

СТАНДАРТИЗАЦІЯ, МЕТРОЛОГІЯ І СЕРТИФІКАЦІЯ

УДК 681.2

¹О.А.-Б. Ахмадов

²С.О. Ахмадов

³Б.П. Гальовський

ВТОРИННИЙ ЕТАЛОН ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОГО ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ

^{1,3} ДП «Укрметртестстандарт»
² ТОВ «Техенком»

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

Ключові слова: електрична потужність, промисловий діапазон частот, вторинний еталон електричної потужності для промислового діапазону частот.

Вступ

Вимірювання електричної потужності використовується в багатьох галузях промисловості та науки. Засоби вимірювання потужності широко застосовуються для забезпечення оптимальних режимів технологічних процесів у галузях тепло – енергетики, металургії, машинобудування, транспорту і т.д. Крім того, ці засоби вимірювання використовуються для метрологічного забезпечення таких масових вимірювальних пристрій 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 до 20000 Гц. Державний еталон одиниць електричної потужності та коефіцієнта потужності зберігається у місті Києві в ДП «Укрметртестстандарт». В зв'язку з необхідністю запобігання зношенню Державного еталона електричної потужності та коефіцієнту потужності, 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. передбачено розроблення вторинного еталона одиниці електричної потужності і коефіцієнта потужності у розширеному діапазоні частот і струмів. В 2007 році, з метою приведення у відповідність до державної повірочної схеми для засобів вимірювань електричної потужності і коефіцієнта потужності у діапазоні частот від 40 до 20000 Гц (ДСТУ 4116 – 2002), були зроблені зміни в технічному завданні до цієї теми і в рамках цієї роботи було створено два вторинних еталони:

- вторинний еталон одиниці електричної потужності для промислового діапазону частот;
- вторинний еталон одиниці електричної потужності для розширеного діапазону частот;

Виконавцем цієї роботи є Державне підприємство «Всесукаїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «Укрметртестстандарт»).

Галузь застосування вторинного еталона одиниці електричної потужності для промислового діапазону частот – метрологічне забезпечення обладнання енергопостачальних та енергогенеруючих компаній, виробників лічильників електроенергії, територіальних органів Держспоживстандарту України, повірочних та калібрувальних лабораторій [1].

Вторинний еталон одиниці електричної потужності для промислового діапазону частот (далі – вторинний еталон) призначений для зберігання одиниці електричної потужності від 0,001 Вт до 72000 Вт при значеннях напруги від 1 В до 600 В, сили струму від 0,001 А до 120 А та частоти від 40 Гц до 70 Гц і передавання розміру одиниці за допомогою робочих еталонів

робочим засобам вимірювальної, які застосовуються в національній економіці. Вторинний еталон одержує розмір одиниці електричної потужності від Державного еталона одиниць електричної потужності та коефіцієнта потужності, який очолює державну повірочну схему за ДСТУ 4116-2002 та зберігається у Державному підприємстві «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «Укрметртестстандарт»). Метрологічні характеристики вторинного еталона відповідають вимогам ДСТУ 4116-2002.

Усього в Україні експлуатується більше 200 одиниць робочих еталонів електричної потужності 1-го та 2-го розряду, які проходять щорічну повірку в ДП «Укрметртестстандарт» з використанням вторинного еталона одиниць електричної потужності для промислового діапазону частот. На (Рис. 1) подано діаграму співвідношення робочих еталонів 1-го (клас точності: 0,05) та 2-го розряду (клас точності: 0,1; 0,2) до загальної кількості робочих еталонів, що проходять щорічну повірку в лабораторії ДП «Укрметртестстандарт».

Вторинний еталон передає розмір одиниці електричної потужності, при проведенні повірки робочих еталонів електричної потужності (РЕЕП) 1-го та 2-го розряду, методом прямих вимірювань, або методом звірення за допомогою компаратора.

В свою чергу робочі еталони електричної потужності 1-го та 2-го розряду застосовують для повірки робочих засобів вимірювань методом безпосередніх звірень, або методом опосередкованих вимірювань. Загальний обсяг лічильників електроенергії, які експлуатуються в Україні, оцінюється більш ніж 180000000.

Опис еталона та його склад

Вторинний еталон одиниць електричної потужності призначений для повірки і дослідження одиниці електричної потужності в діапазоні частот від 40 до 70 Гц і робочих еталонів робочим засобам вимірювальної техніки, які застосовують в відповідних галузях економіки та оборони України.

Діапазон значень вторинного еталону електричної потужності, в якому відтворюється одиниця вимірювань, становить: від 1 до 72000 Вт при силі струму від $1 \cdot 10^{-3}$ А до 120 А, напругі від 1 В до 600 В, в діапазоні частот від 40 Гц до 70 Гц.

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

При цьому для оптимізації структурної схеми вторинного еталона, необхідність якої визвано наявністю трифазного режиму і значних струмів при роботі на промислових частотах, доцільно виконати у вигляді двох окремих блоків.

На (Рис.2) подано структурну схему трифазного блоку еталона.

1-3 - масштабні перетворювачі напруги; 4,11 - мультиплексори; 5,12 - аналогово-цифрові перетворювачі; 6 - пристрій відображення інформації; 7-9 - масштабні перетворювачі струму; 10 - мікропрцесор; 13 - підсилювач сигналів каналу напруги; 14 - підсилювач сигналів

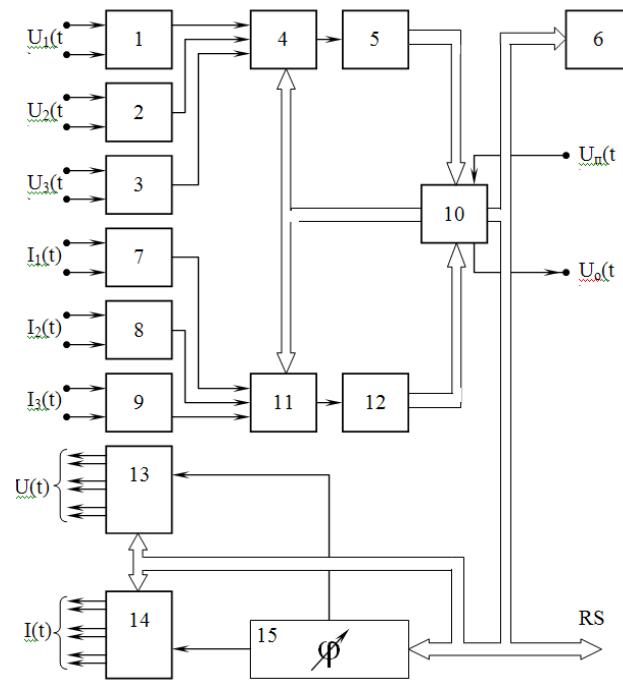


Рис. 3. Структурна схема трифазного блоку вторинного еталона ЕП і КП



Рис.1. Співвідношення робочих еталонів 1-го та 2-го розряду до загальної кількості РЕЕП

каналу струму; 15 - двофазний генератор.

Зовнішній вигляд еталону представлено на Рис.3.

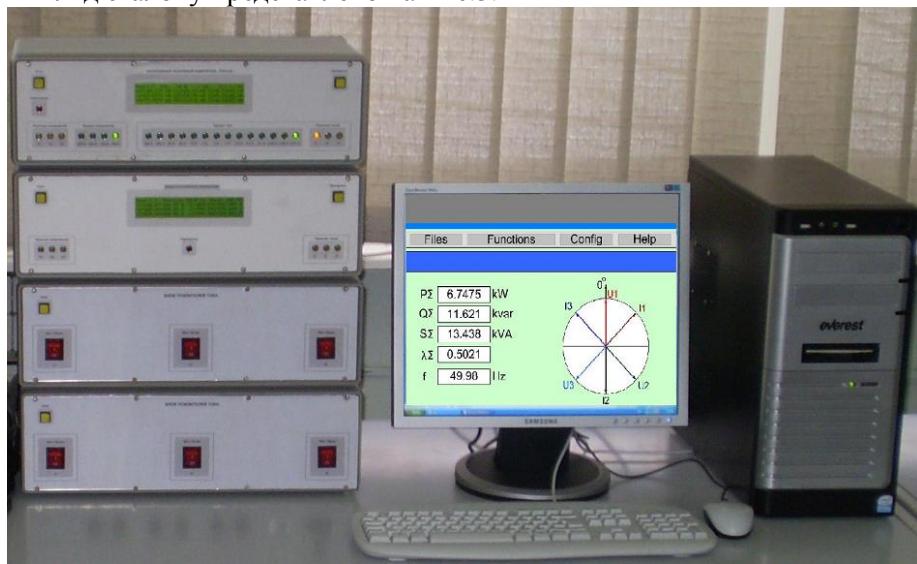


Рис.3. Зовнішній вигляд вторинного еталону електричної потужності
для промислового діапазону частот

Вторинний еталон є комплексом засобів вимірювальної техніки до складу якого входять:

- портативний еталонний вимірювач ПЕВ-0,02;
- блок еталонного генератора;
- блок підсилювачів напруги;
- блок підсилювачів струму;
- блок еталонних перетворювачів напруги;
- блок еталонних перетворювачів струму;
- комп'ютер;
- комплект допоміжного обладнання.

Портативний еталонний вимірювач ПЕВ

Портативний еталонний вимірювач ПЕВ призначено для зберігання і передачі розміру одиниці електричної потужності при середньоквадратичних значеннях фазної напруги від 320 до 600 В, середньоквадратичних значеннях струму від 0,001 до 120 А та частотах від 40 до 70 Гц. Схема роботи: трифазна чотирьох-провідна, трифазна трьох-провідна або однофазна.

Під час роботи на дисплеї ПЕВ відображається наступна інформація:

- діапазон вимірювання по напрузі (встановлюється автоматично);
- діапазон вимірювання по струму (встановлюється автоматично);
- статус періоду усереднення (результати вимірювання оновлюються кожні 30 сек.);
- середньоквадратичні фазні напруги;
- середньоквадратичні лінійні напруги;
- середньоквадратичні струми;
- активна електрична потужність для кожної фази та сумарна;
- реактивна електрична потужність для кожної фази та сумарна;
- повна електрична потужність для кожної фази та сумарна;
- коефіцієнти потужності.

Також на передній панелі ПЕВ за допомогою світлодіодних індикаторів відображаються діапазони вимірювання по напрузі і струму та наявність саме сигналів напруги та струму.

Блок еталонного генератора

Принципову схему одного з каналів генератора подано на (Рис.4).

Каскад генератора виконаний на мікросхемі DA1 КР574УД1Б з мостом Віна в ланцюзі позитивного зворотного зв'язку (резистори R1 - R4, конденсатори C1, C2). Для кожної частоти f, що генерується, величини елементів ланцюга зворотного зв'язку вибираються з умови:

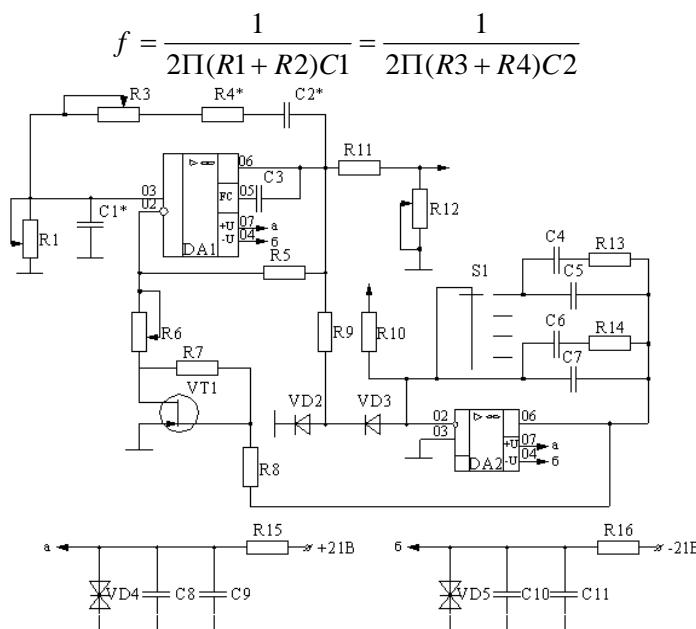


Рис.4. Схема електрична принципова каналу генератора

Польовий транзистор VT1 КП103М, включений у ланцюг негативного зворотного зв'язку (резистори R5, R6), стабілізує амплітуду коливань. Резистори R7, R8 лінеризують його характеристики [2].

Напругу для керування опором каналу транзистора виробляє інтегратор на мікросхемі DA2 КР140УД8А. Постійна часу інтегратора визначається резисторами R9, R13, R14 і конденсаторами C4 - C7. Резистор R9 і діоди VD1, VD2 утворюють випрямляч напруги керуючого сигналу.

Рівень вихідного сигналу регулюється резисторним подільником R11, R12.

Живлення мікросхем здійснюється через стабілізуючі і розв'язуючі ланцюжки, зібрані на елементах VD4, VD5, C8-311, R15, R16.

Для дослідження нестабільноті рівня сформованих сигналів напруги від часу використовувався еталонний мультиметр НР 3458А.

Оскільки похибка нестабільноті фази сформованих сигналів напруги усіх типів залежить від рівня сигналів, то експериментальний зразок еталонного генератора було досліджено при чотирьох різних значеннях напруги, а саме: 1 В, 0,1 В, 0,01 В та 0,001 В.

Отримані результати вимірювань зведені у Таблицях 1-2.

Таблиця 1

Нестабільність рівня сформованих сигналів напруги (за 1 хв.).

Номінальна напруга, В	Нестабільність рівня, %					
	Канал 1 (U1)	Канал 2 (U3)	Канал 3 (U3)	Канал 4 (I1)	Канал 5 (I2)	Канал 6 (I3)
1	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001
0,1	0,004	0,003	0,005	0,004	0,004	0,005
0,01	0,007	0,009	0,007	0,008	0,009	0,007
0,001	0,023	0,020	0,025	0,024	0,026	0,022

Таблиця 2

Нестабільність фази сформованих сигналів напруги (за 1 хв.).

Номінальна напруга, В	Нестабільність рівня, %					
	Канал 1 (U1)	Канал 2 (U3)	Канал 3 (U3)	Канал 4 (I1)	Канал 5 (I2)	Канал 6 (I3)
1	Опорний	0,001 ⁰	0,001 ⁰	0,001 ⁰	0,002 ⁰	0,002 ⁰
0,1	Опорний	0,002 ⁰	0,003 ⁰	0,002 ⁰	0,004 ⁰	0,003 ⁰
0,01	Опорний	0,006 ⁰	0,005 ⁰	0,006 ⁰	0,007 ⁰	0,008 ⁰
0,001	Опорний	0,010 ⁰	0,009 ⁰	0,009 ⁰	0,011 ⁰	0,012 ⁰

Аналіз результатів досліджень цього етапу, дозволяють зробити наступні висновки:

- нестабільність рівня сформованих сигналів напруги (за 1 хв.) при номінальній напрузі 1 В лежить в межах від 0,001% до 0,002%;

- нестабільність рівня сформованих сигналів напруги (за 1 хв.) при напругах від 0,1 В до

0,001 В лежить в межах від 0,003% до 0,026%;

- нестабільність фази сформованих сигналів напруги (за 1 хв.) при номінальній напрузі 1 В лежить в межах від $0,001^0$ до $0,002^0$;
- нестабільність фази сформованих сигналів напруги (за 1 хв.) при напругах від 0,1 В до 0,001 В лежить в межах від $0,002^0$ до $0,012^0$.

Блок еталонного генератора (далі: генератор) призначено для формування 6-ти синхронізованих між собою сигналів напруг. Робота генератора відбувається під керуванням програмного забезпечення персонального комп’ютера.

Основні характеристики:

- кількість каналів: 6;
- номінальна вихідна напруга: 1 В (СКЗ);
- можливість незалежного керування кожним з 6-ти сигналів;
- можливість встановлювати середньоквадратичне значення вихідної напруги в діапазоні від 0 до 610 В (при роботі з блоком підсилювачів напруги);
- можливість встановлювати середньоквадратичне значення вихідного струму в діапазоні від 0 до 120 А (при роботі з блоком підсилювачів струму та блоком помножувачів струму);
- можливість змінювати частоту сигналів в діапазоні від 40 до 70 Гц;
- програмне забезпечення для персонального комп’ютера.

Зовнішній вигляд вікна програми керування генератором наведено на Рис. 5.



Рис. 5. Зовнішній вигляд вікна програми керування блоком еталонного генератора

Перед тим як розпочати роботу з генератором, необхідно присуднати його до порту RS-232 (СОМ порт) персонального комп’ютера та встановити номер його порту в відповідному вікні програми керування.

Після того, як генератор підключено до комп’ютера та встановлено номер СОМ порту, можна встановлювати рівень напруги (СКЗ) та струму (СКЗ) для кожного з 6-ти каналів генератора. Максимальна напруга, яка може бути встановлена, дорівнює 600 В, а максимальний струм дорівнює 120 А. Рівні напруги та струму можуть бути встановлені незалежно для кожного з 6-ти каналів (наприклад: напруга в каналі 1 дорівнює 600 В, а в каналі 3 дорівнює 100 В).

Якщо рівень струму хоча б в одному з каналів перевищує 12 А, необхідно ввімкнути програмний перемикач «Усилитель тока x10» для того, щоб генератор формував вихідні струми з урахуванням наявності блоку помножувачів струму.

Частота встановлюється одразу для всіх 6-ти сигналів з діапазону від 40 до 70 Гц. Дискретність встановлення частоти дорівнює 0,001 Гц.

Кут зсуву фаз між сигналами напруг та струмів може бути встановлено з діапазону від 0 до 360^0 з дискретністю $0,01^0$. При цьому усі суміжні напруги та струми мають фіксований кут зміщення що дорівнює 120^0 .

Основним обладнанням еталона, яке виконує функції зберігання та передавання розміру одиниці електричної потужності, є наступні блоки.

Блоки підсилювачів напруги та струму

До складу вторинного еталона потужності на промисловій частоті входить трифазний блок

підсилювачів напруги, який працює в діапазоні частот від 40 Гц до 70 Гц. Блок підсилювачів напруги на промисловій складається з блоків підсилювачів та трансформаторів напруги. Було досліджено характеристики блока підсилювачів напруги на промисловій частоті, а саме: коефіцієнт нелінійних спотворень вихідних сигналів каналів напруги та нестабільність рівня сформованих за 10 хв сигналів напруги [3].

Також був розроблений центральний вузол схеми вторинного еталона одиниці електричної потужності на промисловій частоті – блок керування блоками підсилювачів напруги та трансформаторами. Цей блок, за допомогою програмного забезпечення, керує функціонуванням трифазного блока підсилювачів напруги на промисловій частоті у різних режимах роботи: прийомом команд від оператора з блоку клавіатури, індикацію на алфавітно-цифровому дисплеї інформації про роботу, виконувати математичну обробку масивів даних, метою якої є формування потоків цифрових даних. Сформовані потоки за допомогою ЦАП каналів напруги перетворюються у аналогові напруги необхідної амплітуди та частоти. Оскільки вихідні сигнали ЦАП мають паразитні високочастотні складові, то для їх фільтрації до складу структурної схеми введено блоки фільтрації та регулювання рівня.

Блок підсилювачів напруги призначено для підсилення напруги з номінальним значенням 1 В (СКЗ) до 600 В (СКЗ). Також блок підсилювачів напруги забезпечує підсилення сигналів напруги по потужності. На передній панелі блоку підсилювачів напруги розташовано три червоних перемикача, кожний з яких призначено для вимикання та вимикання силової частини відповідного каналу підсилення напруги. Якщо вимикач в каналі вимкнено, на відповідному виході на задній панелі підсилювача встановлюється рівень сигналу 0 В. Якщо за допомогою блоку підсилювачів напруги формується трифазна чотирьох-проводна схема роботи, то необхідно з'єднати між собою «нульові» виходи усіх трьох каналів напруги.

Кожен з трьох каналів блоку підсилювачів напруги забезпечує максимальну вихідну потужність в 10 Вт при вихідній напрузі 600 В. Якщо в якому-небудь каналі потужність, що передається в навантаження перевищує 10 Вт, то блок підсилювачів напруги активує схему захисту від перевантаження, яка зменшує напругу на відповідному виході. Схема захисту працює повністю автоматично і не потребує втручання користувача [4].

Аналіз результатів досліджень, дозволяє зробити наступні висновки:

- коефіцієнт нелінійних спотворень вихідного сигналу каналу напруги №1 лежить у межах від 0,060 % до 0,080 %;
- коефіцієнт нелінійних спотворень вихідного сигналу каналу напруги №2 лежить у межах від 0,057 % до 0,072 %;
- коефіцієнт нелінійних спотворень вихідного сигналу каналу напруги №3 лежить у межах від 0,062 % до 0,082 %;
- нестабільність рівня сформованого сигналу напруги (за 10 хв) каналу №1 при напругах від 60 В до 380 В лежить у межах від 0,001 % до 0,003 %;
- нестабільність рівня сформованого сигналу напруги (за 10 хв) каналу №2 при напругах від 60 В до 380 В лежить у межах від 0,001 % до 0,003 %;
- нестабільність рівня сформованого сигналу напруги (за 10 хв) каналу №3 при напругах від 60 В до 380 В лежить у межах від 0,002 % до 0,003 %.

До складу вторинного еталона електричної потужності на промисловій частоті також входить трифазний блок підсилювачів струму, який працює в діапазоні частот від 40 Гц до 70 Гц та в діапазоні струмів від 0,01 А до 10 А. Блок підсилювачів струму на промисловій частоті складається з блоків підсилювачів та трансформаторів струму.

Було розроблено центральний вузол схеми вторинного еталона одиниці електричної потужності на промисловій частоті – блок керування блоками підсилювачів струму та трансформаторами.

Цей блок забезпечує належне функціонування трифазного блока підсилювачів струму на промисловій частоті у різних режимах роботи: прийомом команд від оператора з блоку клавіатури, індикацію на алфавітно-цифровому дисплеї інформації про роботу, виконувати математичну обробку масивів даних, метою якої є формування потоків цифрових даних. Сформовані потоки за допомогою ЦАП каналів напруги та струму перетворюються у аналогові напруги необхідної амплітуди та частоти. Оскільки вихідні сигнали ЦАП мають паразитні високочастотні складові, то для їх фільтрації до складу структурної схеми введено блоки

фільтрації та регулювання рівня трифазного блока підсилювачів струму на промисловій частоті.

Для захисту вихідних сигналів трифазного блока підсилювачів струму на промисловій частоті та приладів, що підключаються, до складу структурної схеми введено блок захисту від перенавантаження каналу струму

Отриманні значення з запасом відповідають встановленим вимогам технічного завдання. Далі наведено результати вимірювання коефіцієнта нелінійних спотворень для різних каналів напруги.

Блок підсилювачів струму призначено для перетворення напруги з номінальним значенням 1 В (СКЗ) до 10 А (СКЗ). Максимальний струм, який може бути сформовано на виході блоку підсилювачів струму дорівнює 12 А (СКЗ). Також блок підсилювачів струму забезпечує підсилення сигналів струму по потужності.

На передній панелі блоку підсилювачів струму розташовано три червоних перемикача, кожний з яких призначено для вимикання та вимикання силової частини відповідного каналу підсилення струму. Якщо вимикач в каналі вимкнено, на відповідному виході на задній панелі підсилювача встановлюється рівень сигналу 0 В. Кожен з трьох каналів блоку підсилювачів струму забезпечує максимальну вихідну потужність в 10 Вт при вихідному струмі 12 А. Якщо в якому-небудь каналі потужність, що передається в навантаження перевищує 10 Вт, то блок підсилювачів струму активує схему захисту від перевантаження, яка зменшує рівень струму у відповідному виході. Схема захисту працює повністю автоматично і не потребує втручання користувача.

Висновки

В основі системи передавання розміру одиниці електричної потужності в Україні є Державний еталон одиниць електричної потужності й коефіцієнта потужності, що дозволяє вимірювати електричну потужність із розширою невизначеністю результату вимірювання на рівні від 0,003 % до 0,008 %, при цьому забезпечується високий ступінь автоматизації, що збільшує ефективність роботи й підвищує достовірність і повторюваність результатів вимірювань. Виконуючи завдання програми створення еталонної бази України було розроблено вторинний еталон електричної потужності для промислового діапазону частот. Враховуючи результати досліджень, було зроблено висновок, що найбільш прийнятно буде розробити вторинний еталон, як комплекс обладнання. Під час підготовки до процедури затвердження було проведено ряд досліджень обладнання, які довели, що метрологічні характеристики вторинного еталону електричної потужності із запасом відповідають вимогам технічного завдання. Починаючи з 2009 року вторинний еталон електричної потужності використовують для проведення калібрування, повірки та державної метрологічної атестації робочих еталонів електричної потужності 1-го та 2-го розрядів. Це дозволило знизити навантаження на Державний еталон електричної потужності та коефіцієнту потужності. А також, завдяки високому рівню автоматизації процесів, прискорити та спростити процедури вимірювання електричної потужності. В середньому за рік роботи на вторинному еталоні проходять повірку та інші процедури більше ніж 250 робочих еталонів електричної потужності.

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 поверки энергетических фазометров в диапазоне звуковых частот. Измерительная техника. – М.: Издательство стандартов, 1974, №1. – С. 25-28.