

УДК 629.78.3

М.В. Чорний

Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

МЕТРОЛОГІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ГУСТИНИ РІДКИХ СЕРЕДОВИЩ

В статті запропоновано функцію перетворення вимірювального каналу переміщення світлової плями по fotocутливому шару диференційного фотодіодного сенсора, що дозволило отримати аналітичні залежності таких статистичних метрологічних характеристик, як номінальна функція перетворення, чутливість, похибка нелінійності, адитивна та мультиплікативна складова похибок.

Ключові слова: математична модель, вимірювальний перетворювач, густина рідких середовищ, метрологічна характеристика, вимірювальний канал.

Вступ

Перспективним напрямком розвитку засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) є розроблення приладів, які використовують оптичні закономірності. Слід відзначити, що фізичні явища, закладені у оптичні прилади, дозволяють отримувати високу точність визначення вимірювальної величини, досягати стабільності відтворення результатів вимірювання, а також в значній мірі знизити вплив неінформативних факторів на процес вимірювання [1].

Застосування оптичних методів у сукупності з компенсаційно-мостовими схемами електронних частин структурних схем оптичних приладів дає можливість будувати на цій основі високої точності ЗВТ.

Аналіз літератури. У роботі [2] запропонована ідея і структура оптико-електронної системи для вимірювання оптичної густини рідин. Однак, для практичного використання такої системи необхідно провести метрологічне дослідження її вимірювальних каналів. В основу такого дослідження покладено алгоритм запропонований в [3] та технічні параметри сенсора отримані з джерела [4].

Мета статті. Отримати рівняння перетворення для вимірювального каналу визначення показника заломлення рідини, що досліджується та оцінити статичні метрологічні характеристики вимірювального каналу з диференційним оптичним перетворювачем.

Викладення основного матеріалу

Розроблення структури вимірювального каналу. Прямий метод визначення оптичної густини середовища через вимірювання коефіцієнта заломлення є найбільш точним, а тому розроблення ЗВТ, які практично реалізують цей метод, є важливим і актуальним завданням.

На рис. 1 показана структурна схема вимірювального каналу з оптичним перетворювачем з одномірним позиційно чутливим елементом.

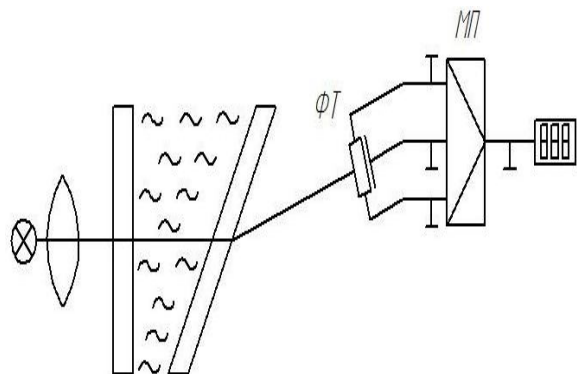


Рис. 1. Структура вимірювального каналу:
1 – джерело випромінювання; 2 – оптична система;
3 – оптично прозора кювета з досліджуванним середовищем; 4 – одномірний позиційно-чутливий оптичний перетворювач, електронний вимірювальний блок з мікропроцесором, цифровий індикатор результату вимірювань

Синтез математичної моделі. Для позиційно чутливого елемента значення координати положення центру тяжіння світлової плями від променя світла, що падає на нього визначається за формулою:

$$X = L \frac{I_1}{I_2 + I_1}, \quad (1)$$

де X – координата центру тяжіння (мм); L – довжина чутливого шару фотодіода (мм); I_1, I_2 – вихідні струми виводів світлочутливого шару (мА).

Очевидно, що інформацію про положення центру тяжіння світлової плями отримують із розрахунку за формулою (1). Оброблення результату вимірювання виконує мікропроцесорний блок. У ньому виконується підсилення, усереднення і масштабування результату вимірювання. На трьохрозрядному цифровому індикаторі отримуємо число:

$$N_X = kX = kL \frac{I_1}{I_2 + I_1}, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт пропорційності.

Так як аналого-цифровий перетворювач мікропроцесора оперує з напругами, то додамо у вхідні ланки схеми резистори однакового номіналу R_0 , як перетворювачі струм-напруга, тоді отримаємо:

$$N_X = kL \frac{I_1 R_0}{I_2 R_0 + I_1 R_0} = kL \frac{U_1}{U_2 + U_1}, \quad (3)$$

де $U_1 = I_1 R_0$ та $U_2 = I_2 R_0$ – відповідні напруги.

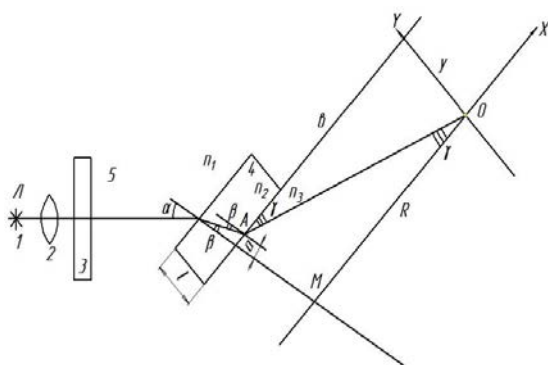


Рис. 2. Лінійна оптична схема вимірювального перетворювача на основі геометричної оптики

З іншого боку, із рис. 2 очевидно, що переміщення світлової плями відбувається завдяки змінюванню показника оптичної густини шару рідини, що знаходиться на шляху розповсюдження світлового променя. Отже отримуємо:

$$X = R \sqrt{\frac{n_1^2 \sin^2 \alpha}{1 - n_1^2 \sin^2 \alpha}} - y, \quad (4)$$

де R – відстань по вісі абсцис від оптичної вісі до фотоприймача; Y – відстань по вісі ординат від площини скла до фотоприймача; α – кут між нормаллю до скляної пластинки і оптичною віссю; n_1 – показник заломлення рідини.

Якщо прирівнюємо формули (1) та (4), то отримаємо наступний вираз:

$$L \frac{I_1}{I_2 + I_1} = R \sqrt{\frac{n_1^2 \sin^2 \alpha}{1 - n_1^2 \sin^2 \alpha}} - y,$$

звідки знайдемо формулу перетворення вимірювального каналу:

$$I = \frac{2RI_0}{L} \sqrt{\frac{n_1^2 \sin^2 \alpha}{1 - n_1^2 \sin^2 \alpha}} - I_0(1 - 2y), \quad (5)$$

де I – приріст вихідного струму на виходах фотоприймача; I_0 – вихідний струм виходів фотоприймачів, який настроюється на градуванні.

Струм, при якому координата X дорівнює $L/2$, визначається як

$$I = R \sqrt{\frac{n_1^2 \sin^2 \alpha}{1 - n_1^2 \sin^2 \alpha}},$$

де $\alpha \rightarrow [2]$, $R \rightarrow [5]$, $n_1 \rightarrow [x]$, $y \rightarrow [6]$.

Характер зміни чутливості диференційного перетворювача вимірювального нахилу від кута вихідної скляної пластинки нахилу показано на рис. 3.

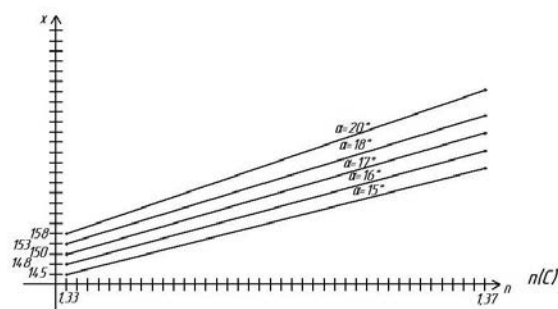


Рис. 3. Зміна чутливості диференційного перетворювача вимірювального нахилу від кута вихідної скляної пластинки нахилу

Сімейство залежностей переміщення світлової плями від температури при зміні кута вихідної скляної пластинки відображено на рис. 4.

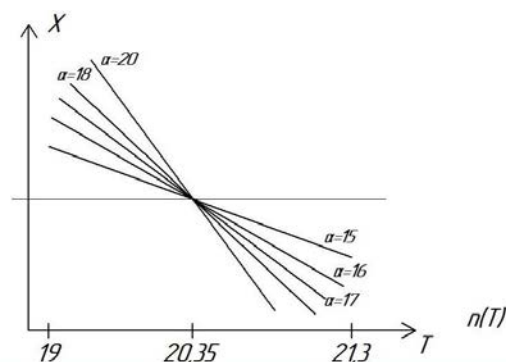


Рис. 4. Сімейство залежностей переміщення світлової плями від температури при зміні кута вихідної скляної пластинки

Значення коефіцієнта заломлення середовища в залежності від координати положення світлової мітки при фіксованому значенні кута між нормаллю до скляної пластинки і оптичною віссю наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнта заломлення середовища в залежності від координати положення світлової мітки при фіксованому значенні кута між нормаллю до скляної пластинки і оптичною віссю

$n_1[x]$	$\alpha=20^\circ$ x(мм)	$\alpha=18^\circ$ x(мм)	$\alpha=17^\circ$ x(мм)	$\alpha=16^\circ$ x(мм)	$\alpha=15^\circ$ x(мм)
1,330	158,9986	153,0073	150,35432	147,9109	145,6649
1,331	159,14706	153,1411	150,48198	148,03304	145,7821
1,332	159,29536	153,27494	150,60968	148,15522	145,8993
1,333	159,4437	153,40882	150,7374	148,2774	146,0165
1,334	159,59212	153,54274	150,8514	148,3996	146,13372
1,335	159,7406	153,67668	150,99292	148,52182	146,25094
1,336	159,88918	153,8107	151,12074	148,64408	146,36818
1,337	160,0378	153,94474	151,24856	148,76634	146,48544
1,338	160,18652	154,07882	151,37644	148,88862	146,6027
1,339	160,33528	154,21294	151,50434	149,01092	146,71998
1,340	160,48414	154,34712	151,63226	149,13324	146,83726
1,341	160,63306	154,48132	151,76022	149,25558	146,95456
1,342	160,78206	154,61556	151,88822	149,37794	147,07186
1,343	160,9311	154,74986	152,01624	149,50032	147,18918
1,344	161,08024	154,8842	152,14428	149,62272	147,3065
1,345	161,22944	155,01856	152,27236	149,74504	147,42386
1,346	161,37872	155,153	152,40046	149,86758	147,5412
1,347	161,52808	155,28744	152,5286	149,99004	147,65856
1,348	161,6775	155,42196	152,65676	150,11252	147,77594
1,349	161,827	155,55648	152,78496	150,23502	147,89332
1,350	161,97658	155,69106	152,9132	150,35756	148,01072
1,351	162,12322	155,82572	153,04144	150,48008	148,12814
1,352	162,27594	155,96038	153,16974	150,60264	148,24554
1,353	162,42574	156,0951	153,29806	150,72522	148,36298
1,354	162,5756	156,22986	153,422642	150,84784	148,48044
1,355	162,72556	156,36466	153,55478	150,97046	148,59788
1,356	162,87556	156,49948	153,6832	151,0931	148,71534
1,357	163,02566	156,63438	153,81166	151,21576	148,83284
1,358	163,17584	156,76932	153,94014	151,33846	148,95032
1,359	163,32606	156,9043	154,06864	151,46116	149,06782
1,360	163,4764	157,03932	154,19718	151,5839	149,18536
1,361	163,62678	157,17438	154,32574	151,70664	149,3029
1,362	163,77726	157,30948	154,45436	151,8294	149,42044
1,363	163,9278	157,44464	154,583	151,9522	149,53798
1,364	164,07842	157,57982	154,71166	152,07502	149,65556
1,365	164,22912	157,71506	154,84036	152,19786	149,77314
1,366		157,85036	154,9691	152,32072	149,89072
1,367		157,98568	155,09786	152,4436	150,00834
1,368		158,12108	155,22666	152,5665	150,12596
1,369		158,25648	155,35548	152,68942	150,2436
1,370		158,39196	155,48436	152,81236	150,36122

Похибка вимірювального перетворювача ви-
значається шляхом обчислення диференціалу (5)
функції.

Підставивши значення часткових похідних,
отримуємо:

$$|\Delta l| = \left| \frac{2I_0}{L} \sqrt{\frac{n_1^2 \sin^2 \alpha}{1 - n_1^2 \sin^2 \alpha}} \right| |\Delta R| + \left| \frac{2R}{L} \sqrt{\frac{n_1^2 \sin^2 \alpha}{1 - n_1^2 \sin^2 \alpha}} \right| |\Delta l_0| + \left| 2R \sqrt{\frac{n_1^2 \sin^2 \alpha}{1 - n_1^2 \sin^2 \alpha}} \left(-\frac{1}{L^2} \right) \right| |\Delta L| +$$

$$+ |2I_0| |\Delta l_0| + \left| \frac{2RI_0 \sin \alpha}{L(1 - n_1^2 \sin^2 \alpha)^{3/2}} \right| |\Delta n_1| + \left| \frac{n_1^2 \sin^2 \alpha (2 \cos \alpha (1 - n_1^2 \sin^2 \alpha) - F)}{(1 - n_1^2 \sin^2 \alpha)^{3/2}} \right| |\Delta \alpha|,$$

де $F = \sin \alpha (1 - n_1^2 2 \sin \alpha \cos \alpha)$ – допоміжна функція, що введена для компактного запису формули.

Звідси ми можемо обчислити похибку виготовлення сенсора при заданих похибках: ΔR , ΔL , ΔI_0 , Δn_1 , $\Delta \alpha$.

Розклавши вираз (3) в ряд Тейлора, отримуємо аналітичні залежності для наступних метрологічних характеристик.

Чутливість перетворювача:

$$S_L = \frac{\partial N}{\partial L} = k \frac{U_1}{U_2 + U_1}.$$

Зміна чутливості за діапазоном fotocутливого шару фото діода:

$$S'_L = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 N}{\partial L^2} = 0.$$

Коефіцієнт впливу виливної речовини на вихідний параметр:

$$\begin{aligned} \beta_{OU} &= \frac{\partial N}{\partial U_1} = \\ &= \frac{U'_1 (U_2 + U_1) - U_1 (U_2 + U_1)'}{(U_2 + U_1)^2} kL = \\ &= \frac{U_2 + U_1 - U_1}{(U_2 + U_1)^2} kL = kL \cdot \frac{U_2}{(U_2 + U_1)^2}. \end{aligned}$$

Зміна впливу по діапазону:

$$\begin{aligned} \beta'_{OU} &= \frac{\partial^2 N_x}{\partial U_1^2} = kL \cdot U_2 \left(\frac{1}{(U_2 + U_1)^2} \right)'_{U_1} = \\ &= \frac{2U_2}{(U_2 + U_1)^3}. \end{aligned}$$

Коефіцієнт впливу виливної величини на номінальну чутливість:

$$\alpha_{OL} = \frac{\partial^2 N}{\partial L \partial U_1} = k \frac{U_2}{(U_2 + U_1)^2}.$$

Похибка нелінійності номінальної функції перетворення дорівнює:

$$S_0' L^2 + S_0'' L^3 = 0.$$

Аддитивна похибка перетворення визначається:

$$\Delta N_A = k \frac{U_2 \cdot L}{(U_2 + U_1)^2} \cdot \Delta U.$$

Мультиплікативна похибка перетворення описується рівнянням:

$$\Delta N_M = k \frac{U_2 \cdot L}{(U_2 + U_1)^2} \cdot \Delta U + \frac{2U_2}{(U_2 + U_1)^3} \cdot \Delta U^2.$$

Висновок

В результаті проведених досліджень отримано функцію перетворення вимірювального каналу переміщення світлової плями по fotocутливому шару диференційного фотодіодного сенсора, що дозволило отримати аналітичні залежності таких статистичних метрологічних характеристик, як номінальна функція перетворення, чутливість, похибка не лінійності, адитивна та мультиплікативна складова похибок.

Список літератури

1. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси, К. Окамото. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. Патент №5077 Україна МПК⁷ G01N21/43. Оптико-електронна система вимірювання оптичної густини рідин / Дмитрієв Ю.О., Гаврилюк О.І., Шабатура Ю.В. – №2002086938; заявл. 23.08.2002; опубл. 15.02.2005, Бюл. №2. – 2 с.
3. Тейлор Д. Введение в теорию ошибок / Д. Тейлор. – М.: Мир, 1985. – 272 с.
4. Кауфман М. Практическое руководство по расчётам в электронике / М. Кауфман. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 288 с.

Надійшла до редколегії 2.09.2009

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПЛОТНОСТИ ЖИДКИХ СРЕД

Н.В. Чёрный

В статье предложена функция преобразования измерительного канала перемещения светового пятна по фотоувствительному слою дифференциального фотодиодного сенсора, что позволило получить аналитические зависимости таких статистических метрологических характеристик как номинальная функция преобразования, чувствительность, погрешность нелинейности, аддитивная и мультипликативная составляющие погрешностей.

Ключевые слова: математическая модель, измерительный преобразователь, плотность жидких сред, метрологическая характеристика, измерительный канал.

METROLOGY RESEARCH OF MEASURING CHANNEL FOR CONTROL OF CLOSNESS OF LIQUID ENVIRONMENTS

M.V. Chorniy

In the article the function of transformation of measuring channel of moving of light-spot is offered on the layer of differential touch-control, that allowed to get analytical dependences of such statistical metrology descriptions as a nominal function of transformation, sensitiveness, error of non-linearity, additive and multiplicative constituent of errors.

Keywords: mathematical model, measuring transformer, closeness of liquid environments, metrology description, measuring channel.