

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

Кафедра комп'ютерної інженерії

До захисту допущено:

«На правах рукопису»

Завідувач кафедри _____ Юрій Бойко

« _ » _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

на тему:

**«РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИН ПОРТАТИВНОГО ПРИСТРОЮ-
СИГНАЛІЗАТОРА ПРИСУТНОСТІ ЕКОЛОГІЧНО ШКІДЛИВИХ ЛЕТКИХ
РЕЧОВИН НА ОСНОВІ МАСИВУ ХЕМОРЕЗИСТИВНИХ ДАТЧИКІВ»**

Виконав:

студент 4-го курсу бакалаврату
денної форми навчання
спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія

ОНП « _____ »

Волошин Максим Євгенійович _____

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник

Кукла Олександр Леонідович _____

доктор фізико-математичних наук, професор

Веклич Анатолій Миколайович _____

Рецензент:

Засвідчую, що у цій бакалаврській роботі
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____

Робота допущена до захисту в ЕК рішенням кафедри _____

від « _ » _____ 2023 р., протокол № __.

Завідувач кафедри _____,

кандидат фізико-математичних наук, доцент

Бойко Юрій Володимирович

(підпис)

Реферат

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра: 58 сторінок, 48 рисунків, 12 посилань.

Об'єкт дослідження: портативний пристрій-сигналізатор присутності екологічно шкідливих летких речовин на основі масиву хеморезистивних датчиків.

Мета роботи: розробка реалізації мініатюрного носимого пристрою, призначеного для сигналізації наявності в навколишньому повітрі певних отруйних речовин у кількостях, що перевищують задані порогові концентрації. Крім того, проведення тестування хеморезистивних датчиків, у складі яких використовувалися різні типи плівок.

Зміст

1. ВСТУП	4
2. Загальна структура та алгоритм функціонування пристрою.....	6
3. Елементна база	7
3.1 Центральний контролер АТmega168РА.....	8
3.2 Операційний підсилювач МСР6271	10
3.3 Аналоговий мультиплексор ADG704.....	11
3.4 Підсистема електроживлення	12
3.5 Радіомодуль НМ-10.....	16
3.6 Датчик вологості та температури SHT25	19
4. Конфігурація пристрою	20
5. Загальний алгоритм функціонування пристрою.....	21
6. ХЕМОРЕЗИСТИВНІ ДАТЧИКИ.....	22
6.1 Електрична схема	22
6.2 Конструкція сенсор-картриджа	23
6.3 Детектування присутності сенсор-картриджа.....	24
6.4 Калібрування датчиків.....	27
6.5 Хеморезистинні електроди та чутливі шари	29
7. Експериментальна установка.....	30
8. Методика вимірювань	31
9. Експериментальні результати.....	34
10. Аналіз і обговорення.....	54
11. Висновок	55
12. ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	57

1. ВСТУП

Леткі речовини є одним з основних антропогенних забруднювачів навколишнього середовища. Це відходи виробництва фарб, клеїв, нафтопродуктів, фармацевтичних препаратів і холодоагентів.

Забруднення атмосфери – це зміни її газового складу в результаті появи домішок. Аналіз забруднення повітря є чи не найскладнішим завданням аналітичної хімії, оскільки повітря є рухомою системою, склад якої постійно змінюється, а одна проба може містити десятки і сотні органічних та неорганічних сполук. Необхідність захисту людей від згубного впливу різних токсичних газів та отруйних речовин (ОР), та інших летких органічних сполук (ЛОС), актуалізували необхідність їх швидкого та селективного виявлення.

Газові сенсори як інструмент для оцінки та контролю стану навколишнього середовища, робочих місць на виробництві чи в хімічних/біохімічних лабораторіях, нашого житла тощо, вже давно стали необхідним елементом нашого життя. Серед численних матеріалів, що пропонуються як чутливі матеріали для таких сенсорів значна увага приділяється електропровідним полімерам (ЕПП) завдяки їх здатності реагувати на хімічні фактори оборотними змінами в їх електропровідності, спектральних, оптичних характеристиках, масі тощо. Така здатність ЕЕП може легко використовуватись в різноманітних сенсорних вимірювальних схемах. Однак серйозною перешкодою на шляху широкого впровадження ЕПП в сенсорні вимірювання є їх слабкі механічні та адгезійні характеристики. Ця проблема вирішується, зокрема, формуванням композитів ЕПП з різними полімерними матеріалами та використанням специфічних функціоналізованих допантів. Наразі, такі модернізовані ЕПП композитні/комплексні матеріали розробляються як чутливі компоненти сенсорних пристроїв для аналізу складу видихуваного людиною повітря, витоків промислових і сільськогосподарських виробництв, житлових будинків, тощо.

Перевагами таких матеріалів є достатньо прості методи синтезу і формування, а також їх здатність детектувати леткі органічні речовини з надзвичайно низькою межею виявлення від одиниць ppm і навіть в ppb-ppm діапазоні. Серед цих матеріалів ЕПП займають важливе місце завдяки унікальному поєднанню фізико-хімічних властивостей, таких як ефективне електронне π -сполучення, напівпровідникові або металеві властивості, простота отримання та використання, хімічна стабільність, синтетична універсальність і висока чутливість при кімнатній температурі до ЛОС і, зокрема, до ОР.

Сенсорні елементи на основі ЕПП та їх нанокompatитів обернено реагують на газові аналіти зміною їх електропровідності (опору) за рахунок фізико-хімічної адсорбції молекул аналізованих речовин. Такі сенсори відрізняються низьким енергоспоживанням та можуть працювати з простим вимірювальним обладнанням.

2. Загальна структура та алгоритм функціонування пристрою

Електронний модуль вимірювального перетворювача прототипу СОР (сигналізатора отруйних речовин) реалізований на друкованій платі з певними розмірами та містить наступні апаратні компоненти:

- цифро-аналоговий перетворювач з номінальним діапазоном вихідних напруг 0.1..2.4 В, що також виконує функцію модулятора;
- чотирьохканальний аналоговий мультиплексор, керований мікроконтролером (МК), для перемикання між опитуваними датчиками;
- трансїмпедансний підсилювач (ТПІ) з загальною точкою, зміщеною на рівень 1.25 В;
- інтерфейс обміну даними з програмованим постійним запам'ятовуючим пристроєм (ППЗП), розташованим на сенсор-картриджі (окрема плата з резистивними датчиками, яка підключається до основної плати електронного модуля);
- інтерфейс обміну даними з радіомодулем (BLE-модуль), який використовується також для зв'язку з ПК під час налагодження протоколів/алгоритмів обробки вимірювальних даних;
- інтерфейс обміну даними з інтегральним датчиком вологості та температури (ДВТ);
- засоби взаємодії з оператором: тактова клавіша та світлодіодний індикатор;
- інтегральний стабілізатор напруги живлення, який використовується також для формування ряду опорних напруг в схемі вимірювального перетворювача (ВП).

Інтерфейс програмування МК поєднаний з інтерфейсом ідентифікації та запиту калібрувальних даних сенсор-картриджа, що дозволяє зменшити кількість роз'ємів та мінімізувати розміри друкованої плати вимірювального перетворювача. Сенсор-картридж (с-к) з встановленими на ньому датчиками

підключається до плати ВП через 13-контактний штиревий роз'єм. Цей же роз'єм використовується для програмування МК. Також на платі передбачені штиреві роз'єми для підключення радіомодуля та зовнішнього джерела живлення замість вбудованого гальванічного елемента (ГЕ).

Друковані плати описаного вище електронного модуля мають розміри стандартної пластикової банківської карти розміром 85x55x5 мм, і містять вбудований автономний джерело живлення, інтерфейси для програмування мікроконтролера/підключення сенсорного блоку та для зв'язку з ПК.

3. Елементна база

У електричній схемі прототипу приладу використовуються наступні мікросхеми та мікромодулі: центральний контролер - ATmega168PA (Atmel/Microchip); операційні підсилювачі, на основі яких реалізуються ЦАП і ТПП - MCP6271 (Microchip); аналоговий мультиплексор для комутації вимірювальних каналів - ADG704 (Analog Devices); стабілізатор вторинного електроживлення - MCP1700-250 (Microchip); радіомодуль, який реалізує набір протоколів Bluetooth Low Energy (BLE) - HM-10 (Jinan Huamao); датчик вологості і температури - SHT-25 (Sensirion).

Електрична схема та алгоритми функціонування ВП проектувалися з урахуванням вимог мінімізації енергоспоживання. Джерелом первинного електроживлення виробу є літійовий гальванічний елемент типорозміру 2032 з номінальною напругою 3 В, але для тестування макетного зразка в лабораторних умовах передбачена можливість підключення зовнішнього блока живлення.

Радіомодуль з'єднується з МК через стандартний асинхронний послідовний інтерфейс (UART). До цього ж інтерфейсу з'єднання може бути підключений адаптер UART-USB або UART-RS232 замість радіомодуля, таким чином, пристрій можна при необхідності зв'язати з ПК.

3.1 Центральний контролер ATmega168PA

Центральним елементом схеми СОР є МК, який інтегрує значну частину функціональності ВП та координує роботу сигналізатора в цілому. При виборі МК, окрім доступності мікросхем, були враховані архітектура МК та набір вбудованої периферії, доступність засобів розробки мікропрограмного забезпечення (МПЗ) та попередній досвід розробки виробів з використанням мікросхем МК даного типу. За сукупністю цих критеріїв у якості центрального контролера СОР використовується ATmega168PA (Atmel/Microchip) в 32-вивідному корпусі. Слід зазначити, що функціональні можливості та структурна гнучкість вказаного МК заздалегідь обмежені, і, ймовірно, він не підходить для застосування в кінцевому варіанті виробу. Контролер навмисно вибирався з міркувань зручності його використання в макетному зразку. Більш оптимальний варіант контролера може бути вибраний після уточнення вимог до виробу на основі результатів тестування макетного зразка. Як можливу кандидатуру МК з більш багатим набором вбудованої периферії, більшою кількістю ліній в/в та достатньо низьким енергоспоживанням можна вказати STM32F303CB (ST Microelectronics). Також слід згадати ADuCM350 (Analog Devices), спеціально призначений для імпедансометричних застосувань.

Ресурси контролера СОР розподіляються наступним чином:

- восьмиразрядні таймери-лічильники TC0 та TC2 використовуються для організації двоканального широтно-імпульсного модулятора та двохдіапазонного ЦАП на його основі;
- аналоговий компаратор використовується для організації балансної вимірювальної схеми;
- АЦП з мультиплексованим входом використовується для організації прямої вимірювальної схеми (канал мультиплексора #6) та моніторингу напруги первинного джерела живлення - гальванічного елемента (канал мультиплексора #7);

- чотирипровідний послідовний інтерфейс SPI використовується для зчитування даних з ПЗП сенсор-картриджа, цей же інтерфейс використовується для програмування МК;
- асинхронний послідовний інтерфейс UART використовується для зв'язку з терміналом (EOM або радіомодулем) для передачі команд встановлення режимів та параметрів роботи COP та даних вимірювань;
- двопровідний послідовний інтерфейс I2C (TWI) використовується для обміну командами та даними з цифровим датчиком вологості та температури;
- решта цифрових ліній в/в використовуються для управління живленням ОУ, управління зовнішнім мультиплексором вимірювальних каналів, детектування присутності сенсор-картриджа, формування та зчитування додаткових сигналів управління радіомодулем та контролю його стану, та організації пульта оператора - клавіші управління та світлодіодного

Програма, що виконується центральним процесором МК, реалізує логіку роботи сигналізатора та протоколи взаємодії з місцевим пультом оператора, віддаленим терміналом, набором датчиків на картриджі та іншою зовнішньою периферією, пов'язаною з контролером. У відмінність від кінцевого варіанту COP, режими роботи прототипу та відповідні протоколи управління та контролю спрямовані в більшій мірі на тестові та калібрувальні вимірювання. Тобто, COP замінює собою лабораторний стенд, але одночасно може використовуватися для оптимізації та налагодження структурних, схемотехнічних та алгоритмічних аспектів виробу для подальших ітерацій циклу проектування.

Запис програмного коду для МПЗ в ПЗП мікросхеми контролера здійснюється після встановлення контролера на плату COP та при штатній нарузі живлення за допомогою послідовного інтерфейсу SPI відповідно до протокола. Оскільки для зв'язку між МК та мікросхемою ПЗП сенсор-

картриджа використовується той самий апаратний інтерфейс, стає можливим поєднання функцій роз'ємів підключення сенсор-картриджа та адаптера програматора, що усуває потребу в додатковому роз'ємі для програмування МК. Проте слід пам'ятати, що використовуваний адаптер повинен бути сумісним з програмованим виробом за рівнем напруги живлення.

Один з можливих варіантів реалізації адаптера для програмування МК полягає в модифікації паралельного адаптера Altera ByteBlaster, в якій буферний повторювач LS- або HC-серії замінюється двома мікросхемами LVC- та HCT-серії, які забезпечують трансляцію логічних рівнів з 5 вольт на 2..3 вольти і назад. Низьковольтна частина адаптера живиться безпосередньо від програмованої схеми, напруга живлення п'ятивольтової частини надходить з зовнішнього джерела, роль якого може виконувати, наприклад, лінія живлення шини USB.

Адаптер з'єднується з паралельним портом ПК-програматора за допомогою типового роз'єму DB 25, а з програмованим МК - через роз'єм підключення сенсор-картриджа на платі COP, який у свою чергу з'єднується з 10-контактним роз'ємом на платі адаптера за допомогою гнучкого шлейфа.

(Відповідність номерів контактів роз'ємів на платі COP та на платі адаптера програматора наведена в таблиці 2.)

Для програмування МК можна використовувати будь-який програмний засіб, який підтримує роботу з адаптером ByteBlaster через стандартний паралельний порт, наприклад AVReal або AVRDUDE.

3.2 Операційний підсилювач MCP6271

Для реалізації ЦАП та ТПІ в COP використовується пара ідентичних операційних підсилювачів (ОП) MCP6271. ОП даного типу виготовляються за технологією КМОП та характеризуються високою швидкодією, низьким власним шумом (спектральна щільність введеного шуму $20 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ в області 1 кГц) та малим струмом зміщення вхідних каскадів (приблизно 1 пА при температурах до 45 °С). Виробник не пропонує двоканальний варіант MCP6271. Використання

двоканального ОП, виготовленого в одному корпусі, дозволило б зменшити площу плати з елементами схеми ВП, що є позитивним фактором навіть за фіксованих розмірах плати, проте розведення двосторонньої плати без додаткових внутрішніх шарів металізації в такому варіанті ускладнене, тому з точки зору оптимізації токонесучого малюнку, використання двох окремих мікросхем є більш бажаним.

Кожен з підсилювачів МСР6271 споживає струм спокою приблизно 170 мкА. МСР6271 не має функції відключення за допомогою зовнішнього цифрового сигналу, але існує його повністю сумісна модифікація МСР6273 з такою функцією, і Друкована плата (ДП) СОР спроектована з урахуванням можливості управління живленням ОП (зі спільним рядком управління для двох підсилювачів). МСР6271/6273 також сумісні за розпіновкою з ОП TLV2760 виробництва Texas Instruments, які мають менше енергоспоживання при трохи меншій швидкодії та порівняних значеннях інших характеристик.

3.3 Аналоговий мультиплексор ADG704

Для мультиплексування вимірювальних каналів у СОР використовується чотиріканальний аналоговий мультиплексор ADG704 (Analog Devices). За напруги живлення мультиплексора 2.5 В та напруги на стоці ключа, що дорівнює 1.25 В, опір відкритого ключа становить близько 5 Ом. Опір ключа значно залежить від напруги на його стоці/витоці, але у використаній вимірювальній схемі зміни цих напруг є незначними - напруга на стоці ключа підтримується постійною завдяки зворотному зв'язку, в якому залучений підсилювач DA2, а падіння напруги на відкритому ключі при струмі 225 мкА та опорі ключа 5 Ом не перевищує 1.2 мВ. Таким чином, похибка, внесена опором ключа мультиплексора, є переважно статичною та систематичною, проте відносна величина цієї похибки при малих опорах хеморезисторів може бути досить великою. При опорі хеморезисторів порядку одиниць кілоом розглянута похибка має порядок 0.5%. Опір ключа також змінюється з температурою, але ця залежність є відносно слабкою (близько 10 мОм/°С в діапазоні температур -40..+85 °С).

Можна дещо зменшити величину опору відкритого ключа, збільшивши напругу живлення мультиплексора, тобто підключивши лінію живлення мікросхеми D1 безпосередньо до джерела первинного електроживлення GB1, а не до виходу регулятора DA3. Конструкція ДП розробленого прототипу передбачає можливість такої комутації за допомогою переминок. Збільшення напруги живлення D1 не призводить до помітного збільшення енергоспоживання схеми, оскільки споживаний мультиплексором струм практично не залежить від напруги. Потенційною проблемою при такій конфігурації схеми може стати недостатньо високий рівень логічної одиниці на адресних входах мультиплексора (через різницю в напругах живлення D1 і D2), що може привести до появи помилок при перемиканні вимірювальних каналів. Перевага одного або іншого варіанту організації живлення мультиплексора має бути встановлена експериментально.

Компанією Analog Devices також пропонується мультиплексор ADG804, який має сумісний роз'єм з ADG704, але меншу швидкодію та кращі аналогові характеристики - зокрема, ключі з меншим опором на порядок - та може бути використаний як пряма заміна ADG704 у схемі інтерфейсу програмування SOP у разі необхідності. У кінцевому варіанті SOB може знадобитися мультиплексування більше, ніж чотирьох каналів для підключення калібрувальних резисторів до ВП та реалізації функції автокалібрування. Альтернативним варіантом є використання спеціального калібрувального картриджа.

3.4 Підсистема електроживлення

Як первинний джерело живлення в SOP використовується літійовий гальванічний елемент (ГЕ) з номінальною напругою 3,0 В. Крім того, конструкція передбачає підключення зовнішнього блока живлення (БЖ) через роз'єм, який паралельно з'єднаний з гніздом для встановлення ГЕ, для спрощення тестування та лабораторного використання макетного зразка. Слід пам'ятати, що гніздо для встановлення ГЕ та роз'єм для підключення зовнішнього БЖ підключаються

паралельно без будь-яких елементів ізоляції або захисту, тобто одночасне підключення БЖ та ГЕ не допускається.

Схема ВП також містить вторинне джерело живлення у вигляді лінійного послідовного регулятора MCP1700-250 (DA3) з номінальною вихідною напругою 2,5 В. Операційні підсилювачі ЦАП та ТІП (DA1 і DA2) живляться безпосередньо від гальванічного елемента, а живлення цифрових компонентів схеми здійснюється від вторинного джерела. Аналогова частина МК живиться напругою вторинного джерела, відфільтрованою пасивним фільтром (L1-C16). Цю ж фільтровану напругу використовують як опорну напругу АЦП, що інтегрується в МК, для формування умовного нуля ТІП, та для формування порогової напруги на вході аналогового компаратора (вхід AIN0 мікроконтролера). Напруга з виходу DA3 також подається на роз'єм X1 для живлення EPROM сенсор-картриджа та формування сигналу CPD, а також для живлення адаптера програматора під час програмування МК.

Реалізована в СОР структура підсистеми електроживлення базується на наступних міркуваннях:

- Забезпечення автономної роботи пристрою за мінімально можливих масогабаритних характеристик потребує використання компактного первинного джерела живлення. Літійовий гальванічний елемент типорозміру 2032 забезпечує прийнятний компроміс між масою, розмірами та ємністю, крім того, ГЕ цього типу широко поширені та доступні в комерційному сенсі. Обраний тип ГЕ визначає номінальне значення первинної напруги живлення схеми (3,0 В).
- Напруга живлення центрального контролера макета впливає на метрологічні характеристики ВП, оскільки визначає величини опорних напруг ЦАП та АЦП. Для забезпечення стабільних метрологічних характеристик бажано стабілізувати живлення мікросхеми МК.

- З урахуванням типових характеристик малоспоживаючих лінійних регуляторів напруги та розрядних характеристик ГЕ, найбільш прийнятним значенням стабілізованої (вторинної) напруги живлення є 2,5 В.

- Напруга живлення інших мікросхем, що входять до складу електричної схеми СОР та зв'язаних з центральним контролером, повинна збігатися з напругою живлення МК для узгодження рівнів логічних сигналів та забезпечення стабільної роботи цифрових інтерфейсів.

- Живлення більшості компонентів схеми від вторинного джерела з напругою нижче первинного дозволяє також зменшити загальне споживання енергії, оскільки за інших рівних умов споживаний елементами схеми струм, як правило, зменшується зі зниженням напруги живлення.

З іншого боку, оскільки опорні напруги, як ЦАП (формування напруги збудження датчиків), так і АЦП визначаються величиною напруги живлення, і динамічні діапазони ЦАП та АЦП з аналогового сигналу зі зміною напруги живлення змінюються пропорційно, величина останнього не впливає на числовий результат перетворення при незмінному опорі датчика. Таким чином, вимірювальний тракт залишається в цілому працездатним при живленні всіх елементів схеми єдиною нестабілізованою напругою (за умови достатньо повільної динаміки змін цієї напруги). Спотворюються лише абсолютні значення вимічених струмів, обчислені за відліками АЦП з припущенням постійності опорних напруг, але оскільки в контексті цільового застосування розглянутого ВП інформативним параметром є відносне змінення провідності датчика, систематична множникова похибка в вимічених абсолютних значеннях струмів на практиці не має значення.

На ДП макетного зразка СОР передбачено місце для встановлення обхідної перемички, за допомогою якої можна виключити регулятор DA3 зі схеми та живити всі компоненти безпосередньо від первинного джерела живлення. Такий режим електроживлення може бути корисним при тестуванні макету або

для застосування його як частини лабораторної установки, коли в якості первинного джерела живлення виступає зовнішній блок живлення.

Напруга першочергового джерела живлення GB1 через рівнобіжний діляник R22:R23 подається на допоміжний вхід мультиплексора, що інтегрований в МК АЦП (вхід ADC7 мікросхеми D2), для періодичного контролю та сигналізації про необхідність заміни ГЕ в разі, якщо виміряне значення напруги буде меншим за поріг, передбачений в програмі, що виконується контролером. Опір резисторів R22, R23 повинен бути достатньо великим, щоб не створювати зайвого навантаження на джерело живлення, але при цьому достатньо малим порівняно зі входним опором АЦП, типове значення якого становить 100 МОм. У поточному варіанті схеми СОР номінальні значення опорів R22, R23 встановлені рівними 510 кОм, тобто внесена діляником у вимірювану величину напруги статична похибка складає близько 0,5%. При необхідності опори R22, R23 можуть бути зменшені, але використовувати номінали менше 100 кОм небажано. Величина опору верхнього плеча (R22) також може впливати на динамічні характеристики входу АЦП (ПВЗ), цей фактор компенсується ємністю С22. Крайова частота фільтра утвореного R22 і С22 приблизно на три порядки нижче граничної частоти смуги пропускання АЦП.

Моніторинг напруги живлення можливий, навіть якщо МК живиться безпосередньо від ГЕ, але у цьому випадку, звичайно, напруга живлення не може використовуватися як опорна. Проблема вирішується перемиканням на час моніторингу на альтернативний вбудований в МК джерело опорної напруги (ІОН) з номінальною величиною 1,1 В, і відповідним змінням співвідношення опорів R22:R23, для отримання напруги ~1В на вході ADC7 при повністю зарядженому ГЕ.

3.5 Радіомодуль НМ-10

Радіоінтерфейс СОР використовується для повідомлення віддалених терміналів про виявлення ОП в зоні експонування підключених до ВП датчиків. Для створення бездротового каналу зв'язку використовується набір протоколів Bluetooth Low Energy (BLE). Інтерфейси цього типу зазвичай реалізуються за допомогою багатофункціональних контролерів (SoC), які представлені достатньо широкою номенклатурою мікросхем, випускаються різними компаніями (Nordic Semiconductor - nRF528xx, Renesas - RL78/G1D, Texas Instruments - CC254x і CC264x, Qualcomm - CSR102x, Cypress/Infineon - CY8C412x, CY8C424x, Espressif Systems - серія ESP32 та інші). Однак, навіть з урахуванням апаратної реалізації багатьох низькорівневих функцій та програмної та інструментальної підтримки від компанії-виробника SoC, розробка BLE-інтерфейсу «з нуля» є нетривіальною та складною задачею. З метою спрощення процесу розробки в СОР для створення бездротового інтерфейсу використовується серійно випускається мікромодуль (НМ-10 пр-ва Jinan Huamao [12, 13] або сумісний з ним), який реалізує мікропрограмну підтримку потрібного набору протоколів та надає додатковий рівень абстракції у вигляді набору команд керування параметрами бездротового інтерфейсу та можливості обміну командами та даними через стандартний послідовний порт (UART).

BLE-модуль підключається до контролера СОР за допомогою п'ятипровідного інтерфейсу зв'язку, який включає лінії живлення (VCC та GND), прийому та передачі даних (RXD/TXD), скидання/перезапуску контролера BLE-модуля (RESET#), примусового розриву бездротового з'єднання (BRK, також може використовуватись для примусового виведення контролера BLE-модуля з режиму зниженого споживання енергії), та сигналу стану/наявності бездротового з'єднання (STATE).

Модуль НМ-10 може поставлятися у двох варіантах виконання: у вигляді друкованої плати з краєвими контактами для планарного монтажу, або

передвстановленим на додаткову ДП-основу, на якій крім самого модуля змонтовані захисний діод, підключений послідовно до лінії VCC, регулятор напруги (Torex Semiconductor XC6206 або аналогічний, з номінальною вихідною напругою 3,3 В), схема зсуву логічних рівнів ліній передачі даних (з використанням двох полевих транзисторів), світлодіодний індикатор та шестиконтактний штиревий роз'єм. Другий варіант виконання призначений передусім для підключення модуля до макетних плат з п'ятивольтовою лінією живлення, хоча модуль залишається працездатним і при напругі живлення (на контакті VCC роз'єму) рівному $\sim 3,3$ В.

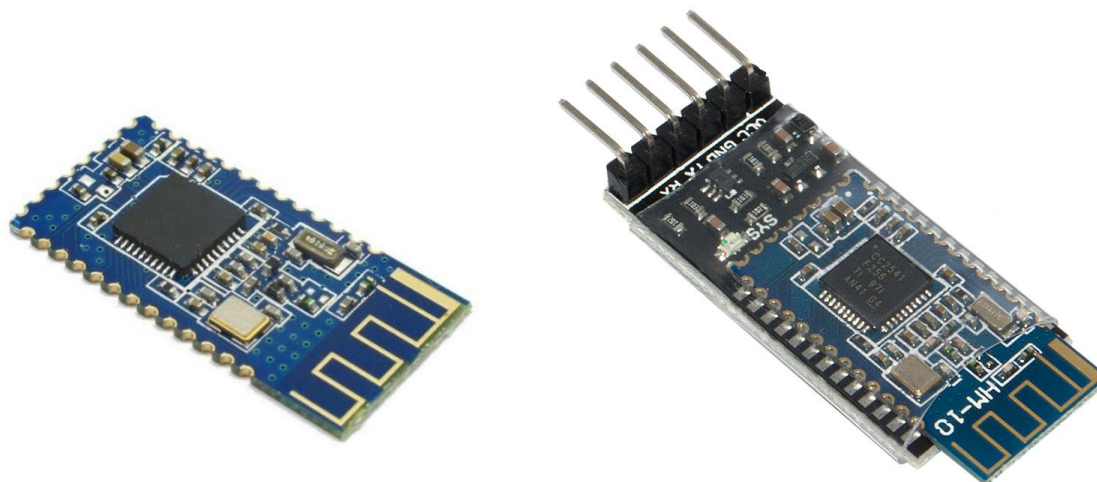


Рис. 1. Варіанти поставки мікромодуля НМ-10

Роз'єм X2 на платі COP відповідає роз'єму на додатковій платі BLE-модуля в другому виконанні, що дозволяє пряме підключення модуля до плати COP. Однак наявність захисного діода та інших допоміжних елементів на додатковій платі може призвести до нестабільної роботи модуля при напругі живлення 2,5 В (номінальної величини напруги живлення контролера COP), тому при роботі з BLE-модулем в другому виконанні може знадобитися виключення зі схеми COP регулятора напруги, або модифікація самого BLE-модуля, тобто усунення елементів перетворення напруг з його додаткової плати.

На платі COP також є місце для монтажу BLE-модуля в звичайному (першому) виконанні. Слід мати на увазі, що виводи модуля U3 (який монтується на плату паянням) безпосередньо з'єднуються з відповідними контактами роз'єму X2, тому при встановленому на платі COP BLE-модулі підключення другого модуля (або будь-якого іншого комунікаційного адаптера) до роз'єму X2 не допускається. Така конструкція передбачає використання роз'єму X2 для початкового налагодження та тестування комунікаційного інтерфейсу, після чого BLE-модуль монтується на плату макету паянням, і роз'єм більше не використовується. Також можливе виготовлення кількох екземплярів макету, частина з них в виконанні з інтерфейсним роз'ємом, а частина з постійно встановленим модулем бездротового зв'язку.

Оскільки зв'язок між центральним контролером COP та контролером BLE-модуля здійснюється за допомогою стандартного асинхронного послідовного інтерфейсу, той же канал зв'язку (виведений на роз'єм X2) можна використовувати для провідного з'єднання з настільним або портативним ПК за допомогою адаптера-моста UART-USB або UART-RS232 для тестування та налагодження комунікаційних алгоритмів або налаштування параметрів BLE-модуля.

Оскільки зв'язок між центральним контролером COP та контролером BLE-модуля здійснюється за допомогою стандартного асинхронного послідовного інтерфейсу, той же канал зв'язку (виведений на роз'єм X2) можна використовувати для провідного з'єднання з настільним або портативним ПК за допомогою адаптера-моста UART-USB або UART-RS232 для тестування та налагодження комунікаційних алгоритмів або для використання макета як лабораторного вимірювального перетворювача. У разі використання моста UART-USB згодження напруг вирішується за допомогою мікросхеми моста, головна частина якої живиться від порту шини USB (напругою 5 В), а лінії вводу/виводу - від окремої низьковольтної лінії живлення. Таку можливість надає, наприклад, міст FT232R (FTDI Ltd.). Сигнали STATE і BRK, виведені на роз'єм X2, при провідному

з'єднанні з ПК можуть емулюватися за допомогою стандартних для інтерфейсу UART сигналів арбітражу потоку даних (DSR/DTR або RTS/CTS).

Оскільки розроблюваний пристрій може бути використаний для різних цільових призначень, цілком доцільно розробити універсальний логічний рівень комунікаційного протоколу, який включатиме завдання всіх потенційних областей застосування. Цей протокол повинен бути придатним як для організації бездротової мережі для повідомлення про наявність об'єктів в повітрі, так і для безперервного реєстрування вимірювальної інформації.

3.6 Датчик вологості та температури SHT25

Конструкція СОР передбачає можливість встановлення на ДП датчика вологості та температури (ДВТ) для програмної корекції похибок, що виникають внаслідок впливу цих факторів. Як ДВТ передбачено використання інтегрального датчика SHT25 (виробництва Sensirion). Датчик розташовується в безпосередній близькості до роз'єму підключення с-к. Для ефективної компенсації необхідно, щоб область (апертура) експонування чутливого елемента (ЧЕ) ДВТ приблизно співпадала з такою для ЧЕ хеморезистивних датчиків. Оскільки фактичне розташування ЧЕ хеморезисторів відносно плати СОР визначається конструкцією с-к, а остання на даний момент ще остаточно не встановлена, місце для встановлення ДВТ продубльовано з обох сторін ДП макетного зразка, тобто датчик може бути встановлений або на верхній (що містить з'єднувальні роз'єми та гніздо для встановлення ГЕ), або на нижній стороні плати. Одночасне встановлення двох датчиків з обох сторін ДП не допускається.

У тестовій версії макету СОР ДВТ не встановлюється. На першому етапі проектування пріоритетом є реалізація та налагодження основних вимірювальних функцій макета. Вивчення впливу температури та вологості на функціональні характеристики ВП та оцінка можливості автоматичної або напівавтоматичної компенсації цього впливу з використанням інтегрованого в виріб ДВТ можуть бути відкладені до завершальних або додаткових етапів виконання проекту.

SHT2x датчики на момент написання цього диплому вже не виробляються, але все ще доступні для роздрібної та оптової продажу. У майбутніх версіях конструкції COB можна використовувати більш нові датчики серії SHT4x виробництва тієї ж компанії, але слід зазначити, що пряма механічна сумісність (за розміром корпусу та місцем установки на платі) між датчиками двох зазначених серій відсутня. Однак можливо сконструювати плату з універсальним місцем установки для датчиків обох розмірів.

4. Конфігурація пристрою

Розроблюваний електронний модуль може використовуватися як вторинний ВП для масиву хеморезистивних датчиків, а також як сигналізатор (пристрій оповіщення) присутності ОР в зоні експонування датчиків. Основна частина зазначеної функціональності реалізується програмно в МПЗ центрального контролера, при цьому розділення відбувається на рівні протоколу взаємодії пристрою зі сполученим терміналом. Важливе місце в роботі пристрою займає калібрування - процес визначення значень ряду кількісних параметрів (в тому числі параметрів конфігурації), необхідних для коректного виконання процедур вимірювання та детекції ОР.

Параметри конфігурації поділяються на специфічні для вибраного вимірювального каналу (параметри конфігурації каналу) та загальні (параметри конфігурації пристрою). До параметрів конфігурації вибраного каналу належать, наприклад, метод вимірювання (прямий або балансний), напруга збудження датчика, поріг спрацювання тривоги, активність каналу (канал включено або вимкнено / ігнорується). До загальних параметрів конфігурації належать, наприклад, інтервал між вимірюваннями, калібрувальні коефіцієнти ЦАП, АЦП та аналогового компаратора; карта з'єднань у бездротовій мережі оповіщення; параметр калібрування генератора тактової частоти МК, роздільна здатність автокалібрування та автозапуску вимірювань.

Початкові значення параметрів конфігурації встановлюються під час налагодження кожного примірника пристрою та записуються в EPROM центрального контролера. Пізніше частину значень можна змінити командами з супутнього термінала, автоматично після калібрування або перезапису з ПЗП сенсор-картриджа. Змінені значення параметрів, які не пов'язані з конкретним примірником сенсор-картриджа, зберігаються в EPROM центрального контролера та застосовуються при всіх наступних включеннях пристрою. Значення параметрів можуть бути повернені до початкових (заводських) за допомогою команд з термінала або локального пульта.

5. Загальний алгоритм функціонування пристрою

Основою алгоритму функціонування є два процеси, які протікають переважно незалежно один від одного: вимірювання та обмін даними з супутнім терміналом.

Процес вимірювання відбувається циклічно та складається з циклів опитування вимірювальних каналів (тобто послідовного вимірювання вихідного сигналу кожного з чотирьох хеморезистивних датчиків та запису отриманих даних в оперативну пам'ять МК), які відбуваються через певні фіксовані інтервали часу (від ~ 1 с до 30 с). Якщо в налаштуваннях EPROM МК збережено дозвіл на автостарт, то вимірювання починаються автоматично після включення живлення, або за командою з термінала. Після завершення кожного циклу вимірювання контролер обчислює відносне відхилення вимірюваних значень сили струму від початкових, отриманих під час калібрування, і на підставі порівняння цього відхилення з попередньо встановленим порогом встановлює або знімає прапорець тривоги для відповідного вимірювального каналу. Поріг спрацювання тривоги специфічний для кожного датчика і зчитується з конфігураційного EPROM сенсор-картриджа або встановлюється під час конфігурування пристрою з термінала.

Процес обміну даними з терміналом відбувається асинхронно до процесу вимірювання та складається з транзакцій пакетів даних певного формату, що

ініціюються в будь-який момент часу. Обмін відбувається в напівдуплексному режимі: контролер СОР отримує від терміналу пакет з кодом запитаної операції (команди) та значеннями відповідних параметрів (аргументів), та відправляє у відповідь пакет даних, який відображає результат виконання команди. Результатом виконання команди можуть бути, наприклад, встановлення нових значень певних конфігураційних параметрів, зчитування результатів останнього циклу вимірювань, отримання інформації про поточний стан та конфігурацію виробу, тощо.

У проміжках між циклами вимірювань, якщо немає з'єднання з терміналом, контролер СОР переходить в режим зниженого енергоспоживання (РЗЕ, "сплячий" режим). Це стосується як центрального контролера, так і інших компонентів електричної схеми, що підтримують таку функціональність (зокрема, радіомодуля). Вихід з режиму РЗЕ відбувається через заданий інтервал часу між вимірювальними циклами, за сигналом встановлення з'єднання або отриманням даних від терміналу, або за активності локального пульта оператора (натисканні клавіші, встановленої на ДП). Якщо інтервал між вимірювальними циклами встановлений рівним нулю, РЗЕ не задіяно, і вимірювання відбуваються безперервно, тобто вимірювальні цикли слідує один за іншим без пауз.

6. ХЕМОРЕЗИСТИВНІ ДАТЧИКИ

6.1 Електрична схема

Електрична принципова схема плати сенсор-картриджа наведена на рис. 2. На платі є масив з чотирьох хеморезистивних датчиків, що умовно показані як змінні резистори R5-R8, мікросхема перезаписуваної постійної пам'яті та контактна частина роз'єму X1 на 13 виводах. Міжпласківка J1 встановлюється в положення 1 під час програмування мікросхеми EPROM DD1, і в положення 2 в робочому стані.

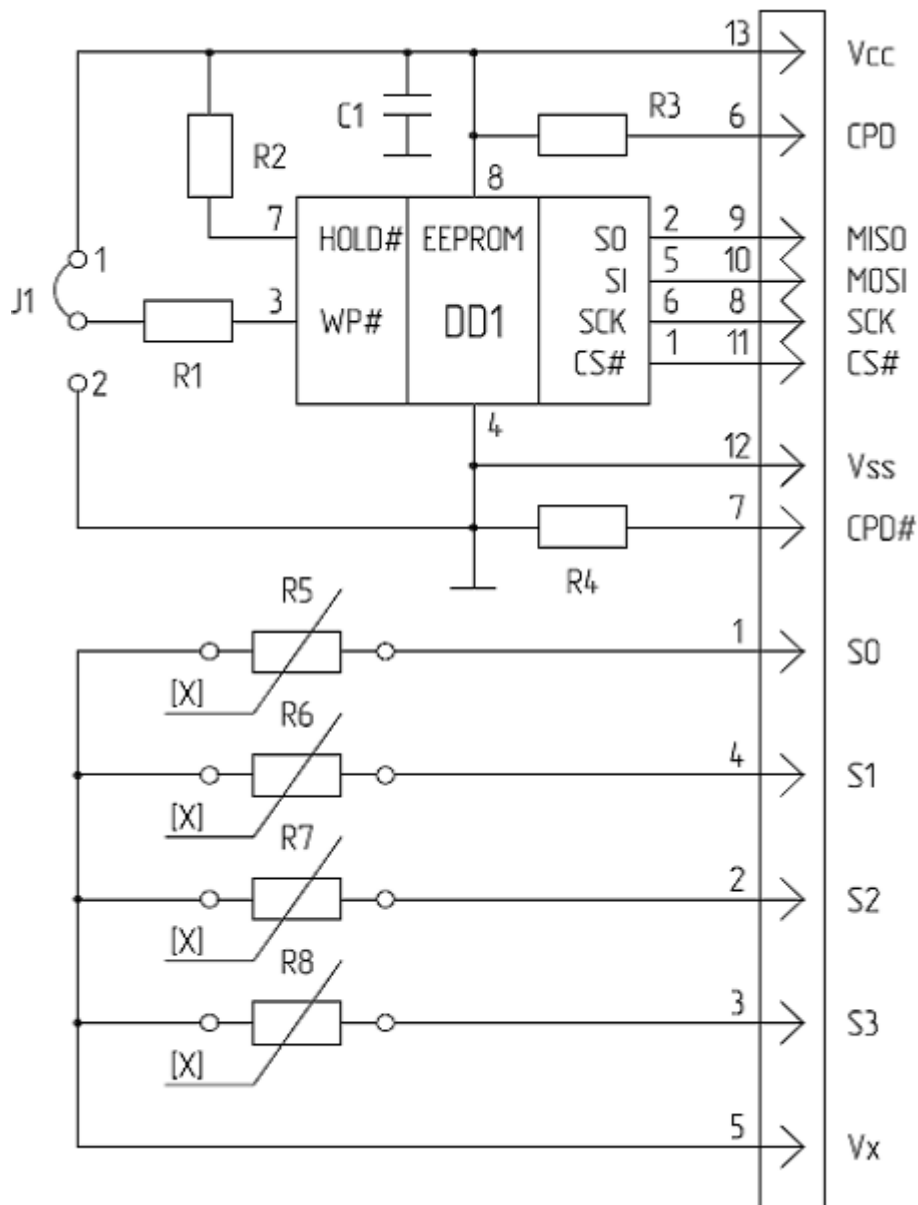


Рис.2. Схема електрична принципова сенсор-картриджа.

6.2 Конструкція сенсор-картриджа

Наразі конструкція сенсор-картриджа ще не остаточно визначена, проте було реалізовано декілька тестових варіантів цього змінного модуля.

З урахуванням схеми підключення чотирьох датчиків з одним спільним виводом в розробленому пристрої, конструкція датчиків з одностороннім розміщенням виводів та поздовжнім розташуванням підкладок не є оптимальною. Більш успішною була б конструкція зменшеного розміру датчика з двостороннім розташуванням виводів. Тим не менш, наявні типові датчики також можна

розмістити на зазначеній площі (рис. 5, варіант без мікросхеми EPROM). На рисунку показано розміщення токопровідних провідників по одній стороні плати картриджа, проте при використанні двосторонньої друкованої плати розташування датчиків та допоміжних компонент на картриджі значно спрощується, хоча за цієї умови збільшується його собівартість.

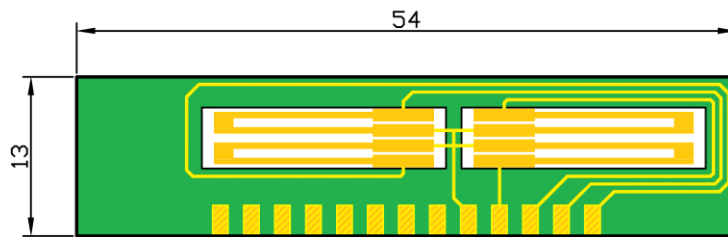


Рис.3. Розташування спарених хеморезистивних датчиків з одностороннім розташуванням виводів (на підложках 5x20 мм) на платі сенсор-картриджа, сумісної з платою електронного модуля.

6.3 Детектування присутності сенсор-картриджа

Наявність підключеного до роз'єму X1 сенсор-картриджа визначається за сигналом CPD# (контакт №11 роз'єму X1), який контролер відслідковує на вході PB6 (вивід №7 мікросхеми D2). Присутність картриджа детектується на початку кожного циклу вимірювання або калібрування. Для цього контролер COP притягує цифровий вхід PB6 до лінії живлення записом одиниці в відповідний розряд регістру PORTB. Якщо картридж не встановлений, напруга на вході PB6 при цьому піднімається до рівня логічної одиниці (так як опір внутрішнього підтягуючого резистора цифрового входу МК на порядок менший опору зовнішнього резистора R24, який з'єднує вхід PB6 з загальною точкою схеми). Якщо ж картридж встановлений, паралельно до резистора R24 включається резистор R104, змонтований на платі С-К, опір якого на два порядки менший за опір R24. Відповідно, при підключенні внутрішнього підтягуючого резистора на вході PB6 зберігається рівень логічного нуля.

Описаний алгоритм детектування картриджа обумовлений вимогою мінімізації споживання енергії та побудований таким чином, що струм через резистори R24, R104 протікає лише короткочасно, безпосередньо під час детектування. Присутність картриджа детектується одноразово в межах вимірювального циклу. Якщо картридж не виявлено, вимірювання в даному циклі не проводяться, а дані вимірювань обнуляються.

Прапор присутності картриджа є однією зі змінних стану виробу і передається на з'єднаний термінал за запитом з останнього. При виявленні підключеного картриджа контролер COP намагається прочитати з нього конфігураційну інформацію через інтерфейс SPI (виводи №№14–17 мікросхеми контролера D2, контакти №№8–11 роз'єму X1). Деталі протоколу обміну даними між МК та с-к, переліку та формату представлення конфігураційних параметрів на даний момент не визначені і будуть уточнюватися в ході подальшої розробки та тестування макетного зразка. Конфігураційними параметрами, специфічними для кожного екземпляра с-к, можуть бути, наприклад, рекомендовані значення напруг збудження або приблизні початкові значення опорів хеморезисторів, коефіцієнти температурної залежності опорів та їх чутливості до атмосферної вологості, пороги спрацювання тривоги для даного набору датчиків, дати виготовлення датчиків тощо.

Крім прапора присутності картриджа (SC_PRESENT), у процедурі конфігурування масиву датчиків задіяні також прапори перепідключення картриджа (SC_RECONNECT) та зміни картриджа (SC_CHANGE). Прапор SC_RECONNECT встановлюється у випадку, якщо у попередньому вимірювальному циклі картридж не був виявлений, але присутній у поточному циклі. Якщо попередній та поточний стан прапора SC_PRESENT однакові, прапор SC_RECONNECT скидається. ППЗП

Записані в ППЗП с-к конфігураційні дані містять серійний номер, який є унікальним для кожного картриджа. Серійний номер зчитується перед усіма

іншими параметрами і порівнюється з номером, зчитаним у попередньому циклі. Флаг зміни картриджа SC_CHANGE встановлюється, якщо номери не співпадають, і знімається в іншому випадку. Інші конфігураційні дані зчитуються з ППЗП с-к тільки у разі встановлення хоча б одного з прапорців SC_CHANGE або SC_RECONNECT, тобто якщо картридж було вийнято та перепідключено, інакше сесія обміну даними з картриджем завершується і використовуються попередні значення параметрів конфігурації.

Якщо мікросхема ППЗП на с-к відсутня, несправна або містить невалідні дані, контролер COP використовує значення відповідних конфігураційних параметрів, прийняті за замовчуванням (записані в EPROM МК під час його програмування), або отримані від хоста через інтерфейс зв'язку. При передачі конфігураційних даних хост також встановлює їх пріоритет - вищий або нижчий, ніж у відповідних параметрів, зчитаних з картриджа. Пріоритет може встановлюватись для окремих параметрів (або груп параметрів) незалежно. Якщо отримане від хоста значення параметра має високий пріоритет, воно буде використовуватись навіть у випадку наявності успішно зчитаних з картриджа конфігураційних даних.

Считування конфігураційних даних з картриджа також може бути ініційовано командою з терміналу, у довільний момент часу незалежно від стану прапорців SC_CHANGE та SC_RECONNECT.

Після завершення процедури виявлення с-к та зчитування параметрів конфігурації картриджа може автоматично запуститись процедура калібрування датчиків, якщо автокалібрування дозволено встановленням відповідного глобального параметра конфігурації виробу, і якщо встановлено хоча б один із прапорців SC_CHANGE або SC_RECONNECT.

На старті мікропрограми контролера COP після включення (циклів) живлення або скидання контролера командою з терміналу, попереднє значення прапорця SC_PRESENT вважається рівним нулю. Таким чином, зчитування конфігурації з ППЗП с-к та автоматична калібрування датчиків завжди ініціюються при першому

виявленні с-к після включення або перезапуску виробу з підключеним картриджем.

6.4 Калібрування датчиків

Процедура калібрування датчиків запускається або автоматично при виявленні перепідключення сенсор-картриджа, або примусово за командою зі зв'язаного терміналу або з місцевого пульта оператора (визначеної послідовністю натискань перемикача SB1).

Цілями калібрування є встановлення оптимальних величин напруги збудження для кожного датчика (для методу прямого вимірювання), і визначення початкових значень опорів хеморезисторів, відносно яких далі визначаються відгуки на присутність ОР.

Процес калібрування складається із трьох етапів:

1. Автоматичне визначення оптимальних значень напруги збудження (НЗ) для кожного вимірювального каналу. На цьому етапі напруга збудження вибраного датчика змінюється до тих пір, поки вимірювана величина струму не потрапить у задані межі на околиці середини діапазону допустимих значень (тобто середини повного діапазону вимірюваних струмів СОР). Остаточне значення керуючого коду ЦАП для формувальника напруги запам'ятовується контролером СОР та використовується для всіх наступних вимірювань (прямим методом) до повторного калібрування або до примусової установки іншого значення командою з терміналу. Процедура повторюється для кожного датчика. Якщо струм в вибраному каналі не регулюється, канал позначається як дефектний, а значення напруги збудження для нього встановлюється згідно з конфігурацією, прочитаною з с-к, отриманої від хоста або прийнятої за замовчуванням.

Перший етап калібрування може бути пропущений, якщо встановлений відповідний прапор у глобальній конфігурації виробу. В цьому випадку при

подальших вимірюваннях для всіх каналів використовуються величини НЗ датчиків, прийняті в поточній конфігурації (згідно з значеннями відповідних параметрів, зчитаним з с-к, отриманим від хоста, знайденим при попередньому калібруванні або прийнятим за умовчанням).

2. Визначення струмів базової лінії вимірювань прямим методом. На цьому етапі проводиться кілька (2..8) циклів вимірювання при НЗ датчиків відповідних значень, отриманих на першому етапі калібрування (або взятим з поточної конфігурації, якщо перший етап був пропущений). Результати вимірювань усереднюються за проведеними циклами та зберігаються в оперативній пам'яті МК.

3. Визначення НЗ базової лінії для вимірювання балансним методом. Аналогічно на попередньому етапі проводитиметься 2..8 циклів вимірювань, отримані значення усереднюються і зберігаються в оперативній пам'яті контролера.

У разі отримання аномальних результатів на іншому або третьому етапі (тобто значень близьких до нижньої чи верхньої межі) відповідний канал також позначається як дефектний. Прапори дефектності першого, другого та третього етапів є різними змінними станами.

Параметри вимірювальних циклів при калібруванні - наявність модуляції, число періодів модуляції в циклі, полярність НЗ при якій здійснюється вибірка даних - визначаються поточними значеннями параметрів конфігурації масиву датчиків (зчитаної з ППЗП-к, отриманої від хоста або прийнятої за умовчанням). Кількість вимірювальних циклів калібрування є глобальним параметром конфігурації виробу, і за умовчанням встановлюється рівним чотирма, але може бути змінено командою з терміналу.

Метод виміру (прямий або балансний) є конфігураційним параметром, що є специфічним для кожного вимірювального каналу. Однак, при калібруванні цей

параметр не враховується, і другий та третій етапи проводяться для всіх чотирьох каналів. Таким чином, не потрібно повторювати калібрування в разі перемикання методу вимірювань у ході подальшої роботи з виробом.

Процес калібрування може бути перерваний командою з терміналу в будь-який момент часу. Виконання калібрування відображається у змінному стані виробу, яка може мати значення "не калібровано", "калібрується", "успішно калібровано", "калібровано з помилками" та "калібрування перервано". Процес калібрування також супроводжується світловою індикацією (блманням світлодіода) на пульті оператора.

6.5 Хеморезистивні електроди та чутливі шари

Чутливі шари наносили на растрові золоті електроди, сформовані на склокерамічних підкладках за допомогою фотолітографії. Золоті електроди товщиною близько 150 нм отримувались термічним випаровуванням у вакуумі. Кожен сенсорний елемент містив 20 пар растрових електродів розміром 1050×20 мкм, розділених зазором 20 мкм. Отримані чутливі шари мали площу біля 2 мм^2 , з типовою товщиною чутливого шару від 100 до 200 нм. На кожній підкладці розміщувались два однотипних сенсорних елементи (рис.1). Опір отримуваних сенсорних елементів з чутливими шарами складав приблизно від 20 Ом до 20 кОм.



Рис.4. Хеморезистивні датчики з растровими золотими мікроелектродами, вкриті шаром нанокompозиту.

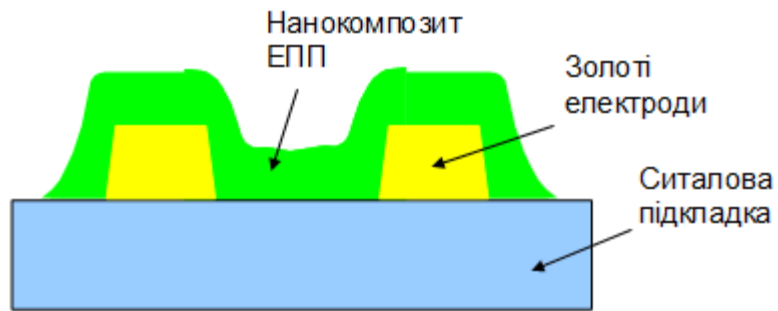


Рис.5. Схема формування нанокompозиту типу "ядро - оболонка", де ядром є темплатна наночастинка, а оболонкою – електропровідний полімер;

7. Експериментальна установка

За величину сенсорного відгуку на цільові газові аналіти приймали зміну постійного струму через кожний хеморезистор за прикладеної до нього регульованої опорної напруги. Струм вимірювали за допомогою 6-канального електричного перетворювача типу вхідний струм – вихідна напруга на основі операційних підсилювачів 140UD17, поєднаних з аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) з розрядністю 12 біт із вхідним діапазоном 5 В. Кожний канал вказаного перетворювача формує регульовану опорну напругу, що подається на досліджуваний хеморезистивний елемент R , має окреме джерело стабілізованої напруги та регульоване значення коефіцієнту підсилення в діапазоні від 1 до 10000. Діапазон зміни опорної напруги становить 0-500 мВ, діапазон вихідних сигналів АЦП становить 0-5 В, дискретність АЦП біля 1 мВ. Діапазон значень вимірюваних опорів становить 10 Ом – 10 МОм, для значень R , більших за 1 МОм, передбачено перемикання опорної напруги з діапазону 0-500 мВ на діапазон 0-5 В. Електрична схема одного з каналів такого перетворювача приведена на рис.6.

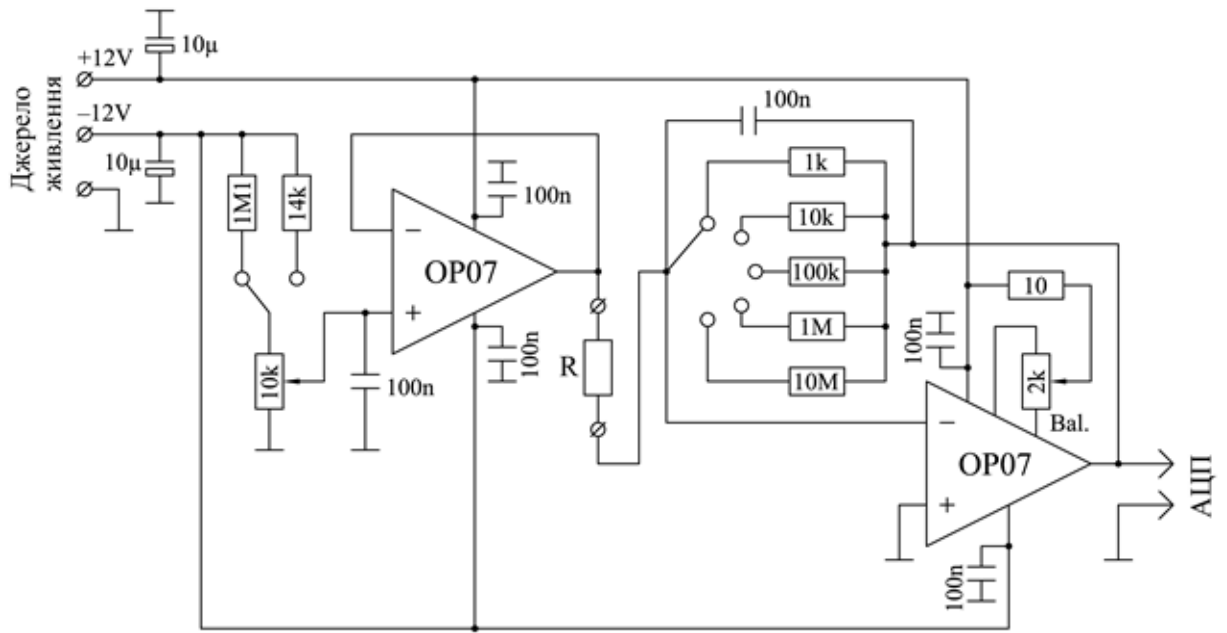


Рис.6. Електрична принципова схема одного з каналів 6-ти каналного перетворювача типу струм-напруга.

Фізична величина, що безпосередньо вимірюється в експерименті, є напруга на виході перетворювача, яка прямо пропорційна струму через сенсор, який в свою чергу, пропорційний електропровідності чутливого шару сенсору. Отже, реакцію датчика можна визначити як зміну величини провідності сенсорного елемента (або його опору) при взаємодії з парами аналіту. Внаслідок значного розкиду електричних параметрів сенсорів значення зареєстрованих відгуків конвертувались у відносну зміну опору сенсору:

$$\delta R = \frac{R - R_0}{R_0} = \frac{U_0 - U}{U},$$

де R , U – опір сенсору та напруга на виході вторинного перетворювача після експозиції аналіту, R_0 , U_0 – початкове значення опору та вихідної напруги за відсутності парів аналіту.

8. Методика вимірювань

Експозиція повітряних сумішей парів окремих аналітів проводилось за допомогою інжекційної або проточної системи напуску. Було розроблено та

виготовлено кілька варіантів фторопластових кювет об'ємом біля 10-15 мл для встановлення одночасно від 6 до 12 електродів. Бажану концентрацію аналіту в межах 10-1000 ppm формували шляхом послідовних розбавлень його насиченої пари (відібраної при 20°C) кімнатним повітрям. Для цього 5-15 мл насиченої пари аналіту розбавляли повітрям за допомогою медичного шприцу об'ємом 50-100 мл. Для кожного аналіту використовували окремий шприц. Розрахунок отриманої концентрації аналіту проводили за формулою:

$$C = \frac{P_{sv}}{P_a} \left[\frac{V_{va}}{V} \right]^N 10^6 \text{ (ppm)},$$

де C – концентрація аналіту, P_{sv} – тиск його насичених парів при даній температурі (табл. значення), P_a – атмосферний тиск, V_{va} – об'єм зразка з парами аналіту, V – об'єм камери (шприца), в якому зразок розбавляли повітрям, N – кількість циклів послідовного розведення.

Далі вимірювались сенсорні відгуки на протязі 2-5 хв. Після експозиції камера продувалася багатократним введенням атмосферного кімнатного повітря (10-20 об'ємів камери) перед початком наступної інжекції зразків пару. Всі вимірювання проводилися за фіксованої температури, що лежала в межах від 18 до 20°C, стабілізованої за допомогою кімнатного кондиціонування з точністю до $\pm 0,5^\circ\text{C}$.



Рис.7. Фото багатоканального сенсорного вимірювача



Рис.8. Фото герметичної тефлонової камери з хеморезистивними мікроелектродами в утримувачі.

9. Експериментальні результати

На першому етапі експерименту було проведено тестування датчиків з використанням ацетону як аналіту при температурі 20 градусів та відсутності вологості. У складі датчиків використовувалися різні типи плівок, зокрема два з них містили електропровідний політриметилтіофен, що був легований хлором (P3MT-Cl), а інші два - композит з електропровідного політриметилтіофена, легованого хлором та вуглецевих нанотрубок (P3MT-Cl\CNT).

Відгуки дачика №1:

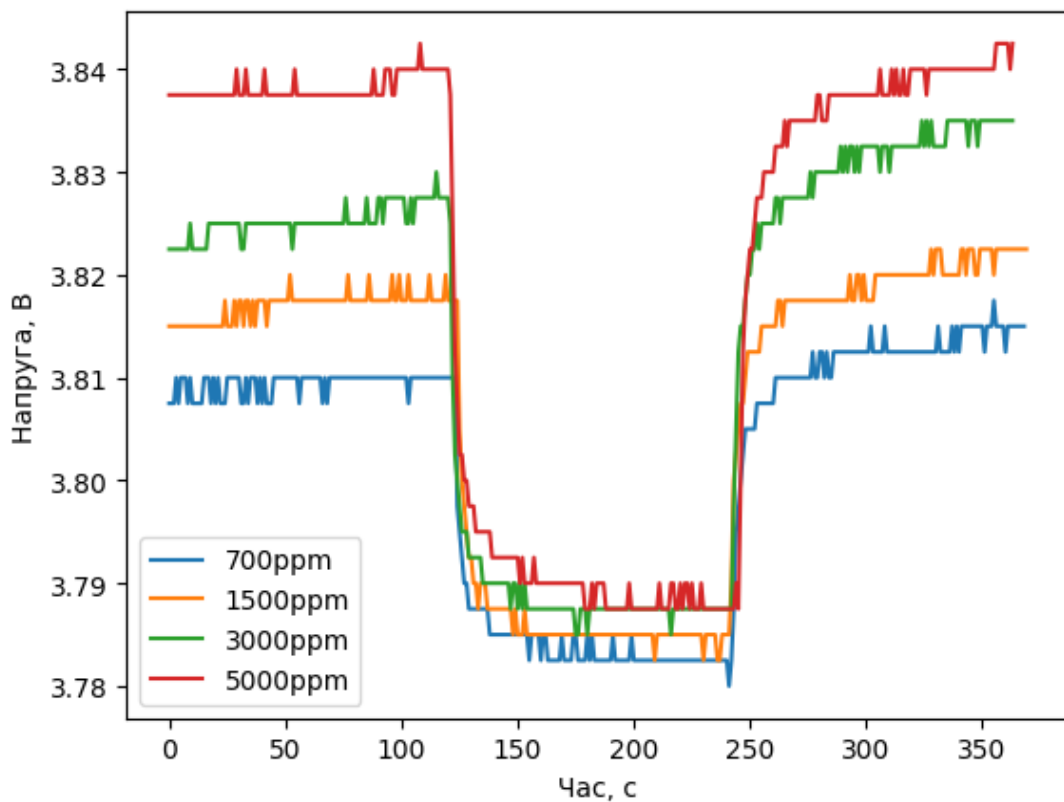


Рис.9, Відгук дачика №1 на вміст аналіту 700ppm, 1500ppm, 3000ppm, 5000ppm.

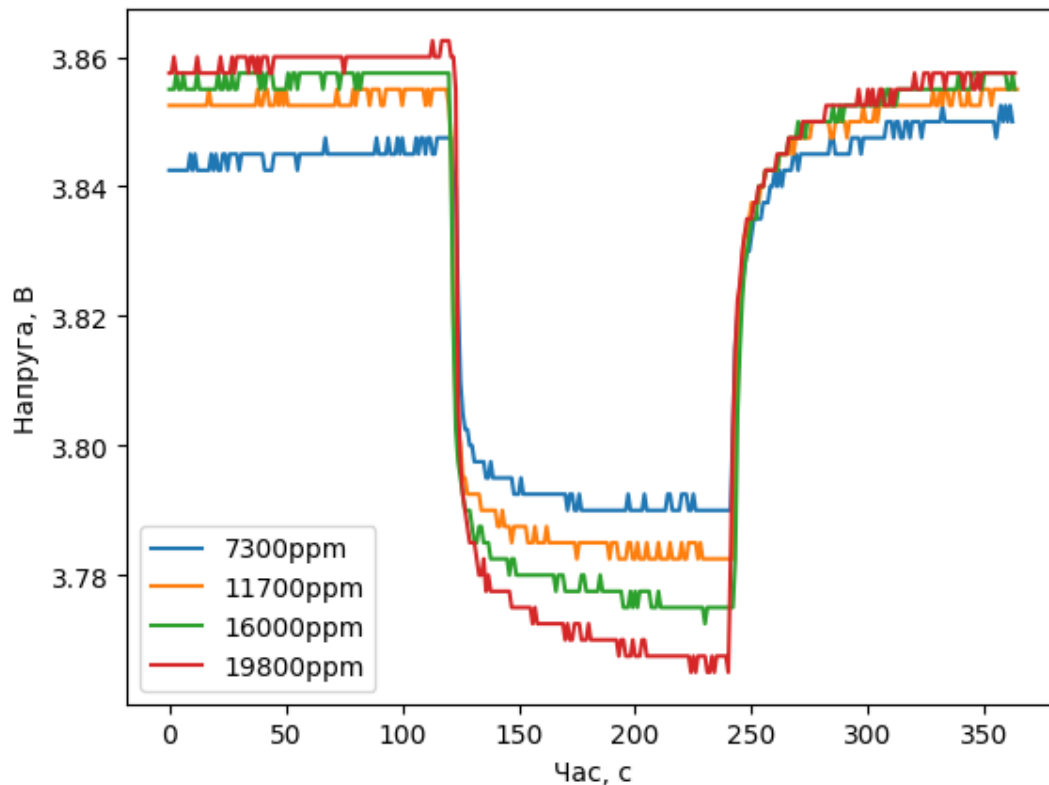


Рис.10, Відгук дачика №1 на вміст аналіту 7300ppm, 11700ppm, 16000ppm, 19800ppm.

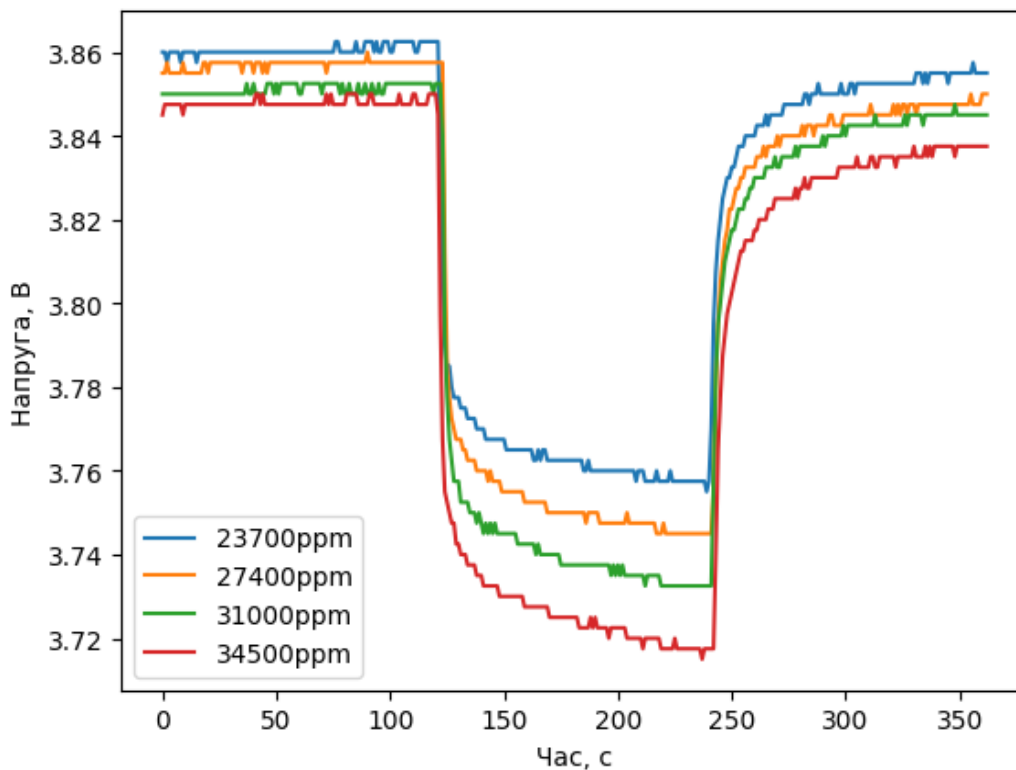


Рис.11, Відгук дачика №1 на вміст аналіту 23700ppm, 27400ppm, 31000ppm, 34500ppm.

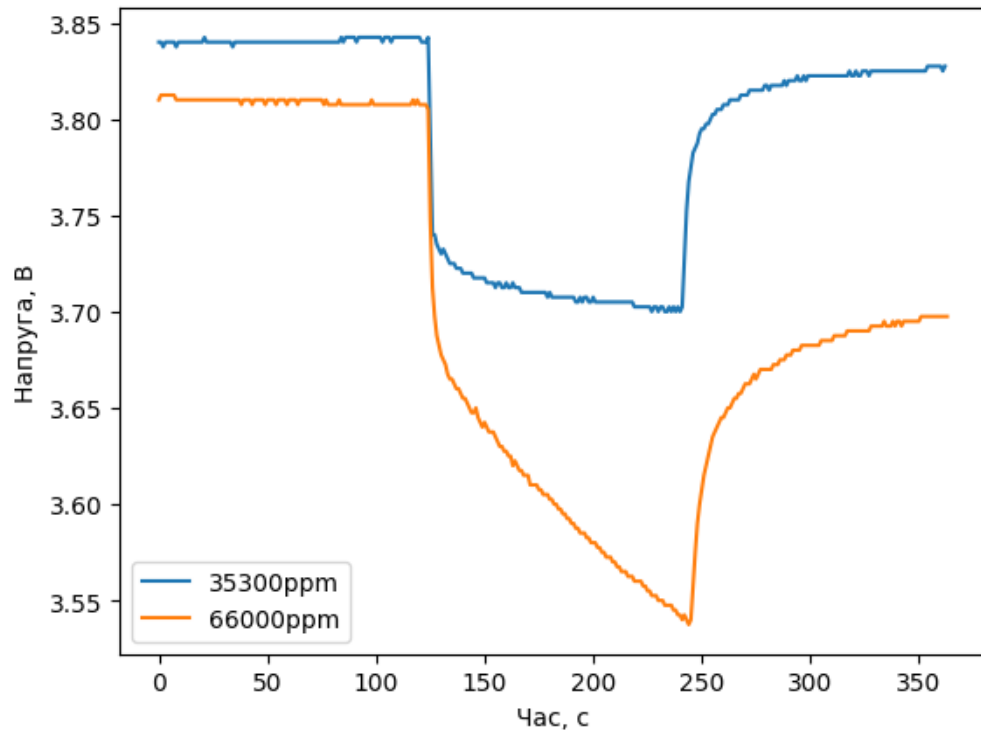


Рис.12, Відгук дачика №1 на вміст аналіту 35300ppm, 66000ppm.

Відгуки дачика №2:

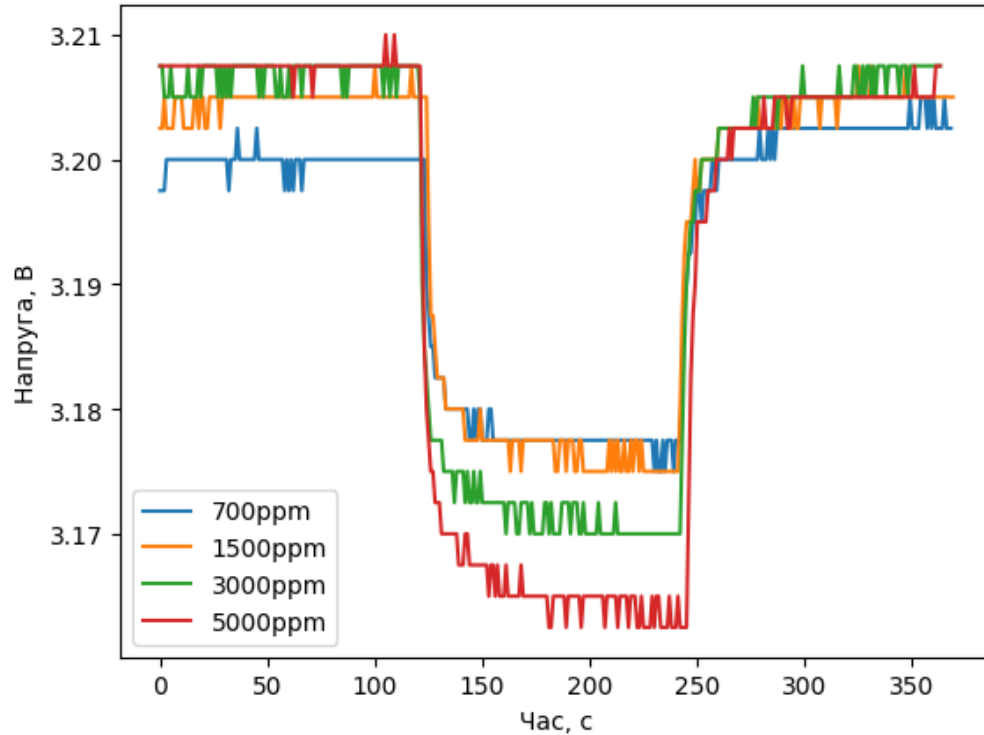


Рис.13, Відгук дачика №2 на вміст аналіту 700ppm, 1500ppm, 3000ppm, 5000ppm.

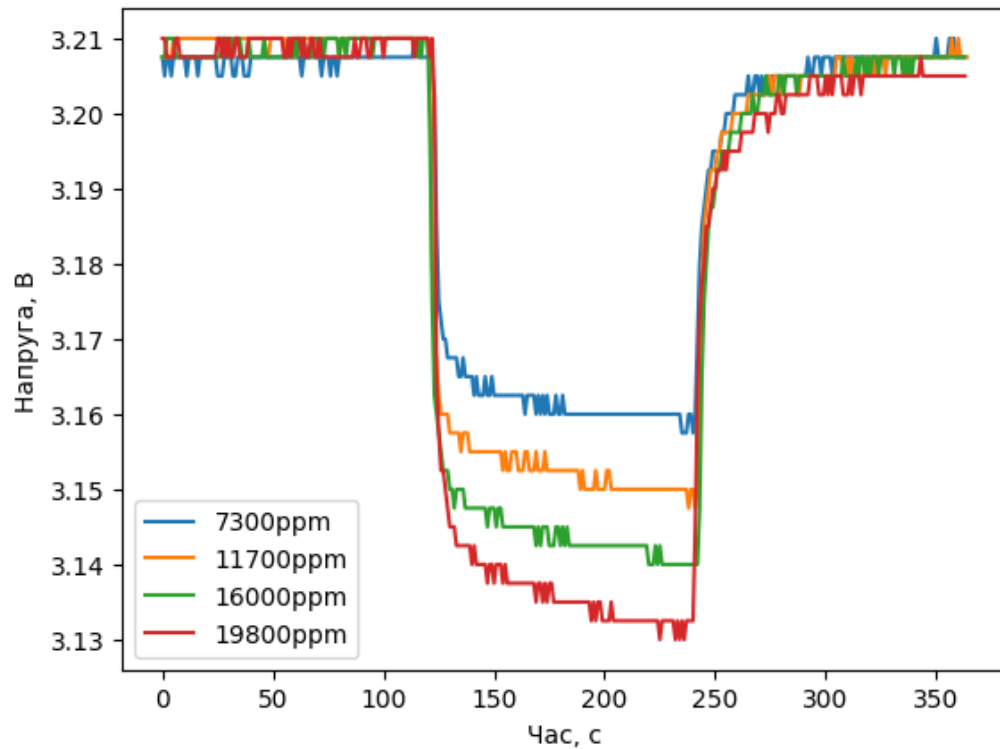


Рис.14, Відгук дачика №2 на вміст аналіту 7300ppm, 11700ppm, 16000ppm, 19800ppm.

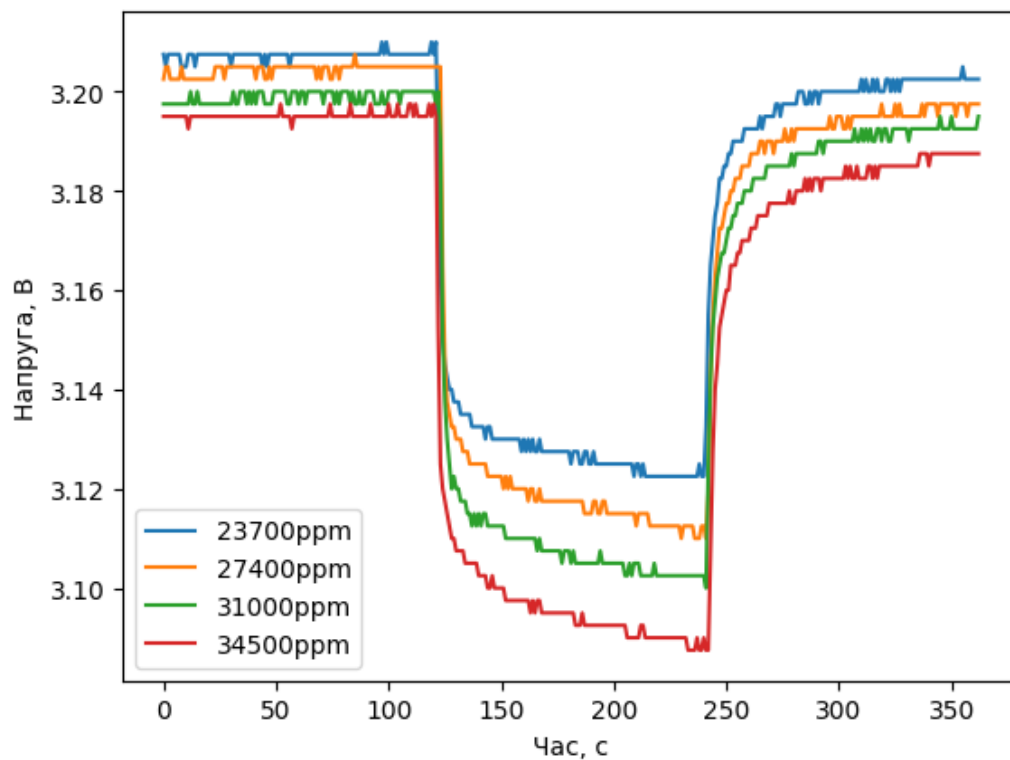


Рис.15, Відгук дачика №2 на вміст аналіту 23700ppm, 27400ppm, 31000ppm, 34500ppm.

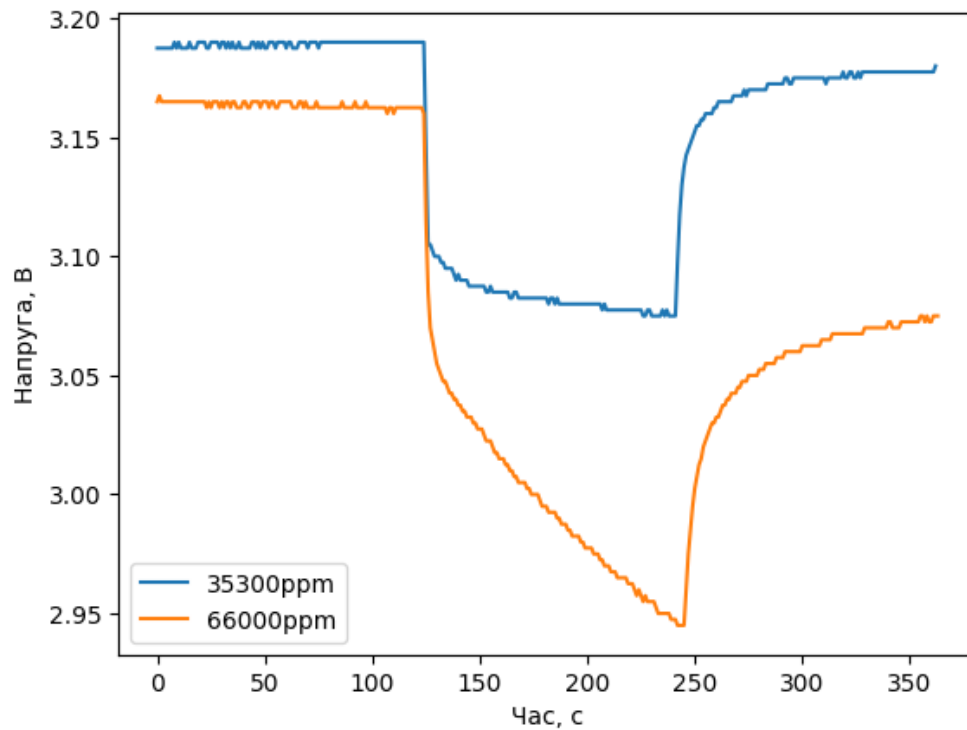


Рис.16, Відгук дачика №2 на вміст аналіту 35300ppm, 66000ppm.

Відгуки дачика №3:

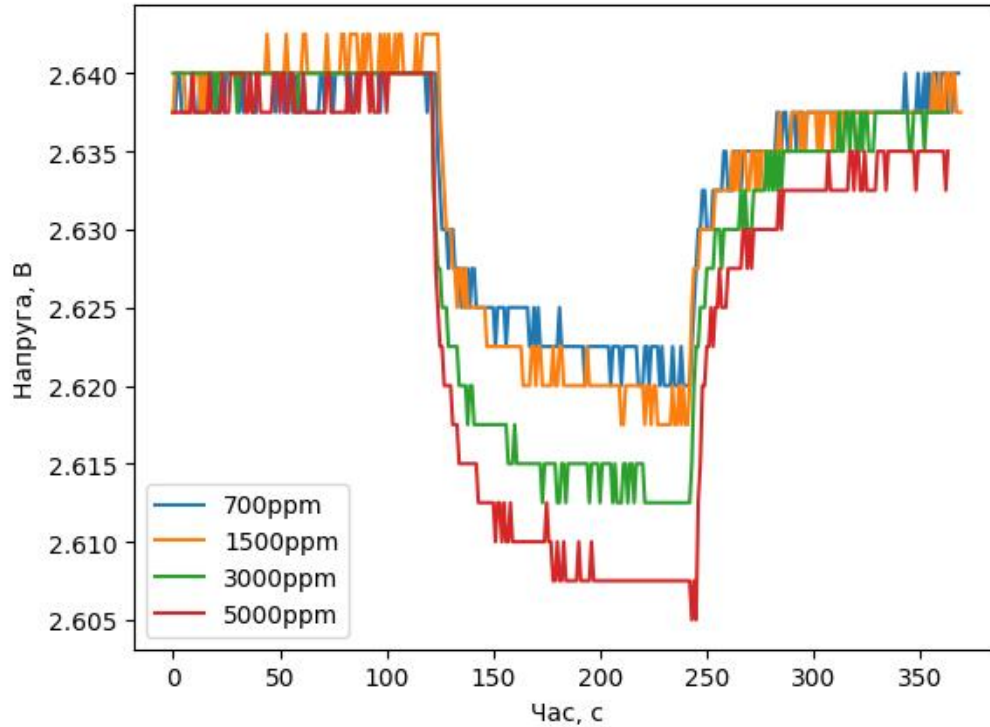


Рис.17, Відгук дачика №3 на вміст аналіту 700ppm, 1500ppm, 3000ppm, 5000ppm.

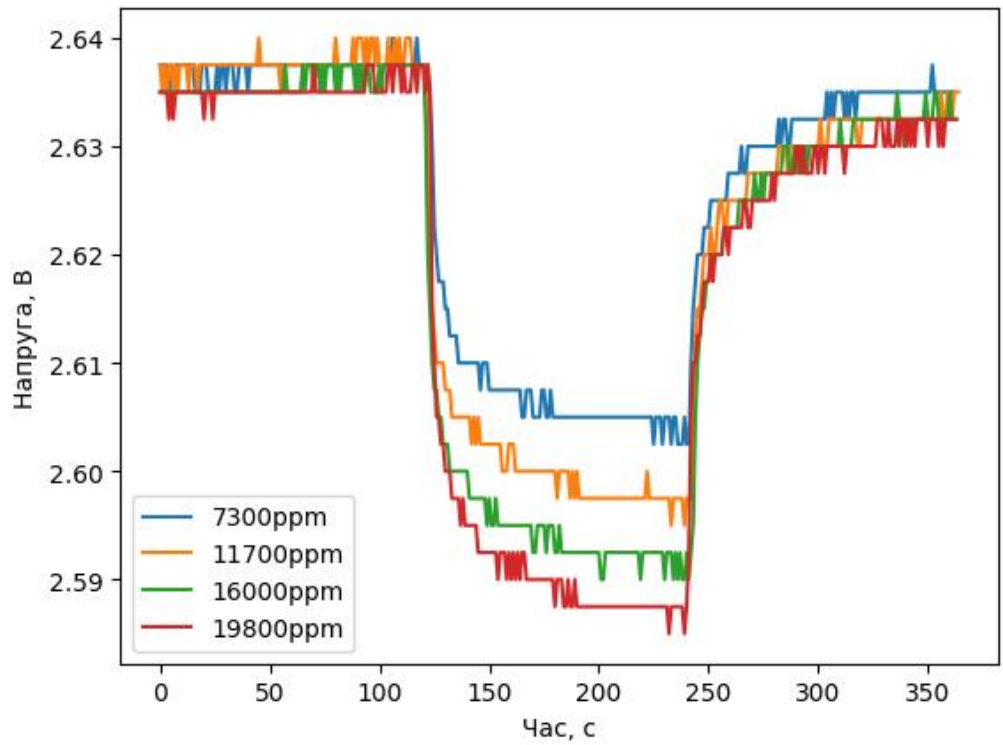


Рис.18, Відгук дачика №3 на вміст аналіту 7300ppm, 11700ppm, 16000ppm, 19800ppm.

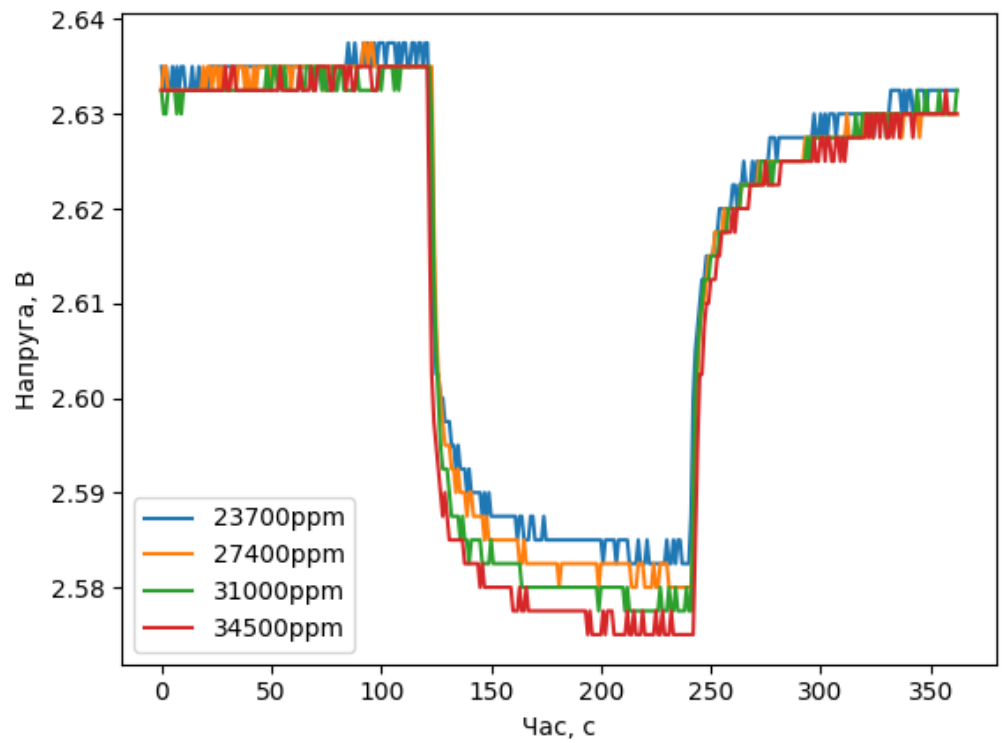


Рис.19, Відгук дачика №3 на вміст аналіту 23700ppm, 27400ppm, 31000ppm, 34500ppm.

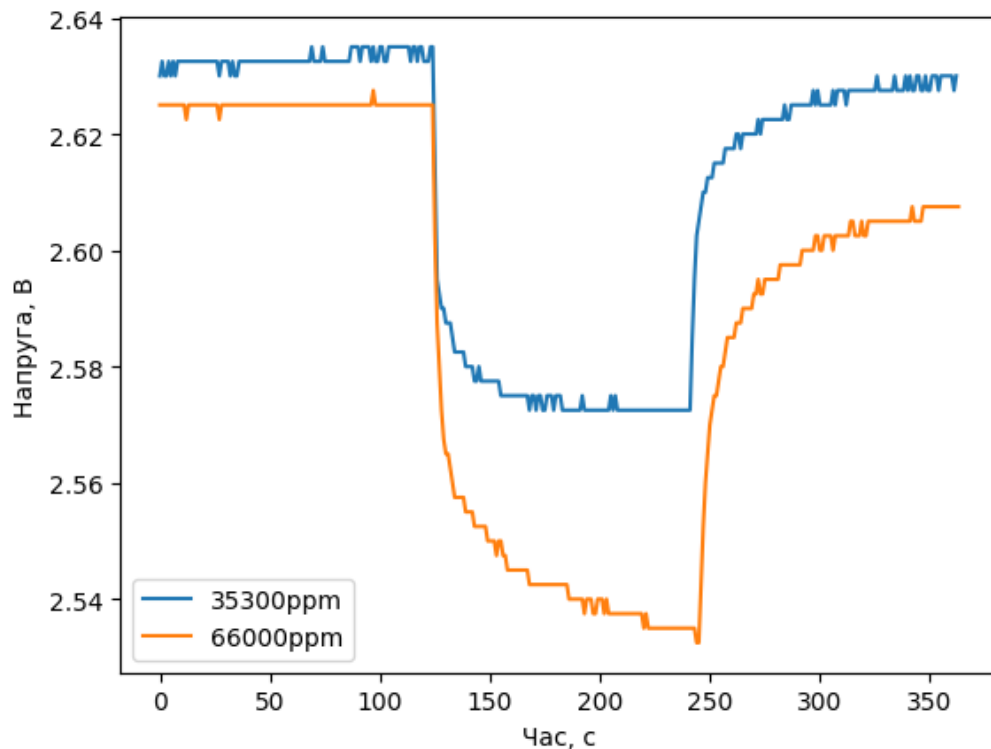


Рис.20, Відгук дачика №3 на вміст аналіту 35300ppm, 66000ppm.

Відгуки дачика №4:

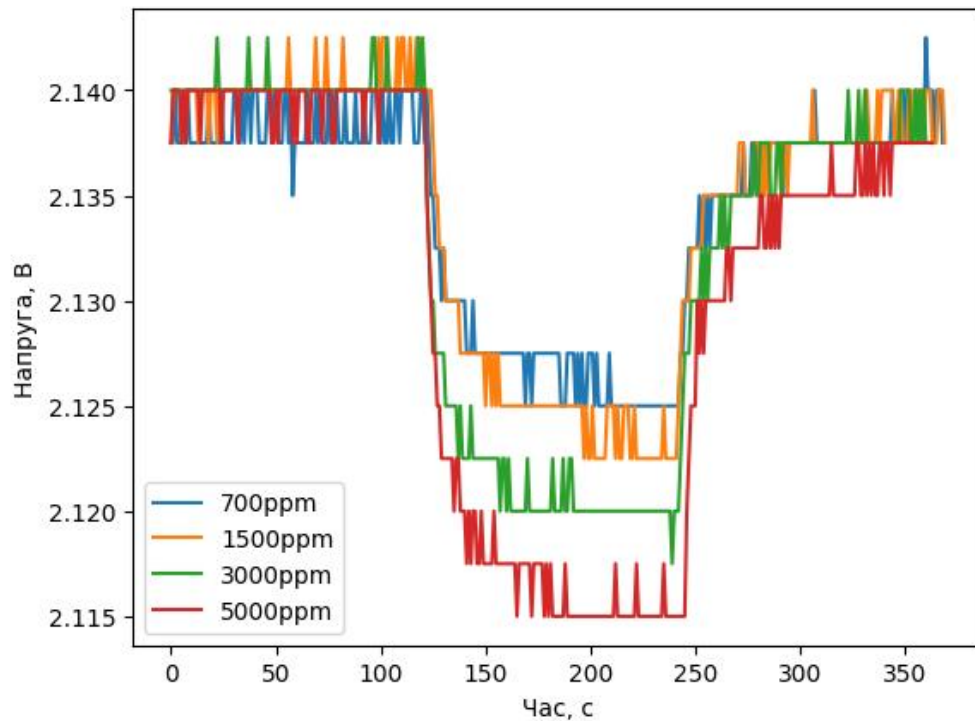


Рис.21, Відгук дачика №4 на вміст аналіту 700ppm, 1500ppm, 3000ppm, 5000ppm.

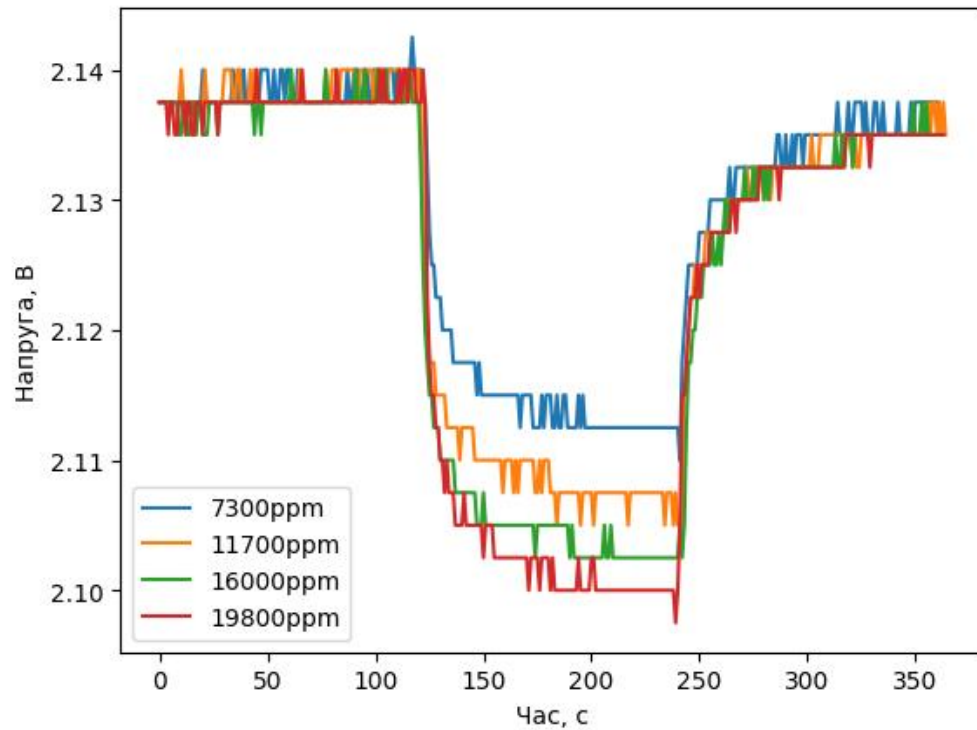


Рис.22, Відгук дачика №4 на вміст аналіту 7300ppm, 11700ppm, 16000ppm, 19800ppm.

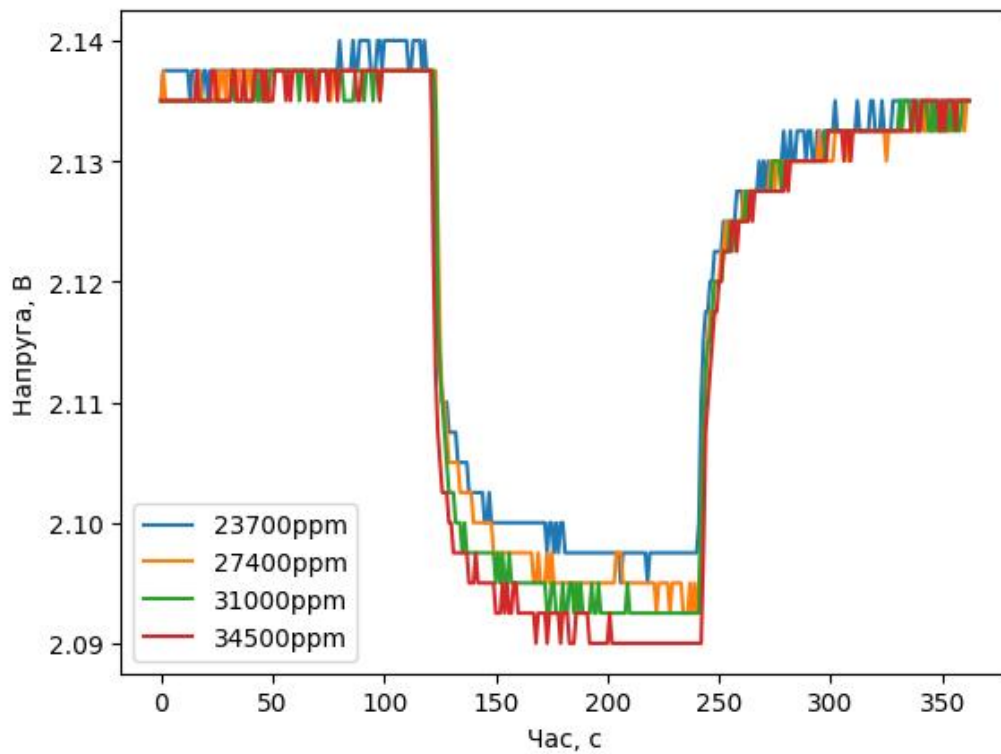


Рис.23, Відгук дачика №4 на вміст аналіту 23700ppm, 27400ppm, 31000ppm, 34500ppm.

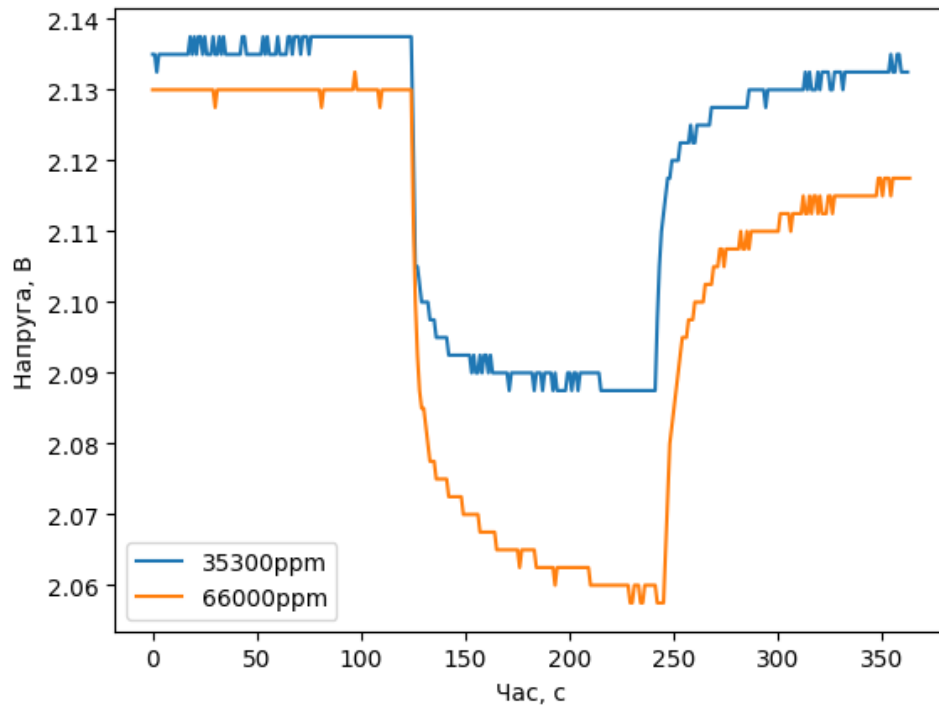


Рис.24, Відгук дачика №4 на вміст аналіту 35300ppm, 66000ppm.

В другому етапі ми змінюємо вологість до 50% і робимо повторні заміри.

Відгуки дачика №1:

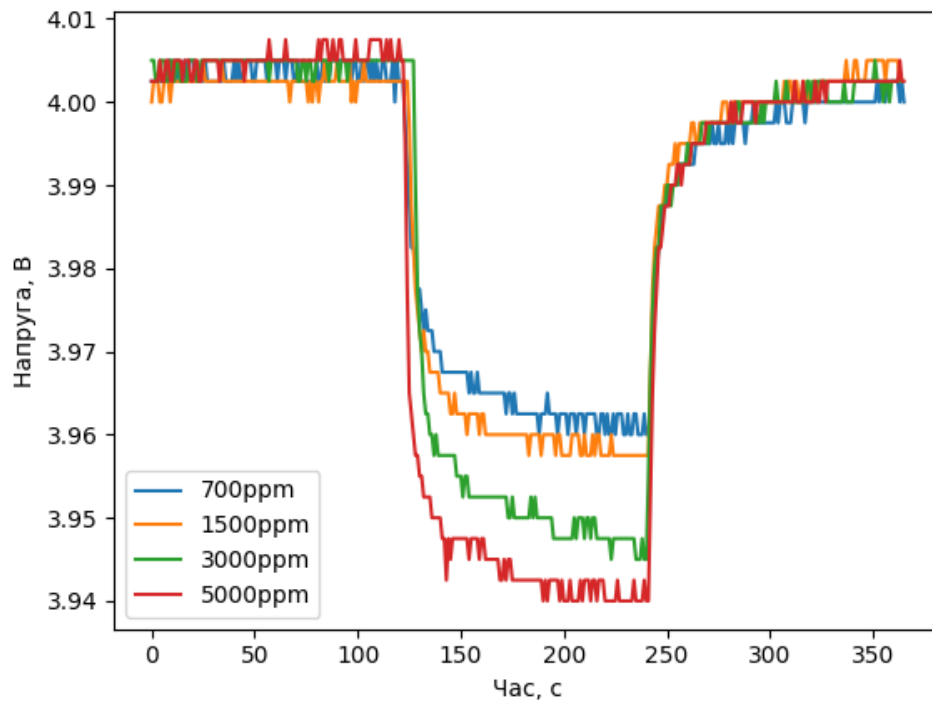


Рис.25, Відгук дачика №1 на вміст аналіту 700ppm, 1500ppm, 3000ppm, 5000ppm.

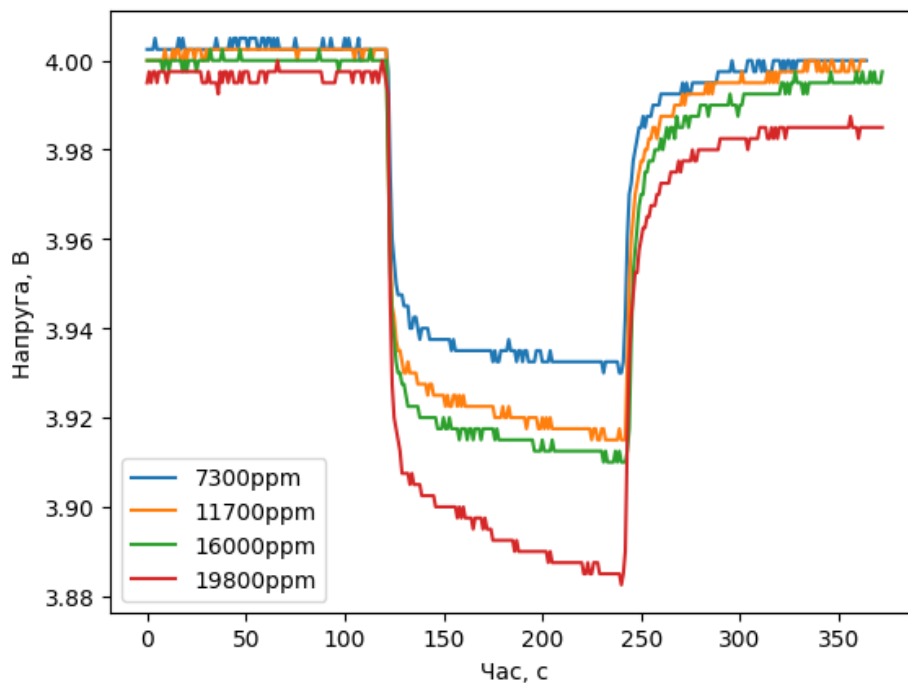


Рис.26, Відгук дачика №1 на вміст аналіту 7300ppm, 11700ppm, 16000ppm, 19800ppm.

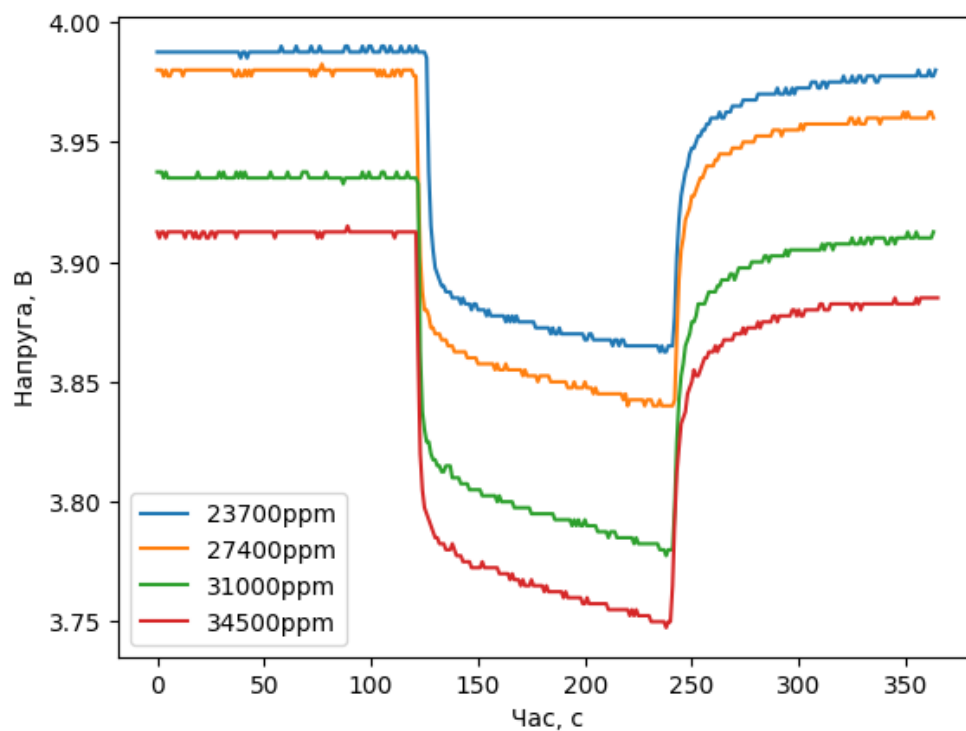


Рис.27, Відгук дачика №1 на вміст аналіту 23700ppm, 27400ppm, 31000ppm, 34500ppm.

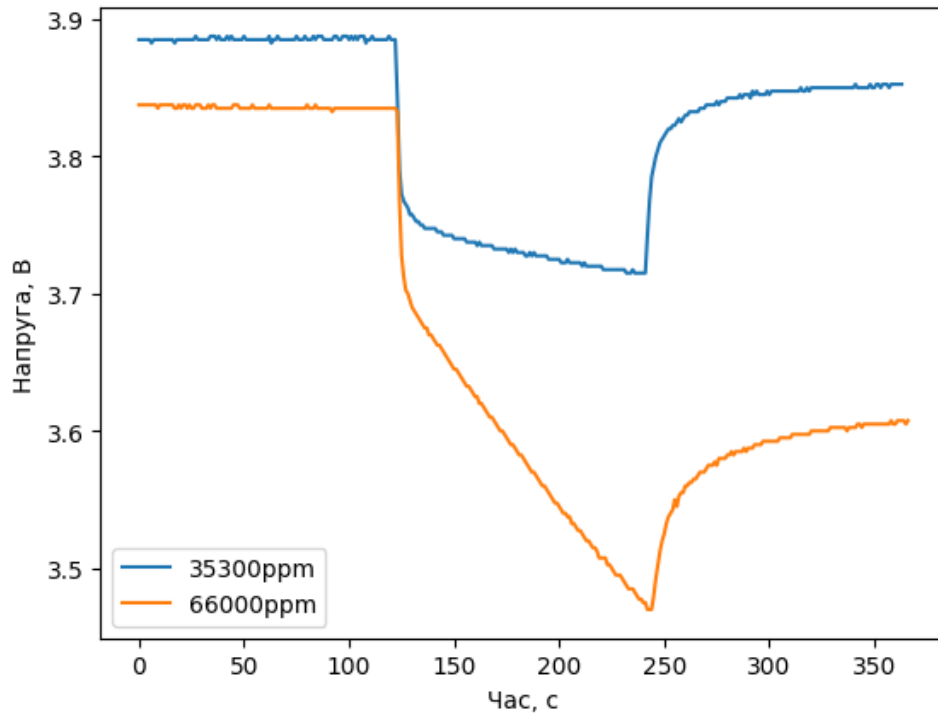


Рис.28, Відгук дачика №1 на вміст аналіту 35300ppm, 66000ppm.

Відгуки дачика №2:

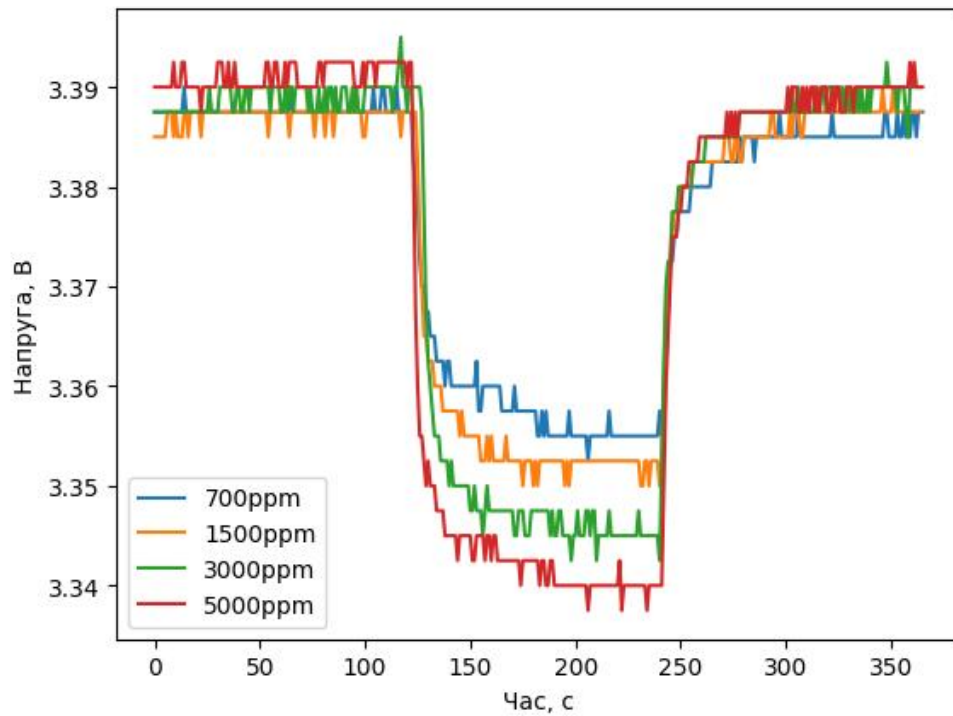


Рис.29, Відгук дачика №2 на вміст аналіту 700ppm, 1500ppm, 3000ppm, 5000ppm.

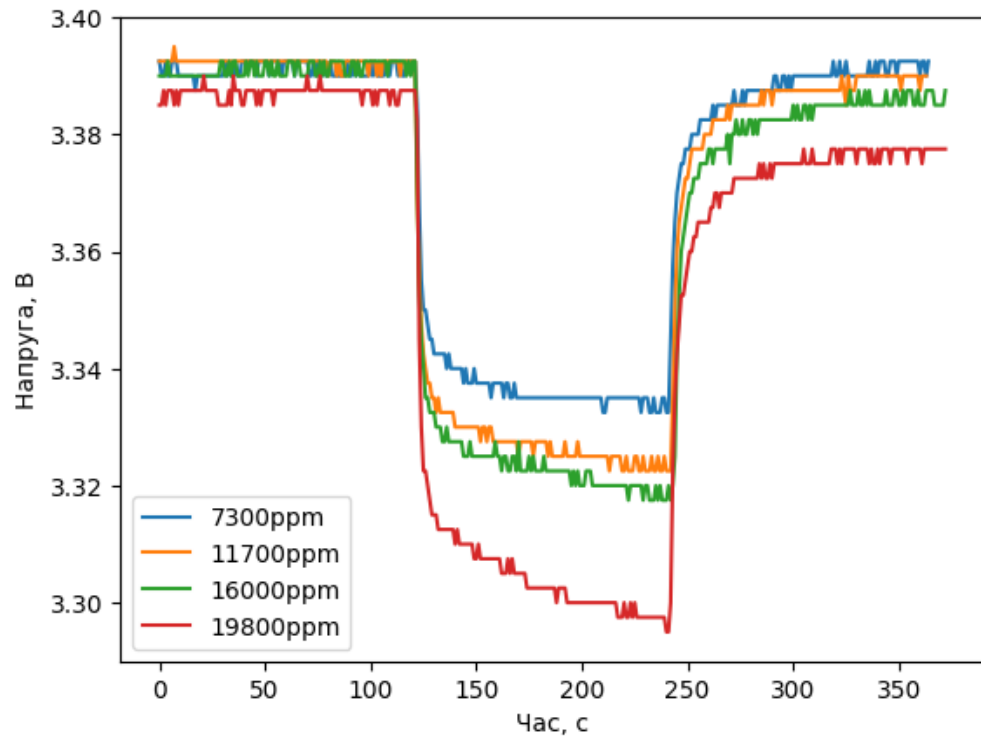


Рис.30, Відгук дачика №2 на вміст аналіту 7300ppm, 11700ppm, 16000ppm, 19800ppm.

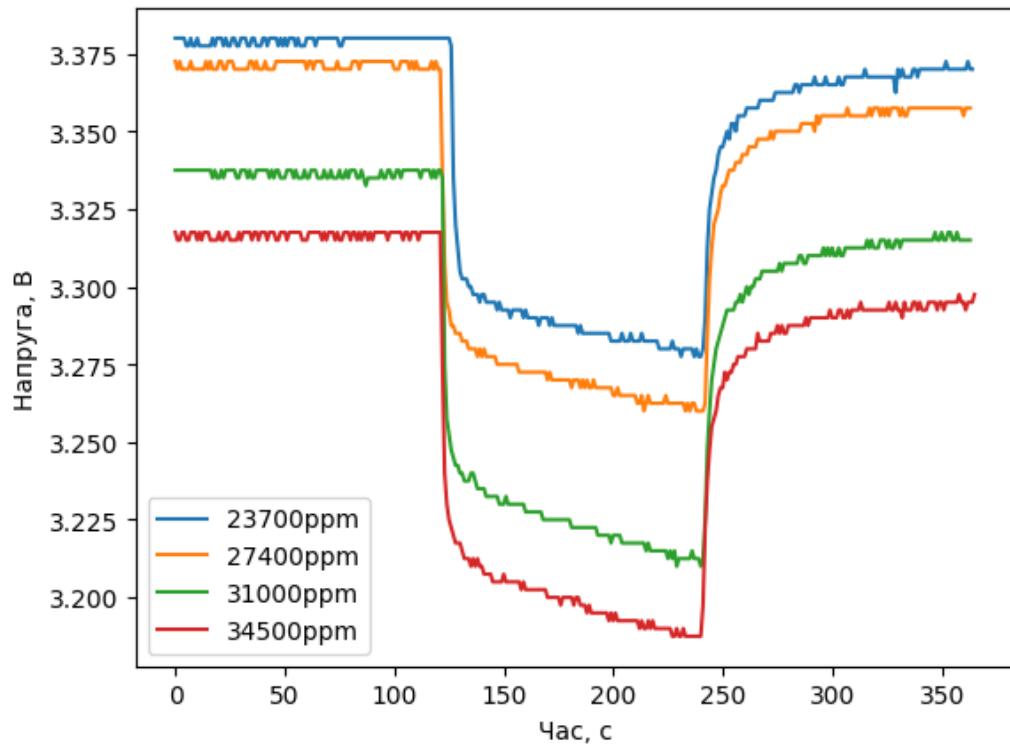


Рис.31, Відгук дачика №2 на вміст аналіту 23700ppm, 27400ppm, 31000ppm, 34500ppm.

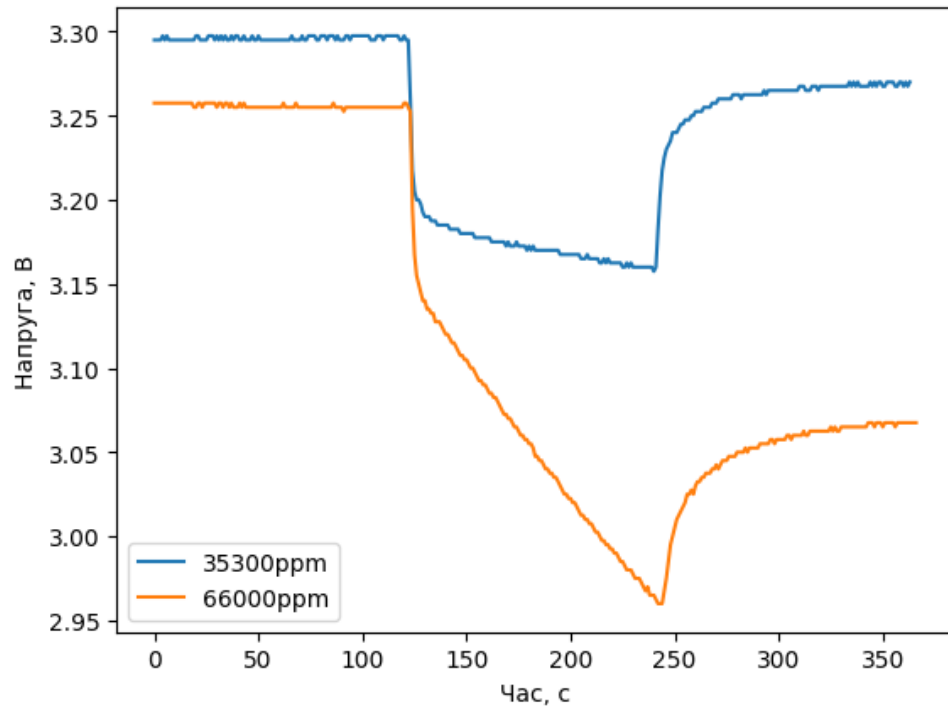


Рис.32, Відгук дачика №2 на вміст аналіту 35300ppm, 66000ppm.

Відгуки дачика №3:

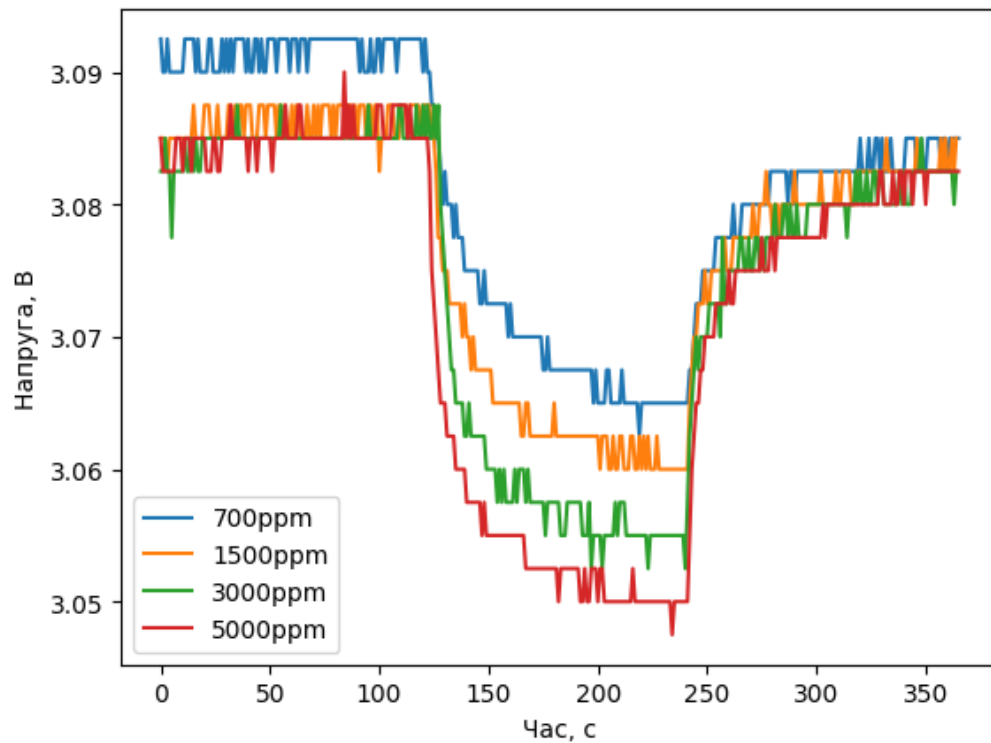


Рис.33, Відгук дачика №3 на вміст аналіту 700ppm, 1500ppm, 3000ppm, 5000ppm.

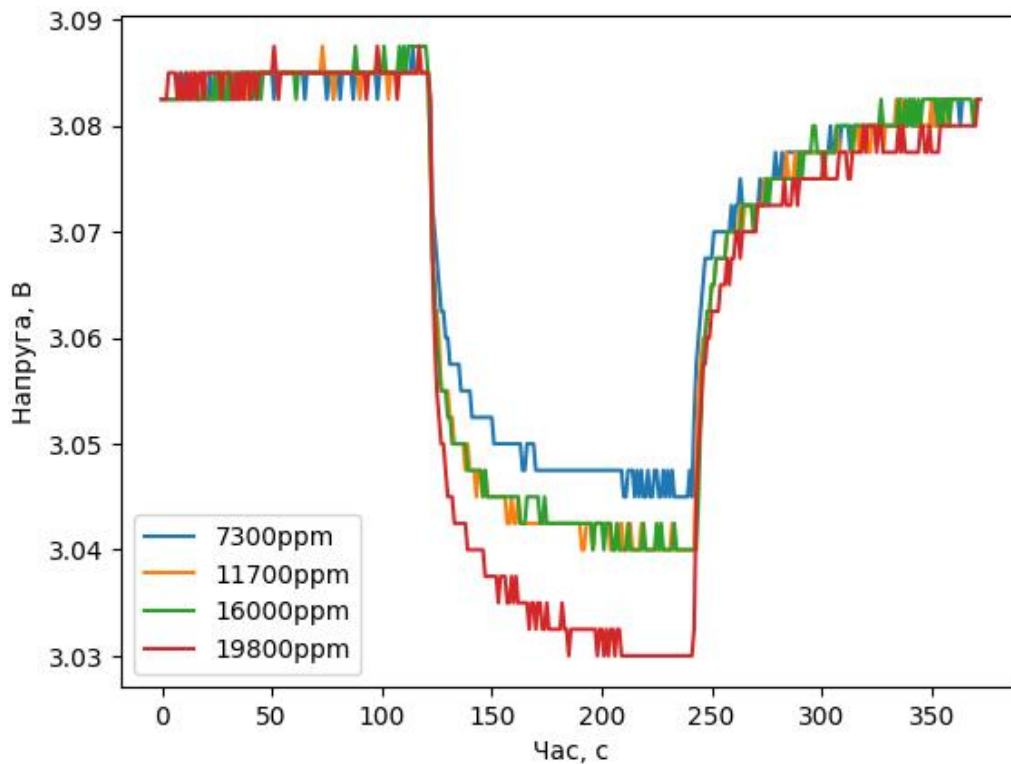


Рис.34, Відгук дачика №3 на вміст аналіту 7300ppm, 11700ppm, 16000ppm, 19800ppm.

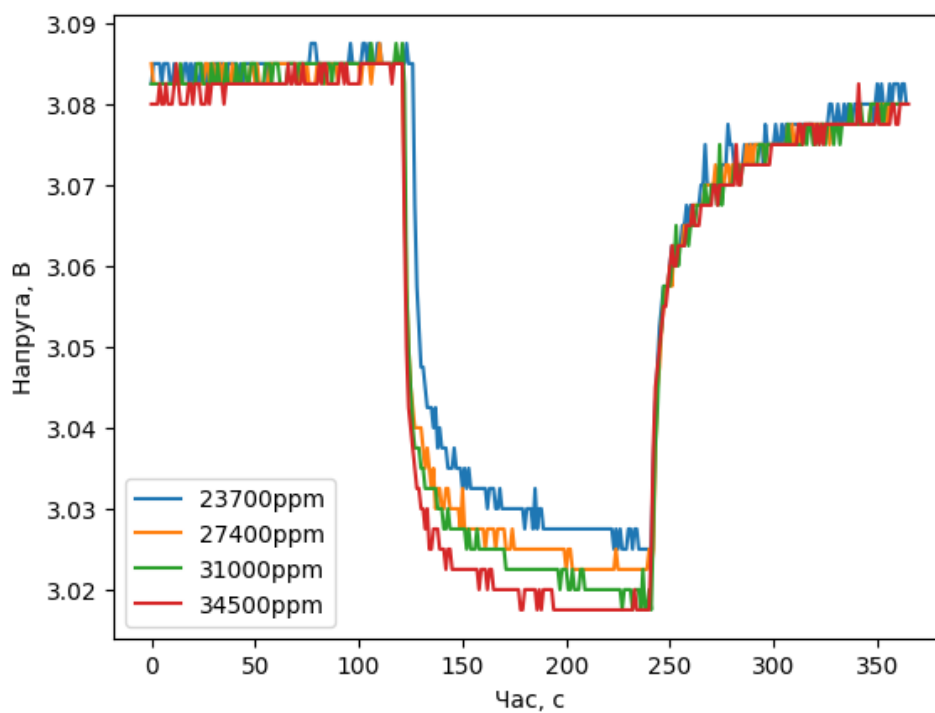


Рис.35, Відгук дачика №3 на вміст аналіту 23700ppm, 27400ppm, 31000ppm, 34500ppm.

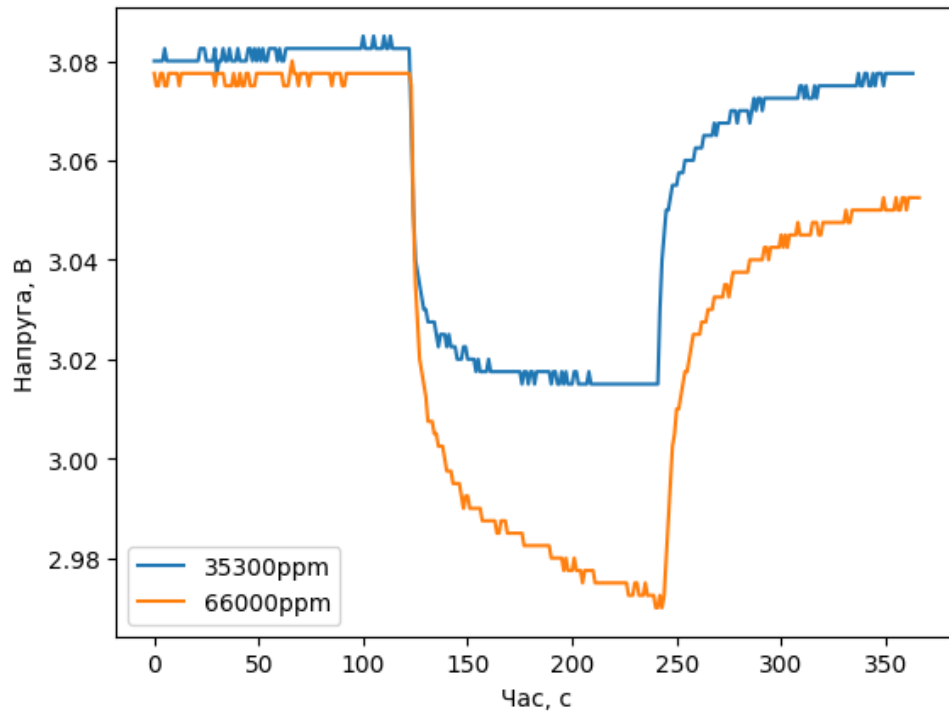


Рис.36, Відгук дачика №3 на вміст аналіту 35300ppm, 66000ppm.

Відгуки дачика №4:

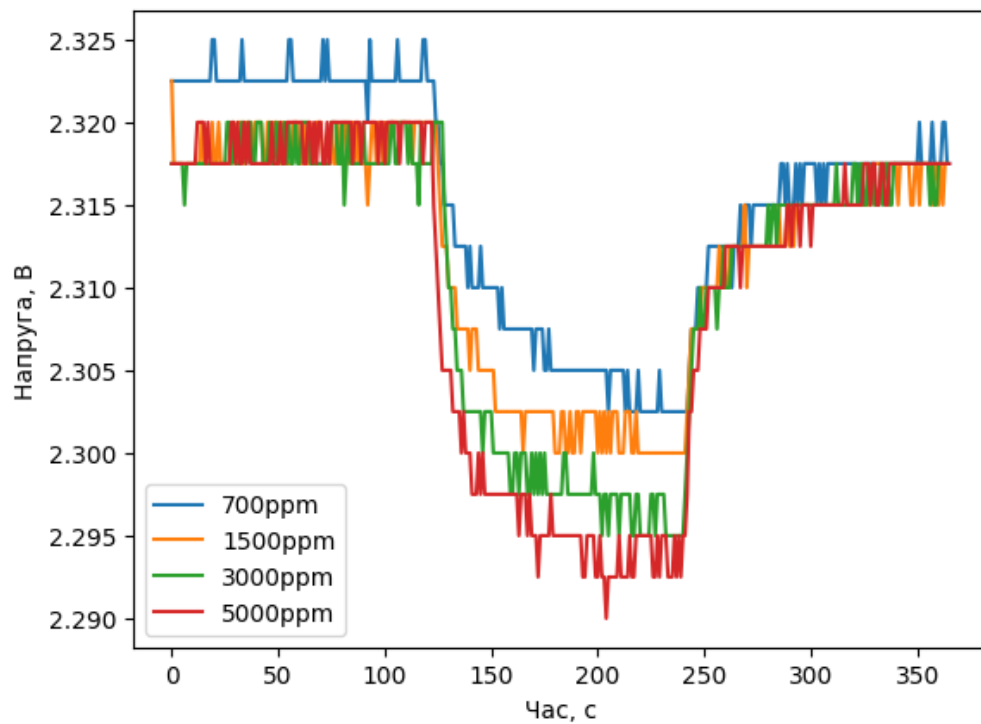


Рис.37, Відгук дачика №4 на вміст аналіту 700ppm, 1500ppm, 3000ppm, 5000ppm.

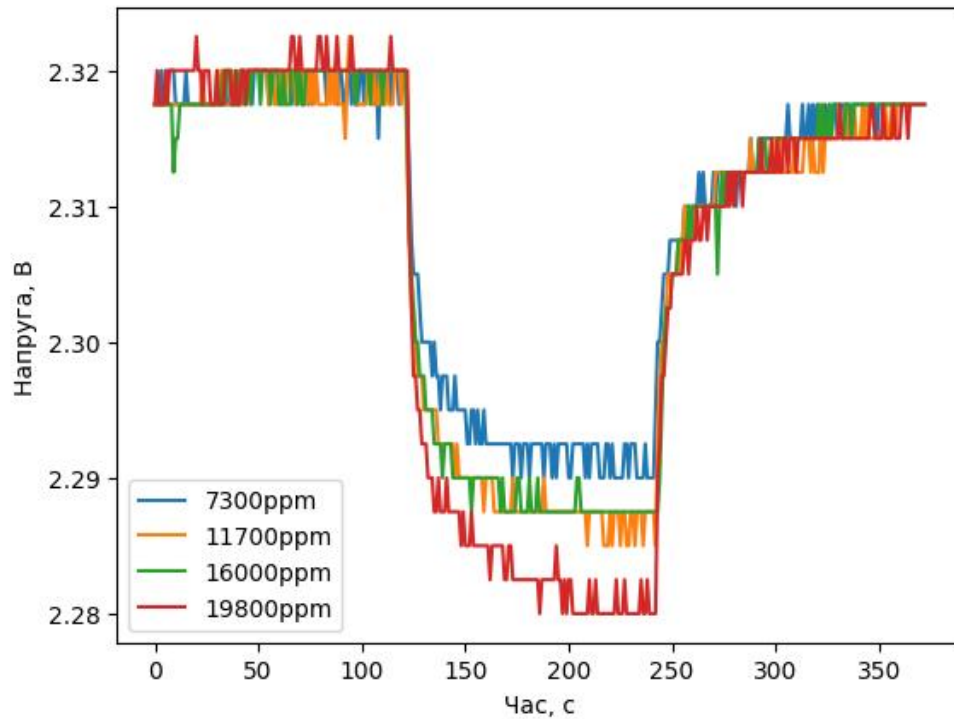


Рис.38, Відгук дачика №4 на вміст аналіту 7300ppm, 11700ppm, 16000ppm, 19800ppm.

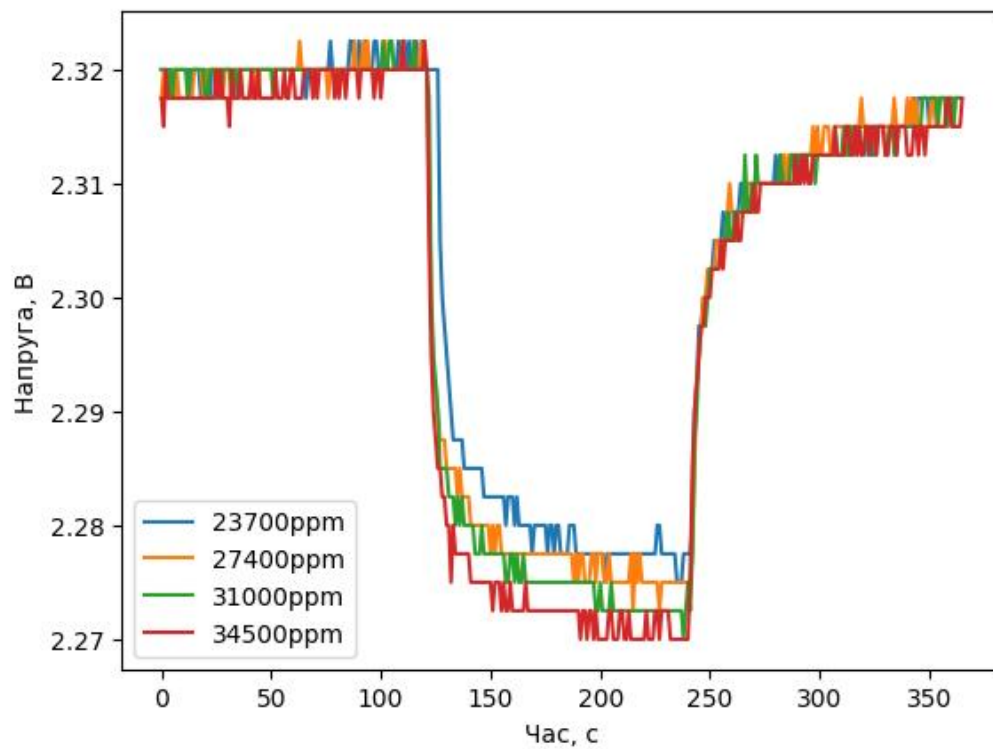


Рис.39, Відгук дачика №4 на вміст аналіту 23700ppm, 27400ppm, 31000ppm, 34500ppm.

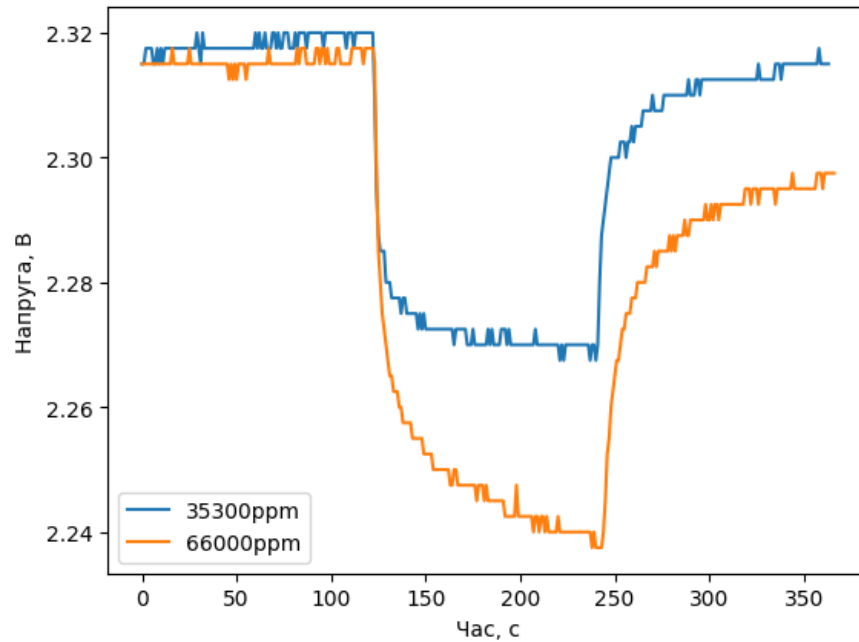


Рис.40, Відгук дачика №4 на вміст аналіту 35300ppm, 66000ppm.

В третьому етапі ми повертаємо всі параметри до параметрів з першого етапу, щоб перевірити, чи змінилися відгуки у датчиків.

Відгуки дачика №1:

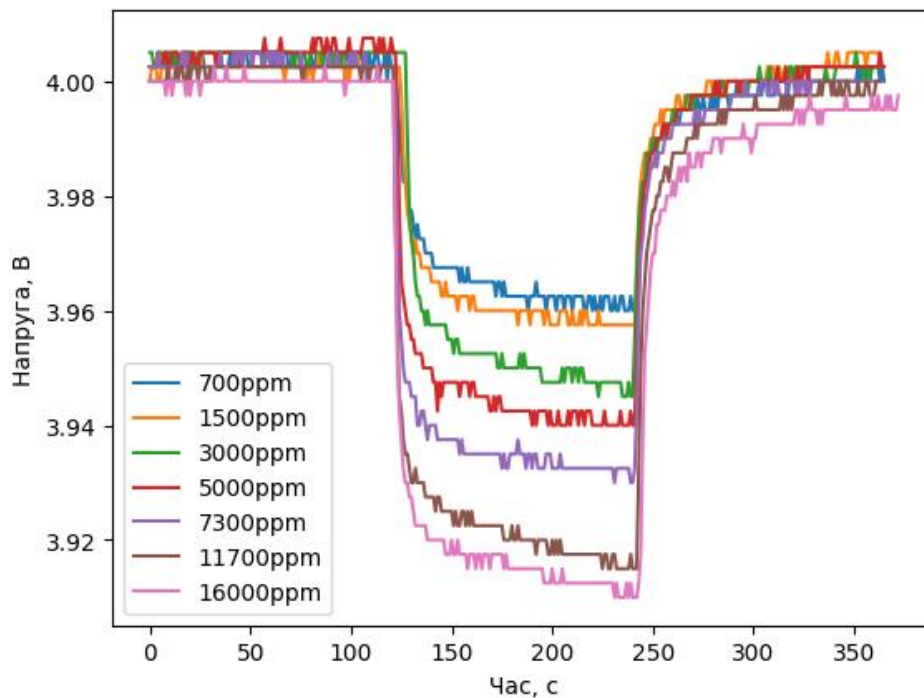


Рис.41, Відгук дачика №1 на вміст аналіту 700ppm, 1500ppm, 3000ppm, 5000ppm, 7300ppm, 11700ppm, 16000ppm, 19800ppm.

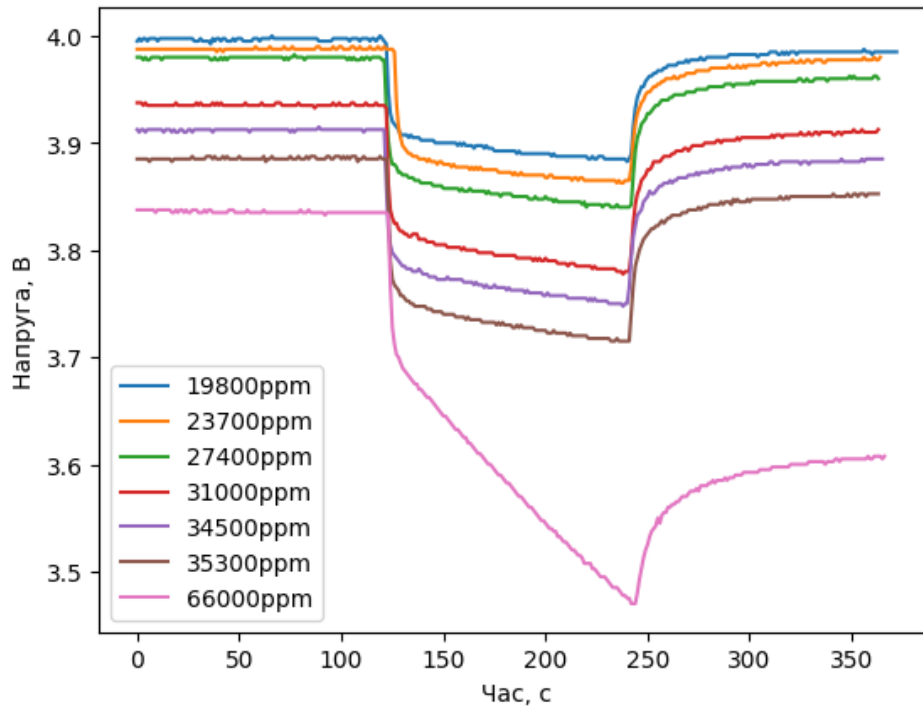


Рис.42, Відгук дачика №1 на вміст аналіту 23700ppm, 27400ppm, 31000ppm, 34500ppm, 35300ppm, 66000ppm.

Відгуки дачика №2:

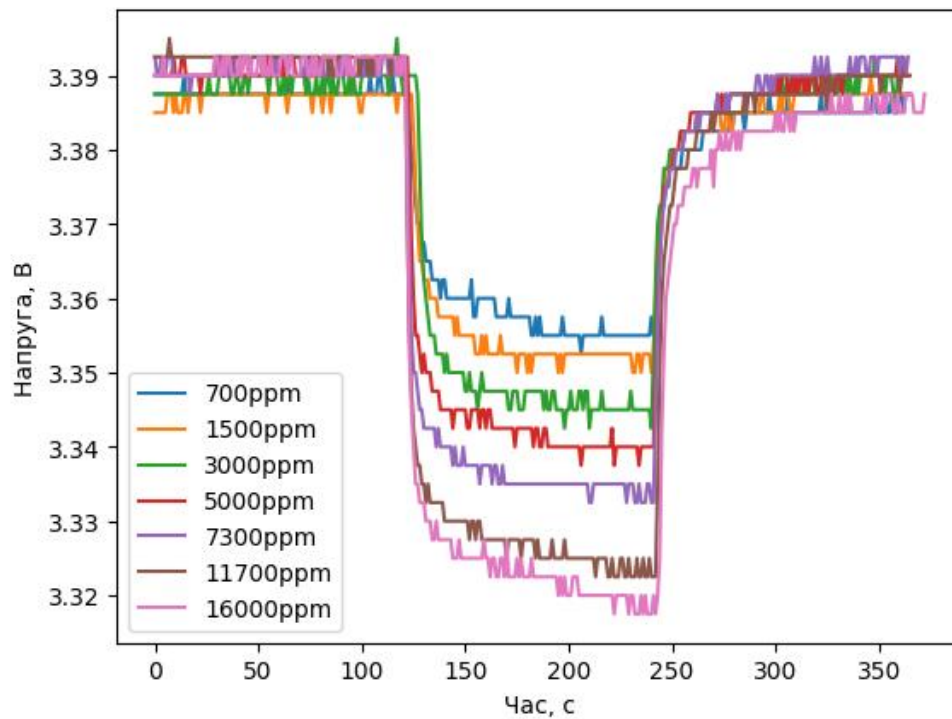


Рис.43, Відгук дачика №2 на вміст аналіту 700ppm, 1500ppm, 3000ppm, 5000ppm, 7300ppm, 11700ppm, 16000ppm, 19800ppm

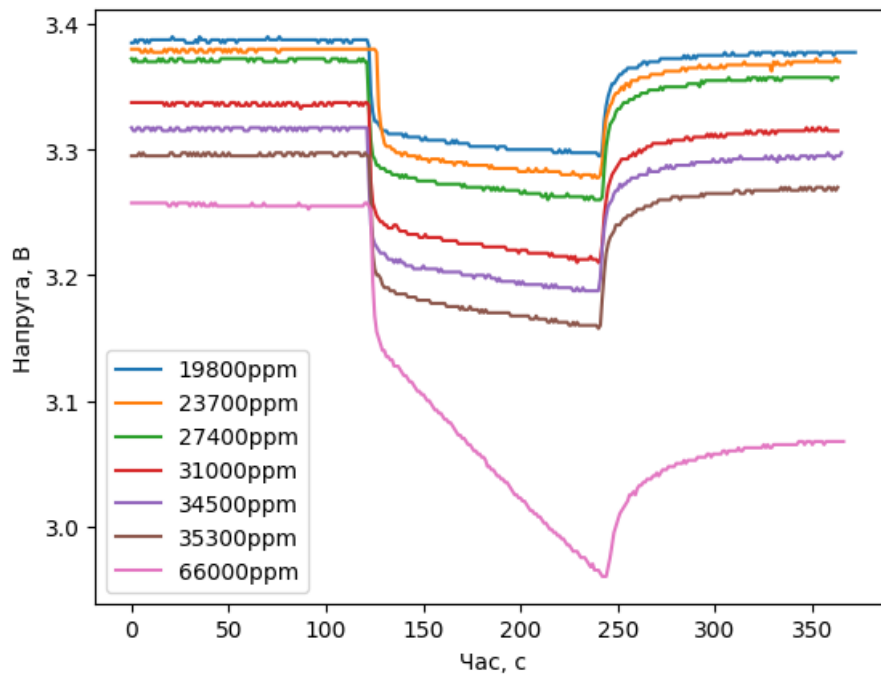


Рис.44, Відгук дачика №2 на вміст аналіту 23700ppm, 27400ppm, 31000ppm, 34500ppm, 35300ppm, 66000ppm

Відгуки дачика №3:

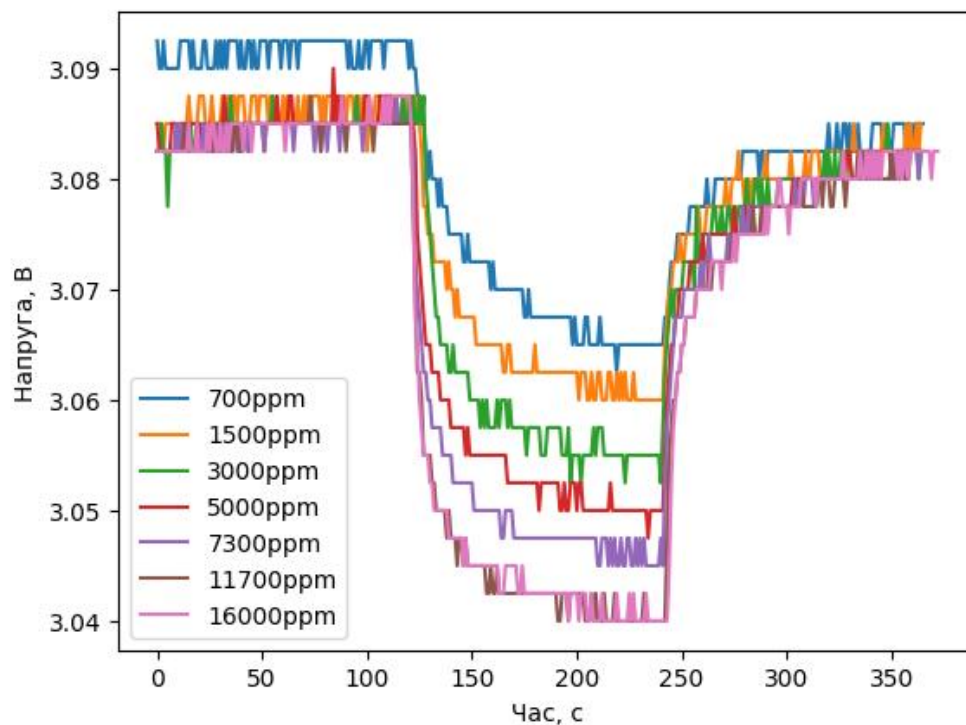


Рис.45, Відгук дачика №3 на вміст аналіту 700ppm, 1500ppm, 3000ppm, 5000ppm, 7300ppm, 11700ppm, 16000ppm, 19800ppm

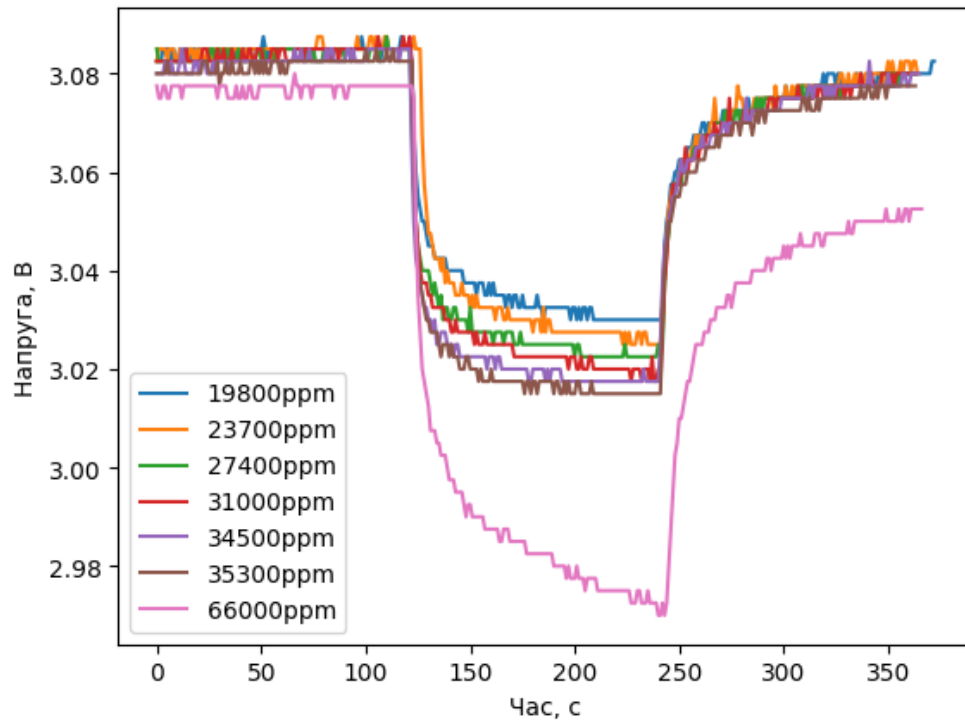


Рис.46, Відгук дачика №3 на вміст аналіту 23700ppm, 27400ppm, 31000ppm, 34500ppm, 35300ppm, 66000ppm

Відгуки дачика №4:

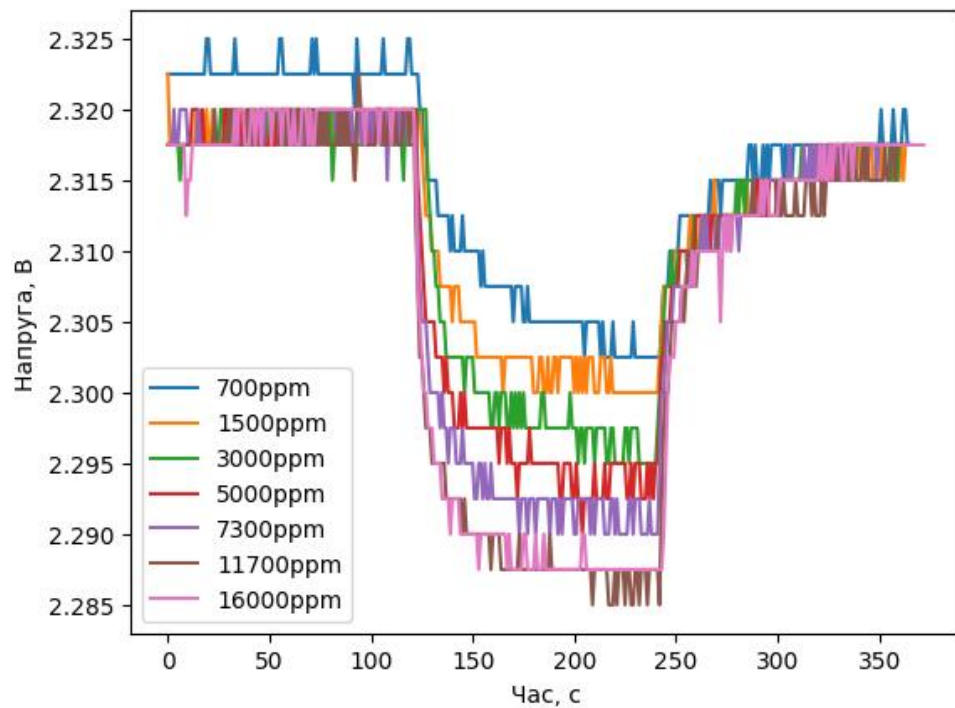


Рис.47, Відгук дачика №4 на вміст аналіту 700ppm, 1500ppm, 3000ppm, 5000ppm, 7300ppm, 11700ppm, 16000ppm, 19800ppm

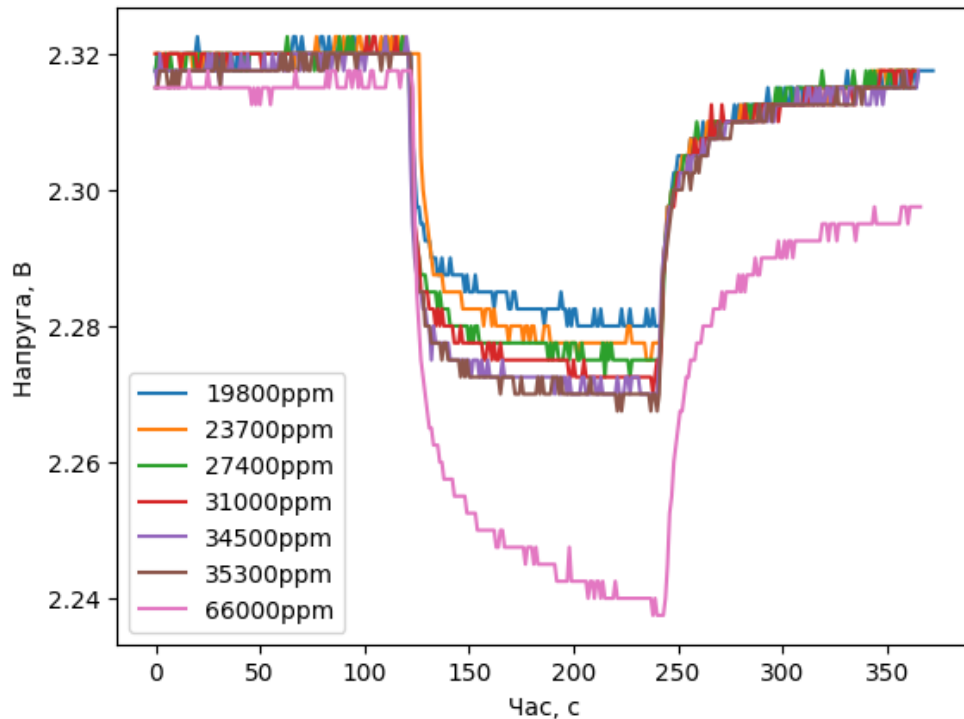


Рис.48, Відгук дачика №4 на вміст аналіту 23700ppm, 27400ppm, 31000ppm, 34500ppm, 35300ppm, 66000ppm

10. Аналіз і обговорення

Проведено дослідження сенсорних властивостей нанокompозитів електропровідних полімерів щодо етокх сполук, які є імітаторами отруйних газоподібних речовин. Максимальна величина відгуків була на рівні 4-5% при концентраціях токсичних сполук близько сотень ppm, швидкодія відгуків - до 1 хв.

До переваг хеморезистивних сенсорів відноситься досить висока швидкодія відгуків, мініатюрність та малогабаритність, простота резистивних вимірювань. Останні два фактори сприяють можливості створення невеликого переносного газоаналізаторного пристрою-гаджету з автономним живленням. До недоліків цих сенсорів можна віднести їх не дуже високу селективність, що вимагає певного часу на проведення наступної математичної обробки сигналів від масиву сенсорів з використанням методів статистичного варіаційного аналізу, а також необхідність попередньої адаптації та “тренування” в парах досліджуваних речовин для стабілізації базової лінії.

Завдяки швидкому відгуку на зміну газового оточення розроблені хеморезистивні сенсорні електроди можуть бути з успіхом використані для створення портативного газового сигналізатора токсичних речовин у повітрі. Також доцільним є використання масиву сенсорів як засобу постійного моніторингу навколишнього середовища, з потребою певного часу для якісної ідентифікації отруйних та вибухонебезпечних молекул у повітрі за технологією “електронного носу”.

11.Висновок

В ході виконання випускної кваліфікаційної роботи ми ознайомилися з усіма компонентами вимірювального перетворювача та з його роботою. Розроблений пілотний прототип проектувався з метою мінімізації матеріальних ресурсів та трудовитрат і далекий від кінцевого варіанту СОР, придатного для серійного виробництва. Тим не менше, можна сподіватися, що майбутній зразок-макет стане інструментом для подальшого дослідження властивостей та уточнення характеристик хеморезистивних датчиків, відпрацювання специфічних для цільового застосування виробу методів та протоколів аналізу даних вимірювань і, в кінцевому підсумку, підготовка для проектування остаточного варіанту сигналізатора.

Разом з тим, проектування прототипу СОР також ще не завершено. Завданнями наступних етапів є завершення роботи над програмним забезпеченням контролера виготовленого зразка, тестування зразка з реальними образцями хеморезистивних датчиків для загальної оцінки працездатності запропонованих технічних рішень та уточнення вимог до електричних параметрів та метрологічних характеристик ВП.

12. ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Microchip ATMEGA168PA [Електроний ресурс], Доступ до ресурсу: <https://octopart.com/datasheet/atmega168pa-mu-microchip-77759984>
2. ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P megaAVR[®] Data Sheet (Doc. No. DS40002061B). – Microchip Technology Inc., 2020. – 653 p.
3. MCP6271 [Електроний ресурс], Доступ до ресурсу: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001810G.pdf>
4. MCP6271/1R/2/3/4/5 170 μ A, 2 MHz Rail-to-Rail Op Amp (Datasheet, Doc. No. DS20001810G). – Microchip Technology Inc., 2019. – 52 p.
5. ADG704 [Електроний ресурс], Доступ до ресурсу: <https://www.analog.com/en/products/adg704.html#product-overview>
6. ADG704 CMOS Low Voltage 4 Ω , 4-Channel Multiplexer (Datasheet, Rev. A). – Analog Devices, Inc., 1999. – 8 p.
7. SHT20 [Електроний ресурс], Доступ до ресурсу: https://sensirion.com/media/documents/CCDE1377/635000A2/Sensirion_Datasheet_Humidity_Sensor_SHT20.pdf
8. SHT25 Humidity and Temperature Sensor IC (Datasheet, Version 3). – Sensirion AG, May 2014. – 14 p.
9. HM-10 (Jinan Huamao) [Електроний ресурс], Доступ до ресурсу: <https://www.rhydolabz.com/documents/37/datasheet%20HM-10.pdf>
10. Bluetooth 4.0 BLE module Datasheet, V610/V707. – Jinan Huamao Technology Co., Ltd., Feb. 2020. – 57 p.
11. М. Й. Мацишин, В. М. Пешкова, В. Г. Мельник, О. Л. Кукла, А. В. Мамикін, Л. М. Семеничева, С. В. Дзядевич, О. П. Солдаткін. Вплив характеристик системи тонкоплівковий перетворювач – буферний розчин на кондуктометричний біосенсор, створений на її основі // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології, Т. 10, №2, 2013, с. 73–83.

12. А. В. Мамикін, О. Л. Кукла, А. С. Павлюченко, Л. М. Матвієнко,
І. В. Могильний, О. А. Пуд, М. О. Огурцов, Ю. В. Носков. Сенсорні
властивості нанокompозитів електропровідних полімерів щодо отруйних та
вибухонебезпечних летких сполук // Сенсорна електроніка і мікросистемні
технології, Т. 19, №1/2, 2022, с. 55–69.; DOI:10.18524/1815-
7459.2022.1/2.258453