

Д. т. н. А. О. ДРУЖИНИН, к. т. н. О. П. КУТРАКОВ, к. т. н. Р. В. ЗІНЬКО

Україна, Національний університет «Львівська політехніка»

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

## ДАТЧИКИ ТИСКУ НА ОСНОВІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ШУМОВИХ ПАРАМЕТРІВ АВТОГЛУШНИКІВ

Наведено результати дослідження високотемпературних датчиків тиску на основі ниткоподібних кристалів кремнію та розробки системи активного придушення шуму автомобільного двигуна на їхній основі. Принцип роботи запропонованої системи засновано на застосуванні в глушнику додаткової буферної камери зі змінним об'ємом. Застосування розроблених високотемпературних датчиків тиску з тензорезисторами на основі ниткоподібних кристалів кремнію для отримання інформації про параметри звукових коливань, що виникають під час витоку вихлопних газів, дозволило створити систему управління зміною об'єму буферної камери. Представлено результати випробування запропонованої системи активного придушення шумів двигуна внутрішнього згорання.

Ключові слова: автомобільні глушники, активне придушення шуму, датчики тиску, ниткоподібні кристали.

Важливим етапом створення сучасних автотранспортних засобів з покращеними екологічними та споживчими якостями є вдосконалення їхніх віброакустичних характеристик. Цей факт спонукає виробників застосовувати методи зниження як зовнішнього, так і внутрішнього шуму, створюваного автотранспортом [1].

Основним джерелом шуму працюючого двигуна залишається шум випуску відпрацьованих газів, причому акустична потужність незаглушеного шуму вихлопу досягає 100 Вт (до 140 дБА) і в десятки або навіть у сотні разів перевищує потужність шуму інших елементів і систем двигуна [2].

Частотний спектр звуку даного джерела має виражений низькочастотний характер, що визначає слабе його поглинання під час поширення у відкритому просторі. Для якісного зниження рівня звукового тиску в частотних смугах шуму до 500 Гц необхідно застосовувати глушники з величезними габаритними розмірами та масою. Останнім часом все більше використовуються активні глушники шуму, дія яких заснована на принципах суперпозиції та інтерференції — накладання двох або декількох звукових хвиль, що призводить до послаблення результуючої хвилі в різних точках простору [3—5]. Однак глушники зі сталими характеристиками, розрахованими під задану резонансну частоту, не завжди є ефективними — зміна режимів роботи двигуна викликає дрейф резонансної частоти, яка може виходити за межі діапазону, на який розраховано глушник (рис. 1) [6]. Тому розробка нових конструкцій глушників, які поєднували б у собі високу ефективність у всьому діапазоні частот, низький протитиск і не-

значні масово-габаритні параметри, нині є дуже актуальним завданням.

Можливим варіантом розв'язку проблеми є застосування системи придушення резонансних частот глушника з використанням спеціальних датчиків для зняття первинної інформації про динамічні процеси, які визначають рівень шуму. Природно, що для створення такої системи необхідні датчики, які були б працездатними у дуже агресивному середовищі. Так, наприклад, температура вихлопних газів дизельного двигуна варіюється в діапазоні 500...700°C, карбюраторного — 700...1000°C. При вході в глушник швидкість потоку вихлопних газів змінюється в діапазоні  $V = 50...130$  м/с, а тиск в об'ємі досягає 0,1 МПа за зміни температури в діапазоні  $T_0 = 290...500$ °C [6].

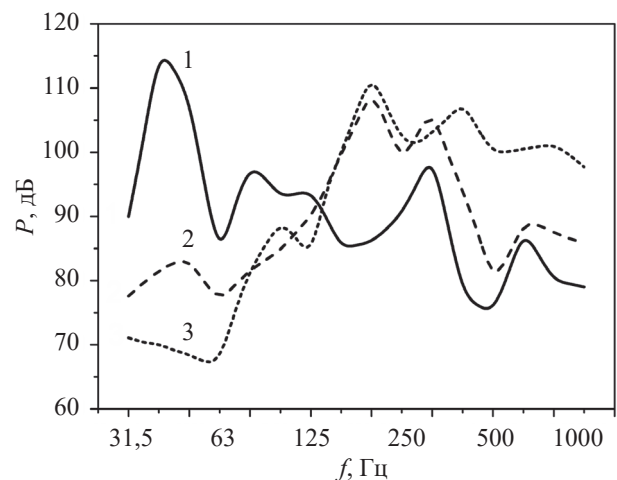


Рис. 1. 1/3-октавний спектр рівня звукового тиску  $P$  двигунів ВАЗ 2111 у різних режимах його роботи (за різних частот обертання, у об/хв):

1 — 1600; 2 — 5600; 3 — 5500

Метою цієї роботи є розробка високотемпературних датчиків тиску на основі тензорезисторів, виготовлених з ниткоподібних кристалів (НК) кремнію, для створення системи активного придушення шумів автомобільного глушника. Тензорезистори на основі НК кремнію мають унікальні механічні властивості, вони характеризуються високою чутливістю та можливістю роботи у різних амплітудно-частотних і температурних діапазонах до 500°C [8, 9].

**Конструкція датчика**

В основу конструкції датчика покладено систему «мембрана — шток — балка» (рис. 2). Принцип його роботи полягає у наступному. Під дією тиску  $P$  відбувається прогин мембрани 1, і переміщення її центру через шток 5 передається на балку 4 із тензорезисторами 3. При цьому балка зазнає деформації згину, а закріплені на ній тензорезистори — деформації стиску або розтягу залежно від місця їхнього розміщення.

Тензорезистори на основі НК Si  $p$ -типу провідності з питомим опором 0,005 Ом·см, які мають лінійну температурну залежність опору в широкому температурному діапазоні, підібрані в пари за значенням номінального опору і температурного коефіцієнта опору. Вони закріплюються на верхній та нижній поверхнях балки тензомодуля, а струмовідводи з платинового дроту діаметром 30 мкм приварюються до метало-скляного виводу, вбудованого у тензомодуль. Тензорезистори з'єднано у мостову схему, вихідний сигнал якої змінюється залежно від тиску, який сприймає мембрана датчика.

Для створення пружного елемента високотемпературного датчика використано сплав 29НК з коефіцієнтом термічного розширення (КТР) близьким до КТР кремнію. Для закріплення тензорезисторів обрано склоприпой C51-1 з КТР  $\approx 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  та температурою розм'якшення приблизно 750°C. Використання комбінації «кремнієвий тензорезистор — склоприпой — ковар» з близькими КТР дозволило мінімізувати

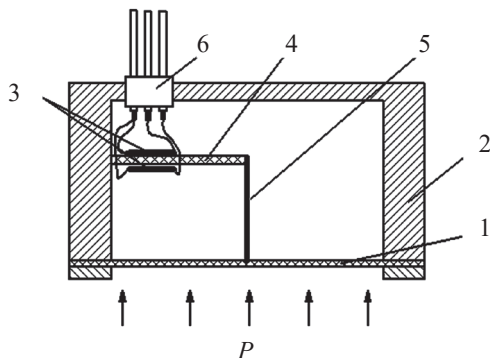


Рис. 2. Конструкція датчика тиску:

1 — мембрана; 2 — корпус; 3 — тензорезистори; 4 — балка; 5 — шток; 6 — струмовиводи

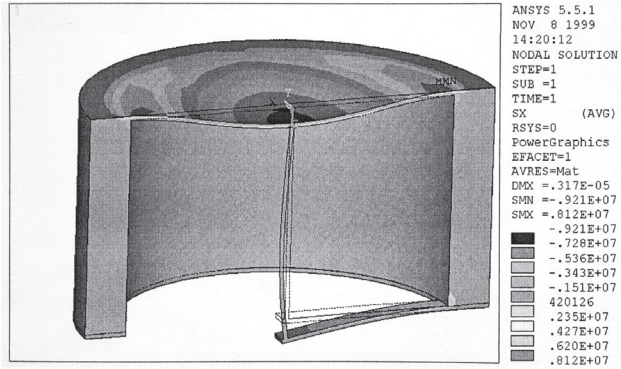


Рис. 3. Розподіл механічних напружень у датчика тиску

ти температурні напруження та забезпечити стабільність роботи датчика за високих температур.

Для оптимізації конструкції датчика тиску проводилось комп'ютерне моделювання розподілу механічних напружень і деформацій в системі «мембрана — шток — балка», яке виконувалося за методом скінчених елементів з використанням програми ANSYS [9]. Розрахунок проводився в ізотропному наближенні: вважалося, що всі елементи конструкції датчика виготовлено із ковара 29НК з модулем Юнга  $E = 140 \cdot 10^9 \text{ Па}$  та коефіцієнтом Пуассона  $\nu = 0,3$ . На рис. 3 наведено результати розрахунків механічних напружень в елементах конструкції датчика тиску. Такі розрахунки дозволили вибрати оптимальну конфігурацію та розміри штока, щоб забезпечити необхідні частотні характеристики системи, а також зменшити її нелінійність.

Для усунення впливу великих вібраційних навантажень і кислотної дії середовища корпус датчика виготовлено з коварового сплаву, а всі з'єднання виконуються за допомогою лазерного зварювання. Жорстке з'єднання всіх елементів датчика сприяє підвищенню його власної частоти та стійкості до вібрацій. Мембрану датчика виготовлено зі сплаву типу 44НХТЮ з високими пружними властивостями та малим температурним коефіцієнтом модуля пружності. На рис. 4 наведено зовнішній вигляд датчика тиску, призначеного для вимірювання тиску

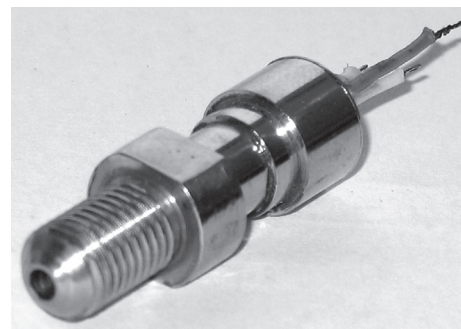


Рис. 4. Зовнішній вигляд датчика тиску

у діапазоні від 0 до 400 кПа за температури у діапазоні до 450°C.

**Результати досліджень датчика тиску**

В результаті проведених досліджень отримано залежності, представлені на **рис. 5, 6**.

З наведених на **рис. 5** характеристик зрозуміло, що у статичному режимі вимірювання вихідний сигнал датчика має лінійну залежність від тиску за різних температур у діапазоні від 20 до 450°C. Розрахована нелінійність вихідної характеристики становить близько 0,1%.

Дослідження динамічних характеристик датчиків тиску проводилося на спеціальному стенді, призначеному для вимірювань амплітудно- і фазо-частотних характеристик датчиків тиску, у діапазоні частот від 30 Гц до 8 кГц [11]. Система вимірювання пульсацій тиску складається з датчиків тиску (контрольного та досліджуваного), вимірювальних підсилю-

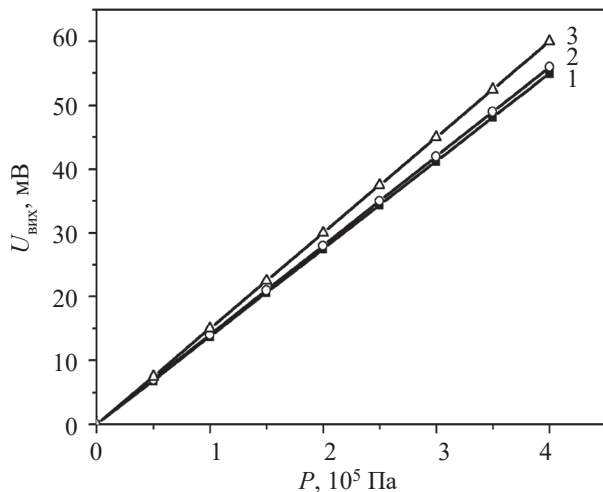


Рис. 5. Вихідні характеристики датчика тиску за різних температур:  
1 — 20°C; 2 — 300°C; 3 — 450°C

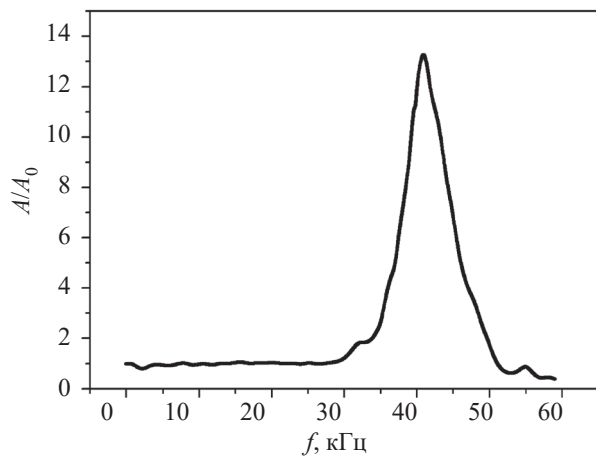


Рис. 6. Амплітудно-частотна характеристика датчика тиску

вачів та багатоканального реєструючого пристрою ТЕСЛА ЕАМ-500.

Амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) датчика тиску досліджувалися методом їхнього порівняння з АЧХ контрольного датчика тиску фірми "Kulite" [12]. Наведена на **рис. 6** АЧХ визначалась як відношення між амплітудами досліджуваного ( $A$ ) та контрольного ( $A_0$ ) датчиків тиску. Резонансна частота досліджуваного датчика тиску становить близько 4400 Гц.

Градування датчика тиску показало, що його електромеханічна частина є якісною, та дало змогу визначити похибку вимірювань у діапазоні температури від 20 до 900°C, яка становить  $\pm 0,5\%$ , а додаткова температурна похибка — менш ніж 0,03%/K.

**Система придушення шуму в глушнику**

Проведені дослідження дозволили розробити активну систему придушення шуму в глушнику вихлопу двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), схема якої представлена на **рис. 7**.

Датчик опорного звукового сигналу 1 на вході глушника та датчик залишкового звукового сигналу 6 в зоні виходу потоку вихлопних газів фіксують рівень шуму. В результаті обробки блоком 3 управління цими сигналами формується додатковий сигнал. Цей сигнал через підсилювач відправляється на електромагніт-соленоїд 4, який керує положенням діафрагми 5, що визначає об'єм буферної камери 2. Така конструкція дозволяє динамічно змінювати резонансну частоту буферної камери залежно від режиму роботи двигуна, що призводить до покращення його шумових характеристик.

Для оцінки ефективності роботи як усієї системи випуску, так і її окремих елементів найбільш інформативним параметром є втрата передачі звукових хвиль  $TL$  (transmission loss), оскільки вона не

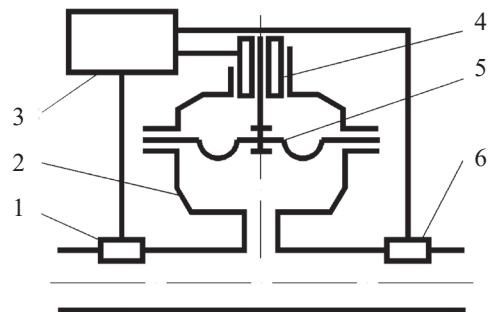


Рис. 7. Комбінована система придушення шуму в глушнику:

1 — тензодатчик опорного сигналу; 2 — додаткова буферна камера; 3 — блок управління; 4 — електромагніт-соленоїд; 5 — діафрагма; 6 — тензодатчик залишкового сигналу

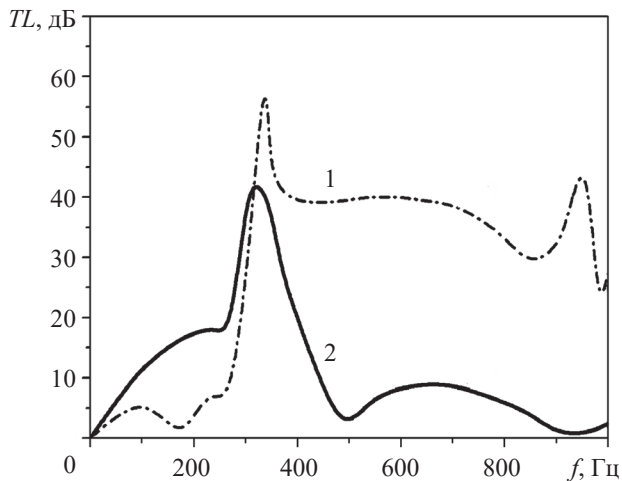


Рис. 8. Втрата передачі звукових хвиль глушника:  
1 — без додаткової буферної камери; 2 — з додатковою буферною камерою

залежить від акустичних умов на вході та виході системи випуску:

$$TL = 10 \lg(W_{in} / W_{out}),$$

де  $W_{in}$ ,  $W_{out}$  — потужність звукових хвиль, відповідно, на вході та виході глушника за погодженого вхідного та вихідного навантаження [13].

Використання в глушниках вихлопу ДВЗ розробленої додаткової резонаторної камери зі змінним об'ємом дозволило зменшити резонансні явища в зоні низькочастотних пульсацій тиску вихлопних газів з 57 до 43 Гц при дрейфі частоти в межах 310...350 Гц, що значно покращило його шумові характеристики (рис. 8).

### Висновки

Розроблені високотемпературні датчики тиску на основі тензорезисторів з ниткоподібних кристалів кремнію дозволили реалізувати систему динамічної зміни об'єму резонаторної камери у глушнику вихлопу відпрацьованих газів двигунів внутрішнього згорання. Проведені експериментальні дослідження показали високу надійність датчиків (вони витримують понад  $10^7$  циклів навантаження-розвантаження при деформації тензорезисторів  $1 \cdot 10^{-3}$  відносних одиниць). Використання спеціальних сплавів типу 29НК для виготовлення пружних елементів та склоприпою С51-1 для закріплення тензорезисторів забезпечило працездатність датчиків тиску в умовах високих температур (до  $450^\circ\text{C}$ ) зі збереженням їхніх високих ме-

трологічних параметрів. Завдяки застосуванню таких датчиків в системі динамічної зміни об'єму резонаторної камери в глушнику вихлопу відпрацьованих газів зменшилися резонансні явища в зоні низькочастотних пульсацій тиску, що значно покращило шумові характеристики двигуна.

### ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Munjal M.L. Analysis and design of pod silencers. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, vol. 262, № 3, pp.497–507.
2. Комкин А.И., Куличев И.Н., Сухоруков В.А. Анализ акустических характеристик глушителей шума. *Научно-технические достижения и передовой опыт в автомобилестроении*, НИИ стандартавтосельхозмаш, Москва, 1991, вып. 7, с. 9–12.
3. Potente D. General design principles for an automotive muffler. *Proceedings of Acoustics*, Busselton, Western Australia, 2005, p. 153–158.
4. Белоцерковский С. В., Тольский В. Е. Автомобильные глушители: современные требования, тенденции развития, методы расчета и испытаний. *Электронный журнал "Техническая акустика"*, <http://ejta.org>, 2001, 4.
5. Васильев А.В. *Акустическое моделирование и комплексное снижение шума автомобильных двигателей внутреннего сгорания*. Самара, Издательство Самарского научного центра РАН, 2004, 296 с.
6. Васильев А.В. Снижение низкочастотного шума и вибрации силовых и энергетических установок. *Механика и машиностроение*, 2003, т. 5, № 2, с. 419–429.
7. Лубяченко А.А. Приближенные физико-математические модели газодинамических и аэроакустических процессов в глушителях шума выпуска ДВС. *NOISE Theory and Practice*, т. 1, № 2, с. 72–83.
8. Druzhinin A., Kutrakov A., Lavitska E., Maryamova I. High temperature pressure sensors based on silicon microcrystals. *Труды 6-й междунар. конф. «Теория и техника передачи, приема и обработки информации»*. Туапсе, Россия, Харьков, ХТУРЭ, 2000, с. 451–453.
9. Дружинин А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П., Лях-Кагуй Н. С. Ниткоподібні кристали кремнію для сенсорної електроніки. *Фізика і хімія твердого тіла*, 2011, т. 12, № 4, с. 1078–1084.
10. Altabay W.A., Noori M., Wang L. *Using ANSYS for Finite Element Analysis. Vol. 1. A Tutorial for Engineers*, New York, Momentum Press, 2018, 193 p.
11. Дружинин, А.О., Мар'ямова І.Й., Кутраков О.П. Датчики механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук  $A_3B_5$ . Львів, Вид-во Львівська політехніка, 2015, 232 с.
12. Ned A. A., Kurtz A. D., Beheim G. et. al. Improved SiC Leadless Pressure Sensors for High Temperature, Low and High Pressure Applications. *Kulite Semiconductor Products, Inc. Twenty-First Transducer Workshop*. Lexington, Maryland, 2004, 10 p.
13. Комкин А.И. Оптимизация реактивных глушителей шума. *Акустический журнал*, 2010, т. 56, № 3, с. 373–379.

Дата надходження рукопису  
до редакції 10.02 2021 р.



SILICON WHISKER PRESSURE SENSORS FOR NOISE REDUCTION  
IN SILENCERS

The article contains the results of research and development of a system for active noise damping of an automobile engine. The main source of noise from a running engine is exhaust noise. The frequency spectrum of this sound has a pronounced low-frequency character, which explains its weak absorption when the sound is propagating in open spaces. A possible solution to this problem is to use an active system for suppressing the resonant frequencies of the muffler using strain gauges to read the primary information about the dynamic processes that determine the noise level.

It is for such active noise suppression systems that the authors develop a high-temperature pressure sensor based on strain gauges made of silicon whiskers. Such strain gauges have unique mechanical properties, are characterized by high sensitivity and the ability to operate in various amplitude-frequency and temperature ranges up to 500°C. The study of the dynamic characteristics of pressure sensors made it possible to confirm the quality of its electromechanical part and determine that the measurement error of the sensor is  $\pm 0.5$  in the temperature range of 20 to 500°C.

The active noise suppression system is a buffer tank whose volume changes in accordance with signals from pressure sensors. This design makes it possible to dynamically change the resonant frequency of the buffer capacitance depending on the operating modes of the engine, which leads to a decrease in its noise characteristics.

Using the developed additional resonator chamber with a variable volume in the exhaust muffler of an internal combustion engine made it possible to reduce resonance phenomena in the zone of low-frequency pulsations of the exhaust gas pressure from 57 to 43 Hz with a frequency drift in the range of 310 to 350 Hz, which significantly improved its noise characteristics.

**Keywords:** automobile mufflers, active noise suppression, pressure sensors, whiskers.

## REFERENCES

1. Munjal M.L. Analysis and design of pod silencers. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, vol. 262, № 3, pp.497–507.
2. Komkin A.I., Kulichev I.N., Sukhorukov V.A. Analysis of acoustic characteristics of silencers. *Nauchno-tehnicheskie dostigneniya i peredovoj opyt v avtomobilestroenii*, Research institutes Standartavtoselhoz mash, Moscow, 1991, vol.7, pp. 9–12. (Rus)
3. Potente D. General design principles for an automotive muffler. *Proceedings of Acoustics*, Busselton, Western Australia, 2005, pp. 153–158.
4. Belotserkovsky S. V., Tolskiy V. E. The Automobile Mufflers: the Modern Requirements. Tendencies of Development, Methods of Calculations and Tests, *Electronic Journal Technical Acoustics*, 2001, 4. (Rus)
5. Vasil'yev A.V. Acoustic modeling and integrated noise reduction for automotive internal combustion engines, Samara, Publishing House of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2004, 296 p. (Rus)
6. Vasil'ev A. V. Reducing low-frequency noise and vibration of power and power plants. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 2003, vol. 5, no. 2, pp. 419–429. (Rus)
7. Lubyanchenko A. A. Approximate physical and mathematical models of gas-dynamic and aeroacoustic processes in mufflers of engine exhaust noise. *NOISE Theory and Practice*, vol. 1, no. 2, pp.72–83. (Rus)
8. Druzhinin A., Kuttrakov A., Lavitska E., Maryamova I. High temperature pressure sensors based on silicon microcrystals. *Proceedings of the 6th Intern. conf. "Theory and technique of transmission, reception and processing of information"*, Tuapse, Russia, Kharkov, KhTURE, 2000, pp. 451–453.
9. Druzhinin A. O., Maryamova I. Y., Kuttrakov O. P., Lyakh-Kaguy N. S. Silicon microcrystals for touch electronics. *Solid State Physics and Chemistry*, 2011, vol. 12, no 4, pp. 1078–1084. (Ukr)
10. Altabay W.A., Noori M., Wang L. *Using ANSYS for Finite Element Analysis. Vol. 1. A Tutorial for Engineers*, New York, Momentum Press, 2018, 193 p.
11. Druzhinin A. O., Maryamova I. Y., Kuttrakov O. P. *Sensors of Mechanical Quantities Based on Filamentary Crystals of Silicon, Germanium and Compounds A<sub>3</sub>B<sub>5</sub>*, Ukraine, Lviv, Publisher House of Lviv Polytechnic National University, 2015, 232 p. (Ukr)
12. Ned A. A., Kurtz A. D., Beheim G. et. al. Improved SiC Leadless Pressure Sensors for High Temperature, *Low and High Pressure Applications. Kulite Semiconductor Products, Inc. Twenty-First Transducer Workshop*. Lexington, Maryland, 2004, 10 p.
13. Komkin A.I. Optimization of jet silencers. *Acoustic journal*, 2010, vol. 56, no. 3, pp. 373–379. (Rus)

## Опис статті для цитування:

Дружинін А. О., Кутраков О. П., Зінько Р. О. Датчики тиску на основі ниткоподібних кристалів кремнію для зниження шумових параметрів автоглушників. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2021, № 1–2, с. 28–32. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.1-2.28>

## Cite the article as:

Druzhinin A. A., Kuttrakov A. P., Zinko R. V. Silicon whisker pressure sensors for noise reduction in silencers. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 1–2, pp. 28–32. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.1-2.28>