

А.О. Дружинін¹, І.Т. Когут², В.І. Голота², С.І. Нічкало¹,
Ю.М. Ховерко¹, Т. Г. Бенько²

Розроблення схем інвертора з подвійним керуванням підканальними областями інтегрального КМОН сенсорного елемента

¹Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна, druzh@polynet.lviv.ua

²Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, Івано-Франківськ, Україна, igorkohut2202@gmail.com

Досліджено використання інтегрального сенсорного елемента у складі інвертора, який перетворює опір чутливого елемента у рівень вихідного імпульсного сигналу. Промодельовано в програмі LTSpice схеми інвертора з різними варіантами керування підканальними областями МОН-транзисторів. За результати моделювання побудовано графіки залежностей амплітуди вихідного сигналу від опору чутливого елемента, чутливості сенсора, показано форми вихідних сигналів.

Ключові слова: резистивний сенсор, інвертор, МОН-транзистор, підканальна область, сигнал, амплітуда.

Подано до редакції 6.10.2021; подано до друку 5.11.2021.

Вступ

Резистивні сенсори використовуються для вимірювання таких фізичних величин як тиск, температура, вологість, деформації, освітленість, магнітне поле, концентрація газів, електрохімічної реакції тощо [1-6]. Резистивні сенсори мають перевагу на емісійних та індуктивних сенсорах у простоті, точності, чутливості та можливості їх твердотільної реалізації і інтеграції в мікросистеми-на-кристали сенсорного типу [7]. Інформаційний сигнал резистивного сенсора обробляється в аналогових або цифрових електричних схемах. В аналогових схемах використовуються мостові схеми, які під'єднуються до аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) [8], інтерфейсних схем [9] або мікроконтролерів [10]. В цифрових схемах використовуються різні техніки оцифрування інформаційного сигналу [11, 12].

У даній статті пропонується техніка оцифрування інформаційного сигналу з використанням КМОН інвертора в імпульсний

сигнал, амплітуда якого залежить від опору чутливого елемента. Особливістю пропонованого інвертора на КМОН-транзисторах є введення подвійного керування пороговими напругами p - і n -канальних МОН-транзисторів як зі сторони затвору, так і зі сторони підкладки.

I. Інтегральний сенсорний елемент з керованою підканальною областю p -МОН-транзистора

Запропонована електрична схема інтегрального сенсорного елемента з подвійним керуванням підканальною областю p -МОН-транзистора показана на рис. 1.

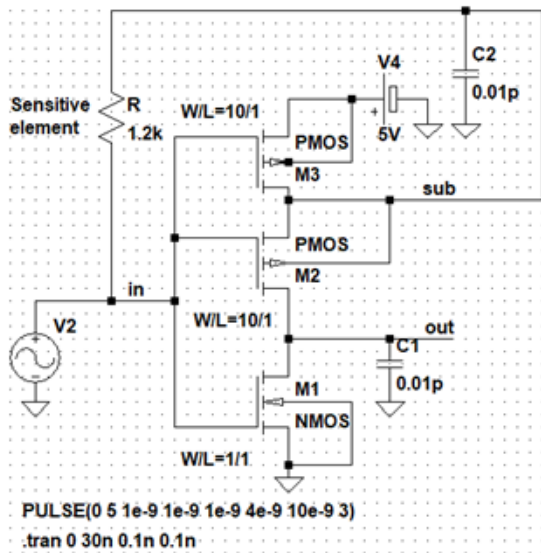


Рис. 1. Схема електрична інтегрального сенсорного елемента з подвійним керуванням підканальною областю *p*-МОН-транзистора

Сенсорний елемент містить чутливий елемент резистивного типу **R**, модифікований КМОН-інвертор на транзисторах **M1–M3**, інтегральні ємнісні елементи **C1, C2**. Особливістю КМОН-інвертора є те, що додатково введено *p*-канальний МОН-транзистор **M2**, до підкладки якого подається вимірюваний сигнал через інтегруючу ланку **R–C2**.

Чутливим елементом інтегруючої ланки є резистор **R**, невеликі зміни якого суттєво впливають на порогову напругу *p*-канального МОН-транзистора **M2**, який визначає амплітуду імпульсного сигналу **OUT** на виході інвертора.

Електричну схему промодельовано в програмі LTSpiceXVII. Отримані залежності вихідної напруги від опору чутливого елемента **R**, підключеного до підканальної області *p*-МОН-транзистора для двох варіантів розмірів транзисторів **M3, M2, M1** (варіант *a*: $W/L=10/1, 10/1, 1/1$ мкм; варіант *b*: $W/L=3/1, 3/1, 1/1$ мкм) показано на рис. 2.

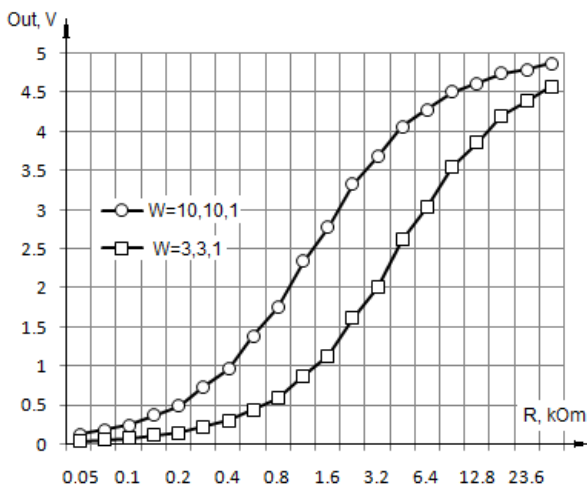


Рис. 2. Залежність вихідної напруги від опору чутливого елемента, підключеного до підканальної області *p*-МОН-транзистора.

Як видно з рис. 2, при збільшенні опору чутливого елемента **R** амплітуда імпульсів вихідного сигналу збільшується. Для варіанту *a*, при зміні опору чутливого елемента в діапазоні $0,6 \div 3,2$ кОм, а для варіанту *b* – в діапазоні $1,2 \div 9,6$ кОм, криві залежностей є близькими до лінійних. Чутливість сенсорів визначається як відношення зміни вихідного сигналу до одиничної зміни вхідної величини. Чутливість сенсорного елемента з керованою підканальною областю *p*-МОН-транзистора показано на рис. 3.

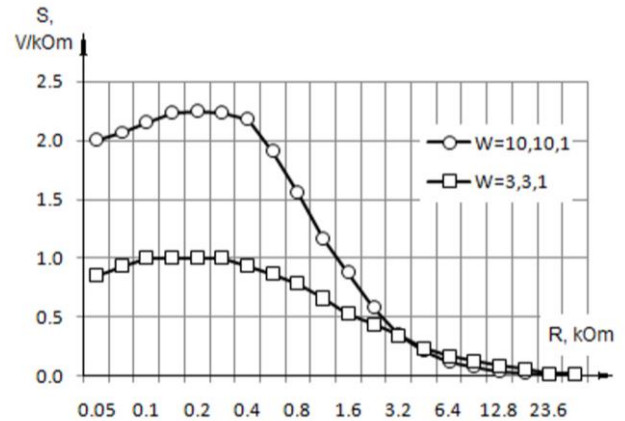


Рис. 3. Чутливість сенсора з керованою підканальною областю *p*-МОН-транзистора.

Як видно з рис. 3, сенсор має найбільшу чутливість при змінах опору резистивного чутливого елемента в діапазоні $0,02 \div 9,6$ кОм.

На рис. 4 показано форми вихідних імпульсних сигналів для значень опорів чутливого елемента 0,02, 1,2 і 9,6 кОм при напрузі вхідного сигналу 5 В.

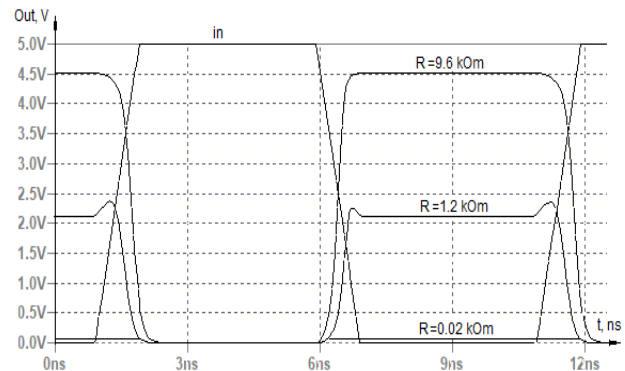
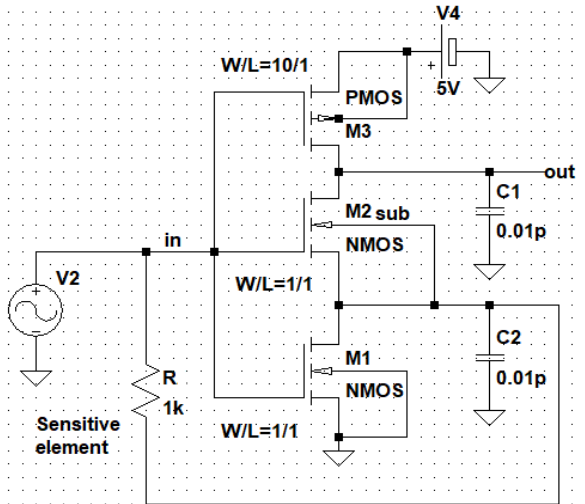


Рис. 4. Форми вихідних імпульсів для різних значень опору чутливого елемента (для схеми на рис. 1, $W/L = 10/1, 10/1 1/1$ мкм).

Особливістю схеми на рис. 2 є те, що при збільшенні опору чутливого елемента збільшуються амплітуди вихідних сигналів, що співпадають з низькими рівнями вхідного сигналу. Такі зміни є достатніми і такими, що добре відрізняються та придатними для оброблення в наступних каскадах мікросистем-на-кристалі.

II. Інтегральний сенсорний елемент з керуваною підканальною областю *n*-МОН-транзистора

Електричну схему інтегрального сенсорного елемента з керуваною підканальною областю *n*-МОН-транзистора показано на рис. 5. У цій схемі чутливий резистивний елемент **R** підключений до підканальної області *n*-МОН-транзистора **M2**.



PULSE(0 5 1e-9 1e-9 1e-9 4e-9 10e-9 3)
 .tran 0 30n 0.1n 0.1n

Рис. 5. Схема електрична інтегрального сенсорного елемента з керуваною підканальною областю *n*-МОН-транзистора.

Залежності вихідної напруги від опору чутливого елемента, підключеного до підканальної області *n*-МОН-транзистора для двох варіантів розмірів транзисторів **M3**, **M2**, **M1** (варіант *a*: $W/L=10/1$, $1/1$, $1/1$ мкм; варіант *б*: $W/L=10/1$, $3/1$, $3/1$ мкм) показано на рис. 6.

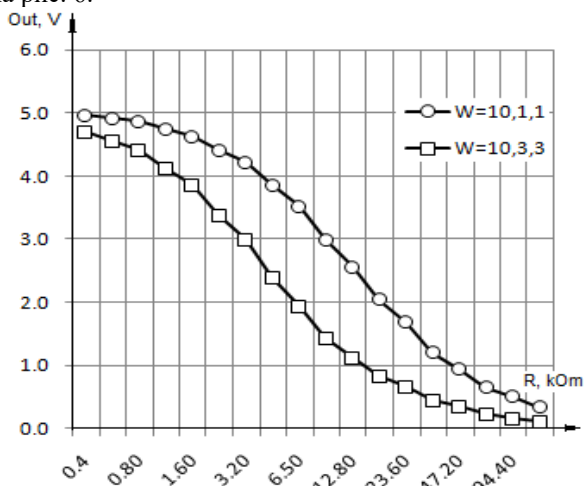


Рис. 6. Залежність вихідної напруги від опору чутливого елемента, підключеного до підканальної області *n*-МОН-транзистора.

Як видно з рис. 6, при збільшенні опору чутливого елемента **R** амплітуда імпульсів вихідного сигналу зменшується. Для варіанту *a*, при зміні опору

чутливого елемента в межах $4,8 \div 35,4$ кОм, та для варіанту *б* – в межах $2,4 \div 9,6$ кОм, криві залежностей є близькими до лінійних.

Чутливість сенсорного елемента з керуваною підканальною областю *n*-МОН-транзистора показано на рис. 7.

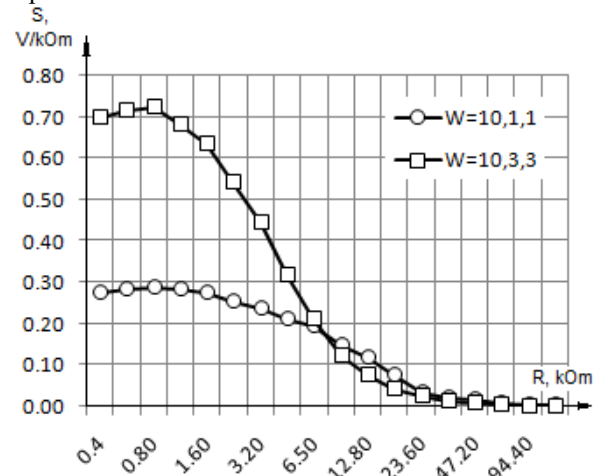


Рис. 7. Чутливість сенсорного елемента з керуваною під канальною областю *n*-МОН-транзистора.

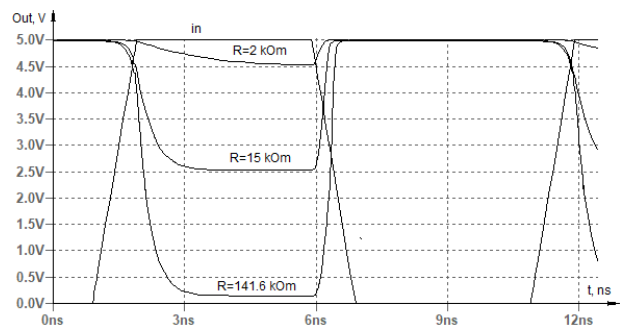


Рис. 8. Форми вихідних імпульсів для різних значень опору чутливого елемента (для схеми на рис. 5, $W/L = 10/1$, $1/1$, $1/1$ мкм).

На рис. 8 показано форми вихідних імпульсних сигналів для значень опорів чутливого елемента 2, 15 і 9,6 кОм при напрузі вхідного сигналу 5 В. Особливістю схеми на рис. 5 є те, що при збільшенні опору чутливого елемента зменшуються амплітуди вихідних сигналів, що співпадають з високими рівнями вхідного сигналу. Ці зміни є достатніми і придатними для оброблення в наступних каскадах мікросистем-на-кристалі.

III. Інтегральний сенсорний елемент з керуваними підканальними областями *p*-МОН- і *n*-МОН-транзисторів

У схемах на рис.1 і рис.5 при зміні опору чутливого елемента **R** амплітуди вихідних сигналів змінюються при низьких і високих рівнях вхідного сигналу. Схеми на рис. 1 і рис. 5 можна об'єднати в одну, в якій при зміні опору сенсорного елемента буде змінюватися амплітуда вихідного сигналу для низьких і високих рівнів вхідного сигналу. Для цього

сенсорний елемент під'єднують до підканальних областей p -МОН і n -МОН-транзисторів, як показано на рис. 9. Для симетричної зміни амплітуди вихідного сигналу для низьких і високих рівнів вхідного сигналу, розміри МОН-транзисторів **M1-M4** прийняті однаковими $W/L=10/1$ мкм.

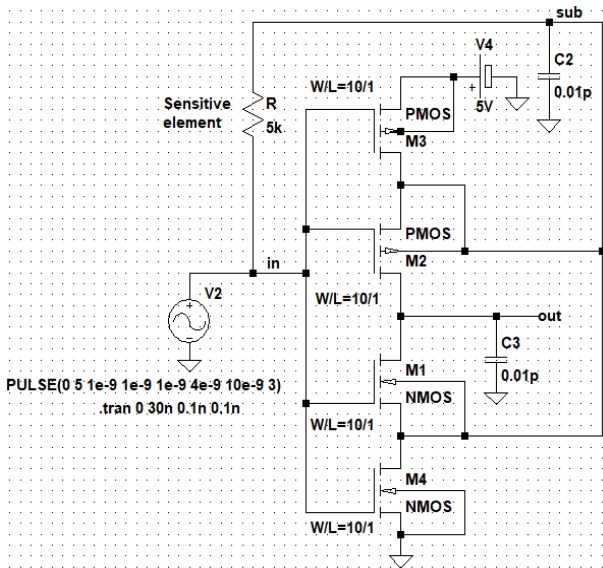


Рис. 9. Схема електрична інтегрального сенсорного елемента з керуваними підканальними областями n -МОН- і p -МОН-транзисторів.

Залежності вихідної напруги від опору чутливого елемента R , під'єданого до підканальних областей p -МОН- і n -МОН-транзисторів з однаковими розмірами транзисторів **M1-M4** (варіанта: $W/L=10/1$ мкм; варіантб: $W/L=3/1$ мкм) показано на рис. 10.

Як видно рис. 10, при збільшенні опору чутливого елемента R амплітуда імпульсів вихідного сигналу збільшується для низьких рівнів і зменшується для високих рівнів вхідного сигналу.

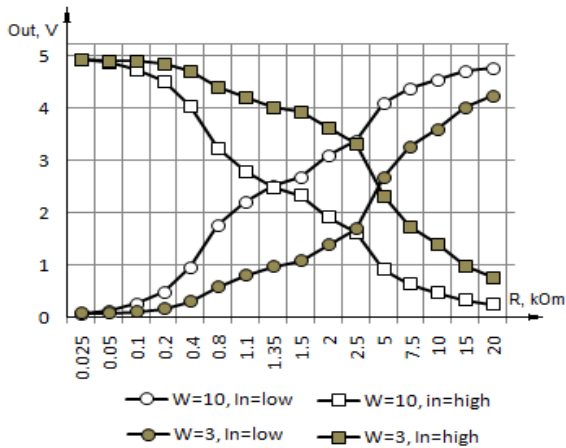


Рис. 10. Залежності вихідної напруги від опору чутливого елемента, підключеного до підканальних областей p -МОН- і n -МОН-транзистора.

Для варіанту *a*, при значенні опору чутливого елемента $R=1,35$ кОм, для варіанту *б* – при $R = 4,5$ кОм, імпульси вихідного сигналу вироджуються у рівень постійної напруги 2,5 В, що дорівнює половині напруги вхідного сигналу.

Чутливість резистивного сенсорного елемента з

керуваною підканальною областю p -МОН- і n -МОН-транзистора показано на рис. 11.

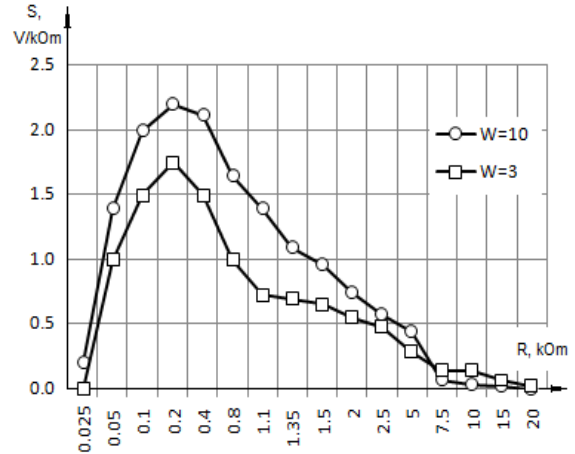


Рис. 11. Чутливість резистивного сенсорного елемента з керуваною підканальною областю p -МОН- і n -МОН-транзисторів.

На рис. 12 для схеми з рис.9 показано форми вихідних імпульсних сигналів для значень опорів чутливого елемента 0,4, 1,35 і 10 кОм при напрузі вхідного сигналу 5 В. Особливістю схеми на рис. 9 є те, що при збільшенні опору чутливого елемента амплітуда імпульсів вихідного сигналу збільшується для низьких рівнів і зменшується для високих рівнів вхідного сигналу.

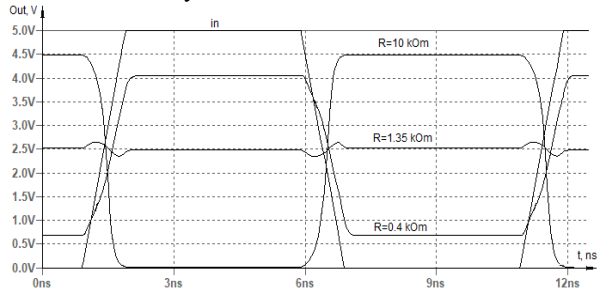


Рис. 12. Форми вихідних імпульсів для різних значень опору чутливого елемента (для схеми на рис. 9, $W/L = 10/1$ мкм).

Висновки

Досліджено інтегральний сенсорний елемент у складі інвертора на основі комплементарних МОН-транзисторів з подвійним керуванням пороговою напругою зі сторони затвору і підкладки, який перетворює опір чутливого елемента у рівень вихідного імпульсного сигналу. Запропоновано три варіанти підключення чутливого резистивного елемента до підканальних областей МОН-транзисторів. Показано графіки залежностей вихідної напруги від опору чутливого елемента, чутливості сенсорного елемента, форми вихідних імпульсів.

При керуванні підканальною областю p -МОН-транзистора амплітуда вихідних імпульсів, для низького рівня вхідного сигналу, збільшується від 0 до 5 В при збільшенні опору чутливого резистивного елемента від 0,05 до 23,6 кОм. Чутливість сенсорного

елемента є більшою в діапазоні $0,05 \div 3,2$ кОм і має максимальне значення $2,3$ В/кОм.

При керуванні підканалною областю n -МОН-транзистора амплітуда вихідних імпульсів, для високого рівня вхідного сигналу, зменшується від 5 до 0 В при збільшенні опору чутливого резистивного елемента в діапазоні від $0,4$ до $94,4$ кОм. Чутливість сенсорного елемента є більшою в діапазоні $0,4 \div 12,8$ кОм і сягає максимального значення $0,72$ В/кОм.

При керуванні під каналною областю p -МОН- і n -МОН-транзисторів амплітуда вихідних імпульсів, для низького рівня вхідного сигналу, збільшується від 0 до 5 В, для високого рівня вхідного сигналу, зменшується від 5 до 0 В при збільшенні опору чутливого резистивного елемента від $0,025$ до 20 кОм. Чутливість сенсорного елемента є більшою в діапазоні $0,05 \div 5$ кОм і має максимальне значення $2,2$ В/кОм.

Запропонований інтегральний сенсорний елемент на комплементарних МОН-транзисторах з подвійним керуванням може використовуватися як функціональний елемент мікросистем-на-кристалі.

Дружинін А.О. – д.т.н., професор, завідувач кафедри напівпровідникової електроніки;

Когут І.Т. – д.т.н., професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки;

Голота В.І. – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки;

Нічкало С.І. – к.т.н., доцент, доцент кафедри напівпровідникової електроніки;

ХOVERKO Ю.М. – д.т.н., професор, професор кафедри напівпровідникової електроніки;

Бенько Т.Г. – асистент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки.

- [1] R. Ghosh, J.W. Gardner, P.K. Guha, IEEE Transactions on Electron Devices 66(8), 3254 (2019); <https://doi.org/10.1109/TED.2019.2924112>.
- [2] A.S. Fiorillo, C.D. Critello, S.A. Pullano, Sensors and Actuators A: Physical 281, 156 (2018); <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.07.006>.
- [3] K. Rohrmann, M. Sandner, P. Meier, M. Prochaska, 2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference: Discovering New Horizons in Instrumentation and Measurement (IEEE, Houston, 2018), p. 1; <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2018.8409840>.
- [4] A. Druzhinin, I. Ostrovskii, Yu. Khoverko, K. Rogacki, I. Kogut, V. Golota, Journal of Materials Science: Materials in Electronics 29(10), 8364 (2018); <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8847-0>.
- [5] J. Li, J.P. Longtin, S. Tankiewicz, A. Gouldstone, S. Sampath, Sensors and Actuators A: Physical 133(1), 1 (2007); <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.04.008>.
- [6] A. Druzhinin, E. Lavitska, I. Maryamova, V. Voronin, Sensors and Actuators A: Physical 61(1-3), 400 (1997); [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(97\)80296-8](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(97)80296-8).
- [7] I.T. Kogut, A.A. Druzhinin, V.I. Holota, Advanced Materials Research 276, 137 (2011); <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.276.137>.
- [8] K. Han, H. Kim, J. Kim, D. You, H. Heo et al., Applied Sciences 10(1), 399 (2020); <https://doi.org/10.3390/app10010399>.
- [9] S.Y. Yurish, Sensors and Transducers 10, 46 (2011); https://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/february_2011/P_SI_132.pdf.
- [10] O. López-Lapeña, E. Serrano-Finetti, Oscar Casas, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 65(1), 222 (2016); <https://doi.org/10.1109/TIM.2015.2479105>.
- [11] I. Kogut, A. Druzhinin, V. Holota, Y. Khoverko, T. Benko, S. Nichkalo, 2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems, CADSM 2021 (IEEE, Lviv, 2021), p. 15; <https://doi.org/10.1109/CADSM52681.2021.9385245>.
- [12] K. Elangovan, C. Sreekantan Anoop, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 69(9), 6070 (2020); <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.2972048>.

A.A. Druzhinin¹, I.T. Kogut², V.I. Golota², S.I. Nichkalo¹, Y.M. Khoverko¹, T.G. Benko²

Development of Inverter Circuits with Dual Control Subchannel Areas of Integral CMOS Sensor Element

¹Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, druzh@polynet.lviv.ua

²Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine, igorkohut202@gmail.com

The use of an integrated sensor element as an addition of inverter, which converts the resistance of a sensitive element into the level of the output pulse signal, is investigated. Inverter circuits with different control options for sub-channel areas of MOS transistors are modeled in the LTSpice program. Based on the simulation results, dependencies graphs of the output signal amplitude on the resistance of a sensitive element and sensor's sensitivity are drawn, and the shapes of the output signals are shown.

Key words : resistive sensor, inverter, MOS transistor, subchannel area, signal, amplitude.