

ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ І МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА СПОТВОРЕННЯ НАПРУГИ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

DETERMINATION OF VOLTAGE CONFORMITY FACTOR IN POWER SUPPLY SYSTEMS

Гудим В. І., д-р техн. наук, проф.,

Львівський національний аграрний університет, Україна;

Яцишин С. П., д-р техн. наук, проф.,

Національний університет "Львівська політехніка", Україна; e-mail: slav.yat@gmail.com

Мамцаж Д., магістр

Краківський університет технологій, Польща

Vasyl Hudym, Dr. Sc., Prof.,

Lviv National Agrarian University, Ukraine;

Svyatoslav Yatsyshyn, Dr. Sc., Prof.,

Lviv Polytechnic National University, Ukraine; e-mail: slav.yat@gmail.com

Dominik Mamcarz, master

Krakow University of Technology, Poland

<https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.03>.

Анотація. Нові технічні розробки, наприклад, у галузі частотних електроприводів технологічних агрегатів, електрифікованого транспорту, вітрових та сонячних електростанцій, використовують пристрої, побудовані на базі потужних тиристорів та транзисторів. Багато сучасних пристроїв, сконструйованих на цих елементах, є потужними генераторами вищих гармонік струмів, котрі проникають у електричні мережі систем електропостачання. Це потребує розроблення заходів та засобів для обмеження вищих гармонік струмів у електричних мережах.

У роботі розглянуто метод і засіб визначення коефіцієнта спотворення форми напруги вищими гармоніками в електричних мережах. Цей коефіцієнт належить до групи основних показників якості електричної енергії, які регламентують національними стандартами та міжнародними нормами на якість електричної енергії. Вказано на недоліки у прийнятих методиках та запропоновано спосіб, який суттєво дає змогу істотно підвищити точність визначення вказаного показника. На основі опрацювання реальних вимірювань за допомогою сертифікованої апаратури показано, що похибка результатів обчислення та вимірювання з використанням запропонованого способу не перевищує 1 % від номінальної напруги, тоді як чинними нормами значення цього коефіцієнта, залежно від напруги системи електропостачання, допускається від 2 % до 8 %. Враховуючи те, що використовувана вимірювальна апаратура не враховує інтергармонік та експоненціальних складових у напрузі живлення, запропоновано спосіб, який враховує ці складові на заданому інтервалі часу, значно більшому від одного періоду, забезпечує вищу точність визначення коефіцієнта спотворення напруги. Запропоновані метод та засіб визначення коефіцієнта спотворення форми напруг дають змогу врахувати всі гармоніки та інтергармоніки, зокрема нульову та експоненціальні складові, що забезпечує значно вищу точність порівняно із прийнятими методами, передбаченими стандартами та нормами на якість електричної енергії. До того ж алгоритм можна реалізувати на основі використання вимірювальної апаратури та мікропроцесорних пристроїв.

Ключові слова: показники якості електричної енергії, спотворення напруги, гармоніки, інтергармоніки.

Abstract. New technical developments, such as in the field of frequency drives of technological units, electrified transport, wind, and solar power plants, apply devices built on the basis of powerful transistors. Modern devices designed on these elements are powerful generators of higher harmonics of currents that penetrate the grids of power systems. It requires the development of measures and means to limit the higher harmonics of currents in the electrical grids.

The method and the means of determining the voltage distortion coefficient by higher harmonics in electric networks are considered in the paper. This factor belongs to the group of main indicators of electricity quality, which are regulated by national standards and international standards for electricity quality. The shortcomings in the existing methods are pointed out and a method is proposed which allows increasing the accuracy of the specified indicator significantly. Based on the actual measurement and using certified equipment, it is shown that the error of the measurement results and their calculation by using the proposed method does not exceed 1 % of the nominal voltage, while the existing norms of this factor, depending on the voltage of the power supply system, regulate value of error from 2 % to 8 %. Considering that the commonly used measuring equipment does not take into

account the interharmonics and exponential components in the supply voltage, the proposed method regarding these components over a predetermined time interval, much larger than one period, provides higher accuracy for determining the distortion factor. By examining all harmonics and interharmonics, including zero and exponential components, we provide substantially higher accuracy than the existing methods described in the standards and norms for electricity quality.

Key words: Indicators of quality of electric energy, Distortion of voltage, Harmonics, Interharmonics.

Вступ та постановка завдання

Якість електричної енергії як особливого продукту виробництва, що не підлягає складуванню, повинна відповідати вимогам державних норм чи державних і міждержавних стандартів. Від якості електричної енергії істотно залежить ефективність та надійність функціонування усіх без винятку приймачів та споживачів електричної енергії.

Серед основних показників якості електричної енергії доволі вагомим є коефіцієнт спотворення напруги, який оцінюється через відношення діючого значення вищих гармонік, котрі містяться у напрузі, включаючи постійну складову, до діючого значення першої гармоніки контролюючої напруги [1–3]. Високий вміст гармонік у напрузі системи електропостачання погіршує умови роботи асинхронних електроприводів, найпоширеніших на підприємствах і в побуті, а також інших чутливих до вищих гармонік споживачів, до яких належать: системи електрозв'язку, автоматичного контролю режимів, регулювання та керування різноманітними технологічними процесами тощо. Крім того, вищі гармоніки призводять до додаткових втрат електричної енергії в елементах електричних мереж, зокрема в трансформаторах, реакторах та батареях конденсаторів. Особливо небезпечними вищі гармоніки є для кабельних ліній, у яких через ємності між жилами кабелів замикаються струми вищих гармонік і додатково нагрівають кабелі, що негативно впливає на стан ізоляції, яка швидко погіршується. Унаслідок цього термін експлуатації кабелів скорочується. Разом із тим, струми вищих гармонік додатково завантажують електричні мережі та викликають появу потужності спотворення, яка за суттю є реактивною, викликають додаткові втрати активної потужності в електромагнітних апаратах і погіршують умови експлуатації електроустановок.

Необхідно зазначити, що нові технічні розробки, наприклад, у галузі частотних електроприводів технологічних агрегатів, електрифікованого транспорту, вітрових та сонячних електростанцій, використовують пристрої, побудовані на основі потужних тиристорів та транзисторів. Багато сучасних пристроїв, сконструйованих на цих елементах, є потужними генераторами вищих гармонік струмів, котрі проникають у електричні мережі систем електропостачання. Це вимагає розроблення заходів та засобів для обмеження вищих гармонік струмів у електричних мережах. Такими засобами є фільтри вищих гармонік струмів, які поділяють на

активні та пасивні, які можуть компенсувати або поглинати певні конкретні гармоніки струмів, або в автоматичному режимі налаштовуватися безпосередньо під навантаженням на гармоніку і навіть частоту струму з найбільшою амплітудою [4, 5]. Проте необхідно зазначити, що використання фільтрів не завжди дає бажаний ефект, оскільки фільтри поглинають гармоніки струму лише певних частот, які вдається виявляти за допомогою вимірювань та аналізу форми сигналу, але ці фільтри недостатньо обмежують інтергармоніки, котрі доволі складно виявити сучасними вимірювальними засобами. У зв'язку з цим доцільно запропонувати і використати ефективний метод визначення діючого значення гармонік та інтергармонік [4, 5], які містяться в напругах електричних мереж і негативно впливають на силові електрообладнання та режими його функціонування. У цій роботі визначено коефіцієнт спотворення напруги в системах електропостачання всією сукупністю гармонік та інтергармонік на будь-якому інтервалі часу.

Класичним підходом щодо виділення гармонік та частот у несинусоїдальних напругах є використання певних видів перетворень, до прикладу, для неперервних функцій – перетворення Фур'є, [6], а для довільних функцій – узагальнені формули Релея чи рівності Персеваля у вигляді спектральних густин гармонійних коливань, зокрема в теорії електротехнічних сигналів. Використання зазначених теорій для напруг електричних мереж не дає бажаного результату через порівняно малі значення гармонік та інтергармонік стосовно основної гармоніки напруги системи.

У загальному випадку, щоб отримати задовільні результати, необхідно, щоб миттєве значення аналізованої напруги відповідало певним вимогам, котрі не завжди трапляються у реальних ситуаціях. Наприклад, напруга на шинах живлення дугових сталеварних електропечей на стадії розтоплення не лише спотворена гармоніками, а й змінюється за величиною з частотою від сотих Гц до кількох Гц, тобто не періодично. У випадку неперіодичності форми напруги використовується короткохвильове перетворення, яке дає змогу виділити широкий спектр частот, зокрема як гармоніки, так і інтергармоніки, котрі доволі істотно впливають на форму напруги [7]. Результат залежить від вибраного виду апроксимуючих функцій, зокрема від використовуваних стандартних функцій, таких як функції Добеші, Майєра, Хаара, Струмберга, Батла–Лемар'є та інших спеціалістів. Вказаними функціями можна

скористатися у таких програмних середовищах як MATLAB 6/6.1, MathCad 14 або Mathematica 12. Крім того на результат впливає кілька чинників, зокрема крок дискретизації, тривалість процесу, тобто параметри вікна сигналу, вибраного набору функцій тощо. Проте навіть використання найкращого варіанта короткохвильових перетворень не дає відповіді на кількісний рівень спотворення форми напруги гармоніками та інтергармоніками, оскільки в такий спосіб важко отримати амплітуди всього спектра частот, які містить напруга на інтервалі часу в декілька секунд.

Точність та якість фільтрування гармонік за допомогою керованих активних чи пасивних фільтрів залежить від якості функціонування пристроїв керування, які реагують на отриману інформацію від систем вимірювання та контролю рівня спотворення і гармонійного складу напруги та струму в живильній електромережі. Таку інформацію можна отримати на основі розкладання миттєвих значень напруг та струмів у гармонійний ряд, зокрема за допомогою перетворень Фур'є [6]. Точність отриманих результатів залежить від кількох чинників, зокрема від кроку дискредитації аналізованого сигналу, використовованого алгоритму оброблення сигналу, досконалості вимірювальної апаратури, точності виділення амплітуд напруг окремих гармонік тощо. Проте навіть використання короткохвильового перетворення не дає повної відповіді про рівень спотворення форми напруги гармоніками та інтергармоніками, оскільки таким способом важко отримати амплітуди повного спектра частот.

Мета роботи

Мета роботи полягає у розвитку методу і засобів визначення коефіцієнта спотворення напруги синусоїдальної форми в електричних мережах гармоніками, інтергармоніками та експоненційними складовими, що наявні у напрузі, проте виявити їх за допомогою розкладу у гармоніки неможливо.

1. Розв'язання задачі

Об'єктивна інформація про реальний вміст гармонік та інтергармонік у напрузі живлення споживачів електричної енергії дає змогу належно реагувати на ситуацію та вибирати оптимальні параметри і режими наявних засобів для обмеження впливу гармонік на споживачів електричної енергії. Крім того, теорія оцінки якості електричної енергії від дії вищих гармонік потребує розвитку з метою отримання нових закономірностей та залежностей, зокрема втрат електричної енергії, умов та термінів експлуатації промислового та побутового електрообладнання, а також можливостей оцінки величин, пов'язаних зі спотворенням форми синусоїдальних

електричних координат в електричних мережах. Кінцевий результат оцінки гармонійного складу напруг в електричних мережах та у точках приєднання споживачів електричної енергії отримують з певною похибкою, оскільки процес складається із кількох етапів та за допомогою апаратури, яка характеризується певною точністю вимірювань і оброблення їх результатів.

Відповідно до рекомендацій стандарту на якість електричної енергії [1], який використовується в Україні, а також Європейських норм з електромагнітної сумісності, коефіцієнт спотворення форми напруги визначають за виразом

$$k_{BG} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{50} U_i^2}}{U_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де $\sqrt{\sum_{i=2}^{50} U_i^2}$ – діюче значення вищих гармонік, починаючи від другої до п'ятдесятої включно; U_1 – діюче значення напруги першої гармоніки.

У стандарті допускається замість діючого значення першої гармоніки використовувати діюче значення контрольованої напруги і в цьому випадку коефіцієнт спотворення форми напруги визначають за виразом

$$k_{BG} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{50} U_i^2}}{U_H} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де U_H – номінальне значення контрольованої напруги.

Як видно з (1) та (2), кількісне значення коефіцієнта спотворення напруги визначається лише гармоніками від другої до п'ятдесятої включно; гармоніки понад 50-ту відкидають, а також не враховують інтергармоніки, які часто наявні в напрузі та мають достатньо великі амплітуди.

Однак вказаний метод не завжди забезпечує необхідну точність через неврахування субгармонік та інтергармонік, які істотно впливають на значення коефіцієнта спотворення напруги живлення споживачів.

Згідно з використововуваною методикою на першому етапі відбувається відбирання інформації за допомогою давачів (трансформатори напруги та подільники напруги), точність яких залежить від їхніх технічних характеристик. Ці пристрої видають аналогові сигнали, які підлягають подальшому опрацюванню.

На другому етапі відбувається перетворення аналогового сигналу миттєвої напруги на цифровий код або числова апроксимація аналогового сигналу, де з'являється додаткова похибка, зокрема внаслідок закруглення результатів обчислень.

На третьому етапі здійснюється виділення гармонік та інтергармонік; причому точність ре-

зультатів залежить від використаних математичних методів та математичного забезпечення технічних засобів опрацювання, зокрема від програмного забезпечення комп'ютерних систем.

На останньому етапі визначають коефіцієнти гармонік та спотворення форми напруги згідно з (1) або (2).

Отже, кінцевий результат характеризується похибкою, яка може бути співмірною зі значенням певної гармоніки чи інтергармоніки. Крім того, під час таких вимірювань відкидають випадкові високі частоти напруг, амплітуди яких можуть істотно впливати на контрольовані показники якості напруг чи інших координат режимів електричних мереж.

Враховуючи наведене вище, постає завдання пошуку способу підвищення точності визначення коефіцієнтів, які характеризують форму напруги та рівень її спотворення гармоніками й інтергармоніками. Один із таких способів полягає у тому, що на будь-якому інтервалі часу від реальної вимірюваної напруги віднімають стандартну й отримують різницю, що містить частотний спектр гармонік від нульової до нескінченної, зокрема експоненціальні складові та першу гармоніку. Різниця напруг охоплює також відхилення напруги від номінального значення та коливання контрольованої напруги з певною частотою. Сучасна вимірювальна апаратура усереднює експоненціальні функції і видає як постійну складову на контрольованому проміжку часу. Якщо значення першої гармоніки контрольованої напруги відрізняється від стандартної, то різниця між контрольованою та стандартною напругами містить першу гармоніку. Для з'ясування впливу першої гармоніки на якість напруги необхідно з різниці виділити першу гармоніку і під час подальшого опрацювання визначити її вплив на відхилення контрольованої напруги від номінального значення.

Описаний спосіб визначення коефіцієнтів спотворення та відхилення напруги в однофазних

електричних мережах запропоновано у [11], де наведено алгоритм та блочну схему. Реалізація алгоритму визначення коефіцієнта спотворення та відхилення напруги передбачена на базі мікропроцесорного пристрою з відповідним програмним забезпеченням. Спосіб перевірено в реальних умовах стосовно напруги електричної мережі 230 В, яку підводили до електродугового зварювального агрегату. Схему системи електропостачання електрозварювального агрегату наведено на рис. 1.

Від шин електроенергетичної системи через силовий трансформатор напругою 15/0,4 кВ та лінію живлення напруга подається до пункту приєднання електрозварювального апарату Дека PARVA 175с. Струм короткого замикання системи електропостачання у точці приєднання зварювального агрегату становив 100,1 А. Активний опір короткого замикання системи живлення – 2,26 Ом, реактивний опір – 0,43 Ом, а повний опір – 2,30 Ом.

Потужність електродугового зварювального агрегату може змінюватися в межах від 2 кВт до 5 кВт, а значення струму зварювання – від 40 А до 160 А. При цьому вхідна напруга зварювального агрегату частотою 50 Гц дорівнює 230 В, а вихідна – 48 В.

Вимірювання миттєвих значень напруг здійснювали за допомогою осцилоскопа ATEN FDS1022CL+, оснащеного приставкою CIECA60, подільника високої напруги HANTEK T3100, та багатофункціонального вимірювального приладу параметрів електроустановки SONEI MPI-520. У ході виконання експериментів реєстровано напруги у точці приєднання електродугового зварювального агрегату на інтервалі 0,45 с у режимі номінального навантаження та в режимі вільного ходу.

На рис. 2 наведено осцилограму миттєвої напруги у точці приєднання електродугового зварювального агрегату до електричної мережі загального користування у режимі вільного ходу.

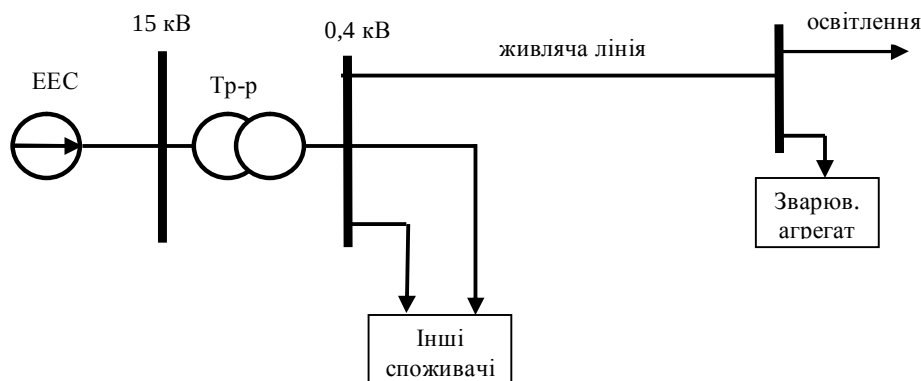


Рис. 1. Схема живлення зварювального агрегату

Fig. 1. The power supply scheme of the welding unit

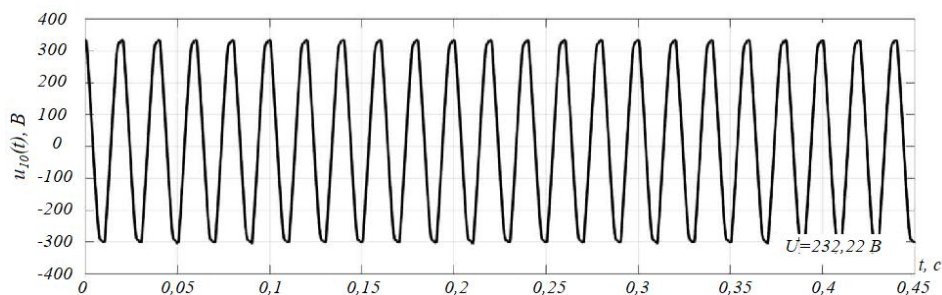


Рис. 2. Миттєве значення напруги у точці приєднання зварювального агрегату

Fig. 2. Instantaneous voltage value at the point of connection of the welding unit

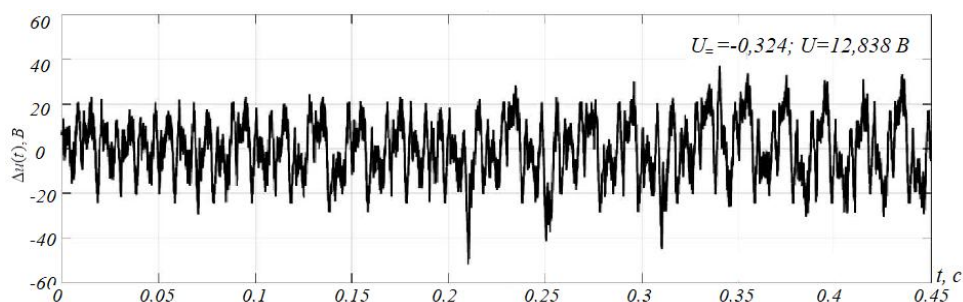


Рис. 3. Миттєве значення різниці виміряної та стандартної напруг

Fig. 3. Instantaneous difference of measured and standard voltages

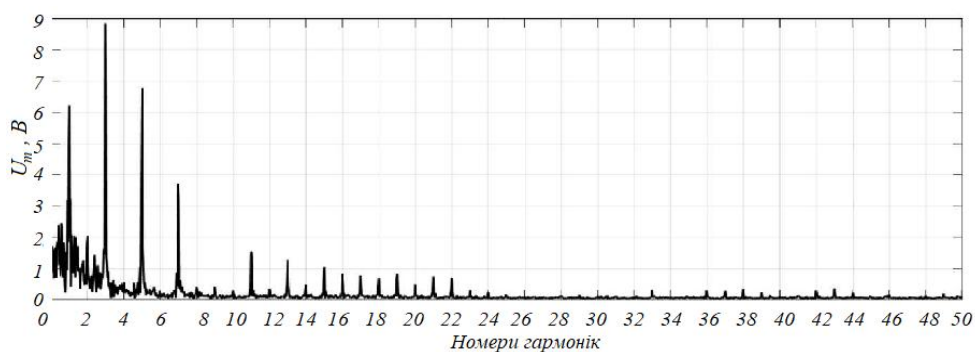


Рис. 4. Спектрограма різниці виміряної та стандартної напруг у режимі вільного ходу електрозварювального агрегату

Fig. 4. Spectrogram of difference of measured and standard voltages in free-running mode of welding unit

Як видно з рис. 2, миттєва напруга мережі у точці приєднання навантаження, діюче значення якої становить 232,22 В, містить широкий спектр гармонік, які в цьому режимі не зумовлені роботою зварювального агрегату.

Після віднімання від миттєвої напруги електромережі живлення, яка наведена на рис. 2, миттєвої стандартної напруги одержано миттєве значення різниці напруг $du(t)$, наведене на рис. 3. Отримана різниця квазіперіодична, містить достатньо широкий спектр гармонік та інтергармонік, а в окремі моменти

часу з'являються раптові збільшення амплітуди напруги, що перевищують усталене значення в 1,2–2,0 рази.

Спектральний аналіз різниці напруг, наведеної на рис. 3, показує, що найбільшого значення (майже 3 %) набуває третя гармоніка. Як видно зі спектрограми миттєвого значення різниці напруг, наведеної на рис. 4, амплітуди п'ятої та першої гармонік досягають 2 %, а сьомої – ~1,3 %. Амплітуди одинадцятої гармоніки і вищих гармонік не перевищують 0,5 % номінальної напруги електромережі.

Вказані гармоніки можуть генеруватись іншими споживачами або з'являться внаслідок насичення магнітної системи трансформатора живлення.

Згідно з інформацією, виданою вимірювальним комплексом, діюче значення різниці напруг становить 12,838 В, а розраховане діюче значення (понад 0,1 %) гармонік, взятих зі спектрограми, дорівнює 9,1 В. Це підтверджує гіпотезу, що швидке перетворення Фур'є не забезпечує належної точності щодо вмісту частот у напрузі живлення. Варто відзначити, що діюче значення гармонік та інтергармонік, урахувавши залишок першої гармоніки, становить 5,58 % від діючого значення

номінальної напруги, тоді як за результатами розрахунку цей показник дорівнює 4,0 %. Отже, класична методика призводить до істотної похибки визначення коефіцієнта гармонік у бік його зниження.

Крім того, виконано реєстрування миттєвої напруги електричної мережі у точці приєднання навантаженого електрозварювального агрегату. На рис. 5 подано зображення миттєвої напруги на вході зварювального агрегату в режимі максимального навантаження за діючого значення 207,36 В, котра також спотворена вищими гармоніками, передусім генерованими зварювальним агрегатом.

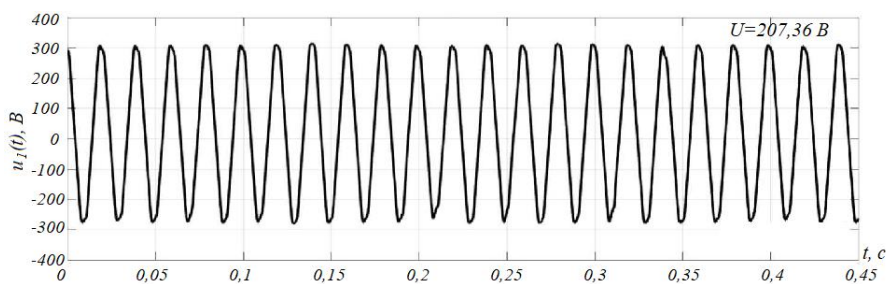


Рис. 5. Миттєве значення входної напруги електрозварювального агрегату в режимі навантаження

Fig. 5. Instantaneous input voltage of the welding machine in load mode

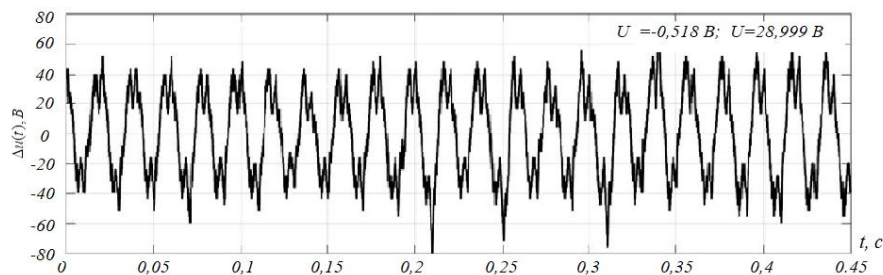


Рис. 6. Миттєве значення різниці контрольованої та стандартної напруг у режимі навантаження

Fig. 6. Instantaneous difference of controlled and standard voltages in load mode

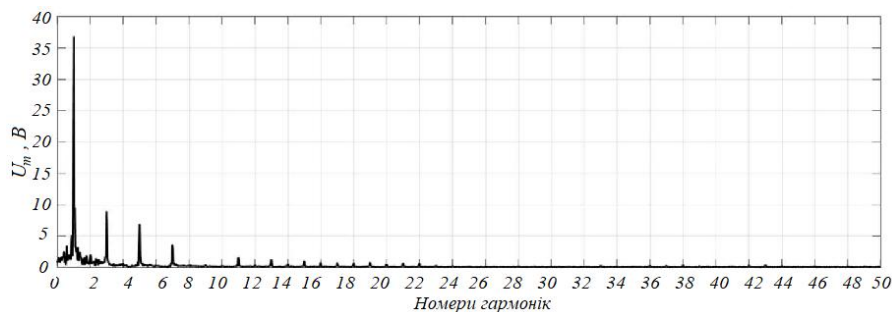


Рис. 7. Спектрограма різниці виміряної та стандартної напруг у режимі навантаження електрозварювального агрегату

Fig. 7. Spectrogram of the difference between the measured and standard voltages in the load mode of the welding machine

З різниці, яку отримали, віднявши стандартну миттєву напругу від вимірної у режимі навантаження, наведеної на рис. 6, бачимо, що вона містить достатньо велику першу гармоніку внаслідок відхилення напруги від номінального значення.

На рис. 7 наведено спектрограму миттєвого значення різниці напруг у режимі навантаження електрозварювального апарата, з якої видно, що внаслідок відхилення напруги амплітуда першої гармоніки досягає 37 В, що становить майже 13 % від номінального значення.

Значення третьої, п'ятої та сьомої гармонік дорівнюють відповідно $\sim 9\%$, $\sim 7\%$ та $\sim 4\%$ від номінальної відповідно. За рахунок першої гармоніки діюче значення різниці напруг, наведеної на рис. 6, дорівнює 28,999 В, тоді як діюче значення, отримане з урахуванням гармонік від першої до п'ятдесятої амплітудою від 0,5 В і більше, становить 26,65 В. Різниця діючих значень напруги 2,34 В, або 1,01 % від номінальної величини між зареєстрованою приладом і обчисленою, підтверджує те, що завдяки запропонованому підходу враховуються не лише гармоніки, а й наявні у миттєвій напрузі інтергармоніки, котрі за допомогою розкладу Фур'є виявити неможливо.

Необхідно зауважити, що виділення спектрів гармонік у використовуваній апаратурі здійснюється на основі розкладу Фур'є, який, як зазначено раніше, не визначає інтергармонік, тому похибка може бути вищою.

На рис. 8 наведено структуру алгоритму визначення коефіцієнта гармонік напруги, де отриманий від вимірювального органу напруги 1 сигнал, пропорційний до миттєвого значення напруги,

перетворюється на цифровий код за допомогою АЦП 2. Тривалість реєстрації миттєвого значення напруги визначається пристроєм задання часу реєстрації 3 і може змінюватися, залежно від неперіодичності сигналу. Параметри дискретного сигналу зберігаються у блоці запам'ятовування миттєвого значення напруги 4 впродовж часу реєстрації аж до наступного оновлення інформації й одночасно передаються до блока синхронізації та віднімання 5, до якого також передається сигнал, пропорційний до номінальної миттєвої напруги від блока 6. У блоці 5 миттєве значення номінального сигналу віднімається від миттєвого значення контрольованого сигналу. Отримана різниця запам'ятовується та зберігається у блоці 7, з якого подається на блок виділення першої гармоніки 8 і, одночасно, на другий блок синхронізації та віднімання 9. У другому блоці синхронізації та віднімання здійснюється віднімання від першої різниці, яка отримана у блоці 5, першої гармоніки, виділеної у блоці 8. Після виділення у блоці 10 першої гармоніки напруги із першої різниці у блоці 12 здійснюється визначення коефіцієнта гармонік як відношення діючого значення першої різниці, з якої виділена перша гармоніка, до діючого значення першої гармоніки контрольованої напруги. Це означає, що після виділення першої гармоніки із першої різниці, отриманої у блоці 9, залишаються лише вищі гармоніки та інтергармоніки, що забезпечує вищу точність визначення коефіцієнта спотворення форми напруги.

Якщо перша гармоніка контрольованої напруги дорівнює номінальній напрузі або відрізняється від номінальної на значення похибки, то визначення коефіцієнта спотворення напруги спрощується.

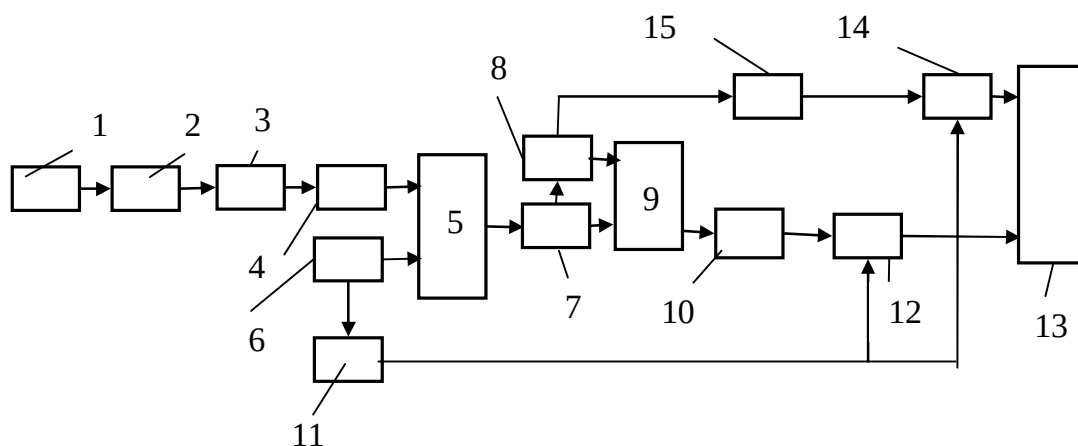


Рис. 8. Блочна схема реалізації алгоритму оцінювання коефіцієнтів

Fig. 8. Block diagram of the evaluation factors algorithm

Цей підхід ефективний, оскільки визначення вказаних коефіцієнтів можна здійснити на будь-якому інтервалі часу, але не меншому від одного періоду промислової частоти. На наш погляд, найкращий результат можна отримати на інтервалі однієї секунди, коли вдається одержати не лише гармоніки та інтергармоніки, але й субгармоніки, котрі достатньо відчутно впливають на форму миттєвої напруги та на коефіцієнт її спотворення, але оцінити їх вплив упродовж цього періоду практично не вдається. Крім того, виділення амплітуд окремих гармонік на інтервалі однієї секунди за допомогою гармонійного аналізу дає середнє значення кожної гармоніки. Реально на такому інтервалі часу амплітуди гармонік не є постійними, що призводить до відхилення результату визначення коефіцієнтів гармонік напруги.

Аналізуючи отримані результати, легко помітити, що використання відомих методів оцінки коефіцієнта спотворення форми напруги гармоніками призводить до значних похибок. Це спричинено тим, що в електричних мережах систем електропостачання нелінійних та стрімко змінних споживачів електричної енергії проявляються квазіперіодичні форми напруг, для гармонійного аналізу яких гармонійні ряди Фур'є непридатні. Тому результати оцінювання коефіцієнтів спотворення стають недостатньо точними. Для аналізу випадкових процесів у мережах зі стрімко змінними споживачами електричної енергії, яким притаманна неперіодична форма напруг, можна скористатись короткохвиловим перетворенням, проте результат залежить від вибраного методу апроксимації функції.

Висновки

Запропоновані метод та засіб визначення коефіцієнта спотворення форми напруг дають змогу врахувати всі гармоніки та інтергармоніки, зокрема нульову та експоненціальні складові, що забезпечує значно вищу точність порівняно із відомими методами, передбаченими стандартами та нормами на якість електричної енергії. До того ж алгоритм можна реалізувати з використанням вимірювальної апаратури та мікропроцесорних пристроїв.

Подяка

Автори висловлюють вдячність колективу кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету "Львівська політехніка" за надану допомогу та всемірне сприяння у підготовці та виконанні цієї роботи.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність будь-якого фінансового або іншого можливого конфлікту, що стосується роботи.

Список літератури

- [1] И. Жежеленко, Ю. Саенко, *Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях*. Москва, Россия: Энергоатомиздат, 2000.
- [2] Polska norma PN-EN 61000-3-11. Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) Część 3-2: Poziomy dopuszczalne emisji harmoniczných prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika ≤ 16 , 2004.
- [3] Polska Norma PN-EN 50160. Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych, 2010.
- [4] Norma Europejska EN 61000 – 4-7 z włączona poprawką AC1:2004 ma status Polskiej Normy. Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) Część 4-7: Metody badań i pomiarów. Ogólny przewodnik dotyczący pomiarów harmoniczných i interharmoniczných oraz przyrządów pomiarowych, dla sieci zasilających i przyłączonych do nich urządzeń, Warszawa, Polska 2007.
- [5] M. Marz, *Interharmonics: What They Are, Where They Come From and What They Do*. [Online]. Available: <https://ccaps.umn.edu/documents/CPE-Conferences/MIPSYCON-Papers/2016/Interharmonics.pdf>
- [6] J. Arrillaga and N. R. Watson, *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [7] R. Polikar, *The Wavelet Tutorial. Part I. Fundamental Concepts & an Overview on the Wavelet Theory*. [Online]. Available: <http://web.iitd.ac.in/~sumeet/WaveletTutorial.pdf>.
- [8] P. Wojtaszczyk, *A Mathematical Introduction to wavelets*. Cambridge CB2 1RP, United Kingdom: Cambridge University Press. 1997.
- [9] Amara Graps, *An Introduction to Wavelets*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1995 <https://www.eecis.udel.edu/~amer/CISC651/IEEEwavelet.pdf>
- [10] В. Гудим, Технічні засоби зниження гармонік в електропостачальних системах, *Техн. електродинаміка*, № 3, с. 67–72, 1996.
- [11] В. Гудим, В. Косовська, А. Дрваль, В. Чухра, Спосіб визначення коефіцієнтів гармонік і відхилення напруги у однофазних електричних мережах. *Патент України на корисну модель* № 132863, Бюл. №5, 2019.
- [12] У. Ашимов, Д. Сатвалдиев, Ю. Чернов, Шестизлектродный узел руднотермической электропечи с круглой ванной, *А.с. СССР 1702544*, Бюл. 48а, 1991.

References

- [1] I. Zhezhelenko, Yu. Sayenko. *Indicators of Quality of Electric Energy and Their Determination in Industry*. Moscow, RF: Energoatomizdat, 2000.
- [2] Polska norma PN-EN 61000-3-11. Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) Część 3-2: Poziomy dopuszczalne emisji harmoniczných prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika ≤ 16 , 2004.
- [3] Polska Norma PN-EN 50160. Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych, 2010.
- [4] Norma Europejska EN 61000 – 4-7 z włączona poprawką AC1:2004 ma status Polskiej Normy. Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) Część 4-7: Metody badań i pomiarów. Ogólny przewodnik dotyczący pomiarów harmoniczných i interharmoniczných oraz przyrząd-

dów pomiarowych, dla sieci zasilających i przyłączonych do nich urządzeń, Warszawa, Polska 2007.

[5] M. Marz, *Interharmonics: What They Are, Where They Come From and What They Do*. [Online]. Available: <https://ccaps.umn.edu/documents/CPE-Conferences/MIPSYCON-Papers/2016/Interharmonics.pdf>

[6] J. Arrillaga and N. R. Watson, *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons, Ltd, 2003.

[7] R. Polikar, *The Wavelet Tutorial. Part I. Fundamental Concepts & an Overview on the Wavelet Theory*. [Online]. Available: <http://web.iitd.ac.in/~sumeet/WaveletTutorial.pdf>.

[8] P. Wojtaszczyk, *A Mathematical Introduction to wavelets*. Cambridge CB2 IRP, United Kingdom: Cambridge University Press. 1997.

[9] Amara Graps, *An Introduction to Wavelets*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1995 <https://www.eecis.udel.edu/~amer/CISC651/IEEEwavelet.pdf>

[10] V. Hudym, "Technical Means for Lowering the Harmonics Power in Electric Power Supply Systems, *Technical Elektrodynamics*, No 3, cc.67-72, 1996

[11]. V. Hudym, V. Kosovska, A. Drval, V. Chuhra, "Method for determining harmonic coefficients and voltage deviation in single-phase electrical networks". *Pat. UA for utility model No 132863*, Bull. 5, 2019.

[12]. U. Ashimov, D. Satvaldiev, Yu. Chernov, "Six-electrode unit of ore thermal furnace with round bath", *A.S. USSR 1702544*, Bull. 48a, 1991.