



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 90045

(13) C2

(51) МПК (2009)
G01L 11/00МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) СПОСІБ НАДЛИШКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ ТИСКУ

1

2

(21) а200809723

(22) 25.07.2008

(24) 25.03.2010

(46) 25.03.2010, Бюл.№ 6, 2010 р.

(72) КОНДРАТОВ ВЛАДИСЛАВ ТИМОФІЙОВИЧ,
РЕДЬКО ВІТАЛІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ(73) ІНСТИТУТ КІБЕРНЕТИКИ ІМ.В.М.ГЛУШКОВА
НАН УКРАЇНИ

(56) SU 1812463 A1, 30.04.1993

SU 1500889 A1, 15.08.1989

SU 1796937 A1, 23.02.1993

JP 03243822 A, 30.10.1991

US 538053, 31.01.1995

RU 2184945 C1, 10.07.2000

Кондратов В.Т., Редько В.В. Оптико-электронный метод избыточных измерений давления: особенности реализации // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 2008. - №2

(57) Спосіб надлишкових вимірювань тиску, що полягає у формуванні направленого потоку оптичного випромінювання Φ_0 у заданому діапазоні довжин хвиль, модуляції його потужності невідомим за значенням тиском p_x , перетворенні потужності модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_m у напругу U_Φ , її вимірюванні і запам'ятовуванні з подальшим визначенням дійсного значення тиску p_x за рівнянням вимірювання, який відрізняється тим, що спочатку потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_1 , значення якого дорівнює значенню атмосферного тиску p_n ($\{p_1\}=\{p_n\}$), перетворюють потужність першого модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_{m1} у напругу $U_{\Phi1}$, вимірюють її і запам'ятовують, потім потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_2 , значення якого встановлюють за умовою $\{p_2\}=0,5\{p_x\}+\{p_n\}$, перетворюють потужність другого модульованого потоку оптичного

випромінювання Φ_{m2} у напругу $U_{\Phi2}$, вимірюють її і запам'ятовують, далі потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_3 , значення якого встановлюють за умовою $\{p_3\}=0,5(\{p_x\}-\{\Delta p_0\})+\{p_n\}$, де $\{\Delta p_0\}$ - значення нормованого приросту тиску, перетворюють потужність третього модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_{m3} у напругу $U_{\Phi3}$, вимірюють її і запам'ятовують, після цього потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_4 , значення якого встановлюють за умовою $\{p_4\}=0,5(\{p_x\}+\{\Delta p_0\})+\{p_n\}$, перетворюють потужність четвертого модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_{m4} у напругу $U_{\Phi4}$, вимірюють її і запам'ятовують, потім потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_5 , значення якого встановлюють за умовою $\{p_5\}=0,5\{p_{0x}\}+\{p_n\}$, де $\{p_{0x}\}$ - значення нормованого тиску, яке, виходячи із результату другого вимірювання, встановлюють близьким до значення тиску p_x , перетворюють потужність п'ятого модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_{m5} у напругу $U_{\Phi5}$, вимірюють її і запам'ятовують, далі потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_6 , значення якого встановлюють за умовою $\{p_6\}=0,5(\{p_{0x}\}-\{\Delta p_0\})+\{p_n\}$, перетворюють потужність шостого модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_{m6} у напругу $U_{\Phi6}$, вимірюють її і запам'ятовують, після цього потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_7 , значення якого встановлюють за умовою $\{p_7\}=0,5(\{p_{0x}\}+\{\Delta p_0\})+\{p_n\}$, перетворюють потужність сьомого модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_{m7} у напругу $U_{\Phi7}$, вимірюють її і запам'ятовують, а дійсне значення невідомого тиску p_x визначають згідно з рівнянням надлишкових вимірювань:

$$p_x = \frac{S_{\Phi1} \Delta p_0 \left(S_{n2} \Delta p_0 - k_1 \right) k_2 e^{S_{n2} \Delta p_0} \left(U_{\Phi3} - U_{\Phi1} \right) + k_2^2 e^{\frac{S_{n2} \Delta p_0}{k^2}} \left(U_{\Phi3} - U_{\Phi1} \right) + k_2 \left(U_{\Phi4} - U_{\Phi1} \right)}{S_{\Phi1} \left(e^{\frac{S_{n2} \Delta p_0}{k^2}} - k_1 \right)}$$

(13) C2

(11) 90045

(19) UA

де $k_1 = 1$, $k_2 = 2$,

$$S_{n1} = k_2 \frac{p_{0x}^2 \left[\Phi_{05} \Phi_{\Phi 1} - U_{\Phi 5} \right] U_{\Phi 1} \left[\Phi_{05} - U_{\Phi 6} \right] U_{\Phi 7} \left[\Phi_{06} - U_{\Phi 1} \right] \Delta p_0^2 \left[\Phi_{05} - U_{\Phi 1} \right]^2}{p_{0x} \left[\Phi_{0x}^2 \left[\Phi_{06} - U_{\Phi 5} \right] \left[\Phi_{07} - U_{\Phi 5} \right] + k_2 \Delta p_0^2 U_{\Phi 5} \left[\Phi_{05} - U_{\Phi 1} \right] + p_{0x} \Delta p_0 U_{\Phi 5} \left[\Phi_{06} - U_{\Phi 7} \right]}}$$

$$S_{n2} = \frac{k_2}{\Delta p_0} \ln \left[\frac{\Phi_{0x} - \Delta p_0 \left[\Phi_{0x} \left[\Phi_{05} - U_{\Phi 7} \right] + \Delta p_0 \left[\Phi_{05} - U_{\Phi 1} \right] \right]}{\Phi_{0x} - \Delta p_0 \left[\Phi_{06} - U_{\Phi 5} \right] + \Delta p_0 \left[\Phi_{05} - U_{\Phi 1} \right]} \right]$$

Винахід відноситься до області вимірювальної техніки і може бути застосований при реалізації високоточних оптико-електронних методів вимірювання тиску.

Відомий спосіб вимірювання тиску (а. с. №1500889 СССР, МКИ⁵ G01L11/00. Датчик давления / В.А. Раков, В.Г. Тимошенко, Е.Ф. Волосожар. - №4350110/24-10; Заявл. 17.11.87; Опубл. 15.08.89. Бюл. № 30. - 3 с.), який оснований на формуванні направленного потоку оптичного випромінювання Φ_0 у заданому діапазоні довжин хвиль, модуляції його потужності невідомим за значенням тиском p_x , перетворенні потужності модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_m у напругу U_Φ , її вимірюванні і запам'ятовуванні з подальшим визначенням дійсного значення тиску p_x за рівнянням вимірювання.

Відомий спосіб не дозволяє забезпечити високу точність вимірювання дійсного значення тиску. Причинами цього є нелінійність і нестабільність функції перетворення тиску у потужність потоку оптичного випромінювання, а також нелінійність і нестабільність функції перетворення потужності модульованого потоку оптичного випромінювання у напругу, які призводять до появи похибки від нелінійності, адитивної і мультиплікативної складових систематичної похибки.

Відомий спосіб вимірювання тиску (А. с. 1796937 SU, МПК G01L11/00. Волоконно-оптический датчик давления / Е.М. Белозубов (SU), В.С. Полунин (SU). - №4907744/10; Заявл. 25.12.1990; Опубл. 23.02.1993. Бюл. №7. - 3 с.), який оснований на формуванні направленного потоку оптичного випромінювання Φ_0 у заданому діапазоні довжин хвиль, модуляції його потужності невідомим за значенням тиском p_x , перетворенні потужності модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_m у напругу U_Φ , її вимірюванні і запам'ятовуванні з подальшим визначенням дійсного значення тиску p_x за рівнянням вимірювання.

Відомий спосіб також не забезпечує високу точність вимірювання. Причинами, що заважають досягненню поставленої задачі підвищення точності вимірювання, є нелінійність і нестабільність функції перетворення тиску у потужність потоку оптичного випромінювання, а також нелінійність і нестабільність функції перетворення потужності модульованого потоку оптичного випромінювання у напругу.

Відомий спосіб вимірювання тиску (Бадеева Е.А., Гориш А.В., Котов А.Н., Мурашкина Т.И., Пивкин А.Г. Теоретические основы проектирования

амплитудных волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом: Монография. - М.: МГУЛ, 2004. - С. 188-193), який оснований на формуванні направленного потоку оптичного випромінювання Φ_0 у заданому діапазоні довжин хвиль, модуляції його потужності невідомим за значенням тиском p_x , перетворенні потужності модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_m у напругу U_Φ , її вимірюванні і запам'ятовуванні з подальшим визначенням дійсного значення тиску p_x за рівнянням вимірювання.

Причинами, що заважають досягненню поставленої задачі підвищення точності вимірювання при використанні даного способу є нелінійність та нестабільність функції перетворення тиску в потужність потоку оптичного випромінювання, нелінійність та нестабільність функції перетворення потужності модульованого потоку оптичного випромінювання у напругу. Це обумовлює появу похибки від нелінійності, адитивної і мультиплікативної складових систематичної похибки.

В основу винаходу покладена технічна задача створення такого способу надлишкових вимірювань тиску, 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 вимірювання тиску при нелінійній та нестабільній функції механіко-оптико-електронного перетворення тиску в напругу.

Поставлена задача вирішується завдяки тому, що спосіб надлишкових вимірювань тиску, оснований на формуванні направленного потоку оптичного випромінювання Φ_0 у заданому діапазоні довжин хвиль, модуляції його потужності невідомим за значенням тиском p_x , перетворенні потужності модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_m у напругу U_Φ , її вимірюванні і запам'ятовуванні з подальшим визначенням дійсного значення тиску p_x за рівнянням вимірювання від відомих способів відрізняється тим, що спочатку потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_1 , значення якого дорівнює значенню атмосферного тиску $p_n(\{p_1\}=\{p_n\})$, перетворюють потужність першого модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_{m1} у напругу $U_{\Phi 1}$, вимірюють її і запам'ятовують, потім потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_2 , значення якого встановлюють за умовою $\{p_2\}=0,5\{p_x\}+\{p_n\}$, перетворюють потужність другого модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_{m2} у напругу

$U_{\Phi 2}$, вимірюють її і запам'ятовують, далі потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_3 , значення якого встановлюють за умовою $\{p_3\}=0,5(\{p_x\}-\{\Delta p_0\})+\{p_n\}$, де $\{\Delta p_0\}$ - значення нормованого приросту тиску, перетворюють потужність третього модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_{m3} у напругу $U_{\Phi 3}$, вимірюють її і запам'ятовують, після цього потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_4 , значення якого встановлюють за умовою $\{p_4\}=0,5(\{p_x\}+\{\Delta p_0\})+\{p_n\}$, перетворюють потужність четвертого модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_{m4} у напругу $U_{\Phi 4}$, вимірюють її і запам'ятовують, потім потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_5 , значення якого встановлюють за умовою $\{p_5\}=0,5\{p_{0x}\}+\{p_n\}$, де $\{p_{0x}\}$ - значення нормованого тиску, яке виходячи із результату другого вимірю-

вання, встановлюють близьким до значення тиску p_x , перетворюють потужність п'ятого модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_{m5} у напругу $U_{\Phi 5}$, вимірюють її і запам'ятовують, далі потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_6 , значення якого встановлюють за умовою $\{p_6\}=0,5(\{p_{0x}\}-\{\Delta p_0\})+\{p_n\}$, перетворюють потужність шостого модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_{m6} у напругу $U_{\Phi 6}$, вимірюють її і запам'ятовують, після цього потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_7 , значення якого встановлюють за умовою $\{p_7\}=0,5(\{p_{0x}\}+\{\Delta p_0\})+\{p_n\}$, перетворюють потужність сьомого модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_{m7} у напругу $U_{\Phi 7}$, вимірюють її і запам'ятовують, а дійсне значення невідомого тиску p_x визначають згідно з рівняннями надлишкових вимірювань

$$p_x = \frac{S_{\pi 1} \Delta p_0 \left(S_{\pi 2} \Delta p_0 - k_1 \right) k_2 e^{S_{\pi 2} \Delta p_0} \left(\Phi_{\Phi 3} - U_{\Phi 1} \right) k_2^2 e^{\frac{S_{\pi 2} \Delta p_0}{k_2}} \left(\Phi_{\Phi 3} - U_{\Phi 1} \right) k_2 \left(\Phi_{\Phi 4} - U_{\Phi 1} \right)}{S_{\pi 1} \left(e^{\frac{S_{\pi 2} \Delta p_0}{k_2}} - k_1 \right)^2},$$

де

$$S_{\pi 1} = k_2 \frac{p_{0x}^2 \left(\Phi_{\Phi 5} \left(\Phi_{\Phi 1} - U_{\Phi 5} \right) + U_{\Phi 1} \left(\Phi_{\Phi 5} - U_{\Phi 6} \right) + U_{\Phi 7} \left(\Phi_{\Phi 6} - U_{\Phi 1} \right) + \Delta p_0^2 \left(\Phi_{\Phi 5} - U_{\Phi 1} \right)^2 \right)}{p_{0x}^2 \left(\Phi_{\Phi 6} - U_{\Phi 5} \right) \left(\Phi_{\Phi 7} - U_{\Phi 5} \right) + k_2 \Delta p_0^2 U_{\Phi 5} \left(\Phi_{\Phi 5} - U_{\Phi 1} \right) + p_{0x} \Delta p_0 U_{\Phi 5} \left(\Phi_{\Phi 6} - U_{\Phi 7} \right)},$$

$$S_{\pi 2} = \frac{k_2}{\Delta p_0} \ln \left[\frac{\left(\Phi_{0x} - \Delta p_0 \right) \left(\Phi_{\Phi 5} - U_{\Phi 7} \right) + \Delta p_0 \left(\Phi_{\Phi 5} - U_{\Phi 1} \right)}{\left(\Phi_{0x} + \Delta p_0 \right) \left(\Phi_{\Phi 6} - U_{\Phi 5} \right) + \Delta p_0 \left(\Phi_{\Phi 5} - U_{\Phi 1} \right)} \right],$$

$$k_1=1, \quad k_2=2.$$

На Фіг.1 наведена структурною схемою пристрою, що пояснює сутність запропонованого способу надлишкових вимірювань тиску, де 1 - електромагнітний клапан тиску з ручним керуванням (РК); 2 - джерело нормованого тиску з ручним керуванням; 3 - напісуматор тисків; 4 - волоконно-оптичний сенсор тиску; 5 - волоконно-оптичний кабель; 6, 7 - волоконні світловоди; 8 - джерело оптичного випромінювання; 9 - приймач оптичного випромінювання; 10 - вольтметр з цифровим відліковим пристроєм.

На Фіг.2 наведена конструкція рефлексометричного сенсору тиску 4, що використовується у запропонованому технічному рішенні пристрою¹ (1). Конструкція сенсора тиску та спосіб розташування підвідних і відвідних волоконних світловодів у торці волоконно-оптичного джгута запозичені з наступної монографії: Бадеева Е.А., Гориш А.В., Котов А.Н., Мурашкина Т.И., Пивкин А.Г. Теоретические основы проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом: Монография. - М.: МГУЛ, 2004. - С. 136-138, 180-183). Пружний чутливий елемент сенсора виконаний у вигляді пласкої круглої мембрани 12, що жорстко закріплюється по контуру у штуцері 11. Напроти відбиваючої поверхні мембрани 12 на нормованій за значенням відстані (за-

дається товщиною кільцевої прокладки 13) у накопичнику 15 закріплений торець волоконно-оптичного джгута 16, утвореного з підвідних 20 і відвідних 21 волоконних світловодів. Схематичне розташування останніх наведено на Фіг.3. Волоконні світловоди 20 і 21 об'єднані у волоконно-оптичний кабель 18, який окінцьований розніжним світловодним з'єднувачем типу розетка 19.

Для виключення випадання роси або конденсату на відбиваючій поверхні мембрани 12 порожнину корпусу 14 заповнюють інертним газом аргонном. Тиск аргону у цій порожнині встановлюють рівним атмосферному тиску p_n .

Суть запропонованого способу надлишкових вимірювань тиску розглянемо на прикладі роботи пристрою, структурна схема якого наведена на Фіг.1.

Оскільки одним з основних елементів пристрою є сенсор тиску, то спочатку розглянемо принцип дії даного сенсора. Він полягає у наступному.

Потік оптичного випромінювання, що випускається з торців підвідних волоконних світловодів 20, поступає на відбиваючу поверхню мембрани 12, відбивається від неї та формує в площині торців відвідних волоконних світловодів 21 опромінену зону заданої форми та геометричних розмірів.

Прогин мембрани 12 під дією вимірюваного тиску призводить до зміни геометричних розмірів опроміненої зони та зміни її просторового положення відносно торців відвідних волоконних світловодів 21. Одночасно спостерігається зміна опроміненості цієї зони. Зазначені процеси зумовлюють зміну потужності потоку оптичного випромінювання на виходах відвідних волоконних світловодів 21.

Перетворення потужності модульованого потоку оптичного випромінювання у напругу здійснюється за допомогою приймача оптичного випромінювання 9, у якості чутливого елементу якого використовується напівпровідниковий фотодіод.

Залежність напруги U_{Φ} на виході приймача оптичного випромінювання 9 від тиску p_x , поданого на вхід волоконно-оптичного сенсора 4, може бути апроксимована (з достатньою для практики точністю) функцією виду

$$U_{\Phi} = S_H(p_x - p_H) \exp[S_{L2}(p_x - p_H)] + S_{L1}(p_x - p_H) + U_{3M},$$

де p_H - тиск у внутрішній порожнині сенсора 4 (його значення встановлюють рівним значенню атмосферного тиску); S_H - крутизна перетворення нелінійної складової функції перетворення; S_{L1} , S_{L2} - крутизна перетворення лінійних складових функції перетворення; U_{3M} - зміщення функції перетворення.

Згідно із запропонованим способом, спочатку за допомогою джерела 8 формують направлений потік оптичного випромінювання Φ_0 у заданому діапазоні довжин хвиль. Останній проходить через волоконні світловоди 6, волоконно-оптичні кабелі 5 і 18 та випромінюється з торців підвідних волоконних світловодів 20 у напрямі мембрани 12.

Потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_1 , значення якого дорівнює значенню атмосферного тиску p_H ($\{p_1\} = \{p_H\}$). Для цього клапан тиску 1 встановлюють у положення «Зачинено» і за допомогою джерела нормованого тиску 2 формують тиск p_{d1} ($\{p_{d1}\} = \{p_H\}$). Останній подають на другий вхід напівсуматора тисків 3. Оскільки на перший вхід напівсуматора 3 невідомий тиск p_x не поступає (клапан 3 закритий), то по закінченню перехідних процесів тиск p_1 у камері напівсуматора 3 встановлюється рівним за значенням тиску p_{d1} , тобто $\{p_1\} = \{p_H\}$.

Тиск p_1 з виходу напівсуматора 3 подають на вхід сенсора 4. У результаті на виході останнього утворюється перший модульований потік оптичного випромінювання Φ_{M1} .

Потужність першого модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_{M1} перетворюють у напругу $U_{\Phi1}$. Для цього модульований потік оптичного випромінювання Φ_{M1} через волоконно-оптичні кабелі 18 і 5 та волоконні світловоди 7 подають на вхід приймача оптичного випромінювання 4. У результаті на його виході утворюється напруга

$$U_{\Phi1} = U_{3M} \quad (1)$$

Напругу $U_{\Phi1}$ (1) подають на вхід вольтметра 10, вимірюють, а отриманий результат запам'ятовують.

Потім потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_2 , значення якого встановлюють за умовою $\{p_2\} = 0,5\{p_x\} + \{p_H\}$. Для цього клапан тиску 1 встановлюють у положення «Відчинено» і за допомогою джерела нормованого тиску 2 формують тиск p_{d2} , значення якого дорівнює подвоєному значенню тиску p_H ($\{p_{d2}\} = 2\{p_H\}$).

Тиск p_x з виходу клапану 1 та тиск p_{d2} з виходу джерела 2 подають, відповідно, на перший та другий входи напівсуматора тисків 3. По закінченню перехідних процесів тиск p_2 у камері напівсуматора 3 встановлюється рівним за значенням середньому арифметичному поданих на його входи тисків, тобто $\{p_2\} = 0,5\{p_x\} + \{p_H\}$.

Тиск p_2 з виходу напівсуматора 3 подають на вхід волоконно-оптичного сенсора тиску 4. У результаті на виході останнього утворюється другий модульований потік оптичного випромінювання Φ_{M2} . Потужність другого модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_{M2} перетворюють у напругу $U_{\Phi2}$. Для цього модульований потік оптичного випромінювання Φ_{M2} через волоконно-оптичні кабелі 18 і 5 та волоконні світловоди 7 подають на вхід приймача оптичного випромінювання 4. У результаті на його виході утворюється напруга

$$U_{\Phi2} = S_H(p_x/k_2) \exp[S_{L2}(p_x/k_2)] + S_{L1}(p_x/k_2) + U_{3M} \quad (2)$$

Напругу $U_{\Phi2}$ (2) подають на вхід вольтметра 10, вимірюють, а отриманий результат запам'ятовують.

Далі потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_3 , значення якого встановлюють за умовою $\{p_3\} = 0,5(\{p_x\} - \{\Delta p_0\}) + \{p_H\}$, де $\{\Delta p_0\}$ - значення нормованого приросту тиску. Для цього клапан тиску 1 залишають у положенні «Відчинено» і за допомогою джерела нормованого тиску 2 формують тиск p_{d3} , значення якого дорівнює різниці подвоєного значення тиску p_H і значення нормованого приросту тиску Δp_0 , тобто $\{p_{d3}\} = 2\{p_H\} - \{\Delta p_0\}$.

Тиск p_x з виходів клапану 1 та тиск p_{d3} з виходу джерела 2 подають, відповідно, на перший та другий входи напівсуматора тисків 3. По закінченню перехідних процесів тиск p_3 у камері напівсуматора 3 встановлюється рівним за значенням середньому арифметичному поданих на його входи тисків, тобто $\{p_3\} = 0,5(\{p_x\} - \{\Delta p_0\}) + \{p_H\}$.

Тиск p_3 з виходу напівсуматора 3 подають на вхід волоконно-оптичного сенсора тиску 4. У результаті на виході останнього утворюється третій модульований потік оптичного випромінювання Φ_{M3} . Потужність третього модульованого потоку оптичного випромінювання Φ_{M3} за допомогою приймача 9 перетворюють у напругу

$$U_{\Phi3} = S_H \left(\frac{p_x - \Delta p_0}{k_2} \right) \exp \left[S_{L2} \left(\frac{p_x - \Delta p_0}{k_2} \right) \right] + S_{L1} \left(\frac{p_x - \Delta p_0}{k_2} \right) + U_{3M}. \quad (3)$$

Напругу $U_{\Phi 3}$ (2) подають на вхід вольтметра 10, вимірюють, а отриманий результат запам'ятовують.

Після цього потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_4 , значення якого встановлюють за умовою $\{p_4\}=0,5(\{p_x\}+\{\Delta p_0\})+\{p_n\}$. Для цього клапан тиску 1 залишають у положенні «Відчинено» і за допомогою джерела нормованого тиску 2 формують тиск p_{d4} , значення якого дорівнює сумі подвоєного значення тиску p_n і значення нормованого приросту тиску Δp_0 , тобто $\{p_{d4}\}=2\{p_n\}+\{\Delta p_0\}$.

Тиск p_x з виходу клапану 1 та тиск p_{d4} з виходу джерела 2 подають, відповідно, на перший та другий входи напівсуматора тисків 3. По закінченню перехідних процесів тиск p_4 у камері напівсуматора 3 встановлюється рівним за значенням середньому арифметичному поданих на його входи тисків, тобто $\{p_4\}=0,5(\{p_x\}+\{\Delta p_0\})+\{p_n\}$.

Тиск p_4 з виходу напівсуматора 3 подають на вхід волоконно-оптичного сенсора тиску 4. У результаті на виході останнього утворюється четвертий модульований потік оптичного випромінювання Φ_{m4} . Його потужність за допомогою приймача 9 перетворюють у напругу

$$U_{\Phi 4} = S_H \left(\frac{p_x + \Delta p_0}{k_2} \right) \exp \left[S_{\Pi 2} \left(\frac{p_x + \Delta p_0}{k_2} \right) \right] + S_{\Pi 1} \left(\frac{p_x + \Delta p_0}{k_2} \right) + U_{3M} \quad (4)$$

Напругу $U_{\Phi 4}$ (4) подають на вхід вольтметра 10, вимірюють, а отриманий результат запам'ятовують.

Потім потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_5 , значення якого встановлюють за умовою $\{p_5\}=0,5\{p_{0x}\}+\{p_n\}$, де $\{p_{0x}\}$ - значення нормованого тиску. Для цього клапан тиску 1 встановлюють у положення «Зачинено». Виходячи з результату другого вимірювання визначають приблизне значення $\{p_{0x}\}$ тиску p_x . За допомогою джерела 2 формують тиск p_{d5} , значення якого встановлюють за умовою $\{p_{d5}\}=0,5\{p_{0x}\}+\{p_n\}$. Тиск p_{d5} подають на другий вхід напівсуматора 3. Оскільки на перший вхід напівсуматора 3 невідомий тиск p_x не поступає (клапан 3 закритий), то по закінченню перехідних процесів тиск p_5 у камері напівсуматора 3 встановлюється рівним за значенням тиску p_{d5} , тобто $\{p_5\}=0,5\{p_{0x}\}+\{p_n\}$.

Тиск p_5 подають на вхід волоконно-оптичного сенсора тиску 4. У результаті на виході останнього утворюється п'ятий модульований потік оптичного випромінювання Φ_{m5} . Його потужність за допомогою приймача 9 перетворюють у напругу

$$U_{\Phi 5} = S_H(p_{0x}/k_2) \exp[S_{\Pi 2}(p_{0x}/k_2)] + S_{\Pi 1}(p_{0x}/k_2) + U_{3M} \quad (5)$$

Напругу $U_{\Phi 5}$ (5) подають на вхід вольтметра 10, вимірюють, а отриманий результат запам'ятовують.

Далі потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_6 , значення якого встановлюють за умовою $\{p_6\}=0,5(\{p_{0x}\}-\{\Delta p_0\})+\{p_n\}$. Для цього клапан тиску 1 залишають у положенні «Зачинено» і за допомогою джерела 2 формують тиск p_{d6} , значення якого встановлюють за умовою $\{p_{d6}\}=0,5(\{p_{0x}\}-\{\Delta p_0\})+\{p_n\}$. Тиск p_{d6} подають на другий вхід напівсуматора 3. Оскільки на перший вхід напівсуматора 3 невідомий тиск p_x не поступає, то по закінченню перехідних процесів тиск p_6 у камері напівсуматора 3 встановлюється рівним за значенням тиску p_{d6} , тобто $\{p_6\}=0,5(\{p_{0x}\}-\{\Delta p_0\})+\{p_n\}$.

Тиск p_6 з виходу напівсуматора 3 подають на вхід волоконно-оптичного сенсора тиску 4. У результаті на виході останнього утворюється шостий модульований потік оптичного випромінювання Φ_{m6} . Його потужність за допомогою приймача 9 перетворюють у напругу

$$U_{\Phi 6} = S_H \left(\frac{p_x - \Delta p_0}{k_2} \right) \exp \left[S_{\Pi 2} \left(\frac{p_x - \Delta p_0}{k_2} \right) \right] + S_{\Pi 1} \left(\frac{p_x - \Delta p_0}{k_2} \right) + U_{3M} \quad (6)$$

Напругу $U_{\Phi 6}$ (6) подають на вхід вольтметра 10, вимірюють, а отриманий результат запам'ятовують.

Після цього потужність потоку оптичного випромінювання Φ_0 модулюють тиском p_7 , значення якого встановлюють за умовою $\{p_7\}=0,5(\{p_{0x}\}+\{\Delta p_0\})+\{p_n\}$. Для цього клапан тиску 1 залишають у положенні «Зачинено» і за допомогою джерела 2 формують тиск p_{d7} , значення якого встановлюють за умовою $\{p_{d7}\}=0,5(\{p_{0x}\}+\{\Delta p_0\})+\{p_n\}$. Тиск p_{d7} подають на другий вхід напівсуматора 3. Оскільки на перший вхід напівсуматора 3 невідомий тиск p_x не поступає, то по закінченню перехідних процесів тиск p_7 у камері напівсуматора 3 встановлюється рівним за значенням тиску p_{d7} , тобто $\{p_7\}=0,5(\{p_{0x}\}+\{\Delta p_0\})+\{p_n\}$.

Тиск p_7 з виходу напівсуматора 3 подають на вхід волоконно-оптичного сенсора тиску 4. У результаті на виході останнього утворюється сьомий модульований потік оптичного випромінювання Φ_{m7} . Його потужність за допомогою приймача 9 перетворюють у напругу

$$U_{\Phi 7} = S_H \left(\frac{p_x + \Delta p_0}{k_2} \right) \exp \left[S_{\Pi 2} \left(\frac{p_x + \Delta p_0}{k_2} \right) \right] + S_{\Pi 1} \left(\frac{p_x + \Delta p_0}{k_2} \right) + U_{3M} \quad (7)$$

Напругу $U_{\Phi 7}$ (7) подають на вхід вольтметра 10, вимірюють, а отриманий результат запам'ятовують.

Дійсне значення тиску p_x визначають згідно з рівнянням надлишкових вимірювань

$$p_x = \frac{S_{n1}\Delta p_0 \left(S_{n2}\Delta p_0 - k_1 \right) + k_2 e^{S_{n2}\Delta p_0} \left(U_{\Phi 3} - U_{\Phi 1} \right) + k_2^2 e^{\frac{S_{n2}\Delta p_0}{k_2}} \left(U_{\Phi 3} - U_{\Phi 1} \right) + k_2 \left(U_{\Phi 4} - U_{\Phi 1} \right)}{S_{n1} \left(e^{\frac{S_{n2}\Delta p_0}{k_2}} - k_1 \right)^2}, \quad (8)$$

де

$$S_{n1} = k_2 \frac{p_{0x}^2 [U_{\phi 5} - U_{\phi 1} - U_{\phi 5}] + U_{\phi 1} [U_{\phi 5} - U_{\phi 6}] + U_{\phi 7} [U_{\phi 6} - U_{\phi 1}] + \Delta p_0^2 [U_{\phi 5} - U_{\phi 1}]^2}{p_{0x}^2 [U_{\phi 6} - U_{\phi 5}] + [U_{\phi 7} - U_{\phi 5}] + k_2 \Delta p_0^2 U_{\phi 5} [U_{\phi 5} - U_{\phi 1}] + p_{0x} \Delta p_0 U_{\phi 5} [U_{\phi 6} - U_{\phi 7}]} \quad (9)$$

$$S_{n2} = \frac{k_2}{\Delta p_0} \ln \left[\frac{(p_{0x} - \Delta p_0) \left(p_{0x} \left(\frac{U_{\Phi 5} - U_{\Phi 7}}{U_{\Phi 6} - U_{\Phi 5}} \right) + \Delta p_0 \left(\frac{U_{\Phi 5} - U_{\Phi 1}}{U_{\Phi 6} - U_{\Phi 5}} \right) \right)}{(p_{0x} + \Delta p_0) \left(p_{0x} \left(\frac{U_{\Phi 5} - U_{\Phi 7}}{U_{\Phi 6} - U_{\Phi 5}} \right) + \Delta p_0 \left(\frac{U_{\Phi 5} - U_{\Phi 1}}{U_{\Phi 6} - U_{\Phi 5}} \right) \right)} \right], \quad (10)$$

Аналіз рівняння надлишкових вимірювань (8) показав, що обробка результатів проміжних вимірювань (1)-(7) зазначеним чином забезпечує виключення впливу на результат вимірювання тиску абсолютних значень параметрів функції механіко-оптико-електронного перетворення тиску в напругу, а також їх змін під дією дестабілізуючих факторів. Крім того при цьому забезпечується лінійна залежність результату вимірювання від вимірюваного тиску.

Як видно з рівнянь надлишкових вимірювань (9) і (10), параметри S_{p1} і S_{p2} функції перетворення

визначаються шляхом обробки результатів проміжних вимірювань (1) і (5)-(7).

Отже, спосіб надлишкових вимірювань тиску забезпечує виключення похибки від нелінійності, адитивної і мультиплікативної складових систематичної похибки.

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

Таким чином, запропонований спосіб надлишкових вимірювань тиску забезпечує вирішення поставленої технічної задачі.

