

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-24>

УДК 681.5, 004.9

Оленич Ігор Богданович, д.ф.-м.н., професор

<https://orcid.org/0000-0002-6642-0222>

Яремик Роман Ярославович, с.н.с.

Парандій Петро Петрович, зав. лаб.

<https://orcid.org/0000-0002-5189-4142>

Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів, Україна

МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ СЕНСОРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОЧУТЛИВИХ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ НА ОСНОВІ ПОРУВАТОГО КРЕМНІЮ ТА ПЛІВКИ ВІДНОВЛЕНОГО ОКСИДУ ГРАФЕНУ

Оленич І. Б., Яремик Р. Я., Парандій П. П. Мікропроцесорна система вимірювання сенсорних характеристик газочутливих польових транзисторів на основі поруватого кремнію та плівки відновленого оксиду графену. Прикладні аспекти застосування нових наноструктурованих матеріалів у сенсорній електроніці актуалізують низку завдань з проектування електричних схем під'єднання сенсорних елементів, калібрування перетворювальних характеристик, а також розроблення оптимальних методів реєстрації інформаційних сигналів та алгоритмів їхнього аналізу. Зокрема, значний потенціал для застосування у сенсорних пристроях демонструють наноструктури поруватого кремнію та графену. Як чутливий елемент сенсора запропоновано польовий транзистор, у якому провідним каналом слугує плівка відновленого оксиду графену, осаджена на поверхню поруватого кремнію. Значна площа поверхні поруватого шару і залежність провідності плівки відновленого оксиду графену від локальних змін електричного поля забезпечують високу чутливість сенсора до газових молекул. Дія мікрополів адсорбованих полярних молекул суттєво змінює значення дрейфової рухливості носіїв заряду та дисперсійних параметрів, що спричиняє зміну ємнісно-резистивних характеристик польового транзистора. У роботі розглядаються принципи побудови вимірювального тракту сенсорної системи з використанням сучасної елементної бази мікроелектроніки та інформаційних технологій. Запропоновані алгоритми керування інформаційно-вимірювальними системами дають змогу на якісно вищому рівні реалізовувати традиційні методи вимірювань і створювати пристрої нового типу, принципи функціонування яких кардинально відрізняються від попередніх ідеологій побудови вимірювальних систем.

Ключові слова: сенсор, графеновий польовий транзистор, вимірювальна система, мікропроцесор.

Olenych I., Yaremyk R., Parandiy P. Microprocessor system for measuring sensor characteristics of gas-sensitive field-effect transistors based on porous silicon and reduced graphene oxide film. Applied aspects of the use of new nanostructured materials in sensor electronics actualize a number of tasks related to the design of electrical circuits for connecting sensor elements, calibration of conversion characteristics, as well as the development of optimal methods for registering information signals and algorithms for their analysis. In particular, nanostructures of porous silicon and graphene demonstrate significant potential for application in sensor devices. A field-effect transistor, in which a reduced graphene oxide film deposited on the porous silicon surface serves as the conductive channel, is proposed as the sensitive element of the sensor. The significant surface area of the porous layer and the dependence of the conductivity of the reduced graphene oxide film on local changes in the electric field provide high sensitivity of the sensor to gas molecules. The action of microfields of adsorbed polar molecules significantly changes the value of the drift mobility of charge carriers and dispersion parameters, which causes a change in the capacitive and resistive characteristics of the field-effect transistor. The principles of constructing a measuring path of the sensor system using components of modern microelectronics and information technology are considered in the paper. The proposed algorithms for controlling information and measuring systems make it possible to implement traditional measurement methods at a qualitatively higher level and create new types of devices with operating principles that are fundamentally different from previous ideologies for building measuring systems.

Keywords: sensor, graphene field-effect transistor, measuring system, microprocessor.

Постановка проблеми. Динамічний розвиток сенсорних технологій стимулює інноваційні підходи у різних сферах діяльності людини: промисловості, транспорті, сільському господарстві, медицині, охороні навколишнього середовища та ін. До ключових основ нової парадигми можна віднести інтелектуалізацію сенсорних систем, як новий етап технологічної революції, який поєднує передові технології з аналітикою даних. Зокрема, вирішальну роль у сучасних процесах автоматизації, а також у системах безпеки та екологічного моніторингу відіграють інтелектуальні сенсорні системи [1-4]. Вони розглядаються як цілісні системи з власними програмно-апаратними засобами, такими як чутливі елементи сенсорів, фільтри і підсилювачі сигналів, аналого-цифрові перетворювачі, мікропроцесори, програмні модулі для керування та аналізу даних, алгоритми самооцінки, протоколи зв'язку тощо. Ці системи не тільки виконують функції збору та мікропроцесорної обробки сенсорних даних в режимі реального часу, але й на основі ідентифікації та інтерпретації даних здійснюють самотестування та/або автокалібрування сенсорів з метою адаптації до змінних умов [5, 6]. Крім того, інтелектуальні сенсорні системи часто можуть бути забезпечені еволюційними методологіями для подальшого удосконалення. Інтеграція технологій

штучного інтелекту забезпечує додаткові можливості для адаптивного врахування невизначеності та варіації, прогнозування поведінки системи, а також підвищення точності та ефективності аналізу даних [7-9].

Реалізація багатофункціональних сенсорних систем на основі графенових польових транзисторів потребує створення програмно-апаратних комплексів, які забезпечують не тільки різні режими роботи чутливих елементів, але й збір, обробку, зберігання, візуалізацію та передачу сенсорних даних з використанням стандартних протоколів зв'язку. Тому основна увага у роботі була зосереджена на розробленні комп'ютерно-керованої мікропроцесорної архітектури вимірювальної системи, яка забезпечує надійне функціонування сенсорів на основі польового ефекту, та можливості їх інтеграції з іншими технічними системами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвивається стійка тенденція розвитку сенсорних технологій з мініатюризацією чутливих елементів, що забезпечує низьке енергоспоживання, а також їх інтеграцію у портативні пристрої та сенсорні системи. Зменшення розмірів чутливих елементів напряму пов'язано з розвитком нанотехнологій і створенням нових наноматеріалів. Значний потенціал для застосування у сенсорній електроніці демонструють наноструктури поруватого кремнію та графену [10, 11]. Синергетичне поєднання їхніх корисних властивостей може забезпечити підвищення чутливості та розширення функціональності сенсорів. Зокрема, завдяки високій чутливості графену до локальної зміни електричного поля і високому співвідношенню площі поверхні поруватого кремнію до його об'єму польові транзистори на основі такої гібридної структури мають перспективу використання як чутливі елементи газоадсорбційних сенсорів і детекторів електромагнітного випромінювання [12, 13].

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Розроблена система представляє собою високоінтегровану комп'ютерно-керовану мікропроцесорну архітектуру (Рис. 1), яка забезпечує програмний цифровий синтез зонduючих гармонічних сигналів у широкому діапазоні частот, подачу напруги зондування із необхідною мінімальною і максимальною частотою спектру та кроком дискретизації на елементи сенсорної ланки, програмне встановлення у заданому діапазоні значення постійної напруги затвору експериментального польового транзистора. Одночасно, в реальному масштабі часу реєструється відгук сенсорного елемента на дію зонduючого сигналу та графічно візуалізуються і записуються в пам'ять результати вимірювання.

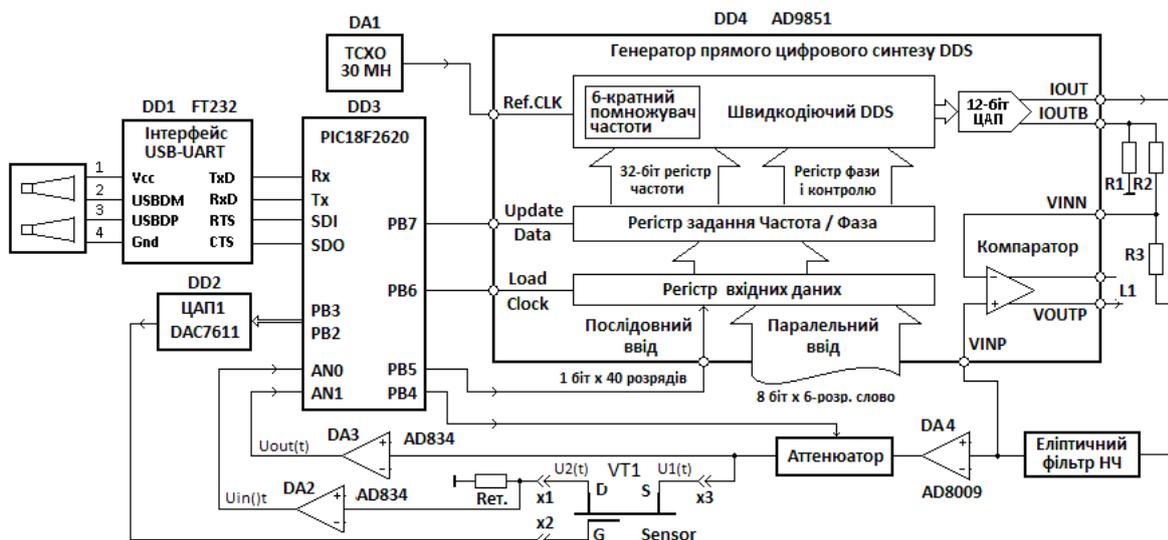


Рис.1 Функціональна блок-схема мікропроцесорної системи вимірювання

Для синтезу зонduючих гармонічних сигналів використано мікросхему типу AD9851 (виробництва Analog Devices) [14]. Мікросхема AD9851 (позначення DD4 на Рис. 1) використовує сучасну технологію прямого цифрового синтезу (DDS), яка у поєднанні з внутрішнім високошвидкісним і високопродуктивним цифро-аналоговим перетворювачем і компаратором для

формування функції синтезатора частоти та генератора синхросигналів з цифровим керуванням генерує стабільну частоту і формує гармонічні коливання з програмованою фазою.

Вихідна частота генератора AD9851 залежить від тактової частоти `ref_CLK` термокомпенсованого генератора IMC DA1 (TCXO 30 MHz) і від керуючого двійкового 32-х розрядного слова, яке кодує частоту. Конфігурація системи здійснюється 8-ми бітовим словом. Таким чином, 40-бітний послідовний код, що синхронізується сигналами DATA і CLOCK, задають на виходах гармонічний і прямокутний сигнали, які генеруються до наступного перезавантаження і зміни режиму роботи.

Спрощена структура вузла DDS зображена на рис. 2. Головний складовий елемент технології DDS представлений акумулятором фази, який формує код миттєвої фази вихідного сигналу. Код миттєвої фази перетворюється в цифрове значення гармонічного сигналу, яке за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) трансформується в аналогову форму і піддається фільтрації. Компаратор дає змогу отримати сигнал прямокутної форми.

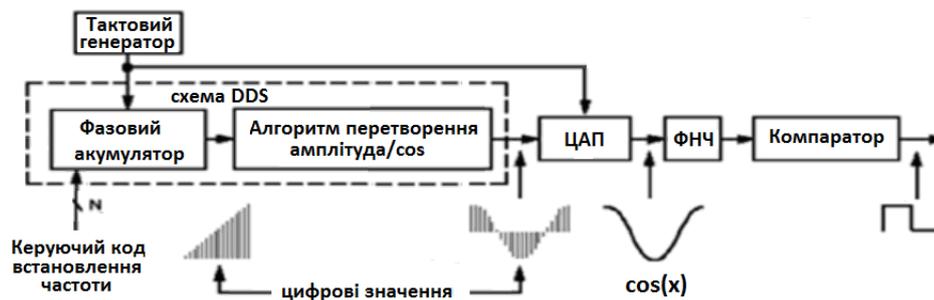


Рис. 2. Структурна схема вузла цифрового синтезу DDS

Модуль мікроконтролера IMC DD3 (PIC18F1620, Microchip) забезпечує програмне керування мікросхемою прямого цифрового синтезу (DDS) на базі AD9851 [15]. Модуль мікроконтролера здійснює програмне ініціювання робочих регістрів IMC AD9851, керування синтезатором частоти для задання початкової і кінцевої частот спектру та кроку квантування, записування регістрів стану і передачу даних для системи візуалізації і комп'ютерного аналізу.

Для програмування значення частоти, мікроконтролер PIC18F1620 по порту PB7 виводить код частоти послідовністю довжиною 40 біт (сигнал Update Data). Кожен біт даних супроводжується імпульсом додатної полярності Load Clock на вході синхронізації. Після завантаження керуючого слова відбувається зміна параметрів генерації на нові значення.

На виході ЦАП формується квазігармонічний сигнал, який містить у спектрі окремі побічні складові обумовлені процесами квантування по рівню і дискретизації по часу. Для покращення спектральної чистоти вихідного сигналу синтезатора DDS використовується згладжуваний аналоговий фільтр низької частоти (ФНЧ). В робочому діапазоні частот до 100 кГц еліптичний фільтр рекомендований фірмою-виробником DDS типу AD9851 повністю відповідає вимогам. При розширенні частотного діапазону вимірювань до 1 МГц кращі результати дає застосування ФНЧ Чебишева 4 порядку на екранованих котушках індуктивності.

Мікросхема буферного підсилювача DA4 типу AD8009 мінімізує вплив активних і реактивних параметрів сенсорних елементів на синтезатор аналогового гармонічного сигналу [16].

Для досліджень різних типів сенсорних елементів виникає необхідність змінювати амплітуду вихідної напруги DDS генератора. Регулювання сигналу здійснюється за допомогою атенюатора, який зменшує вихідний сигнал до потрібного рівня. Атенюатор виконаний з використанням програмно-керованого потенціометра і забезпечує ступінчасту зміну сигналу в діапазоні 0–63 dB з кроком 1 dB. Програмне керування цифровим потенціометром виконує мікроконтролер через лінію порта PB4.

Під дією зондувальної гармонічної напруги $U_1(t)$ через канал графенового польового транзистора VT1, який використовується як сенсорний елемент, тече струм $I=U_1(t)-U_2(t)/R$, де R – опір каналу польового транзистора. Номінальне значення опору та імпеданс несуть інформацію про кількісні характеристики впливу досліджуваних молекул газу, адсорбованих на поверхні плівки відновленого оксиду графену. Протікання струму каналу через послідовно включений еталонний

резистор R_{ei} породжує спад напруги на ньому $u_{in}(t)$, який пропорційний стуму каналу сенсорного польового транзистора VT1.

Для реєстрації інформаційних аналогових сигналів $u_{in}(t)$, $u_{out}(t)$ використовується 10-розрядний аналого-цифровий перетворювач (АЦП), інтегрований у мікроконтролер мікросхеми DD3 типу PIC18F1620 [15]. Оскільки діапазон зміни частот аналогових сигналів становить 0–100 кГц, що перевищує частоту дискретизації АЦП мікроконтролера, для коректного вимірювання амплітуд цих сигналів, необхідно перетворити гармонічні аналогові сигнали в їхні середньоквадратичні представлення. Загальновідомо, що середньоквадратичне значення U напруги $u(t)$ за інтервал часу T визначається згідно формули

$$U = \sqrt{(1/T) \int_{t_1}^{t_1+T} u^2(t) dt} . \quad (1)$$

Щоб обчислити середньоквадратичне значення сигналу відповідно до формули (1) потрібно виконати інтегрування квадрату вимірюваної напруги на інтервалі часу від моменту t_1 до моменту t_1+T . При вимірюваннях періодичних сигналів замість інтегралу як правило визначають поточне середнє значення сигналів за допомогою фільтра низьких частот. Передбачається, що фільтр досить добре послаблює всі гармонічні складові вимірюваної напруги, а середньоквадратичне значення цієї напруги змінюється настільки повільно, що не викликає динамічної похибки, зв'язаної з інерційністю фільтра. В цьому випадку середньоквадратичне значення напруги:

$$U = \sqrt{u^2(t)} , \quad (2)$$

де

$$\overline{u^2(t)} \approx (1/T) \int_t^{t+T} u^2(t) dt \quad (3)$$

визначає поточне середнє значення квадрату вхідного сигналу.

Вищеописаний метод у розробленій вимірювальній системі, реалізований із застосуванням прецизійних аналогових мікросхем DA2, DA3 типу AD834 (виробник Analog Devices) [17]. Інтегровані в AD834 вузли виконують:

- перетворення вхідної змінної напруги $U_{ex}(t)$ в уніполярний вхідний струм $I_{ex}(t)$;
- піднесення вхідного струму до квадрату $I_{ex}^2(t)$ та інтегрування його за допомогою фільтра нижніх частот (ФНЧ) з великою постійною часу усереднення $\tau_{сep}$ для отримання середнього значення напруги U .

Висока точність виконання функції перетворення забезпечується лазерною підгонкою номіналів резисторів на кристалі мікросхеми [18]. Для зменшення нелінійності в AD834 введені вузли компенсації на основі підсилювачів похибки, вихідна напруга яких керує ланкою зворотного зв'язку і забезпечує мінімізацію нелінійності.

Перемножуваний блок реалізований на основі комірки Гільберта (Gilbert cell) з емітерно-зв'язаними резисторами і схемою стабілізації струмових зміщень [19].

Зв'язок системи вимірювання з мікрокомп'ютером здійснюється через інтерфейс USB. Так як у системі вимірювання функціонує мікроконтролер типу PIC18F1620, який на апаратному рівні підтримує роботу з послідовним інтерфейсом UART, для комунікацій застосовується перетворювач інтерфейсів UART – USB типу FT232R (виробник FTDIchip) [20]. ІМС DD1 містить інтегровані USB трансивер, UART контролер і буферні регістри, помножувач частоти та інші функціональні вузли, які дозволяють реалізувати двосторонній обмін даними систем з COM портом через інтерфейс USB.

Для апробації розробленої системи, контролю метрологічних параметрів вимірювальних схем і тестування коректності роботи програмного забезпечення були виготовлені еталонні калібрувальні елементи з електричними нормованими параметрами опору, ємності та індуктивності. Величини номінальних значень цих елементів перекривали повний діапазон зміни інформаційних сигналів досліджуваних первинних перетворювачів. Перед кожним циклом досліджень сенсорних характеристик польових транзисторів вимірювальна система тестується і, за необхідності, калібрується, що забезпечує достовірність результатів вимірів.

Вимірянні інформаційні сигнали $U_{in}(t)$ та $U_{out}(t)$ перетворюються інтегрованим у мікроконтролер PIC18F1620 аналого-цифровим перетворювачем у 10-розрядний код і через USB-

інтерфейс передаються в host мікрокомп'ютера для збереження результатів у базі даних, їх графічної візуалізації і попереднього програмного аналізу. Передбачена можливість архівування даних в стандартних форматах представлення для опрацювання їх зовнішніми пакетами прикладних програм.

Отримано позитивні результати використання мікропроцесорної системи в експериментах з дослідження сенсорних характеристик газочутливих польових транзисторів на основі поруватого кремнію та плівки відновленого оксиду графену. Зокрема, реєструвалися зміна провідності каналу польового транзистора при дії на робочу поверхню транзистора випарів органічних сполук, таких як ацетон, етанол, толуол тощо. Вимірювання проводились в режимах постійного і змінного струму в діапазоні частот 10–100 кГц при кімнатній температурі. На рис. 3 зображено типову візуалізацію процесу вимірювання. Графічне представлення вимірювання демонструє вплив випарів ацетону на струм каналу експериментального польового транзистора та залежність струму від частоти напруги прикладеної між стоком і витком транзистора. Графік демонструє адсорбційну чутливість польового транзистора на основі поруватого кремнію та плівки відновленого оксиду графену до молекул ацетону, що розширює перспективу його застосування як первинного перетворювача сенсорних пристроїв.

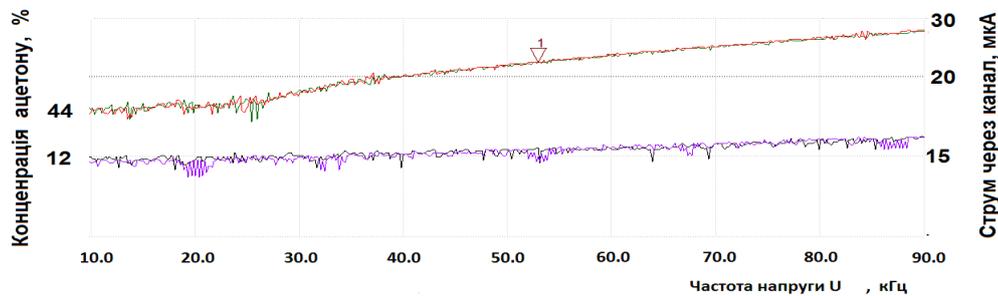


Рис. 3. Частотна залежність струму каналу польового транзистора для різної концентрації молекул ацетону

Важливим параметром польових транзисторів є характеристика перемикання, тобто залежність струму каналу від напруги між затвором і витком. Ця залежність визначає ефективність модуляції провідності каналу напругою на затворі. Як видно із графіку реєстрації вимірювання на рис. 4 зміною напруги затвора можна керувати провідністю каналу експериментального транзистора на основі поруватого кремнію та плівки відновленого оксиду графену. Зокрема, провідність графенового каналу польового транзистора змінюється більш ніж на порядок. Крім того, струм каналу польового транзистора залежить від частоти напруги стік-витік, що може бути використано для підвищення селективності сенсорного елемента.

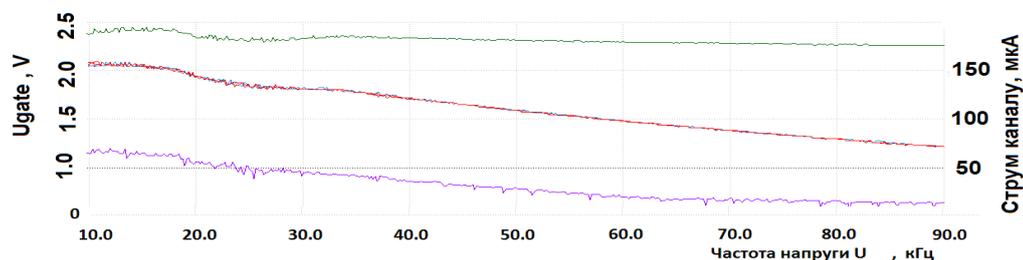


Рис. 4. Залежність струму провідності каналу польового транзистора на основі поруватого кремнію і плівки відновленого оксиду графену від частоти змінної напруги стік-витік для різних значень напруги затвора

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Розроблена система розглядається як універсальна платформа для експериментальних досліджень та аналізу електрофізичних властивостей сенсорних елементів на основі нанокompозитних матеріалів, отриманих різними технологічними способами. Особливістю апаратної реалізації створеної системи є можливість програмного конфігурування вимірювального тракту та алгоритму вимірювання з максимальним врахуванням специфічних фізичних властивостей використовуваних сенсорних елементів. Для

кожного класу сенсорних елементів та відповідних режимів реєстрації інформаційних сигналів використовується спеціалізована підпрограма, розміщена у бібліотеці прикладних підпрограм.

Апробація вимірювальної системи для дослідження сенсорних характеристик експериментального польового транзистора на основі поруватого кремнію та плівки відновленого оксиду графену підтверджує адсорбційну чутливість такого сенсорного елемента до газових молекул. Розроблена система дає змогу врахувати основні причини, які стримують широке впровадження сенсорних елементів на основі нанопоруватих структур, а саме значний часовий дрейф перетворювальної характеристики сенсора та високу сенсорну сприйнятливості до змін численних побічних фізичних величин, що супроводжують процес вимірювання. Перша причина не дозволяє гарантувати стабільність калібрувальної характеристики сенсора, друга не забезпечує селективності вимірювання заданої фізичної величини.

Розроблена мікропроцесорна система вимірювання забезпечує можливість розширення області досліджень електрофізичних параметрів нового типу сенсорів. Відкритість архітектури до розширення на апаратному і програмному рівнях дає змогу оптимально конфігурувати вимірювальний тракт для різних класів сенсорних елементів.

Список бібліографічного опису

1. Smith, A., Roberts, B. (2021). Smart sensors and IoT in industrial manufacturing: Trends and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 300, 100-110.
2. Formica, D., Schena, E. (2021). Smart Sensors for Healthcare and Medical Applications. *Sensors*, 21, 543.
3. Zhu, X., Li, K.-C., Zhang, J., Zhang, S. (2019). Distributed Reliable and Efficient Transmission Task Assignment for WSNs. *Sensors*, 19, 5028.
4. Ullo, S.L., Sinha, G.R. (2020). Advances in Smart Environment Monitoring Systems Using IoT and Sensors. *Sensors*, 20, 3113. <https://doi.org/10.3390/s20113113>
5. Sun, Z., Wang, M. (2022). Self-Test and Self-Calibration of Digital Closed-Loop Accelerometers. *Sensors*, 22(24), 9933. <https://doi.org/10.3390/s22249933>
6. Barcelo-Ordinas, J. M., Doudou, M., Garcia-Vidal, J., Badache, N. (2019). Self-calibration methods for uncontrolled environments in sensor networks: A reference survey, *Ad Hoc Networks*, 88, 142-159. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2019.01.008>
7. Jiang, C., Chen, S., Chen, Y., Zhang, B., Feng, Z., Zhou, H., Bo, Y. (2018). A MEMS IMU De-Noiseing Method Using Long Short Term Memory Recurrent Neural Networks (LSTM-RNN). *Sensors*, 18, 3470.
8. Awan, F.M., Minerva, R., Crespi, N. (2020). Improving Road Traffic Forecasting Using Air Pollution and Atmospheric Data: Experiments Based on LSTM Recurrent Neural Networks. *Sensors*, 20, 3749.
9. Kush, J. C. (2025). Integrating Sensor Technologies with Conversational AI: Enhancing Context-Sensitive Interaction Through Real-Time Data Fusion. *Sensors*, 25(1), 249. <https://doi.org/10.3390/s25010249>
10. Harraz F.A. (2014). Porous silicon chemical sensors and biosensors: A review. *Sensors Actuat B Chem*, 202, 897-912.
11. Choi, J.H., Lee, J., Byeon, M., Hong, T.E., Park, H., Lee, C.Y. (2020). Graphene-Based Gas Sensors with High Sensitivity and Minimal Sensor-to-Sensor Variation. *ACS Appl Nano Mater*, 3, 2257-2265.
12. Olenych, I.B., Horbenko, Y.Y., Monastyrskii, L.S., Aksimentyeva, O.I., Boyko, Y.V. (2023). Humidity sensor element based on porous silicon – reduced graphene oxide sandwich-like structures, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 767, 9-15, <https://doi.org/10.1080/15421406.2023.2224981>
13. Olenych, I.B., Horbenko, Y.Y. (2024). Electrical and photoelectric properties of hybrid structures based on reduced graphene oxide and Pd-doped porous silicon, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 768, 135-144, <https://doi.org/10.1080/15421406.2023.2235191>
14. <https://www.analog.com/en/products/ad9851.html>
15. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39631a.pdf>
16. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad8009.pdf>
17. Using the AD834 in DC to 500 MHz. Analog Devices Application Note. AN-212. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/an-212.pdf>
18. <https://www.analog.com/en/products/ad834.html>
19. Gilbert B. A New Wide-band Amplifier Technique // *IEEE Transactions on Solid-State Circuits*. Vol. SC-3, N4.
20. https://ftdichip.com/wp-content/uploads/2020/08/DS_FT232R.pdf

References

1. Smith, A., Roberts, B. (2021). Smart sensors and IoT in industrial manufacturing: Trends and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 300, 100-110.
2. Formica, D., Schena, E. (2021). Smart Sensors for Healthcare and Medical Applications. *Sensors*, 21, 543.
3. Zhu, X., Li, K.-C., Zhang, J., Zhang, S. (2019). Distributed Reliable and Efficient Transmission Task Assignment for WSNs. *Sensors*, 19, 5028.
4. Ullo, S.L., Sinha, G.R. (2020). Advances in Smart Environment Monitoring Systems Using IoT and Sensors. *Sensors*, 20, 3113. <https://doi.org/10.3390/s20113113>
5. Sun, Z., Wang, M. (2022). Self-Test and Self-Calibration of Digital Closed-Loop Accelerometers. *Sensors*, 22(24), 9933. <https://doi.org/10.3390/s22249933>

6. Barcelo-Ordinas, J. M., Doudou, M., Garcia-Vidal, J., Badache, N. (2019). Self-calibration methods for uncontrolled environments in sensor networks: A reference survey, *Ad Hoc Networks*, 88, 142-159. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2019.01.008>
7. Jiang, C., Chen, S., Chen, Y., Zhang, B., Feng, Z., Zhou, H., Bo, Y. (2018). A MEMS IMU De-Noiseing Method Using Long Short Term Memory Recurrent Neural Networks (LSTM-RNN). *Sensors*, 18, 3470.
8. Awan, F.M., Minerva, R., Crespi, N. (2020). Improving Road Traffic Forecasting Using Air Pollution and Atmospheric Data: Experiments Based on LSTM Recurrent Neural Networks. *Sensors*, 20, 3749.
9. Kush, J. C. (2025). Integrating Sensor Technologies with Conversational AI: Enhancing Context-Sensitive Interaction Through Real-Time Data Fusion. *Sensors*, 25(1), 249. <https://doi.org/10.3390/s25010249>
10. Harraz F.A. (2014). Porous silicon chemical sensors and biosensors: A review. *Sensors Actuat B Chem*, 202, 897-912.
11. Choi, J.H., Lee, J., Byeon, M., Hong, T.E., Park, H., Lee, C.Y. (2020). Graphene-Based Gas Sensors with High Sensitivity and Minimal Sensor-to-Sensor Variation. *ACS Appl Nano Mater*, 3, 2257–2265.
12. Olenych, I.B., Horbenko, Y.Y., Monastyrskii, L.S., Aksimentyeva, O.I., Boyko, Y.V. (2023). Humidity sensor element based on porous silicon – reduced graphene oxide sandwich-like structures, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 767, 9-15, <https://doi.org/10.1080/15421406.2023.2224981>
13. Olenych, I.B., Horbenko, Y.Y. (2024). Electrical and photoelectric properties of hybrid structures based on reduced graphene oxide and Pd-doped porous silicon, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 768, 135-144, <https://doi.org/10.1080/15421406.2023.2235191>
14. <https://www.analog.com/en/products/ad9851.html>
15. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39631a.pdf>
16. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad8009.pdf>
17. Using the AD834 in DC to 500 MHz. Analog Devices Application Note. AN-212. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/an-212.pdf>
18. <https://www.analog.com/en/products/ad834.html>
19. Gilbert B. A New Wide-band Amplifier Technique // *IEEE Transactions on Solid-State Circuits*. Vol. SC-3, N4.
20. https://ftdichip.com/wp-content/uploads/2020/08/DS_FT232R.pdf