

МІНІМІЗАЦІЯ ПОХИБОК БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ МЕТОДИКИ ПЕРЕБОРУ КОМБІНАЦІЙНИХ ЗНАЧЕНЬ

Вступ

Розвиток та постійне вдосконалення еталонної бази у державі є одним із основних кроків до визнання міжнародною науковою спільнотою.

Саме цей факт спонукає науково-дослідні інститути нашої країни брати активну участь у створенні еталонів. Так і колектив НДІ АЕД не упускає такої можливості. Серед науково-технічних робіт, що він виконував, є розробка блока еталонних перетворювачів напруги, що увійшов до складу додаткового обладнання Державного еталону одиниці електричної потужності і коефіцієнту потужності ДЕТУ 08-08-02, затвердженого наказом Державного комітету стандартизації, метрології та сертифікації України від 17.06.2002 р. №379.

Слід зазначити, що високоточні вимірювальні прилади і, насамперед, вихідні еталони за статтею 1 Закону України «Про внесення змін до Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» від 15.06.2004 р. та за ДСТУ 2681-94 [1,2] повинні мати або найвищі, або досить високі метрологічні властивості.

Найкращі метрологічні властивості високоточних вимірювальних пристроїв забезпечуються завдяки різним методам підвищення точності, серед яких певне місце займають конструктивно-технологічні методи [3]. Вони передбачають використання високостабільних, інваріантних до часу та зовнішніх впливів, матеріалів і конструкцій.

Саме до конструктивно-технологічних методів належить методика перебору комбінаційних значень, за допомогою якої можна не тільки підвищити точність, а й значно зменшити собівартість вимірювальних пристроїв за рахунок створення високоточних компонентів на базі комбінації менш точних їх складових.

Методика перебору комбінаційних значень допомагає розв'язати задачу оптимального вибору складових частин окремих багатокомпонентних пристроїв, тобто задачу синтезу. А як відомо, на сьогоднішній день при створенні будь-яких вимірювальних пристроїв насамперед постає питання спрощення їх розробки та підвищення точності, тобто охоплюються як задачі аналізу так і задачі синтезу.

В основу даної методики покладено принцип перебору комбінацій значень (опір, ємність, температурні коефіцієнти і т. ін.) відповідних

компонентів (резисторів, конденсаторів і т. ін.) вимірювального пристрою. З множини компонентів за допомогою перебору комбінацій значень заданої кількості елементів обирається така комбінація, яка дає або необхідне значення, тобто таке, що відповідає заданому діапазону, або значення максимально наближене до цього діапазону, в разі неможливості попадання в зазначений діапазон.

Постановка задачі

При створенні масштабних перетворювачів змінної напруги доцільно застосовувати індуктивні, ємнісні та резистивні подільники напруги.

Ємнісні подільники мають такі недоліки, як частотнозалежні вхідний і вихідний опори та неможливість перевірки на постійному струмові.

Індуктивні подільники не дозволяють проводити роботу на постійному струмі, що дає можливість застосовувати метод компарування в прямому вигляді.

Враховуючи недоліки ємнісних та індуктивних подільників напруги, масштабні перетворювачі змінної напруги доцільно створювати з використанням резистивних подільників напруги.

Мета дослідження полягає у тому, щоб на основі обраної схеми побудови резистивних подільників напруги за допомогою методики перебору комбінаційних значень підібрати комплект резисторів таким чином, щоб у разі їх послідовного, паралельного або комбінованого з'єднання в ланцюги подільника напруги, сумарне значення похибки було б мінімальним. При цьому в ланцюгах можуть бути використані не лише резистори з однаковим номінальним опором.

Для цього попередньо необхідно встановити фактичний опір кожного резистора з серії та обчислити їх абсолютні та відносні похибки.

Нормовані показники та схеми резистивних подільників напруги

Параметри будь-якого вимірювального пристрою залежать від обраної елементної бази, схемних та конструктивних рішень. Масштабні перетворювачі змінної напруги теж не виключення.

Перш за все необхідно визначитись з діапазоном допустимих напруг, потужностями, температурними коефіцієнтами, частотними характеристиками.

Найважливішими нормованими показниками подільника напруги є температурна похибка, частотна похибка, похибка нестабільності в часі.

Як відомо, найбільш стабільними є резистори зроблені з дроту, високоомні – з мікродроту. Нажаль, ці резистори мають найгірші частотні властивості через індуктивність намотки та міжвиткові ємності.

Плівкові резистори, як металеві, так і неметалеві, мають гірші показники стабільності і температурної залежності, але незрівнянно кращі частотні характеристики.

Частотні властивості резисторів детально розглянуто в [4].

Однією з особливостей плівкових резисторів є та, що згідно технічних умов (ТУ) на них найкращі метрологічні характеристики (ТКР, точність, реактивність) мають резистори в обмеженому діапазоні значень.

Показники точності також залежать від допустимої потужності та напруги резисторів.

Виходячи з цих міркувань обираються схемні та конструктивні рішення. Наприклад, резистор великого значення, який за ТУ має великий ТКО, доцільно замінити послідовно включеними резисторами меншого номінального значення, але з кращими температурними коефіцієнтами; резистор високої допустимої потужності – послідовним або паралельним з'єднаннями резисторів меншої потужності, але з кращими метрологічними характеристиками.

Ця обставина має супутній позитивний ефект, який полягає в тому, що з'являється можливість взаємокомпенсації допускових, температурних та деяких інших похибок окремих резисторів, які входять до складу принципової схеми.

Можливість взаємокомпенсації похибок дозволяє застосувати резистори з гіршими метрологічними характеристиками, що в свою чергу здешевлює вартість виробу.

Такі підходи були використані при розробці перетворювачів напруги для Державного еталону одиниці електричної потужності та коефіцієнту потужності ДЕТУ 08-08-02.

Для прикладу застосування методики перебору комбінаційних значень розглянемо побудову перетворювача на 1000 В СКЗ напруги з коефіцієнтом перетворення 1:1000 з комплекту додаткового обладнання для ДЕТУ 08-08-02.

Комплект включає в себе перетворювачі напруги з номінальними значеннями 1000, 600, 380, 220, 127, 100, 57.7, 30 В. При їх створенні були використані резистори з номінальним опором 1 кОм, 6.98 кОм, 10 кОм, 20 кОм, 100 кОм, 1 Ом, 2 Ом, 4.99 Ом, 10 Ом.

Для зменшення температури перегріву можна зберегти у всіх подільниках кількість резисторів верхнього плеча однаковою, що становить 10 штук. При струмі споживання 1 мА значення кожного резистора буде складати 100 кОм при номінальній нарузі 1000 В. У випадку рівної кількості резисторів верхнього плеча подільники на всі номінальні напруги будуть мати однакову конструкцію. Схема з'єднань подільника напруги на 1000 В зображена на рис. 1.

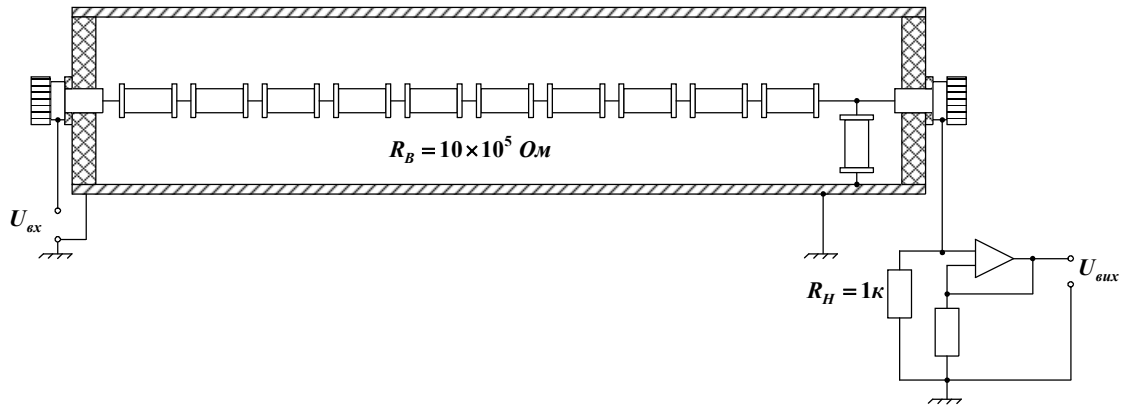


Рис. 1. Схема з'єднань подільника напруги на 1000 В

Для зменшення частотної похибки можна застосувати потенціально розподілені компенсуючі екрани, які з'єднані з рівнопотенціальними точками допоміжного низькоомного подільника.

Схематична конструкція потенціально розподіленого компенсованого подільника зображена на рис. 2.

Основний подільник виконаний з прецезійних резисторів з малим температурним коефіцієнтом опору, високоомний і складається з 10 резисторів верхнього плеча по 100 кОм кожний.

Допоміжний подільник складається з 10 резисторів по 10 кОм кожний максимальною потужністю по 1 Вт. Він менш точний. Єдиним його завданням є створення необхідних компенсуючих потенціалів.

При цьому невелика нерівність потенціалів в відповідних точках основного і допоміжного подільників викликає похибки вищих порядків малості.

Допоміжний подільник виконує необхідну функцію компенсації при знижених вимогах до нього.

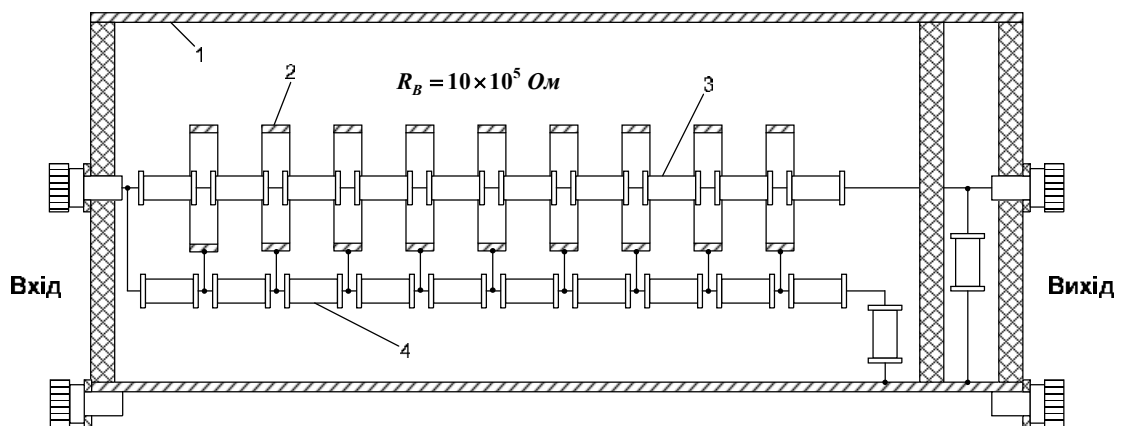


Рис. 2. Схематична конструкція потенціально розподіленого компенсованого подільника: 1 – зовнішній екран, 2 – внутрішній екран, 3 – основний подільник, 4 – допоміжний

Методика відбору резисторів

Отже, по-перше, потрібно встановити значення фактичного опору кожного резистора з серії та обчислити відносне відхилення фактичного опору резисторів від номінального.

Експерименти проводились для дев'яти серій резисторів з номінальним опором 1 кОм, 6,98 кОм, 10 кОм, 20 кОм, 100 кОм, 1 Ом, 2 Ом, 4,99 Ом, 10 Ом. Кожна серія мала по декілька партій резисторів. Резистори певної партії було розміщено у засобі для швидкого підключення. Для вимірювання опору резисторів використано мультиметр типу HP3458A фірми Hewlett Packard.

Опір кожного резистора вимірювався на протязі двох хвилин.

Результати вимірювань використано для обчислення наступних значень:

- середнє значення опору: $\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i$,
- відносне відхилення: $\delta = \frac{R_i - R_{ном}}{R_{ном}} \times 10^6$,

де $N = 10$ – кількість вимірювань для кожного резистора з партії,

R_i – результати вимірювань опору.

Результати досліджень першого етапу для серій резисторів з вказаним вище номінальним опором було зведено у відповідні таблиці.

На базі отриманих даних проводилась друга частина дослідження, а саме – створення подільників напруги.

Відомо, що

$$R_{факт} = \sum_1^n R_i,$$

$$R_{ном} + \Delta R = \sum_1^n R_{іном} + \sum_1^n \Delta R_i.$$

Якщо номінальні значення R_i однакові, то $R_{ном} = nR_i$, де n – кількість резисторів. Виходячи з цього, $\Delta R = \sum_1^n \Delta R_i$.

Шляхом перебору потрібно досягти мінімізації ΔR , тобто $\Delta R \rightarrow 0$ або $|\Delta R| < C$, де C – задана абсолютна похибка.

Відносна похибка суми опорів резисторів:

$$\delta R = \frac{1}{R_{ном}} \sum_1^n R_{іном} \delta R_i = K_i \delta R_i,$$

де $K_i = \frac{R_i}{R}$ – коефіцієнт впливу,

δR_i – відносна похибка окремого резистора.

Урахування всіх перелічених факторів вказує на те, що відносна похибка суми опорів резисторів повинна бути наближеною до нуля, тобто $\delta R \rightarrow 0$ або $\delta R < \gamma$, де γ – задана відносна похибка.

Мінімізувати відносну похибку можна шляхом перебору R_i та δR_i .

Ця задача є багатоваріативною:

- можна використати резистори з рівними малими додатними та від’ємними значеннями похибки, які компенсують одна одну;
- можна використати резистори з одним великим додатнім значенням похибки та багатьма малими від’ємними значеннями похибки, і навпаки;
- можна також використати резистори з різним номінальним опором з урахуванням попередніх можливостей.

Враховуючи ці чинники та виходячи з міркувань підвищення точності системи, було створено декілька варіантів з’єднання резисторів у ланцюг подільника напруги з мінімальним температурним коефіцієнтом опору, а саме: 1000 В – 1 екземпляр, 600 В – 3 екземпляри, 380 В – 1 екземпляр, 220 В – 3 екземпляри, 127 В – 1 екземпляр, 100 В – 3 екземпляри, 57,7 В – 1 екземпляр, 30 В – 1 екземпляр.

Створені завдяки підбору комплементарних резисторів, подільники напруги досліджувались на предмет відхилення фактичного коефіцієнту ділення від номінального. Для цього застосовувались метод вимірювання за прямим діленням (МД) та метод вимірювання за опором (МО). МО полягає у вимірюванні опору нижнього плеча подільника напруги та суми опорів верхнього та нижнього плечей. А МД полягає у вимірюванні вхідної та вихідної напруги подільника напруги. Напруга на вхід подільника напруги подається від калібратора-вольтметра універсального Н4-6, вихідна напруга вимірюється за допомогою мультиметра типу НР3458А. За отриманими результатами вимірювання обчислювались фактичні значення коефіцієнтів ділення та їх відносних відхилень.

Можуть виникати ситуації, коли розрахункові значення коефіцієнтів ділення набагато відрізняються від фактичних. В такому разі необхідно проводити розрахунок коректуючих резисторів до подільників напруги за даними вимірювань, щоб задовольнити поставленим вимогам щодо мінімальної відносної похибки.

При цьому вихідними даними є:

- коефіцієнт ділення $K = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}$;
- опір нижнього плеча $K = \frac{R_H}{R_B + R_H}$.

Якщо $K = K_0(1 + \gamma)$, необхідно знайти ΔR_H при якому $\gamma = 0$.

Нехай відоме реальне значення опору нижнього плеча R_H . Знайдемо значення опору верхнього плеча R_B :

$$KR_B + KR_H = R_H,$$

$$R_B = \frac{R_H(1-K)}{K} = R_H \left(\frac{1}{K} - 1 \right).$$

Розраховане (ідеальне) значення K_i має бути:

$$K_i = \frac{R_H + \Delta R_H}{R_B + R_H + \Delta R_H}.$$

Розв'яжемо це рівняння відносно ΔR_H :

$$K_i R_B + K_i R_H + K_i \Delta R_H = R_H + \Delta R_H,$$

$$K_i (R_B + R_H) - R_H = \Delta R_H (1 - K_i).$$

Після проведених розрахунків отримаємо:

$$\Delta R_H = \frac{K_i (R_B + R_H) - R_H}{1 - K_i},$$

$$\Delta R_H = \frac{KR_H \left(\frac{K_i}{K} - 1 \right)}{K_i K \left(\frac{1}{K_i} - 1 \right)},$$

$$\Delta R_H = \frac{R_H \left(\frac{K_i}{K} - 1 \right)}{K_i \left(\frac{1}{K_i} - 1 \right)},$$

де K_i – ідеальний коефіцієнт ділення,

K – реальний коефіцієнт ділення.

Для різних коефіцієнтів ділення ΔR_H , виражене через похибку K , знаходиться за наступною формулою:

$$\Delta R_H = - \frac{R_H \gamma_K}{K_i (1 + \gamma_K) \left(\frac{1}{K_i} - 1 \right)}.$$

Після монтажу коректуючих резисторів для комплексу перетворювачів напруги та процедури калібрування були отримані значення коефіцієнтів ділення та їх похибки, які зведені в табл. 1.

Таблиця 1.

Результати калібрування подільників напруги

Номинальна вхідна напруга, В	Номинальний коефіцієнт ділення	Реальний коефіцієнт ділення	Відносна похибка, %
1000	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,000019 \cdot 10^{-3}$	+0,002
600 1	$1,66666667 \cdot 10^{-3}$	$1,666664 \cdot 10^{-3}$	-0,0002
600 2	$1,66666667 \cdot 10^{-3}$	$1,666739 \cdot 10^{-3}$	+0,0043
600 3	$1,66666667 \cdot 10^{-3}$	$1,666646 \cdot 10^{-3}$	-0,0013
380	$2,63157895 \cdot 10^{-3}$	$2,631612 \cdot 10^{-3}$	+0,0012
220 1	$4,54545455 \cdot 10^{-3}$	$4,545466 \cdot 10^{-3}$	+0,0002
220 2	$4,54545455 \cdot 10^{-3}$	$4,545465 \cdot 10^{-3}$	-0,0002
220 3	$4,54545455 \cdot 10^{-3}$	$4,545425 \cdot 10^{-3}$	-0,0007
127	$7,87401575 \cdot 10^{-3}$	$7,874156 \cdot 10^{-3}$	+0,0018
100 1	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,000007 \cdot 10^{-2}$	+0,0007
100 2	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,000014 \cdot 10^{-2}$	+0,0014
100 3	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,000034 \cdot 10^{-2}$	+0,0034
57,7	$1,733102253 \cdot 10^{-2}$	$1,733093 \cdot 10^{-2}$	-0,0005
30	$3,333333333 \cdot 10^{-2}$	$3,333307 \cdot 10^{-2}$	-0,0008

Аналіз температурної похибки

Температурний коефіцієнт опору (ТКО) характеризує зміну опору резистора відносно номінального значення при зміні температури на один градус. Резистори можуть мати додатний ТКО, коли опір резистора зростає при зростанні температури, та від'ємний ТКО, коли опір резистора зменшується при зростанні температури. ТКО характеризує зворотні зміни опору резистора. Чим менший ТКО, тим кращу температурну стабільність має резистор.

Температура перегріву резистора при встановленій номінальній потужності визначається експериментальним шляхом. Іншими словами, експеримент полягає у дослідженні зв'язку між температурою та резисторами різних типів; обчисленні температурних коефіцієнтів резисторів; знаходженні найбільш стабільного резистора з серії кожного типу.

Зменшити температурну похибку можна такими шляхами.

Перший – відбір резисторів з найменшим ТКО.

Другий – відбір резисторів з протилежними знаками ТКО і взаємна компенсація їх впливів при послідовному з'єднанні.

Третій – примусовий підігрів резистора нижнього плеча потужністю, рівною питомій споживаній потужності резисторів верхнього плеча. Умовою мінімізації впливу саме прогріву верхнього плеча є відбір резисторів верхнього і нижнього плеча з однаковими за знаком і значенням ТКО.

Четвертий – врахування похибки після самопрогріву.

Для з'ясування можливості компенсації температурних похибок експериментальному дослідженню підлягали резистори типів С2-29В, Р2-67 та МЛТ. Для встановлення потрібної температури було використано термостатовану камеру. Точна температура в середині термостатованої камери вимірювалась за допомогою мультиметра типу НР34420А фірми Hewlett Packard, до якого було під'єднано температурний давач типу UDL4-Z6-346.8265.02. Для вимірювання опору резисторів використано мультиметр типу НР3458А фірми Hewlett Packard.

Кожен резистор протестовано при температурі 10, 20, 30, 40 та $\tilde{\square}\square\text{C}$; резистори типу С2-29В, 965 Ом протестовано при температурі 15°C, 20°C, 25°C та 30°C.

Результати вимірювань використано для обчислення наступних значень:

– середнє значення температури: $\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i$;

– середнє значення опору: $\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i$,

де $N = 30$ – кількість вимірювань для кожного встановленого значення температури, R_i, T_i – результати вимірювань опору та температури.

Температурні коефіцієнти $TКО_{(20-10)}$, $TКО_{(20-15)}$, $TКО_{(25-20)}$, $TКО_{(30-15)}$, $TКО_{(30-20)}$, $TКО_{(30-25)}$, $TКО_{(40-30)}$, $TКО_{(50-40)}$, $TКО_{(50-10)}$ обчислюються за формулою:

$$TКО_{(b-a)} = \frac{\bar{R}_b - \bar{R}_a}{(\bar{T}_b - \bar{T}_a) \cdot \bar{R}_a}$$

За обчисленими значеннями температурних коефіцієнтів розглянутих резисторів можна зробити висновок щодо резисторів з найменшим температурним коефіцієнтом.

Висновки

1. Методику безпосередньо опрацьовано при розробці блока еталонних перетворювачів змінної напруги, що увійшли до складу

додаткового обладнання Державного еталону одиниці електричної потужності і коефіцієнту потужності ДЕТУ 08-08-02, тобто за її допомогою було створено високоточні компоненти на базі комбінації менш точних їх складових.

2. За допомогою методики перебору комбінаційних значень було створено декілька варіантів з'єднання резисторів у ланцюг подільника напруги з мінімальним температурним коефіцієнтом опору, виходячи з міркувань не тільки виконання умови $\delta R < \gamma$, а й мінімізації залишку резисторів, які виявились в партії, що досліджується, непридатними для взаємокомпенсації.

3. Створені за допомогою розглянутої методики подільники напруги пройшли процедуру калібрування, і її результати повністю задовольняють поставленим вимогам.

4. Аналіз температурної похибки показав:

- **1 кОм:** Значення ТКО резистора типу P2-67-0.5 менше, ніж значення ТКО резистора типу C2-29B.
- **3 кОм:** Значення ТКО₍₂₀₋₁₀₎ резистора типу C2-29B-0.25W велике (8,83E-05) та в інших температурних діапазонах менше у порівнянні із значеннями ТКО резистора типу C2-29B-0.125W. Середнє значення ТКО резистора типу C2-29B 0.125W (1,20E-05) менше ніж середнє значення ТКО резистора типу C2-29B-0.25W (2,29E-05), таким чином резистор типу C2-29B 0.125W є найбільш стабільним.
- **10 кОм:** Значення ТКО резистора типу P2-67-0.5 менше значень ТКО всіх досліджених 30 кОм резисторів.
- **30 кОм:** MLT Res. B має значення ТКО менше, ніж значення ТКО MLT Res. A.

5. Дана методика може бути використана при вирішенні таких задач, як відбір елементів, значення яких дають необхідну суму, та відбір резисторів для неінвертуючого підсилювача з віртуальним живленням.

Список використаної літератури

1. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення. – Чинний від 1995–01–01. – К. : Держспоживстандарт України, 1994. – 111 с. – (Система стандартів з метрології).
2. Про внесення змін до Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність»: Закон України: [прийнято ВР України 15.06.2004 р.] // ВВР. – 2004. – № 1765-IV. – С. 30.

3. *Туз Ю. М.* Структурные методы повышения точности измерительных устройств : учебное пособие / Ю. М. Туз. – К.: Изд. Выща шк., 1976. – 256 с.
4. *Нестеренко А. Д.* Основы расчета электроизмерительных схем уравнивания : учебное пособие / А. Д. Нестеренко. – К.: Изд. АН УССР, 1960. – 716 с.