

УДК 621.317.31

## ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КАНАЛ СТРУМУ З МІКРОПРОЦЕСОРНИМ КЕРУВАННЯМ

*Кухарчук В.В., д.т.н., проф., Усов В.В., аспірант  
Вінницький національний технічний університет  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95  
E-mail: victor386@rambler.ru*

В статье рассматривается проблема повышения точности и быстродействия измерения переменных токов на примере шаговых двигателей. Предложен новый подход, который заключается в динамическом регулировании уровня опорного напряжения аналого-цифрового преобразователя и значения сопротивления измерительного резистора сенсора тока. Также повышение точности и быстродействия достигается за счет использования преобразователей тока на основе эффекта Холла.

**Ключевые слова:** электрический ток, погрешность квантования, точность, сенсор тока, эффект Холла.

This article discusses problem of increase of accuracy and performance of alternating currents measuring on the example of a step motor. New approach which consists in dynamic control of level of supporting voltage of analog-digital transformer and value of resistance of current sensor measuring resistor is offered. Also the increase of accuracy and speed is achieved due to the use of current transformers on the basis of Hall effect.

**Keywords:** electric current, quantum error, accuracy, current sensor, Hall effect.

**Вступ.** Сила струму є одним з основних електричних параметрів електронних, електромеханічних та енергетичних систем. Тому вимірювання цієї величини є необхідним в процесі наладки, випробування, контролю та діагностики. Для цих актуальних задач, проведення яких є умовою надійного функціонування, важливим є розробка вимірюваного каналу струму, який забезпечуватиме максимальну швидкодію та точність.

Виділяють такі основні значення струму: діюче як середньоквадратичне, амплітудне як максимальне та середньовипрямлене як середнє арифметичне з усіх миттєвих. Тобто кожне із цих значень визначається через миттєві, проте не показують зміни значень струму в часі. Тому для детального аналізу актуальним є проведення вимірювань миттєвих значень в динаміці. Зокрема це стосується крокових двигунів, струм у фазах яких носить коливальний характер, з різкою зміною частоти та амплітуди.

**Аналіз попередніх досліджень.** Проблема вимірювання змінного струму з'явилась з його відкриттям, тому вона не є новою і, звичайно, вже давно розв'язана. Існує багато підходів до побудови таких вимірювальних систем, кожний з яких базується на застосуванні того чи іншого первинного вимірювального перетворювача та відповідного йому алгоритму обробки даних.

Так, наприклад, найпростішим варіантом є застосування електромеханічних перетворювачів, що представляють результати вимірювання у візуальному вигляді [1]. Ці засоби мають високу чутливість, але очевидним недоліком є неможливість зв'язку їх з сучасними цифровими системами обробки і представлення інформації. Для виконання цієї мети можливе застосування прецизійних резистивних сенсорів — шунтів [2]. Вони мають ряд переваг, такі як невисока вартість та відсутність впливу постійної складової струму. Проте при цьому є необ-

хідним використання додаткових перетворювальних, підсилювальних та фільтруючих каскадів. Крім того, за рахунок нагрівання і втрати потужності точність перетворення шунта погіршується при вимірюванні змінних струмів. Вимірювальна схема знаходиться під високою напругою, тому це вимагає застосування додаткової гальванічної розв'язки між силовим та вимірювальним колами [3].

Вказані недоліки відсутні у трансформаторних сенсорах струму, які дорожче резистивних, але на відміну від останніх практично не споживають струму, забезпечують гальванічну розв'язку, їх параметри не залежать від температури та імпульсних завад [2].

Відомий пристрій, який базується на використанні вимірювального трансформатора струму з ферромагнітним осердям [4]. Спосіб вимірювання електричного струму полягає в тому, що здійснюють вимірювання поточних значень струму, аналого-цифрове перетворення вторинного струму, обчислення поточного значення синхронного часу мережі і, використовуючи відомі закономірності протікання перехідних процесів у ферромагнітних трансформаторах струму, застосовуючи засіб кускової лінеаризації нелінійних процесів у реальному масштабі часу, обчислюють струм намагнічування і, з його урахуванням, первинний струм, значення якого піддають відомим засобам математичної обробки.

Але суттєвим недоліком трансформатора струму є явище намагнічування осердя, що спричиняє появу струмової та кутової похибок. Тому вони мають нелінійну статичну характеристику. Для її компенсації в цьому вимірювальному каналі застосовується додатковий блок розрахунку струму намагнічування, що зменшує швидкодію і точність вимірювання. Окрім того трансформатор погіршує чутливість і роздільну здатність сенсора струму, які є важливими при вимірюванні змінних струмів високої частоти в

динамічних режимах. Тому трансформатори струму мають порівняно не високий клас точності 0,5-1 [1].

Також одним з вагомих недоліків трансформаторних сенсорів струму є їх неможливість застосування для вимірювання постійного струму. А порівняно велика маса та габарити ускладнюють їх використання у портативних пристроях.

Це вимагає пошуку принципово нових сенсорів струму, які б мали вищий клас точності, високу швидкодію та більш широкі межі використання.

**Мета роботи.** Підвищення точності та швидкодії вимірювання електричного струму. Для цього необхідно розробити вимірювальний канал струму з використанням сучасних сенсорів.

**Матеріал і результати дослідження.** Вказані недоліки трансформаторів струму практично відсутні у сенсорах струму, принцип роботи яких заснований на використанні ефекту Холла. Вихідний сигнал вимірювальної інформації (як правило напруга) в таких сенсорах формується за рахунок електромагнітного поля, що створюється вимірювальним струмом у вторинній котушці, силові лінії якого проходить через тонку пластинку напівпровідника. Звичайно, позбутися проблеми перемагнічування не вдається, проте компанія ЛЕМ, яка виготовляє сенсори струму та напруги на основі даного ефекту, вбудовує спеціальну схему компенсації нелінійності. Тому однією з основних переваг таких перетворювачів є лінійність петлі гістерезису в робочій області (рис. 1).

Також важливими перевагами є можливість вимірювання змінних, постійних та імпульсних струмів від декількох А до декількох сотень кА. Це дає можливість їх широкого застосування в різних ре-

жимах роботи. Дані сенсори разом з малими габаритами та масою забезпечують низьке споживання потужності, особливо в діапазонах високих струмів. Аналогічно трансформаторам струму вони гальванічно розв'язані з силовою частиною кола, проте на відміну від них характеризуються відсутністю внутрішніх втрат у вимірювальному колі (клас точності складає не більше 0,5, а для деяких серій 0,1) і особливо стійкі при перенавантаженнях. Висока швидкодія (час запізнення вихідного сигналу від вимірюваного складає < 3 мкс) та порівняно низька вартість, — всі ці переваги дають можливість використання сенсорів на основі ефекту Холла фірми ЛЕМ замість вимірювальних трансформаторів струму.

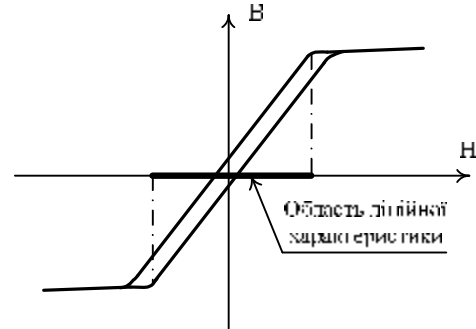


Рисунок 1 – Крива намагнічування

Для ідентифікації математичної моделі вимірювального каналу струму на основі такого сенсора, використовуючи відомий пристрій [4], представимо його узагальнену структурну схему (рис. 2)

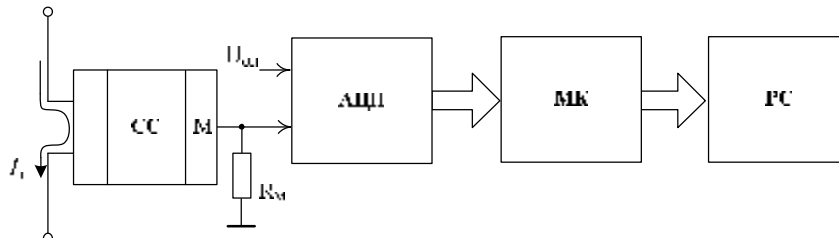


Рисунок 2 – Узагальнена структурна схема ВК струму на основі сенсора Холла:

СС – сенсор струму на основі ефекту Холла; АЦП – паралельний аналого-цифровий перетворювач; МК – мікропроцесорний контролер; РС – персональний комп'ютер

Принцип роботи даної вимірювальної системи полягає у перетворенні вимірюваного струму  $I_x$  у пропорційну йому напругу  $U_x$  на вимірювальному резисторі  $R_M$ , яка за допомогою АЦП перетворюється у відповідний двійковий код, що передається на МК для подальшої обробки та аналізу на РС.

Таким чином математична модель вимірювального каналу буде складатися з рівняння перетворення сенсора струму:

$$U_x = I_x \cdot R_M \cdot k, \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт перетворення СС по струму, та рівняння аналого-цифрового перетворення АЦП:

$$N_x = \frac{U_x}{U_{оп}} \cdot 2^n, \quad (2)$$

де  $N_x$  – двійковий код на виході АЦП,  $U_{оп}$  – опорна напруга АЦП,  $n$  – розрядність АЦП [1].

В загальному вигляді вимірюваний струм  $I_x$ , напруга  $U_x$  та код  $N_x$  є змінними величинами, тому, об'єднавши вирази (1) та (2), отримуємо рівняння перетворення ВК струму:

$$N_x(t) = \frac{k R_M \cdot i_x(t)}{U_{оп}} \cdot 2^n. \quad (3)$$

Графічна залежність у вигляді статичної характеристики має вигляд (рис. 3):

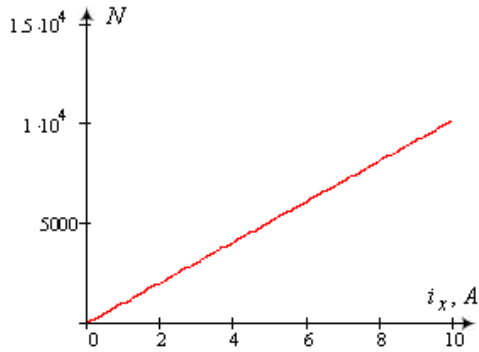


Рисунок 3 – Статична характеристика ВК струму на основі сенсора Холла

Як видно з рис. 3, дана залежність є лінійною, оскільки вихідна величина  $N_x$  прямопропорційна вимірювальному струму  $i_x$ .

Проте інша ситуація з відносною похибкою квантування, яка рівна:

$$\delta_{kb} = \frac{1}{n_x} \cdot 100\% = \frac{U_{оп}}{k R_M \cdot 2^n \cdot i_x} \cdot 100\% . \quad (4)$$

При цьому абсолютна похибка квантування визначається:

$$\Delta_{kb} = \frac{u_{оп}}{2^{n+1}} . \quad (5)$$

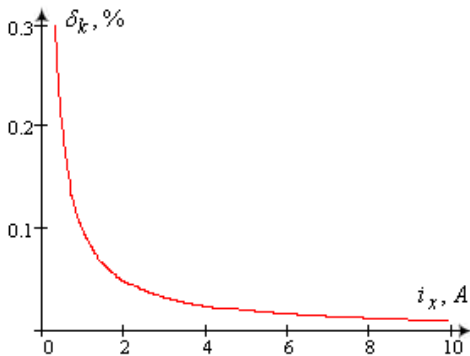


Рисунок 4 – Похибка квантування ВК струму на основі сенсора Холла

Рис. 4 показує, що похибка квантування є нелінійною, тому її досить важко врахувати при обробці результатів вимірювання. Більше того, при вимірюванні малих значень струму, вона різко збільшується, а це може призвести до отримання неправильних результатів. Це досить важливо при вимірюванні змінного струму, наприклад, в обмотках крокового двигуна, де в моменти переходу через стійкі кутові положення виникають різкі коливання ротора, і як результат — коливання струму (рис. 5).

Очевидно, що подібні стрибки, навіть за умови достатньої чутливості сенсора, не будуть правильно фіксуватися вимірювальним каналом, по причині великої похибки в даному діапазоні вимірювання. Тому ця проблема потребує вирішення.



Рисунок 5 – Перехідний процес струму в обмотці крокового двигуна

Завдання полягає у зменшенні похибки квантування в областях малих струмів. Проте точно не можна визначити необхідні межі, в яких буде розв'язуватися поставлена задача, тому розглядаємо загальний випадок. Фактично проблема являє собою тривіальну задачу оптимізації — мінімізація виразу (4), тобто:

$$\delta_{kb}(i_x) \rightarrow 0 . \quad (6)$$

У виразі (4) лише одна змінна величина — вимірювальний струм  $i_x$ , тому для виконання умови (6) припустимо, що опорна напруга АЦП  $U_{оп}$ , та опір вимірювального резистора  $R_M$  змінні величини, тоді з врахуванням виразу (6) вираз (4) буде мати вигляд:

$$\delta_{kb} = \frac{u_{оп}}{k r_m \cdot i_x \cdot 2^n} \cdot 100\% \rightarrow 0 \quad (7)$$

З виразу (7) видно, що мінімальна похибка квантування досягатиметься за умов, коли значення опорної напруги  $u_{оп}$  буде найменшим, а  $r_m$  найбільшим. Проте згідно з технічними вимогами до АЦП опорна напруга не може бути меншою за певне значення, так само і опір вимірювального резистора не може перевищувати встановлене паспортом значення. Тому матимемо наступні умови:

$$u_{оп} \rightarrow U_{оп \min} ; \quad (8)$$

$$r_m \rightarrow R_{M \max} . \quad (9)$$

Проте є очевидним, що вхідна напруга на АЦП не повинна перевищувати опорну, інакше результат завжди буде рівним максимально можливому вихідному коду. Тобто можна записати наступну умову:

$$u_{оп} \geq k r_m \cdot i_x . \quad (10)$$

Звичайно, похибка квантування буде мінімальною, але не буде отриманий власне результат вимірювання. Більше того, навіть якщо завжди виконувати умову (10), то залежність похибки квантування від вимірювального струму буде все одно нелінійною.

Але лінійність залежності, показаної на рис. 4, може досягатися лише за відсутності всіх змінних складових у виразі (7), тобто за умови:

$$u_{оп} = k r_m \cdot i_x . \quad (11)$$

Звідси вираз (4) матиме вигляд:

$$\delta_{kb} = \frac{1}{2^n} \cdot 100\% = \text{const} . \quad (12)$$

Таким чином похибка квантування залишатиметься сталою, і для  $n=12$  складає  $\delta_{KB} = 0.024\%$ , але за умови, що

$$\begin{aligned} U_{оп\ max} &\geq u_{оп} \geq U_{оп\ min} \\ R_{M\ max} &\geq r_m \geq R_{M\ min} \end{aligned} \quad (13)$$

З технічної точки це означає, після кожного циклу аналого-цифрового перетворення відбувається оцінка вимірюваного значення і відповідна настройка значень опорної напруги та опору вимірювального резистора. Одразу слід зауважити, що реалізація динамічної зміни опорної напруги не є проблемою, для цього можна використати цифро-аналоговий перетворювач ЦАП, розрядність якого рівна розрядності АЦП. Проблема може представляти реалізація змінного опору. Проте сучасна промисловість виготовляє цифрові потенціометри, за допомогою яких можливе встановлення з високою дискретністю бажаного значення активного опору через МК.

Графічна залежність похибки квантування від вимірюваного струму у відповідності до описаного принципу настройки має вигляд (рис. 6).

Тобто при зменшенні опорної напруги до мінімально можливого значення  $U_{оп\ min}$  вона обов'язково повинна зафіксуватися, так само як і фіксується значення вхідної напруги на резисторі  $r_m$ , встановлюючись, при виконанні умови (10), на максимально можливе значення.

Проте здається поставлена мета, зменшення похибки, не вирішується, оскільки при вимірюванні малих значень струмів вона все одно різко збільшується. Але насправді по відношенню до вимірювального каналу, зображеного на рис. 2, за допомогою

даного підходу вдається значно зменшити як відносну, так і абсолютну похибки квантування. Так за рахунок зменшення значення опорної напруги вдається зменшити похибку квантування у

$$\frac{U_{оп\ max}}{U_{оп\ min}} \text{ разів}, \quad (14)$$

а похибку квантування у

$$\frac{U_{оп\ max} \cdot R_{M\ max}}{U_{оп\ min} \cdot R_{M\ min}} \text{ разів}. \quad (15)$$

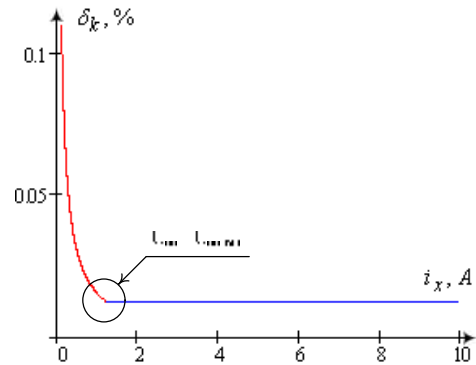


Рисунок 6 – Залежність похибки квантування від вимірюваного струму при виконанні умови (11)

Наприклад, для сенсора струму LA 25-NP і 12-ти розрядного АЦП застосування описаного підходу при вимірювання струму 5 мА дає можливість зменшити похибку квантування з 18% (при відсутності регулювання) до 3%. Тому даному методу варто приділити увагу і здійснити його технічну реалізацію.

На основі запропонованого принципу керування опорною напругою АЦП та вимірювальним резистором  $r_m$ , розроблено відповідну структурну схему вимірювального каналу струму (рис. 7).

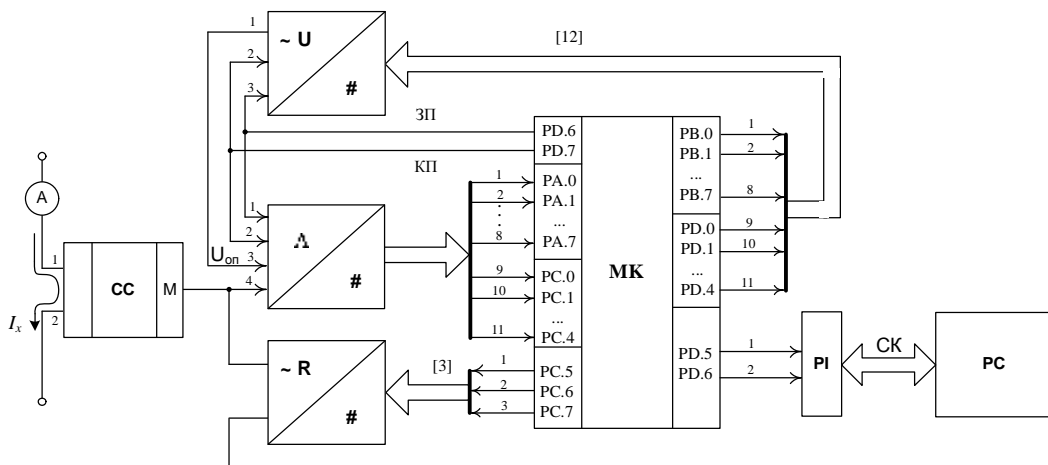


Рисунок 7 – Структурна схема вимірювального каналу струму

На рис. 7: СС – сенсор струму на основі ефекту Холла; АЦП – паралельний аналого-цифровий перетворювач; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач; ЦП – цифровий потенціометр; МК – мікропроцесо-

рий контролер; PI – послідовний інтерфейс; PC – персональний комп'ютер.

Як вже зазначалося, основний принцип керування даного вимірювального каналу полягає у забез-

печенні умови (11). Очевидно, що рівність вхідної та опорної напруги АЦП може досягатися за рахунок регулювання як лівої так і правої частин рівності. Проте найбільш зручним є зміна опорної напруги, оскільки вона безпосередньо впливає на значення кроку квантування і відповідно на абсолютну похибку квантування. Тому значення опорного  $r_m$  встановлюється максимально можливе (відповідно до даних технічної документації) для забезпечення максимальної роздільної здатності. При цьому регулювання

опорною напругою повинно задовольняти умови (13). У протилежному випадку, при перевищенні або зменшенні значення вхідної напруги за вказані межі, регулювання відбувається шляхом зміни значення опорного цифрового потенціометру.

На основі описаного принципу керування розроблено алгоритм роботи вимірювального каналу струму (рис. 7).

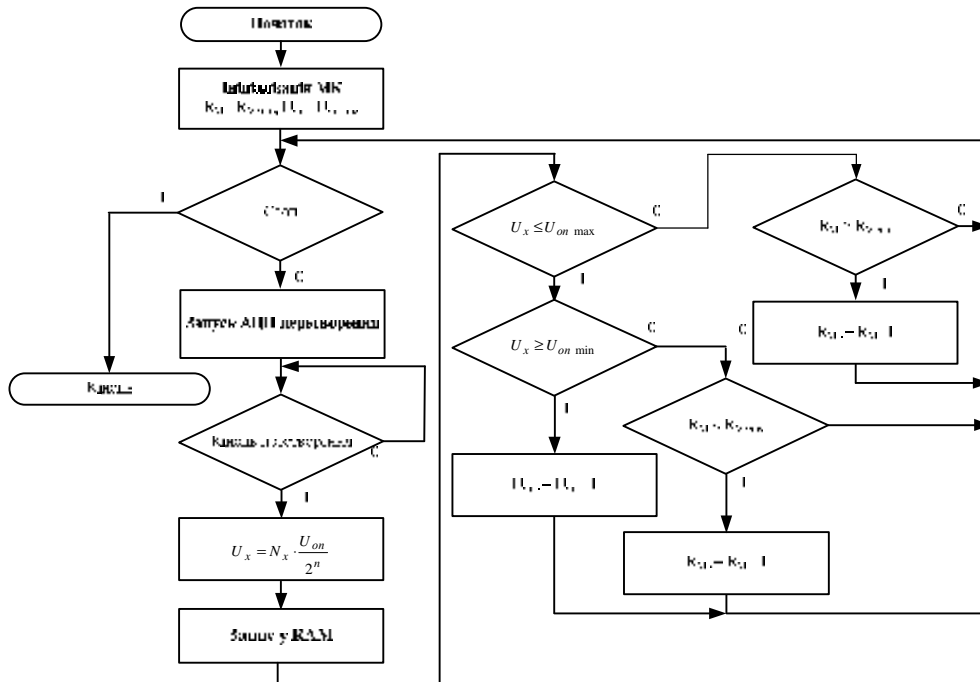


Рисунок 7 – Алгоритм роботи вимірювального каналу струму

Дослідження показують, що абсолютне забезпечення умови (13) неможливо, за рахунок додаткових затрат часу на виконання аналого-цифрового та цифро-аналогового перетворення. Проте час запізнення складає не більше 0,2 мкс (при застосування сучасних АЦП AD7266 та ЦАП AD7564), що є цілком прийнятним при вимірюванні струму частотою до 500 Гц. Таким чином досягається наближення значення опорної напруги до вихідної напруги АЦП, за рахунок чого досягається мінімізація похибки квантування.

**Висновки.** В результаті проведених досліджень доведено доцільність використання сенсорів струму на основі ефекту Холла як основної складової вимірювального каналу. Встановлено, при вимірюванні миттєвих значень даним каналом малих струмів, похибка квантування може досягати 20%.

Запропоновано новий підхід до підвищення точності вимірювання змінного струму, який полягає у мінімізації похибки квантування, за рахунок зміни значення опорної напруги, та збільшення роздільної здатності сенсора струму, за рахунок зміни опорного вимірювального резистора.

На основі даного підходу було розроблено структурну схему, рівняння перетворення та алгоритм роботи вимірювального каналу струму з мікропроцесорним керуванням.

#### БІБЛІОГРАФІЧНІ ДАНІ

1. Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Долгополов В.П., Грузинська Л.В. Метрологія та вимірювальна техніка. – В.: УНІВЕРСУМ, 2004. – 252 с.
2. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320с.
3. Малиновский В.Н. Электрические измерения (с лабораторными работами). – М.: Энергоиздат, 1982. – 392с.
4. Канал вимірювання струму і напруги: А.с. 58603. Україна МПК (2006) G01R 21/06 / Голуб В.С. – № 200500972, Заявлено 03.02.2005, Опубл. 15.07.2005.
5. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.

Стаття надійшла 9.04.2007 р.