

УДК 621.313.5/8; 621.314.2

doi: 10.32782/2225-6733.43.2021.17

© Дяченко М.Д.¹, Батора М.Р.²**ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОГО ВИСОКОВОЛЬТНОГО
ВИМІРЮВАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРУ СТРУМУ З АБСОЛЮТНОЮ
ЕЛЕКТРИЧНОЮ МІЦНОЮ**

У статті пояснюються причини створення високовольтних вимірювальних трансформаторів струму, які володіли б широким динамічним діапазоном і практично абсолютною електричною міцністю. Які б відповідали високим вимогам щодо точності як для комерційного обліку електроенергії, так і для апаратури релейного захисту, а також могли бути спроможні використовуватися для різних класів напруг. Наведена спрощена методика розрахунку друкованої котушки Rogovського. Наведена концепція та алгоритм цифрової інтеграції корисного сигналу. Наведені схематичні рішення основних елементів даної конструкції. Акцентовано увагу на мінімізацію капітальних витрат при серійному виробництві запропонованого пристрою трансформатора струму.

Ключові слова: вимірювальний трансформатор струму, цифровий потік, котушка Rogovського, мережа передачі даних, цифровий потенціометр.

M.D. Dyachenko, M.R. Batora. Basic principles of creating a digital high-voltage measuring current transformer with absolute electrical strength. The article describes the prerequisites for the creation a high-voltage measuring current transformers with near-absolute electric strength and wide dynamic range that can provide precision requirements for both commercial metering of electricity and relay protection equipment and can be used for any voltage classes. The necessity for developing small-sized digital current transformers of wide range of measurable currents with absolute electric strength and low price, which would allow them to be used for any voltage class operating in a wide range of measurable currents has been justified. The article reviews the hardware implementation of such a measuring transducer. It was proposed to perform a current transformer in the form of two independent blocks, that is - a measuring block and a substation. The measuring unit is located directly on the current-carrying conductor, and the receiving substation unit is located in the immediate proximity to the measuring unit, thus assuring the electrical strength of the system. To increase the range of measured current values, adaptable instrumental amplifiers have been proposed, which, along with the double-circuit Rogowski coil and passive integrator, can be rearranged to solve a wide range of current measurement tasks. The article shows that it is expedient to separate digital streams of current measurements directly after the Rogowski coil integrator; the integrator being of the passive type. Such solution makes it possible to provide by relatively low costs the necessary signal transform parameters that satisfy the requirements of both commercial electricity metering and the relay protection equipment of substations.

Key words: current measuring transformer, digital flow, Rogowski coil, data-communication network, digital potentiometer.

Постановка проблеми. Як прийнято, для роботи з пристроями релейного захисту, а також приладами обліку та контролю використовуються трансформатори струму, принцип дії яких ґрунтується на законі електромагнітної індукції. Розробники прагнуть використовувати нестандартні засоби вимірювання, оскільки традиційні системи мають ряд недоліків.

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет, м. Маріуполь, signnet.dmd@gmail.com

² магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет, м. Маріуполь, batoranik@gmail.com

У зв'язку з особливостями конструкції традиційних трансформаторів струму, вони нерідко стають винуватцями аварій і пожеж, які завдають значної шкоди виробництву.

Протягом вже 50-ти років невпинно ведуться пошуки альтернативних пристроїв для традиційних трансформаторів струму, на сьогоднішній день найреволюційнішим досягненням є використання оптичних трансформаторів струму, однак через свою підвищену надійність і якість виміру, вони є досить дорогими пристроями, які можуть собі дозволити далеко не кожне виробництво.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У зв'язку з прагненням до переходу на застосування цифрових підстанцій, а також збільшення різновидів пристроїв релейного захисту та автоматики, з'являється велика кількість публікацій, пов'язаних з модернізацією трансформаторів струму.

Ця тенденція обумовлюється банальним застарінням технології традиційних трансформаторів струму, які через свої наявні недоліки вже не можуть повною мірою відповідати потребам сучасних електростанцій та електрообладнання.

Сучасні системи управління та автоматизації технологічних процесів вимагають постійний моніторинг та аналіз стану процесів, що протікають, а з урахуванням того, що дані системи відносяться до цифрової форми реалізації, то і для них необхідні цифрові трансформатори струму [1, 2].

Найперспективнішими вважається дослідження, спрямовані на вдосконалення оптичних трансформаторів струму, які беруть за основу ефект Фарадея. Ефектом Фарадея називається магнітооптичний ефект, який проявляється як поворот вектора поляризації світла під дією магнітного поля, що викликається струмом, що протікає у провідниках. Обертання площини поляризації світла практично лінійно залежить від інтенсивності магнітного поля.

Однак так як і оптичні трансформатори струму мають два великі недоліки, а саме: висока вартість і відсутність абсолютної електричної міцності, це мотивує дослідників на публікацію досліджень, в яких пропонується застосовувати інший спосіб контролю вимірюваних параметрів, а саме, контроль падіння напруги на опорі шунта [3].

Вартість даного рішення набагато нижче, ніж у випадку використання оптичних трансформаторів струму, а так само дозволяється досягти абсолютної електричної міцності.

Мета статті – обґрунтувати необхідність модернізації засобів вимірювання струму для широкого діапазону напруг, які б мали абсолютну електричну міцність та низьку вартість, а також передбачити пропозиції щодо апаратної реалізації.

Виклад основного матеріалу. Класичні трансформатори струму поступово витісняються трансформаторами струму оптичного типу. У порівнянні з класичними трансформаторами струму оптичні перетворювачі мають ряд незаперечних переваг. Це широкий динамічний діапазон перетворення, висока термічна та електродинамічна стійкість, чудова лінійність та відсутність явищ насичення, гістерезису та резонансу. Немаловажним фактором є і відсутність впливу навантаження вторинних ланцюгів на точність перетворення. А клас точності оптичного вимірювального комплексу взагалі недосяжний для класичних трансформаторів струму, особливо якщо йдеться про цифровий інтерфейс.

Однак застосування оптичних технологій для вирішення широкого кола завдань у різних класах напруг поки що важко з огляду на їх високу вартість. Зрозуміло, що ціна оптичних трансформаторів струму неухильно знижуватиметься, але малоймовірно, що в найближчому майбутньому вона виявиться прийнятною для широкого кола завдань, особливо в мережах середнього та низького рівнів напруг. Тому спостерігається і деяка тенденція до пошуку більш дешевих варіантів вимірювання струмів без застосування прецизійної оптомеханіки і здатних забезпечити електричну міцність для вимірювання струму в мережах будь-якого класу напруг.

Для вирішення проблеми гальванічної розв'язки з підстанційним обладнанням замість оптоволокна прийнято рішення використовувати багатоканальний ширококутовий радіоканал. Відмова від оптоволокна дозволяє відмовитися і від високовольтних ізоляторів, опор з фундаментами під них і тим самим багаторазово (на кілька порядків) скоротити капітальні витрати.

Отримати лінійний датчик струму, що має широкий динамічний діапазон та забезпечує необхідну точність перетворення як для апаратури релейного захисту, так і для комерційного обліку електроенергії, нескладно, використовуючи падіння напруги на опорі шунта. При цьому,

необхідно забезпечити корекцію вироблених вимірів, викликаних зміною температури шунта. Проте, таке рішення з погляду експлуатації не дуже вдале, оскільки вимагає включення шунта в розрив силових провідників, що значно знижує споживчі властивості таких перетворювачів.

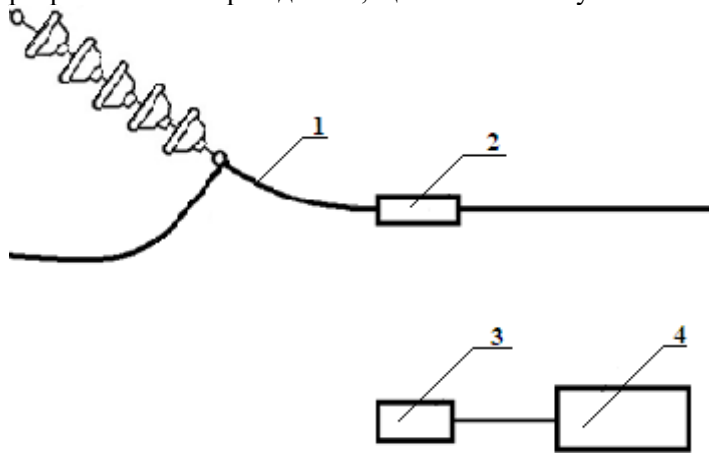


Рис. 1 – Загальна концепція запропонованого універсального цифрового трансформатора струму: 1 – струмопровідний провідник; 2 – вимірювальний блок; 3 – приймальний блок; 4 – підстанційний блок

Пояс Роговського куди кращий, особливо розрізного типу, оскільки дозволяє виключити втручання у високовольтні силові ланцюги. При використанні пояса Роговського може бути досягнутий позитивний ефект «миттєвого монтажу», коли монтаж трансформатора струму на струмопровідний провідник займає лічені хвилини.

На рис. 1 наведена загальна концепція запропонованого універсального цифрового вимірювального трансформатора струму. На рисунку показано, що вимірювальний блок 2 цифрового трансформатора струму встановлюється безпосередньо на струмопровідний провідник 1 без розриву струмопровідних ланцюгів.

Приймальний блок 3 розташований поблизу вимірювального блоку, що передає на віддаленні, достатньому для забезпечення електричної міцності. Взаємодія між блоками 2 і 3 здійснюється за допомогою широкополосного багатоканального радіо-каналу, що працює в безліцензійному діапазоні радіочастот ISM від 900 МГц до 2,4 ГГц, з'єднання типу «крапка – крапка».

Підстанційний блок 4 забезпечує узгодження з вимірювальними приладами та апаратурою релейного захисту підстанції. Таке рішення повністю виключає проблеми, пов'язані із забезпеченням необхідного рівня ізоляції. Частково про таке рішення було представлено у роботах [4, 5].

На рис. 2 показано блок-схему універсального цифрового трансформатора струму. В якості вимірювального елементу 2 в даному перетворювачі пропонується використовувати котушку Роговського двоконтурного типу.

Завдяки відсутності осердя, котушка Роговського має хорошу лінійність у широкому діапазоні струмів і позбавлена безлічі недоліків, властивих традиційним трансформаторам струму, але вихідний сигнал котушки Роговського диференційований за часом, це викликає необхідність застосовувати інтегратор для отримання відповідного значення первинного струму.

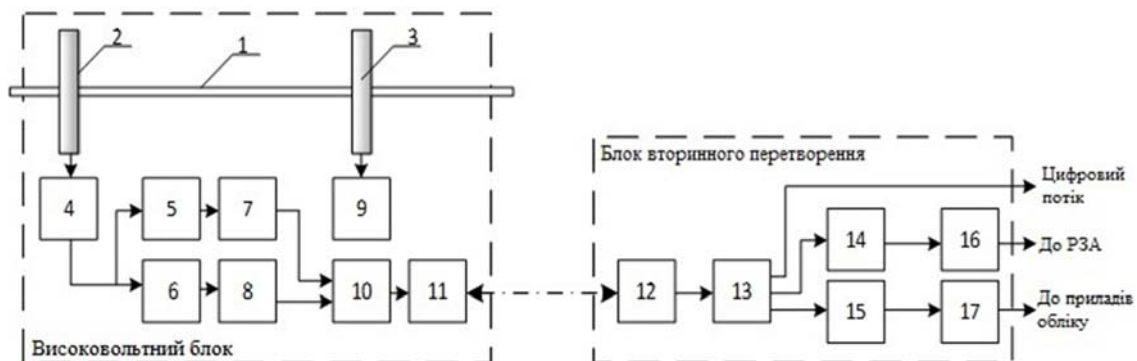


Рис. 2 – Блокова концепція універсального цифрового трансформатора струму: 1 – струмопровідний провідник; 2 – двоконтурна котушка Роговського; 3 – трансформатор струму; 4 – пасивний інтегратор; 5, 6 – керовані вимірювальні підсилювачі; 7, 8 – АЦП; 9 – блок живлення; 10, 13 – мікроконтролери; 11, 12 – модулі широкопasmового радіоканалу; 14, 15 – ЦАП; 16, 17 – підсилювачі потужності зі струмовим виходом

Як відомо, між магнітним потоком Φ і напруженістю магнітного поля H існує залежність:

$$\Phi = \iint \mu_0 \cdot H \cdot dS = \mu_0 \cdot A \cdot n \cdot \oint H dl, \quad (1)$$

де A – поперечна площа секції, n – число витків секції довжиною dl , μ_0 – магнітна проникність повітря.

Внаслідок наведеного електричного поля при зміні магнітного поля в замкнутому контурі індукується е.р.с.:

$$U_c = \frac{d\Phi}{dt} = -\mu_0 \cdot A \cdot n \cdot \frac{di}{dt}. \quad (2)$$

Напруга на виході котушки Роговського пропорційна похідній струму і для перетворення його в сигнал, придатний для подальшої обробки, необхідно зробити його інтегрування:

$$U_{out} = -\frac{1}{\tau} \cdot \int U_c dt = -\frac{\mu_0 \cdot A \cdot n}{\tau} \cdot I, \quad (3)$$

де τ – постійне інтегрування.

Для інтегрування сигналу можна використовувати пасивне, активне чи цифрове інтегрування [6]. Шляхом перебудови постійної інтегрування τ та взаємної індуктивності котушки $\mu_0 \cdot A \cdot n$ можна змінювати вихідну напругу інтегратора в широких межах, забезпечуючи тим самим широкий діапазон перекриття струмів, що вимірюються, – від десятка ампер до сотень тисяч ампер.

Виходячи з самого принципу роботи котушки Роговського, її вихідний сигнал схильний до негативного впливу зовнішніх магнітних полів. Тільки завдяки рівномірності обмотки витків на тороїдальне осердя можна досягти істотного зниження впливу зовнішнього магнітного поля, врівноважуючи його всередині котушки.

Для усунення наведень від низькочастотних зовнішніх змінних електромагнітних полів зазвичай застосовують розрізні екрани з металу з високою магнітною проникністю. Ефективним методом подавлення зовнішніх магнітних полів можна вважати застосування зворотного витка в котушці. Але, відповідно до рекомендації [7], прийнято рішення застосувати двоконтурну котушку Роговського, виконану у вигляді двох друкованих плат, що різко підвищує технологічність виробництва трансформаторів струму та багаторазово знижує вплив зовнішніх електромагнітних полів.

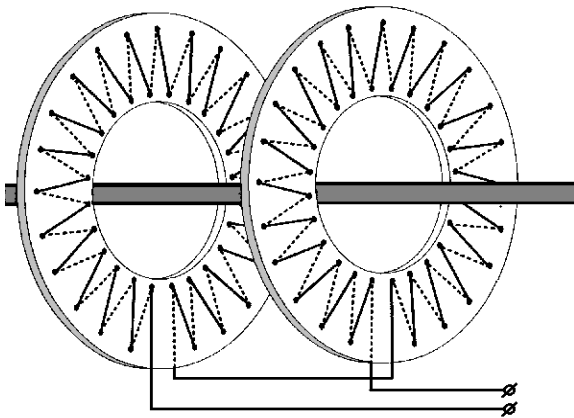


Рис. 3 – Двоконтурна друкована котушка Роговського

На рис. 3 наведено схему з'єднання двоконтурної друкарської котушки Роговського. Для безрозривної установки її на струмопровідний провідник, кожна секція виконана у вигляді двох секторів з жорсткою фіксацією їх у робочому стані.

Подальше перетворення залежить від динамічного діапазону інтегратора і розрядності АЦП. Застосування пасивного інтегратора в нашому випадку дозволяє охопити весь діапазон передбачуваних вхідних струмів для всього діапазону використовуваних класів напруг з подальшою нормалізацією сигналу за рахунок програмно адаптованих інструментальних підсилювачів.

Обмотка котушки Роговського (рис. 4) разом з інтегруючими ємностями утворює коливальний контур із загасанням, вихідна напруга якого має залежність [6]:

$$U_{out} = \int_0^t \frac{E}{(R_{coil}+R) \cdot C} dt = \frac{L_{coil}}{(R_{coil}+R) \cdot C} \cdot \frac{I_t}{N}, \quad (4)$$

де N – число витків обмотки котушки Роговського.

Як було зазначено раніше, для мінімізації витрат на апаратне забезпечення при реалізації цифрового трансформатора струму пропонується розділити канал первинного перетворення струму на два канали. Перший канал використовується для вимірювання струму в робочому діапазоні лінії електропередачі і використовується для приладів обліку, другий охоплює діапазон струмів, у сотні разів перевищуючий діапазон робочих струмів і призначений для роботи з апаратурою релейного захисту. Враховуючи те, що цільова функція даного трансформатора струму

– широкий спектр застосувань, тобто здатність працювати в широкому діапазоні первинних напруг (від 220 В до 750 кВ), то первинний номінальний струм такого трансформатора може лежати в межах від декількох ампер до десятків і сотень тисяч ампер.

Але навіть поділ діапазону вимірюваних струмів на піддіапазон не дозволять охопити настільки величезний динамічний діапазон вхідних струмів, навіть використовуючи АЦП надвисокої розрядності.

На рис. 4 наведена спрощена схема вхідного перетворювача широкодіапазонного цифрового датчика струму, на якому представлений один з варіантів вирішення даної проблеми.

У цьому рішенні використовуються інструментальні підсилювачі, що адаптуються, які спільно з двоконтурною котушкою Роговського і пасивним інтегратором можуть бути дистанційно перебудовані під рішення широкого кола завдань вимірювання струму.

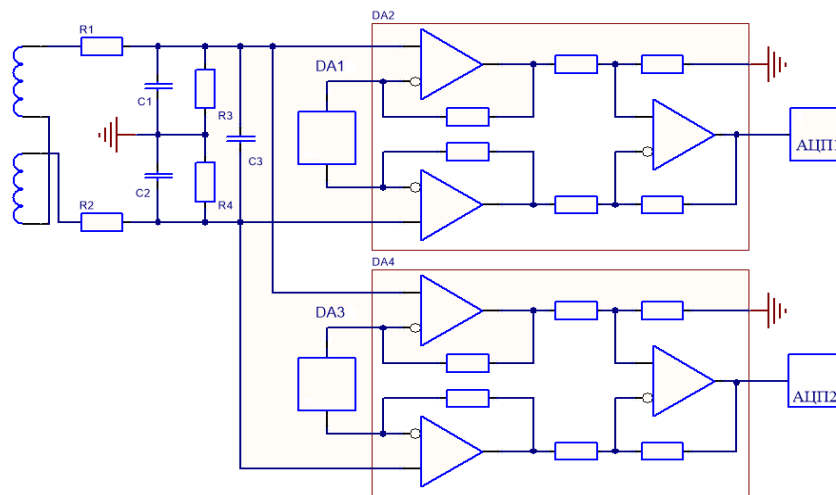


Рис. 4 – Вхідний перетворювач широкодіапазонного цифрового датчика струму

На рис. 4 представлена спрощена схема інтегратора та нормалізатора вхідного сигналу на основі інструментальних підсилювачів, що здійснюють масштабування вхідного сигналу. В якості інструментальних підсилювачів DA2, DA4 (рис. 4) застосовані мікросхеми INA188.

Мікросхема INA188 є однією з останніх розробок фірми «Texas Instruments», побудованої з використанням технології «Zero-Drift», що дозволяє отримувати надзвичайно низьку напругу зміщення нуля (менше 55 мкВ), а також малий дрейф напруги зміщення та низький рівень щільності шуму [8].

Підстроювання під заданий діапазон вимірювання струму (тобто під конкретні умови роботи) здійснюється цифровими потенціометрами [9] мікросхеми DA1, DA3 (рис. 4). Як цифровий потенціометр застосована мікросхема AD5271 фірми Analog Devices, що забезпечує 1024 градаций опорів при максимальній похибці менше 1% [10]. Зв'язок із процесором здійснюється по послідовній шині.

Вихідний сигнал кожного масштабного підсилювача обробляється своїм АЦП і після відповідного перетворення по радіоканалу передається на підстанційне обладнання. Підстанційне обладнання включає (див. рис. 2) модуль широкополосного радіоканалу 12, мікроконтролер 13, цифро-аналогові перетворювачі 14 і 15, а також підсилювачі потужності 16 і 17.

Підстанційне обладнання функціонує наступним чином. Цифровий потік, що надійшов по радіоканалу, обробляється мікроконтролером 13 і надходить на цифро-аналогові перетворювачі 14 і 15, перший з них спільно з підсилювачем потужності формує аналоговий сигнал для підстанційних приладів обліку, другий, відповідно, для роботи апаратури релейного захисту і автоматики. Дане рішення дозволяє охопити широкий діапазон вимірюваних струмів, а його оригінальність захищена патентом [5].

Котушка Роговського – це тороїд з повітряним сердечником з кількістю витків навколо нього. Для забезпечення повторюваності параметрів котушки Роговського та зниження матеріальних витрат при серійному виробництві запропонованих трансформаторів струму пропонується виготовляти саму котушку Роговського у вигляді друкованої плати.

Розглянемо виток певної довжини, розташований на круглій друкованій платі, як показано на рис. 5. Через змінний в часі струм в провіднику навколо нього створюється магнітне поле.

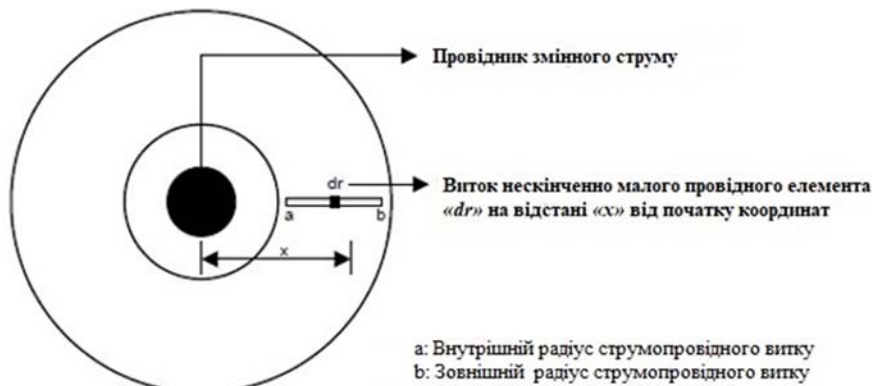


Рис. 5 – Конструкція котушки Роговського

Розглянемо нескінченно малий провідний елемент « dr » на відстані « x » від початку координат. Відповідно до закону Біо-Савара, напруженість магнітного поля на відстані « x » описується рівнянням:

$$dH = \frac{I_{нач}}{2 \cdot \pi \cdot x} \cdot dr \quad (5)$$

Щільність магнітного потоку в точці « dr » визначається за допомогою рівняння:

$$dB = \mu \cdot dH, \quad (6)$$

де μ – магнітна постійна

Підставляючи (5) у (6), отримуємо, що щільність магнітного потоку, створена за допомогою протікання струму через провідник, знаходиться як:

$$dB = \mu \cdot \frac{I_{нач}}{2 \cdot \pi \cdot x} \cdot dr \quad (7)$$

Магнітний потік витка знаходиться як:

$$\Phi = \int_a^b dB \cdot dA \quad (8)$$

Рівняння (5) відображає « dA » – площу прямокутного перерізу для елемента « dr » з висотою друкованої плати « h » – з рівняння (4):

$$\Phi = \int_a^b \left(\mu \cdot \frac{I_{нач}}{2 \cdot \pi \cdot x} \right) \cdot (dr \cdot h) \quad (9)$$

Таким чином, загальний потік, що проходить через виток:

$$\Phi = \mu \cdot \frac{I_{нач}}{2 \cdot \pi} \cdot h \cdot \ln \frac{b}{a} \quad (10)$$

Відповідно до закону Ленца, напруга в залежності від кількості витків N може бути обчислена за виразом:

$$V = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (11)$$

Виходячи з рівняння (10), внаслідок змінного в часі струму, напруга знаходиться як:

$$V = N \cdot \frac{\mu \cdot h}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{b}{a} \cdot \frac{dI_{нач}}{dt} \quad (12)$$

Таким чином, взаємна індуктивність (M) для котушки Роговського:

$$M = N \cdot \frac{\mu \cdot h}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{b}{a} \quad (13)$$

Припустимо, що синусоїдальний струм з амплітудою « I_m » та частотою « f_{IN} » протікає через провідник, розташований у центрі котушки. Таким чином, індукована напруга задається як:

$$V = M \cdot \frac{dI_m \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{in} \cdot t)}{dt} \quad (14)$$

Обчисливши похідну, отримаємо:

$$V = M \cdot 2 \cdot f_{in} \cdot \pi \cdot I_m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_{in} \cdot t) \quad (15)$$

У момент часу $t = 0$ косинус дорівнює 1. Таким чином, пікова напруга:

$$V_{пик} = M \cdot 2 \cdot f_{in} \cdot \pi \cdot I_m \quad (16)$$

Підставляємо середньоквадратичний струм (IRMS), який дорівнює ($I_m/1.414$) до рівняння 16:

$$V_{RMS} = M \cdot 4,44 \cdot f_{in} \cdot I_{RMS} . \quad (17)$$

Напруга на виході котушки Роговського – це диференціація первинного струму. Інтеграція вихідної напруги в аналогову чи цифрову область дозволить отримати більш точну форму сигналу первинного струму (рис. 5). Інтеграція в цифрову область має ряд переваг у порівнянні з аналоговою, так як дозволяє досягти кращої амплітуди та фазової характеристики. Цифрова інтеграція може дозволити змінювати постійну часу інтегратора за рахунок зміни частоти дискретизації. За допомогою функції ІІР першого порядку може бути реалізований процес інтеграції в цифрову область, як показано в рівнянні:

$$y(n) = y * (n - 1) + (T * x(n)) . \quad (18)$$

де $y(n)$ – поточний приклад вибірки; $y(n-1)$ – попередній результат вибірки; $x(n)$ – поточний приклад входу.

ІІР-фільтр першого порядку є пряме інтегрування прямокутного вікна. Щоб отримати приблизно площу кривої, прямокутні вікна повинні бути дуже маленькими. Отже, частота дискретизації має бути набагато вищою, ніж частота вхідного сигналу, щоб краще відповідати апроксимації кривої. Z-перетворення ІІР-фільтра першого порядку має вигляд:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{T}{1-z^{-1}} . \quad (19)$$

На вході постійного струму $z - 1$ дорівнює 1, що дає нескінченне масштабування вихідного сигналу. Так, вихід насичує вхідний сигнал незмінним струмом. Щоб запобігти насиченню вихідного сигналу, всі компоненти постійного струму мають бути відфільтровані перед інтеграцією функції. Перед інтеграцією необхідно встановити фільтр високих частот.

Простим способом видалення компонента постійного струму є віднімання середнього значення вхідних зразків кожного циклу кожного зразка.

Альтернативним способом є перевизначення ІІР-фільтра з константою B , як показано у рівнянні:

$$y(n) = (B * y(n - 1)) + (T * x(n)) . \quad (20)$$

Значення B може змінюватись від 0,95 до 0,99. Z-перетворення для модифікованого ІІР-фільтра:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{T}{1-Bz^{-1}} . \quad (21)$$

Відповідно, компонент постійного струму матиме деяке стійке значення, яке можна відняти з кожного зразка. Інтеграція дозволить отримати значення зміщення для кожного наступного зразка. Щоб відкоригувати зміщення потрібно відняти компонент постійного струму з кожного обчислюваного виходу. Простіший спосіб корекції усунення – відняти середній показник вихідних зразків одного циклу кожного зразка.

Для корекції зміщення алгоритм повинен містити два фільтри високих частот один перед інтеграцією і один після.

На рис. 6 показано повне представлення концепції цифрової інтеграції.

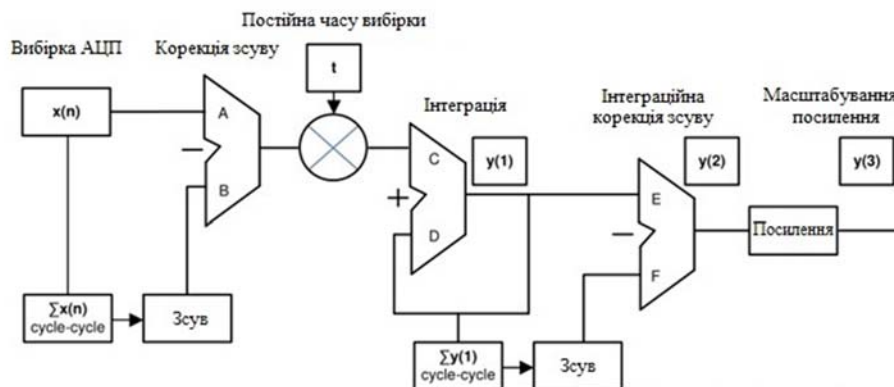


Рис. 6 – Логіка цифрової інтеграції

Для поліпшення апроксимації кривої з нижчою частотою дискретизації, інтеграція трапецієподібного вікна може бути реалізована з використанням рівняння:

$$y(n) = y(n-1) + \left(\frac{T}{2} \cdot (x(n) + x(n-1)) \right). \quad (22)$$

Застосування цифрового інтегратора спільно з інтегратором на пасивних елементах значною мірою дозволяє розширити динамічний діапазон вимірюваних струмів і скоротити матеріальні витрати.

Висновки

У статті розглянуто питання подальшого вдосконалення цифрового високовольтного вимірювального трансформатора струму з абсолютною електричною міцністю. Показано, що використання друкованої котушки Роговського дозволило отримати абсолютну повторюваність пристроїв при їх тиражуванні. Наведена спрощена методика розрахунку друкованої котушки Роговського. Наведена концепція та алгоритм цифрової інтеграції корисного сигналу. Наведені схематичні рішення основних елементів даної конструкції. Акцентовано увагу на мінімізацію капітальних витрат за серійного виробництва запропонованого пристрою трансформатора струму.

Перелік використаних джерел:

1. Кровцова И.О. Обработка и передача данных для классических и цифровых электроподстанций: монография / И.О. Кровцова. – М. : Прометей, 2016. – 236 с.
2. Хренников А.Ю. Цифровые трансформаторы тока. Устройство для вычисления силы тока / А.Ю. Хренников, И. Галиев, Е. Скрыдлов // Новости ЭлектроТехники. – 2015. – № 6(96). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2015/96/06.php>.
3. Гречухин В.Н. Новые разработки электронных измерительных трансформаторов тока и напряжения 110-220 кВ [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: https://www.ruscable.ru/article/Novye_razrabotki_elektronnyx_izmeritelnyx/.
4. Дьяченко М.Д. Цифровая защита (аппаратное и алгоритмическое обеспечение): учеб. пособие / М.Д. Дьяченко, С.К. Поднебенная; М-во образования и науки Украины, Приазов. гос. техн. ун-т. – Мариуполь: ПГТУ, 2014. – 398 с.
5. Пат. 110009 Україна, МПК G01R 19/252, H01F 38/28, G01R 15/18. Високовольтний вимірювальний трансформатор струму / М.Д. Дьяченко, В.М. Дьяченко. – № a201412319; заявл. 17.11.2014; опубл. 26.10.2015, Бюл. № 20. – 6 с.
6. Корнеев М. Использование катушки Роговского для токовых измерений / М. Корнеев, Ю. Троицкий // Электронные компоненты. – 2005. – № 5. – С. 123-127.
7. Kojovic L. High-Precision Rogowski Coils for Improved Relay Protection, Control and Measurements / L. Kojovic // The Line. – 2002. – Pp. 7-8.
8. Texas Instruments INA188 datasheet. – 2015. – 40 p. – Mode of access: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina188.pdf>.
9. Андрусевич А. Управление потенциалом. Цифровые потенциометры Maxim/Dallas / А. Андрусевич // Новости электроники. – 2006. – № 15. – Режим доступа: <https://www.compel.ru/lib/ne/2010/3/6-tsifrovyye-potentsiometryi-kompanii-on-semiconductor>.
10. Analog Devices AD5271 datasheet. – 2013. – 24 p. – Mode of access: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5270_5271.pdf.

References:

1. Krovцова I.O. *Obrabotka i peredacha dannykh dlia klassicheskikh i tsifrovyykh elektropodstantsii: monografiia* [Data processing and transmission for classical and digital power substations: monograph]. Moscow, Prometej Publ., 2016. 236 p. (Rus.)
2. Hrennikov A.Ju., Galiev I., Skrydlov E. Tsifrovye transformatory toka. Ustroistvo dlia vychisleniia sily toka [Digital current transformers. Device for calculating the amperage]. *Novosti ElektroTehniki – Electrical Engineering News*, 2015, № 6(96) 2015. Available at: www.news.elteh.ru/arh/2015/96/06.php (accessed 05 December 2020). (Rus.)

3. Grechuhin V.N. *Novye razrabotki elektronnykh izmeritel'nykh transformatorov toka i napriazheniia 110-220 kV* (New developments of electronic measuring current and voltage transformers 110-220 kV) Available at: www.ruscable.ru/article/Novye_razrabotki_elektronnykh_izmeritelnykh/ (accessed 03 February 2021). (Rus.)
4. Dyachenko M.D., Podnebennaia S.K. *Tsifrovaia zashchita (apparatnoe i algoritmicheskoe obespechenie): ucheb. posobie* [Digital protection (hardware and algorithmic support): tutorial]. Mariupol', PGTU Publ., 2014. 398 p. (Rus.)
5. Dyachenko M.D., Dyachenko V.M. *Visokovol'tnii vimiriuval'nii transformator strumu* [High-voltage measuring current transformer]. Patent UA, no.110009, 2015. (Ukr.)
6. Korneev M., Troitskii Iu. *Ispol'zovanie katushki Rogovskogo dlia tokovykh izmerenii* [Using a Rogowski Coil for Current Measurements]. *Elektronnye komponenty – Electronic components*, 2005, № 5, pp. 123-127. (Rus.)
7. Kojovic L. High-Precision Rogowski Coils for Improved Relay Protection, Control and Measurements. *The Line*, 2002, pp. 7-8.
8. Texas Instruments INA188 datasheet. 2015. 40 p. Available at: www.ti.com/lit/ds/sym-link/ina188.pdf (accessed 15 January 2020).
9. Andrusovich A. *Upravlenie potentsialom. Tsifrovye potentsiometry Maxim/Dallas* [Potential management. Digital Potentiometers Maxim / Dallas]. *Novosti elektroniki – Electronics News*, 2006, № 15. Available: www.compel.ru/lib/ne/2010/3/6-tsifrovyie-potentsiometryi-kompanii-on-semiconductor (accessed 20 December 2021). (Rus.)
10. Analog Devices AD5271 datasheet. 2013. 24 p. Available: www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5270_5271.pdf (accessed 15 November 2020).

Рецензент: С.К. Поднебенна
д-р техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 15.09.2021