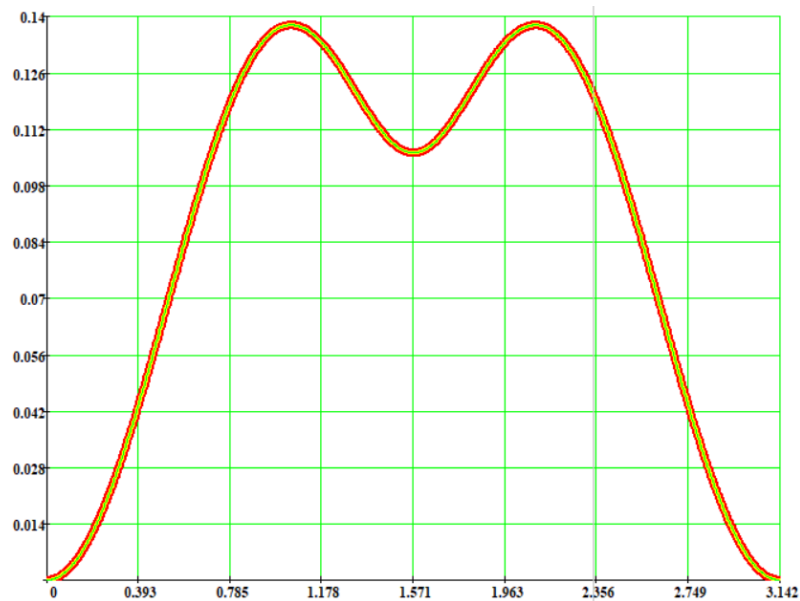
Математичну ідентифікацію функції відносної амплітуди п'ятої гармоніки вихідної напруги від кута вмикання проведемо за вищенаведеною методою. Тоді відповідно до співвідношень (3-6) для зазначеної амплітуди маємо

$$J_m^{(5)}(\alpha) = \frac{\sqrt{-2 \sin^2 3\alpha + 3 \sin^2 2\alpha + 6 \sin^2 \alpha}}{6\pi} \quad (12)$$

На рис. 2, б наведена графічна інтерпретація функції (12).



а) Залежність відносної амплітуди третьої гармоніки від фазового кута вмикання



б) Залежність відносної амплітуди п'ятої гармоніки від фазового кута вмикання

Рис. 2. Залежності відносних амплітуд третьої та п'ятої гармонік від фазового кута вмикання

3. Сьома та інші вищі гармоніки

Математичну ідентифікацію досліджуваних функціональних залежностей для сьомої та інших вищих гармонік проведемо у схожий спосіб. Результати занесемо в табл.1.

На рис. 3 наведені графіки функціональних залежностей (13) – (16) для відповідно сьомої, дев'ятої, одинадцятої та тринадцятої гармонік.

Табл. 1. Залежності відносних амплітуд сьомої та інших вищих гармонік від кута вмикання

Номер гармоніки	Відносна амплітуда вищої гармоніки в функції від кута вмикання
7	$J_m^{(7)}(\alpha) = \frac{\sqrt{-3 \sin^2 4\alpha + 4 \sin^2 3\alpha + 12 \sin^2 \alpha}}{12\pi}$ (13)
9	$J_m^{(9)}(\alpha) = \frac{\sqrt{-4 \sin^2 5\alpha + 5 \sin^2 4\alpha + 20 \sin^2 \alpha}}{20\pi}$ (14)
11	$J_m^{(11)}(\alpha) = \frac{\sqrt{-5 \sin^2 6\alpha + 6 \sin^2 5\alpha + 30 \sin^2 \alpha}}{30\pi}$ (15)
13	$J_m^{(13)}(\alpha) = \frac{\sqrt{-6 \sin^2 7\alpha + 7 \sin^2 6\alpha + 42 \sin^2 \alpha}}{42\pi}$ (16)
15	$J_m^{(15)}(\alpha) = \frac{\sqrt{-7 \sin^2 8\alpha + 8 \sin^2 7\alpha + 56 \sin^2 \alpha}}{56\pi}$ (17)
17	$J_m^{(17)}(\alpha) = \frac{\sqrt{-8 \sin^2 9\alpha + 9 \sin^2 8\alpha + 72 \sin^2 \alpha}}{72\pi}$ (18)
19	$J_m^{(19)}(\alpha) = \frac{\sqrt{-9 \sin^2 10\alpha + 10 \sin^2 9\alpha + 90 \sin^2 \alpha}}{90\pi}$ (19)
21	$J_m^{(21)}(\alpha) = \frac{\sqrt{-10 \sin^2 11\alpha + 11 \sin^2 10\alpha + 110 \sin^2 \alpha}}{110\pi}$ (20)

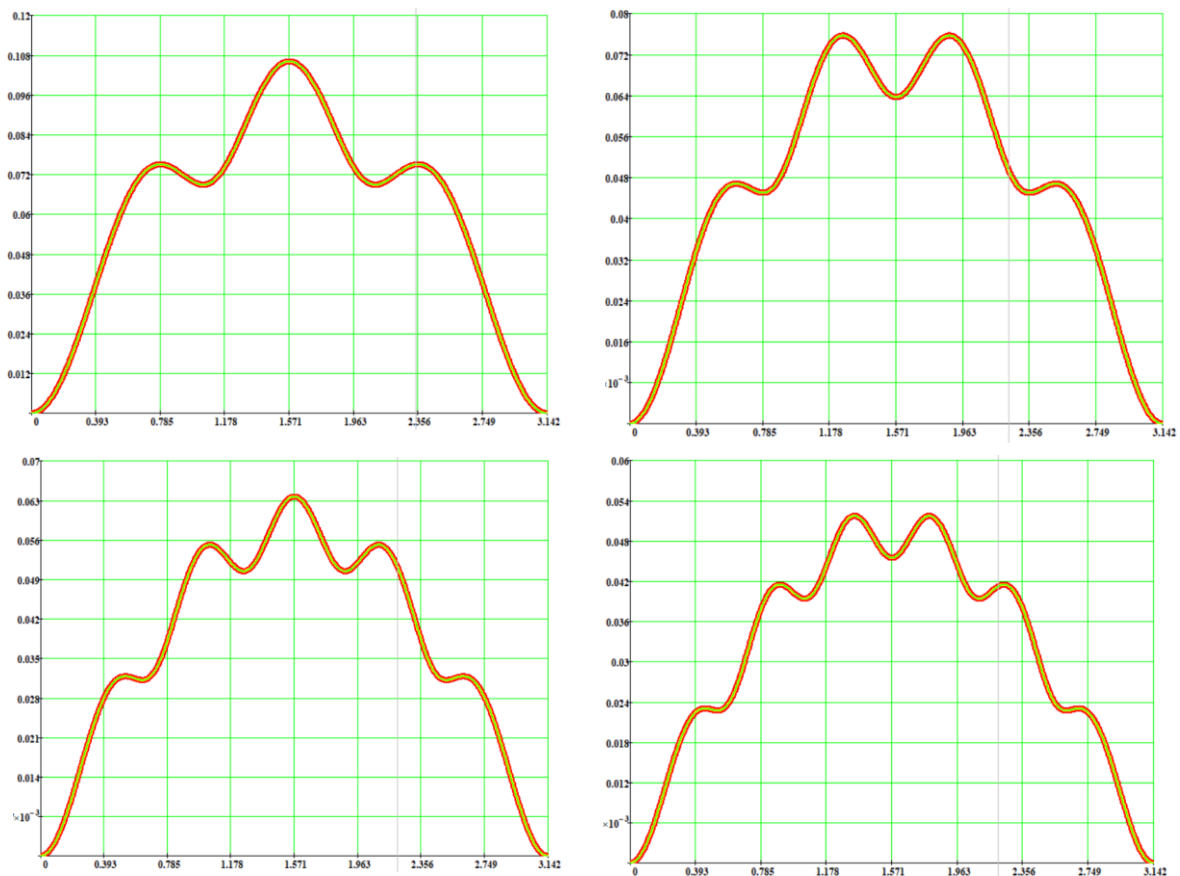


Рис. 3. Залежності відносних амплітуд сьомої, дев'ятої, одинадцятої та тринадцятої гармонік від фазового кута вмикання

Для порівняння за значеннями зведемо графіки всіх вище визначених функціональних залежностей до єдиної системи координат (рис. 4).

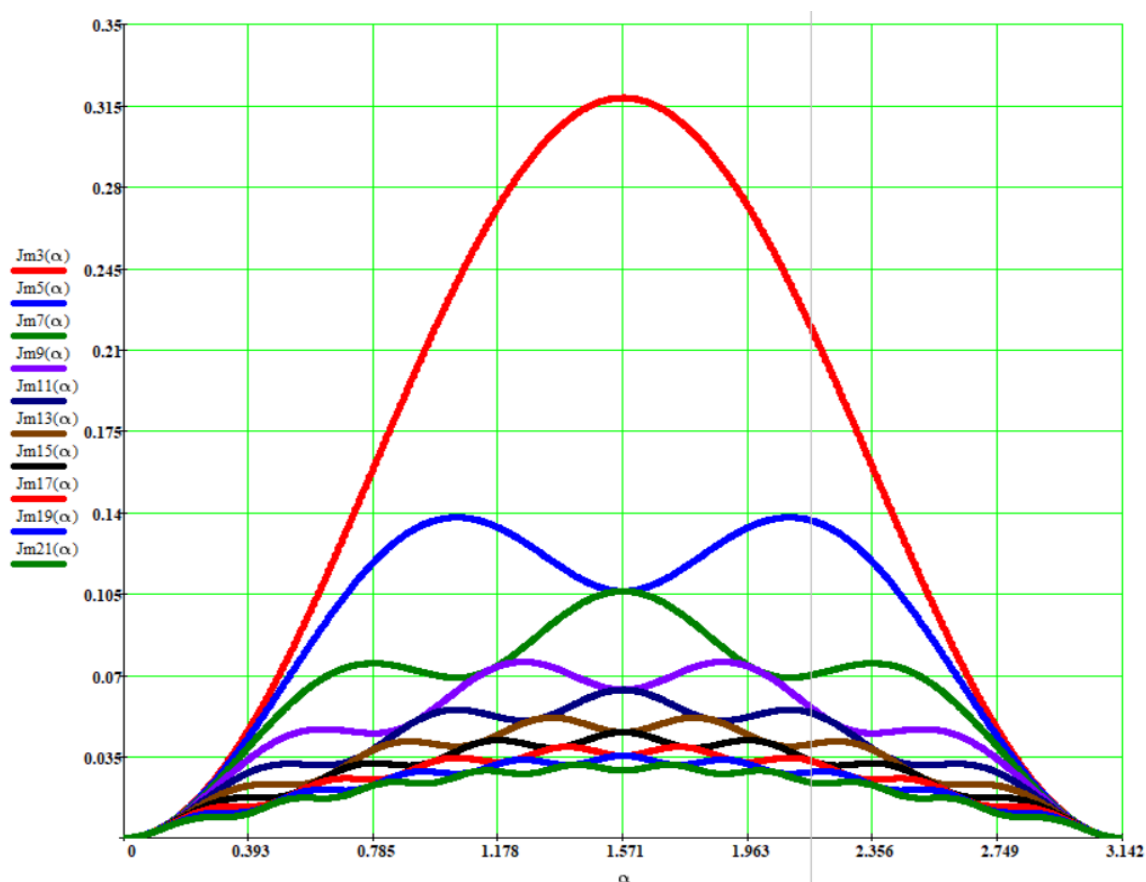


Рис. 4. Залежності відносних амплітуд вищих гармонік від фазового кута вмикання

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 залежності амплітуди її вищих гармонік від кута вмикання, представлених у відносних до амплітуди вхідної напруги 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.

15. Ведміцький Ю. Г. Елементи теорії електродинамічного моделювання вимірювального перетворення і контролю моменту інерції. Проблематика, динамічні аналогії та принцип дуальності / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2008. — №5 (80). — С. 25-30.

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

Юлія Сергіївна Балабак — студентка, гр. 2ЕЕ-20, ФЕЕЕМ, ВНТУ, м. Вінниця

Yulia S. Balabak — student, gr. 2EE-20, FPEEM, VNTU, Vinnytsia

Андрій Олегович Гресько — студент, гр. 2ЕЕ-20, ФЕЕЕМ, ВНТУ, м. Вінниця

Andrii O. Gresko — student, gr. 2EE-20, FPEEM, VNTU, Vinnytsia

Володимир Олександрович Кочмарук — студент, гр. 2ЕЕ-20, ФЕЕЕМ, ВНТУ, м. Вінниця

Volodymir O. Kochmaruk — student, gr. 2EE-20, FPEEM, VNTU, Vinnytsia

Юрій Володимирович Лащенко — студент, гр. 2ЕЕ-20, ФЕЕЕМ, ВНТУ, м. Вінниця

Yurii V. Lashenko — student, gr. 2EE-20, FPEEM, VNTU, Vinnytsia