

Ю. Г. Ведміцький
 А. В. Шкуран
 К. Р. Євдокимов
 К. А. Буток
 А. Є. Бондаренко

КОЕФІЦІЄНТ ГАРМОНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ (TOTAL HARMONIC DISTORTION, THD) КОНВЕРТОВАНОЇ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ СИЛОВОГО РЕГУЛЯТОРА ЗМІННОГО СТРУМУ В ФУНКЦІЇ ВІД ФАЗОВОГО КУТА ВМИКАННЯ ТА ЇЇ ДІЮЧОГО ЗНАЧЕННЯ (ДОПОВІДЬ №7)

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 функціональної залежності коефіцієнта гармонійних спотворень (THD) від фазового кута регулювання та діючого значення цієї напруги, заданого 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, вища гармоніка, коефіцієнт гармонійних спотворень

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), a mathematical identification of the functional dependence of the harmonic distortion coefficient (THD) on the phase angle of regulation and on the level of the effective value of this voltage 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, high harmonic, total harmonic distortion (THD)

Вступ

Відповідно до алгоритму роботи електронних регуляторів змінного струму внаслідок формування СІФК вихідної напруги, яка належить класу одновимірних 2π -періодичних функцій $u_{\text{вих}}(\alpha; \theta)$, сформованих над полями значень тригонометричного синуса вхідної напруги $u_{\text{вх}}(\theta) = U_m \sin \theta$, її діюче значення перебуває в безпосередній залежності від фазового кута вмикання α (рис. 1) [1-6]:

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

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.

У відповідності зі стандартами, міжнародними – зокрема, наприклад, стандарт IEEE 519-1992 [7], до таких функціоналів відноситься один з найважливіших параметрів оцінки якості конвертованої напруги або струму – коефіцієнт гармонійних спотворень (total harmonic distortion або THD), який

визначає наявність та сумарний рівень вищих гармонік в спектрі періодичної несинусоїдної напруги (або струму) у відношенні до її основної (першої) гармоніки.

Варто зазначити, що наявність вищих гармонік в спектрах напруг та струмів, генерованих пристроями силового перетворення електричної енергії, на сьогодні є доволі значущою технічною проблемою, яка створює ризики не тільки для споживачів електричної енергії, але й, що не менш важливо, для енергосистеми в цілому, яка генерує електричну енергію і зобов'язана постачати її у відповідній якості [8-12].

Чи не тому вищезазначений стандарт поширює відповідальність не тільки на виробників електричної енергії, але й на її споживачів, зазвичай на боці яких такі силові перетворювачі і розташовані.

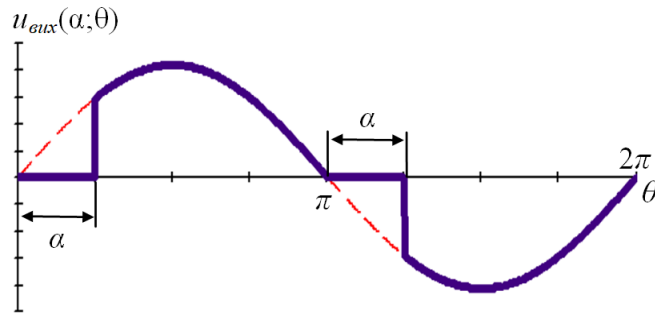


Рис. 1. Одновимірна 2π -періодична функція $u_{вих}(\alpha; \theta)$

Беручи до уваги залежність амплітудно-частотних та фазово-частотних характеристик спектрів силових процесів від різноманітних технологічних параметрів, що ці процеси супроводжують і забезпечують, автори на прикладі конвертованої регулятором змінного струму електричної напруги поставили за мету дослідити залежність її коефіцієнта гармонійних спотворень від фазового кута регулювання α та від рівня діючого значення цієї напруги.

ТНД в функції від фазового кута вмикання

Конвертована регулятором електрична напруга $u_{вих}(\alpha; \theta)$ є елементом лінійного функціонального простору і, як елемент цього простору, в координатному базисі, побудованому на основі тригонометричних функцій, може бути по ним же і розкладена та представлена лінійною комбінацією тригонометричного ряду Фур'є

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

де

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

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

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

– відповідно амплітуди та коефіцієнти Фур'є основної ($k=1$) і вищих ($k \geq 2$) гармонік (рис. 2).

В свою чергу, коефіцієнт гармонійних спотворень (ТНД) визначається як відношення діючого значення вищих гармонік зі спектру силового процесу до діючого значення основної (першої гармоніки)

$$THD(\alpha) = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} [U^{(k)}(\alpha)]^2}}{U^{(1)}(\alpha)}. \quad (6)$$

або з урахуванням, що

$$U^{(k)} = \frac{U_m^{(k)}}{\sqrt{2}},$$

$$THD(\alpha) = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} [U_m^{(k)}(\alpha)]^2}}{U_m^{(1)}(\alpha)}. \quad (7)$$

Отже, як впливає із співвідношень (2-7), коефіцієнт гармонійних спотворень є функціоналом класу одновимірних 2π -періодичних функцій $u_{вих}(\alpha; \theta)$ і перебуває в функціональній залежності від фазового кута вмикання α .

Безпосередньо це означає, що зі зміною кута вмикання зміни зазнає і параметр THD. Наразі з'ясуємо характер такої зміни.

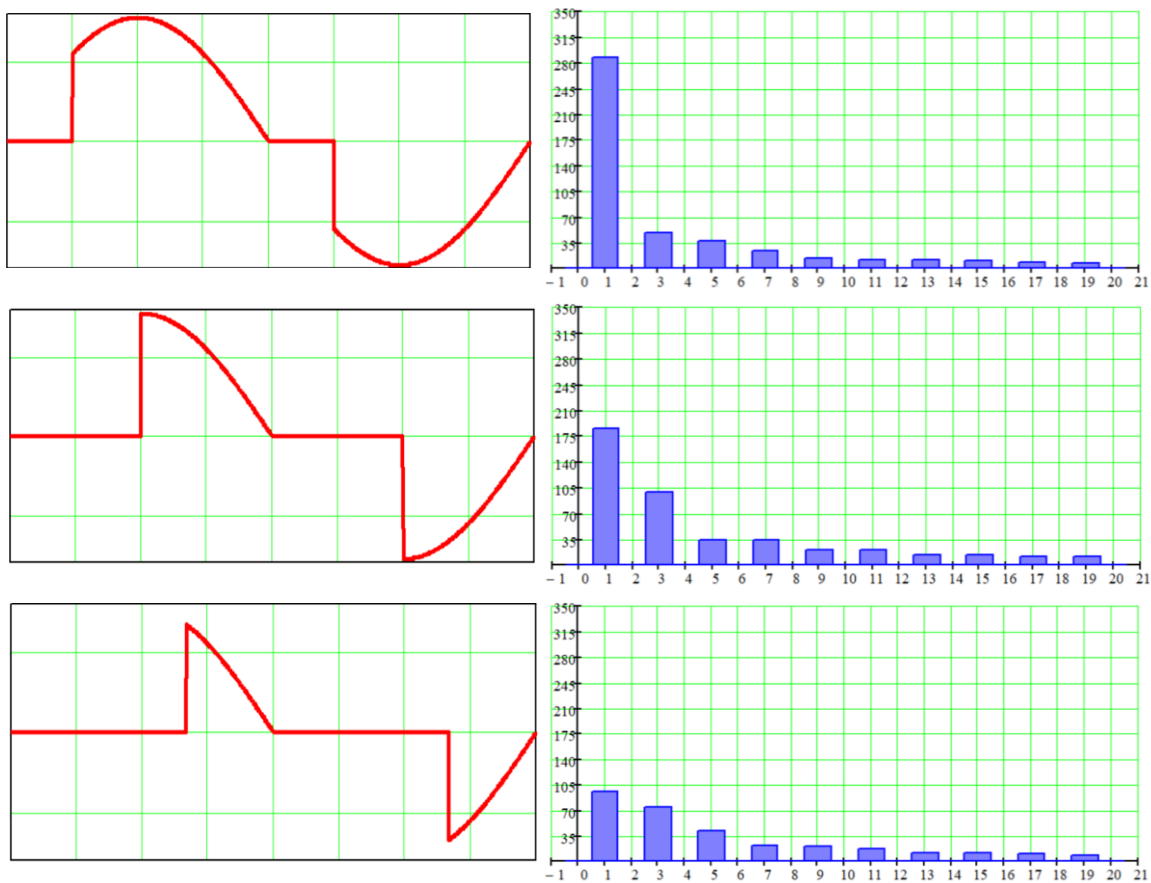


Рис. 2. Спектральна АЧХ одновимірної 2π -періодична функції $u_{вих}(\alpha; \theta)$ за різних значень фазового кута вмикання α

Амплітуда напруги основної (першої) гармоніки в функції від фазового кута вмикання α описується співвідношенням

$$U_m^{(1)}(\alpha) = \frac{U_m}{\pi} \sqrt{(\pi - \alpha)^2 + (\pi - \alpha) \sin 2\alpha + \sin^2 \alpha}. \quad (8)$$

Залежності від кута вмикання амплітуд напруг вищих гармонік наведені в табл. 1.

Функціональну залежність коефіцієнта гармонійних спотворень від фазового кута вмикання подамо в графічній інтерпретації, скориставшись співвідношеннями (7-13) та системою комп'ютерної математики MathCAD.

Табл. 1. Залежності амплітуд вищих гармонік від фазового кута вмикання

Номер з-поміж вищих гармонік	Відносна амплітуда вищої гармоніки в функції від кута вмикання
3	$U_m^{(3)}(\alpha) = U_m \frac{\sqrt{-\sin^2 2\alpha + 4 \sin^2 \alpha}}{2\pi} = U_m \frac{\sin^2 \alpha}{\pi} \quad (9)$
5	$U_m^{(5)}(\alpha) = U_m \frac{\sqrt{-2 \sin^2 3\alpha + 3 \sin^2 2\alpha + 6 \sin^2 \alpha}}{6\pi} \quad (10)$
7	$U_m^{(7)}(\alpha) = U_m \frac{\sqrt{-3 \sin^2 4\alpha + 4 \sin^2 3\alpha + 12 \sin^2 \alpha}}{12\pi} \quad (11)$
9	$U_m^{(9)}(\alpha) = U_m \frac{\sqrt{-4 \sin^2 5\alpha + 5 \sin^2 4\alpha + 20 \sin^2 \alpha}}{20\pi} \quad (12)$
11	$U_m^{(11)}(\alpha) = U_m \frac{\sqrt{-5 \sin^2 6\alpha + 6 \sin^2 5\alpha + 30 \sin^2 \alpha}}{30\pi} \quad (13)$
...	...

Результат представлено на рис. 3.

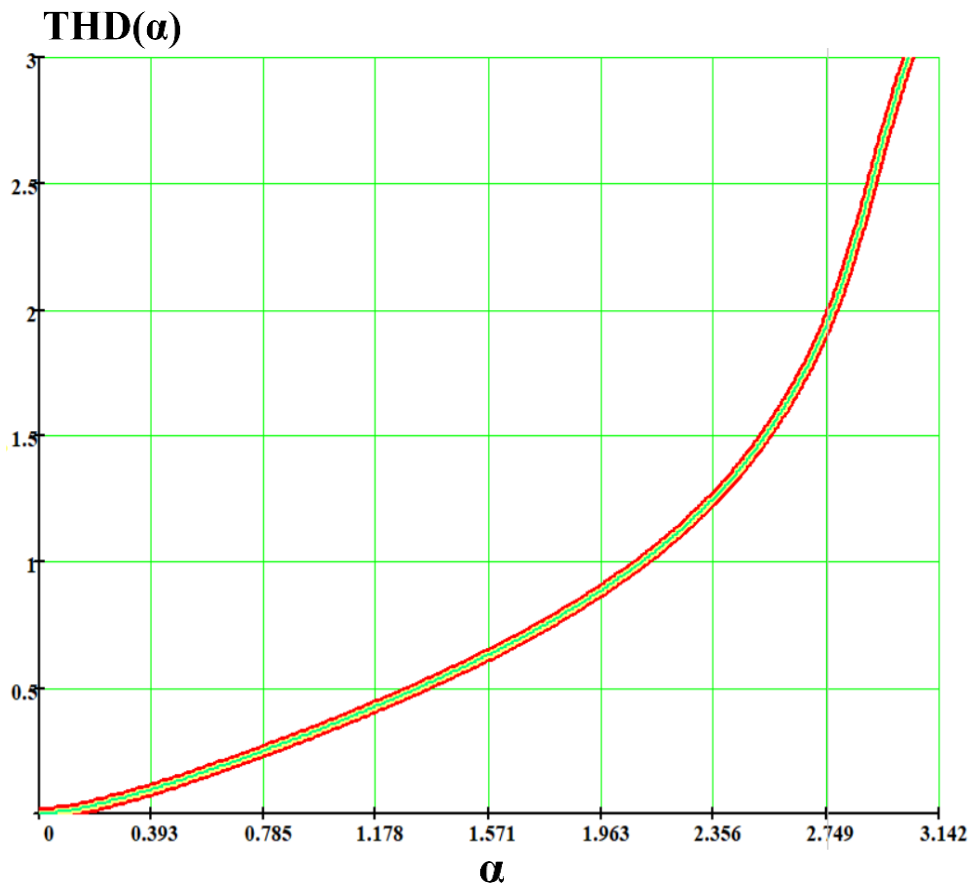


Рис. 3. Функція коефіцієнта гармонійних спотворень THD від фазового кута вмикання α

ТНД в функції від рівня діючого значення конвертованої напруги

Діюче значення вихідної напруги $U(\alpha)$ відповідно до алгоритму роботи регулятора змінного струму перебуває у функціональній залежності від фазового кута вмикання α , яка визначена співвідношенням (1). Графік цієї залежності відображає рис. 4.

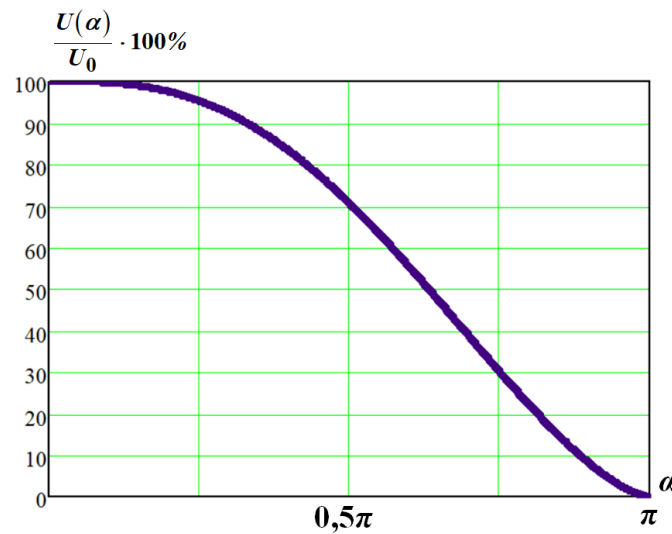


Рис. 4. Графік функції $J_d(\alpha) = \frac{U(\alpha)}{U_0} \cdot 100\%$

Оскільки $THD(\alpha)$ є функцією цього ж кута вмикання, неважко за допомогою системи MathCAD встановити безпосередній математичний зв'язок поміж обидвома параметрами: THD та U (рис. 5).

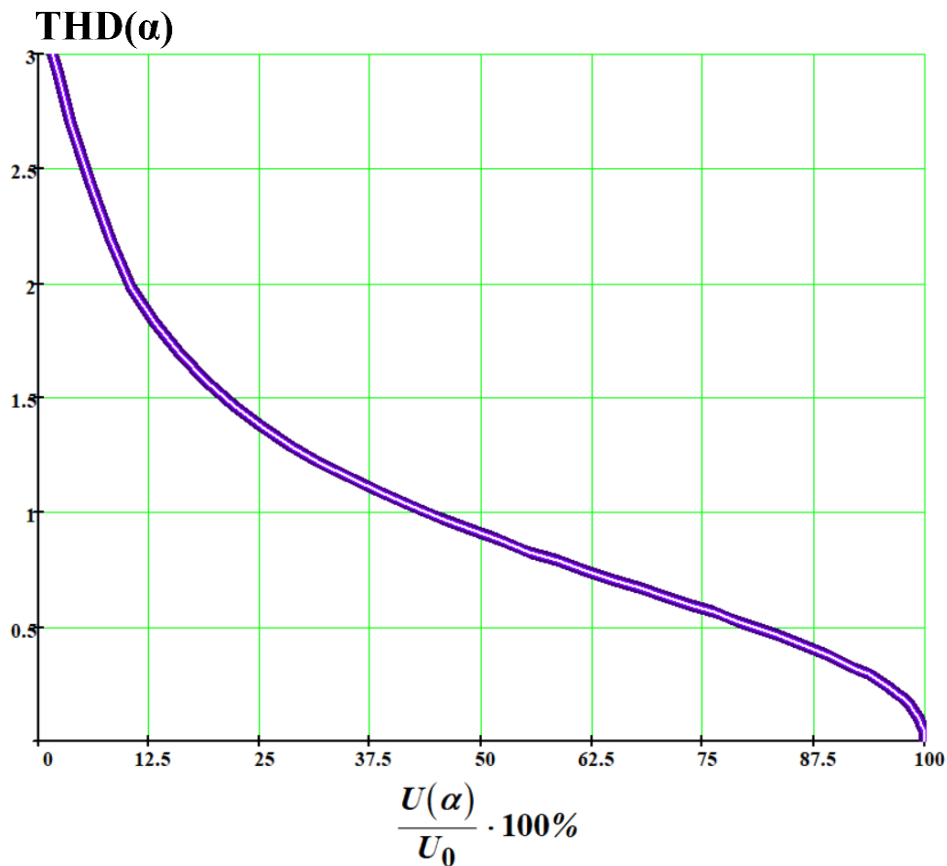


Рис. 5. THD в функції від відносного рівня діючого значення вихідної напруги

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 коефіцієнта гармонійних спотворень від фазового кута регулювання α та від рівня діючого значення цієї напруги.

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. IEEE Std 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," © Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 1993.
8. 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. Качив, за ред. проф. Ю. О. Карпова. – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2019. – 456 с.
9. 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.
10. 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.
11. 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>.
12. Ведміцький Ю. Г. Узагальнене електричне коло і фізичне явище гіпервалентної взаємодії / Ю. Г. Ведміцький // Вісник Інженерної академії України. — 2016. — Випуск 4. — С. 207-213.

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

Анна Володимирівна Шкуран — студентка, гр. 3ЕЕ-20, ФЕЕЕМ, ВНТУ, м. Вінниця
Anna V. Shkuran — student, gr. 3EE-20, FPEEM, VNTU, Vinnytsia

Костянтин Романович Євдокимов — студент, гр. 1ЕЕ-20, ФЕЕЕМ, ВНТУ, м. Вінниця
Kostjantin R. Evdokimov — student, gr. 1EE-20, FPEEM, VNTU, Vinnytsia

Костянтин Андрійович Буток — студент, гр. 2ЕЕ-20, ФЕЕЕМ, ВНТУ, м. Вінниця
Kostjantin A. Butok — student, gr. 2EE-20, FPEEM, VNTU, Vinnytsia

Артем Євгенійович Бондаренко — студент, гр. 1ЕЕ-20, ФЕЕЕМ, ВНТУ, м. Вінниця
Artem E. Bondarenko — student, gr. 1EE-20, FPEEM, VNTU, Vinnytsia