

УДК 681.586.59(045)

В. Т. Кондратов, д. т. н., проф.;

В. В. Редько

ЦИФРОВИЙ ВИМІРЮВАЧ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИМ СЕНСОРОМ

Описано нове технічне рішення цифрового вимірювача постійного струму з автоматичною корекцією систематичних похибок, який реалізує магніто-оптико-електронний метод надлишкових вимірювань. Запропоновано конструкцію структурно-надлишкового волоконно-оптичного сенсора постійного струму, що має широкі функціональні можливості та є нечутливим до дії теплових, електричних і магнітних полів.

Постановка проблеми

Проблема розробки цифрових вимірювачів постійного струму (ЦВПС), розрахованих на роботу не тільки у лабораторних умовах, але й при дії жорстких зовнішніх дестабілізуючих факторів, як і раніше залишається актуальною. У цьому зв'язку перспективним є створення ЦВПС на основі магніто-оптико-електронних методів (МОЕМ) вимірювання електричних величин.

Аналіз досліджень і публікацій

У даний час у державах СНД проводяться інтенсивні розробки в області створення ЦВПС з використанням волоконно-оптичних сенсорів струму (ВОСС). Результати досліджень [1—3] показали, що ЦВПС із ВОСС є ефективнішими у порівнянні з традиційними засобами вимірювання постійного струму в умовах дії сильних електромагнітних завад і підвищеної іскро- та вибухонебезпеки.

Сучасні ЦВПС, які реалізують МОЕМ вимірювання, забезпечують похибку вимірювання постійного струму (1,0...2,5) %, що є недостатнім для проведення прецизійних вимірювань [2...4].

Відомо [2, 3], що основними складовими систематичної похибки ЦВПС із ВОСС є: 1) похибка від нелінійності функції перетворення (ФП) вимірюваного постійного струму у потужність потоку оптичного випромінювання; 2) похибка від нелінійності ФП потужності модульованого потоку оптичного випромінювання у напругу; 3) додаткова похибка, яка обумовлена температурною нестабільністю джерела оптичного випромінювання, чутливого елемента ВОСС та фотоприймача.

Для зменшення похибки від нелінійності ФП струму у потужність потоку оптичного випромінювання застосовують, як правило, метод введення поправок. Дослідження [3] показали, що цей метод не дозволяє досягти похибки від нелінійності меншої за $\pm 0,14$ % в діапазоні вимірюваних постійних струмів (0,01...1700) А.

Для забезпечення лінійності перетворення потужності потоку оптичного випромінювання у напругу використовують, переважно, фотогальванічний режим роботи фотодіода з робочою точкою на початковій ділянці його світлової характеристики.

Вплив температурної нестабільності джерела оптичного випромінювання на вихідний оптичний сигнал ВОСС зменшують за рахунок розділення інформативного потоку оптичного випромінювання на дві ортогонально поляризовані складові, перетворення їх у напруги і застосування різницево-сумарної обробки отриманих напруг [2, 3]. Слід зазначити, що даний підхід є ефективним лише для малих значень похибки від нелінійності ФП фотоприймача. Крім того, для реалізації даного методу необхідно підбирати два фотоприймачі з ідентичними характеристиками, оскільки невиконання цієї умови призводить до виникнення похибки від неідентичності вимірювальних каналів.

Додаткову похибку ВОСС можна зменшити, якщо його чутливий елемент виготовити з волоконного світловода із діамагнітного матеріалу (наприклад, свинцевого скла, $\text{V}_{12}\text{SiO}_{20}$, As_4S_3 -скла) [2, 3]. Однак, ВОСС, в якого чутливий елемент виготовлений із діамагнетика, за чутливістю поступається ВОСС з парамагнітним чутливим елементом.

Частково температурна нестабільність фотоприймача може бути зменшена шляхом термостатування фотодіода [5] або за допомогою різних схемотехнічних рішень, наприклад, за рахунок підключення фотодіода до підсилювача напруги із парафазним виходом [6].

Постановка завдання

Задачею дослідження є вивчення можливостей створення ЦВПС із структурно-надлишковим ВОСС, що реалізує МОЕМ надлишкових вимірювань і забезпечує автоматичну корекцію систематичних похибок вимірювання в широкому діапазоні постійних струмів.

Мета дослідження

Метою дослідження є створення МОЕМ надлишкових вимірювань постійного струму і відповідного технічного рішення ЦВПС, які забезпечували б вирішення поставленої задачі.

Розв'язання поставленої задачі та отримані результати

МОЕМ надлишкових вимірювань постійного струму — це методи, які засновані на виконанні скінченної сукупності прямих вимірювань контрольованої фізичної величини, — потужності потоку оптичного випромінювання, що пов'язана з вимірюваним струмом відомою функціональною залежністю, та/чи ряду спряжених величин (різних потужностей потоку оптичного випромінювання), пов'язаних із контрольованою за відомим законом для незмінних та/чи дискретно змінених на нормовані значення параметрах ФП ВОСС або всього вимірювального каналу ЦВПС з подальшим визначенням дійсного значення струму згідно з рівнянням надлишкових вимірювань [7].

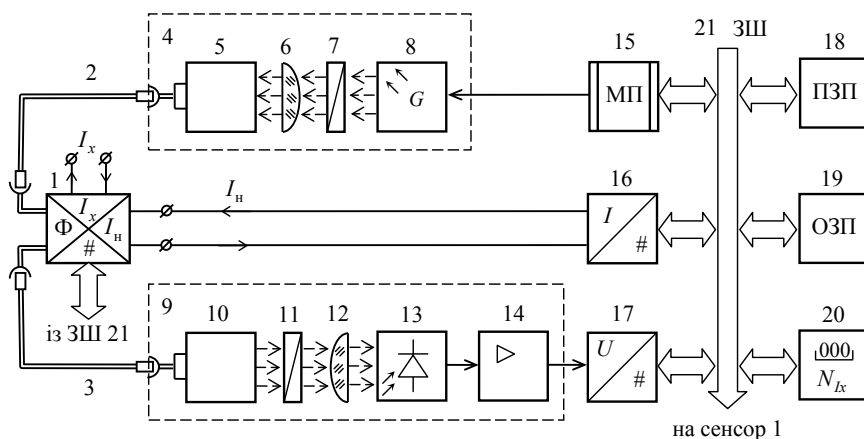


Рис. 1. Структурна схема цифрового вимірювача постійного струму:

1 — структурно-надлишковий ВОСС; 2, 3 — перший та другий світловоди із встановленими на обох їх кінцях штирями світловодних з'єднувачів; 4 — формувач потоку лінійно поляризованого оптичного випромінювання; 5 — перший мікрооб'єктив; 6 — перша лінза; 7 — поляризатор; 8 — джерело оптичного випромінювання; 9 — оптико-електронний перетворювач; 10 — другий мікрооб'єктив; 11 — аналізатор; 12 — друга лінза; 13 — фотоприймач; 14 — підсилювач напруги; 15 — мікропроцесор (МП); 16 — перетворювач «код-струм» (ПКС); 17 — перетворювач «напруга-код» (ПНК); 18 — постійний підшипник ковзання; 19 — феромагнітна втулка; 20 — другий мідний струмопровідник; 21 — штук; 22 — перетворювач «код-переміщення».

В основу принципу дії структурно-надлишкового ВОСС 1 покладено магнітооптичний ефект Фарадея. Даний ефект полягає в обертанні площини поляризації лінійно поляризованого випроміню-

Розв'яжемо задачу автоматичної корекції систематичних похибок вимірювання постійного струму на прикладі роботи ЦВПС, який реалізує МОЕМ надлишкових вимірювань.

Структурну схему ЦВПС показано на рис. 1.

Для пояснення принципу дії ЦВПС на рис. 2 зображено конструкцію структурно-надлишкового ВОСС 1, де 22 і 23 — перше і друге гнізда світловодних з'єднувачів; 24 — третій світловод; 25 — перша багатовиткова котушка з волоконного світловоду; 26 — перший мідний струмопровідник; 27 — друга багатовиткова котушка тороїдальної форми із світловоду; 28 — котушка індуктивності; 29 — циліндровий каркас; 30 —

вання в оптично активних речовинах під дією магнітного поля, яке містить компоненту у напрямі розповсюдження випромінювання в матеріалі [2, 3].

Для запропонованої конструкції ВОСС магнітооптичний ефект Фарадея аналітично можна записати таким чином [2, 3]

$$\alpha = V_B (w_1 I_X + w_2 w_3 I_H), \tag{1}$$

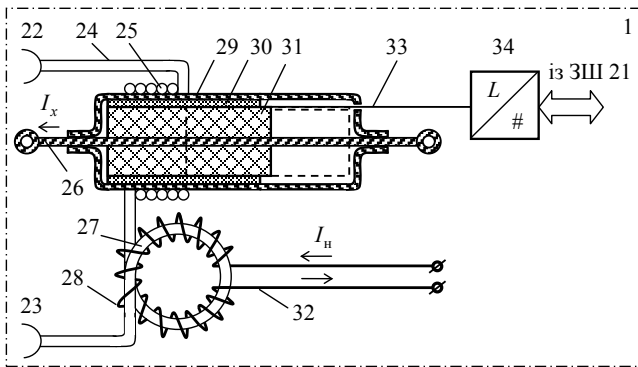


Рис. 2. Конструкція структурно-надлишкового ВОСС

мідний струмопровідник 32.

Якщо кут між площинами поляризації потоку оптичного випромінювання, що проходить через поляризатор 7 і аналізатор 11, встановити рівним 45° , то ФП оптико-електронного перетворювача 9 з урахуванням аналітичного виразу (1) можна описати таким нелінійним рівнянням величин [2]:

$$U = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{S_I \Phi_{\Pi} \left[k_1 + \sin \left(k_2 V_B (w_1 I_X + w_2 w_3 I_H) \right) \right]}{k_2 I_S} + k_1 \right], \tag{2}$$

де k — постійна Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T — абсолютна температура; q — заряд електрону, $q = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл; S_I — інтегральна струмова чутливість фотоприймача; I_S — темновий струм фотоприймача; Φ_{Π} — потужність потоку лінійно поляризованого оптичного випромінювання на виході формувача 4; k_1 і k_2 — безрозмірні коефіцієнти, причому $k_1 = 1$, $k_2 = 2$.

Представимо ФП (2) у вигляді квадратичної функції

$$U_H = S'_H (w_1 I_X + w_2 w_3 I_H)^2 + S'_L (w_1 I_X + w_2 w_3 I_H) + \Delta U_{3M},$$

де S'_H , S'_L і ΔU_{3M} — параметри ФП, значення яких дорівнюють:

$$\begin{aligned} \{S'_H\} &= -a_H \frac{\{k\}\{T\}\{S_I\}^2\{\Phi_{\Pi}\}^2\{V_B\}^2}{\{q\}\{I_S\}(\{S_I\}\{\Phi_{\Pi}\} + 2\{I_S\}) \left(\frac{\{S_I\}\{\Phi_{\Pi}\}}{2\{I_S\}} + 1 \right)}; \\ \{S'_L\} &= a_L \frac{\{k\}\{T\}\{S_I\}\{\Phi_{\Pi}\}\{V_B\}}{\{q\}\{I_S\} \left(\frac{\{S_I\}\{\Phi_{\Pi}\}}{2\{I_S\}} + 1 \right)}; \\ \{\Delta U_{3M}\} &= a_{3M} \frac{\{k\}\{T\}}{\{q\}} \ln \left(\frac{\{S_I\}\{\Phi_{\Pi}\}}{2\{I_S\}} + 1 \right), \end{aligned}$$

де a_H , a_L , a_{3M} — безрозмірні коефіцієнти.

Цифровий вимірювач постійного струму працює таким чином. Після включення приладу всі функціональні блоки встановлюються в початковий стан. Вхідні регістри чисел цифрового відлікового пристрою 20, ПНК 17 і перетворювача «код-переміщення» 34 обнуляються. У результаті цифровий відліковий пристрій 20 відображає нульовий результат. На виході ПКС 16 струм відсутній.

Джерело оптичного випромінювання 8 за командою з МП 15 вмикається. У середині ВОСС 1 феромагнітна втулка 31 за допомогою перетворювача «код-переміщення» 34 встановлюється в положення вказане на рис. 2. При цьому виключається дія магнітного поля, яке створюється вимірюваним струмом, на чутливий елемент ВОСС 1.

Робота пристрою складається з чотирьох тактів вимірювання та одного такту обробки одержаних результатів проміжних вимірювань.

У першому такті вимірювань за командою з МП 15 вмикається джерело оптичного випромінювання 8. Потік оптичного випромінювання від джерела 8 надходить на поляризатор 7. З виходу поляризатора 7 лінійно поляризований потік Φ_H оптичного випромінювання через першу лінзу 6 надходить на мікрооб'єктив 5 і по світловоду 2 надходить на оптичний вхід ВОСС 1 (див. рис. 1).

Одночасно за командою з МП 15 в регістр ПКС 16 записується код числа N_{I1} . У результаті через котушку індуктивності 28 (див. рис. 2) протікає постійний струм I_1 , значення якого дорівнює $\{I_1\} = \{I_0\} - \{\Delta I_0\}$, де I_0 — нормований за розміром постійний струм; ΔI_0 — нормований за розміром приріст постійного струму.

Магнітне поле, яке утворене в котушці індуктивності 28 постійним струмом I_1 , взаємодіє з лінійно поляризованим потоком оптичного випромінювання Φ_H , що проходить через багатовиткову котушку 27 тороїдальної форми. У результаті площина поляризації потоку Φ_H повертається на кут α_1 , значення якого дорівнює $\{\alpha_1\} = \{V_B\} w_2 w_3 \{I_1\}$.

З оптичного виходу ВОСС 1 поляризаційно-модульований потік оптичного випромінювання через світловод 3 надходить на мікрооб'єктив 10, а з нього — на аналізатор 11. За допомогою аналізатора 11 формується потік оптичного випромінювання $\Phi_{ан1}$, значення потужності якого дорівнює $\{\Phi_{ан1}\} = \{\Phi_H\}(1 + \sin 2\{\alpha_1\})/2$. Цей потік через лінзу 12 надходить на чутливий елемент фотоприймача 13.

Вихідна напруга $U_{H1} = S'_H (w_2 w_3 I_1)^2 + S'_L w_2 w_3 I_1 + \Delta U_{ЗМ}$ фотоприймача 13 подається на підсилювач 14 і підсилюється в k_H разів:

$$U_{H1} = k_H \left[S'_H (w_2 w_3 I_1)^2 + S'_L w_2 w_3 I_1 + \Delta U_{ЗМ} \right], \quad (3)$$

де k_H — коефіцієнт підсилення підсилювача 14.

Підсилена напруга U_{H1} (3) подається на вхід ПНК 17 і перетворюється в код числа

$$N_{H1} = \{S_{пр}\} \{U_{H1}\}, \quad (4)$$

де $S_{пр}$ — крутизна аналого-цифрового перетворення.

Код числа N_{H1} (4) по команді з МП 15 надходить через ЗШ 21 в ОЗП 19, де запам'ятовується.

У другому такті за командою з МП 15 в регістр ПКС 16 записується код числа N_{I2} . У результаті через котушку індуктивності 28 протікає постійний струм I_2 , значення якого дорівнює $\{I_2\} = \{I_0\} + \{\Delta I_0\}$.

Магнітне поле, яке утворене в котушці індуктивності 28 постійним струмом I_2 , взаємодіє з лінійно поляризованим потоком оптичного випромінювання Φ_H , що проходить через багатовиткову котушку 27 тороїдальної форми. У результаті площина поляризації потоку Φ_H повертається на кут α_2 , значення якого дорівнює $\{\alpha_2\} = \{V_B\} w_2 w_3 \{I_2\}$. З оптичного виходу ВОСС 1 поляризаційно-модульований потік оптичного випромінювання по світловоду 3 поступає на мікрооб'єктив 10, а з його виходу — на аналізатор 11. За допомогою аналізатора 11 формується потік оптичного випромі-

нювання $\Phi_{ан2}$, значення потужності якого дорівнює $\{\Phi_{ан2}\} = \{\Phi_H\}(1 + \sin 2\{\alpha_2\})/2$. Потік оптичного випромінювання $\Phi_{ан2}$ через лінзу 12 надходить на чутливий елемент фотоприймача 13.

Вихідна напруга

$$U_{н2} = S'_H (w_2 w_3 I_2)^2 + S'_L w_2 w_3 I_2 + \Delta U_{зм}$$

фотоприймача 13 подається на підсилювач 14 і також підсилюється в $k_{п}$ разів:

$$U_{п2} = k_{п} \left[S'_H (w_2 w_3 I_2)^2 + S'_L w_2 w_3 I_2 + \Delta U_{зм} \right]. \quad (5)$$

Підсилена напруга $U_{п2}$ (5) за допомогою ПНК 17 перетворюється в код числа

$$N_{н2} = \{S_{пр}\}\{U_{п2}\}. \quad (6)$$

По команді з МП 15 код числа $N_{н2}$ (6) подається через ЗШ 21 в ОЗП 19, де запам'ятовується.

У третьому такті по команді з МП 15 у реєстр числа перетворювача «код-переміщення» 34 записується код числа N_L . В результаті в середині ВОСС 1 феромагнітна втулка 31 за допомогою перетворювача «код-переміщення» 34 переводиться у крайнє праве положення (на рис. 2 показане пунктиром). При цьому положенні феромагнітної втулки 31 магнітне поле, яке утворене вимірюваним струмом I_x , взаємодіє з чутливим елементом ВОСС 1.

За командою з МП 15 в реєстр ПКС 16 надходить код числа N_{I2} . В результаті через котушку індуктивності 28 протікає постійний струм I_2 . У ВОСС 1 магнітні поля, які утворені постійними струмами I_x і I_2 , взаємодіють з лінійно поляризованим потоком оптичного випромінювання Φ_H , що проходить через світловод 24, і повертають площину поляризації на кут α_3 . При цьому значення кута α_3 дорівнює $\{\alpha_3\} = \{V_B\}(w_1\{I_x\} + w_2 w_3\{I_2\})$.

Поляризаційно-модульований потік оптичного випромінювання з виходу ВОСС 1 по світловоду 3 надходить на мікрооб'єктив 10, а з нього — на аналізатор 11. У результаті на виході аналізатора 11 з'являється потік оптичного випромінювання $\Phi_{ан3}$, значення потужності якого дорівнює $\{\Phi_{ан3}\} = \{\Phi_H\}(1 + \sin 2\{\alpha_3\})/2$. Потік оптичного випромінювання $\Phi_{ан3}$ через лінзу 12 надходить на чутливий елемент фотоприймача 13. Вихідна напруга

$$U_{н3} = S'_H (w_1 I_x + w_2 w_3 I_2)^2 + S'_L (w_1 I_x + w_2 w_3 I_2) + \Delta U_{зм}$$

фотоприймача 13 надходить на підсилювач 14 і підсилюється в $k_{п}$ разів:

$$U_{п3} = k_{п} \left[S'_H (w_1 I_x + w_2 w_3 I_2)^2 + S'_L (w_1 I_x + w_2 w_3 I_2) + \Delta U_{зм} \right]. \quad (7)$$

За допомогою ПНК 17 підсилена напруга $U_{п3}$ (7) перетворюється в код числа

$$N_{н3} = \{S_{пр}\}\{U_{п3}\}. \quad (8)$$

Код числа $N_{н3}$ (8) по команді з МП 15 надходить через ЗШ 21 в ОЗП 19, де запам'ятовується.

У четвертому такті за командою з МП 15 в реєстр ПКС 16 записується код числа N_{I1} . У результаті через котушку індуктивності 28 протікає постійний струм I_1 , значення якого дорівнює $\{I_1\} = \{I_0\} - \{\Delta I_0\}$. У ВОСС 1 магнітні поля утворені струмами I_x і I_1 взаємодіють з лінійно поляризованим потоком оптичного випромінювання Φ_H , що проходить через світловод 24, і повертають площину поляризації на кут α_4 . При цьому значення кута α_4 дорівнює $\{\alpha_4\} = \{V_B\}(w_1\{I_x\} + w_2 w_3\{I_1\})$.

З оптичного виходу ВОСС 1 поляризаційно-модульований потік оптичного випромінювання по світловоду 3 поступає на мікрооб'єктив 10, а з нього — на аналізатор 11. У результаті на виході ана-

лізатора 11 з'являється потік оптичного випромінювання $\Phi_{ан4}$, значення потужності якого дорівнює $\{\Phi_{ан4}\} = \{\Phi_{н}\}(1 + \sin 2\{\alpha_4\})/2$. Потік оптичного випромінювання $\Phi_{ан4}$ через лінзу 12 надходить на чутливий елемент фотоприймача 13. Вихідна напруга

$$U_{н4} = S'_н (w_1 I_x + w_2 w_3 I_1)^2 + S'_л (w_1 I_x + w_2 w_3 I_1) + \Delta U_{зм}$$

фотоприймача 13 подається на підсилювач 14 і підсилюється в $k_{п}$ разів:

$$U_{п4} = k_{п} \left[S'_н (w_1 I_x + w_2 w_3 I_1)^2 + S'_л (w_1 I_x + w_2 w_3 I_1) + \Delta U_{зм} \right]. \quad (9)$$

Підсилена напруга $U_{п4}$ (9) подається на вхід ПНК 17. На виході ПНК 17 з'являється код числа

$$N_{н4} = \{S_{пр}\}\{U_{п4}\}. \quad (10)$$

Код числа $N_{н4}$ (10) за командою з МП 15 надходить через ЗШ 21 в ОЗП 19, де запам'ятовується.

У п'ятому такті одержані результати проміжних вимірювань обробляються згідно із рівнянням числових значень

$$N_{Ix} = 2\{\Delta I_0\} \frac{w_2 w_3}{w_1} \frac{(N_{н1} - N_{н3}) + (N_{н2} - N_{н4})}{(N_{н1} - N_{н2}) + (N_{н4} - N_{н3})}. \quad (11)$$

Обчислене за рівнянням числових значень (11) дійсне значення вимірюваного струму I_x відображається на цифровому відліковому пристрої 20.

Встановлено, що на результат визначення дійсного значення N_{Ix} постійного струму не впливають адитивна, лінійна і нелінійна мультиплікативні складові систематичної похибки вимірювання. У цьому неважко переконатися, якщо підставити в (11) рівняння числових значень (4), (6), (8) і (10).

Проаналізуємо методичну похибку методу надлишкових вимірювань постійного струму I_x з автоматичною корекцією систематичних похибок. Припустимо, що на практиці формування корегуючих постійних струмів I_1 і I_2 здійснюється з абсолютними похибками $\Delta_{л1}$ та $\Delta_{л2}$, відповідно. Таким чином, замість корегуючих постійних струмів I_1 і I_2 із розмірами $\{I_1\} = \{I_0\} - \{\Delta I_0\}$ і $\{I_2\} = \{I_0\} + \{\Delta I_0\}$, відповідно будуть відтворені постійні струми I'_1 і I'_2 із розмірами $\{I'_1\} = \{I_0\} - \{\Delta I_0\} + \{\Delta_{л1}\}$ та $\{I'_2\} = \{I_0\} + \{\Delta I_0\} + \{\Delta_{л2}\}$. У цьому випадку відносна методична похибка визначення дійсного значення струму I_x , обумовлена похибками формування корегуючих фізичних величин, визначається за рівнянням числових значень

$$\delta_M = - \frac{\{\Delta_{л2}\} - \{\Delta_{л1}\}}{\{\Delta_{л2}\} - \{\Delta_{л1}\} + 2\{\Delta I_0\}} = - \frac{\{\Delta_{21}\}}{\{\Delta_{21}\} + 2\{\Delta I_0\}} \quad (12)$$

де $\{\Delta_{21}\} = \{\Delta_{л2}\} - \{\Delta_{л1}\}$.

Аналіз рівняння відносної методичної похибки δ_M (12) показав, що дана похибка залежить від абсолютних похибок відтворення $\Delta_{л1}$ і $\Delta_{л2}$ корегуючих постійних струмів I_1 і I_2 , але не залежить від значення вимірюваного струму та від варіації параметрів ФП постійного струму в напругу.

Встановлено, що відносна методична похибка δ_M має від'ємний знак при додатному знаку абсолютної похибки Δ_{21} і додатний знак при від'ємному знаку абсолютної похибки Δ_{21} (див. рис. 3).

Зв'язок між відносною методичною похибкою δ_M і абсолютною похибкою Δ_{21} для діапазону зміни останньої

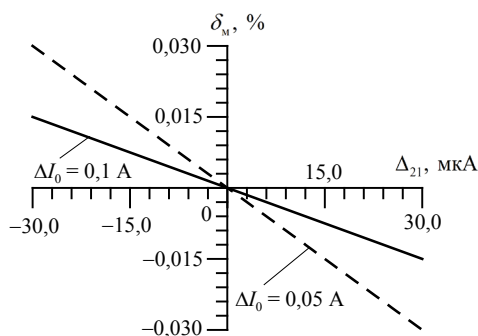


Рис. 3. Графік залежності $\delta_M = f(\Delta_{21})$

$-30,0 \dots 30,0$ мкА має лінійний характер. Розрахунки показали, що відносна методична похибка δ_M обернено пропорційна значенню нормованого за розміром приросту ΔI_0 постійного струму. Наприклад, у разі збільшення приросту ΔI_0 удвічі (з 0,05 А до 0,1 А) значення відносної похибки δ_M зменшується в 2 рази (див. рис. 3).

Таким чином, отримані дані свідчать про можливість підбору таких значень корегуючих постійних струмів і похибок їх відтворення, для яких відносна методична похибка δ_M не перевищує 0,015 %.

Висновки

1. Показана можливість лінеаризації загальної функції перетворення ЦВПС для степеневі функції магніто-оптико-електронного перетворення постійного струму в напругу.

2. Описано конструкцію і принцип дії малогабаритного структурно-надлишкового ВОСС, що має широкі функціональні можливості та є нечутливим до дії теплових, електричних і магнітних полів.

3. Розроблено технічне рішення ЦВПС, який реалізує запропонований МОЕМ надлишкових вимірювань і забезпечує автоматичну корекцію систематичних похибок вимірювання постійних струмів. Встановлено, що відносна методична похибка не перевищує 0,015 % в усьому діапазоні вимірюваних постійних струмів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Волчихин В. И., Мурашкина Т. И. Проблемы создания волоконно-оптических датчиков // Датчики и системы. — 2001. — № 7. — С. 54—58.
2. Бусурин В. И., Носов Ю. Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчёта и применения. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 256 с.
3. Световодные датчики / Б. А. Красюк, О. Г. Семёнов, А. Г. Шереметьев и др. — М.: Машиностроение, 1990. — 256 с.
4. Пат. 6366075 США, МКИ G01R 33/032. Fiber optic, current measuring devices and method / Bruce G. Aitken, Nicholas F. Borrelli, Lauren K. Cornelius. 1999.
5. Бакакин Г. В., Меледин В. Г., Наумов И. В. Широкоапертурный прецизионный фотоприёмник // Приборы и техника эксперимента. — 1999. — № 1. — С. 101—104.
6. А. С. SU 1592914 A2 МКІ⁵ H03F 17/00. Усилитель фототока / Е. И. Чернов. Оpubл. бюл. № 34, 1990.
7. Кондратов В. Т. Стратегічна теорія ХХІ століття // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2001. — № 2. — С. 11—16.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування» (2—5. 07.05)

Надійшла до редакції 11.07.05
Рекомендована до друку 21.07.05

Кондратов Владислав Тимофійович — доктор технічних наук, професор Інституту новітніх технологій; **Редько Віталій Володимирович** — студент.

Національний авіаційний університет, м. Київ