

УДК 621.31

## ВПЛИВ ФОРМИ КРИВОЇ НАПРУГИ НЕСИНУСОЇДНОГО СТРУМУ НА ККД ЕЛЕКТРОМАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ

Отримано 22 лют. 2022; рекомендовано до публікації 6 черв. 2022  
Доступно онлайн 30 черв. 2022

**А. П. Войцицький<sup>1</sup>, М. П. Фомін<sup>2</sup>, А. А. Голубенко<sup>3</sup>,  
Н. М. Цивенкова<sup>4</sup>, І. С. Омаров<sup>5</sup>**

Автор для кореспонденції: Анна Голубенко  
e-mail: anikagogobl@gmail.com

*Інтеграція України з електроенергетичним сектором країн ЄС можлива тільки в разі дотримання жорстких вимог відповідно до параметрів якості електричної енергії, які мають бути в межах допустимих рівнів, встановлених у відповідних нормативних документах.*

*На жаль, такі дані щодо України на цей час відсутні, оскільки проблемою якості електричної енергії систематично займаються тільки науковці, і це при тому, що збитки від неякісної електричної енергії мають тенденцію до щорічного зростання.*

*Проблеми якості електроенергії привертають увагу багатьох провідних дослідників, виробників електроенергії та її споживачів. Останнім часом через суттєву зміну структури системи генерації та розподілу електроенергії, популяризацію малих електростанцій відновлюваної енергетики проблеми якості електроенергії набули актуальності. Точкові вклучення великої кількості вітроелектричних та фотоелектричних станцій на рівні приватних господарств часом спричиняють зниження якості електричного струму на рівні спотворення синусоїдальної форми напруги.*

*Крім того, погіршення якості електроенергії відбувається як через значну кількість збурень, викликаних перехідними процесами (стрибки і просідання напруги, імпульсні перешкоди) так і в сталих режимах (гармонійні спотворення, несиметричність тощо). З усіх проблем, найбільш докладно в цій статті описані гармонійні спотворення.*

*Розглянуто та проаналізовано причини спотворення форми кривої синусоїдного періодичного струму та вплив спотворення на якість електричної енергії. Від якості електричної енергії істотно залежить ефективність та надійність функціонування усіх без винятку приймачів та споживачів електричної енергії.*

*Проаналізовано заходи щодо зменшення несинусоїдальності напруги, забезпечення електромагнітної сумісності споживачів тощо.*

**Ключові слова:** напруга, електрична енергія, якість електричної енергії; коефіцієнт форми синусоїдальної напруги; нелінійні елементи, комутація.

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент кафедри електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології, Поліський національний університет, Житомир, Україна <https://orcid.org/0000-0002-8361-714X>

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент кафедри вищої та прикладної математики, Поліський національний університет, Житомир, Україна <https://orcid.org/0000-0001-9909-7882>

<sup>3</sup> викладач кафедри електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології, Поліський національний університет, Житомир, Україна <https://orcid.org/0000-0001-5018-5312>

<sup>4</sup> канд. техн. наук, доцент, кафедра тракторів, автомобілів та біоенергоресурсів, Національний університет біоресурсів та природокористування України, Київ, Україна; відділ відновлюваних органічних енергоносіїв, Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ, Україна <https://orcid.org/0000-0003-1703-4306>

<sup>5</sup> аспірант, відділ відновлюваних органічних енергоносіїв, Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ, Україна <https://orcid.org/0000-0001-9449-853X>

## THE INFLUENCE OF VOLTAGE CURVE FORM OF NON-SINUSOIDAL CURRENT ON THE EFFICIENCY OF AC ELECTRIC MACHINES

Received 22 Feb. 2022; accepted 6 June 2022.  
Available online 30 June 2022

Anatoliy Voytsytsky<sup>1</sup>, Mykola Fomin<sup>2</sup>,  
Anna Holubenko<sup>3</sup>, Nataliya Tsyvenkova<sup>4</sup>,  
Ivan Omarov<sup>5</sup>

Author for correspondence: Anna Holubenko  
e-mail: anikagogobl@gmail.com

*The integration of Ukraine with the electricity sector of the EU countries is possible only if strict requirements to the electricity quality parameters are met, which must be within the permissible levels established in the relevant regulatory documents.*

*Unfortunately, there is currently no similar data for Ukraine, since the problem of the power quality is systematically dealt with only by scientists, and this despite the fact that losses from low-quality power tend to increase annually.*

*Power quality problems have attracted the comprehensive attention of many leading researchers, power producers, and power consumers. Recently, because of a significant change in the structure of the electricity generation and distribution system, with the popularization of small renewable energy power plants, the power quality has met new problems. Connection of a large number of wind and photovoltaic plants at the level of private households create conditions for reducing the quality of electric current at the level of distortion of the sinusoidal voltage form.*

*In addition, the deterioration of the power quality occurs both due to a significant number of disturbances caused by transient processes (surges and sags of voltage, impulse interference) and in stable modes (harmonic distortions, asymmetry, etc.). Of all the problems, harmonic distortions are described in the most detail in this article.*

*The causes of the distortion of the shape of the sinusoidal periodic current curve and the impact of the distortion on the quality of electric energy are considered and analyzed. The efficiency and reliability of the functioning of all electrical energy receivers and consumers, without exception, significantly depends on the quality of electrical energy.*

*The measures for reducing the voltage non-sinusoidality and ensuring electromagnetic compatibility of consumers are analyzed, etc.*

**Keywords:** voltage, electric energy, electric energy quality; sinusoidal voltage shape factor; nonlinear elements, switching.

**Вступ.** Поняття якості електричної енергії (ЯЕЕ) слід відрізнити від поняття якості інших видів енергоресурсів та енергоносіїв, а особливо це стосується якісних показників продукції.

Для кожного електричного агрегату і пристрою, призначеного для роботи у певних кліматичних умовах та відповідних умовах експлуатації, мають бути визначені такі параметри:

- номінальна частота;

<sup>1</sup> PhD, associate professor, Department of Electrification, Production Automation and Environmental Engineering, Polissia National University, Zhytomyr, Ukraine <https://orcid.org/0000-0002-8361-714X>

<sup>2</sup> PhD, associate professor, Department of Higher and Applied Mathematics, Polissia National University, Zhytomyr, Ukraine <https://orcid.org/0000-0001-9909-7882>

<sup>3</sup> teacher, Department of Electrification, Production Automation and Environmental Engineering, Polissia National University, Zhytomyr, Ukraine <https://orcid.org/0000-0001-5018-5312>

<sup>4</sup> PhD, associate professor, Department of Tractors, Cars and Bioenergy Resources, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine; Department of Renewable Organic Energy, Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine <https://orcid.org/0000-0003-1703-4306>

<sup>5</sup> postgraduate student, Department of Renewable Organic Energy, Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine <https://orcid.org/0000-0001-9449-853X>

- напруга;
- коефіцієнт форми кривої напруги;
- коефіцієнт часової перенапруги;
- тощо.

Тому важливо зазначити, що якість електричної енергії – це сукупність властивостей, які визначають дію на електрообладнання, прилади, пристрої та апарати, що в свою чергу оцінюються показниками якості електроенергії [1]. Наведені показники характеризують рівні електромагніт-

них перешкод в системі електропостачання. Погіршення якості електроенергії, інакше кажучи, зміна рівня електромагнітної сумісності в системі електропостачання, обумовлена технологічним процесом виробництва, передачі, розподілу та споживання електроенергії [2]. Дотримання встановлених норм ЯЕЕ забезпечує електромагнітну сумісність електричних мереж енергопостачальних організацій та електричних мереж споживачів електроенергії [2, 5].

Наприклад, дослідження, які були проведені відповідно до програми Європейської комісії «Leonardo Energy», довели, що щорічні фінансові збитки для промисловості лише ЄС через неналежну якість енергоносіїв становлять понад 10 млрд євро, тоді як витрати на їх запобігання не перевищували б 5 % цієї суми.

Слід зауважити, що споживання електричної енергії неналежної якості призводить не лише до її перевитрати, збільшення часу технологічного процесу та простою трудових ресурсів, а й до погіршення якості готової продукції, зростання кількості браку, скорочення міжремонтних інтервалів обладнання, підвищення ймовірності аварій [9].

Слід відзначити, що термін «якість електроенергії» не відображає факту впливу на нього споживачів електроенергії і значною частиною населення, насамперед неспеціалістів енергетичної галузі, сприймається як поняття, яке характеризує якість продукції що поставляється. Тому, за умов невідповідної якості електроенергії, зауваження від населення надходять лише до організації, яка постачає зазначену електроенергію [10].

Норми показників якості електроенергії (ПЯЕ) поділяються на нормально допустимі та гранично допустимі. Нормальні значення мають відповідати величині ймовірності 0,95, тобто впродовж 95 % часу доби ПЯЕ не повинні виходити за межі стандартних значень [8].

Упродовж решти часу (5 %) норми можуть бути вищими. Нормально допустиме та гранично допустиме значення відхилення напруги в точках загального приєднання споживачів електроенергії до електричних мереж напругою 0,38 кВ та вище відповідно становить  $\pm 5$  та  $\pm 10$  % номінальної напруги електричної мережі [2, 6, 12].

**Мета і завдання.** Метою роботи є дослідження впливу відхилення форми кривої синусоїдального струму від синусоїдальної форми в мережі на ККД електричних машин.

**Об'єкт дослідження** – несинусоїдальна форма напруги в силовій мережі м. Житомир.

**Предмет дослідження** – залежності впливу відхилення форми кривої синусоїдального струму від синусоїдальної форми в мережі на ККД електричних машин.

**Завдання дослідження:**

1. Зібрати статистичні дані спостереження форм кривих напруги в різних вузлах системи електропостачання м. Житомир.
2. Навести аналітичні залежності для оцінки відхилення сигналу напруги від синусоїдальної форми.

3. За результатами перетворення класичних залежностей та представлення їх у вигляді ряду Фур'є встановити вплив спотворення форми сигналу напруги на ККД електричних машин.
4. Виконати моделювання коефіцієнта форми кривої напруги для різних умов.
5. Зробити висновки щодо причин спотворення форми напруги та його впливу на ККД електричних машин (трансформаторів).

**Методи дослідження.** Теоретико-практичні дослідження виконувалися на основі базових теоретичних викладок та законів електротехніки, електромеханіки, теорії електричних кіл з використанням класичних математичних методів та перетворень. Для отримання даних вимірювань використовувався метод наукового спостереження, порівняння тощо. Форми напруги були отримані відповідно до прийнятої методики і галузевих стандартів із застосуванням вимірювального обладнання лабораторій Поліського національного університету.

**Результати дослідження.** Результатами дослідження є узагальнення спостережень щодо форми кривих напруги та коефіцієнта їх спотворення, тобто відхилення форми від синусоїдальної. Всі спостереження форм напруги здійснювались в реальних умовах електромережі м. Житомира в різні періоди часу. Банк даних містив понад 1000 спостережень.

Спотворення форми змінної електричного струму (напруги) відбулося внаслідок дії вищих гармонік, які негативно впливали на роботу систем автоматики та телемеханіки, знижували економічність та надійність роботи електричних мереж, зменшували термін експлуатації електрообладнання та призводили до багатьох інших негативних наслідків.

Вагомий внесок у вивчення режимів джерел струму (напруги) при спотворенні форми кривої та в розробку методик вимірювання, розрахунку, аналізу та нормалізації зробили вітчизняні та зарубіжні вчені: Жежеленко І. В., Железко Ю. С., Зикін Ф. А., Карташев І. І., Кордюков Е. І., Кузнецов В. Г., Курбацкий В. Г., Липський А. М. та інші. Основними роботами в сфері аналізу систем електропостачання промислових підприємств при спотворених формах струму (напруги) є праці Жежеленка І. В. У його працях представлено найбільш повний спектр питань, які пов'язані з режимами вищих гармонік і їх негативним впливом на мережі промислових підприємств [4, 8, 10].

На основі вивчення літературних джерел відповідного спрямування розглянуто стан якості електричної енергії в системах електропостачання та визначено наслідки, викликані погіршенням якості електроенергії, причому особливу увагу приділено вищим гармонікам складових струму і напруги як найскладнішому для інженерної оцінки фактору. До числа таких елементів належать: різного роду вентильні перетворювачі (головним чином тиристорні), установки дугового і контактного електрозварювання, сталеплавильні печі, трансформатори, двигуни тощо [9, 10].

Фізична сутність спотворення форми змінної струму

(напруги) полягає у виникненні режиму короткого замикання ланцюга змінного струму в інтервалі комутації струму діодних та тиристорних плечей випрямляча. Як наслідок, у цих інтервалах відбуваються провали в кривій синусоїдального струму (напруги). Ці провали спотворюють форму кривої напруги і призводять до виникнення вищих гармонійних складових у частотному спектрі напруги [2, 7]. Апарати з електричною дугою або апарати, що використовують електричний розряд (дугові печі, зварювальні машини, люмінесцентні лампи), також створюють нестабільні у часі гармоніки.

Дещо нова проблема, яку потрібно негайно вирішувати, – стрімкий ріст використання комп'ютерної техніки, що призводить до спотворення форми кривої синусоїдальної напруги [3].

Аналіз спотворення синусоїдальної форми кривої напруги силової мережі здійснювався за даними, зібраними у різних частинах м. Житомира. Перші дослідження було виконано у 2016 році, інші – відповідно у 2020 та 2021 роках. На рис. 1. зображено характерні форми кривих напруги силової мережі, які мали місце під час проведення цього дослідження.

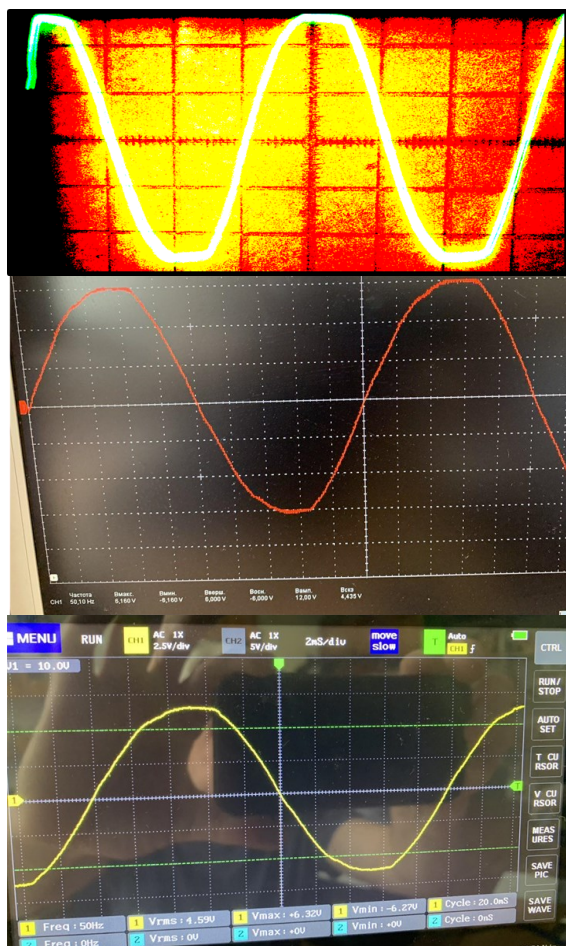


Рис. 1. Осцилограми форм кривих напруги силової мережі м. Житомира: а – зафіксована 2016 року; б – зафіксована 2016 року; в – зафіксована 2021 року

Fig. 1. Oscillograms of the voltage curves shapes of Zhytomyr power network: a – fixed in 2016 year; b – fixed in 2020 year; c – recorded in 2021 year

Осцилограми були зняті осцилографом С-99 в учбовій лабораторії Поліського національного університету. Для порівняння на рис. 2 зображена ідеальна форма змінної синусоїдальної напруги.

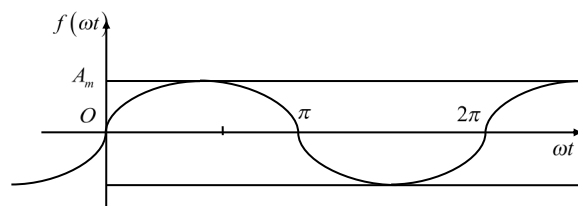


Рис. 2. Ідеальна форма змінної синусоїдальної напруги

Fig. 2. An ideal form of an alternating sinusoidal voltage

Осцилограми свідчать про те, що форми кривої напруги силових мереж далеко не ідеальні і не мають реально вираженої форми кривої синусоїдальної напруги, яку зображено на рис. 2.

Це відбувається за рахунок того, що в процесі роботи навантаженого синхронного генератора змінного струму в ньому одночасно діють магніторухіливі сили (МРС) збудження статора та якоря, при цьому МРС статора впливає на МРС збудження, посилюючи або послаблюючи поле збудження, наслідком чого є спотворення форми змінного струму.

Згідно із досліджуваною формою спотворень, вона є ближчою до періодичної функції, яка має вигляд симетричної трапеції (рис. 3).

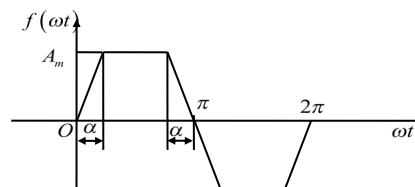


Рис. 3. Періодична функція трапецеїдальної форми

Fig. 3. Periodic function of trapezoidal form

Спотворення форми кривої напруги (Harmonic Distortion) мають такі основні показники:

- 1) коефіцієнт спотворення форми кривої напруги та струму, який визначається як відношення діючих значень суми вищих гармонік напруги (струму) до діючого значення напруги (струму) основної гармоніки, або, у спрощеному варіанті, до номінальної напруги (струму);
- 2) коефіцієнт гармоніки напруги (струму) – це відношення діючого значення аналізованої гармоніки напруги (струму) до діючого значення змінної напруги (струму), або у спрощеному варіанті – до номінальної напруги (струму);
- 3) коефіцієнт форми кривої напруги (струму), який визначається як відношення діючих значень суми вищих гармонік до середнього їх значення.

Небезпеку для електрообладнання різного призначення створюють спотворення форми кривої напруги більш за 8 %, а також наявність в кривій напруги гармонійних скла-

дових непарного (парного) порядку, з коефіцієнтом гармонік більшим за 5 % [1, 2, 5].

Для визначення коефіцієнта форми кривих змінної напруги потрібно знайти діюче значення напруги змінного струму, після чого стає можливим визначення середнього значення напруги змінного струму.

Діюче значення напруги змінного струму визначається за формулою:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}, \quad (1)$$

або за формулою:

$$U = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} \frac{U_k^2}{2}} = \sqrt{\frac{U_0^2}{2} + \frac{U_1^2}{2} + \frac{U_2^2}{2} + \dots}, \quad (2)$$

де  $U_k$  – діюче значення відповідних гармонічних складових, в цьому разі – напруги, В;

$T$  – період, с;

$t$  – час, с.

Середнє значення напруги змінного струму в разі симетрії функції (рис. 3) визначається за формулою [7, 11]:

$$U_c = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt. \quad (3)$$

Для оцінки спотворення форми кривої визначаємо коефіцієнт форми як відношення діючого значення спотвореної функції до її середнього значення

$$K_\phi = \frac{U}{U_c} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}}{\frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt} = \frac{\sqrt{\frac{U_0^2}{2} + \frac{U_1^2}{2} + \frac{U_2^2}{2} + \dots}}{\frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt}. \quad (4)$$

де  $U$  – діюче значення напруги, В;

$U_c$  – середнє значення напруги, В;

$u(t)$  – напруга як функція від часу.

Діючі значення гармонік спотвореної функції  $f(\omega t)$  (рис. 3) можна знайти шляхом розкладання цієї функції в ряд Фур'є [11]. Отримуємо:

$$f(\omega t) = \frac{4A_m}{\pi\alpha} \left( \sin \alpha \sin \omega t + \frac{1}{3^2} \sin 3\alpha \sin 3\omega t + \frac{1}{5^2} \sin 5\alpha \sin 5\omega t + \dots \right) \quad (5)$$

де  $A_m$  – амплітудне (максимальне) значення функції;

$\omega t$  – кутова частота;

$\alpha$  – відрізок осі  $\omega t$  від початку осі координат до початку спотворення кривої напруги силової мережі.

На основі аналізу та вимірювання напруги силової мережі (рис. 1) за допомогою осцилографа було встановлено, що

величина  $\alpha$  має значення  $\alpha \approx 77^\circ$  (або 1,35 рад.); амплітудне значення спотвореної напруги на виході знижувального силового трансформатора дорівнює  $U_m = 5,86$  В; амплітудне значення неспотвореної напруги –  $U_m = 6,08$  В.

Отже, спотворену напругу можна записати у вигляді:

$$u(t) = \frac{4U_m}{\pi\alpha} \left( \sin \alpha \sin \omega t + \frac{1}{3^2} \sin 3\alpha \sin 3\omega t + \frac{1}{5^2} \sin 5\alpha \sin 5\omega t + \dots \right). \quad (6)$$

Тоді амплітуди діючих значень гармонік спотвореної напруги на виході знижувального силового трансформатора дорівнюють:

$$U_1 = 5,55 \text{ В}, \quad U_3 = 0,51 \text{ В}, \\ U_5 = 0,258 \text{ В}, \quad U_7 = 0,11 \text{ В}.$$

Звідси:

$$U = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} \frac{U_k^2}{2}} = \sqrt{\frac{5,55^2}{2} + \frac{0,51^2}{2} + \frac{0,258^2}{2} + \frac{0,11^2}{2}} = 3,95 \text{ В} \quad (7)$$

Для визначення середнього значення спотвореної напруги силової мережі  $U_c$  потрібно проінтегрувати вираз (6).

Отримуємо:

$$\begin{aligned} U_c &= \frac{4U_m}{\pi\alpha} \frac{2}{T} \int_0^{T/2} \left( \sin \alpha \sin \omega t + \frac{1}{3^2} \sin 3\alpha \sin 3\omega t + \frac{1}{5^2} \sin 5\alpha \sin 5\omega t + \dots \right) dt = \\ &= \frac{4U_m}{\pi\alpha} \frac{2}{T} \left( -\frac{1}{\omega} \sin \alpha \cos \omega t - \frac{1}{3^2 3\omega} \sin 3\alpha \cos 3\omega t - \frac{1}{5^2 5\omega} \sin 5\alpha \cos 5\omega t - \dots \right) \Big|_0^{T/2} = \\ &= \frac{4U_m}{\pi\alpha} \frac{2}{2\pi} \left( -\sin \alpha (\cos \pi - 1) - \frac{1}{3^3} \sin 3\alpha (\cos 3\pi - 1) - \frac{1}{5^3} \sin 5\alpha (\cos 5\pi - 1) - \dots \right) = \\ &= \frac{8U_m}{\pi^2 \alpha} \left( \sin \alpha + \frac{1}{3^3} \sin 3\alpha + \frac{1}{5^3} \sin 5\alpha + \dots \right). \end{aligned}$$

3,329 для  $U_m = 5,86$  В (3,76 для  $U_m = 6,08$  В). (7)

Підставляючи в цей вираз значення:  $\alpha = 77^\circ$  (1,35 рад.),  $U_m = 5,86$  В, отримуємо  $U_c = 3,464$  В. У цьому разі коефіцієнт форми кривої напруги дорівнює:

$$K_\phi = \frac{U}{U_c} = \frac{3,95}{3,764} = 1,046. \quad (8)$$

Для підтвердження впливу коефіцієнта форми кривої напруги на ККД розглянемо цей вплив на прикладі силового трансформатора, проаналізувавши таку формулу:

$$\omega_i = \frac{E_i \cdot 10^4}{4K_\phi \cdot f \cdot B \cdot S_{n.c} \cdot k_{3.c}}, \quad (9)$$

де  $E_i$  – е.р.с.  $i$ -ї обмотки, В;

$f$  – частота мережі, Гц;

$B$  – магнітна індукція (1,3...1,5 Тл);

$S_{n.c}$  – перетин осердя, см<sup>2</sup>;

$k_{3.c}$  – коефіцієнт заповнення сталевго осердя (0,85...0,9);

$K_\phi = 4,44$  – коефіцієнт форми кривої напруги синусоїдального струму.

Якщо в формулу 9 підставити коефіцієнт форми кривої

несинусоїдної напруги 1,046, кількість витків потрібно збільшити в  $1,11/1,046 = 1,06$  раза, тобто на 6 %, якщо це не зробити, то збільшиться струм холостого ходу, що зменшить ККД трансформатора.

### Висновки

1. Представлено результати практичних спостережень спотворення форми напруги від синусоїдальної форми в електромережі м. Житомир.
2. Наведено аналітичні залежності для розрахунків коефіцієнта спотворення форми кривої напруги та ККД електричної машини. Розрахунки, проведені за запропонованими залежностями, дають змогу оптимізувати параметри електричних машин для підвищення їх ККД в умовах відхилення напруги від синусоїдальної форми. Моделювання проведене на прикладі силового трансформатора.
3. Дослідження підтверджує, що необхідною умовою раціональної роботи системи загального електропостачання є забезпечення якості електроенергії у вузлах підключення споживачів, зокрема мінімальне спотворення синусоїдальної форми сигналу.

### ПОСИЛАННЯ

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. *Держспандарт України*. Київ, 1999. 32 с.
2. Жежеленко И. В. *Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий*: 6-е изд., перераб. и доп. Москва : Энергоатомиздат, 2010. 375 с.
3. Жежеленко И. В., Сезерко Ю. Л. *Вопросы качества электроэнергии в электроустановках*. Мариуполь : ПГТУ, 1996. – 173 с.
4. Аррилага Д., Бредли Д., Боджер П. *Гармоники в электрических системах*. Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
5. Кузнецов В. Г., Шполянський О. Г., Яремчук Н. А. Узагальнений показник якості енергії в електричних мережах і системах // *Технічна електродинаміка*. 2011. № 3. С. 46–52.
6. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке и др. Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
7. Авдеева Т. В., Качаєнко О. Б. *Ряди Фур'є : практикум*. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 88 с.
8. Электричні кола несинусоїдного струму: Методичні вказівки до виконання розрахункових робіт з дисципліни / уклад.: Є. А Кудря, І. Н. Намацалюк, Ю. В. Перетятко. Київ : НТУУ КПІ. 2016. 58 с.
9. Якість енергоресурсів і енергоносіїв: навч. посіб. / А. П. Войцицький та ін. Житомир : Вид-во ЖНАЕУ, 2017. 189 с.

10. Войцицький А. П., Колос Ю. О. Аналіз причин погіршення якості показників електроенергії які характеризують форму напруги // *Вісник Житомирського національного агроекологічного ун-ту*. 2016. № 1. С. 164–170.
11. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. *Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов*. Изд. 13-е., исправленное. Москва : Наука, Гл. ред. Физ.-мат. Лит., 1986. 544 с.
12. Бунько В. Я. Питання якості електричної енергії в розподільних пристроях систем електропостачання // *Молодий вчений*. 2016. № 1 (28). Ч. 3. С. 99–103.

### REFERENCES

1. GOST 13109-97. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tehnikeskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. Derzhstandart UkraYini. KiYiv, 1999. 32 p.
2. Zhezhelenko I. V. *Vyisshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya promyshlenniyh predpriyatiy*: 6-e izd., pererab. i dop. Moskva : Energoatomizdat, 2010. 375 p.
3. Zhezhelenko I. V., Sezerko Yu. L. *Voprosy kachestva elektricheskoy energii v elektroustanovkakh*. Mariupol : PGU, 1996. – 173 p.
4. Arrilaga D., BrEdli D., Bodzher P. *Garmoniki v elektricheskikh sistemah*. Moskva : Energoatomizdat, 1990. – 320 p.
5. Kuznietsov V. H., Shpolianskyi O. H., Yaremchuk N. A. Uzaahlnenyi pokaznyk yakosti enerhii v elektrychnykh merezhakh i systemakh // *Tekhnichna elektrodynamika*. 2011. №3. P. 46–52.
6. *Osnovy teoryy tsepei* / H. V. Zeveke y dr. Moskva: Enerhoatomyzdat, 1989. – 528 p.
7. Avdieieva T. V., Kachaienko O. B. *Riady Furie : praktykum*. Kyiv : NTUU «KPI», 2016. 88 p.
8. *Elektrychni kola nesynusoidnoho strumu*: Metodychni vkazivky do vykonannya rozrakhunkovykh robіt z dystsypliny / uklad.: Ye. A Kudria, I. N. Namatsaliuk, Yu. V. Peretiatko. Kyiv : NTU. KPI. 2016. 58 p.
9. *Yakist enerhoresursiv i enerhonosiiv: navch. posib.* / A. P. Voitsytskyi ta in. Zhytomyr : Vyd-vo ZhNAEU, 2017. 189 p.
10. Voitsytskyi A. P., Kolos Yu. O. Analiz prychyn pohirshennia yakosti pokaznykiv elektroenerhii yaki kharakteryzuiut formu napruhy // *Visnyk Zhytomyrskoho natsionalnoho ahroekolohichnoho un-tu*. 2016. № 1. P. 164–170.
11. Bronshteyn I. N., Semendyaev K. A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashihsya vtuzov*. Izd. 13-e., ispravlennoe. Moskva : Nauka, Gl. red. Fiz.-mat. Lit. 1986. 544 p.
12. Bunko V.Ia. Pytannia yakosti elektrychnoi enerhii v rozpodilnykh prystroiakh system elektropostachannia // *Molodyi vchenyi*. 2016. № 1 (28). Ch. 3. P. 99–103.