УДК 621.316.13: 621.316.95

О.С. Кобозєв, О.Г. Середа, В.В. Моргун

ВИЗНАЧЕННЯ ДІЮЧИХ ЗНАЧЕНЬ ПЕРІОДИЧНОГО НЕСИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ І ЙОГО НЕПАРНИХ ГАРМОНІК ЗА ДИСКРЕТНИМИ ЗНАЧЕННЯМИ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ СТРУМУ У ЧАСІ

Розглядається можливість визначення параметрів електричних кіл, зокрема, гармонійної характеристики струму чотирьох дротяної електромережі 0,4 кВ з нелінійними видами навантажень, шляхом множення залежностей струму від часу на гратчасту дельта-функцію з різними інтервалами дискретизації.

Рассмотрена возможность определения параметров электрических цепей, в частности, гармонической характеристики тока четырех проводной электросети 0,4 кВ с нелинейными видами нагрузок, путем умножения зависимостей тока во времени на решетчатую дельта-функцию с разными интервалами дискретизации.

Необхідність визначення як кількості гармонійних складових струму, так і їх діючих значень, обумовлена тим, що при використанні мікропроцесорної техніки для побудови нових видів струмових захистів все ширше використовують комплексні критерії спрацьовування цих захистів, які поєднують не один, а декілька параметрів електричного кола, що захищається. Так, наприклад, при реалізації технічного рішення [1] захисту від струмів віддалених коротких замикань, критерій спрацьовування є комплексним, в який, окрім величини I струму електричного кола, що захищається, додані також значення коефіцієнта потужності кола cosφ та вид струму збурення – дво або трифазний. При реалізації захисту від можливих перенапруг у однофазних споживачів у разі обриву нульового дроту (N-дроту) і надмірної несиметрії фазних струмів $I_ф$ [2], в якості критерію спрацьовування використовують наступні параметри електричного кола: фактична величина струму в N-дроті I_0, яка визначається з миттєвих значень фазних струмів; очікувана величина струму в N–дроті I'_0, що визначається за значеннями несиметрії фазних струмів; значення струмів в аварійній частині електричного кола тощо.

У запропонованому технічному рішенні [2] захисту від можливих перенапруг у разі обриву N-дроту факт його обриву визначався шляхом порівняння фактичного значення струму в N-дроті I_0 та очікуваного значення I'_0, яке визначається як геометрична сума фазних струмів $I_ф$. Такий підхід справедливий по відношенню до електричних кіл з лінійним навантаженням, коли характер струму мало відрізняється від синусоїдального, а значить в ньому немає інших значимих за величиною гармонік струму, окрім першої. У таких електричних колах фактичне значення I_0 струму в N-дроті, дійсно, залежить тільки від величини несиметрії фазних струмів $I_ф$, а величина I'_0 визначається геометричною сумою фазних струмів $I_ф$.

Проте, в електричних колах з нелінійним навантаженням за наявності у фазних струмах $I_ф$, окрім першої, інших непарних гармонік фактична величина струму в N-дроті буде визначатися не лише несиметрією фазних струмів, а й величинами струмів третьої гармоніки в фазах. У загальному випадку струм в N-дроті при нелінійних навантаженнях дорівнюватиме геометричній сумі усіх непарних гармонік струму, не кратних 3, а також арифметичній сумі струмів третьої гармоніки і інших, кратних 3.

Таким чином, для побудови таких захистів електричних кіл 0,4 кВ з N-дротом, як захист від обриву N-дроту, що призводить до можливих перенапруг у однофазних споживачів, необхідно безперервно здійснювати моніторинг гармонійного складу фазних струмів. При цьому слід враховувати, що вказані захисти повинні встановлюватися не в тих апаратах, які захищають конкретні навантаження, у тому числі й нелінійні (напівпровідникові перетворювачі), а у ввідних апаратах, через які протікають струми, створені як лінійним, так і нелінійним навантаженням. При цьому, кількість значущих за величиною гармонік струму через ввідний захисний апарат не може бути великою. Як правило, у фазних струмах $I_ф$ значимими за величиною являються лише перші 3 непарні гармоніки, а саме – 1, 3 та 5-та гармоніки.

Тому для побудови вказаних захистів вважається надмірним використання універсального способу визначення великої кількості вищих гармонік, яким, наприклад, є дискретне перетворення Фур'є [3]. При використанні дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) безперервна залежність струму у часі $i_ф=f(t)=i_ф(t)$ шляхом множення її на гратчасту дельта-функцію (**δ**-функцію) перетворюється в дискретну функцію, за дискретними значеннями i_j якої можливо визначити величину й фазу кожної гармоніки струму. Проте, для розрахунку величин струму будь якої з гармонік потрібно виконати досить велику кількість математичних операцій множення, складання, зведення в квадрат тощо. Головною причиною необхідності проведення великого обсягу математичних операцій при використанні ДПФ є те, що для визначення величини однієї з гармонік струму вимагається провести розрахунок усього ДПФ, тобто усіх гармонік спектру.

Таким чином розроблені альтернативні методи дискретного розкладання в ряди Фур'є, які дозволяють визначати фіксовані гармоніки без визначення усього спектру. Одним з таких альтернативних методів є алгоритм Герцеля [4]. Це спеціальна реалізація ДПФ у формі рекурсивного фільтра з нескінченною імпульсною характеристикою. У відмінність від швидкого перетворення Фур'є, що обчислює всі частотні компоненти, алгоритм Герцеля дозволяє ефективно обчислити значення однієї частотної компоненти. Тому при його використанні спрощується розрахунок спектру гармонік та помітно зменшується кількість необхідних математичних операцій.

Проте й широко відомий метод швидкого ДПФ, і альтернативний алгоритм Герцеля, для вирішення окремих завдань є досить витратними за ресурсом для тих мікропроцесорних пристроїв, для яких визначення перших трьох гармонік є не самоціллю, а лише елементом побудови алгоритму захисту електричного кола від тих аварійних ситуацій, які впливають на спектральну характеристику кола. Тому вважається доцільним для вирішення окремих випадків визначення діючих значень перших трьох непарних гармонік струму знайти простіший спосіб, який вимагає меншої кількості математичних операцій, а значить меншого ресурсу мікропроцесора.

Найбільш близьким по суті математичних операцій, які використовуються для визначення спектру перших трьох, нижчих, гармонік струму являється спосіб визначення діючого значення сигналу відповідно до відомої теореми Котельникова [5] і спосіб визначення діючого значення несинусоїдального струму відповідно до регламентації держстандарту з якості електроенергії [6].

Згідно теореми Котельникова, якщо безперервний сигнал $i_ф(t)$ має спектр, в якому є $\boldsymbol{n}$ вищих гармонік, обмежений частотою f_k, то він може бути однозначно і без втрат відновлений за своїми дискретними відліками $i_j = f(\Delta t_k)$, узятими в діапазоні $0<\Delta t_k<1/(2f_k)$.

Теорему Котельникова можна сформулювати і зворотнім чином. Щоб за дискретними значеннями відновити сигнал на прийомі без втрат (без втрат визначити його діюче значення), необхідно частоту дискретизації $f_д$ вибирати строго більшою подвоєної максимальної частоти спектру, тобто більшою за подвоєну частоту f_k, k-ї, найбільш високої гармоніки: $f_д > 2f_k$.

Вимога ж держстандарту з якості електроенергії в частині величини необхідної частоти дискретизації жорсткіша – частота дискретизації $f_д$ має бути, як мінімум, в 3 рази більшою за частоту f_k, k-ї, найбільш високої гармоніки струму:

$$f_д \geq 3 f_k \,. \tag{1}$$

Вказана розбіжність у вимогах до частоти дискретизації $f_д$ пояснюється наступним. Теорема Котельникова розглядає теоретичну можливість (ідеальний випадок) відновлення початкового сигналу за його дискретними значеннями, коли сигнал почався нескінченно давно і ніколи не закінчиться, а також не має в часовій характеристиці точок розриву. Саме це має на увазі поняття "спектр, обмежений частотою f_k". Це означає, що для визначення діючого значення сигналу період інтегрування квадратів дискретних значень може виявитись неприпустимо великим. Зрозуміло, що в реальних випадках вказаний діапазон інтегрування має бути мінімізований. Так, наприклад, якщо в якості сигналу мати аналогову залежність зміни в часі несинусоїдального фазного струму $i_ф=f(t)$, то максимальним діапазоном інтегрування буде період зміни струму першої основної гармоніки T_1. Для такого, порівняно невеликого інтервалу інтегрування, вимоги до частоти дискретизації мають бути жорсткішими, що й відображено в держстандарті [6].

З урахуванням вищевикладеного теоретичного підґрунтя, найбільш близьким по суті математичних операцій, які використовуються для визначення спектру перших трьох, нижчих, гармонік струму, є спосіб визначення діючого значення струму, що регламентується держстандартом [6]. Згідно з цим способом визначення діючого значення несинусоїдального струму необхідно робити методом чисельного інтегрування квадратів миттєвих значень струму за період часу, не менший за час одного періоду зміни струму першої основної гармоніки. При цьому мінімальна необхідна кількість таких миттєвих значень струму синусоїди найвищої k-ї гармоніки з частотою, що дорівнює $k \cdot f_1$, має бути не менше трьох за її період, де f_1 – частота першої гармоніки.

Тобто співвідношення частоти дискретизації $f_д$ вимірювань миттєвих значень струму з частотою найбільш високої k-ї гармоніки визначається як:

$$f_д \geq 3k \cdot f_1 \,. \tag{2}$$

Для реалізації чисельного інтегрування необхідно безперервну функцію залежності струму від часу $i_ф=f(t)$ перетворити в дискретну, причому з визначеною частотою дискретизації. Для цього здійснюють множення залежності $i_ф=f(t)$ на гратчасту **δ**-функцію $\delta(t)$, вираз якої має наступний вигляд:

$$\delta(t) = \delta(t - n\Delta t_n), \tag{3}$$

де Δt_n – часовий інтервал дискретизації **δ**-функції; n – кількість часових інтервалів Δt_n в періоді зміни струму першої гармоніки T_1.

На рис. 1 наведені діаграми, що ілюструють суть множення аналогової залежності струму від часу $i_ф=f(t)$ на гратчасту **δ**-функцію $\delta(t-n\Delta t_n)$:

$$i_{фд} = i_ф(t) \cdot \delta(t - n\Delta t_n). \tag{4}$$

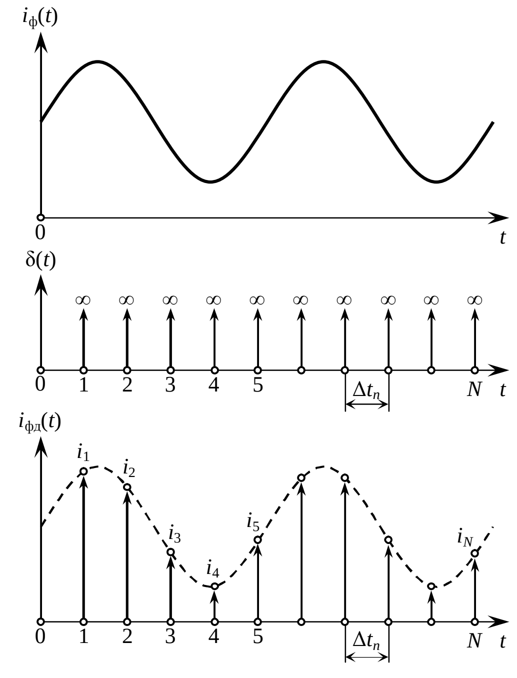


Рис. 1. Перетворення безперервної функції в дискретну

Діюче значення несинусоїдального струму визначається методом чисельного інтегрування квадратів тих миттєвих значень струму, які відповідають дискретним значенням результату множення залежності зміни струму в часі $i_ф=f(t)$ на гратчасту **δ**-функцію $\delta(t-n\Delta t_n)$. Як видно з рис. 1, геометричною інтерпретацією множення залежності $i_ф=f(t)$ на функцію $\delta(t-n\Delta t_n)$ є визначення крапок перетину часових відліків **δ**-функції з кривої залежності $i_ф=f(t)$. Сукупність вказаних крапок перетину є дискретною залежністю струму від часу $i_{фд}=f(t)$. Саме за цими дискретними значеннями струму i_j методом чисельного інтегрування квадратів означених значень визначають діючі значення струму у фазах $I_ф$ та діючі значення струмів складових гармонік $I_{фn}$:

$$I_{ф} = \sum_{j=1}^{N} i_j^2 \Delta t_n \,. \tag{5}$$

Чисельне інтегрування здійснюють в діапазоні часу від 0 до значення, що дорівнює періоду зміни струму першої гармоніки T_1.

Щоб задовольнити вимогу (1) з частоти дискретизації, значення часового інтервалу дискретизації гратчастої **δ**-функції вибирають за умови:

$$\Delta t_n \le \frac{1}{3} T_n \,, \tag{6}$$

де T_n – період зміни струму n-ї гармоніки.

Розглянутий спосіб дозволяє з необхідною точністю обчислити діюче значення струму при врахуванні в ньому визначеної кількості n вищих гармонік струму. При цьому необхідна точність урахування усіх n гармонік забезпечується за рахунок того, що при перетворенні безперервної залежності фазного струму від часу $i_ф=f(t)$ в дискретну, вказана залежність множиться на гратчасту **δ**-функцію зі значенням інтервалу дискретизації $\Delta t_n=\Delta t_k$, як мінімум, у тричі меншим, ніж період найбільш високої k-ї гармоніки.

Проте розглянутий спосіб визначення діючого значення струму не дозволяє визначати величину кожної з n гармонік, сума яких і формує початкову залежність в часі несинусоїдального фазного струму.

Таким чином поставлена задача розробити такий спосіб визначення діючого значення $I_ф$ несинусоїдального фазного струму $i_ф=f(t)$, який за рахунок вибору додаткових значень часового інтервалу дискретизації гратчастої **δ**-функцію, дозволяє:

- визначити не лише діюче значення суми усіх гармонік струму, але й діючі значення I_n струмів кожної з n гармонік;
- істотно знизити необхідну кількість математичних операцій для визначення діючих значень струмів перших трьох непарних гармонік, величини яких в електромережах 0,4 кВ є найбільш значущими.

Поставлена задача реалізується шляхом множення залежностей струму в часі на гратчасту **δ**-функцію з різними інтервалами дискретизації. Діюче значення несинусоїдального фазного струму $I_ф$ визначають з (5), за періоду зміни струму першої гармоніки T_1, за миттєвими значеннями струму i_j (рис. 1), які відповідають дискретним значенням результату множення залежності зміни струму в часі $i_ф=f(t)$ на гратчасту **δ**-функцію $\delta(t–k\Delta t_k)$, де інтервал дискретизації Δt_k в 3 і більше разів менший за період T_k зміни найвищої k-ї непарної гармоніки струму $3\Delta t_k<T_k$. Додатково здійснюють множення залежності $i_ф=f(t)$ на гратчасту **δ**-функцію $\delta(t–n\Delta t_n)$. При цьому інтервал дискретизації Δt_n в 2 рази менший за період зміни струму n-ї гармоніки, де $n=k$, $k–2$, $k–4$, 1 – номер непарної гармоніки. Після чого методом чисельного інтегрування квадратів тих миттєвих значень струму, які відповідають дискретним значенням результату множення залежності зміни струму в часі $i_ф=f(t)$ на гратчасту **δ**-функцію $\delta(t–k\Delta t_k)$, визначають діюче значення струму без урахування найбільшої k-ї гармоніки, тобто струму $I_{ф(k-2)}$, в якому найвищою буде $k–2$ гармоніка.

Діюче значення I_k струму k-ї гармоніки:

$$I_k = \sqrt{I_{ф}^2 - I_{ф(k-2)}^2} \,. \tag{7}$$

Для визначення діючого значення наступної, більше низької, $(k–2)$-ї гармоніки струму $I_ф$, здійснюють множення залежності в часі струму k-ї гармоніки $i_k=f(t)=I_{km}\sin(k\omega t)$, на гратчасту функцію $\delta(t–[k–2]\Delta t_{k-2})$. Отримані дискретні значення $i_{jk}=I_{km}\sin(jk\omega\Delta t_{k-2})$ струму k-ї гармоніки віднімають з миттєвих значень струму $i_{jф(k-2)}$, які відповідають дискретним значенням результату множення залежності зміни струму у часі $i_ф=f(t)$ на гратчасту функцію $\delta(t–[k–2]\Delta t_{k-2})$. Потім отримані миттєві значення струму $i_{j(k-4)}=i_{j(k-2)} – i_{jk}$ зводять в квадрат і методом їх чисельного інтегрування отримують діюче значення струму $I_{ф(k-4)}$, в якому найвищою є $(k–4)$ гармоніка, після чого визначають діюче значення струму $(k–2)$-ї гармоніки $I_{k–2}$ як:

$$I_{k-2} = \sqrt{I_{ф}^2 - I_k^2 - I_{ф(k-4)}^2} \,. \tag{8}$$

Аналогічним методом визначають діюче значення наступних, нижчих гармонік з виразу:

$$I_n = \sqrt{I_{ф}^2 - \sum_{p=n+1}^{k} I_p^2 - I_{ф(n-1)}^2} \,. \tag{9}$$

Саме за рахунок вибору додаткового інтервалу дискретизації забезпечується визначення не лише діючого значення суми усіх гармонік струму $I_ф$, але і діючих значень струмів I_n кожної з n гармонік.

Дійсно, адже визначення діючих значень I_n кожної з n гармонік за рахунок вибору інтервалу дискретизації Δt_n, що дорівнює половині періоду зміни струму шуканої n-ї гармоніки, засновано на теоремі Котельникова, а точніше на її наслідках [5]:

1. Будь-який аналоговий сигнал може бути відновлений з якою завгодно точністю за своїми дискретними відліками, узятими із частотою $f_д>2f_k$, де f_k максимальна частота, якою обмежений спектр реального сигналу;

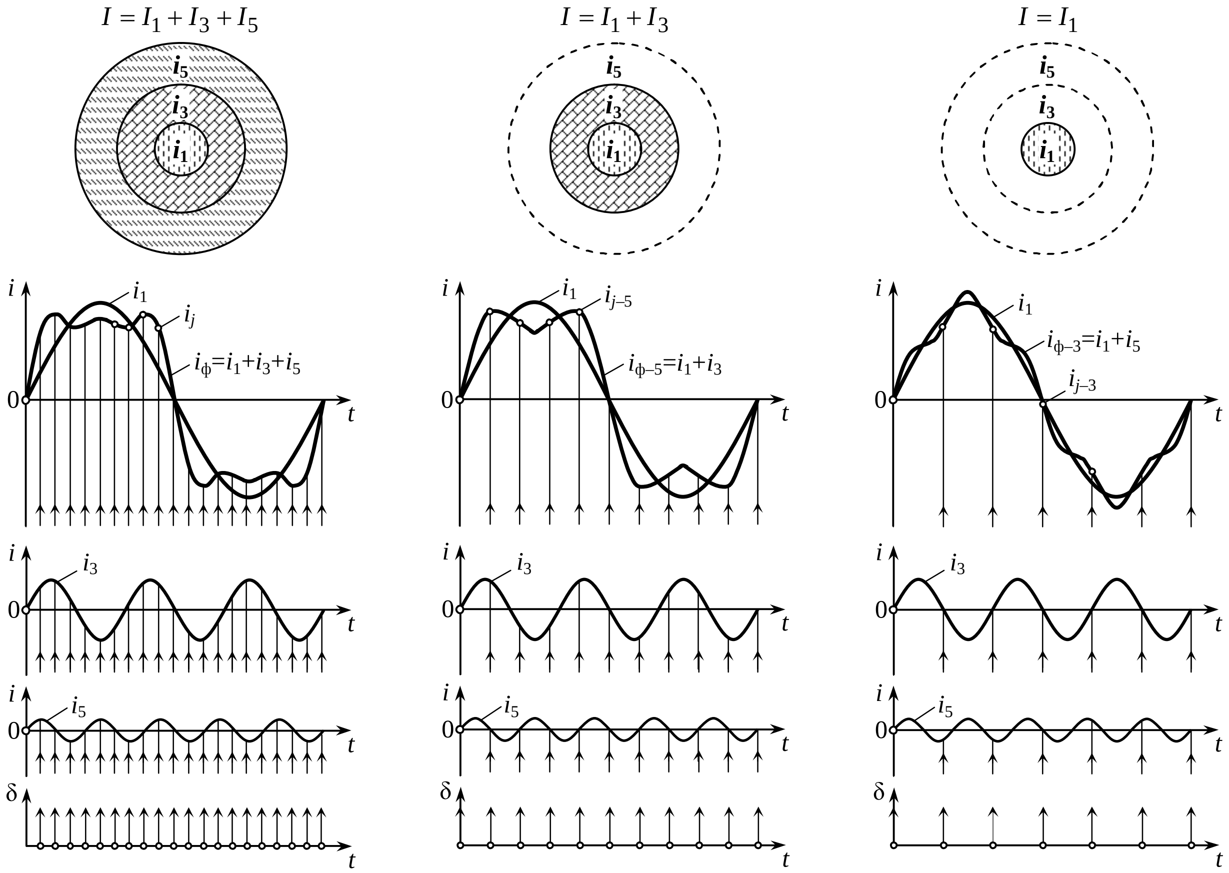
2. Якщо максимальна частота в сигналі перевищує половину частоти дискретизації $0{,}5f_д<f_k$, то способу відновити сигнал з дискретного в аналоговий без спотворення не існує.

До вказаних двох наслідків з теореми Котельникова додамо третій наслідок, який сформулюємо так:

3. Якщо максимальна частота f_k в сигналі $i_ф=f(t)$ дорівнює половині частоти дискретизації $f_д$, тобто $f_д=2f_k$, а початок відліку відповідає дискретному значенню, що дорівнює нулю, то спотворення аналогового сигналу при відновленні з дискретного дорівнюватиме величині найбільш високої k-ї гармоніки.

Таким чином, при одночасному використанні першого і третього наслідків теореми Котельникова досить просто можна визначити величину найвищою гармоніки, а потім і більш низьких. Якщо під сигналом розуміти залежність струму електричного кола в часі $i_ф=f(t)$, то одночасне використання означених наслідків з теореми Котельникова полягає в тому, що аналогова залежність $i_ф=f(t)$ множиться на гратчасті **δ**-функції як з частотами дискретизації $f_д$ більшими, ніж подвоєна частота найбільшої гармоніки струму f_k ($f_д>2f_k$), так і з частотою дискретизації, що дорівнює подвійній частоті тієї ж гармоніки ($f_д=2f_k$).

На рис. 2 наведені діаграми, що ілюструють суть визначення гармонічного спектру несинусоїдального фазного струму, шляхом множення безперервної залежності струму в часі $i_ф=f(t)$ на гратчасту **δ**-функцію з частотою дискретизації $f_д$, що дорівнює подвійній частоті шуканої гармоніки f_n ($f_д=2f_n$), або, що те ж саме, з різними інтервалами дискретизації Δt_n.



а – $3\Delta t_k<T_5$ *б* – $\Delta t_n=\Delta t_5=0{,}5T_5$ *в* – $\Delta t_n=\Delta t_3=0{,}5T_3$

Рис. 2. Обгрунтування вибору додаткового інтервалу дискретизації

Якщо точки перетину часових відліків **δ**-функції з кривою залежності струму *n*-ї гармоніки завжди припадатимуть на момент проходження струму через нуль (коли $f_д=2f_n$), то значення струму цієї гармоніки i_{jn} не буде враховано при обчисленні діючого значення фазного струму $I_ф$. Це дозволяє шляхом послідовного виключення струму i_{jn} кожної *n* гармоніки при обчисленні сумарного діючого значення струму у фазі $I_ф$ визначити значення струму кожної гармоніки.

На фіг. 2,*а* наведені залежності в часі струмів 1, 3 та 5-ї гармонік, а також залежність від часу фазного струму $i_ф=f(t)$, що є сумою залежностей від часу усіх гармонік фазних струмів. Гратчаста **δ**-функція, на яку множаться часові залежності $i_1=f(t)$, $i_3=f(t)$, $i_5=f(t)$, має інтервал дискретизації $\Delta t_n=\Delta t_k$, щонайменш втричі менший періоду найбільш високої 5-ї гармоніки струму (частота $f_д>3f_5$). При такому інтервалі дискретизації гратчастої **δ**-функції ($3\Delta t_k<T_5$) діючі значення усіх гармонік струму $I_ф$ визначають без спотворень, з урахуванням значення струму 5-ї гармоніки I_5. Для наочності на рис. 2,*а* фазний струм $I_ф$ представлено у вигляді коаксіальних трубок, перерізи яких відповідають величинам струмів різних гармонік, а переріз провідника відповідає величині фазного струму $I_ф$.

Математична залежність, що пов'язує величину фазного струму $I_ф$ та величини струмів 1, 3 та 5-ї гармоніки, визначається виразом:

$$I_ф = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2}\ . \tag{10}$$

На рис. 2,*б*, як і на рис. 2,*а*, наведені криві залежностей від часу струмів 1, 3 та 5-ї гармоніки струму. Але гратчаста **δ**-функція, на яку множаться залежності $i_1=f(t)$, $i_3=f(t)$, $i_5=f(t)$, має інтервал дискретизації Δt_n, що дорівнює половині періоду найвищої, 5-ї гармоніки струму $\Delta t_n=\Delta t_5=0{,}5T_5$ (частота $f_д=2f_5$). В цьому випадку точки перетину часових відліків **δ**-функції із залежністю струму 5-ї гармоніки в часі $i_5=f(t)$ завжди відповідатимуть моменту переходу струму цієї гармоніки через нуль, тобто ця гармоніка струму не буде врахована. Тому, при інтервалі дискретизації **δ**-функції Δt_5, що дорівнює половині періоду зміни струму 5-ї гармоніки, знайдене діюче значення струму у фазі $I_{ф\text{-}5}$ складатиметься тільки з двох гармонік – 1 та 3-ї, а 5-ї гармоніки в ньому не буде. Тому на рис. 2,*б* в перерізі провідника показані тільки дві коаксіальні трубки зі струмами 1-ї та 3-ї гармоніки – I_1 та I_3.

Математична залежність, що пов'язує величину струму $I_{ф\text{-}5}$ із величинами струмів 1 та 3-ї гармоніки, визначається виразом:

$$I_{ф\text{-}5} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2}\ . \tag{11}$$

З урахуванням виразів (10) та (11) величина струму 5-ї гармоніки визначається як:

$$I_5 = \sqrt{I_ф^2 - I_{ф-5}^2}\ . \tag{12}$$

На рис. 2,*в* наведені криві залежностей від часу струмів 1, 3 та 5-ї гармоніки струму. Але гратчаста **δ**-функція, на яку множаться залежності $i_1=f(t)$, $i_3=f(t)$, $i_5=f(t)$, має інтервал дискретизації Δt_n, що дорівнює половині періоду 3-ї гармоніки струму $\Delta t_n=\Delta t_3=0{,}5T_3$ (частота $f_д=2f_3$). В цьому випадку точки перетину часових відліків **δ**-функції із залежністю в часі струму 3-ї гармоніки $i_3=f(t)$ завжди відповідатимуть моменту переходу струму цієї гармоніки через нуль, тобто при обчисленні діючого значення фазного струму 3-я гармоніка струму не буде врахована. Тому знайдене значення фазного струму позначимо як $I_{ф\text{-}3}$. Проте часові відліки **δ**-функції з інтервалом дискретизації Δt_3 перетинатимуть залежність струму 5-ї гармоніки від часу $i_5=f(t)$ в моменти часу, коли миттєві значення струму цієї гармоніки i_{j5} не дорівнюватимуть нулю. Тому, щоб запобігти впливу струму 5-ї гармоніки при визначенні 3-ї гармоніки, зі значень струму, що відповідають точкам перетину дискретних відліків із залежністю струму $i_ф=f(t)$, віднімають відповідні значення $i_{j5}=I_{5m}\sin(j5\omega\Delta t_3)$. В цьому випадку знайдене діюче значення струму у фазі, яке позначимо як $I_{ф\text{-}3\text{-}5}$, складатиметься тільки зі струму 1-ї гармоніки: $I_{ф\text{-}3\text{-}5}= I_1$.

Величину струму 3-ї гармоніки I_3 визначають як:

$$I_3 = \sqrt{I_ф^2 - I_5^2 - I_1^2}\,. \qquad (13)$$

Блок-схема, що ілюструє алгоритм роботи мікропроцесорного розчеплювача автоматичного вимикача, або іншого мікропроцесорного пристрою захисту (ПЗМ), при визначенні діючих значень періодичного несинусоїдального струму і його непарних гармонік шляхом множення залежностей струму в часі на гратчасту дельта-функцію з різними інтервалами дискретизації, наведена на рис. 3.

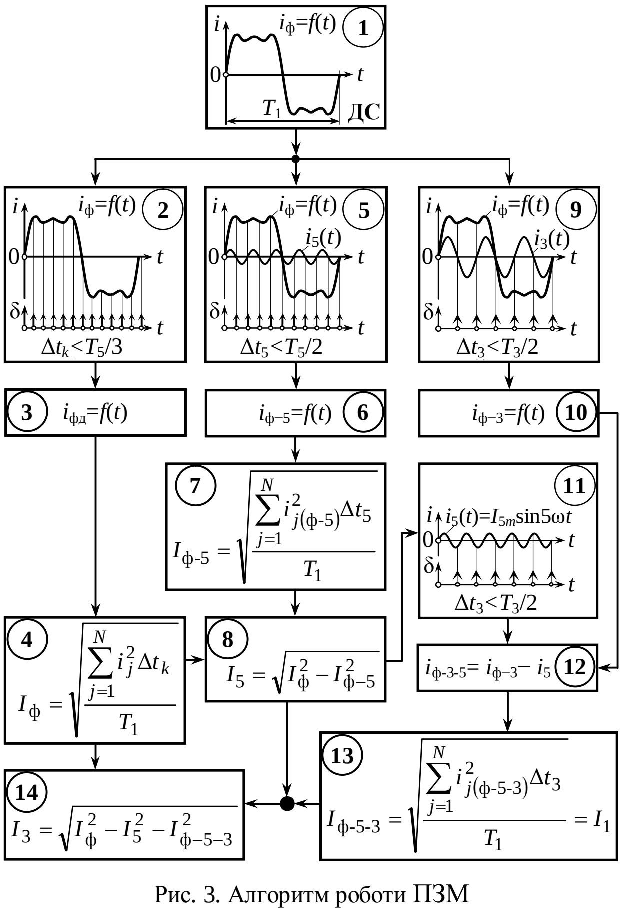


Рис. 3. Алгоритм роботи ПЗМ

Окремі обчислювальні і логічні операції на рис. 3 умовно позначені у вигляді модулів. Фізично вказані модулі не існують, їх зображення потрібне для зручності викладу функціонування ПЗМ.

Функціонує ПЗМ у такий спосіб:

1. У модулі 1 за допомогою датчиків струму (ДС) формується аналогова залежність фазного струму в часі $i_ф=f(t)$.

2. У модулі 2 здійснюють множення аналогової залежності фазного струму в часі $i_ф=f(t)$ на гратчасту **δ**-функцію $\delta(t-k\Delta t_k)$ з часовим інтервалом дискретизації Δt_k, як мінімум, втричі менший, ніж період найвищої гармоніки, величина якої є значущою. У конкретному випадку такою, значущою за величиною (більше 5% величини струму $I_ф$), прийнята 5-та гармоніка фазного струму, тому величина інтервалу дискретизації гратчастої **δ**-функції відповідає нерівності: $3\Delta t_k<T_5$.

3. У модулі 3 визначають дискретні значення i_j фазного струму $i_ф=f(t)$, як результат множення аналогового сигналу від датчика струму $i_ф=f(t)$ на гратчасту **δ**-функцію з часовим інтервалом дискретизації Δt_k.

4. У модулі 4 методом чисельного інтегрування квадратів дискретних значень i_j струму $i_{фд}=f(t)$ визначають діюче значення фазного струму $I_ф$ з виразу:

$$I_ф = \sqrt{\sum_{j=1}^{N} i_j^2 \Delta t_k \Big/ T_1}\,,$$

де $N = T_1/\Delta t_k$.

5. У модулі 5 здійснюють множення аналогової залежності фазного струму $i_ф=f(t)$ на гратчасту **δ**-функцію з часовим інтервалом дискретизації Δt_n, що дорівнює половині періоду найвищої, 5-ї гармоніки фазного струму $\Delta t_n=\Delta t_5=0{,}5T_5$.

6. У модулі 6 визначають дискретні значення $i_{j(ф\text{-}5)}$ фазного струму без урахування 5-ї гармоніки, як результат множення аналогового сигналу від датчика струму $i_ф=f(t)$ на гратчасту **δ**-функцію з часовим інтервалом дискретизації Δt_5.

7. У модулі 7 методом чисельного інтегрування квадратів дискретних значень $i_{ф\text{-}5}=f(t)$ визначають діюче значення фазного струму $I_{ф\text{-}5}$ без урахування 5-ї гармоніки:

$$I_{ф\text{-}5} = \sqrt{\sum_{j=1}^{N} i_{j(ф\text{-}5)}^2 \Delta t_5 \Big/ T_1}\,,$$

де $N = T_1/\Delta t_5$.

8. У модулі 8 визначають діюче значення струму 5-ї гармоніки з виразу $I_5 = \sqrt{I_ф^2 - I_{ф-5}^2}$.

9. У модулі 9 здійснюють множення аналогової залежності фазного від часу $i_ф=f(t)$ на гратчасту **δ**-функцію з часовим інтервалом дискретизації Δt_n, що дорівнює половині періоду 3-ї гармоніки фазного струму $\Delta t_n=\Delta t_3=0{,}5T_3$.

10. У модулі 10 визначають дискретні значення $i_{j(ф\text{-}3)}$ фазного струму без урахування 3-ї гармоніки, як результат множення аналогового сигналу від датчика струму $i_ф=f(t)$ на гратчасту **δ**-функцію з часовим інтервалом дискретизації Δt_3.

11. У модулі 11 визначають дискретні значення i_{j5} залежності струму 5-ї гармоніки від часу $i_5=f(t)$, як результат множення аналогової залежності струму цієї гармоніки від часу $i_5=I_{5m}\sin(5\omega t)$ на гратчасту **δ**-функцію з часовим інтервалом дискретизації Δt_3.

12. У модулі 12 визначають дискретні значення $i_{j(ф\text{-}3\text{-}5)}$ фазного струму без урахування 5-ї та 3-ї гармоніки, як різницю дискретних значень фазного струму без урахування 3-ї гармоніки $i_{j(ф\text{-}3)}$, що отримується з модуля 10, та дискретних значень струму 5-ї гармоніки, що отримується з модуля 11: $i_{j(ф\text{-}3\text{-}5)}=i_{j(ф\text{-}3)} - i_{j5}$.

13. У модулі 13 визначають діюче значення фаз-

ного струму без урахування струмів 3-ї та 5-ї гармонік, яке дорівнює діючому значенню струму першої гармоніки:

$$I_{\text{ф-5-3}} = \sqrt{\sum_{j=1}^{N} i^2_{j(\text{ф-5-3})} \Delta t_3 \bigg/ T_1} = I_1 ,$$

де $N = T_1/\Delta t_3$.

14. У модулі 14 визначають діюче значення струм 3-ї гармоніки з виразу $I_3 = \sqrt{I^2_{\text{ф}} - I^2_5 - I^2_{\text{ф}-5-3}}$.

Наведена блок-схема роботи мікропроцесорного пристрою при визначенні діючих значень як повного несинусоїдального струму у фазі $I_{\text{ф}}$, так і перших трьох непарних гармонік (1, 3 та 5-ї) дозволяє визначити необхідну для цього кількість математичних операцій. Так, якщо припустити, що дискретні значення фазного струму відомі, то кількість необхідних математичних операцій можна оцінювати тільки по операціях саме з цими вже відомими дискретними значеннями i_j фазного струму $i_{\text{ф}}=f(t)$. Якщо прийняти, що для надійного визначення перших трьох непарних гармонік струму, включаючи 5-ту, часовий інтервал дискретизації вибрати таким, що дорівнює 1/3 періоду 5-ї гармоніки, то кількість необхідних математичних операцій визначення гармонічного спектру фазного струму становить – 61.

При використанні дискретного перетворення Фур'є, для визначення спектру перших трьох непарних гармонік (1, 3 та 5-ї), необхідно для кожної з гармонік взяти мінімум 30 відомих дискретних значень i_j фазного струму. Як показує аналіз, для цього необхідно зробити 453 різних математичних операції (складання, віднімання, зведення в квадрат, добування кореня тощо), що, приблизно, в 7,5 разів більше, ніж в заявленому способі (61 операція).

При використанні алгоритму Герцеля, який є одним з альтернативних методів розкладання в ряди Фур'є у формі рекурсивного фільтра з нескінченною імпульсною характеристикою, кількість математичних операцій для знаходження значення однієї гармоніки виходить значно меншою. Як показує аналіз, для розрахунку величини однієї гармоніки потрібно 71 операцію, а для трьох гармонік (1, 3 і 5) – 273 операції, що в 4,8 раз більше, ніж в заявленому способі.

З приведених вище результатів порівняльного аналізу витікає, що при використанні запропонованого способу визначення діючих значень періодичного несинусоїдального струму і його непарних гармонік шляхом множення залежностей струму від часу на гратчасту дельта-функцію з різними інтервалами дискретизації кількість необхідних для цього математичних операцій виходить значно меншою.

Таким чином, поставлене завдання визначення діючих значень не тільки повного несинусоїдального струму, як того потребує ГОСТ 13109-97 [6], а і його перших трьох непарних гармонік, виконано. Також істотно знижена необхідна для цього кількість математичних операцій, порівняно з існуючими методами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Пат. 81981 України МПК Н 02 Н 7/00, Н 01 Н 73/00 Система захисту розгалужених трифазних електричних кіл від струмів віддалених коротких замикань / Г.М. Гапоненко, В.В. Омельченко, О.С. Кобозєв. – №а200604596. Заявлено 25.04.2006; Опубл. 25.02.2008, Бюл. №4.
2. Сосков А.Г, Кобозев А.С. Модернизация системы защиты городских электрических сетей 0,4 кВ за счет использования микропроцессорной техники в расцепителях выключателей / Світлотехніка та електроенергетика. – 2010. – №2. – С. 53-63.
3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 751 с.
4. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 448 с.
5. Басараб М.А., Зелкин Е.Г., Кравченко В.Ф., Яковлев В.П. Цифровая обработка сигналов на основе теоремы Уиттекера-Котельникова-Шеннона. – М.: Радиотехника, 2004. – 72 с.
6. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Bibliography (transliterated): *1.* Pat. 81981 Ukraïni MPK H 02 H 7/00, H 01 H 73/00 Sistema zahistu rozgaluzhenih trifaznih elektrichnih kil vid strumiv viddalenih korotkih zamikan' / G.M. Gaponenko, V.V. Omel'chenko, O.S. Kobozєv. - №a200604596. Zayavleno 25.04.2006; Opubl. 25.02.2008, Byul. №4. *2.* Soskov A.G, Kobozev A.S. Modernizaciya sistemy zaschity gorodskih `elektricheskih setej 0,4 kV za schet ispol'zovaniya mikroprocessornoj tehniki v rascepitelyah vyklyuchatelej / Svitlotehnika ta elektroenergetika. - 2010. - №2. - S. 53-63. *3.* Sergienko A.B. Cifrovaya obrabotka signalov: Uchebnik dlya vuzov. 2-e izd. - SPb.: Piter, 2006. - 751 s. *4.* Blejhut R. Bystrye algoritmy cifrovoj obrabotki signalov: Per. s angl. - M.: Mir, 1989. - 448 s. *5.* Basarab M.A., Zelkin E.G., Kravchenko V.F., Yakovlev V.P. Cifrovaya obrabotka signalov na osnove teoremy Uittekera-Kotel'nikova-Shennona. - M.: Radiotehnika, 2004. - 72 s. *6.* GOST 13109-97. `Elektricheskaya `energiya. Sovmestimost' tehnicheskih sredstv `elektromagnitnaya. Normy kachestva `elektricheskoj `energii v sistemah `elektrosnabzheniya obschego naznacheniya.

Надійшла 12.04.2012

Кобозєв Олександр Сергійович, к.т.н.,
Середа Олександр Григорійович, к.т.н., доц.,
Моргун Вадим Віталійович
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"
кафедра "Електричні апарати"
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21
тел. (057) 7076864,
e-mail: kobozev@ua.fm, n_v_sereda@mail.ru.

Kobozev A.S., Sereda A.G., Morgun V.V.

Determination of effective values of periodic nonsinusoidal current and its odd harmonics through discrete values of continuous time dependence of the current.

The paper considers possibility of electric circuit parameters determination, in particular, the harmonic current characteristic of a 0.4 kV four-wire grid with nonlinear load, via multiplying time dependences of the current by a lattice delta-function with different quantization intervals.

Key words – **0.4 kV four-wire grid with nonlinear load, harmonic current characteristic, lattice delta-function.**