

## ВИМІРЮВАЧ МИТТЄВОГО СТРУМУ В ПРИСТРОЯХ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Ю.Ф. Тесик<sup>1</sup>, докт. техн. наук, М.С. Комаров<sup>2</sup>, докт. техн. наук, Д.М. Клименко<sup>3</sup>

1 – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

2 – Київський національний університет технологій та дизайну,  
вул. Немировича-Данченка, 2, Київ, 01101, Україна

*Розглянуто питання реєстрації миттєвих струмів. Описано конструкції основних шунтів і пристроїв для вимірювання миттєвих струмів. Проведено дослідження частотного діапазону вимірювача миттєвих струмів. Бібл. 5, рис. 10.*

**Ключові слова:** вимірювання, швидкодія, датчик струму, миттєвий струм, шунт.

**Вступ.** У промисловості все ширше застосовуються потужні пристрої силової електроніки, побудовані на MOSFET і IGBT транзисторах, такі як перетворювачі частоти для електропривода, централізовані агрегати безперервного електроживлення, засоби підвищення показників якості електроенергії та багато іншого.

Найбільш інформативним параметром для контролю за роботою таких пристроїв є форма миттєвого струму при перемиканнях. Швидкість зміни струму  $di/dt$  при перемиканнях може досягати  $10^9$  А/с [1], а існуючі засоби вимірювання не дають змоги достовірно реєструвати такі сигнали. Потужність, що розсіюється на первинному датчику, не повинна перевищувати 10 Вт, тобто при струмі 100 А опір вимірювального датчика ( $r$ ) не повинен бути більше  $10^{-3}$  Ом. При тривалості фронту струму  $10^{-6}$  с постійна часу вимірювального ланцюга ( $\tau$ ) має бути не більше  $10^{-7}$  с, отже, індуктивність вимірювального датчика ( $L$ ) повинна бути меншою  $L < r \cdot \tau = 10^{-10}$  Гн, що практично не можливо реалізувати. Тому при використанні звичайних вимірювальних шунтів отримати достовірну картину процесу зміни струму не вдається.

Крім того, виникає проблема забезпечення безпеки вимірювань. Згідно з вимогами техніки безпеки засоби вимірювань, підключені до мережі живлення, повинні бути заземлені, що обмежує підключення вимірювальних входів до пристроїв, які досліджуються.

**Датчик струму.** У роботі пропонується використання трубчастого шунта з манганіну для вимірювання великих імпульсів струму [4]. Основна частина шунта, як показано на рис. 1, складається з манганінових трубок, по яких струм протікає у зворотних напрямках. Таким чином, за рахунок біфілярної взаємодії магнітних полів забезпечується зниження індуктивності шунта, який має гарну відтворюваність [2] амплітуди і форми імпульсів струму при тривалості  $\sim 10^{-5} \dots 10^{-6}$  с з невеликою поправкою на скін-ефект, якого можна уникнути, зменшуючи товщину трубки шунта.

У трубчастих шунтів простір, обмежений резистивним циліндром, вільний від магнітного поля вимірюваного струму, тому динамічні властивості залежать лише від ступеня прояву поверхневого ефекту, тобто вони тим кращі, чим менша товщина стінки резистивного циліндра.

Відмітимо [3] основні переваги трубчастих шунтів у порівнянні з розглянутими вище шунтами:

- при рівній здатності навантаження трубчасті шунти мають кращі динамічні властивості;
- висока завадостійкість до впливу магнітного поля, що пояснюється симетричністю потенціального контура і екрануючою дією циліндрів.

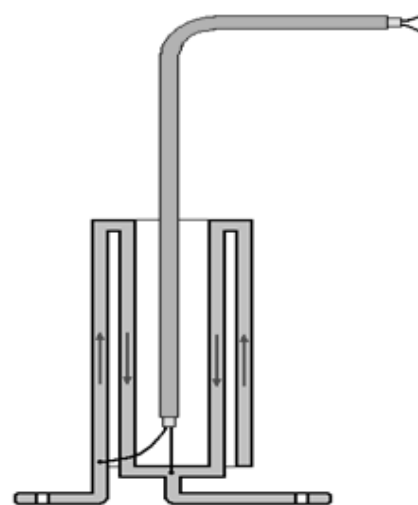


Рис. 1

**Пристрій для вимірювання миттєвого струму.** У роботі розглядається вимірювач струму, структурна схема якого зображена на рис. 2. Він складається з датчика струму, вузла корекції, блока живлення, передавача і приймача, що дає змогу задовольнити умови техніки безпеки.

Для підвищення точності вимірювань у пристрої використано схему, зображену на рис. 3. Схема містить датчик струму 1 і вузол корекції, що складається з диференціатора 3, підсилювача 2, диференціального підсилювача 4, ланцюга балансування нуля 5 і працює наступним чином [5]. Вихідна напруга датчика струму 1 дорівнює

$$U_1 = iR_1 + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

і надходить через опори  $R_2, R_3$  на неінвертуючий вхід DA1, на якому побудовано диференціальний підсилювач 2.

Припустимо, що напруга на виході значно більша напруги на резисторі  $R_{10}$ , тоді

$$U_{R_{10}} = C \frac{dU_{\text{вих}}}{dt} R_{10} \quad (2)$$

Загальна вихідна напруга схеми буде дорівнювати

$$U_{\text{вих}} = (U_1 - U_{10} \cdot K_2) K_u = (iR_1 + L_1 \frac{di}{dt} - C \frac{dU_{\text{вих}}}{dt} \cdot K_2 R_{10}) K_u, \quad (3)$$

де  $K_u$  – коефіцієнт підсилення диференціального підсилювача 2, а  $K_2$  – коефіцієнт підсилення підсилювача 4.

Припустимо, що на виході схеми напруга становить

$$U_{\text{вих}} = i \cdot K_u \cdot R_1. \quad (4)$$

Тоді, підставивши (4) у (3), отримаємо

$$U_{\text{вих}} = (iR_1 + L_1 \frac{di}{dt} - C \frac{di}{dt} \cdot K_2 K_u R_1 R_{10}) K_u. \quad (5)$$

При виконанні умови

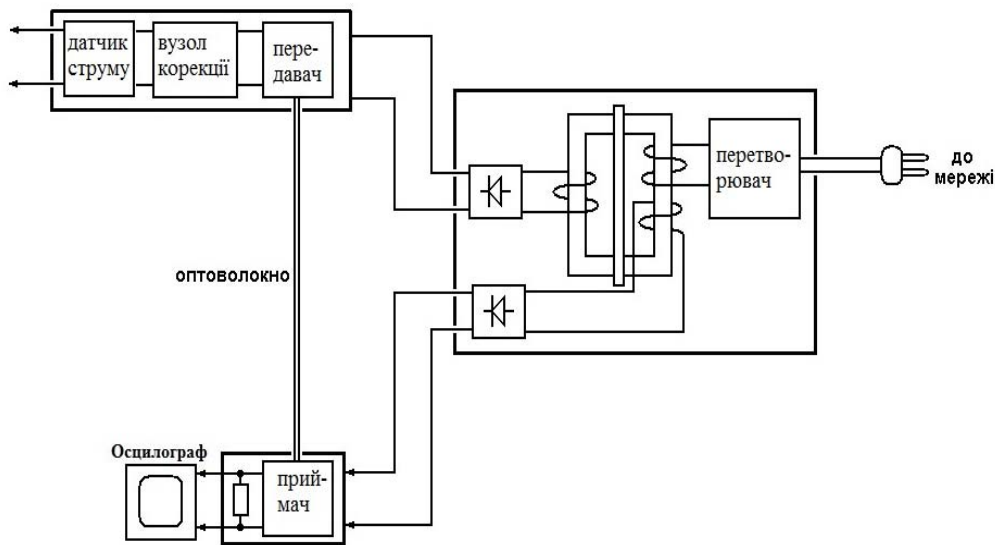


Рис. 2

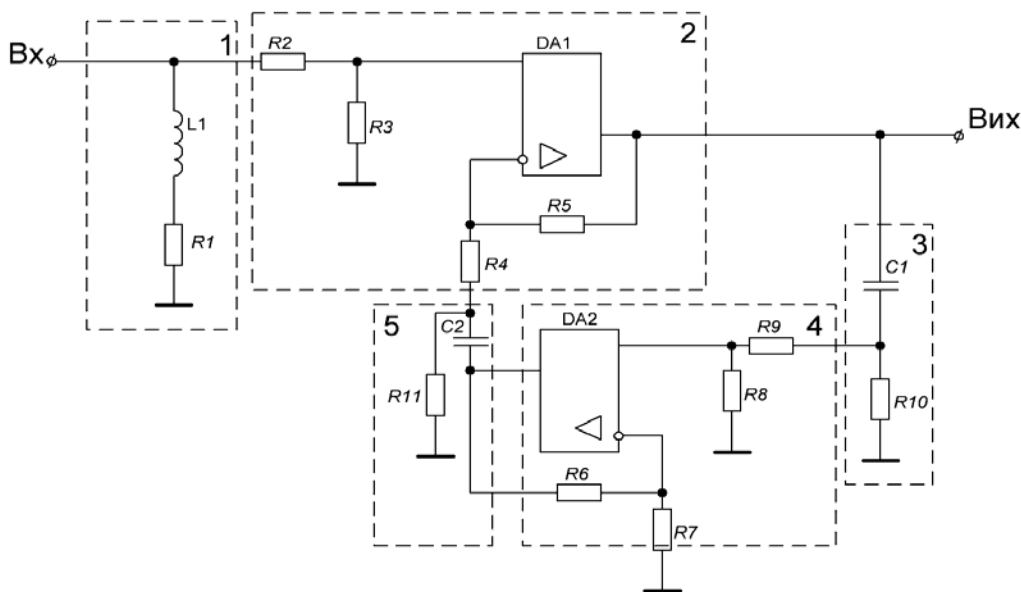


Рис. 3

$$\frac{L_1}{R_1} = -CK_2R_{10}K_u \quad (6)$$

вихідна напруга дорівнює виразу (4), тобто схема забезпечує компенсацію напруги на індуктивності датчика струму. Таким чином, для роботи схеми необхідно виконати умови

$$\begin{cases} U_{\text{вих}} \gg U_{R10} \\ \frac{L_1}{R_1} = CR_{10}K_uK_2 \end{cases} \quad (7)$$

Отже, при відомих параметрах датчика струму, вибираючи параметри згідно з умовою (7), сигнал на виході схеми пропорційний миттєвому значенню струму, тобто частотний діапазон вимірювача і його швидкодія залежатимуть лише від параметрів операційних підсилювачів.

**Моделювання вимірювача миттєвих значень струму.** Проведено моделювання вузла корекції для ідеалізованих операційних підсилювачів, для коефіцієнтів підсилення  $K_{U1}=10$  та для двох коефіцієнтів  $K_{U2}=80$  і  $K_{U2}=100$  (рис. 4). Моделювання виконано за допомогою програми Basic. На графіках наведено форми: 1 – вхідного струму; 2 – напруги на шунті; 3 – напруги на виході вузла корекції; 4 – струму через конденсатор.

При  $K_{U2}=80$  форма вихідного сигналу вузла корекції наближається до форми струму, але є розбіжності при передаванні фронту імпульсу. При  $K_{U2}=100$  вказані розбіжності значно зменшуються і вихідний сигнал практично не відрізняється від реальної форми струму, що вимірюється. Крім того, з наведених графіків випливає, що за формою напруги на шунті можна отримати уявлення про тривалість зміни фронту струму, але це справедливо тільки у випадку лінійного фронту.

На рис. 5 показано результати моделювання вузла корекції при експоненціальній формі вхідного струму, де 1 – форма вхідного струму; 2 – форма напруги на шунті; 3 – форма напруги на виході вузла корекції; 4 – форма струму через конденсатор.

На графіку рис. 5 видно, що при нелінійному фронті вхідного сигналу не можна отримати уявлення про вхідний сигнал за формою напруги на шунті, а форма напруги на виході вузла корекції дає змогу отримати уявлення про тривалість фронту вхідного сигналу.

З наведених епюр можна зробити висновок, що при  $K_{U2}=100$  вузол корекції практично відтворює форму вхідного струму, а напруга на шунті не дає достатньої інформації про реальний характер зміни вхідного струму.

Проведене моделювання виконано для ідеальних операційних підсилювачів. Для уточнення роботи схеми при реальних параметрах елементів було виконано моделювання за допомогою програми PSPICE A/D. Ця програма середовища OrCAD дає змогу провести моделювання електричної схеми рис. 6 із заданими параметрами.

Моделювання схеми виконано в режимі Time Domain (залежність параметру від часу). У результаті виконання моделювання отримано графіки, представлені на рис. 7, де 1 – форма вхідного струму; 2 – форма

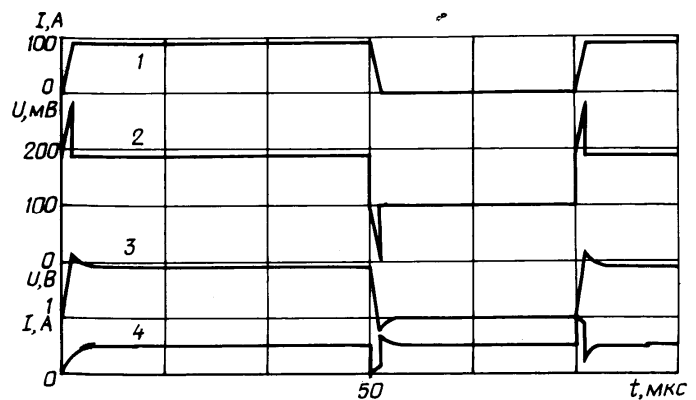


Рис. 4

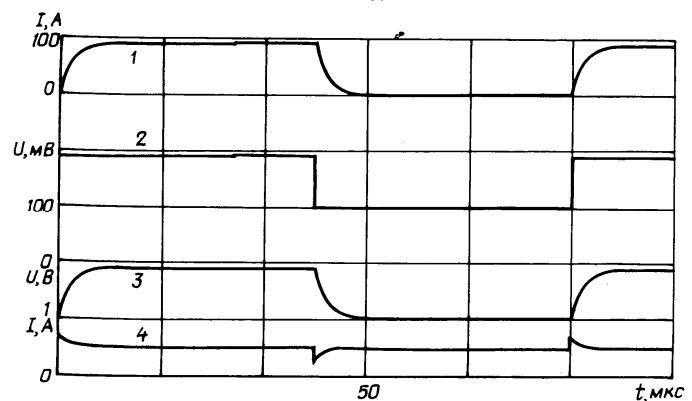


Рис. 5

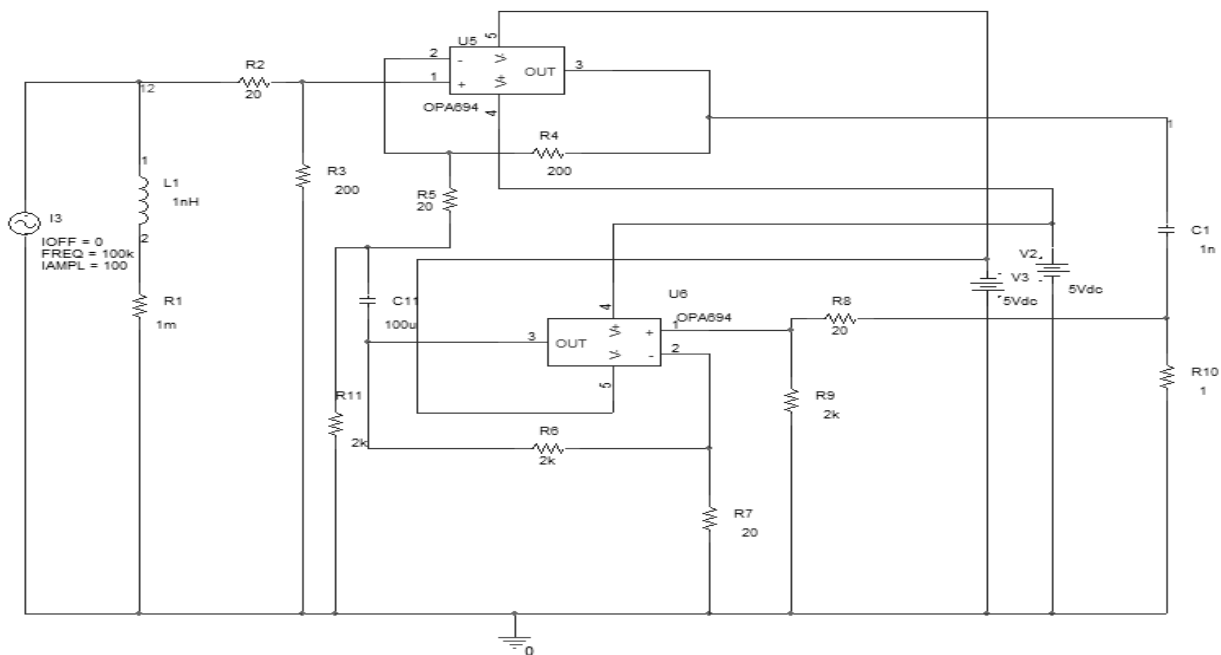


Рис. 6

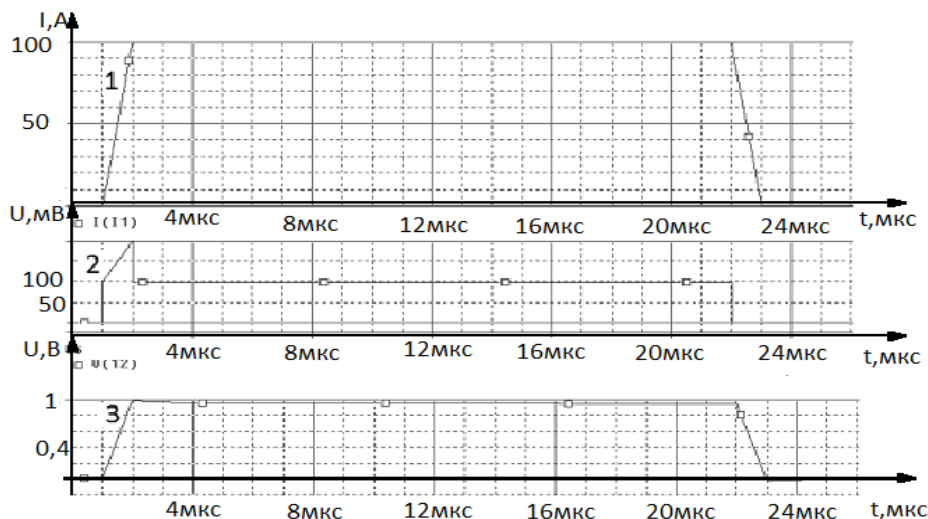


Рис. 7

напруги на шунті; 3 – форма напруги на виході вузла корекції.

З графіків, зображених на рис. 7, можна побачити, що форма напруги на шунті відображає тривалість фронту вхідного сигналу зі спотворенням, а форма напруги на виході вузла корекції дає більш точну інформацію про вхідний сигнал. На рис. 8 показано результати моделювання вузла

корекції при експоненціальній формі вхідного струму, де 1 – форма вхідного струму, 2 – форма напруги на шунті, 3 – форма напруги на виході вузла корекції.

З графіків, наведених на рис. 8, видно, що за формою напруги на шунті не можна отримати уяву про характер зміни струму, а напруга на виході вузла корекції відображає реальний характер зміни струму.

Проведено моделювання вузла корекції при синусоїдальній формі вхідного струму (рис. 9), де 1 – форма вхідного струму, 2 – форма напруги на шунті, 3 – форма напруги на виході вузла корекції.

З графіків, наведених на рис. 9, випливає, що напруга на шунті не співпадає за фазою з формою вхідного струму, а напруга на виході вузла корекції відтворює вхідний сигнал без зсуву за фазою. За результатами моделювання можна зробити висновок, що вузол корекції сигналу забезпечує відтворення вхідного сигналу при реальних операційних підсилювачах.

**Дослідження частотного діапазону вимірювання.** На графіку 1 (рис. 10) показано залежність амплітуди напруги датчика струму від зміни частоти вхідного синусоїдального сигналу амплітудою струму 100 А.

З графіка 1 (рис. 10) видно, що при частоті більше 100 кГц амплітуда напруги первинного датчика починає різко зростати при незмінній амплітуді вхідного струму. Форма

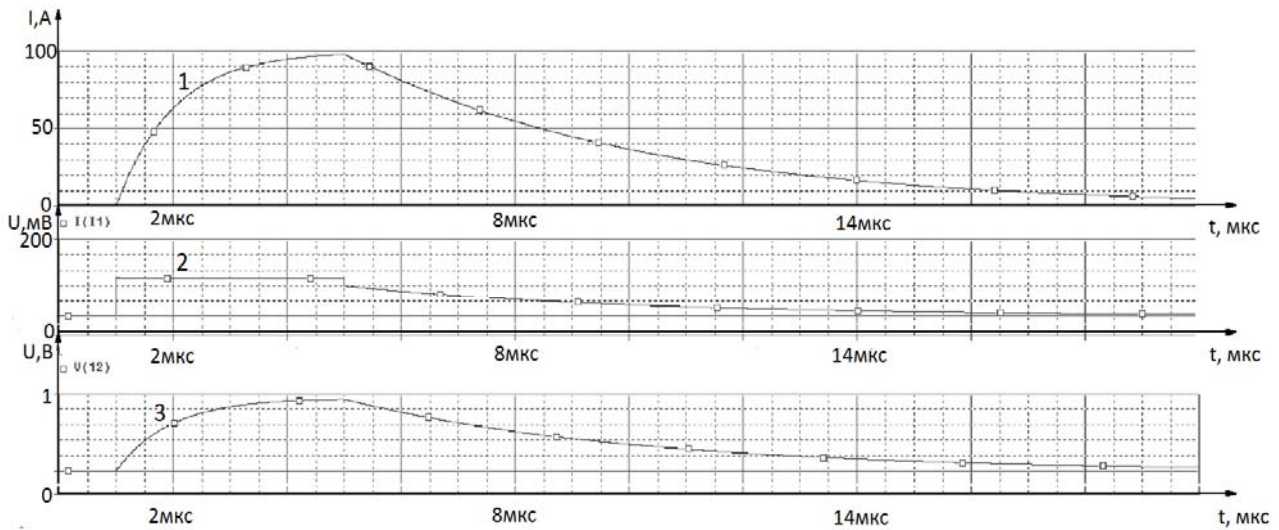


Рис. 8

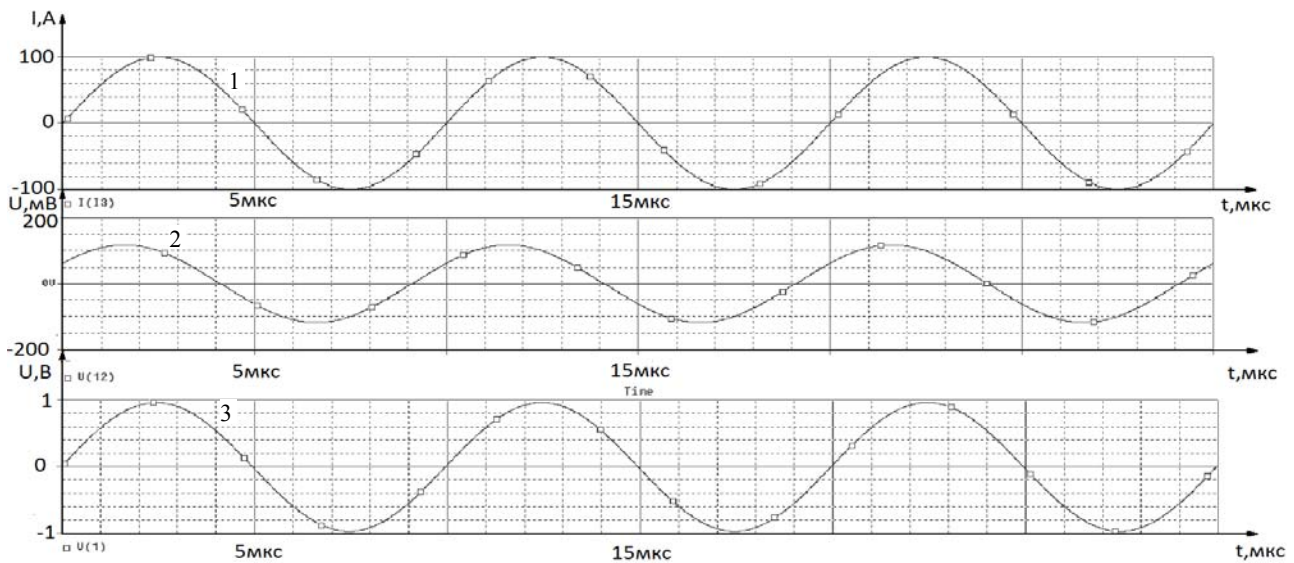


Рис. 9

графіка пояснюється тим, що на високій частоті індуктивність шунта стає співвимірною з його опором. Тому виміряти амплітуду струму за допомогою первинного датчика на частоті більше 100 кГц неможливо.

Графік 2 на рис. 10 показує аналогічну до попереднього графіка залежність для вимірювача миттєвих значень струму. Як видно з графіка 2 (рис. 10), амплітуда напруги на виході вимірювача не змінюється на проміжку від 0 до 5 МГц. При збільшенні частоти вхідного сигналу понад 5 МГц, значення амплітуди напруги на виході вимірювача починає збільшуватись за рахунок неідеальності операційних підсилювачів, на яких побудований вимірювач миттєвих значень струму.

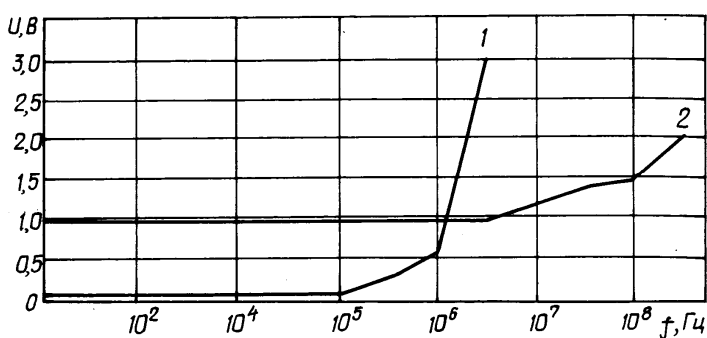


Рис. 10

Порівнюючи графіки 1, 2 (рис. 10), можна зробити висновок, що вимірювач миттєвих значень струму значно розширює частотний діапазон вимірювань амплітуди миттєвого струму в порівнянні з первинним датчиком струму.

**Висновки.** При відомих параметрах первинного датчика струму частотний діапазон вимірювача і його швидкодія залежатимуть лише

від параметрів операційних підсилювачів системи корекції, яка забезпечує вилучення з сигналу датчика струму індуктивної складової.

Наявність оптоволоконної системи передачі сигналу дає змогу підвищити точність передачі даних від вимірювального перетворювача до реєструючого пристрою, а використання спеціального блока живлення забезпечує високу надійність його роботи.

Виконані дослідження дають змогу створити нові вимірювальні пристрої, за допомогою яких забезпечується достовірна інформація про процеси у пристроях силової електроніки при забезпеченні вимог техніки безпеки у випадку проведення вимірювань.

1. *Абрамович М.И., Бабайлов В.М., Либер В.Е. и др.* Диоды и тиристоры в преобразовательных установках. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 432 с.
2. *Векслер М.С., Теплинский А.М.* Шунты переменного тока. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 120 с.
3. *Донец С.Е., Лебедев В.В., Литвиненко В.В.* Стержневой шунт для измерения сильных токов микросекундной длительности // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ». – Харьков, 2008. – Вып. 44. – С. 39–44.
4. *Рябов Б.М.* Измерение высоких импульсных напряжений. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1983. – 124 с.
5. *Пат. України на винахід 98365.* Вимірювач миттєвих значень струмів / М.С. Комаров, О.Н. Сороколетов, А.В. Телюк. Опубл. 2012; Бюл. № 9.

УДК 621.317

**Ю.Ф. Тесик<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **Н.С. Комаров<sup>2</sup>**, докт. техн. наук, **Д.М. Клименко<sup>3</sup>**

1 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

2 – Київський національний університет технологій і дизайну,

ул. Немировича-Данченко, 2, Київ, 01101, Україна

#### **Измеритель мгновенного тока в устройствах силовой электроники**

*Рассмотрены вопросы регистрации мгновенных токов. Описаны конструкции основных шунтов и приспособлений для измерения мгновенных токов. Проведено исследование частотного диапазона измерителя мгновенных токов. Библи. 5, рис. 10.*

**Ключевые слова:** измерение, быстродействие, датчик тока, мгновенный ток, шунт.

**Yu.F. Tesyk<sup>1</sup>, M.S. Komarov<sup>2</sup>, D.M. Klymenko<sup>3</sup>**

1 – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

2 – Kyiv National University of Technologies and Design,

str. Nemyrovycha-Danchenka, 2, Kyiv, 01101, Ukraine

#### **Instant current meter in devices of power electronics**

*The problems of registering instantaneous currents are considered. The design of the main shunts and devices for measuring the instantaneous current are described. The investigation of the frequency range of the probe instantaneous current is studied. References 5, figures 10.*

**Key words:** measuring, speed of operation, current sensor, instant current, shunt.

Надійшла 10.09.2013

Received 10.09.2013