

УДК 623.004.67

В.А. Бородавка

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ МАЛИХ ЗНАЧЕНЬ СТРУМУ, НАПРУГИ ТА ПОТУЖНОСТІ

В статті розглянуті питання визначення точності вимірювання малих значень струму, напруги і потужності за допомогою термоелектричного компаратора з межами вимірювання по струму від 0,1 до 20 мА, по напрузі – від 0,2 до 2 В і по потужності – при тих же значеннях струму і напруги і коефіцієнта потужності, близькому до одиниці.

Ключові слова: термоелектричний компаратор, струм, напруга, потужність.

Вступ

Постановка задачі. У електричних вимірюваннях, радіоелектроніці, магнітних вимірювань широке поширення набули прилади для вимірювання малих значень струму, напруги і потужності. Використання в Збройних Силах України приладів для вимірювання малих значень струму, напруги і потужності зумовило необхідність створення у складі пересувних лабораторій виміральної техніки апаратури щодо їх повірки. Тому питання визначення точності вимірювання малих значень струму, напруги і потужності приладів для вимірювання малих значень струму, напруги і потужності, є важливою науково-технічною задачею, актуальність якої підтверджується необхідністю, підвищення якості повірки мікроамперметрів і мілівольтметрів з межами вимірювання по струму від 0,1 до 20 мА, по напрузі – від 0,2 до 2 В і по потужності – при тих же значеннях струму і напруги і коефіцієнта потужності, близькому до одиниці на зразках озброєння та військової техніки (ОВТ) Збройних Сил та інших військових формувань України для підтримання їх у боєздатному стані.

Аналіз літератури. У джерелі [1] розглядаються характеристики похибок вимірювань, форми подання, засоби використання зразків продукції при контролі їх параметрів. В літературі [2 – 4] визначено теоретичні та практичні відомості про засоби та методи обробки експериментальних даних при вимірюваннях. Нажаль, в цих роботах не проаналізовано питання визначення точності вимірювання малих значень струму, напруги і потужності приладів для вимірювання малих значень струму, напруги і потужності.

Метою статті є визначення можливості проведення повірки міліамперметрів, вольтметрів, ватметрів з необхідним запасом по точності на зразках озброєння та військової техніки (ОВТ) Збройних Сил та інших військових формувань України для підтримання їх у боєздатному стані за допомогою компаратора для мікроамперметрів і мілівольтметрів на змінному струмі з межами вимірювання по струму від 0,1 до 20 мА, по напрузі – від 0,2 до 2 В і по потужності – при тих же

значеннях струму і напруги і коефіцієнта потужності, близькому до одиниці.

Основний матеріал

Передача значень від еталонних заходів постійного струму приладам змінного струму здійснюється методом термоелектричного компарування. В настояній час існує установка з термоелектричним компаратором для мікроамперметрів і мілівольтметрів на змінному струмі при частотах до 200 кГц. При розробці універсальної установки постійного і змінного струму в її комплект була введена апаратура, що забезпечує перевірку міліампер метрів, вольтметрів і ватметрів в звуковому діапазоні частот з межами вимірювання по струму від 0,1 до 20 мА, по напрузі – від 0,2 до 2 В і по потужності – при тих же значеннях струму і напруги і коефіцієнта потужності, близькому до одиниці. На розробленій установці вказані прилади повіряють за допомогою термоелектричного компаратора типу КТЕМ-1. Компаратор виконаний за принципом різночасного порівняння. Його вимірвальний ланцюг за допомогою перемикача П 1 по черзі включають в ланцюзі змінного і регульованого постійного струмів. Про рівність значень цих струмів судять по рівності вихідних ТДЕС двох компарируючих термоперетворювачів. Наявність двох перетворювачів включених по мостовій схемі, обумовлено застосуванням сумарно - різницевого методу з подальшим квадратичним перетворенням, що здійснюється при вимірюванні потужності. При цьому виді вимірювання до вершин діагоналі, паралельно якій включений шунт підводять струм. Відомо, що при ідентичних і квадратичних характеристиках обох термоперетворювачів різниця вихідних ТДЕС є пропорційною потужності:

$$e = kUI \cos \varphi, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт перетворення; U і I – вимірювані напруга і струм; φ – кут зрушення фаз між струмом і напругою.

Компаратор можна використовувати також як датчик напруги при перевірці електронних мілі-

мікрвольтметрів з малим власним споживанням. Для цього в ланцюг струму компаратора включають безреактивний резистор R_1 , що калібрує спад напруги U , якій створюється на цьому резисторі відомим (зміряним) струмом I та подається на прилад, що повіряється. Значення напруги, без урахування вхідного опору вольтметра, що повіряється, визначають з виразу:

$$U = IR_1 \cdot (1 + \omega^2 \cdot \tau_1^2 / 2), \quad (2)$$

де R_1 – опір резистора, що калібрується, на постійному струмі; τ_1 – його постійна часу; ω – кутова частота. Відносна похибка визначення напруги γ_U при цьому має вигляд:

$$\gamma_U = (1 + \omega^2 \cdot \tau_1^2 / 2) \cdot (\gamma_R + \gamma_I), \quad (3)$$

де γ_R і γ_I – відносні похибка вимірювання опору резистора, якій калібрується, і струму в ньому.

Для розширення меж вимірювання по струму в комплекті компаратора є набір резисторів, що калібруються, з набором шунтів. Похибка вимірювань за допомогою компараторів визначається похибками: переходу від постійного струму до змінного; вимірювання значення постійного струму, еквівалентного вимірюваному значенню змінного струму; від нечутливості нульового показника; похибками, обумовленими реактивністю елементів схеми і недоліками монтажу. Високу чутливість компаратора зумовлена специфікою вимірювання малих значень струму, напруги і потужності. Застосування повітряних багатоеlementних перетворювачів, які використовуються у відомих термоелектричних компараторах потужності належного ефекту не дає. Тому в компараторі були використані вакуумні термоперетворювачі. Нульовий показник обрано з урахуванням заданої похибки вимірювання (0,1%). Зв'язок між відносною похибкою вимірювання струму автокомпенсаційний і чутливістю нульового показника встановлює співвідношення:

$$\frac{p_a}{I} = \frac{p_a}{S_a S_{\text{кл}} I}, \quad (4)$$

де p_a – зміна відхилення показника, яку викликано зміною значення струму; S_a – чутливість нульового показника; $S_{\text{кл}} = 2\text{кІ}$ – чутливість автокомпенсаційного перетворювача. Задаючись допустимою похибкою компарування (0,01%), значенням коефіцієнта комперирующего перетворювача для обраної робочої точки вольтамперної характеристики термоперетворювача і мінімальним значенням вимірюваного струму, визначаємо, що чутливість нульового показника повинна бути не менше $5 \cdot 10^7$ дел/а. У даному компараторі в якості нульового показника

застосовується автокомпенсаційний мікрвольтнаоамперметр з фото зусиллям, чутливість якого $S = 5 \cdot 10^7$ дел/а. Для зручності роботи при включенні компаратора в ланцюг установки в нього вбудована частина нульового показника з перемикачем чутливості та електричним коректором нуля, а вихідний прилад розташовано у вимірювальному стенді установки. Крім того, в компараторі передбачено можливість приєднання зовнішнього гальванометра у разі роботи поза ланцюгом пристрою. Режим роботи термоперетворювача в компараторі обраний таким чином, що в їх нагрівачах струми не перевищують $0,1 \pm 0,2$ мА. Тому виявилось можливим не застосовувати спеціальні засоби для захисту термоперетворювача від перевантажень. Відносну похибку місткостей витoku визначимо з виразу:

$$\gamma_c = (I_k - I) / I \approx r_k \cdot \omega \cdot C_2, \quad (5)$$

де I_k і I – струм, що протікає через компаратор і прилад, якій повіряється; r_k – опір струмового ланцюга компаратора.

З підвищенням частоти відмінність в свідченнях приладу, що повіряється, і компаратора збільшуються. Для зменшення похибки від впливу витoku місткості термоперетворювача з резисторами ланцюга балансування по струму і напрузі поміщені в екран, завдяки чому було знизити місткість екрану щодо токоведущих частин до 12 пФ, а місткість сполучних провідників від затисків приєднання приладу, якій повіряється, до термоперетворювачів в компараторі складає близько 30 пФ.

Результат вимірювання на постійному струмі залежить від опору ізоляції. Відносна похибка витoku через опір ізоляції має вигляд:

$$\gamma_y^1 = (I_{\text{ізол}} / I_{\text{мін}}) \cdot 100 = (U_{\text{макс}} / R_{\text{ізол}}) (1 / I_{\text{мін}}) 100\%, \quad (6)$$

де $I_{\text{ізол}}$ – струм витoku через ізоляцію; $I_{\text{мін}}$ – мінімальний струм ланцюга; $I_{\text{макс}}$ – максимальне падіння напруги в послідовному ланцюзі компаратора; $R_{\text{ізол}}$ – опір ізоляції ланцюга.

При вимірюванні потужності до термоперетворювача пред'являють ряд специфічних вимог, а саме: вони повинні мати ідентичні та квадратичні вольт-амперні характеристики. Реактивність ланцюгів в цьому випадку приводить до появи відносної кутової похибки. Оскільки неможливо вибрати два термоперетворювача з абсолютно ідентичними характеристиками, в компараторі передбачені змінні резистори, які служать для вирівнювання опорів плечей моста (балансування по напрузі), і резистори для поєднання вольт-амперних характеристик термоперетворювачей балансування по струму). Не-квадратичність вольтамперних характеристик цих

термоперетворювачей не повинна перевищувати 0,1%. Відносну кутову похибку компаратора потужності визначимо з виразу:

$$\gamma_{\varphi} = \cos \varphi_n - \cos \varphi_d / \cos \varphi_n = 1 - \cos(\gamma - \delta) + \operatorname{tg} \varphi \sin(\gamma - \delta), \quad (7)$$

де φ, δ, γ – кути зрушення фаз; φ – між струмом I і напругою U ; δ – струмом I_u напругою U ; γ – між струмом I_i і струмом I .

Ця похибка позначається тим більше, чим більше кут зрушення фаз φ між струмом і напругою. При $\varphi = 0$ відносну кутову похибку визначають тільки як $\cos(\gamma - \delta)$, яка близький до одиниці.

Конструктивно компаратор є переносним приладом, на верхній панелі якого змонтовані затиски для приєднання приладів, що повіряються, і коаксіальні роз'єми для живлення ланцюгів компаратора змінним і постійним струмом. Для живлення ланцюгів струму і напруги компаратора застосовують спеціальні генератори і підсилювачі малої потужності, розраховані на роботу в діапазоні частот 40 Гц - 20 кГц. Коефіцієнт нелінійних спотворень при номінальному значенні вихідної потужності не перевищує 2%. Нестабільність вихідних параметрів підсилювачів не гірша $\pm 0,05\%$ за 3 мін. Живляться анодні і накальні ланцюги підсилювачів від джерел живлення, що серійно випускаються.

Експериментально похибки компаратора оцінено при комплексній і поелементній повірці його для передбачених видів вимірювання.

Для оцінки похибки компарування струму і напруги в якості зразкового пристрою використовують термоелектричний компаратор, у якого похибка порівняння змінного струму (напруги) з постійним не перевищує $\pm 0,1\%$ при частотах до 200 кГц. Тому похибка цієї установки в даному діапазоні 40 Гц – 20 кГц мала в порівнянні з очікуваною похибкою компаратора, якій має складнішу схему у зв'язку з можливістю зміни потужності. Щоб виявити характер зростання частотної похибки компаратора, його було випробувано в ширшому діапазоні частот.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ И МОЩНОСТИ

В.А. Бородавка

В статье рассмотрены вопросы определения точности измерения малых значений тока, напряжения и мощности с помощью термоэлектрического компаратора с пределами измерения по току от 0,1 до 20 мА, по напряжению – от 0,2 до 2 В и по мощности – при тех же значениях тока и напряжения и коэффициента мощности, близкому к единице.

Ключевые слова: термоэлектрический компаратор, ток, напряжение, мощность.

DETERMINATION OF EXACTNESS OF MEASURING OF SMALL VALUES OF CURRENT, TENSION AND POWER

V.A. Borodavka

In the articles the questions of determination of exactness of measuring of small values of current, tension and power are considered by thermo-electric компаратора with the limits of measuring on a current from 0,1 to 20 mA, on tension – from 0,2 to 2 V and on power – at those values of current and tension and power-factor, to near to unit.

Keywords: thermo-electric comparator, current, tension, power.

ВИСНОВКИ

1. За результатами випробувань встановлено, що частотна похибка при вимірюванні струму в діапазоні частот 60-20000 Гц не перевищують 0,1%, а при 60000 Гц складає 0,4%.

2. Експериментально доведено, що застосування окремих додаткових резисторів замість набору їх у вигляді магазину істотно зменшує похибку вимірювання напруги.

3. Для оцінки похибки компаратора при роботі в режимі калібратора напруг його було повірено поелементно. При цьому при використанні відомостей про похибку вимірювання струму, визначено похибку підгонки резистора, якій калібрується, і його залишкову реактивність.

4. Дійсні значення опорів резисторів, які калібруються, і значення їх постійних за часом виміряне з похибкою 0,05%.

5. Проведені дослідження дозволяють зробити висновок, що розглянутий компаратор може забезпечити повірку міліамперметрів, вольтметрів, ватметрів з необхідним запасом по точності на зразках озброєння та військової техніки (ОВТ) Збройних Силах та інших військових формуваннях України для підтримання їх у боездатному стані.

Список літератури

1. МИ 1317-86. ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров. – М.: Изд-во стандартов. – 30 с.
2. Володарский Е.Т. Планирование и организация измерительного эксперимента / Е.Т. Володарский, Б.Н. Малиновский, Ю.М. Туз. – К.: Вица шк. Головне вид-во, 1987. – 280 с.
3. Грановский В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В.А. Грановский, Т.С. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
4. Беляев Б.М. Зразкові засоби вимірювань напруги і сили змінного струму, методи їх перевірки / Б.М. Беляев, М.Н. Фрідман. – К.: Видавництво стандартів, 1981. – 218 с.

Надійшла до редколегії 1.11.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.