



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 76354

(13) C2

(51) МПК (2006)

G01R 19/06

G01R 15/24

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

### (54) СПОСІБ НАДЛИШКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1

2

(21) 20041109690

(22) 25.11.2004

(24) 17.07.2006

(46) 17.07.2006, Бюл. № 7, 2006 р.

(72) Кондратов Владислав Тимофійович, Редько Віталій Володимирович

(73) ІНСТИТУТ КІБЕРНЕТИКИ ІМ. В.М. ГЛУШКОВА НАН УКРАЇНИ

(56) US 5416860, 16.05.1995

US 3605013, 14.09.1971

(57) Спосіб надлишкових вимірювань постійного струму, оснований на формуванні лінійно поляризованого потоку оптичного випромінювання нормованої за значенням потужності у заданому діапазоні довжин хвиль, поляризаційній модуляції лінійно поляризованого потоку оптичного випромінювання магнітним полем, напруженість якого утворена відповідним постійним струмом, перетворенні поляризаційно-модульованого потоку оптичного випромінювання в амплітудно-модульований потік оптичного випромінювання, перетворенні його потужності у напругу, її вимірюванні і запам'ятовуванні, який **відрізняється** тим, що попередньо перетворюють лінійно поляризований потік оптичного випромінювання у першу напругу  $U_{H1}$ , вимірюють і запам'ятовують її, поляризаційно модулюють лінійно поляризований потік оптичного випромінювання магнітним полем напруженістю  $H_1$ , еквівалентною за дією нормованому за розміром постійному струму  $I_1$ , перетворюють оптико-електронним способом поляризаційно-модульований потік оптичного випромінювання у другу напругу  $U_{H2}$ , вимірюють і запам'ятовують її, поляризаційно модулюють лінійно поляризований потік оптичного випромінювання магнітним полем напруженістю  $H_2$ , еквівалентною за дією нормованому за розміром постійному струму  $I_2$ , яку встановлюють за умовою, що сума значень напруженостей  $H_1$  і  $H_2$  магнітних полів дорівнює подвоєному значенню напруженості  $H_0$  магнітного поля, їх різниця дорівнює подвійному значенню приросту напруженості  $\Delta H_0$  магнітного поля, причому

$H_0$  і  $\Delta H_0$  перетворюють оптико-електронним способом поляризаційно-модульований потік оптичного випромінювання у третю напругу  $U_{H3}$ , вимірюють і запам'ятовують її, підсумовують магнітні поля, результуюча напруженість  $H_{\Sigma 1}$  яких еквівалентна за дією нормованому за розміром постійному струму  $I_2$  і постійному струму  $I_x$  невідомого розміру, результуючим магнітним полем сумарної напруженості  $H_{\Sigma 1}$  поляризаційно модулюють лінійно поляризований потік оптичного випромінювання, перетворюють оптико-електронним способом поляризаційно-модульований потік оптичного випромінювання у четверту напругу  $U_{H4}$ , вимірюють і запам'ятовують її, підсумовують магнітні поля, результуюча напруженість  $H_{\Sigma 2}$  яких еквівалентна за дією нормованому за розміром постійному струму  $I_1$  і постійному струму  $I_x$  невідомого розміру, результуючим магнітним полем сумарної напруженості  $H_{\Sigma 2}$  поляризаційно модулюють лінійно поляризований потік оптичного випромінювання, перетворюють оптико-електронним способом поляризаційно-модульований потік оптичного випромінювання у п'яту напругу  $U_{H5}$ , вимірюють і запам'ятовують її, визначають дійсне значення постійного струму згідно з рівнянням надлишкових вимірювань

$$I_x = k_w \frac{H_0^2 - \Delta H_0^2}{k_2} \cdot \frac{(U_{H4} - U_{H3}) + (U_{H2} - U_{H5})}{H_0 (U_{H3} - U_{H2}) + \Delta H_0 (U_{H1} - U_{H2}) + \Delta H_0 (U_{H1} - U_{H3})},$$

де  $k_w$  - коефіцієнт перетворення напруженості магнітного поля в постійний струм;

$U_{H1}$ ,  $U_{H2}$ , ...,  $U_{H5}$  - перша, друга, ..., п'ята напруги;

$k_2$  - коефіцієнт пропорційності, причому  $k_2 = 2$ ;

$H_0$  - напруженість магнітного поля, яка еквівалентна за дією нормованому за значенням постійному струму  $I_0$ ;

$\Delta H_0$  - приріст напруженості магнітного поля, еквівалентний за дією нормованому за значенням приросту постійного струму  $\Delta I_0$ .

(13) C2

(11) 76354

(19) UA

Винахід відноситься до області вимірювальної техніки і може бути застосований для високоточного вимірювання постійного струму оптико-електронними методами.

Відомий спосіб вимірювання постійного струму [Пат. 3605013 США, МКИ G01R 13/40. Current-measuring system utilizing Faraday effect element / Shogo Yoshikawa (Японія), Atsufumi Ueki (Японія), 1969], який заснований на тому, що формують лінійно поляризований потік оптичного випромінювання у заданому діапазоні довжин хвиль, поляризаційне модулюють лінійно поляризований потік оптичного випромінювання магнітним полем, напруженість якого утворена постійним струмом невідомого розміру, перетворюють поляризаційно-модульований потік оптичного випромінювання в амплітудно-модульований, перетворюють його потужність у напругу, її вимірюють, запам'ятовують і визначають дійсне значення постійного струму згідно з рівнянням вимірювання.

Відомий спосіб не забезпечує високу точність вимірювання дійсного значення постійного струму. Причинами цього є нелінійність і нестабільність функції оптико-електронного перетворення постійного струму в напругу. Вказані причини призводять до появи похибок від нелінійності, адитивної і мультиплікативної складових систематичної похибки.

Відомий спосіб вимірювання постійного струму [Волоконно-оптические датчики / Т.Окиси, К.Окамото, М.Оцу и др. - Л.: Энергоатомиздат, 1990. - 256 с.], який заснований на тому, що формують лінійно поляризований потік оптичного випромінювання у заданому діапазоні довжин хвиль, поляризаційне модулюють лінійно поляризований потік оптичного випромінювання магнітним полем, напруженість якого утворена постійним струмом невідомого розміру, перетворюють поляризаційно-модульований потік оптичного випромінювання в амплітудно-модульований, перетворюють його потужність у напругу, вимірюють отриману напругу, запам'ятовують її, а про дійсне значення постійного струму судять згідно з рівнянням вимірювання.

Відомий спосіб забезпечує невисоку точність вимірювання дійсного значення постійного струму. Причинами, що заважають досягненню поставленої задачі підвищення точності вимірювання, є нелінійність і нестабільність функції оптико-електронного перетворення постійного струму в напругу.

Відомий також спосіб вимірювання постійного струму [Пат. 5416860 США, МКИ G01R 15/07. Method and apparatus for optically measuring electric current and/or magnetic field with temperature compensation / Yen-Zen Lee (Тайвань, Китай), K. Roger Lee (Тайвань, Китай), 1995], який полягає в тому, що формують лінійно поляризований потік оптичного випромінювання нормованої потужності у

заданому діапазоні довжин хвиль, поляризаційне модулюють лінійно поляризований потік оптичного випромінювання магнітним полем утвореним вимірюваним струмом, перетворюють поляризаційно-модульований потік оптичного випромінювання в амплітудно-модульований, перетворюють його потужність у напругу, вимірюють її, запам'ятовують і визначають дійсне значення постійного струму згідно з рівнянням вимірювання.

У відомому способі причинами, що заважають досягненню поставленої задачі підвищення точності вимірювання, є нелінійність, довгострокова і температурна нестабільність функції оптико-електронного перетворення постійного струму в напругу. Останнє обумовлює появу систематичної похибки, в тому числі похибки від нелінійності функції перетворення. Зазначений спосіб неповністю виключає ці похибки, оскільки не враховує нелінійність функції оптико-електронного перетворення.

В основу винаходу покладена задача створення такого способу надлишкових вимірювань постійного струму, у якому, шляхом введення заданої кількості, послідовності, умов виконання операцій та обробки результатів проміжних вимірювань по заздалегідь заданому рівнянню надлишкових вимірювань, забезпечувалося б підвищення точності при нелінійній та нестабільній функції оптико-електронного перетворення постійного струму в напругу.

Поставлена задача вирішується завдяки тому, що спосіб надлишкових вимірювань постійного струму, оснований на формуванні лінійно поляризованого потоку оптичного випромінювання нормованої за значенням потужності у заданому діапазоні довжин хвиль, поляризаційній модуляції лінійно поляризованого потоку оптичного випромінювання магнітним полем, напруженість якого утворена відповідним постійним струмом, перетворенні поляризаційно-модульованого потоку оптичного випромінювання в амплітудно-модульований потік оптичного випромінювання, перетворенні його потужності у напругу, її вимірюванні, запам'ятовуванні і визначенні дійсного значення постійного струму згідно з рівнянням вимірювання. Від прототипу він відрізняється тим, що спочатку перетворюють лінійно поляризований потік оптичного випромінювання у першу напругу  $U_{H1}$ , вимірюють і запам'ятовують її, поляризаційне модулюють лінійно поляризований потік оптичного випромінювання магнітним полем напруженістю  $H_1$ , еквівалентною за дією нормованому за розміром постійному струму  $I_1$ , після оптико-електронного перетворення поляризаційно-модульованого потоку оптичного випромінювання у другу напругу  $U_{H2}$ , вимірювання і запам'ятовування її, поляризаційне модулюють лінійно поляризований потік оптичного випромінювання магнітним полем напруженістю

$H_2$ , еквівалентною за дією нормованому за розміром постійному струму  $I_2$ , яку встановлюють за умовою, що сума значень напруженостей  $H_1$  і  $H_2$  магнітних полів дорівнює подвоєному значенню напруженості  $H_0$  магнітного поля, їх різниця дорівнює подвійному значенню приросту напруженості  $\Delta H_0$  магнітного поля, причому

$H_0 \approx 6 \cdot 10^{-4} \Delta H_0$ , після оптико-електронного перетворення поляризаційно-модульованого потоку оптичного випромінювання у третю напругу  $U_{H3}$ , вимірювання і запам'ятовування її, сумують магнітні поля, результуюча напруженість  $H_{\Sigma 1}$  яких еквівалентна за дією нормованому за розміром постійному струму  $I_2$  і постійному струму  $I_x$  невідомого розміру, результуючим магнітним полем сумарної напруженості  $H_{\Sigma 1}$  поляризаційне модулюють лінійно поляризований потік оптичного випромінювання, після оптико-електронного перетворення поляризаційно-модульованого потоку оптичного випромінювання у четверту напругу  $U_{H4}$ , вимірювання і запам'ятовування її, сумують магнітні поля, результуюча напруженість  $H_{\Sigma 1}$  яких еквівалентна за дією нормованому за розміром постійному струму  $I_1$  і постійному струму  $I_x$  невідомого розміру, результуючим магнітним полем сумарної напруженості  $H_{\Sigma 2}$  поляризаційне модулюють лінійно поляризований потік оптичного випромінювання, після оптико-електронного перетворення поляризаційно-модульованого потоку оптичного випромінювання у п'яту напругу  $U_{H5}$ , вимірювання і запам'ятовування її, визначають дійсне значення постійного струму згідно з рівнянням надлишкових вимірювань

$$I_x = k_w \frac{H_0^2 - \Delta H_0^2}{k_2} \cdot \frac{U_{H4} - U_{H3} \pm U_{H2} - U_{H5}}{H_0 U_{H3} - U_{H2} \pm \Delta H_0 U_{H1} - U_{H2} \pm \Delta H_0 U_{H1} - U_{H3}}$$

де  $k_w$  - коефіцієнт перетворення напруженості магнітного поля в постійний струм;  $U_{H1}$ ,  $U_{H2}$ , ...,  $U_{H5}$  - перша, друга, ..., п'ята напруги;  $k_2$  - коефіцієнт пропорційності, причому  $k_2 = 2$ ;  $H_0$  - напруженість магнітного поля, яка еквівалентна за дією нормованому за значенням постійному струму  $I_0$ ;  $\Delta H_0$  - приріст напруженості магнітного поля, еквівалентний за дією нормованому за значенням приросту постійного струму  $\Delta I_0$ .

Суть запропонованого способу надлишкових вимірювань постійного струму пояснюється структурною схемою пристрою наведеною на рисунку, де 1 - світлодіод; 2 - поляризатор; 3 та 9 - перша та друга лінзи; 4 - елемент Фарадея; 5 - котушка індуктивності; 6 - рухомий магнітозахисний екран; 7 - рухомий постійний магніт (кільцевий); 8 - аналізатор; 10 - фотодіод; 11 - вольтметр з цифровим відліковим пристроєм.

В основу запропонованого способу надлишкових вимірювань постійного струму покладені два фізичні ефекти: магнітно-оптичний ефект Фарадея та фотогальванічний ефект. Магнітно-оптичний ефект Фарадея дозволяє поляризаційне модулювати лінійно поляризований потік оптичного випромінювання магнітним полем напруженість якого утворюється постійним струмом. Фотогальванічний ефект дозволяє перетворити

потужності амплітудно-модульованого потоку оптичного випромінювання у напругу.

Припустимо, що загальна функція оптико-електронного перетворення напруженості магнітного поля в напругу описується рівнянням величин

$$U = S_H (H_x)^2 + S_L H_x + \Delta U,$$

де  $H_x$  - напруженість магнітного поля, що утворюється вимірюванням постійним струмом, причому  $\{H_x\} = \{k_w\} \{I_x\}$ ;  $\{k_w\} = \{w\}/\{l\}$ ;  $w$  - кількість витків в котушці індуктивності;  $l$  - довжина котушки індуктивності,  $S_H$ ,  $S_L$  - номінальні за значенням параметри квадратичної функції перетворення;

$\Delta U$  - початкове зміщення квадратичної функції перетворення.

Запропонований спосіб надлишкових вимірювань постійного струму оснований на тому, що формують лінійно поляризований потік оптичного випромінювання нормованої за значенням потужності у заданому діапазоні довжин хвиль. Лінійно поляризований потік  $\Phi_H$  оптичного випромінювання формують за допомогою світлодіода 1, поляризатора 2 і першої лінзи 3. Потім поляризаційне модулюють лінійно поляризований потік оптичного випромінювання магнітним полем, напруженість якого утворена відповідним постійним струмом. Поляризаційну модуляцію лінійно поляризованого потоку  $\Phi_H$  оптичного випромінювання здійснюють за допомогою елемента Фарадея 4 та котушки індуктивності 5 або рухомого постійного магніту 7. Далі перетворюють поляризаційно-модульований потік оптичного випромінювання в амплітудно-модульований потік оптичного випромінювання. Перетворення поляризаційно-модульованого потоку  $\Phi_{PM}$  оптичного випромінювання в амплітудно-модульований потік здійснюють за допомогою аналізатора 8. Потім перетворюють його потужність у напругу. Перетворення потужності амплітудно-модульованого потоку оптичного випромінювання у напругу  $U_H$  виконується за допомогою фотодіода 10. Далі отриману напругу вимірюють, запам'ятовують і визначають дійсне значення постійного струму згідно з рівнянням вимірювання. Вимірювання отриманої напруги  $[U]$  здійснюється за допомогою вольтметра 11.

Реальна функція оптико-електронного перетворення постійного струму в напругу описується рівнянням величин

$$U = S'_H (H_x)^2 + S'_L H_x + \Delta U, \quad (1)$$

де  $\{S'_H\} = \{S_H\} + \{\Delta S_H\}$ ,  $\{S'_L\} = \{S_L\} + \{\Delta S_L\}$  - реальні значення параметрів квадратичної функції перетворення;  $\Delta S_H$  - абсолютне відхилення від номінального значення параметра нелінійної складової функції перетворення;

$\Delta S_L$  - абсолютне відхилення від номінального значення параметра лінійної складової функції перетворення;  $\{U_H\} \pm \{U\} \pm \{U_a\}$  - результуюче зміщення функції перетворення;  $\Delta_a$  - адитивна складова систематичної похибки;

$A_{\text{лм}} \rightarrow A_{\text{сл}} \rightarrow H_x$  - лінійна складова мультиплікативної систематичної похибки;  
 $A_{\text{лм}} \rightarrow A_{\text{сл}} \rightarrow H_x \rightarrow H_x^2$  - нелінійна складова мультиплікативної похибки вимірювання.

Згідно із запропонованим способом, спочатку перетворюють лінійно поляризований потік оптичного випромінювання у першу напругу  $U_{\text{н1}}$ .

Для цього рухомий магнітозахисний екран 6 встановлюють у перше, вказане на рисунку, положення. Таким чином виключають дію на елемент Фарадея 4 магнітного поля напруженість  $H_x$  якого утворена постійним струмом  $I_x$ , що протікає через котушку індуктивності 5. Постійний магніт 7 встановлюють в перше положення при якому напруженість створюваного ним магнітного поля стає меншою за поріг чутливості елемента Фарадея 4.

Перетворюють поляризаційно-модульований потік оптичного випромінювання у першу напругу. Для цього поляризаційно-модульований потік оптичного випромінювання  $\Phi_{\text{пм1}}$  пропускають через аналізатор 8 другу лінзу 9 і подають на фотодіод 10. На виході фотодіода 10 утворюється перша напруга

$$U_{\text{н1}} = \Delta U_{\text{н}}. \quad (2)$$

Отриману напругу  $U_{\text{н1}}$  (2) вимірюють за допомогою вольтметра 11 і запам'ятовують.

Потім поляризаційне модулюють лінійно поляризований потік оптичного випромінювання магнітним полем напруженістю  $H_1$  еквівалентною за дією нормованому за розміром постійному струму  $I_1$ .

Для цього постійний магніт 7 встановлюють в друге положення (див. рисунок) при якому значення напруженості магнітного поля, що діє на елемент Фарадея 4 є рівним

$$H_1 \rightarrow H_0 \rightarrow \Delta H_0 \rightarrow K_w \rightarrow K_w \rightarrow A_{I_0}$$

де  $H_0$  - напруженість магнітного поля, яка еквівалентна за дією нормованому за значенням постійному струму  $I_0$ ;  $\Delta H_0$  - приріст напруженості магнітного поля, еквівалентний за дією нормованому за значенням приросту постійного струму  $\Delta I_0$ .

Перетворюють поляризаційно-модульований потік оптичного випромінювання у другу напругу  $U_{\text{н2}}$ . Для цього поляризаційно-модульований потік  $\Phi_{\text{пм2}}$  оптичного випромінювання пропускають через аналізатор 8, другу лінзу 9 та подають на фотодіод 10. На виході фотодіода 10 утворюється друга напруга

$$U_{\text{н2}} = S_{\text{н}}' \left( H_0 - \Delta H_0 \right) + S_{\text{л}}' \left( H_0 - \Delta H_0 \right) \Delta U_{\text{н}} \quad (3)$$

Отриману напругу  $U_{\text{н2}}$  (3) вимірюють за допомогою вольтметра 11 і запам'ятовують.

Далі поляризаційне модулюють лінійно поляризований потік оптичного випромінювання магнітним полем напруженістю  $H_2$ , еквівалентною за дією нормованому за розміром постійному струму  $I_2$ .

Для цього постійний магніт 7 встановлюють в третє положення (див. рисунок) при якому значення напруженості магнітного поля, що діє на елемент Фарадея 4 є рівним

$$H_2 \rightarrow H_0 \rightarrow \Delta H_0 \rightarrow K_w \rightarrow K_w \rightarrow A_{I_0}$$

Перетворюють поляризаційно-модульований потік оптичного випромінювання у третю напругу  $U_{\text{н3}}$ . Для цього поляризаційно-модульований потік  $\Phi_{\text{пм3}}$  оптичного випромінювання пропускають через аналізатор 8, другу лінзу 9 та подають на фотодіод 10. На виході фотодіода 10 утворюється друга напруга

$$U_{\text{н3}} = S_{\text{н}}' \left( H_0 + \Delta H_0 \right) + S_{\text{л}}' \left( H_0 + \Delta H_0 \right) \Delta U_{\text{н}} \quad (4)$$

Отриману напругу  $U_{\text{н3}}$  (4) вимірюють за допомогою вольтметра 11 і запам'ятовують.

Сумують магнітні поля, результуюча напруженість  $H_{\Sigma 1}$  яких еквівалентна за дією нормованому за розміром постійному струму  $I_2$  і постійному струму  $I_x$  невідомого розміру, результуючим магнітним полем сумарної напруженості  $H_{\Sigma 1}$  поляризаційне модулюють лінійно поляризований потік оптичного випромінювання.

Для цього встановлюють магнітозахисний екран 6 у друге положення (див. рисунок), на встановлену відстань до котушки індуктивності 5. Постійний магніт 7 встановлюють у третє положення. При цьому на елемент Фарадея 4 одночасно діють два магнітні поля з напруженостями  $H_2$  і  $H_x$ .

Результуючим магнітним полем за допомогою елемента Фарадея 4 поляризаційне модулюють лінійно поляризований потік  $\Phi_{\text{н}}$  оптичного випромінювання.

За допомогою аналізатора 8, другої лінзи 9 та фотодіода 10 перетворюють поляризаційно-модульований потік  $\Phi_{\text{пм4}}$  оптичного випромінювання у четверту напругу

$$U_{\text{н4}} = S_{\text{н}}' \left( H_x + H_2 \right) + S_{\text{л}}' \left( H_x + H_2 \right) \Delta U_{\text{н}} \quad (5)$$

Отриману напругу  $U_{\text{н4}}$  (5) вимірюють за допомогою вольтметра 11 і запам'ятовують.

Потім сумують магнітні поля, результуюча напруженість  $H_{\Sigma 2}$  яких еквівалентна за дією нормованому за розміром постійному струму  $I_1$  і постійному струму  $I_x$  невідомого розміру, результуючим магнітним полем сумарної напруженості  $H_{\Sigma 2}$  поляризаційне модулюють лінійно поляризований потік оптичного випромінювання.

Для цього постійний магніт 7 встановлюють у друге положення (див. рисунок) при якому значення напруженості магнітного поля, що діє на елемент Фарадея 4 є рівним

$$H_1 \rightarrow H_0 \rightarrow \Delta H_0 \rightarrow K_w \rightarrow K_w \rightarrow A_{I_0}$$

Результуючим магнітним полем за допомогою поляризаційне модулюють лінійно поляризований потік  $\Phi_{\text{н}}$  оптичного випромінювання.

За допомогою аналізатора 8 та фотодіода 10 перетворюють поляризаційно-модульований потік  $\Phi_{\text{пм5}}$  оптичного випромінювання у п'яту напругу

$$U_{\text{н5}} = S_{\text{н}}' \left( \Phi_{\text{х}} + H_1 \right)^2 + S_{\text{п}}' \left( \Phi_{\text{х}} + H_1 \right) \Delta U_i \quad (6)$$

Отриману напругу  $U_{\text{н5}}$  (6) вимірюють за допомогою вольтметра 11 і запам'ятовують.

Дійсне значення постійного струму визначають згідно з рівнянням надлишкових вимірювань

$$I_x = k_w \frac{H_0^2 - \Delta H_0^2}{k_2} \cdot \frac{\Phi_{\text{н4}} - U_{\text{н3}} \pm \Phi_{\text{н2}} - U_{\text{н5}}}{H_0 \Phi_{\text{н3}} - U_{\text{н2}} \pm \Delta H_0 \Phi_{\text{н1}} - U_{\text{н2}} \pm \Delta H_0 \Phi_{\text{н1}} - U_{\text{н3}}} \quad (7)$$

де  $k_w$  - коефіцієнт перетворення напруженості магнітного поля в постійний струм;  $U_{\text{н1}}, U_{\text{н2}}, \dots, U_{\text{н5}}$  - перша, друга, ..., п'ята напруги;  $k_2$  - коефіцієнт пропорційності, причому  $k_2 = 2$ ;  $H_0$  - напруженість магнітного поля, яка еквівалентна за дією нормованому за значенням постійному струму  $I_0$ ;  $\Delta H_0$  - приріст напруженості магнітного поля, еквівалентний за дією нормованому за значенням приросту постійного струму  $\Delta I_0$ .

Покажемо, що дійсно за допомогою запропонованого рівняння надлишкових вимірювань

забезпечується одержання позитивного ефекту. Для цього в рівняння (7) підставимо аналітичні вирази (2 - 6) та зробимо спрощення:

$$I_x = k_w \frac{H_0^2 - \Delta H_0^2}{k_2} \cdot \frac{\Phi_{\text{н4}} - U_{\text{н3}} \pm \Phi_{\text{н2}} - U_{\text{н5}}}{H_0 \Phi_{\text{н3}} - U_{\text{н2}} \pm \Delta H_0 \Phi_{\text{н1}} - U_{\text{н2}} \pm \Delta H_0 \Phi_{\text{н1}} - U_{\text{н3}}} \cdot \frac{H_0^2 - \Delta H_0^2}{k_2} \cdot \frac{k_2^2 S_{\text{н}} \Delta H_0}{k_2 S_{\text{н}} \Delta H_0 (H_0^2 - \Delta H_0^2)} = k_w H_x.$$

Аналіз рівняння надлишкових вимірювань (7) показав, що обробка результатів проміжних вимірювань зазначеним чином забезпечує виключення впливу абсолютних значень параметрів квадратичної функції оптико-електронного перетворення постійного струму в напругу, а також їх змін в часі та від температури, відносно номінальних.

Таким чином, спосіб надлишкових вимірювань постійного струму забезпечує виключення похибок від нелінійності, адитивної і мультиплікативної складових систематичної похибки.

Позитивний ефект отриманий завдяки введенню нової сукупності та послідовності операцій вимірювання різних за розмірами постійних струмів і використання нового рівняння надлишкових вимірювань.

Таким чином, запропонований спосіб надлишкових вимірювань постійного струму забезпечує вирішення зазначеної задачі.

