

УДК 681.2.089

О.А-Б. Ахмадов, С.О. Ахмадов, В.С. Писчиков

**РОЗВИТОК ВТОРИННОГО ЕТАЛОНУ ОДИНИЦІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ
ДЛЯ РОЗШИРЕНОГО ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ**

ДП «Укрметрестандарт», м. Київ

У статті розкрито запитання розвитку та дослідження вторинного еталону одиниці електричної потужності для розширеного діапазону частот. Наведено результати досліджень еталона.

Ключові слова: електрична потужність, розширений діапазон частот, вторинний еталон одиниці електричної потужності для розширеного діапазону частот.

Вступ. Метрологічні характеристики вторинного еталону одиниці електричної потужності для розширеного діапазону частот:

- 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 при звіренні вторинного еталона з державним еталоном по електричній потужності знаходиться в межах від $2 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-4}$.

Метрологічні характеристики вторинного еталона відповідають вимогам ДСТУ 4116-2002.

Розвиток та дослідження. У цілях удосконалення параметрів еталону та досліджень в більш широкому діапазоні кута зсуву фаз між сигналами струму та напруги, а також автоматизації досліджень ряд вимірювань на частоті 40 Гц, 50 Гц та 70 Гц було здійснено з використанням еталонного вимірювача TPZ303. Інші дослідження на частоті 40 Гц, 500 Гц та 1000 Гц було проведено за допомогою високоточного нановольметра Agilent 34420 А та мультиметра HP 3458 А, а також використовувалися ватметри Д5107, Д5106 та інші.

Еталонний вимірювач TPZ303 призначено для зберігання і передачі розміру одиниці електричної потужності при середньоквадратичних значеннях фазної напруги від 1 до 320 В, середньоквадратичних значеннях струму від 0,001 до 20 А та частотах від 40 до 70 Гц. Схема роботи: трифазна чотирьох-провідна, трифазна трьох-провідна або однофазна.

Зовнішній вигляд TPZ303 наведено на рис. 1.

Принцип роботи TPZ303 базується на швидкісній цифровій вимірювальній технології, яка забезпечує наступні можливості: автоматичний вибір діапазонів по напрузі та струму; висока точність незалежно від схеми роботи; частота сигналів напруги та струму від 40 до 70 Гц; вбудований принтер; кольоровий рідинно-кристалічний дисплей з високою роздільною здатністю; керування через меню за допомогою клавіатури та миші.

Високі метрологічні характеристики досягаються завдяки безперервному контролю температури вимірювальних перетворювачів напруги і струму та компенсації їх температурної залежності.

Всі результати вимірювань відображаються у графічному, векторному та цифровому вигляді на 21-сантиметровому кольоровому екрані з високою роздільною здатністю (640x480 пікселів). Простота керування TPZ303 забезпечується меню та контекстним меню, які управляються за допомогою клавіатури та миші.

На TPZ303 подавалися сигнали напруги та струму. На дисплеї TPZ303 відображалася інформація про результати вимірювань, при цьому використовувалося підменю «Vectorial Diagram». Зовнішній вигляд цього вікна наведено на рис. 2.

Елементи керування цього вікна дозволяли змінювати схему вимірювання, діапазон по напрузі, діапазон по струму та коефіцієнти трансформації каналів напруги та струму.

Результати вимірювань відображалися у вигляді векторної діаграми та у таблиці. Таблиця вміщує наступні елементи: U_{pp} - СКЗ лінійних напруг; U_{pn} - СКЗ фазних напруг (відносно до нуля); U_{dc} - значення постійної напруги, яка міститься у відповідній фазній напрузі; $U_{\Sigma har}$ - СКЗ значення усіх гармонічних складових каналів напруги; kU - коефіцієнт спотворення каналів напруги; I - СКЗ значення струмів; I_{dc} - значення постійного струму, який міститься у



Рис. 1. Зовнішній вигляд еталонного вимірювача TPZ303

струмі відповідного каналу; $I_{\Sigma har}$ - СКЗ значення усіх гармонічних складових каналів струму; kI - коефіцієнт спотворення каналів струму; $\angle U1 \rightarrow U$ - кут фазної напруги по відношенню до $U1$ (проти годинникової стрілки); $\angle U1 \rightarrow I$ - кут струму по відношенню до $U1$ (проти

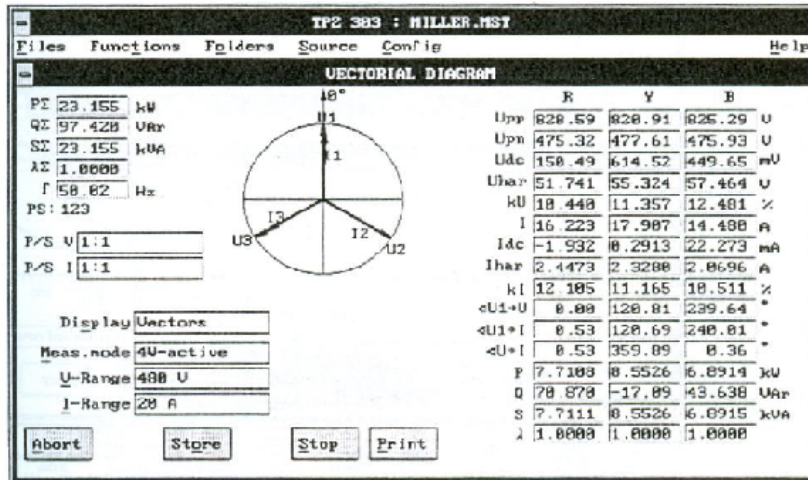


Рис. 2 Зовнішній вигляд вікна програми з результатами вимірювань

годинникової стрілки); $\angle U \rightarrow I$ - кут струму по відношенню до відповідної фазної напруги (проти годинникової стрілки); P - активна електрична потужність; Q - реактивна електрична потужність; S - повна електрична потужність; λ - коефіцієнт потужності; P_{Σ} - сумарна активна електрична потужність; Q_{Σ} - сумарна реактивна електрична

повна електрична потужність; λ_{Σ} - сумарний коефіцієнт потужності; f - частота; Prim./Sec. VT - коефіцієнт трансформації напруги; Prim./Sec. CT - коефіцієнт трансформації струму.

TPZ303 забезпечує можливість автоматичного вибору діапазонів по напрузі та струму. Коли починаються вимірювання, автоматично обирається відповідний діапазон вимірювань. Якщо діапазон буде перевищено, з'являється відповідне попередження. Доступні такі діапазони по напрузі: (480 – 240 – 120 – 60 – 5)V.

Доступні такі діапазони по струму: (20 – 10 – 5 – 2 – 1 – 0,5 – 0,2 – 0,1 – 0,05 – 0,02 – 0,01 – 0,005) A.

TPZ303 дозволяє на кожному діапазоні вимірювати сигнали з перевищенням діапазону на 120%.

Для передачі розміру одиниці електричної потужності користуються вікном керування передачею розміру одиниці електричної потужності (підменю «ENERG-COMP»). Зовнішній вигляд цього вікна наведено на рис. 3.

Вікно керування вміщує наступні елементи: SSM-Table - дозволяє встановлювати параметри передачі розміру одиниці у вигляді таблиці; Volt.-Range - встановлює діапазон по напрузі для приладу, який повіряється; Curr.-Range - встановлює діапазон по струму для приладу, який повіряється; SSM Meas.mode - встановлює схему роботи для приладу, який повіряється; Pulsefreq. - встановлює кількість імпульсів на одиницю електричної потужності для приладу, який повіряється; Prim/Sec VT - встановлює коефіцієнт трансформації в каналі напруги; Prim/Sec CT - встановлює коефіцієнт трансформації в каналі струму; Tmin - встановлює мінімальний час на протязі якого будуть накопичуватись імпульси від приладу, який повіряється; Meas. Mode - встановлює схему роботи (повинно співпадати з SSM Meas.mode); V/I-Range - встановлює відповідні діапазони по напрузі та струму; Sequence - встановлює режим однократного або безперервного вимірювання.

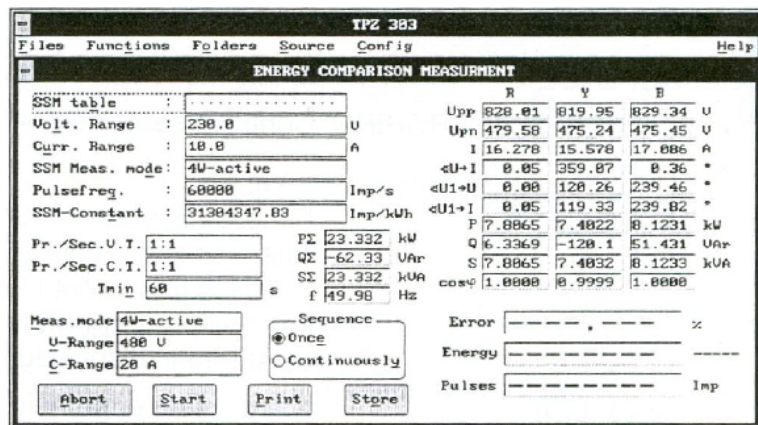


Рис. 3. Зовнішній вигляд вікна керування передачею розміру одиниці

Дослідження еталону за допомогою TPZ303 проводилися на частотах сигналів 40 Гц, 50 Гц, 70 Гц при значеннях напруги від 57,7 В до 220 В, сили струму від 0,01 А до 10 А та величинах кута зсуву фаз 0°, +30°, -30°.

Таблиця 1

ТРЗ303					
Частота сигналу 40 Гц					
Напруга 57,7 В					
-30°		0°		+30°	
Струм, А	Електрична потужність, Вт	Струм, А	Електрична потужність, Вт	Струм, А	Електрична потужність, Вт
0,010059	0,51037	0,010095	0,55963	0,010071	0,50415
0,020050	1,0012	0,020092	1,16	0,020041	1,0013
0,050053	2,49	0,050047	2,87	0,050140	2,50
0,010002	5,03	0,100025	5,74	0,10016	5,01
0,200035	9,91	0,200072	11,57	0,200043	9,99
0,500052	24,9	0,499964	28,83	0,500044	24,9
1,0017	49,58	1,0083	58,22	1,0043	51,56
2,0060	100,06	2,0060	115,44	2,0013	100,79
5,0059	249,65	5,0094	289,80	5,0032	250,11
10,0030	504,13	10,0062	580,99	10,0096	503,19

Таблиця 2

Частота сигналу 40 Гц					
Напруга 127 В					
-30°		0°		+30°	
Струм, А	Електрична потужність, Вт	Струм, А	Електрична потужність, Вт	Струм, А	Електрична потужність, Вт
0,01012	1,16	0,010026	1,2797	0,010095	1,06
0,020047	2,19	0,020085	2,55	0,020061	2,16
0,050065	5,46	0,050049	6,35	0,050053	5,49
0,100043	10,95	0,100047	12,764	0,10005	10,67
0,200090	22,005	0,200017	25,38	0,20008	21,99
0,50015	54,69	0,500015	63,59	0,50005	54,145
1,0067	110,19	1,0013	127,35	1,0016	111,78
2,0017	220,48	2,0068	255,54	2,0070	221,62
5,0080	551,68	5,0057	634,70	5,0079	556,25
10,061	1109,0	10,011	1274,5	10,016	1106,0

Таблиця 1

Частота сигналу 40 Гц					
Напруга 220 В					
-30°		0°		+30°	
Струм, А	Електрична потужність, Вт	Струм, А	Електрична потужність, Вт	Струм, А	Електрична потужність, Вт
0,010008	1,89	0,010043	2,200	0,010034	2,07
0,020041	3,85	0,020081	4,438	0,020021	3,82
0,050034	9,50	0,050094	11,030	0,050012	9,48
0,100031	19,053	0,100033	22,034	0,100030	19,084
0,200019	38,13	0,200058	44,23	0,200060	38,25
0,500030	94,91	0,500038	110,32	0,500094	94,76
1,0071	191,76	1,0076	221,43	1,0041	191,52
2,0025	381,71	2,0047	440,68	2,0034	380,74
5,0052	955,72	5,0092	1103,50	5,0031	952,30
10,023	1912,90	10,0032	2206,00	10,043	1916,00

Таблиця 4

Частота сигналу 50 Гц					
Напруга 57,7 В					
-30°		0°		+30°	
Струм, А	Електрична потужність, Вт	Струм, А	Електрична потужність, Вт	Струм, А	Електрична потужність, Вт
0,01067	0,512	0,01045	0,578	0,010153	0,507
0,020053	1,02	0,020074	1,22	0,020058	1,00
0,050060	2,50	0,050033	2,89	0,050020	2,49
0,100020	5,03	0,100070	5,77	0,10008	5,02
0,200080	9,97	0,200090	11,562	0,20019	10,014
0,500130	24,981	0,500020	28,862	0,50009	25,073
1,0010	50,251	1,0057	58,078	1,0025	50,023
2,0080	98,306	2,0003	115,73	2,0009	101,080
5,0008	250,29	5,0071	289,61	5,0014	249,72
10,022	499,65	10,006	577,47	10,008	501,12

Таблиця 5

Частота сигналу 50 Гц					
Напруга 127 В					
-30°		0°		+30°	
Струм, А	Електрична потужність, Вт	Струм, А	Електрична потужність, Вт	Струм, А	Електрична потужність, Вт
0,010035	1,01	0,010044	1,2776	0,010024	1,04
0,020057	2,21	0,020028	2,55	0,020001	2,19
0,050044	5,54	0,050002	6,35	0,050005	5,51
0,100022	10,94	0,100012	12,719	0,10007	10,983
0,200033	21,944	0,200047	25,443	0,20006	22,082
0,500030	55,021	0,500084	63,681	0,50008	54,821
1,0007	110,70	1,0009	126,84	1,0066	109,91
2,0009	219,65	2,0034	249,46	2,0002	219,17
5,0020	546,73	5,0090	634,11	5,0070	549,62
10,0057	1090,0	10,0084	1277,0	10,0060	1100,0

Таблиця 6

Частота сигналу 50 Гц					
Напруга 220 В					
-30°		0°		+30°	
Струм, А	Електрична потужність, Вт	Струм, А	Електрична потужність, Вт	Струм, А	Електрична потужність, Вт
0,010069	1,92	0,010017	2,207	0,010130	1,93
0,020075	3,72	0,020024	4,4478	0,020093	3,78
0,050066	9,45	0,050034	11,863	0,050065	9,33
0,100490	18,404	0,100012	22,108	0,100430	19,54
0,200140	37,9	0,200023	43,997	0,200230	38,031
0,500017	95,395	0,500053	110,09	0,500030	94,73
1,0088	190,28	1,055	221,43	1,0034	190,52
2,0004	381,27	2,0034	441,52	2,0060	379,33
5,0003	954,05	5,0081	1101,70	5,0014	954,06
10,002	1900,90	10,0050	2204,20	10,006	1910,00

Таблиця 7

Частота сигналу 70 Гц					
Напруга 57,7 В					
-30°		0°		+30°	
Струм, А	Електрична потужність, Вт	Струм, А	Електрична потужність, Вт	Струм, А	Електрична потужність, Вт
0,01035	0,500	0,010009	0,571	0,010044	0,501
0,020072	0,996	0,020049	1,146	0,020072	0,992
0,050076	2,50	0,050023	2,893	0,050061	2,51
0,100290	4,99	0,100030	5,754	0,10005	4,97
0,200340	9,99	0,200990	11,483	0,20018	10,027
0,50047	24,912	0,50055	28,622	0,50037	24,991
1,0014	50,004	1,0425	58,393	1,0046	50,114
2,0018	99,89	2,0273	116,44	2,0017	100,030
5,0057	250,74	5,0405	289,75	5,0045	250,72
10,002	505,33	10,002	582,24	10,056	504,85

Таблиця 8

Частота сигналу 70 Гц					
Напруга 127 В					
-30°		0°		+30°	
Струм, А	Електрична потужність, Вт	Струм, А	Електрична потужність, Вт	Струм, А	Електрична потужність, Вт
0,010075	1,11	0,010098	1,29	0,010064	1,095
0,020010	2,21	0,020051	2,53	0,020084	2,20
0,050033	5,48	0,050049	6,36	0,050105	5,57
0,100310	11,024	0,100050	12,670	0,10016	10,97
0,200090	22,006	0,200082	25,512	0,20025	22,137
0,50040	54,844	0,500095	63,911	0,50004	54,859
1,0097	110,52	1,0637	135,12	1,0061	110,34
2,0076	219,89	2,0031	253,60	2,0028	220,21
5,0066	552,45	5,0871	649,52	5,0042	552,10
10,0007	1090,0	10,078	1282,6	10,004	1098,0

Таблиця 9

Частота сигналу 70 Гц					
Напруга 220 В					
-30°		0°		+30°	
Струм, А	Електрична потужність, Вт	Струм, А	Електрична потужність, Вт	Струм, А	Електрична потужність, Вт
0,010031	1,91	0,010017	2,177	0,010058	1,92
0,020093	3,84	0,020052	4,390	0,020034	3,82
0,050090	9,51	0,050011	11,030	0,050032	9,56
0,10012	19,010	0,100050	22,032	0,100010	18,98
0,200090	38,18	0,200035	44,031	0,200070	38,17
0,500090	95,31	0,500081	110,070	0,500160	95,159
1,0042	190,94	1,0015	220,28	1,0058	191,14
2,0014	380,61	2,0025	444,57	2,0047	381,07
5,0094	957,18	5,0092	1121,30	5,0009	958,83
10,001	1903,00	10,0013	2199,60	10,008	1907,00

Під час додаткових досліджень вторинного еталона електричної потужності в розширеному діапазоні частот було проведено також ряд вимірювань з використанням високоточного нановольметра Agilent 34420 А та мультиметра HP 3458 А.

Нановольтметр 34420А являється мультиметром з високою чутливістю. Він виконує вимірювання напруги постійного низького рівня, а також має функції вимірювання опору і температури. Характеристики приладу: розширення 7.5 разрядів; чутливість 100 пВ/100 нОм; власні шуми не більше 1.3 нВ с.к.з./8 нВ пик.; вимірювання напруги на виході перетворювачів температури з індикацією результату вимірювання в °С; компенсація напруги зміщення для зменшення впливу термо-ЕДС на результат вимірювання; два канала для порівняння двох напруг; швидкість вимірювання до 250 раз в секунду; інтерфейс КОП; автокалібровка і встановлення нуля; розрахунок мінімального та максимального і середнього значень; віднімання та усереднення (10 / 50 / 100 значень); габаритні розміри 254 × 374 × 103 мм; маса 3 кг; напруга живлення 100 В / 120 В / 220 В / 240 В, 45-65 Гц, 360-440 Гц.



Рис. 4. Зовнішній вигляд нановольметра Agilent 34420 А

Технічні характеристики Agilent 34420А

Параметр	Границі вимірювань	Похибка вимірювання
Постійна напруга	1 мВ / 10 мВ / 100 мВ / 1 В / 10 В / 100 В	1 мВ - (0.005%×Uизм+ 0.002%×Uпредел) 10 мВ - (0.005%×Uизм+ 0.0003%×Uпредел) 100 мВ - (0.004%×Uизм+ 0.0004%×Uпредел) 1 В - (0.0035%×Uизм+ 0.0004%×Uпредел) 10 В - (0.003%×Uизм+ 0.0004%×Uпредел) 100 В - (0.0035%×Uизм+ 0.0005%×Uпредел)
Опір	1 Ом / 10 Ом / 100 Ом / 1 кОм / 10 кОм / 100 кОм / 1 МОм	1 Ом - (0.007%×Rизм+0.0002×Rпредел) 10 Ом - (0.006%×Rизм+0.0002×Rпредел) 100 Ом - (0.006%×Rизм+0.0002×Rпредел) 1 кОм - (0.006%×Rизм+0.0002×Rпредел) 10 кОм - (0.006%×Rизм+0.0002×Rпредел) 100 кОм - (0.006%×Rизм+0.0004×Rпредел) 1 МОм - (0.007%×Rизм+0.0004×Rпредел)
Тестовий ток от 5 мкА до 10 мА		
Температура	Розширення 0.001 °С	0.003 °С для платинових термоопорів 0.1 °С для термісторів 0.2 °С для термопар

Прилад має наступні технічні характеристики: діапазон вимірювання постійної напруги: 0 В – 1050 В; діапазон вимірювання постійного струму: 0 А – 1,05 А; діапазон вимірювання апруги змінного струму: 1 мВ – 700 В (діапазон частот: 1 Гц – 10 МГц); діапазон вимірювання змінного струму: 6 мкА – 1,05 А (діапазон частот: 10 Гц – 100 кГц);

Вимірювання проводились при струмах до 10 А, напругах до 600 В та при частоті сигналу 40 Гц та 1000 Гц. Кут зсуву фаз між сигналами струму та напруги становив 0°. Сигнали струму та напруги з калібратору Н4-7 за допомогою перетворювачів «струм-напруга» та «напруга-напруга» подавалися на вакуумні термоперетворювачі. Отримані значення постійної напруги

вимірювалися за допомогою нановольтметра Agilent 34420 А. Таким чином було отримано результати наведені в Табл. 10, 12.

Таблиця 10

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

Дослідження еталона на частоты 500 Гц було проведено з використанням ватметрів Д5107, Д5106. Результати цих досліджень наведено в Табл. 11.

Таблиця 11

Частота сигналу 500 Гц					
Тип приладу	Номинальний струм, А	Значення похибки вимірювання, %			
		Номинальна напруга, В			
		30	150	450	600
Д5107	5	± 0,07	± 0,05	± 0,07	± 0,08
	10	± 0,06	± 0,09	± 0,08	± 0,09
Д5106	5	± 0,09	± 0,08	± 0,07	± 0,06
	10	± 0,07	± 0,09	± 0,08	± 0,09

Таблиця 12

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

Висновки

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 засобам вимірювальної техніки, що застосовуються в країні, відповідає вимогам та можливостям національної економіки. Еталон досліджений в достатньому обсязі і знаходиться в робочому стані.

Список літературних джерел

1. 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.
2. 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.
3. Жук А.Г., Ахмадов А.А.-Б., Кисельман И.Г., Кикало В.Н. Образцовая установка для поверки энергетических фазометров в диапазоне звуковых частот. Измерительная техника. – М.: Издательство стандартов, 1974, №1. – С. 25-28.
4. Калашников В.И., Раннев Г.Г., Суругина В.А. Информационно-измерительная техника и электроника. – Издательство "Academia", 2006.
5. Ахмадов О.А.-Б., Ахмадов С.О., Писчиков В.С. Створення та дослідження вторичного еталону електричної потужності для розширеного діапазону частот. Вісник Інженерної академії України, 1, 2012.