

**ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ КОМПЛЕКС
«ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНОГО СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ»
ПРИ НТУУ «КПІ»
НАН УКРАЇНИ ТА МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ УКРАЇНИ**

**«КОНТРОЛЬ І УПРАВЛІННЯ
В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ»
(КУСС-99)**

Книга за матеріалами п'ятої
міжнародної науково-технічної конференції
м. Вінниця, 3—5 лютого 1999 року

Том 2

«УНІВЕРСУМ-Вінниця»

Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького державного технічного університету Міністерства освіти України

ISBN 966-7199-31-2 (книга за матеріалами)
ISBN 966-7199-33-9 (том 2)

«Контроль і управління в складних системах» (КУСС-99).
Книга за матеріалами п'ятої міжнародної науково-технічної конференції. м. Вінниця, 3—5 лютого 1999 року. У 3-х томах. Том 2. — Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 1999. — 316 с.

Відповідальний редактор **В. В. Грабко**

Рецензенти: Капустян В. О., д. ф.-м. н.
Данілов В. Я., д. т. н.

ISBN 966-7199-31-2 (книга за матеріалами)
ISBN 966-7199-32-0 (том 1)
ISBN 966-7199-33-9 (том 2)

© Вінницький державний технічний університет, 1999

© ННК «Інститут системного прикладного аналізу» при НТУУ «КПІ»
НАН та МО України, 1999

ІНВАРІАНТНИЙ МЕТОД АВТОМАТИЧНОЇ КОРЕКЦІЇ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ МАЛИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ

Рудик А. В., Суп'ян Я. В. (Україна, м. Вінниця)

Контроль параметрів технологічних процесів найчастіше зоснований на аналізі результату взаємодії електромагнітного випромінення (пройшовшого або відбитого) різних діапазонів частот з об'єктом контролю. В якості об'єкта контролю можуть використовуватись різні рідини та газоподібні речовини, матеріали різної геометричної форми та розмірів, а також вироби, отримані в ході технологічного процесу. Найбільш чутливими до зміни параметрів технологічних процесів є оптичні датчики, які входять до складу різних вимірювачів [1]. Практичне використання таких датчиків обмежується впливом зовнішніх факторів (температури, вібрацій, шумів), які змінюють параметри вимірювачів та обумовлюють систематичні та випадкові похибки.

Проблема зменшення похибки вимірювання та впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів виникла з появою перших вимірювачів параметрів технологічних процесів. Як показали дослідження, у вимірювальній техніці найбільш ефективними є інваріантні методи зменшення похибок, які потребують наявності як мінімум двох каналів у вимірювальній системі [2]. Ідентичність двох каналів вимірювача дозволяє зменшити рівень похибок, що вносяться різними дестабілізуючими факторами. Для виключення впливу різних нестабільностей, які порушують ідентичність каналів вимірювача, використовуються структурно-алгоритмічні методи, зокрема, методи періодичного порівняння, комутаційно-модуляційні та інші методи автоматичної корекції похибок вимірювання [3]. В роботі розглянуті деякі варіанти побудови оптичних систем контролю параметрів технологічних процесів, в яких використовуються двоканальні вимірювачі з автоматичною корекцією похибок на основі збитковості.

Як показали дослідження [4], використання гетеродинних методів детектування оптичних полів на основі акустичної взаємодії, а також дво-частотних лазерів дозволяє забезпечити передачу кута фазового зсуву між сигналами радіодіапазону в оптичний діапазон та навпаки без суттєвих похибок та розробити фазовий радіооптичний міст [5].

Використання фазового компаратора лінійно-кутових переміщень дозволяє створити універсальний метрологічний засіб атестації робочих вимірювачів довжини, плоского кута та кута фазового зсуву електричних процесів в радіо-оптичному діапазоні по загальній перевірочній схемі з прийнятими в метрології еталонами часу та частоти [6].

На рис. 1 наведена структурна схема двоканального радіо-оптичного вимірювача малих переміщень на основі двох акусто-оптичних модуляторів (АОМ), які працюють в режимі дифракції Брегга.

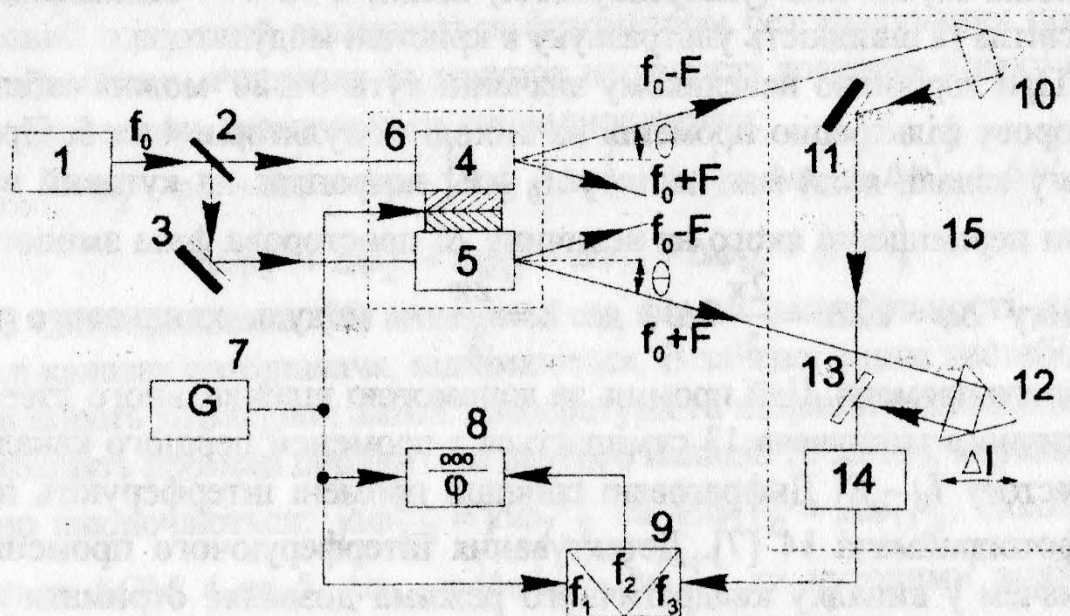


Рис. 1. Структурна схема двоканального радіо-оптичного вимірювача малих переміщень

Вимірювач складається з лазера 1, напівпрозорого дзеркала 2, відбивального дзеркал 3 та 11, АОМ 4 та 5, стабілізаційних платформ 6 та 15, радіочастотного генератора 7, електронного фазометра 8, балансного змішувача 9, куткових відбивачів 10 та 12, оптичного змішувача 13 та фотоприймача 14.

Працює вимірювач таким чином. Випромінення лазера 1 за допомогою напівпрозорого 2 та відбивального 3 дзеркал розділяється на два випромінення, на шляху яких під відповідним кутом Брегга встановлені АОМ 4 в першому та 5 в другому каналах відповідно. На електричні входи модуляторів подається гармонічна напруга збудження від генератора 7 радіочастотного діапазону (40-100 МГц).

В результаті акусто-оптичної взаємодії лазерного випромінення з частотою f_0 та акустичної хвилі збудження з частотою F на виходах модуляторів за рахунок дифракції випромінення лазера з'являються дифраговані промені ± 1 порядків в кожному з каналів. Акустичні хвилі збудження поширюються в модуляторах в протилежних напрямках. Промені нульового порядку в розглянутому вимірювачі не використовуються. Дифраговані промені $+1$ порядку мають частоту $f_0 + F$, а промені -1 порядку – частоту $f_0 - F$.

Ці промені на виходах АОМ випромінюються під кутом Брегга

$\theta = \arcsin \frac{\lambda}{2\Lambda}$, де $\lambda = \frac{c}{f_0}$ – довжина хвилі падаючого випромінення; $\Lambda = \frac{V}{F}$ – довжина акустичної (ультразвукової) хвилі; c та V – відповідно швидкість світла та швидкість ультразвуку в кристалі модулятора.

При порівняно невеликому значенні кута $\theta \leq 20^\circ$ можна забезпечити просторову фільтрацію променів на виході модуляторів 4 та 5. Промінь в другому каналі, який має частоту $f_0 + F$, потрапляє на кутовий відбивач 12, при переміщенні якого на величину Δl просторова фаза змінюється на величину $\Delta\varphi = k2\Delta l = \frac{2\pi}{\lambda}2\Delta l$, де $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – модуль хвильового вектора світлового променя. Цей промінь за допомогою відбивального дзеркала 11 та оптичного змішувача 13 суміщається з променем першого каналу, який має частоту $f_0 - F$. Дифраговані співпалі промені інтерферують на апертурі фотоприймача 14 [7]. Детектування інтерферуючого променя фотоприймачем у випадку квадратичного режиму дозволяє отримати на його виході напругу, яка має вид [8]

$$U_1(t) = b_1 E_1^{-1} E_2^1 \cos\left(\left((\omega_0 + \Omega)t + \Delta\varphi + \varphi_2^1\right) - \left((\omega_0 - \Omega)t + \varphi_1^{-1}\right)\right) = b_1 E_1^{-1} E_2^1 \cos\left(2\Omega t + \Delta\varphi + \varphi_2^1 - \varphi_1^{-1}\right), \quad (1)$$

де: φ_1^{-1} – сумарна фазова нестабільність, що вноситься АОМ 4, дзеркалами 2 та 11, оптичним змішувачем 13 та кутовим відбивачем 10 в першому каналі; φ_2^1 – сумарна фазова нестабільність, що вноситься АОМ 5, дзеркалами 2 та 3, оптичним змішувачем 13 та кутовим відбивачем 12 в другому каналі; E_1^{-1}, E_2^1 – інтенсивності випромінювань в першому та другому каналах вимірювача; b_1 – коефіцієнт, що характеризує чутливість фотоприймача.

Ввівши відповідні фазові нестабільності, отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1^{-1} &= \Delta\varphi_4^{-1} + \Delta\varphi_2^{-1} + \Delta\varphi_{11}^{-1} + \Delta\varphi_{13}^{-1} + \Delta\varphi_{10}^{-1} + \Delta\varphi_7^{-1} \\ \varphi_2^1 &= \Delta\varphi_5^1 + \Delta\varphi_2^1 + \Delta\varphi_3^1 + \Delta\varphi_{13}^1 + \Delta\varphi_{12}^1 + \Delta\varphi_7^1 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де $\Delta\varphi_7^1, \Delta\varphi_7^{-1}$ – фазові нестабільності, що вносяться радіочастотним генератором за рахунок відхилення частоти.

Гармонічна напруга радіочастотного генератора 7 та вихідна напруга фотоприймача 14 подаються на входи балансного змішувача 9, на виході якого фільтром виділяється інформативний сигнал з частотою Ω . Якщо початкову фазу напруги радіочастотного генератора 7 прийняти рівною нулю, то миттєве значення вихідної напруги балансного змішувача 9 буде мати вигляд

$$U_9(t) = K_{\text{пр}} U_{m7} b_1 E_1^{-1} E_2^1 \cos\left(\Omega t + \Delta\varphi + \varphi_2^1 - \varphi_1^{-1}\right), \quad (3)$$

де $K_{\text{пр}}$ – коефіцієнт перетворення балансного змішувача 9, U_{m7} – амплітуда вихідної напруги радіочастотного генератора 7.

Далі напруга $U_9(t)$ з виходу балансного змішувача 9 та $U_7(t)$ з виходу радіочастотного генератора 7 подаються на входи електронного фазометра 8. Фазовий зсув, який вимірюється фазометром без врахування постійних фазових набігань в каналах за рахунок нерівності довжини шляху проходження променями, визначається співвідношенням:

$$\varphi_{\text{изм1}} = \varphi_2^1 - \varphi_1^{-1} + \Delta\varphi = \Delta\varphi + \left\{ \Delta\varphi_5^1 + \Delta\varphi_2^1 + \Delta\varphi_3^1 + \Delta\varphi_{13}^1 + \Delta\varphi_{12}^1 + \Delta\varphi_7^1 \right\}_2 - \left\{ \Delta\varphi_4^{-1} + \Delta\varphi_2^{-1} + \Delta\varphi_{11}^{-1} + \Delta\varphi_{13}^{-1} + \Delta\varphi_{10}^{-1} + \Delta\varphi_7^{-1} \right\}_1. \quad (4)$$

З співвідношення (4) виходить, що фазові нестабільності, які виникають в каналах вимірювача, віднімаються. В зв'язку з цим нестабільності, що виникають за рахунок зміни температури та вібрацій в елементах, крізь які проходять промені першого та другого каналів (2 та 13), корельовані та взаємно виключаються: $\left\{ \Delta\varphi_2^1 \right\}_2 = \left\{ \Delta\varphi_2^{-1} \right\}_1$ та $\left\{ \Delta\varphi_{13}^1 \right\}_2 = \left\{ \Delta\varphi_{13}^{-1} \right\}_1$. Похибки, що вносяться АОМ 4 та 5 $\Delta\varphi_{M1} = \left\{ \Delta\varphi_5^1 \right\}_2 - \left\{ \Delta\varphi_4^{-1} \right\}_1$ та кутовими відбивачами $\Delta\varphi_{OT1} = \left\{ \Delta\varphi_{12}^1 \right\}_2 - \left\{ \Delta\varphi_{10}^{-1} \right\}_1$, можна зменшити при встановленні їх на спільних стабілізаційних платформах 6 та 15 відповідно. Крім того, корельовані та взаємно виключаються фазові нестабільності $\left\{ \Delta\varphi_7^1 \right\}_2 = \left\{ \Delta\varphi_7^{-1} \right\}_1$, що вносяться генератором 7 за рахунок відхилення частоти.

Однак похибка, що виникає за рахунок зміни температури та вібрацій дзеркала 3, яка дорівнює $\left\{ \Delta\varphi_3^1 \right\}_2$, та дзеркала 11, яка дорівнює $\left\{ \Delta\varphi_{11}^{-1} \right\}_1$, не виключаються з результату вимірювань. Вказані похибки можна виключити при введенні в двоканальну систему додаткової структурно-алгоритмічної збитковості.

Розглянемо один з інваріантних методів автоматичної корекції похибок у вимірювачі, структурна схема якого наведена на рис.2. Вона відрізняється від попередньої тим, що в неї додатково введені кутові відбивачі 16 та 17, відбивальне дзеркало 18, оптичний змішувач 19, фотоприймач 20, генератор комутуючих імпульсів (ГКІ) 21 та електронний комутатор 22, а замість балансного змішувача введено подвоювач частоти 9.

Кутовий відбивач 16 використовується для променя +1 порядку дифракції з частотою $f_0 + F$ в першому каналі, а кутовий відбивач 17 – для променя -1 порядку дифракції з частотою $f_0 - F$ в другому каналі. За допомогою відбивального дзеркала 18 та оптичного змішувача 19 відбиті дифраговані промені першого та другого каналів суміщаються у просторі та інтерферують на апертурі додаткового фотоприймача 20.

В режимі квадратичного детектування інтерферуючого променя на виході фотоприймача 20 отримаємо напругу, яка визначається співвідношенням:

$$U_2(t) = b_2 E_1^1 E_2^{-1} \cos\left(\left((\omega_0 + \Omega)t + \varphi_1^1\right) - \left((\omega_0 - \Omega)t + \varphi_2^{-1}\right)\right) = \\ = b_2 E_1^1 E_2^{-1} \cos\left(2\Omega t + \varphi_1^1 - \varphi_2^{-1}\right), \quad (5)$$

де: b_2 - коефіцієнт, характеризуючий чутливість фотоприймача 20; φ_1^1 - сумарна фазова нестабільність, що вноситься АОМ 4, дзеркалами 2 та 18, оптичним змішувачем 19 та кутовим відбивачем 16 в промінь +1 порядку дифракції першого каналу; φ_2^{-1} - сумарна фазова нестабільність, що вноситься АОМ 5, дзеркалами 2 та 3, оптичним змішувачем 19 та кутовим відбивачем 17 в промінь -1 порядку дифракції другого каналу.

Напруги з виходів фотоприймачів 14 $U_1(t)$ та 20 $U_2(t)$ подаються на електронний комутатор 22, який перемикається імпульсами з ГКІ 21, частота повторення яких $\Omega_k < \Omega$.

В перший напівперіод комутації кут фазового зсуву, що вимірюється електронним фазометром 8, визначається співвідношенням (4), а в другий напівперіод - таким співвідношенням:

$$\varphi_{изм2} = \varphi_1^1 - \varphi_2^{-1} = \left\{ \Delta\varphi_4^1 + \Delta\varphi_2^1 + \Delta\varphi_{16}^1 + \Delta\varphi_{18}^1 + \Delta\varphi_{19}^1 + \Delta\varphi_7^1 \right\}_1 - \\ - \left\{ \Delta\varphi_5^1 + \Delta\varphi_2^{-1} + \Delta\varphi_3^{-1} + \Delta\varphi_{17}^{-1} + \Delta\varphi_{19}^{-1} + \Delta\varphi_7^{-1} \right\}_2.$$

З врахуванням кореляції нестабільностей, що вносяться спільними для променів першого та другого каналів вимірювача елементами 2 та 19, з співвідношень (4) та (6) отримаємо:

$$\varphi_{изм1} = \Delta\varphi + \Delta\varphi_{M1} + \Delta\varphi_{OT1} + \left\{ \Delta\varphi_3^1 \right\}_2 - \left\{ \Delta\varphi_{11}^{-1} \right\}_1, \quad (7) \\ \varphi_{изм2} = \Delta\varphi_{M2} + \Delta\varphi_{OT2} + \left\{ \Delta\varphi_{18}^1 \right\}_2 - \left\{ \Delta\varphi_3^{-1} \right\}_2,$$

де $\Delta\varphi_{M2} = \left\{ \Delta\varphi_4^1 \right\}_1 - \left\{ \Delta\varphi_5^{-1} \right\}_2$, $\Delta\varphi_{OT2} = \left\{ \Delta\varphi_{16}^1 \right\}_1 - \left\{ \Delta\varphi_{17}^{-1} \right\}_2$, $\left\{ \Delta\varphi_7^1 \right\}_1 = \left\{ \Delta\varphi_7^{-1} \right\}_2$ - відповідні фазові нестабільності, що вносяться однотипними елементами вимірювача в промінь +1 порядку дифракції в першому каналі та промінь -1 порядку дифракції в другому каналі.

Дзеркало 3 є спільним елементом для формування променів -1 та +1 порядків дифракції, тому $\left\{ \Delta\varphi_3^{-1} \right\}_2 = \left\{ \Delta\varphi_3^1 \right\}_2$. АОМ 4 та 5 також є спільними елементами для променів першого і другого каналів, тому $\Delta\varphi_{M1} = -\Delta\varphi_{M2}$.

При роботі електронного фазометра 8 по алгоритму усереднення (складання) результатів вимірювання в перший та другий напівперіод комутації з співвідношення (7) отримаємо:

$$\varphi_{изм} = \varphi_{изм1} + \varphi_{изм2} = \Delta\varphi + \Delta\varphi_{M1} + \Delta\varphi_{M2} + \Delta\varphi_{OT1} + \Delta\varphi_{OT2} + \left\{ \Delta\varphi_3^1 \right\}_2 - \\ - \left\{ \Delta\varphi_3^{-1} \right\}_2 + \left\{ \Delta\varphi_{18}^1 \right\}_1 - \left\{ \Delta\varphi_{11}^{-1} \right\}_1 = \Delta\varphi + \Delta\varphi_{OT1} + \Delta\varphi_{OT2} + \left\{ \Delta\varphi_{18}^1 \right\}_1 - \left\{ \Delta\varphi_{11}^{-1} \right\}_1. \quad (8)$$

Фазові нестабільності, що вносяться ідентичними відбивальними дзеркалами 11 та 18 і кутовими відбивачами 10, 12 та 16, 17, в каналах променів, близьких по частоті, протифазні та корельовані між собою, тому можна вважати, що $\Delta\varphi_{OT1} \approx -\Delta\varphi_{OT2}$ та $\{\Delta\varphi_{18}^1\}_H \approx \{\Delta\varphi_{11}^{-1}\}_H$.

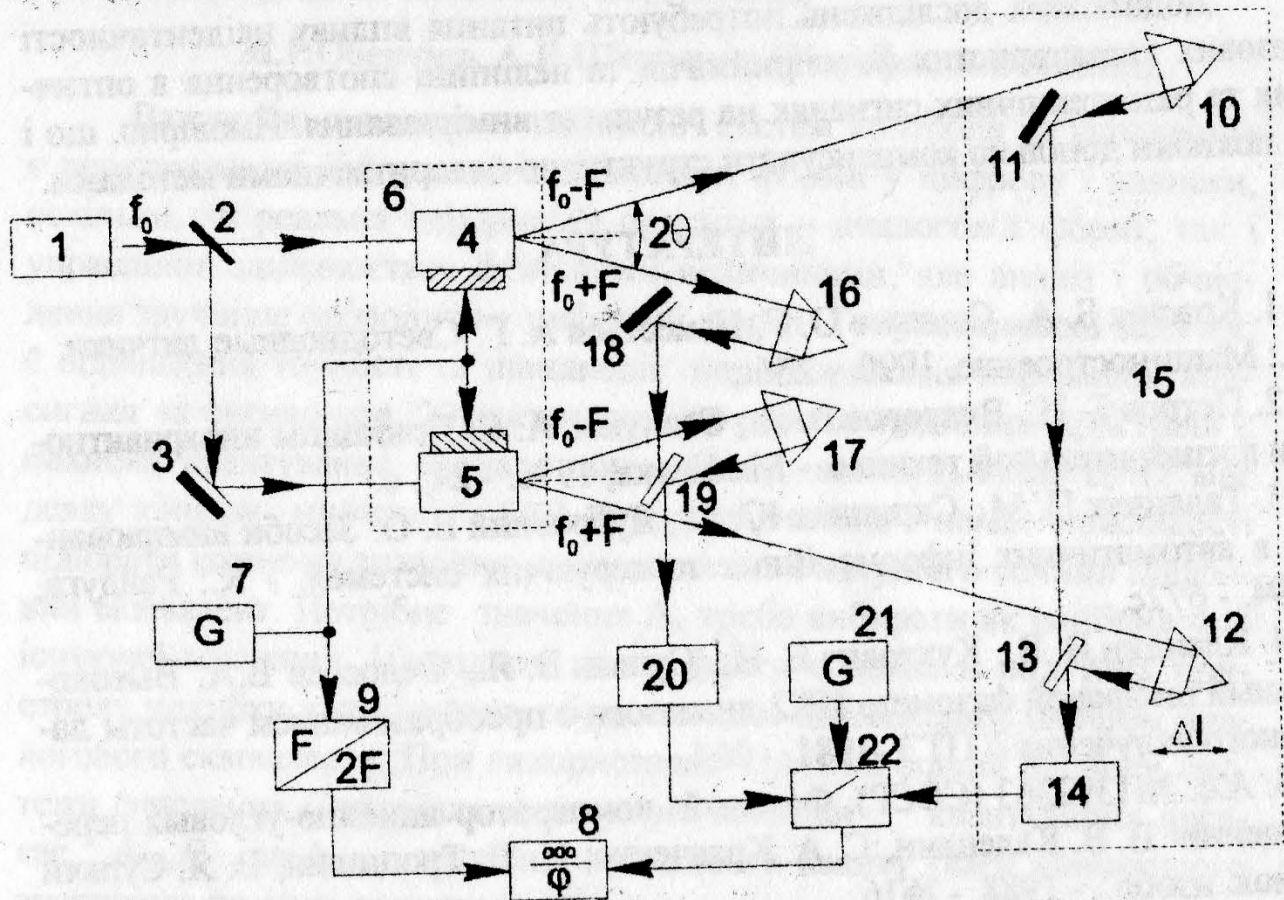


Рис.2. Структурна схема двоканального радіооптичного вимірювача малих переміщень з автоматичною корекцією похибки

Таким чином, результат вимірювання визначається тільки фазовим зсувом $\Delta\varphi$, що вноситься при переміщенні кутового відбивача (об'єкта контролю) 12. Введення додаткового каналу, в якому використовується інформація про нестабільності елементів вимірювача, дозволяє суттєво зменшити вплив вібрацій та температурних змін на точність вимірювання кута фазового зсуву, що вноситься об'єктом контролю 12, тобто малого лінійного переміщення.

Подальший розвиток структур оптичних вимірювачів повинний спрямовуватись на виключення впливу неінформативних параметрів об'єкта контролю на результат вимірювання. Так, при вимірюванні інших фізичних параметрів (кількості речовини або його концентрації) фазовий зсув, що вноситься об'єктом контролю, залежить від показника заломлення власне речовини, показника заломлення розчинника та фазової затримки, що вноситься розчинником. В розглянутих структурних схемах виявити ці залежності можна при введенні в інформативний канал оптично прозорої кювети з розчинником. В цьому випадку можна реалізувати компенсацій-

ний метод вимірювання, переміщуючи АОМ опорного каналу на величину ΔL та використовуючи електронний фазометр в якості нуль-індикатора.

Тоді точність вимірювання може бути збільшена в $m = 2 \frac{\Lambda}{\lambda}$ разів [7].

Додаткових досліджень потребують питання впливу неідентичності фазових характеристик фотоприймачів та нелінійні спотворення в оптичних та радіотехнічних сигналах на результат вимірювання. Ймовірно, що і ці похибки доцільно компенсувати структурно-алгоритмічними методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красюк Б. А., Семенов О. Г., Измestьев А. Г. Светодиодные датчики. - М.: Машиностроение, 1990. - 256с.
2. Петров Б. Н., Викторов В. А., Совлуков А. С. Принципы инвариантности в измерительной технике. - М.: Наука, 1976. - 243 с.
3. Таланчук П. М., Скрипник Ю. О., Дубровний В. О. Засоби вимірювання в автоматичних інформаційних та керуючих системах. - К.: Райдуга, 1994. - 672с.
4. Клендин В. В., Кухтович В. И., Супьян В. Я., Федосеев В.А. Высокоточный цифровой фазометр ИК2 диапазона с преобразованием частоты лазерного излучения // ПТЭ.-1981. - №4.
5. А.с. №1392363 (СССР). Фазовый компаратор линейно-угловых перемещений/ В. В. Календин, С. А. Кравченко, И. В. Троцишин, В. Я. Супьян // Бюл. изобр. - 1988. - №16.
6. Супьян В. Я., Рудик А. В., Морозов О. В. Радиооптический компаратор фазового сдвига, линейных и угловых перемещений // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Труды 3-ей международной НТК. - Новосибирск. - 1996. - Т.5 - с. 93-95.
7. Рудик А. В., Суп'ян О. В. Акустооптический способ вимірювання малих переміщень // Вісник ВПІ. - 1995. - №2.-С.58-62.
8. Патент №18058 (Україна). Фазометр оптичного діапазону /В. Я. Суп'ян, О. В. Суп'ян, А. В. Рудик // Бюл. вин. - 1997. - №16.