

СТАНДАРТИЗАЦІЯ, МЕТРОЛОГІЯ І СЕРТИФІКАЦІЯ

УДК 681.2.089

О.А.-Б. Ахмадов
С.О. Ахмадов
С.Р. Карпенко
С.П. Токар
В.С. Писчиков

ВТОРИЧНИЙ ЕТАЛОН ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ РОЗШИРЕНОГО ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ

ДП «Укрметртестстандарт», м.Київ

У статті розкрито процес створення вторинного еталону електричної потужності для розширеного діапазону частот. Описано та розкрито принцип дії блоків, що входять до комплексу обладнання вторинного еталону. Наведено результати досліджень окремих блоків та статистичні дані про використання вторинного еталону електричної потужності для розширеного діапазону частот в ДП «Укрметртестстандарт».

Ключові слова: електрична потужність для розширеного діапазону частот, Державний еталон електричної потужності та коефіцієнту потужності, вторинний еталон електричної потужності для розширеного діапазону частот.

Вступ

Засоби вимірювання електричної потужності широко застосовуються для забезпечення оптимальних режимів технологічних процесів у галузях тепло – енергетики, металургії, машинобудування, транспорті і т.д. Крім того, ці засоби вимірювання використовуються для метрологічного забезпечення таких масових вимірювальних пристроїв як лічильники електричної потужності.

Метрологічне забезпечення експлуатації та виробництва вказаних засобів вимірювальної техніки в Україні реалізується згідно з вимогами ДСТУ 4116-2002 «Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань електричної потужності і коефіцієнта потужності у діапазоні частот від 40 Гц до 20000 Гц». Державний еталон одиниць електричної потужності та коефіцієнта потужності зберігається у місті Києві в ДП «Укрметртестстандарт». В зв'язку з необхідністю запобігання державного еталона від передчасного зносу, можливістю більш раціональної організації повірочних робіт та необхідністю контролю за незмінністю розміру одиниці електричної потужності, що відтворюється державним еталоном, Програмою розвитку національної еталонної бази України 2006-2010 рр. було передбачено розроблення вторинного еталона одиниці електричної потужності і коефіцієнта потужності у розширеному діапазоні частот і струмів.

Метрологічні характеристики вторинного еталона:

- діапазон значень одиниці електричної потужності, що зберігається вторинним еталоном - від 0,01 Вт до 6000 Вт при значеннях напруги від 60 В до 600 В, сили струму від 0,01 А до 10 А та частоти від 40 Гц до 1000 Гц;
- сумарне середнє квадратичне відхилення результатів вимірювань S_{Σ} при звіренні вторинного еталона з державним еталоном по електричній потужності знаходиться в межах від $2 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-4}$.

Для розрахунку середнього квадратичного відхилення результатів вимірювань S_{Σ} використовуємо формулу $S_{\Sigma} = \sum_{i=1} S_{x_i}^-$, $S_{x_i}^-$ – середнє квадратичне відхилення результатів

вимірювання: $S_{x_i}^- = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i$, n – кількість вимірювань; x_i – значення

ЕП; \bar{x} – середнє значення ЕП (3)

Метрологічні характеристики вторинного еталона відповідають вимогам ДСТУ 4116-2002.

Опис та склад еталона

Вторинний еталон призначений для перевірки і дослідження одиниці електричної потужності в діапазоні частот від 40 до 1000 Гц і робочих еталонів робочим засобом вимірювальної техніки, які застосовують в відповідних галузях промисловості та оборони України.

Вторинний еталон є комплексом засобів вимірювальної техніки до складу якого входять: комплект формувачів струму та напруги з можливістю регулювання кута зсуву фази між ними, вимірювач електричної потужності однофазний, комплект еталонних перетворювачів «струм-струм», комплект еталонних перетворювачів «струм-напруга», комплект еталонних перетворювачів «напруга-напруга», ПК, комплект допоміжного обладнання.

На основі проведеного під час розроблення еталону аналізу, а також результатів проведених досліджень, було розроблено структурну схему вторинного еталону, зазначену на рис.1.

На схемі позначено: 1 - двоканальний генератор; 2 - персональний комп'ютер; 3 - аналого-цифровий перетворювач; 4 - комплект підсилювачів; 5 - цифровий фазометр; 6 - перетворювач «напруга-напруга»; 7 - перетворювач «струм-напруга»;

Функціональна схема вторинного еталону включно з комплектом обладнання для вимірювання та відтворення електричної потужності в розширеному діапазоні частот наведена на рис. 2

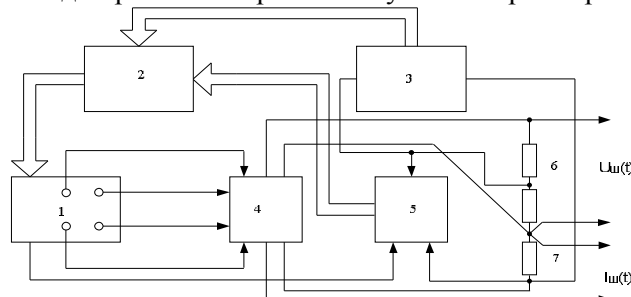


Рис. 1. Структурна схема однофазного вторинного еталона електричної потужності для розширеного діапазону частот.

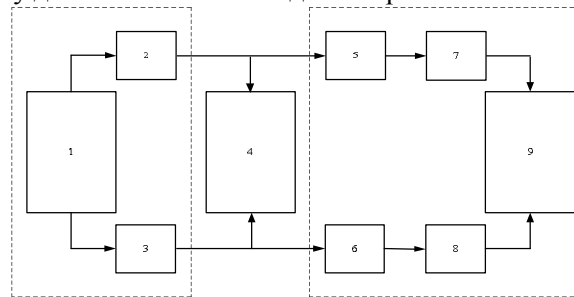


Рис. 2. Функціональна схема вторинного еталона електричної потужності в розширеному діапазоні частот.

На схемі позначено: 1 – однофазний генератор; 2, 3 – блоки однофазних підсилювачів струму та напруги; 4 – повітряний ЗВТ (вимірювачі електричної потужності в розширеному діапазоні частот, тощо); 5 – комплект допоміжного обладнання (комплект перетворювачів «напруга-напруга»); 6 – комплект допоміжного обладнання (комплект перетворювачів «струм-напруга»); 7, 8 – комплект допоміжного обладнання (комплект перетворювачів «напруга-напруга»); 9 – вимірювач електричної потужності однофазний.

Блоки 1, 2, 3 – являються комплектом пристроїв для генерації струмів та напруг в розширеному діапазоні частот. Блоки 5, 6, 7, 8, 9 – комплект пристроїв для відтворення та вимірювання електричної потужності з високою точністю.

Відповідно до схеми на рис. 2 до Вторинного еталону входять пристрої для високоточного вимірювання та відтворення електричної потужності в розширеному діапазоні частот. Далі наведено перелік пристроїв та їх характеристики.

Таблиця 1

Середнє значення результатів вимірювання коефіцієнта нелінійних спотворень вихідного сигналу каналу напруги.

Номинальна напруга, В	Коефіцієнт нелінійних спотворень $K_{нс}$, %			
	40 Гц	50 Гц	70 Гц	1000 Гц
60	0,079	0,080	0,074	0,066
220	0,070	0,068	0,065	0,063
600	0,061	0,067	0,065	0,071



Рис. 3. Калібратор універсальний Н4-7

Калібратор представляє собою прицельний прилад для відтворення струмів та напруг в широкому діапазоні частот, та з високою точністю. В комплекті з калібратором використовуються блок «підсилювач напруги» та блок «перетворювач струм-напруга». Використання цих блоків дозволяє розширити діапазони відтворюваних струмів і напруг.

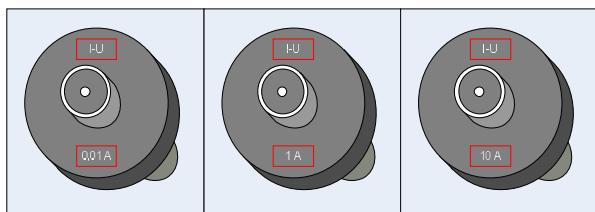


Рис. 4. Комплект перетворювачів «струм-напруга»

Таблиця 2
Середнє значення результатів вимірювання
нестабільності рівня сформованого за 10 хв
сигналу напруги

Номинальна напруга, В	Коефіцієнт нелінійних спотворень Кнс, %			
	40 Гц	50 Гц	70 Гц	1000 Гц
60	0,003	0,002	0,003	0,003
220	0,002	0,002	0,002	0,002
600	0,001	0,002	0,001	0,001

Зовнішній вигляд калібратура представлено на рис.3.

Було досліджено характеристики блока підсилювача напруги, а саме: коефіцієнт нелінійних спотворень вихідного сигналу напруги та нестабільність рівня сформованого сигналу напруги за 10 хв. Результати наведено в табл. 1, 2.

На рис. 4 представлено комплект перетворювачів «струм - напруга», які використовуються при процедурі відтворення вторинним еталоном одиниці електричної потужності. Конструктивно представляють собою термостатовані шунти.

Еталонні перетворювачі «струм-напруга» призначені для перетворення змінного струму в напругу змінного струму, значенням 1 В (СКЗ). Технічні характеристики перетворювачів: вхідні струми: 0,01; 1; 10 (А); вихідна напруга: 1В (СКЗ); робочий діапазон частот: до 1000 Гц;

На рис. 5 зображено блок еталонних перетворювачів струму, який призначено для точного перетворення струму 100 А у струм 1 А та точного перетворення струму 10 А у струм 1 А, а високі метрологічні характеристики їх досягаються завдяки використанню багатоступеневих трансформаторів з комбінованими обмотками і додатковими каскадами перетворення.

Похибка коефіцієнта перетворення струму не перевищує 0,005 % на частоті 50 Гц.

Комплект еталонних перетворювачів напруги (рис. 6) призначено для перетворення високої напруги змінного струму в напругу змінного струму, значенням 1В (СКЗ). До комплекту перетворювачів входять як перетворювачі для певного значення напруги (рис. 6 (а)), так і блок перетворення широкого діапазону напруг (рис. 6 (б)). Конструктивно перетворювачі представляють собою високо стабільні подільники напруги.

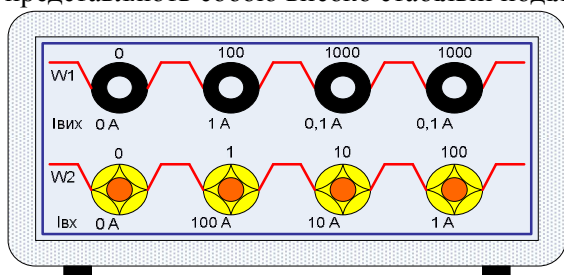


Рис. 5. Блок еталонних перетворювачів струму

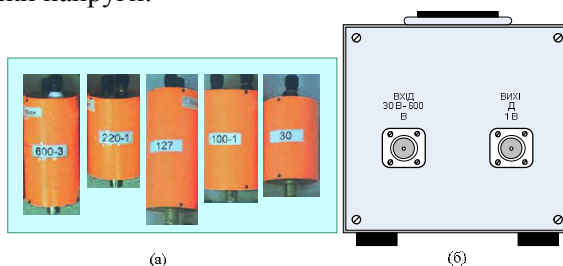


Рис.6. Перетворювачі «напруга-напруга»

Технічні характеристики перетворювачів: вхідні напруги: 30; 100; 127; 220; 600 (В) (СКЗ); вихідна напруга: 1 (В) (СКЗ); робочий діапазон частот: до 1000 Гц; нестабільність коефіцієнта перетворення у часі: не більше $5 \cdot 10^{-6}$ на рік; температурна нестабільність коефіцієнта перетворення: не більше $1 \cdot 10^{-5}$ (1/°C).

При проведенні процедури вимірювання та відтворення одиниці електричної потужності використовують перетворювачі «напруга-напруга» та «струм-напруга», які необхідні для перетворення напруги змінного струму (від 60 В до 600 В) та змінного струму (від 0,01 А до 10 А) в напругу змінного струму номіналом 1 В. На рис. 7 представлено зовнішній вигляд вакуумних термоперетворювачів за допомогою яких напруга змінного струму перетворюється в напругу постійного струму.

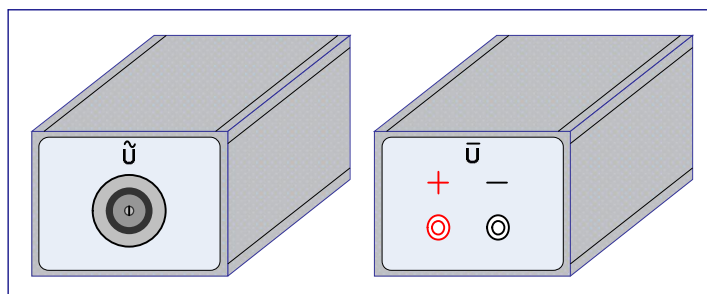


Рис. 7. Вакуумний термоперетворювач

Міра призначена для передавання одиниці напруги постійного струму. Має наступні метрологічні характеристики: відтворення напруги: 1,018 В; 10 В; нестабільність за 1 рік: 0,0005 %; коефіцієнт температурної нестабільності: $0,35 \cdot 10^{-6}$ °С.

Відтворення одиниці ЕП базується на методі різночасового порівняння напруги, сформованої на виході термоелектричних перетворювачів, які по черзі підключаються до кіл постійного та змінного струмів. Для відтворення одиниці ЕП виконують такі операції:

- 1) підключають еталонний вимірювач до двоканального генератора напруги та струму;
- 2) за допомогою двоканального генератора встановлюють необхідне значення напруги В (1; 10; 60; 100; 240; 300; 600) та струму А (0,01; 0,1; 0,5; 1,0; 2,0; 5; 10);
- 3) встановлюють кут зсуву фаз між струмом та напругою, рівним 0^0 (двоканальний генератор дозволяє забезпечити точність встановлення кута зсуву фази між напругою та струмом в межах $0^0 \pm 0,1^0$);

4) в канал напруги, паралельно, підключають термоелектричний перетворювач з подільником напруги;

5) за допомогою еталонного нановольтметра вимірюють значення постійної напруги на виході термоелектричного перетворювача;

6) термоелектричний перетворювач від'єднують від генератора напруги змінного струму і підключають до генератора напруги постійного струму;

7) змінюють полярність постійної напруги на вході термоелектричного перетворювача;

8) регулюють значення напруги постійного струму до отримання на виході термоелектричного перетворювача того ж значення напруги, що і при подачі напруги змінного струму;

9) за допомогою еталонного вольтметра вимірюють значення постійної напруги на вході термоелектричного перетворювача;

10) в канал струму, послідовно з еталонною мірою електричного опору, підключають термоелектричний перетворювач;

11) за допомогою еталонного нановольтметра вимірюють значення напруги постійного струму на виході термоелектричного перетворювача;

12) термоелектричний перетворювач від'єднують від генератора змінного струму і підключають до генератора постійного струму;

13) регулюють значення постійного струму до отримання на виході термоелектричного перетворювача того ж значення напруги, що і при подачі змінного струму;

14) за допомогою еталонної міри електричного опору та прецизійного вольтметра знаходять значення сили постійного струму на вході термоелектричного перетворювача;

15) змінюють полярність постійного струму на вході термоелектричного перетворювача;

16) регулюють значення постійного струму до отримання на виході термоелектричного перетворювача того ж значення напруги, що і при подачі змінного струму;

17) за допомогою еталонної міри електричного опору та прецизійного вольтметра вимірюють значення постійного струму на вході термоелектричного перетворювача.

Значення відтворюваної таким чином одиниці ЕП знаходиться з рівняння:

$$EP = \frac{U_{U+} + U_{U-}}{2} \cdot \frac{\frac{U_{U+}}{R} + \frac{U_{U-}}{R}}{2} \cdot \cos \varphi \quad (4)$$

де: U_{U+} - значення постійної напруги, отримане при виконанні п. 8; U_{U-} - значення постійної напруги, отримане при виконанні п. 11; U_{I+} - значення постійної напруги, отримане при виконанні п. 16; U_{I-} - значення постійної напруги, отримане при виконанні п. 19; R - номінальне значення опору еталонної міри електричного опору; φ - кут зсуву фаз між напругою та струмом.

Під час досліджень вторинного еталона електричної потужності в розширеному діапазоні частот було проведено ряд вимірювань з використанням ватметрів Д5107, Д5106 та інші. при частоті сигналів 500 Гц. Результати досліджень наведено в табл. 3.



Рис. 8. Міра напруги постійного струму Н4-9

Відповідно до ПМА вторинного еталона електричної потужності для розширеного діапазону частот та відповідно до схеми, наведеної на рис. 4 було проведено ряд вимірювань з використанням високоточного нановольтметра Agilent 34420 A та мультиметра HP 3458 A. Вимірювання проводились при струмах до 10 А, напругах до 600 В та при частоті сигналу від 40 Гц до 1000 Гц. Кут зсуву фаз між сигналами струму та напруги становить 0°. Відповідно до ПМА сигнали струму та напруги з калібратору Н4-7 за допомогою перетворювачів «струм-напруга» та «напруга-напруга» подаються на вакуумні термоперетворювачі. Отримані значення постійної напруги вимірюються за допомогою нановольтметра Agilent 34420 A. Таким чином було отримано результати наведені в табл. 4.

Таблиця 3

Результати досліджень робочих еталонів з використанням вторинного еталона електричної потужності

Тип приладу	Номинальний струм, А	Значення похибки вимірювання, %			
		Номинальна напруга, В			
		30	150	450	600
Д5107	5	± 0,09	± 0,08	± 0,08	± 0,09
	10	± 0,08	± 0,10	± 0,10	± 0,08
Д5106	5	± 0,10	± 0,10	± 0,10	± 0,09
	10	± 0,07	± 0,09	± 0,10	± 0,10

Таблиця 4

Результати вимірювання за допомогою комплексу апаратури для відтворення одиниці електричної потужності.

Номинальний струм, А	Частота сигналу: 40 Гц					Частота сигналу: 1000 Гц				
	Значення похибки вимірювання, %					Значення похибки вимірювання, %				
	Номинальна напруга, В					Номинальна напруга, В				
	1	30	120	300	600	1	30	120	300	600
0,01	± 0,02	± 0,03	± 0,03	± 0,04	± 0,02	± 0,02	± 0,04	± 0,03	± 0,03	± 0,03
0,1	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,01	± 0,02	± 0,03	± 0,02	± 0,02	± 0,02
1	± 0,01	± 0,01	± 0,02	± 0,02	± 0,02	± 0,01	± 0,02	± 0,02	± 0,01	± 0,02
10	± 0,02	± 0,01	± 0,02	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,02	± 0,01	± 0,01	± 0,02

Висновки

Метрологічні характеристики еталона відповідають вимогам ТЗ на розроблення еталона. Еталон досліджений в достатньому обсязі і знаходиться в робочому стані.

Умови зберігання і застосування еталона відповідають вимогам, встановленим правилами зберігання та застосування. За своїми метрологічними і технічними характеристиками еталон відповідає вимогам ДСТУ 3864-99 щодо вторинних еталонів. Точність еталона та точність передавання розміру одиниці електричної потужності в розширеному діапазоні частот робочим еталонам та робочим засобом вимірювальної техніки, що застосовуються в країні, відповідає вимогам та можливостям національної економіки.

Список літературних джерел

1. Ахмадов С.А. Система передачи размера единицы электрической мощности в Украине. - Х.: Сборник трудов конференции «Метрология и измерительная техника». Том 7., 2005 – С. 79-81.
2. Ахмадов А.А.-Б., Егоров В.А., Маркевич В.М., Фомин В.М. Двухканальный генератор с регулируемым здвигом фаз между током и напряжением. Измерительная техника. – М.: Издательство стандартов, 1985., №6. – С. 44-45.
3. Ахмадов А.А.-Б., Проненко В.И. Диапазонные фазометрические преобразователи частоты с неперестраиваемым по частоте гетеродином. Измерительная техника. – М.: Издательство стандартов, 1974, №1. – С. 21-25.
4. Жук А.Г., Ахмадов А.А.-Б., Кисельман И.Г., Кикало В.Н. Образцовая установка для проверки энергетических фазометров в диапазоне звуковых частот. Измерительная техника. – М.: Издательство стандартов, 1974, №1. – С. 25-28.
5. Калашников В.И., Раннев Г.Г., Суругина В.А. Информационно-измерительная техника и электроника. – Издательство "Academia", 2006.
6. Панев Б. И. Электрические измерения. Справочник (в вопросах и ответах). Издательство "Агропромиздат", Москва, 1987. – Глава 14,16.
7. Байда Л. И., Добротворский Н. С., Душин Е. М. и др. Электрические измерения. Учебник для вузов. Под редакцией Фремке А. В. и Душина Е. М. Издательство "Энергия", Ленинград, 1980.