

УДК 629.735.05 : 629.735.33-519

**В.Ю. ЛАРІН, Я.Г. РОДЧЕНКО**

*Національний авіаційний університет, Україна*

## **БАРОМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ІНТЕГРОВАНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

*В статті розглянуто структуру та принцип дії, характеристики мікромеханічних перетворювачів тиску, які побудовані за сучасними MEMS-технологіями. Проаналізовано математичну модель процесу перетворення з урахуванням сумарної похибки вимірювання тиску. Розглянуто складові сумарної похибки вимірювання та її математична модель. Надано опис та результати експериментального дослідження характеристик реального барометричного перетворювача тиску в стабільних умовах та в умовах впливу зміни температури зовнішнього середовища.*

**Ключові слова:** барометричні перетворювачі, MEMS-технологія, чутливий елемент, експериментальні дослідження, вплив температури.

### **Вступ**

В інтегрованій навігаційній системі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) барометричні перетворювачі служать для незалежного вимірювання таких навігаційних параметрів як - абсолютна (відносна) висота польоту, вертикальна швидкість і дійсна повітряна швидкість польоту [1, 2]. Барометричні перетворювачі статичного (абсолютного) тиску служать для визначення висоти і вертикальної швидкості, перетворювачі диференціального тиску - для визначення повітряної швидкості польоту.

У пілотованих літальних апаратах різних класів використовуються в основному барометричні перетворювачі механічного типу, чутливим елементом яких є анероїдна коробка або мембранна коробка.

Оскільки вказані перетворювачі мають значну вагу і розміри, то їх використання в БПЛА ближньої, середньої і обмеженої дальності буде нераціональним.

В даний час розроблені і виробляються барометричні перетворювачі на основі MEMS-технології які, по суті, є мікромеханічними датчиками тиску (МДТ). Виробниками таких пристроїв є такі, наприклад відомі фірми як Motorola (Freescale Semiconductor) і Honeywell. Вироблювані ними барометричні перетворювачі мають малі габаритні розміри і малу вагу, лінійну передавальну характеристику, уніфікований вихідний сигнал, хорошу чутливість, термокомпенсацію похибки вихідного сигналу в широкому діапазоні температур, внутрішні схеми придушення перешкод і шумів. Всі вказані характеристики сучасних типів барометричних перетворювачів дозволяють використовувати ці МДТ в інтегральній навігаційній системі для висо-

коточного визначення вище перелічених навігаційних параметрів.

### **Мета дослідження**

Для побудови інтегрованої навігаційної системи БПЛА потрібна всебічна та вичерпна інформація про особливості функціонування її складових частин. Таку інформацію зазвичай отримують із специфікацій на той чи інший пристрій, яка містить всі необхідні дані – характеристики та параметри, рекомендації щодо монтування та експлуатації пристрою. Але для застосування пристрою в конкретному апараті в умовах зовнішнього середовища, що зазнає змін, необхідне отримання інформації щодо реального відклику цього пристрою. Таку інформацію отримують, по-перше, шляхом глибокого аналізу науково-технічної літератури та специфікацій, які супроводжують пристрій, а по-друге шляхом різноманітних експериментальних досліджень з метою отримання реального відклику системи, яка зазнає дії впливаючих факторів.

Іншою причиною необхідності експериментальних досліджень є наступне. Не є секретом те, що виробничі потужності відомих виробників електронного приладобудування знаходяться в країнах “третього світу”, в яких культура виробництва знаходиться на недостатньому рівні. Через це технологічні процеси на таких підприємствах є недосконалими і вироблювана продукція може містити деякі відхилення від вказаних в специфікації стандартів. Ці відхилення можна визначити тільки шляхом проведення експериментальних досліджень або тестових випробувань. Тому для отримання реальних показників барометричних MEMS-перетворювачів були проведені вказані нижче дослідження.

## Структура, принцип дії та основні технічні характеристики перетворювачів

Розглянемо конструкцію барометричного перетворювача абсолютного тиску який виробляє Freescale Semiconductor (рис. 1).

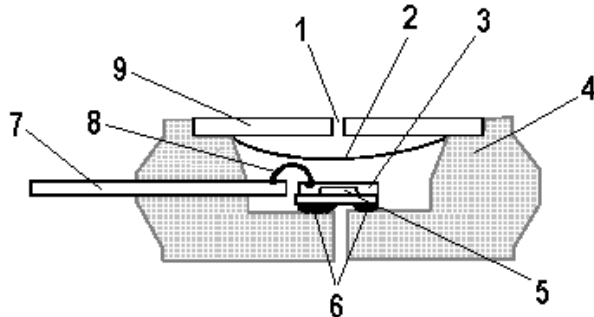


Рис. 1. Конструкція барометричного перетворювача абсолютного тиску:

- 1 - вхідний отвір; 2 - межа оболонки фторокремнієвого захисного гелю; 3 - діафрагма чутливого елемента (ЧЕ); 4 - епоксидний-пластиковий корпус;
- 5 - герметичний вакуумвміщуючий резервуар;
- 6 - кріплення ЧЕ; 7 - зовнішній інформаційний вивід ЧЕ; 8 - резистивний елемент; 9 - пластинка з неіржавіючої сталі

Принцип дії первинного перетворювача заснований на пьезорезистивном ефекті, який спостерігається в напівпровідниках, - а саме зміні їх питомого опору при дії на напівпровідник певного механічного тиску. У даній структурі перетворювача зовнішнє газоподібне середовище (в даному випадку повітря) тиск якої змінюється при зміні висоти точки місцеположення датчика над рівнем моря, проникає через отвір 1 в пластинці 9. Тиск зовнішнього середовища впливає на поверхню фторокремнієвої гелеподібної маси, яка слугує приводним елементом чутливого елемента первинного перетворювача. Маса гелю виконує одночасно дві функції: функцію приводного елемента і функцію захисту чутливого елемента

від несприятливих домішок зовнішнього середовища. Сприйнята гелеподібною масою зміна тиску передається на діафрагму ЧЕ 3. В середині ЧЕ знаходиться герметична вакуумвміщуюча камера, яка як би є джерелом еталонного сигналу, щодо якого вимірюється абсолютний тиск. У діафрагму імплантований резистивний елемент 8, який, вочевидь, є одним з варіантів кремнієвої нанопроволки і в якому власне і відбувається зміна питомого опору унаслідок магніторезистивного ефекту. Зміна опору передається через зовнішнє виведення перетворювача 7, який підключений до внутрішньої електронної схеми датчика, і перетвориться зрештою у вихідний інформаційний сигнал датчика у вигляді перепадів рівня постійної напруги або зміни частоти послідовності вихідних імпульсів (залежить від конкретного варіанту виконання датчика).

У джерелі [3] дається докладний опис характеристик датчиків, тому приведемо лише найзагальніші (табл. 1):

Слід зазначити, що 1 мм.рт.ст = 133, 322 Па, або в перекладі на одиницю вимірювання тиску в міліметрах водного стовпа - 1 мм рт. ст. = 13,5951 мм вод. ст. Таким чином стандартний атмосферний тиск прийнятий рівним (точно) 760 мм рт. ст., або 101 325 Па.

Рекомендоване значення напруги живлення датчиків складає 5,1 В постійної напруги. Час відгуку - 1 мс.

### Аналіз математичної моделі процесу перетворення

У специфікації на барометричні датчики приведена наступна математична модель:

$$U_{\text{out}} = U_s (P \cdot 0,009 - 0,095) \pm U_{\text{err}},$$

де  $U_{\text{out}}$  - вихідна напруга датчика, В;

$U_s$  - напруга живлення датчика, В;

Таблиця 1

Характеристики барометричних перетворювачів

Прилад	$P_{\text{макс.}}$ , PSI	$P_{\text{макс.}}$ , кПа	$P_{\text{макс.}}$ , см H <sub>2</sub> O	$P_{\text{макс.}}$ , мм рт.ст.	$U_{\text{смещ.}}$ , мВ	Чутливість, мВ/кПа	Похибка 0...85°C
MPX4100	15,2	105	1070	788	4,6	54	±1,8
MPX4101	14,8	102	1040	765	4,6	54	±1,8
MPXH6101	14,8	102	1040	765	4,6	54	±1,8
MPX4105	15,2	105	1070	788	4,6	51	±1,8
MPX4115	16,7	115	1174	863	4,6	46	±1,5
MPX6115	16,7	115	1174	863	4,6	46	±1,5
MPX4200	29	200	2040	1500	4,6	26	±1,5

$P$  - поточне значення тиску вимірюваного середовища (у нашому випадку - атмосферний тиск), кПа;

$U_{\text{err}}$  - значення похибки вимірювання, В.

Похибка вимірювання тиску  $U_{\text{err}}$  є величиною із багаточинним впливом. Виробник пропонує наступну математичну модель даної похибки :

$$U_{\text{err}} = P_{\text{err}} \cdot K_{T,\text{err}} \cdot 0,009 \cdot U_s,$$

де  $P_{\text{err}}$  - помилка вимірювання тиску, кПа;

$K_{T,\text{err}}$  - коефіцієнт температурної помилки;

$U_s$  - напруга живлення датчика, В.

Значення помилки вимірювання тиску  $P_{\text{err}}$  не є постійною величиною. За даними виробника її значення у вимірюваному діапазоні від 15 кПа до 115 кПа (для датчика типу МРХ4115) лежить в межах від мінус 1,5 кПа до + 1,5 кПа, тобто розмах помилки складає 3 кПа.

Коефіцієнт температурної помилки  $K_{T,\text{err}}$  рівний одиниці в діапазоні температур від нуля до 85°C. Такий широкий температурний діапазон, в якому температурна похибка не збільшує загальну похибку вимірювання тиску, є наслідком наявності у внутрішній схемі перетворювача термокомпенсаційних ланцюгів. У діапазонах температур від мінус 40°C до нуля та від +85°C до +125°C цей коефіцієнт мультиплікативно зростає. Крутизна нахилу прямої помилки складає приблизно 0,075 1/°C.

Константа 0,009 вочевидь є складовою інструментальної погрешності.

Тоді, з урахуванням похибки математична модель процесу перетворення буде:

$$U_{\text{out}} = U_s(P \cdot 0,009 - 0,095) \pm (P_{\text{err}} \cdot K_{T,\text{err}} \cdot 0,009 \cdot U_s).$$

З приведенного виразу слід, що при зменшенні атмосферного тиску при збільшенні висоти польоту БПЛА буде зменшуватиметься значення першої складової моделі, навіть за умови, що складові похибки будуть постійні і мінімальні, що у свою чергу приведе до більшої невизначеності вимірювання тиску.

Виконаємо дослідження математичної моделі за наступних початкових умов: тиск змінюється в діапазоні  $\Delta P=1$  кПа; напруга живлення стабільна і складає 5В; помилка вимірювання тиску  $P_{\text{err}} = +1,5$ ; температура повітря  $T=15^\circ\text{C}$ , що означає  $K_{T,\text{err}} = 1$ . Заданою величиною тиску на нульовій відмітці рівною 745 мм. рт. ст, або 99324,89 Па.

Величина похибки вимірювання  $U_{\text{err}}$  буде дорівнювати:

$$U_{\text{err}} = 1,5 \cdot 1 \cdot 0,009 \cdot 5 = 0,068 \text{ В.}$$

Визначимо шляхом моделювання чутливість перетворювача. На рис. 2 приведений графік залеж-

ності вихідної напруги датчика від величини тиску, який змінюється у вказаному діапазоні.

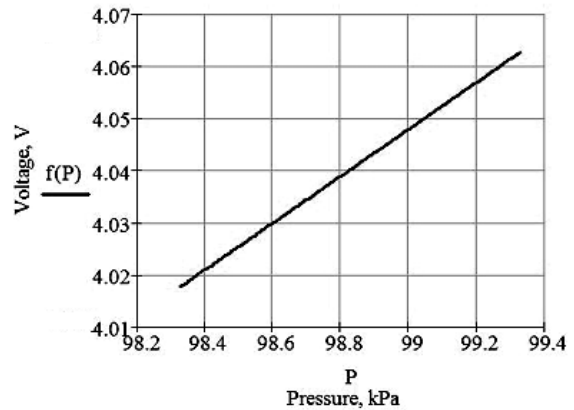


Рис. 2. Графік залежності вихідної напруги  $U_{\text{out}}$  датчика від величини атмосферного тиску

Чутливість в даному діапазоні складає 0,045В, що відповідає паспортним даним.

На невеликих висотах кожні 12 м підйому зменшують атмосферний тиск на 1 мм рт.ст. ( або на 133, 322 Па). Відповідно, при зміні висоти на 1 метр тиск змінюватиметься на 11,11 Па. Тоді вихідна напруга даного барометричного датчика змінюватиметься на 0,5 мВ при зміні висоти на один метр.

### Експериментальні дослідження функціонування барометричних датчиків

Експериментальне дослідження було проведено з метою визначення характеристики перетворення датчика і експериментальної чутливості.

Для досліджень був вибраний барометричний датчик МРХ4115А. Зміна атмосферного тиску досягалася шляхом зміни висоти місцязнаходження датчика. Висота місцязнаходження датчика змінювалася від вибраної нульової відмітки, якою був перший поверх 15-поверхової будівлі до максимальної висоти (на 14 поверсі цієї будівлі). Висота поверху (від підлоги до стелі) - 3м. Висота міжповерхових перекриттів - 0,4м. Таким чином діапазон висоти складав 47,6 м. Для перевірки постійності температури в ході експериментів виконувалося також її вимірювання. Нульова відмітка місця проведення експерименту знаходиться на висоті 179м над рівнем моря. Відносна вологість під час проведення експериментальних досліджень за даними довколишньої метеостанції складала +56% і прийнята постійною.

Опис приладів і устаткування: вимірювання вихідної постійної напруги датчика виконувалося за допомогою електронного мультиметра МУ65 фірми

Mastech. За допомогою ідентичного приладу виконувалося вимірювання вихідної напруги датчика температури типу TC1047A фірми Microchip Technology. Напруга живлення датчиків була постійною і забезпечувалася джерелом стабілізованої постійної напруги і дорівнювала 4,995 В. Ця напруга також періодично вимірювалася за допомогою мультиметра МУ65 при кожному вимірюванні показань датчика тиску.

Показання температури навколишнього середовища, визначалися шляхом розрахунку на підставі свідчень датчика температури згідно формулі:

$$T = \frac{V_{OUT} - 500}{10},$$

де  $T$  - шукане значення температури, °C;

$V_{OUT}$  - поточне значення вихідної напруги датчика температури, В,

500 - значення вихідної напруги датчика температури при 0°C,

10 - крутизна характеристики перетворення датчика, мВ/°C.

Вимірювання на кожній висотній відмітці виконувалися впродовж 20 хвилин. Результати експерименту приведені в табл. 2.

Вихідна напруга датчиків вказана в третьому і четвертому стовпцях таблиці мала дрейф в третьому знаку після коми. Цей дрейф може бути пояснений як нестабільністю самого датчика висоти, так і нестабільністю мультиметра в останньому знаку. Друге припущення ймовірніше, оскільки при вимірюванні показань вихідної напруги датчика температури спостерігався аналогічний дрейф, а оскільки датчик тиску і датчик температури є різними за своєю структурою і функціональністю пристрої, то вони не можуть мати ідентичного характеру змін вихідного сигналу.

Чутливість датчика згідно з отриманими даними експериментів складає 0,51 мВ/м. Вибір остаточного показника чутливості, який визначить точність висотоміра залежить:

– від показників обраного аналого-цифрового перетворювача (АЦП);

– від результатів досліджень (або аналізу) про вплив температури і вологості повітря;

– конструктивних особливостей встановлення датчика.

Передостанній рядок описує показання датчика висоти на першому поверсі усередині приміщення, останній – показання датчика висоти на цій же відмітці поза приміщенням. Причому цей достатньо різкий перепад температури (на 6,4°C) відбувся за проміжок часу рівний не більш 20с. Як видно з останніх двох спостережень при позитивних значеннях температури (від нуля і вище) датчик має відмінну температурну стабілізацію, що повністю відповідає паспортним параметрам датчика. Ця важлива позитивна властивість датчика гарантує відсутність температурної похибки висотоміра при раптових позитивних змінах (біля ±10°C) температурних умов польоту (сонце-похмуро, вечір-ніч, ніч-ранок).

Визначимо абсолютну і відносну похибки.

Розрахуємо вихідну напругу датчика висоти при відомому тиску по формулі (дані специфікації на датчик тиску):

$$U_{out.calc} = U_s(P \times 0,009 - 0,095) = 4,072 .$$

Виміряне значення вихідної напруги складає  $U_{out.meter}=4,059$  В.

Абсолютна похибка:

$$\Delta = U_{out.calc} - U_{out.meter} = 0,013 \text{ В.}$$

$$\text{Відносна похибка: } \sigma = \frac{\Delta}{U_{out.calc}} \cdot 100\% = 0,32\%.$$

### Експериментальні дослідження впливу низької температури на показання барометричного датчика тиску

Метою даного експериментального дослідження було визначення кількісного впливу дії низьких температур (температурній похибки) на вихідний сигнал датчика статичного тиску (датчика висоти) MPX4115A і датчика диференціального тиску (датчика індикаторної швидкості ЛА) MPXV5004G.

Таблиця 2

Результати експериментальних досліджень характеристики перетворення

T, °C	Висота, м.	Вихідна напруга датчика тиску, В	Вихідна напруга датчика температури, В
16	0	4,059 ÷ 4,060	0,660 ÷ 0,659
17,2	47,6	4,032 ÷ 4,031	0,672 ÷ 0,671
17,7	34	4,039 ÷ 4,040	0,677 ÷ 0,676
17,8	20,4	4,047 ÷ 4,048	0,678 ÷ 0,679
16,7	0	4,059 ÷ 4,060	0,667 ÷ 0,666
10,3	0	4,059 ÷ 4,060	0,603 ÷ 0,604

У даному експерименті висота місця знаходження датчика не змінювалася і дорівнювала 179 м. над рівнем моря. Згідно даним метеостанції барометричний тиск на цій точці складав в день проведення експерименту 745,5 мм.рт.ст. Відносна вологість під час проведення експериментальних досліджень за даними довколишньої метеостанції складала +73% і прийнята постійною.

Опис приладів і устаткування: вимірювання вихідної постійної напруги датчика виконувалося за допомогою електронного мультиметра МУ65 фірми Mastech. За допомогою ідентичного приладу виконувалося вимірювання напруги живлення датчика від високостабільного джерела напруги. Вимірювання температури навколишнього повітря виконувалося на підставі показань термометри, яка додається до комплекту мультиметра. Результати експерименту приведені в табл. 3.

З табл. 3 слід, що при зниженні температури навколишнього середовища до мінус 8°C відбувається: приріст вихідного сигналу ( $\Delta U_{st}$ ) датчика статичного тиску на 10мВ, приріст вихідного сигналу датчика динамічного тиску ( $\Delta U_{dyn}$ ) на 26 мВ ( $\pm 5$ мВ).

Вихідний сигнал датчика динамічного тиску має певну нестабільність.

Як видно з даних табл. 3 ця нестабільність складає 5мВ. Нестабільність виявляється як при кімнатній температурі, так і при зниженій температурі, що є небажаним фактом.

Для визначення абсолютної і відносної похибки без урахування температурної складової похибки скористаємося приведеними раніше формулами (розрахунки виконані для кімнатної температури):

$$U_{out.calc} = U_s(P \times 0,009 - 0,095) = 4,006 \text{ В.}$$

Виміряне значення вихідної напруги складає

$$U_{out.meter} = 3,988 \text{ В.}$$

Абсолютна похибка:

$$\Delta = U_{out.calc} - U_{out.meter} = 0,018 \text{ В.}$$

Відносна похибка:

$$\sigma = \frac{\Delta}{U_{out.calc}} \cdot 100\% = 0,45\%.$$

Приріст вихідного сигналу при низькій температурі пояснюється збільшенням температурної похибки (Temperature Factor).

### Висновки

Проаналізовано складові сумарної похибки математичної моделі барометричного перетворювача тиску. Аналітичним шляхом виявлено, що при зменшенні атмосферного тиску (тобто при збільшенні висоти польоту БПЛА) за рахунок зменшення значення першої складової моделі буде зростати невизначеність вимірювання тиску.

Визначено остаточні показники чутливості, який визначатимуть точність барометричного висотоміра у складі інтегрованої навігаційної системи БПЛА.

Експериментальним шляхом виявлено нестабільність перетворювача динамічного тиску яка дорівнює 5 мВ.

Доречним є проведення подальших аналітичних та експериментальних досліджень з метою оцінки впливу припустимого рівню вологості та забруднення повітря на ефективність барометричних перетворювачів.

Таблиця 3

Результати експериментальних досліджень впливу зниженої температури\*

T, °C	P, мм.рт.ст.	$U_{OUT.MPX4115}$ , В	$U_{OUT.MPXV504G}$ , В	$U_{жив}$ , В	$U_t^\circ$ , В
+20	745,5	3,988	1,094	4,999	0,501
-8	745,5	3,997	1,068	4,999	0,540
-8	745,5	3,998	1,074	4,999	0,540
-8	745,5	3,998	1,069	4,999	0,540
-9	745,5	3,999	1,074	4,999	0,542

\* У таблиці позначено:

T – показання температури оточуючого середовища, визначалися за даними метеорологічної апаратури, встановленої на відстані 210 м. від місця проведення експерименту;

P – показання атмосферного тиску визначалися за даними метеорологічної апаратури, встановленої на відстані 210 м. від місця проведення експерименту;

$U_{OUT.MPX4115}$  – показання напруги вихідного сигналу датчика статичного тиску MPX4115, В;

$U_{OUT.MPXV504G}$  – показання напруги вихідного сигналу датчика динамічного тиску MPXV504G, В;

$U_{жив}$  – показання вихідної напруги високостабільного джерела живлення датчиків, В;

$U_t^\circ$  – показання вихідного сигналу термометри, В.

## Література

1. Воробьев, В.Г. *Авиационные приборы, информационно-измерительные системы и комплексы.* [Текст] / В.Г. Воробьев, В.В. Глухов, И.К. Кадьшев. – М. : Транспорт. – 1992. – 399 с.

2. Распопов, В.Я. *Микросистемная авионика* [Текст] / В.Я. Распопов. – Тула : «Гриф и К», 2010. – 248 с.

3. Датчики давления Freescale Semiconductor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kosmodrom.com.ua/sensor.php/el.php?name=NCL30001DR2G>. – 18.03.2012 г.

Поступила в редакцию 19.03.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры радиотехники и технической защиты информации А.Г. Сорочан, ГБУЗ Донецкий национальный технический университет, Донецк.

### БАРОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИНТЕГРИРОВАННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*В.Ю. Ларин, Я.Г. Родченко*

В статье рассмотрены структура и принцип действия, характеристики микромеханических преобразователей давления, построенных на основе современных MEMS-технологий. Проанализирована математическая модель процесса преобразования с учетом суммарной ошибки измерения давления. Рассмотрены составляющие суммарной ошибки измерения и её математическая модель. Приведено описание и результаты экспериментального исследования барометрического преобразователя давления в стабильных условиях и в условиях влияния изменения температуры внешней среды.

**Ключевые слова:** барометрические преобразователи, MEMS-технология, чувствительный элемент, экспериментальные исследования, влияние температуры.

### BAROMETRIC SENSORS OF INTEGRATED NAVIGATION SYSTEM OF UNMANNED AIRCRAFT VEHICLES

*V.J. Larin, Y.G. Rodchenko*

In the article the structure, operation principle, performances of micromechanical transformers of pressure are built on the basis of modern MEMS technologies have been considered. The mathematical model of transforming process taking into account of total error of pressure measuring has been analyzed. The components of total error and its mathematical model have been examined. It is pointing the description and results of experimental researches of barometric transformer at stable condition and at state of influence of changing of environment temperature.

**Key words:** barometric transformers, MEMS technology, sensing element, experimental researches, influence of temperature.

**Ларин Віталій Юрійович** – д-р техн. наук, доцент, професор кафедри аеронавігаційних систем Національного авіаційного університету, Київ, Україна,

**Родченко Ярослава Геннадіївна** – аспірант кафедри аеронавігаційних систем Національного авіаційного університету, Київ, Україна,