

УДК 621.317.725

Ю.М. Туз, О.М. Кривченкова

Національний технічний університет України «КПІ», Київ, Україна

## ВИСОКОТОЧНІ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ В ШИРОКОМУ ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ

В приведеній статті досліджено характеристики існуючих на даний час в світі вимірювачів напруги змінного струму. З урахуванням недоліків існуючих пристроїв запропоновано структурну схему більш точного та більш широкополосного вимірювача.

**Ключові слова:** змінна напруга, термоперетворювач, інтерполяція.

### Загальна постановка проблеми

Актуальність проведеного дослідження була обумовлена тим, що на даний час в Україні не існує високоточних, прецизійних вимірювачів напруги змінного струму в широкому діапазоні частот. Для створення такого приладу було досліджено існуючі у світі конструктивні і технологічні рішення реалізації пристрою таких провідних компаній, як Keithly, Fluke, Angilent та інших. Більшість з цих пристроїв в якості головного вузла вимірювання використовують детектор середніх значень (наприклад Н4-12), або працюють за вибірками миттєвих значень на АЦП. Основною метою даного дослідження є створення

структурної та функціональної схеми пристрою високоточного вимірювання напруги змінного струму в широкому діапазоні частот з урахуванням недоліків всіх існуючих рішень, що на даний час в Україні та в світі мав би найвищі метрологічні характеристики.

### 1. Огляд сучасних світових досягнень у вимірюванні напруги змінного струму

В табл. 1 наведено характеристики діапазонів напруги та частотних діапазонів вимірювачів напруги змінного струму, а також надано максимальні та мінімальні гарантовані на 1 рік похибки вимірювання з наведенням діапазонів напруг та частот, в яких ці похибки мають місце [1 – 3].

Таблиця 1

Характеристики провідних вимірювачів напруги змінного струму

Пристрій	Діапазон змінної напруги	Діапазон частоти	Похибка вимірювання, 1 рік
Datron Wavetek 1281	100 mV to 1000V	40 Гц to 1 МГц	0.006%(1-100V, 100Гц-2кГц) до 1% (300кГц-1МГц)
Fluke 8508A	2 mV to 1050 V	1 Гц to 1 МГц	0.006%(2-200V, 100Гц-2кГц) до 1% (2-200V, 300кГц-1МГц)
Fluke 8845A, 8846A	100 mV to 750 V	3 Гц to 300 КГц	0.06% (10Гц-20кГц) до 4% (100-300 кГц)
H4-12	0.2 mV до 1100 V	20 Гц до 1 МГц	0.0012%(1-30V,0.2-20кГц) до 0.05%(0.2-200mV,300-500кГц та 100-1100V, 50-100кГц)
Keithley 2000, 2010	100nV to 750V	3 Гц – 300кГц	0.06%(100V-750V, 10Гц-20кГц) до 4%(100V-750V, 100-300кГц)
Keithley 2001	100nV to 775V	1 Гц – 2 МГц	0.03%(0.1-10кГц, 200mV-2V) до 7% (20V, 1-2МГц)
Keithley 2002	100nV to 775V	1 Гц – 2 МГц	0.02% (0.1-10кГц, 200mV-2V) до 7% (20V, 1-2МГц)
Keithley 2015, 2015-P, 2016, 2016-P	100nV to 750V	3 Гц – 300кГц	0.06%(10Гц-20кГц) до 4% (100-300кГц)
Agilent 34401A	100mV-750V	3Гц-300кГц	0.06%(10Гц-20 кГц) до 4% (100-300 кГц)
Agilent 3458	10 mV to 1000 V	1 Гц to 10 МГц	0.007% (100mV-10V, 1Гц-1кГц) до 15% (100mV-10V,8-10МГц)
B9-27	10 mV–150 V	5 Гц–20 МГц	0.5%(5Гц-1МГц) до 5% (10-20МГц)
B9-14	0.5V-1000V	10Гц-30МГц	0.01%(3-30V, до 100кГц) до 1.5% (0.5-3V, до 100МГц)
B9-25	10 mV–10 V	5 Гц–200 МГц	0.05% (20Гц-100кГц) до 5% (100-200МГц)
B7-83	10 mV до 100 V	5 Гц до 1500 МГц	0.2 % (в номінальній області частот) до 5% (в розширеній області частот)

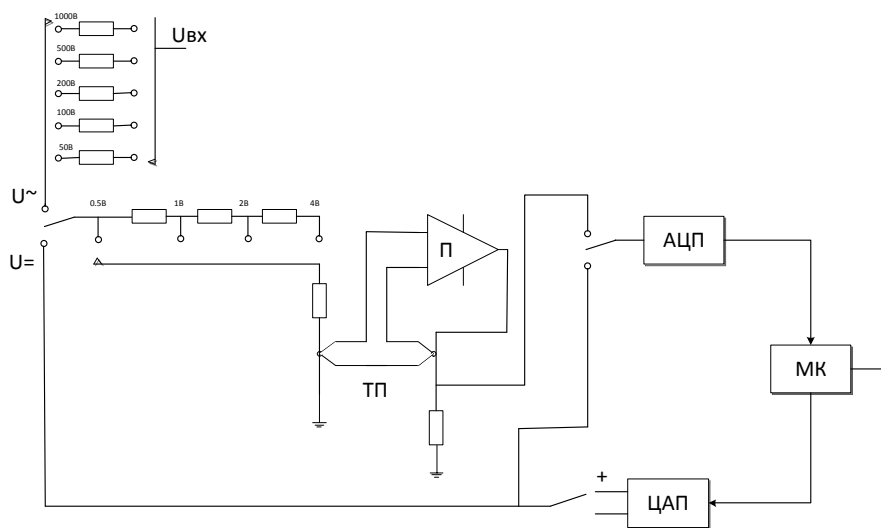


Рис. 1. Структурна схема пристрою вимірювання напруги змінного струму

Недоліком усіх пристроїв є вузький частотний діапазон, в якому забезпечується похибка до 100 ppm (0.01%). Це пояснюється тим, що більшість з наведених пристроїв працює за вибірками миттєвих значень використовуючи АЦП, що не дає можливості отримати бажану широкополосність.

## 2. Структурна схема вимірювача напруги змінного струму

Альтернативою вказаним пристроям є новий вольтметр в широкому діапазоні частот (до 100 МГц). Структурна схема пристрою наведена на рис. 1. На схемі позначено: ТП – диференційний термоперетворювач; П – підсилювач; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач; МК – мікроконтроллер.

Схема працює наступним чином. Шукану напругу змінного струму знаходять за допомогою напруги постійного струму, тому в першому такті відбувається перетворення напруги змінного струму  $U_{\sim}$ , що проходить попереднє масштабування та подається на вхід термоперетворювача, де на виході створюється певне значення ЕРС, яке передається далі у коло. Відповідно до значення поданої напруги змінного струму далі створюється значення напруги постійного струму, що буде створювати значення ЕРС близьке до поданої змінної напруги.

В другому такті відбувається перетворення одиниці напруги постійного струму. Реальна характеристика перетворення термоперетворювача є невідомою, тому в другому такті відбувається її визначення за інтерполяційним методом. Для цього певне відоме значення напруги постійного струму  $U^{\sim}$  подається на вхід термоелектричного перетворювача, де створюється електрорушійна сила. Отримане значення, яке створюється на виході термоперетворювача підсилюється за допомогою підсилювача та вимірюється за допомогою АЦП. Також для змен-

шення похибки вимірювання на вхід АЦП подаються значення постійної напруги, створені безпосередньо на виході ЦАП.

Після чого в блоці інтерполяційної корекції відбувається визначення реальної характеристики перетворювача за інтерполяційним алгоритмом. Для цього використовується створений і записаний в мікроконтроллері масив даних, в якому значення створеної термоелектричної сили залежать від поданої постійної та змінної напруги. Необхідно врахувати те, що через присутність похибки переходу від напруги постійного струму до напруги змінного струму характеристики термоперетворювача для додатних та від'ємних значень напруг не співпадають через термоелектричні ефекти Томсона та Пельтье (рис. 2), тому повинні визначатись окремо в окремому такті перетворення.

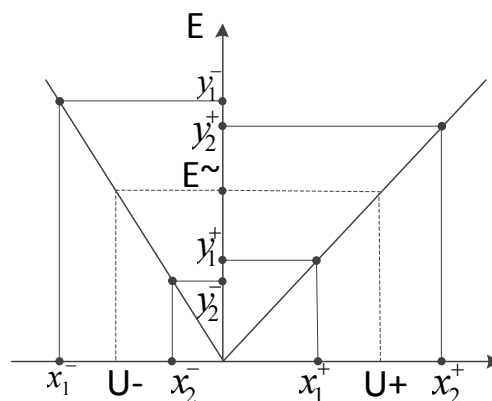


Рис. 2. Лінійна характеристика термоперетворювача

Напруга змінного струму в такому випадку буде знайдена наступним чином:

$$U_{\sim} = \frac{|U^{-}| + |U^{+}|}{2} \quad (1)$$

Зазвичай для прецизійного вимірювання напруги змінного струму за допомогою термоперетворювача використовується метод нульового термокомпаруван-

ня, який передбачає прирівнювання створеної електрорушійної сили на додатній та змінній напрузі, що виникла при дії змінної напруги. Такий метод потребує значного часу для зрівноваження, за який характеристики прямого каналу можуть змінити свої значення, та виміряна при цьому напруга не буде відповідати початковій змінній напрузі. Підчас зрівноваження змінюються параметри кола та створюються додаткові похибки від нестабільності елементів кола, крім того метод потребує час на встановлення параметрів, але встановлення параметрів точніше, ніж часова похибка неможливо. Перевага використаного інтерполяційного методу перед методом нульового термокомпарування полягає у тому, що інтерполяційний метод скоротить час вимірювання, хоча і збільшиться кількість вимірювань, але з точки зору перехідних процесів через те, що значення відразу підбирається дуже близьким, перехідні процеси є меншими бо термопара є прогрітою. Передача напруги буде дуже близькою до заданого значення і буде відрізняться лише на похибку ланки.

Схема на рис. 1 побудована на базі лінійного перетворювача, характеристика перетворення якого повинна бути близькою до лінійної. Лінійний перетворювач був обраний на зміну широко використовуваному квадратичному тому, що для реалізації інтерполяційного алгоритму для лінійного термоперетворювача необхідна менша кількість вузлових точок і це скорочує кількість вимірювань, що в свою чергу зменшує час на вимірювання та перехідні процеси.

Для визначення невідомої характеристики перетворення лінійного термоперетворювача береться декілька поточних значень функції (не менше двох), отриманих експериментально підчас дослідження на постійній напрузі високої точності (рис. 2, табл. 2).

Таблиця 2

Значення вузлових точок для визначення лінійної характеристики термоперетворювача

$x_1^-$	$x_2^-$	$x_1^+$	$x_2^+$
$y_1^-$	$y_2^-$	$y_1^+$	$y_2^+$

Використовуючи інтерполяційні поліноми визначають за методом Лагранжа залежність, яку представляють у вигляді полінома першого порядку. Далі, маючи два рівняння поліномів перших порядків для додатних та від'ємних значень напруг та значення ЕРС шуканої напруги змінного струму за формулою (1) знаходять значення невідомої напруги  $U^{\sim}$ .

Зведення ідеальної залежності до поліноміальної супроводжується похибками апроксимації, що будуть залежати від вибору вузлових точок для здійснення інтерполяції (рис. 2). Чим меншим буде інтервал між вузловими точками  $h$ , тим ближчі будуть розташовані експериментальні точки і тим точніше буде знайдена залежність на інтервалі. Отримані рівняння повинні бути незалежними, це можливо при віддаленні реперних точок. Якщо  $h = 0$ , то

визначити поліноміальну характеристику буде неможливо. Але, з другого боку, при віддаленні реперних точок збільшується похибка апроксимації в інтервалі між реперними точками.

У випадку, якщо немає можливості використати лінійний термоперетворювач, у якого характеристики термопар максимально співпадають і функція перетворення всього пристрою максимально наближена до лінійної, альтернативним є використання квадратичного термоперетворювача. Алгоритм інтерполяційної корекції похибок буде аналогічним, до вище описаного для лінійної характеристики, але з тою відмінністю, що для квадратичної функції необхідно мати набір щонайменше трьох вузлових точок окремо для додатних та від'ємних значень напруг (рис. 3, табл. 3).

Таблиця 3

Значення вузлових точок для визначення квадратичної характеристики термоперетворювача

$x_1^- = x_2^- - \Delta x_2^-$	$x_2^-$	$x_3^- = x_2^- + \Delta x_2^-$
$y_1^- = y(x_1^-)$	$y_2^- = y(x_2^-)$	$y_3^- = y(x_3^-)$
$x_1^+ = x_2^+ - \Delta x_2^+$	$x_2^+$	$x_3^+ = x_2^+ + \Delta x_2^+$
$y_1^+ = y(x_1^+)$	$y_2^+ = y(x_2^+)$	$y_3^+ = y(x_3^+)$

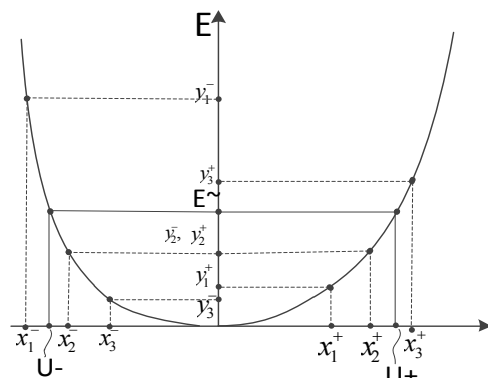


Рис. 3. Квадратична характеристика термоперетворювача

Розрахунковим шляхом було визначено, що оптимальним відстанню між реперними точками для здійснення інтерполяції поліномами другого порядку є 3 – 5% від відстані між центральною реперною точкою і початком координат, так як в цих межах похибка апроксимації  $\Delta_{y_{max}}$  не перевищує значення у 10 ppm (0,001%) [4]. Також аналіз можливості розширення інтервалу апроксимації шляхом екстраполяції, що полягав у визначенні при яких значеннях  $x$  в межах  $x_1 \geq x \geq x_3$  відхилення ідеальної характеристики від поліноміальної, отриманої шляхом інтерполяції, не перевищує  $\Delta_{y_{max}}$  для кожного інтервалу  $[x_1; x_3]$  показав, що розширення меж екстраполяції дозволяє збільшити інтервал апроксимації. За умови рівності інтервалу 6%, інтервал екст-

раполяції складає 7,08%.

Важливо зазначити, що у випадку, коли використовується квадратичний термоперетворювач необхідна реалізація функції добування кореня квадратичного, закладена у мікроконтроллер або у окремому блоці. Схема рис. 1 має АЦП, ЦАП та підсилювач. В якості підсилювача використовується підсилювач фірми Analog Devices AD8629.

Так як ЦАП має власний вихідний опір, то разом з вхідним опором термопары він може утворювати подільник напруги, що викликати втрати. В запропонованій структурній схемі вихід ЦАП вимірюється АЦП. Необхідно використовувати точний багаторазрядний АЦП (наприклад ADS1230), тому що це зменшує вимоги до ЦАП.

В якості вхідного пристрою виступають добавки у вигляді перемикачів та змінні добавочні опори. Альтернативою такому вхідному пристрою є набір термоперетворювачів (рис. 4). В якості перемикачів може слугувати транзисторний мультиплексор. Якщо мультиплексор буде напівпровідниковим, то його опір буде урахуватись при тестуванні робочого опору на постійній та змінній напрузі та буде калібруватися. Розширення на високі межі є окремим набором додаткових опорів, що не калібрують.

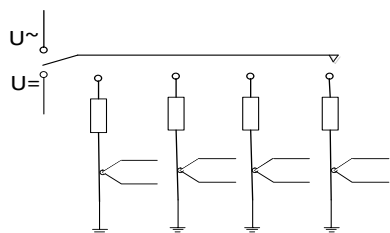


Рис. 4. Вхідний пристрій

Також необхідно урахувати те, що кожен резистор у схемі матиме частотну похибку, що залежатиме від діапазону частот. Якщо елементи будуть підключені послідовно, то компенсація частотної похибки на одній межі може зашкодити компенсації на іншій. Тому необхідно використовувати компенсаційний конденсатор (рис. 5). Для того, щоб пристрій був самокаліброваним необхідно якнайменш 2 головки термоперетворювачів. Тоді спочатку метрологічні характеристики встановлюватимуться для опорного еталонного перетворювача напруги на номінальну напругу експериментально розрахунковим шляхом в

необхідному діапазоні частот, а потім експериментально розрахунковим шляхом передаватимуться на інші термоелектричні перетворювачі від однієї до суміжної напруги у всьому діапазоні напруг і частот.

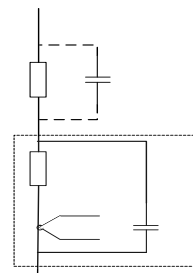


Рис. 5. Компенсація частотної похибки

## Висновок

Представлена схема нового перетворювача напруги змінного струму в широкому діапазоні частот. Основним вузлом запропонованої структурної схеми є термоелектричний перетворювач. Корекція похибок відбувається за допомогою інтерполяційного алгоритму. Розширення меж вимірювання пристрою забезпечено за допомогою набору додаткових опорів. Такі удосконалення забезпечать похибку вимірювання пристрою менше 100 ppm (0.01%).

## Список літератури

1. Гуревич М.Л. Комплект електротеплових перетворювачів В9-14 для високоточного вимірювання сигналів змінної напруги низьких та високих частот / М.Л. Гуревич, А.В. Чермохин // Радиоизмерения и электроника. – 2007. – № 13. – С. 10-16.
2. Гуревич М.Л. Новый высокочастотный цифровой вольтметр В7-83 для точного измерения напряжения и мощности непрерывных и импульсно-модулированных сигналов / М.Л. Гуревич, А.В. Чермохин // Радиоизмерения и электроника. – 2007. – № 13. – С. 5-10.
3. Гуревич М.Л. Комплект широкополосных измерительных перетворювачів напруги В9-25 / М.Л. Гуревич // Радиоизмерения и электроника. – 2006. – № 12. – С. 6-12.
4. Туз Ю.М. Похибки термокомпарування зі застосуванням методів впроксимації / Ю.М. Туз, О.М. Кривченкова, О.В. Синьоока. // Механіка гіроскопічних систем. – 2010. – № 21. – С. 49-63.

Надійшла до редколегії 17.08.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.В. Куц, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

## ВЫСОКОТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НАПЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Ю.М. Туз, О.М. Кривченкова

В приведенной статье исследованы характеристики существующих на данное время в мире измерителей напряжения переменного тока. С учетом недостатков существующих устройств предложена структурная схема более точного и более широкополосного измерителя.

Ключевые слова: переменное напряжение, термопреобразователь, интерполяция.

### THE PRECISION MEASUREMENTS OF AC VOLTAGE IN WIDE FREQUENCY RANGE

Yu.M. Tuz, O.M. Kryvchenkova

Characteristics of the existing precision AC voltage instruments are given in the following article. Considering all shortcomings of existing devices the structure chart of the new more accurate and higher bandwidth device is given in the article.

Keywords: AC voltage, thermal converter, interpolation.