

Метрологія та вимірювальна техніка

УДК 623.004.6

І.С. Кіраш, В.А. Єрмолаєв

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО КОМПАРАТОРУ

В статті визначена похибка вимірювання при переході від постійного струму до змінного, вимірювані значень постійної постійного струму, що обумовлена реактивністю елементів схеми.

Ключові слова: термоелектричний компаратор, похибка, коефіцієнт, струм

Вступ

Постановка задачі. При розробці універсальної установки постійного та змінного струму була введена апаратура, що забезпечує повірку міліамперметрів, 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 в тих же значеннях струму і напруги і коефіцієнта потужності, близькому до одиниці. Існуюче забезпечення єдності вимірювань малих значень струму, напруги і потужності, зумовило необхідність створення апаратури для їх повірки, щодо проведення робіт в галузі важкого машинобудування тому питання, які присвячені аналізу існуючих похибок вимірювання напруги змінного струму при переході від постійного струму є важливою науково-практичною задачею, актуальність якої підтверджуємо необхідністю забезпечення єдності вимірювань електричної напруги в Україні.

Аналіз літератури. В розглянутих літературних джерелах [1 – 5] описуються існуючі еталони одиниць електричної напруги в різноманітних діапазонах. Так в [1] розглянуто державний еталон одиниці електричної сили вольта, в [2] розглянуто Державний еталон одиниць електричної напруги змінного струму в діапазоні від 1 до $1,2 \times 330/\sqrt{3}$ кВ. В [3] розглянутий Державний еталон одиниці електричної напруги від 0,1 до 1000 В змінного струму в діапазоні частот від 20 до 1 МГц. В [4] розглянуті додаткові двосторонні звірення державних еталонів України і Росії. В [5] розглянуті еталони Німеччини та США, на жаль в цих джерелах не проводилось визначення похибки вимірювання напруги змінного струму при переході від постійного струму.

Метою статті є визначення похибки змінного струму при переході від постійного струму.

Основний матеріал

Розглянемо установку, за допомогою якої здійснили перехід від постійного до змінного струму, яка розроблена на базі КТЕМ-1. Компаратор вико-

наний за принципом різночасного порівняння. Його вимірювальний ланцюг за допомогою перемикача П1 по черзі включають в ланцюзі змінного і регульованого постійного струмів. Про рівність значень цих струмів судять по рівності вихідних Т.Д.Е.С. компаруючих термоперетворювачів Т1 і Т2. Відомо, що при ідентичних і квадратичних характеристиках обох термоперетворювачів різниця вихідних Т.Д.Е.С. є пропорційна потужності

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

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

Компаратор також можна використовувати як датчик напруги при повірці електронних мілі- і мікровольтметрів з малим власним споживанням. Значення напруги без урахування вхідного опору вольтметра, що повіряється, визначають з виразу

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

де R_1 – опір резистора, що калібрується на постійному струмі; τ – його постійна часу; ω – кутова частота.

Похибка визначення напруги γ_U має вигляд

$$\gamma_U = 1 + \omega^2 \cdot \tau_1^2 / 2 \cdot \gamma_R + \gamma_1, \quad (3)$$

де γ_R і γ_1 – відносні погрішності опору резистора, що калібрується, і струму в ньому.

Специфіка вимірювання малих значень струму, напруги і потужності зумовила деякі особливості даного компаратора. Перш за все потрібно було забезпечити достатньо високу його чутливість.

Очевидно, застосування повітряних багатоелементних перетворювачів типу ТЕМ, використовуваних у відомих термоелектричних компараторах потужності в нашому випадку належного ефекту не дає навіть в поєднанні з найчутливішими нульовими покажчиками. Тому в компараторі були використані вакуумні термоперетворювачі типу ТВБ-1, що серійно випускаються.

Дослідження показали, що ці перетворювачі достатньо стабільні протягом часу компарування. Оскільки Т.Д.Е.С. термоперетворювачів ТВБ-1 значно залежить від полярності струму в нагрівачі, були відібрані екземпляри, у яких вказана залежність не перевищує $\pm 0,01 - 0,02\%$.

Нульовий показчик вибраний з урахуванням заданої похибки вимірювання ($0,1\%$). Зв'язок між відносною похибкою вимірювання струму компаратором і чутливістю нульового показчика встановлює співвідношення

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

де p_a – змінна відхилення показчика, викликане зміною значення струму; S_a – чутливість нульового показчика; $S = 5 \cdot 10^7$ под/а – чутливість компаруючого перетворювача.

Звідси, задаючись допустимою похибкою компарування ($0,01\%$), значенням коефіцієнта компаруючого перетворювача для вибраної робочої крапки вольт-амперної характеристики термоперетворювача і мінімальним значенням вимірюваного струму, визначаємо, що чутливість нульового показчика повинна бути не менше $S = 5 \cdot 10^7$ под/а. У даному компараторі як нульовий показчик застосований автокомпенсаційний, що серійно випускається, мікрвольтнаноамперметр Р325 з фотозусиллям, чутливість якого $S = 5 \cdot 10^7$ под/а.

Ємність еталонного приладів і того що перевіряється, щодо землі не вносять до похибки в результат вимірювання. Похибку унаслідок наявності ємностей витоку 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, що перевіряється, відповідно; r_k – опір струмового ланцюга компаратора.

Ємність екрану щодо токоведучих частин вдалося понизити до 12 пФ, а ємність сполучених провідників від затисків приєднання приладу, що перевіряється, до термоперетворювачів в компараторі складає близько 30 пФ.

Результат вимірювання на постійному струмі залежить також від опору ізоляції. Похибка витоку γ_y^1 через опір ізоляції має вигляд

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

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

Реактивність ланцюгів у цьому випадку приводить до появи кутової похибки, тобто до відмінності

зрушення фаз як між струмами в термоперетворювачах, пропорційними вимірюваним струму і напрузі I_i і I_n , так і між підведеними до компаратора струмом і напругою, тому $\cos I_i I_n = \cos \varphi$.

Оскільки неможливо вибрати два термоперетворювача з абсолютно ідентичними характеристиками, в компараторі передбачені змінні резистори, що служать для вирівнювання опорів плечей моста R_u (балансування по напрузі), і резистори для поєднання вольтамперних характеристик термоперетворювачів R_u (балансування по струму). Неквадратичність вольтамперних характеристик подібних термоперетворювачів не повинна перевищувати $0,1\%$.

Кутову похибку компаратора визначимо з виразу

$$\gamma_\varphi = \cos \varphi_n - \frac{\cos \varphi_\delta}{\cos \varphi_n} = 1 - \cos \gamma - \delta + \text{tg} \varphi \sin \gamma - \delta, \quad (7)$$

де φ ; δ і γ – кути зрушення фаз; φ – між струмом I і напругою U ; δ – між струмом I_n і 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 $\varphi = 0$ кутову похибку визначають тільки $-\cos \gamma - \delta$, який близький до одиниці.

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 перетворень при номінальному значенні вихідної потужності не перевищує 2%. Нестабільність вихідних параметрів підсилювачів не гірша $\pm 0,05\%$ за 3 хв. Живляться анодні і накальні ланцюги підсилювачів від джерел живлення, що серійно випускаються.

Відповідно до повірочної схеми (приклад на рис. 1), передача значень від еталонних заходів постійного струму приладам змінного струму здійснюється методом термоелектричного компарування.

Висновки

1. Проведені дослідження дозволяють зробити висновок, що розглянутий компаратор в основному може забезпечити повірку при випускненні промисловістю міліамперметрів, вольтметрів і ватметрів з необхідним запасом точності.

2. Похибка вимірювань за допомогою компаратора визначається:

- при переході від постійного струму до змінного;
- при вимірюванні значення постійного струму еквівалентного вимірюваному значенню струму;
- від нечутливості нульового показчика;
- похибками, обумовленими реактивністю елементів схеми (приклад на рис. 2).

3. Експериментально похибки компаратора оцінені при комплексній і поелементній його перевірі, для передбачених видів вимірювання.

Державний еталон одиниці електричної напруги від $0,1 \pm 1000$ В в діапазоні частот 20 ± 10^6 Гц з осн. системною похибкою $1 \cdot 10^{-5} \pm 3,5 \cdot 10^{-4}$
Робочий еталон напруги змінного струму згідно ГОСТ 8.184-76
Комплект перетворювачів 1^{10} і 2^{10} розрядів ПНТЕ-6А з діапазоном частот 20 ± 10^7 Гц з додатковою осн. похибкою $1 \cdot 10^{-4} \pm 3 \cdot 10^{-3}$
Робочий ТПН

Рис. 1. Повірочна схема – приклад 1

Державний еталон одиниці електричної напруги від $0,1 \pm 1000$ В в діапазоні частот 20 ± 10^6 Гц з осн. системною похибкою $1 \cdot 10^{-5} \pm 3,5 \cdot 10^{-4}$
Робочий еталон напруги змінного струму згідно ГОСТ 8.184-76
Комплект перетворювачів 1^{10} і 2^{10} розрядів ПНТЕ-6А з діапазоном частот 20 ± 10^7 Гц з додатковою осн. похибкою $1 \cdot 10^{-4} \pm 3 \cdot 10^{-3}$
Робочий ТПН

Рис. 2. Повірочна схема – приклад 2

Список літератури

1. Державний еталон одиниці електрорушійної сили вольта / В.В. Копшин, О.Г. Бутенко, В.М. Кікало, А.П. Кривохвост // Український метрологічний журнал. – 1999. – Вип. 3. – С. 19-22.

2. Копшин В.В. Державний еталон одиниць електричної напруги змінного струму в діапазоні від 1 до $1,2 \times 330/\sqrt{3}$ кВ та коефіцієнта масштабного перетворення електричної напруги на частоті 50 Гц. / В.В. Копшин, В.М. Кікало, О.Г. Бутенко. – 2000. – Вип. 1. – С. 42-46.

3. Державний еталон одиниці електричної напруги від 0,1 до 1000 В змінного струму в діапазоні частот від 20 до 1 МГц: Доповідь ДССП. – К.: УкрЦСМ, 2001.

4. Додаткові двосторонні звірення державних еталонів України і Росії з відтворення одиниці напруги змінного струму / Г.П. Телитченко, В.І. Шевцов, В.В. Копшин, Ю.П. Дарменко // Український метрологічний журнал. – 2005. – № 2. – С. 17-19.

5. NIST Calibration Services Users Guide. – Gaithersburg, 1998. – P. 155, 156, 160.

Надійшла до редколегії 18.01.2012

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОМПАРАТОРА

И.С. Кираш, В.А. Ермолаев

В статье определена погрешность измерения при переходе от постоянного тока до переменного, измерении значений постоянной постоянного тока, что обусловлено реактивностью элементов схемы.

Ключевые слова: термоэлектрический компаратор, погрешность, коэффициент, ток.

DETERMINATION OF MEASURING ERROR VOLTAGE ALTERNATING CURRENT FOR HELP THERMOELECTRIC COMPARATOR

I.S. Kirash, V.A. Ermolaev

This article a measuring error is certain in transition from direct-current to variable, measuring of values of permanent direct-current that conditioned reactivity of elements of chart.

Keywords: thermoelectric comparator, error, coefficient, current.