

УДК 531.768

### ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТИСКУ НА ОСНОВІ ЗБУРЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

**Д. В. Черненко, О. М. Кузьменко, М. Ф. Жовнір**

Національний технічний університет України "КПІ"

просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: de3223@ukr.net; kuzmenko-oksana@i.ua

Для підвищення чутливості вимірювальних перетворювачів тиску на поверхневих акустичних хвилях і збільшення діапазону вимірюваних значень пропонується використання автогенераторної схеми з виконанням у вигляді п'єзоелектричного звукопроводу частотнозадаючим елементом, розміщеним у герметично закритому мембраною корпусі. Описано новий метод побудови безпроводних пасивних сенсорів на поверхневих акустичних хвилях, що дозволяє збільшити довжину акустичного каналу, яка перекривається зондом і, цим самим, кількість довжин хвиль на збудженій мембраною ділянці. Приведені основні положення математичного моделювання переміщення мембрани в електричному полі поверхневих акустичних хвиль під впливом вимірюваного тиску та результати експериментальних досліджень вимірювальних перетворювачів тиску. Продемонстровані теоретичні та експериментальні залежності часу затримки від відстані між мембраною та звукопроводом, і встановлені величини похибок між приведеними залежностями та причини їх виникнення. Зроблено висновки про переваги представлених вимірювачів тиску на основі збурення електричного поля поверхневих акустичних хвиль.

**Ключові слова:** поверхневі акустичні хвилі, вимірювальний перетворювач, тиск, безпроводні пасивні сенсори, час затримки.

### ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

**Д. В. Черненко, О. Н. Кузьменко, Н. Ф. Жовнір**

Национальный технический университет Украины "КПИ"

просп. Победы, 37, г. Київ, 03056, Украина. E-mail: de3223@ukr.net; kuzmenko-oksana@i.ua

Для повышения чувствительности измерительных преобразователей давления на поверхностных акустических волнах и увеличения диапазона измеряемых значений предлагается использование автогенераторной схемы с выполненным в виде пьезоэлектрического звукопровода частотнозадающим элементом, расположенным в герметично закрытой мембраной корпусе. Описан новый метод построения беспроводных пассивных сенсоров на поверхностных акустических волнах, дающий возможность увеличить длину канала, перекрываемого зондом, и, тем самым, количество длин волн на возбужденном мембраной участке. Приведены основные положения математического моделирования перемещения мембрани в электрическом поле поверхностных акустических волн под влиянием измеряемого давления и результаты экспериментальных исследований измерительных преобразователей. Продемонстрированы теоретические и экспериментальные зависимости времени задержки от расстояния между мембраной и звукопроводом, и установлены величины погрешностей между приведенными зависимостями и причины их возникновения. Сделаны выводы о преимуществах представленных измерителей давления на основе возмущения электрического поля поверхностных акустических волн.

**Ключевые слова:** поверхностные акустические волны, измерительный преобразователь, давление, беспроводные пассивные сенсоры, время задержки.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Останні 40 років поверхневі акустичні хвилі (ПАХ)-прилади широко використовуються в машинобудуванні, авіаційній та космічній техніці, системах зв'язку та моніторингу оточуючого середовища [1].

Сьогодні на основі досягнень акустоелектроніки сформувався новий напрямок у вимірюванні фізичних величин – сенсори на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ). Застосування ПАХ обумовлене можливістю отримання хвильових процесів з малою довжиною хвилі, що забезпечує при використанні частотного або фазового методів вимірювання велику чутливість і точність перетворення інформації в широкому динамічному діапазоні [2].

Мета роботи – створення перетворювачів тиску на основі збурення електричного поля поверхневих акустичних хвиль.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Сенсори на поверхневих акустичних хвилях належать до акустоелектронних компонентів, що є тонкою від-

полірованою п'єзоелектричною пластиною, на яку нанесено систему зустрічно-штирових перетворювачів (ЗШП). Зазвичай, в первинних вимірювальних перетворювачах на ПАХ використовується чутливість спеціальних зрізів п'єзоелектричних матеріалів до дестабілізуючих факторів: температури, механічних напружень, деформації тощо [2]. Недоліком пристроїв даного типу є вузький діапазон вимірюваного тиску та низька чутливість, зумовлені обмеженою довжиною п'єзоелектричного звукопроводу, що пов'язано з необхідністю використання більшої кількості відбивачів для кодування вимірювальної інформації, а також низька надійність внаслідок можливого руйнування мембрани через крихкість п'єзоелектричного звукопроводу при перевантаженнях і складність виготовлення мембрани [4].

Зазначені недоліки відсутні у сенсорах на ПАХ другого типу (рис. 1), які містять п'єзоелектричний звукопровід, на поверхні якого розташовані поглиначі поверхневих акустичних хвиль, зустрічно-

штирові перетворювачі ПАХ, з'єднані з підсилювачем електричних коливань.

Усі елементи утворюють автогенератор із частотозадаючим елементом, виконаним у вигляді п'єзоелектричного звукопроводу із зустрічноштировими перетворювачами, і розташовані у корпусі, який герметично закритий мембраною, котра виконана з пружного матеріалу (наприклад, бронза, сталь тощо) та розташована над поверхнею п'єзоелектричного звукопроводу на відстані, сумірній з довжиною поверхневої акустичної хвилі. Таке розташування мембрани обумовлено тим, що для ефективного впливу її на параметри хвилі, яка поширюється по звукопроводу, необхідно забезпечити переміщення мембрани в електричному полі ПАХ, електричний потенціал якого зменшується при віддаленні від поверхні звукопроводу за експоненціальним законом [4].

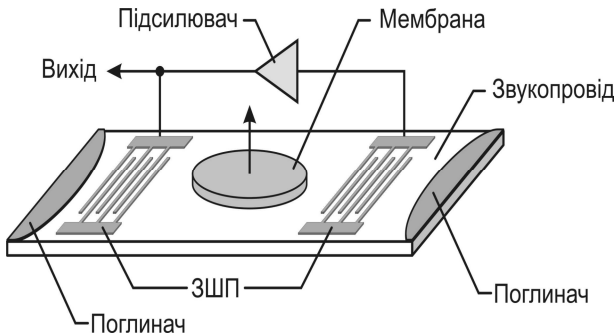


Рисунок 1 – Вимірювальний перетворювач на ПАХ для вимірювання тиску

Зазначена методика може бути використана для побудови безпроводних вимірювальних перетворювачів (рис. 2). Безпроводний сенсор на ПАХ одно-вхідною лінією затримки на відбивачах, що містить п'єзоелектричний звукопровід 1. На поверхні звукопроводу сформовано вхідний/вихідний перетворювач 2 і дві групи відбивних електродів: перша та друга група відбивачів 3 та 4, відповідно. Для зменшення рівня помилкових сигналів і забезпечення режиму біжучої хвилі на торцях звукопроводу нанесено поглиначі 5 та 6. У проміжку між відбивачами, в електричному полі ПАХ, переміщується мембрана (зонд) 7. Вхідний/вихідний перетворювач з'єднано з антеною 8, що через радіоканал забезпечує зв'язок сенсору з пристроєм опитування та обробки інформації [4].

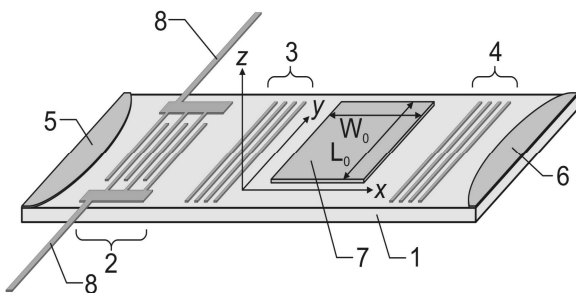


Рисунок 2 – Безпроводний сенсор на ПАХ з прямокутним механічним зондом

Мембрана розміщена в електричному полі ПАХ, потенціал якого змінюється за експонентою при віддаленні від поверхні п'єзоелектричного звукопроводу [2]  $\varphi = \varphi_0 e^{-2\pi z / \lambda_0}$ , де  $\varphi_0$  – потенціал електричного поля на поверхні звукопроводу;  $\lambda_0 = V_0 / f$ ;  $V_0$  та  $\lambda_0$  – фазова швидкість та довжина ПАХ на вільній поверхні звукопроводу;  $f$  – частота ПАХ,  $z$  – відстань від мембрани до п'єзоелектричної поверхні.

Форма та матеріал мембрани, також, впливають на швидкість поширення ПАХ на поверхні звукопроводу.

При розробці моделі вимірювальних перетворювачів прийняті наступні допущення: поверхня механічного зонда паралельна поверхні п'єзоелектричного звукопроводу; розміщення зонда в електричному полі хвилі призводить до дисперсії фазової швидкості ПАХ у частині звукопроводу під зондом, і не впливає на поле механічних напружень у п'єзоелектрику; за час проходження імпульсу ПАХ між відбивачами значення вимірюваного тиску та положення мембрани залишаються незмінними.

При часовому методі вимірювання, затримка між опорним і контрольним імпульсами радіовідгуку з урахуванням дисперсії фазової швидкості хвилі визначається співвідношенням:

$$\Delta t_{delay} \approx 2 \left( n + \frac{\theta}{2\pi} \right) \frac{\lambda}{V_0}, \quad (1)$$

де  $n$  – ціле число, що визначає моду коливання, зазвичай  $n = 150 \dots 250$ ;  $\theta$  – додатковий фазовий набіг ПАХ викликаний дисперсією фазової швидкості.

У загальному випадку контрольний сигнал на вхідному/вихідному ЗШП можна представити у наступному вигляді:

$$U_{mon} = D U_{0mon}, \quad (2)$$

де  $U_{0mon}$  – контрольний сигнал знятий з вхідного/вихідного ЗШП при відсутності дисперсії:

$$U_{0mon} = H U_{in}(t - t_{0L2}) e^{-\alpha(f)t}, \quad (3)$$

де  $H$  – комплексний коефіцієнт перевідбиття, що враховує багатократне проходження ПАХ через систему відбивачів;  $U_{in}(t)$  – вхідний сигнал радіозапиту;  $t$  – поточний час;  $t_{0L2}$  – час затримки ЛЗ утвореної, вхідним/вихідним перетворювачем та другою групою відбивачів;  $\alpha(f)$  – коефіцієнт поглинання матеріалу звукопроводу;  $D$  – комплексний коефіцієнт дисперсії, аналітичний вираз якого визначається формою та матеріалом зонда, а також його розміщенням та напрямом переміщення вздовж вісей  $y$  та  $z$ , тобто

$$D = \frac{L_0 - y}{L_0} + \frac{1}{L_0} \int_0^y e^{-j \frac{2\pi}{\lambda_0} u(z) W(y)} dy, \quad (4)$$

де  $L_0$  – ширина акустичного потоку;  $W(y)$  – ширина зонда;  $v(z) = (V_0 - V(z))/V_0$ ;  $V(z)$  – значення фазової швидкості ПАХ під зондом.

Аналіз співвідношень (1)–(4) показує можливість створення двох типів безпровідних сенсорів тиску на основі використання дисперсії фазової швидкості, що пояснюється можливістю переміщення зонду вздовж вісей  $y$  та  $z$ .

Для випадку переміщення вздовж вісі  $z$  зонда у вигляді прямокутної пластини (рис. 2), розміщеної паралельно п'єзоелектричній поверхні та перекриваючий акустичний потік, слідує, що  $W(y) = W_0$  та  $y = L_0$ .

Тоді, використовуючи співвідношення (4), отримуємо вираз для коефіцієнта дисперсії:

$$D_z = e^{-j\theta_z}, \quad (5)$$

де  $\theta_z$  – додатковий фазовий зсув сигналу на виході ЛЗ на ПАХ, що виникає внаслідок дисперсії фазової швидкості при розміщенні зонда на відстані  $z$  від поверхні звукопроводу [3]:

$$\theta_z = 2\pi N \int_z^\infty S_v dz = 2\pi N \delta, \quad (6)$$

де  $S_v = \frac{1}{V_0} \frac{\partial V}{\partial z}$  – крутизна дисперсійної характеристики;  $N = W_0 / \lambda_0$  – число довжин хвиль на збуреному проміжку звукопроводу;  $\delta = \int_z^\infty S_v dz$  – відносна зміна фазової швидкості ПАХ при розміщенні зонду на відстані  $z$  від поверхні звукопроводу.

Використовуючи співвідношення (1) та (6), час затримки контрольного сигналу відносно опорного, можна привести у вигляді [5]

$$\Delta t_{delay} = 2N \frac{\lambda}{V_0} \left( 1 + \int_{z_1}^{z_2} S_v dz \right) = \frac{2W}{V_0} \left( 1 + \int_{z_1}^{z_2} S_v dz \right). \quad (7)$$

При великих значеннях  $N$ , характерних для ПАХ, коефіцієнт перетворення може бути досить великим навіть при малих значеннях крутизни дисперсійної характеристики  $S_v$ , значення якої визначається як конструктивними, так і фізичними параметрами зонда та звукопроводу, в якості якого доці-

льно використовувати сильні п'єзоелектрики – ніобат літію  $\text{LiNbO}_3$ , германат вісмуту  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ , оксид цинку  $\text{ZnO}$ , тощо.

Прогинання мембрани з жорстким центром, залежно від тиску визначається співвідношенням:

$$x = KP; \quad (8)$$

$$K = (AR^4)/(Eh^3); \quad (9)$$

$$A = \frac{3 \cdot (1 - \mu^2)}{16} \cdot \frac{c^4 - 1 - 4c^2 \ln c}{c^4}, \quad (10)$$

де  $c = R/r_0$ ,  $R$  і  $r_0$  – робочий радіус мембрани та радіус жорсткого центру;  $\mu$  та  $E$  – коефіцієнт Пуассона та модуль пружності матеріалу мембрани;  $P$  – перепад тиску;  $h$  – товщина мембрани (для малих прогинань  $z/h \gg 1$ ).

Тоді співвідношення (7) можна подати у вигляді:

$$\Delta t_{delay} = 2 \frac{W}{V_0} \left( 1 + \int_{P_1}^{P_2} S_p dP \right), \quad (11)$$

$$\text{де } S_p = \frac{1}{v} \frac{dv}{dP} = KS_v; \quad P_1 = z_1 / K; \quad P_2 = z_2 / K.$$

Для дослідження можливості застосування чутливості поверхневих акустичних хвиль до переміщення механічного зонду в електричному полі хвилі для створення безпровідних сенсорів було проведено фізичний експеримент.

Описана вище теорія була використана для проектування сенсору тиску на ПАХ з рухомим механічним зондом. Для реалізації лінії затримки була вибрана «лінійна» топологія ЛЗ із двома зустрічноштировими перетворювачами (рис. 3). Як п'єзоелектричний матеріал звукопроводу був використаний ніобат літію  $YZ$  – зрізу, що забезпечує мінімальні привнесені втрати та має найбільший коефіцієнт електромеханічного зв'язку, а, отже, найбільшу чутливість швидкості поширення ПАХ до умов на поверхні звукопроводу. Фізичні розміри п'єзоелектричної пластини  $52 \times 10$  мм.

Перетворювачі лінії затримки склалися із 40 електродів з апертурою  $30\lambda_0$ , періодом слідування електродів  $p=50$  мкм. Центральна робоча частота лінії затримки складає  $f_0=69,76$  МГц а довжина хвилі на незбуреній поверхні звукопроводу  $\lambda_0=50$  мкм, ширина акустичного потоку 2 мм. Відстань між перетворювачами складає  $L_0=30$  мм. Час затримки при відсутності зонду в полі ПАХ становить  $t_{delay}=8,6$  мкс. Над поверхнею звукопроводу перемішувалися алюмінієва пластинка. Ширина пластини  $W_0=23$  мм, довжина  $D=60$  мм. Пластину можна переміщувати над поверхнею звукопроводу з кроком 5 мкм (рис. 3).

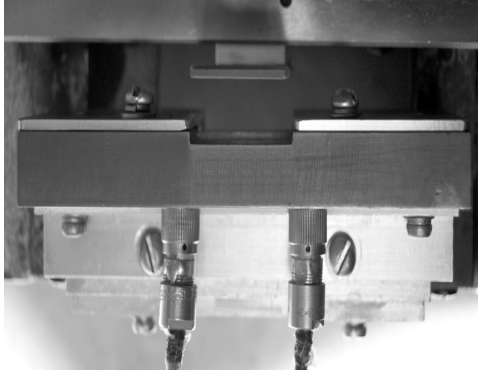


Рисунок 3 – Конструкція ділянки звукопроводу між відбивними структурами

На рис. 4 приведена теоретична та експериментальна залежності часу затримки від відстані між поверхнею звукопроводу  $\text{LiNbO}_3$  та прямокутною пластиною. Теоретична крива розрахована за (11). Приведена похибка обчислювалася за формулою:

$$\delta_{\Delta\tau} = \left| \frac{t_{\text{exp}} - t_{\text{model}}}{\Delta\tau} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{\Delta t}{\Delta\tau} \right| \cdot 100\% \quad (12)$$

де  $t_{\text{exp}}$ ,  $t_{\text{model}}$  – вимірний та розрахований час затримки,  $\Delta\tau$  – різниця в часі затримки для металізованого та неметалізованого звукопроводів.

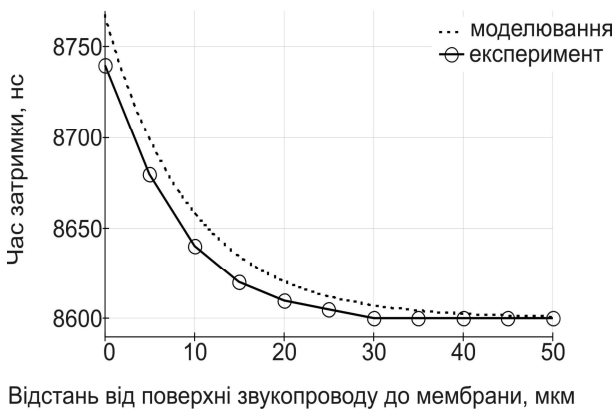


Рисунок 4 – Експериментальна та розрахована залежності часу затримки від відстані між поверхнею звукопроводу та пластиною

При  $z = 0$  приведена похибка складала 16 % – розбіжність пояснюється тим, що в експерименті пластина притискала до поверхні звукопроводу, а в моделі під нульовим зазором розуміється напилена на поверхню звукопроводу металева плівка.

Розбіжність теоретичної та експериментальної залежностей при малих величинах зазору  $0 < z/\lambda \leq 0,2$  складає 12 %, що пояснюється непаралельністю пластины поверхні звукопроводу при фізичному експерименті, хоча дане припущення виконано для моделі.

При цьому, цей діапазон характеризується максимальною чутливістю фазової швидкості ПАХ до переміщення пластины, середня кругизна характеристики становить  $S_i^z = -10 \text{ ns/um}$ . При подальшому збільшенні зазору  $0,2 < z/\lambda \leq 0,6$  максимальна приведена похибка не перевищує 9 %. При цьому, середня кругизна характеристики на цьому проміжку складає  $S_i^z = -2 \text{ ns/um}$ .

При зазорі  $z/\lambda > 0,6$  вплив пластины на час затримки не спостерігався, що підтверджується результатами моделювання. Приведена похибка на цьому проміжку не перевищує 2 %.

**ВИСНОВКИ.** Представлений вимірювальний перетворювач тиску дозволяє розширити діапазон вимірюваного тиску та підвищити чутливість, оскільки значно збільшується довжина акустичного каналу, на який здійснюється вплив вимірюваного тиску. Окрім цього, перетворювач дозволяє підвищити надійність, оскільки мембрана може бути виготовлена з міцного матеріалу, а більш висока технологічність виготовлення призведе до більш високого відсотку виходу придатних виробів при масовому виробництві.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. M. Zhovnir, M. Chernyak, D. Chernenko, and L. Sheremet "Measuring transducers of physical quantities based on surface acoustic waves (SAW)," Proceedings of the XXXI International Scientific Conference ELNANO 2011, Kyiv, April 2011, p. 172.
2. D. Chernenko, M. Zhovnir, O. Oliinyk, and B. Tsyganok, "Wireless Passive Sensor Using Frequency Coded SAW Structures," 35th International Spring Seminar on Electronics Technology „Power Electronics” (ISSE 2012), May 2012, pp. 424-428.
3. A. Pohl, "A Review of wireless SAW Sensors," IEEE Transactions on UFFC, Vol. 47, No. 2, March 2000, pp. 317-332.
4. Пат. № UA55497U Україна, МПК (2009) G01L 11/00. Пристрій на поверхневих акустичних хвилях для вимірювання тиску / Жовнір М.Ф., Черняк М.Г., Черненко Д.В., Шеремет Л.М.; заявник НТУУ «КПІ»; № u201008841; заявл. 15.07.2010; опубл. 10.12.2010, бюл. № 23.
5. Пат. № UA77113U Україна, МПК (2013.1) H03H 9/00, G01L 7/08 (2006.1), H04Q 5/22 (2006.1). Сенсор на поверхневих акустичних хвилях для вимірювання тиску / Черненко Д.В., Жовнір М.Ф.; заявник Черненко Д.В., Жовнір М.Ф.; № U201209622; заявл. 08.08.2012; опубл. 25.01.2013, бюл. № 2.

INSTRUMENT PRESSURE TRANSDUCERS ON THE BASE OF THE EXCITATION  
OF SURFACE ACOUSTIC WAVES ELECTRIC FIELD**D. Chernenko, M. Zhovnir, O. Kuzmenko**

National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute»

prosp. Peremogy, 37, Kiev, 03056, Ukraine. E-mail: de3223@ukr.net; kuzmenko-oksana@i.ua

The self-maintained model with piezoelectric acoustic line used as a frequency setting element and placed in a membrane covered housing is proposed. This model allows increasing responsiveness of pressure transducers and extending the range of measurements. A new method of wireless passive SAW sensors design is described. This method conduces to length enlargement of the line area, which is overlaped with a sound probe, and therefore number of wavelengths at the excited area grows. The main principles for mathematical modelling of membrane displacement in SAW electric field under the pressure measured are shown. The research results corresponding are presented in the article. The theoretical and experimental dependencies of delay time on the distance between the acoustic line and membrane are presented. The magnitude of errors of the dependencies presented and the backgrounds for these errors are demonstrated. The judgements on the advantages of the presented transducers are made.

**Key words:** surface acoustic waves, instrument pressure transducer, pressure, wireless passive sensors, delay time.

## REFERENCES

1. A. Pohl, A. Review of wireless SAW Sensors, *IEEE Transactions on UFFC*, Vol. 47, No. 2, March 2000, PP. 317–332.

2. Pat. № UA55497U Ukraine, MPK (2009) G01L 11/00. Device on surface acoustic waves for pressure measurement / Zhovnir M.F., Cherniak M.G., Chernenko D.V., Sheremet L.M declarant NTUU «KPI»; № u201008841; declared 15.07.2010; published 10.12.2010, bull. № 23.

3. M. Zhovnir, M. Chernyak, D. Chernenko, and L. Sheremet. Measuring transducers of physical quantities based on surface acoustic waves (SAW), *Proceedings of the XXXI International Scientific Conference ELNANO 2011*, Kyiv, April 2011, p. 172.

4. D. Chernenko, M. Zhovnir, O. Oliinyk, and B Tsyganok, Wireless Passive Sensor Using Frequency Coded SAW Structures, *35th International Spring Seminar on Electronics Technology «Power Electronics» (ISSE 2012)*, May 2012, PP. 424–428.

5. Pat. № UA77113U Ukraine MPK (2013.1) H03H 9/00, G01L 7/08 (2006.1), H04Q 5/22 (2006.1). Sensor on surface acoustic waves for pressure measurement / Chernenko D.V., Zhovnir M.F; declarant Chernenko D.V., Zhovnir M.F.; № U201209622; declared. 08.08.2012; published 25.01.2013, bull. № 2.

Стаття надійшла 15.01.2013.