

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**
Факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем
Кафедра комп'ютерної інженерії

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ В ІОТ СИСТЕМАХ

Кваліфікаційна робота бакалавра
студента 4 року навчання
спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»
Дениса СИТНИЧЕНКА

Науковий керівник:
Юрій ЮРЧИК, асистент кафедри
комп'ютерної інженерії

Рецензент:
к. ф.-м. н. Олександр СУДАКОВ,
доцент кафедри медичної радіофізики

До захисту допускаю:

Завідувач кафедрою

Юрій БОЙКО

Ухвалено на засіданні кафедри "16" червня 2022 р., протокол № 18

Реферат

Обсяг роботи 39 сторінок, 15 рисунків, 1 таблиця

ФІЛЬТРАЦІЯ СИНГАЛІВ, ЦИФРОВІ ФІЛЬТРИ, МЕДІАННИЙ ФІЛЬТР,
ЕКСПОНЕНЦІЙНЕ ЗГЛАЖУВАННЯ, ПРОСТЕ КОВЗНЕ СЕРЕДНЄ

Об'єктом роботи є вивчення методів фільтрації.

Метою роботи є визначення оптимальних методів фільтрації даних цифрового датчика температури для зменшення шумів.

Результат роботи: було визначено три оптимальних методи фільтрації, проаналізовано їх недоліки та переваги і здійснено фільтрацію даних з шумом. Фільтрація здійснювалась декілька разів кожним з методів щоб підібрати оптимальні налаштування для кожного з типів фільтру.

Зміст

Реферат	2
Скорочення та умовні позначення	4
Вступ	5
Розділ 1. Інтернет речей	7
1.1 Загальні тенденції і архітектура IoT	7
1.2 Дані в IoT	9
1.3 Шуми в датчиках та інтегральних схемах.....	10
Розділ 2. Причини виникнення шумів та фільтрація	11
2.1 Власні шуми	11
2.2 Внесений шум.....	12
2.3 Власні шуми	16
2.4 Необхідність фільтрації.....	18
2.5 Поняття фільтрації.....	19
2.6 Переваги і недоліки аналогових та цифрових фільтрів.....	21
2.7 Цифрова фільтрація	23
Розділи 3. Методи фільтрації.....	26
3.1 Ковзне середнє.....	26
3.2 Медіанний фільтр	28
3.3 Експоненційне згладжування.....	31
3.4 Порівняння методів фільтрації.....	35
Висновки.....	37
Список літератури	38

Скорочення та умовні позначення

IoT – Internet of Things

IP – Internet Protocol

LSB – Least Significant Bit

WebSocket – протокол, що призначений для обміну інформацією між браузером та вебсервером в режимі реального часу

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЦОС – цифрова обробка сигналів

SMA – simple moving average

SMA3 – simple moving average з розміром вікна 3

SMA6 – simple moving average з розміром вікна 6

Вступ

IoT з технологічної точки зору – це мережа фізичних об'єктів, що унікально ідентифікуються (так званних «речей»), які можуть взаємодіяти між собою шляхом IP-підключення без втручання людини. Варто зазначити, що, вживаючи термін «IoT», ми говоримо про значно складніше явище, ніж просто набір датчиків.

Практика збору та аналізу даних про об'єкт — будь то механізм, будівля чи людина — за допомогою датчиків існує давно. Промисловий інтернет радикально відрізняється тим, що датчики поєднуються в єдину мережу з аналітичними та/або керуючими системами. У середині мережі йде обмін даними, на основі яких автоматично приймаються рішення та здійснюються дії з управління об'єктом. Так з'являються елементи штучного інтелекту та принципи саморегулювання. Нині IoT вже належить до мільярдів фізичних пристроїв у всьому світі, які підключені до Інтернету і аналізують та обробляють величезну кількість даних. Як правило, IoT найбільш поширений у виробничих, транспортних та комунальних організаціях, де використовуються датчики та інші пристрої інтернету речей. Однак це не єдині сфери застосування, за допомогою моніторингу засобами IoT можна покращити стан довкілля, спрогнозувати стихійні лиха. Наприклад, WWF (англ. World Wildlife Fund) вже розгорнули систему моніторингу даних із парків дикої природи в режимі реального часу за допомогою квадрокоптерів.. Він також знайшов застосування у галузях сільського господарства, інфраструктури та домашньої автоматизації, що сильно сприяло їх цифровій трансформації. Передбачається, що в майбутньому пристрої IoT стануть активними учасниками бізнесу, інформаційних та соціальних процесів, де вони зможуть взаємодіяти між собою, обмінюючись інформацією про навколишнє середовище без втручання людини. Завдяки процесорам і бездротовим мережам до IoT можна долучити ледь не будь-який пристрій, який інакше був би неактивними, дозволяючи йому взаємодіяти в мережі без участі людини, тим самим забезпечуючи злиття цифрових та фізичних світів. Стосовно перспектив розвитку, варто зазначити, що у доповіді Fortune Business Insights, до 2026 року вартість IoT-ринку досягне позначки в трильйон доларів США (станом на 2021 рік цей показник

становив 190 млрд дол.). Зростає і кількість IoT-пристроїв, яке вже зараз дісталось вражаючого числа в 14,2 млрд одиниць.

Але на даному етапі розвитку технологій Інтернет речей активно впроваджується не в глобальних масштабах, а всередині компаній, які за рахунок нових технологій хочуть підвищити продуктивність та конкурентоспроможність на ринку. Складність масштабування IoT обумовлена тим, що необхідно інтегрувати в єдине ціле багато систем від різних постачальників, а налагодити їхню злагоджену роботу — завдання складніше, ніж розгорнути роботу пристроїв всередині компанії. Також однією з головних проблем IoT є постійна небезпека витоку особистої інформації. Якщо дані розміщені в мережі, їх можна вкрати. Порушення конфіденційності на будь-якому рівні - це вторгнення в особисте життя людини. Щоб запобігти витоку даних, пристрої IoT повинні обмінюватися лише зашифрованою інформацією. Це підвищить рівень безпеки, але не захистить на 100% від взлому.

Розділ 1. Інтернет речей

1.1 Загальні тенденції і архітектура IoT

Основною вагомою тенденцією Інтернету речей останніми роками є експоненційне зростання пристроїв, підключених і контрольованих Інтернетом. Широкий спектр додатків для технології Інтернету речей означає, що особливості можуть відрізнятися від одного пристрою до іншого, але є основні характеристики, загальні для більшості. Інтернет речей створює можливості для більш прямої інтеграції фізичного світу в комп'ютерні системи, що призводить до підвищення ефективності, економічних вигод та зниження навантаження на людину.

Архітектуру системи інтернету речей у спрощеному вигляді можна поділити на чотири рівні [5]:

- Рівень пристроїв (Сенсори та актуатори)
- Рівень мережі
- Рівень обробки даних
- Рівень додатків

Пристрої включають мережеві пристрої, такі як датчики, різноманітні сенсори, актуатори що використовуються в обладнанні Інтернету речей, особливо ті, які використовують такі протоколи, як Modbus, Bluetooth, Zigbee або власні(пропріетарні) протоколи для підключення до шлюзу даних. Другий рівень складається з систем агрегування даних датчиків, які називаються прикордонними шлюзами, які забезпечують функціональність, таку як попередня обробка даних, забезпечення підключення до хмари, використання таких систем, як WebSockets, концентратор подій (платформа потокової передачі великих даних та служба прийому подій) і навіть у деяких випадках туманні обчислення. Рівень мережі також необхідний для надання загального уявлення про пристрої на верхніх рівнях, щоб полегшити управління. У чотирьохрівневій архітектурі на рівень обробки даних надсилаються дані, отримані від сенсорів чи актуаторів. Рівень обробки даних

забезпечує виконання двох задач, а саме: підтверджує, що дані пересилаються справжніми користувачами та захищає дані від несанкціонованих дій над ними. Аутентифікація є найбільш поширеним методом перевірки користувачів і даних, виконується за допомогою попередньо поширених спільних ключів і паролів для відповідного користувача. Друга відповідальність рівня полягає в передачі інформації на мережвий рівень. Середовище, через яке дані передаються з рівня обробки даних на мережвий рівень, може бути бездротовим і дротовим. На останньому 4-му рівні дані зберігаються для подальшої обробки [8]. На цьому етапі відбуватиметься глибокий аналіз або ресурсомісткі операції, такі як аналіз та обробка даних. Прикладний рівень часто являє собою хмарний додаток, створений для Інтернету речей з використанням архітектури мікросервісів з використанням HTTPS/OAuth. Він включає різні системи баз даних, які зберігають дані датчиків, такі як бази даних залежних від часу (time series data) тощо.



Рис. 1.1.1. Типова архітектура IoT

1.2 Дані в IoT

Незалежно від того, який тип вимірів здійснює датчик, кінцевий запис буде містити мітку часу. Таким чином, масив даних зажених від часу забезпечує загальний контекст для вимірів і стає важливою точкою опори для обробки та розуміння даних в IoT.

Об'єднуючись у мережу, датчики здатні генерувати велику кількість даних сенсорів. Кожен з цих вимірів даних фіксується в певний момент часу, що ефективно перетворює дані датчиків у дані часових рядів, які після підлягають обробці та аналізу [9]. Існує велика плутанина навколо різниці між даними часових рядів і даними датчиків. Якщо розглянути різні типи даних датчиків і те, як вони використовуються, а також той факт, що датчики можуть фіксувати зміни у фізичному світі в один момент часу — швидко стає зрозуміло, що дані датчиків це і є дані часових рядів. Ці критичні точки даних, які фіксують датчики, є найбільш цінними при аналізі з часом, забезпечуючи цінну інформацію, яку можна використовувати для прийняття рішень або для виконання додаткових кроків бізнес-логіки. Такий тип складної структури даних є вимогою для взаємодії IoT, коли пристрої можуть бути оснащені UID (унікальними ідентифікаторами) для передачі великої кількості даних безпосередньо по мережі.

Обсяг даних, що збирається та передається, може бути величезним, тому відокремлення цінних точок даних для пошуку сигналу у шумі є ключовою проблемою для науковців. Зменшення шуму в будь-якій системі сенсорів дозволяє отримати більш точні дані датчика, що допомагає зменшити можливість хибних висновків на основі неточних даних.

1.3 Шуми в датчиках та інтегральних схемах

Шуми в датчиках та інтегральних схемах можуть бути джерелами серйозних похибок, що необхідно враховувати при розробці схем та інтерпретації результатів вимірів. По відношенню до кожної конкретної схеми можна виділити дві основні групи шумів власні шуми (до них відносяться всі шуми, що виникають усередині схеми) та інтерференційні шуми (внесені), джерела яких знаходяться за межами схеми.

Жоден датчик, незалежно від того, наскільки добре він був спроектований, не видає на виході сигнал, що точно відповідає зовнішньому впливу [10]. Для того, щоб визначити, наскільки добре вихідний сигнал датчика відтворює вхідний сигнал, користуються критерієм, заснованим на вимогах щодо точності та надійності. Відхилення сигналу датчика від істинного значення можуть бути або систематичними, або стохастичними (випадковими). Перший тип похибок залежить від виду функції, яку передає датчик, його лінійності, динамічних характеристик, якістю матеріалів та калібруванням. Всі перераховані характеристики протягом заданого інтервалу часу повинні залишатися постійними або змінюватися дуже повільно. Таким чином, характеристики піддаються математичному опису та можуть бути визначені експериментально. У ряді випадків отримане значення систематичної похибки може наводитися в довідкових даних і враховуватися в подальших розрахунках. Стохастичні похибки навпаки мають випадковий характер, є достатньо непередбачуваними і можуть змінюватися дуже швидко. Часто саме вони називаються шумами, що пов'язано з їх природою і статистичними властивостями.

Під шумом розуміються всі перешкоди, що привносяться або зовнішніми впливами та навколишніми факторами, або виникають у компонентах датчика і схеми в діапазоні від нуля до максимальних робочих частот.

Розділ 2. Причини виникнення шумів та фільтрація

2.1 Власні шуми

Сигнал датчика, який перетворюється в інтегральній схемі, що складається з підсилювача та АЦП, в цифровий код, не можна характеризувати тільки його амплітудою та спектральними параметрами, завжди необхідно оцінювати його роздільну здатність

При збільшенні числа розрядів величина LSB (Молодший значущий розряд) зменшується. Наприклад, LSB 10-ти розрядної системи з 5-вольтовою шкалою вимірювання дорівнює 5 мВ, а 16-ти розрядної системи - вже 77 мкВ. Звідси слідує, що якщо й сумарні шуми перевищують рівень, скажімо 300 мкВ, немає сенсу використовувати 16-ти розрядне АЦП [6]. Насправді, на практиці ситуація ще гірша. Оскільки більшість датчиків не можуть видавати сигнали, що відповідають 5-вольтовій шкалі, на їх виходах необхідно встановлювати підсилювачі. Наприклад, якщо максимальний вихідний сигнал датчика дорівнює 5 мВ, LSB 16-розрядного перетворювача становить 77 нВ. Такий рівень сигналу посилювати дуже важко. У випадках, коли потрібна висока точність перетворень, необхідно враховувати всі джерела шуму. У таких системах перешкоди можуть вироблятися операційним підсилювачем та іншими компонентами, що використовуються в ланцюгах зворотнього зв'язку.

Вхідні струми та напруги зміщення можуть дрейфувати. У ланцюгах постійного струму цей дрейф важко відрізнити від низькорівневих сигналів датчика. Сигнали зміщення зазвичай змінюються дуже повільно (у межах частотної смуги десятків і сотень герц), тому їхній дрейф часто називається наднизькочастотним шумом. Цей шум еквівалентний випадковим (або прогнозованим, пов'язаним, наприклад, з температурою) змінам напруги та струму зміщення. Причини виникнення цих перешкод пояснюються фізичною природою резисторів та напівпровідникових елементів, що використовуються для побудови схем.

2.2 Внесений шум

Стабільність роботи датчика та інтегральної схеми залежить від їхньої захищеності від шумів, які продукують зовнішні джерела. На рис. 2.2.1 показана схема поширення внесених шумів. Природа походження завад, що вносяться, часто піддається ідентифікації. Прикладами таких шумів є скачки напруги на лініях живлення, зміни навколишньої температури, сонячна активність і тому подібне. Такі види завад при потраплянні до датчиків або інтегральних схем впливають на їхній вихідний сигнал. При цьому вони впливають або на чутливі елементи датчиків, або на їх виводи, або на електронні компоненти в схемі. З цього випливає, що для інтерференційних сигналів датчик та інтегральна схема грають роль пристроїв приймачів.

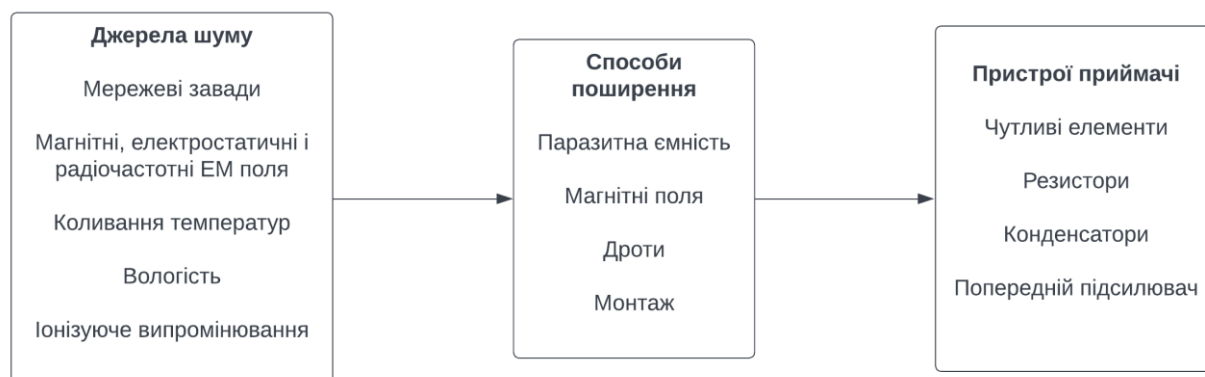


Рис. 2.2.1. Джерела внесених шумів та способи їх розповсюдження

Шуми, що вносяться можна класифікувати за декількома критеріями: за способом попадання в датчик або інтерфейс, за типом впливу на вихідний сигнал і т.д. По тому як внесені шуми впливають на вихідні сигнали, їх можна розділити на адитивні та мультиплікативні [6]. Розглянемо більш детально кожен з них та способи як можна підвищити рівень захищеності від даних видів перешкод.

Адитивний шум e_n складається з корисним сигналом V_s формуючи вихідний сигнал V_{out}

$$V_{out} = V_s + e_n \quad (2.1)$$

На рис. 2.2.2 пункт Б показано вплив адитивного шуму на вихідний сигнал. З малюнка видно, що величина шуму не змінюється за зміни корисного сигналу. У лінійних датчиках та інтегральних схемах величина адитивного шуму абсолютно не залежить від величини сигналу, і якщо сигнал дорівнює нулю, на виході буде лише шум.

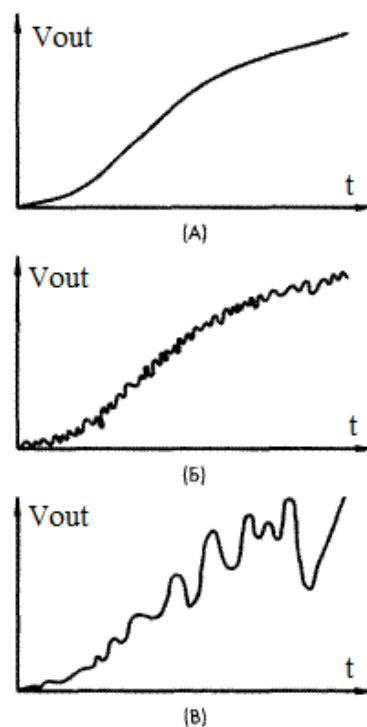


Рис. 2.2.2. Різновиди завад:

А – корисний сигнал, Б – адитивний шум, В – мультиплікативний шум

Мультиплікативний шум змінює передавальну функцію датчика або нелінійних компонентів таким чином, що корисний сигнал стає модульованим цим шумом:

$$V_{out} = (1 + N(t)) * V_s \quad (2.2)$$

В цьому випадку $N(t)$ є функцією шуму. Приклад впливу такого шуму на корисний сигнал показано на рис. 1.3. пункт В. Коли корисний сигнал дорівнює нулю, мультиплікативна перешкода на виході пристрою дорівнює нулю. Мультиплікативний шум зростає одночасно із збільшенням сигналу V_s . Як видно з назви, цей вид шуму з'являється в результаті нелінійної операції множення двох сигналів, одним із яких є корисний сигнал, а іншим сигнал, що визначається шумом.

Для підвищення захисту від адитивних шумів датчики часто об'єднують парами таким чином, щоб їх вихідні сигнали віднімалися один від одного (рис. 2.2.3.). Такий спосіб називається диференціальним методом побудови датчиків. Один з датчиків, називається основним і саме на ньому здійснюють вимір сигналу, в той час як інший, еталонний датчик, захищається від його впливу.

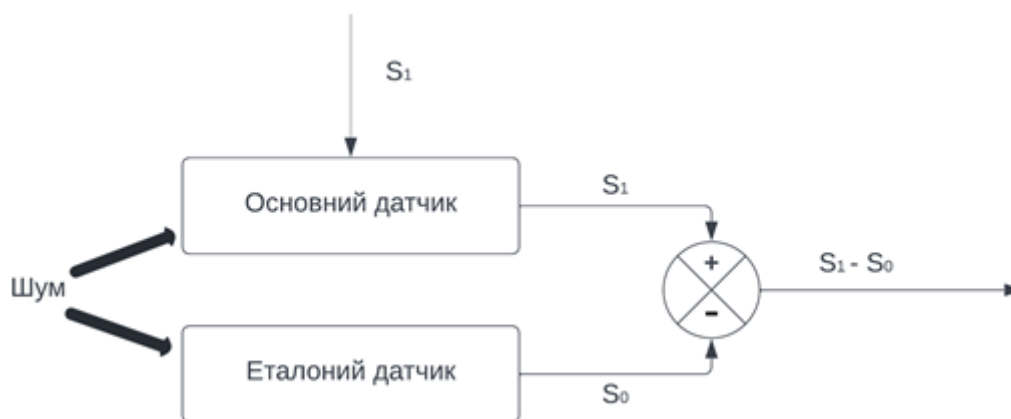


Рис. 2.2.3. Диференціальний метод зниження адитивних завад

Оскільки адитивний шум характерний для лінійних і квазілінійних датчиків та інтегральних схем, на еталонний датчик не треба подавати жодних зовнішніх сигналів, його вхідний сигнал найчастіше дорівнює нулю [6]. Передбачається, що на обидва датчики діють однакові внесені шуми (власні шуми датчика не можуть бути усунені диференціальним методом), також називають синфазними перешкодами. Це означає, що шуми, що діють на датчики, мають однакову фазу і амплітуду, тому при відніманні сигналів вони будуть взаємно знищені.

Така комбінація датчиків називається подвійним чи диференціальним датчиком. Наскільки добре пригнічуються адитивні шуми, можна судити з величини коефіцієнта послаблення синфазного сигналу (КПСС).

$$\text{КПСС} = 0.5 * \frac{S_1 + S_0}{S_1 - S_0} \quad (2.3)$$

Де S_1 і S_0 - вихідні сигнали основного та еталонного датчиків. КПСС залежить від величини зовнішніх впливів, і зазвичай, чим вище вхідні сигнали, тим менше його значення. Цей коефіцієнт показує в скільки разів зменшився синфазний шум по відношенню до корисного сигналу на виході датчика. Величина КПСС є мірою симетричності датчика.

Для ефективного усунення шуму обидва датчики слід розташовувати, як можна ближче один до одного. Вони повинні бути абсолютно ідентичними та працювати в однакових умовах. Також дуже важливо забезпечити надійне екранування еталонних датчиків від зовнішніх впливів, інакше ефективність диференціального методу буде значно знижена.

Для зменшення мультиплікативного внесеного шуму, застосовується метод відносного вимірювання [6]. Його принцип полягає в наступному. Використовується диференціальний датчик, обидві частини якого працюють в однакових умовах навколишнього середовища і піддаються впливу ідентичних мультиплікативних шумів. При цьому на одну половину датчика діє досліджуваний зовнішній сигнал S_1 , а на еталонну, — постійний стабілізований сигнал S_0 . Вважаємо, що навколишня температура є мультиплікативною завадою, що однаково впливає на обидва датчики. Апроксимуємо вихідну напругу першого датчика у вузькому температурному діапазоні наступним виразом:

$$V_1 \approx (1 + \alpha(T - T_0)) * f(S_1) \quad (2.4)$$

де α - температурна чутливість передавальної функції датчика, T - поточна температура, T_0 - температура при калібруванні.

Тоді для другого датчика вихадна напруга буде апроксимована схожим чином:

$$V_2 \approx (1 + \alpha(T - T_0)) * f(S_0) \quad (2.5)$$

Знайдемо співвідношення двох напруг:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{f(S_1)}{f(S_0)} \quad (2.6)$$

Оскільки $f(S_0)$ є константою, з останнього виразу видно, що відношення не залежить від температури (тобто від мультиплікативної завади). Однак слід уточнити, що спосіб відносного вимірювання працює тільки у разі мультиплікативних перешкод, так само як і диференціальний метод застосовується виключно для придушення адитивних шумів. Але обидва методи абсолютно недієві в боротьбі з власними шумами, що генеруються всередині датчиків та інтегральних схем.

2.3 Власні шуми

Власні шуми зазвичай підпорядковуються закону Гауса, чого не можна сказати про внесені шуми, які часто важко описати статистичними методами. Внесені шуми, можуть бути періодичними і просто випадковими. Зазвичай їх вдається суттєво знизити, застосовуючи різні способи боротьби з електростатичними та електромагнітними наведеннями від джерел живлення, радіостанцій, механічних ключів, а також із сплесками напруги та струму, що виникають через процеси перемикачів у ланцюгах з реактивним опором. До таких способів відносяться: фільтрація, гальванічна розв'язка електричних ланцюгів, екранування провідників і компонентів, виключення паразитних контурів заземлення, вибір якомога нижчих імпедансів та використання малошумних джерел живлення та опорної напруги.

Шуми, спричинені електричними полями, можуть бути значно зменшені за допомогою відповідного екранування датчика та інтегральних схем, особливо їх високоімпедансних та нелінійних компонентів [6]. Кожен конкретний випадок екранування має ретельно досліджуватися перед імплементацією. При цьому дуже важливо правильно ідентифікувати джерело перешкод та спосіб зв'язку зі схемою.

Некоректне екранування може лише погіршити ситуацію та створити нові проблеми. Одним з головних завдань екранування є обмеження поширення шуму у сусідні схеми. У цьому випадку виникає проблема, пов'язана з тим, що відбиті від екранів паразитні сигнали повертаються назад і необхідно ретельно продумувати маршрут їхнього «відступу» з урахуванням контурів заземлення та розведення дротів. Якщо джерела перешкод знаходяться всередині самого пристрою, екрани розміщуються лише над критичною ділянкою з метою запобігання попадання шуму на чутливі елементи датчиків та інтегральних схем. Для цього екрани виконуються у вигляді металевих коробів навколо певних ділянок схеми або кабелів з екранування навколо центральних провідників [6].

Завади електростатичних та електричних полів можуть бути значно знижені при застосуванні відповідних екранів. Набагато складніше захищатися від магнітних полів, оскільки вони проникають усередину провідних матеріалів. Звичайний екран, розміщений навколо провідника та заземлений на одному кінці, дуже слабо захищає провідник від наводок, спричиненими магнітними полями. Якщо говорити про роботу на різних частотах – то на високих частотах для побудови ефективних екранів можна використовувати практично будь-який матеріал, тоді як на низьких краще використовувати сталь. Для побудови ефективних магнітних екранів для роботи на низьких частотах рекомендується використовувати матеріали, що мають високий коефіцієнт магнітної проникності, наприклад, мю-метали. Однак захисні характеристики таких екранів значно знижуються зі зростанням частоти та величини магнітного поля. Тому для роботи на високих частотах краще використовувати магнітні екрани з товстої сталі.

2.4 Необхідність фільтрації

Безсумнівно правильне заземлення та екранування можуть покращити результати вимірювань та прибрати значну частку шумів. Однак, вартість таких заходів часто перевищує бюджети обладнання [11]. Таким чином навіть при мінімізації бюджету, проблему буде важко вирішити одними лиш цими діями при використанні великої кількості датчиків. Тому попередня обробка сигналу значно допомагає у протидії різним типам завад.

У сфері обробки сигналів фільтр – це пристрій для виділення бажаних компонентів спектра електричного сигналу та/або пригнічення небажаних. Зазвичай це означає видалення деяких частот, щоб придушити небажані сигнали і зменшити шуми. Зменшення шуму може бути досягнуто як у часовій, так і в частотній областях. У випадку останнього отримують перетворення Фур'є або Вейвлет-перетворення спостережуваного сигналу, а потім застосовують відповідний фільтр. Основне застосування фільтрації сигналу полягає в зменшенні та згладжування шуму.

Головною задачею є оцінка вимірюваного сигналу без шуму або з якомога малими спотворення. Недоліком фільтрації є запізнення, особливо при більш інтенсивній фільтрації, що може мати згубний вплив на своєчасне виявлення змін вимірюваного сигналу. Тому треба бути обережним, щоб не здійснити надмірну фільтрацію. Зменшення шумів та завад має свої недоліки: чим більше здійснюється обробка, тим повільніше відфільтрований сигнал використовується для виконання нової ітерації фільтрації, тобто тим більше стає час затримки між вимірюваним сигналом і його відфільтрованим значенням.

2.5 Поняття фільтрації

У сфері обробки сигналів фільтр - це пристрій або процес, який пригнічує небажані компоненти спектру сигналу або ж навпаки виділяє потрібні. Розглянемо найбільш поширені з них:

- фільтр низьких частот - фільтр, який пропускає сигнали низької частоти і послаблює ті, що розташовані вище частоти зрізу.
- фільтр високих частот - фільтр, який пропускає сигнали високої частоти і послаблює ті, що розташовані нижче частоти зрізу.
- смуговий фільтр - фільтр, який пропускає тільки сигнали з частотою в певному діапазоні.
- режекторний фільтр - фільтр, який не пропускає сигнали певного частотного діапазону. При цьому пропускаючи всі інші, які знаходяться поза діапазоном.

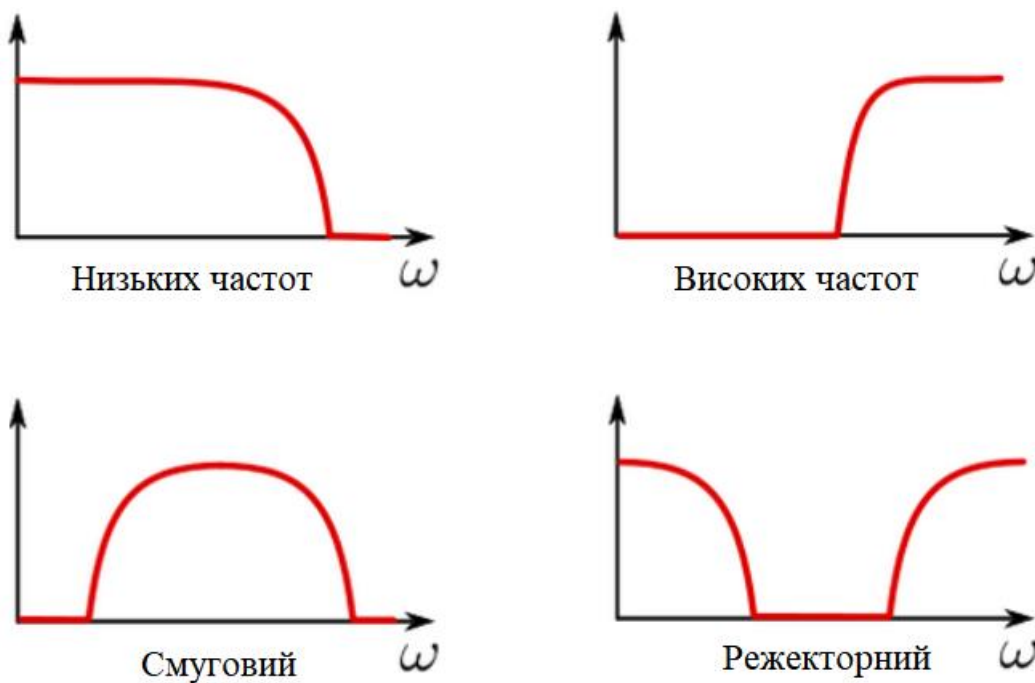


Рис. 2.5.1. Репрезентація принципу роботи кожного з фільтрів

Під час роботи із зашумленими даними існують різні способи фільтрації цих даних. Дві основні категорії, на які можна поділити фільтрацію - це аналогова і

цифрова. Аналогова фільтрація включає фізичне обладнання, яке змінює аналогові сигнали перед тим, як вони передаються іншим компонентам для обробки. Цифрова фільтрація передбачає передачу аналогових даних до процесора, який потім запускає код для цифрової фільтрації даних [12].

Аналогові фільтри є базовою складовою обробки сигналів і призначені для роботи з безперервним сигналом (сигнал має значення в кожен момент часу). Являють собою електронні схеми, в залежності від використовуваних елементів можуть бути:

- пасивні (резистори, конденсатори, котушки індуктивності),
- активні (активні елементи, такі як операційні підсилювачі в поєднанні з пасивними елементами).

Вони можуть бути лінійними або нелінійними, залежно від передавальної функції. Більшість аналогових фільтрів мають нескінченну імпульсну характеристику або ІІР (це означає, що імпульсна характеристика фільтра, теоретично, ніколи не досягне нуля, але на практиці сигнал наближається до нуля і ним можна знехтувати).

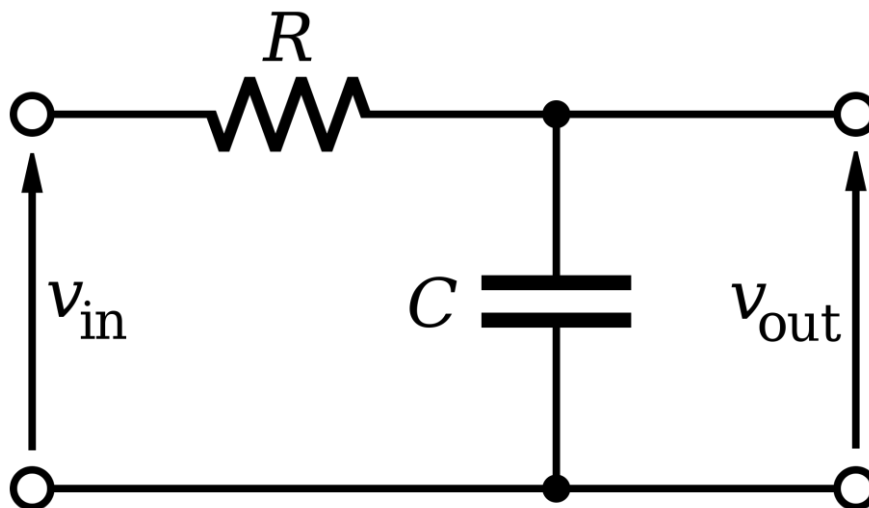


Рис. 2.5.2. Приклад фільтра низьких частот 1-го порядку

Цифровий фільтр — це система обробки сигналу, яка виконує математичні операції з вибіркою (безперервний сигнал, який був зведений до дискретного), за дискретний час (на відміну від безперервного сигналу, дискретний не має значення в кожен момент часу, є квантованим), цифровий (фізичний сигнал, який є представленням послідовності дискретних значень, наприклад, довільний потік бітів або оцифрований аналоговий сигнал) сигнал.

Використовується так само, як і аналогові фільтри. Вони використовуються для модифікації сигналу (для придушення небажаних складових сигналу). Можна класифікувати за: типом (низьких, високих частот, смуговий, режекторний), частотою зрізу, порядком (к-сть RC комірок), за імпульсною хар-кою (ІІР-фільтр, FІR-фільтр). Скінченна імпульсна характеристика, або FІR (відповідь фільтра після імпульсу досягне точно нуля через певний, кінцевий проміжок часу), коли ж при нескінченній імпульсній хар-ці (ІІР), розрахунок поточного значення вихідної величини залежить не тільки від дійсного і попередніх (N-1) значень вхідної величини, але також і від N попередніх значень вихідної величини [7].

2.6 Переваги і недоліки аналогових та цифрових фільтрів

Основною перевагою аналогових фільтрів є швидкість. Апаратна фільтрація означає, що сигнал, що виходить із фізичного фільтра, є кінцевим сигналом. Аналогові фільтри також забезпечують більший динамічний діапазон частот. Порівняно легко спроектувати схему частотної фільтрації з операційним підсилювачем (ОП), який може обробляти сигнали з частотами від 0,01 Гц до 100 кГц.

Проте аналогові фільтри набагато більше схильні до нелінійності (внаслідок меншої точності), оскільки електронні компоненти, які використовуються для фільтрації, за своєю природою є недосконалими і часто мають значення, визначені до певної межі точності (резистори часто мають похибку опору $\pm 5\%$). Ці характеристики до того ж можуть в подальшому додатково змінитись внаслідок температури чи часу. Елементи схем також вносять тепловий шум, оскільки кожен елемент піддається нагріванню. Як можна було очікувати, чим складніша схема, тим більша величина похибок компонентів. Також варто зазначати, що як і з будь-яким фізичним

обладнанням, переробка та адаптація фільтра під нові параметри складні в реалізації, оскільки обладнання не можна змінити дистанційно чи за допомогою мінімальних втручань до коду, як у випадку з цифровим.

Цифрова фільтрація має безліч переваг. Найбільш очевидним є те, що цифрові фільтри вимагають менше обладнання, оскільки вони виконуються на процесорі [12]. Це робить їх дуже універсальними і застосовними в будь-якій системі з процесором. Окрім зниження вартості, додаткове обладнання має недоліки, пов'язані з впливом зовнішніх факторів, таких як температура, вологість та загальний знос. Складність застосованих методів фільтрації даних, обмежена тільки обчислювальною потужністю. Цифрові фільтри являються програмованими застосунками, що спрощує їх імплементацію та тестування. Можливість швидко програмувати та створювати робочі прототипи цифрових фільтрів також сприяє їх універсальності. Не треба забувати і про економічну сторону. Цифрові фільтри значно дешевші особливо це стає помітним зі збільшенням складності фільтру.

Типовим недоліком цифрового фільтра є те, що вони значно повільніше аналогових. Цифрові фільтри вносять додаткову затримку в систему, оскільки аналогові дані, які надходять з обладнання, повинні бути оброблені на комп'ютері, перш ніж вони будуть відфільтровані за бажанням. Також важко обробляти великі діапазони частот за допомогою цифрових фільтрів. Частота дискретизації для захоплення одного циклу на частоті 0,01 Гц має бути надзвичайно високою (20 мільйонів точок). Це дуже велика кількість даних лише для одного циклу, не кажучи вже про декілька.

Для цілей моєї роботи цифрові фільтри є найкращим варіантом для фільтрації даних. Оскільки дають змогу швидко адаптувати свої характеристики під нові параметри. Також є простими в імплементації та тестуванні. Як було зазначено вище, являються безкоштовними в розробці і також, що не мало важливо дають змогу дистанційно без фізичного доступу до датчиків перевірити їх роботу.

2.7 Цифрова фільтрація

Фундаментальним кроком, необхідним для виконання цифрової фільтрації, є аналого-цифрове перетворення. Цей процес здійснюється шляхом вибірки сигналу в рівномірно розташованих часових точках і збереження списку амплітуд, знайдених у кожній точці часу рис 2.7.1. Цей список, якщо його отримати достатньо швидко, щоб запобігти згладженню, забезпечує високоточне відтворення початкової безперервної форми сигналу. Потім списком точок (або «часовими рядами») можна маніпулювати за допомогою операцій додавань, віднімань і множень, щоб отримати фільтр практично будь-якої бажаної характеристики.

Завдяки швидкісним АЦП і високошвидкісним процесорам ЦОС цифрові фільтри можуть працювати в режимі реального часу так само, як і їх аналогові відповідники [13]. Однією з основних переваг цифрових фільтрів є те, що їх можна застосовувати ретроспективно до даних, які вже були зібрані, а потім повторно обробляти з іншим набором параметрів фільтра.

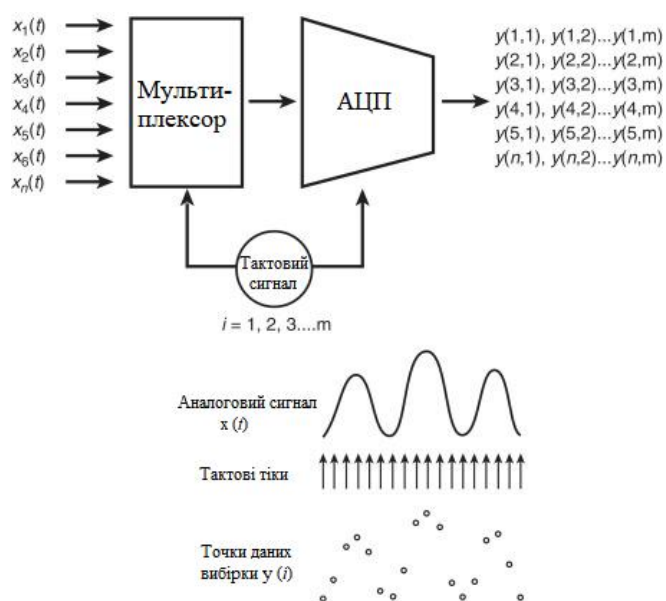


Рис 2.7.1. Аналого-цифрове перетворення

У більшості приладах АЦП використовують для вимірювання низькочастотного сигналу, що повільно змінюється (наприклад, від датчика температури, тиску, від тензодатчика тощо), коли вхідна напруга пропорційна відносно постійної фізичної величини.

В такому випадку основну роль грає статична похибка виміру. У специфікації АЦП цей тип похибки визначають адитивна похибка (Offset), мультиплікативна похибка (Full-Scale), диференціальна нелінійність (DNL), інтегральна нелінійність (INL) та похибка квантування [14]. Ці п'ять показників дозволяють повністю описати статичну похибку АЦП.

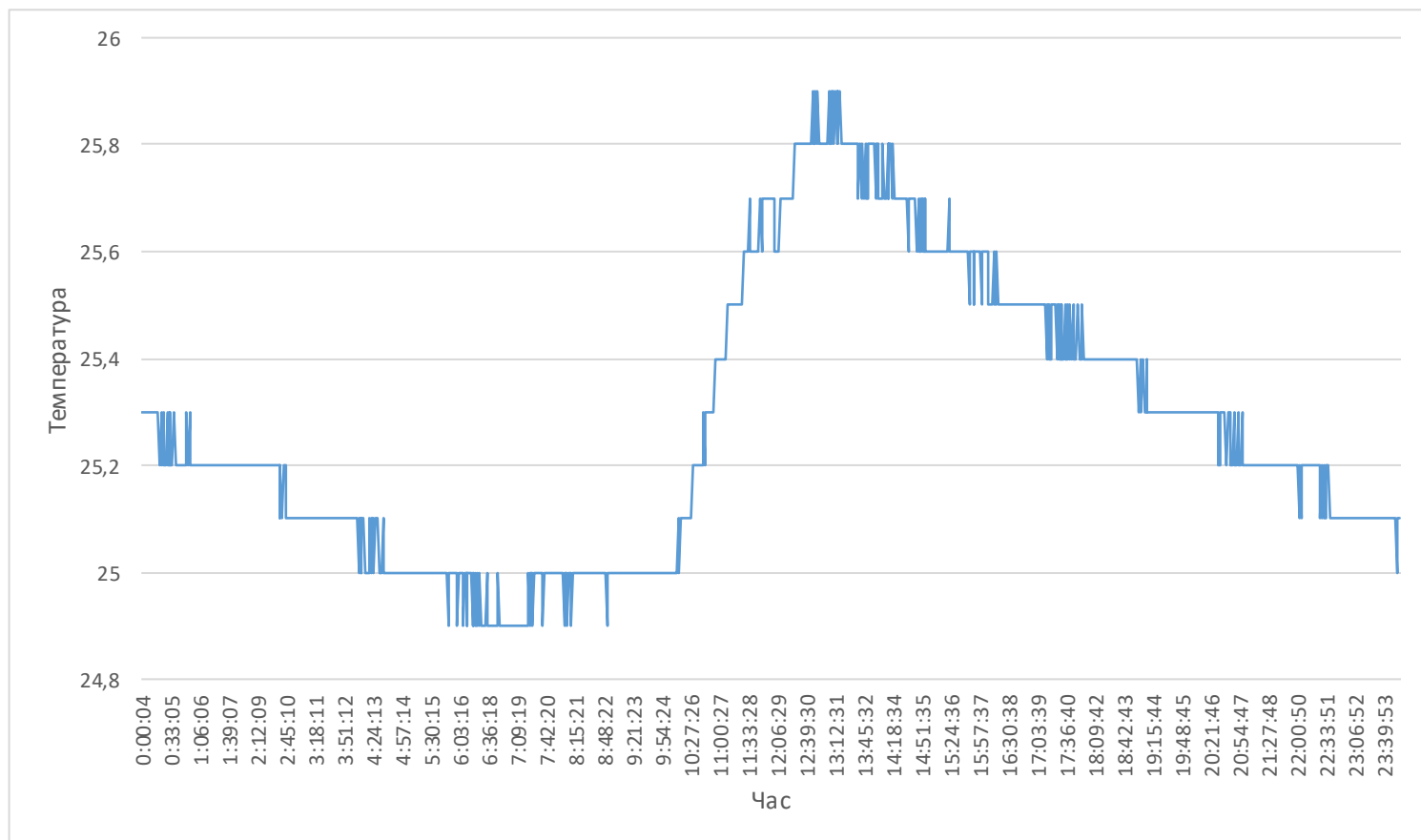


Рис 2.7.2. Графік показів температури датчика від часу

Оскільки адитивна похибка (Offset), мультиплікативна похибка (Full-Scale), диференціальна нелінійність (DNL) та інтегральна нелінійність (INL) це похибки, що спричиняються відхиленням лінійної функції передавальної характеристики АЦП від ідеальної – то в цій роботі будемо розглядати сигнал з шумом датчика, як наслідок похибки квантування. Бо визначення реальної передавальної характеристики ацп не являється можливим в дистанційному форматі роботи.

Похибка квантування є результатом самого процесу перетворення, вона викликана значенням кроку квантування і визначається як $\frac{1}{2}$ величини молодшого значущого розряду (LSB). Вона не може бути усунута в аналого-цифрових перетвореннях, так як є невід'ємною частиною процесу перетворення, визначається роздільною здатністю АЦП і не змінюється від АЦП до АЦП з однаковою роздільною здатністю.

На графіку, позначеному як рис. 2.7.2 можна побачити сигнал з шумом, цей шум відноситься до шуму квантування. Чим вище роздільна здатність АЦП, тим менше похибка квантування і менше шум квантування. Викидів в цій виборці даних часових рядів немає, але так як ми працюємо з даними в реальному часі – то вони можуть з'явитись в майбутньому. Тому нам треба підібрати такий алгоритм фільтрації, який би швидко обробляв дані і не спричиняв великої затримки сигналу і також, так як аномальні значення потенційно можливі – відсіював би їх також.

Розділ 3. Методи фільтрації

3.1 Ковзне середнє

Ковзне середнє є найпоширенішим фільтром у обробці цифрових сигналів, головним чином тому, що це найпростіший цифровий фільтр для розуміння та використання [3].

Незважаючи на свою простоту, фільтр ковзного середнього оптимально підходить для загального завдання: зменшення випадкових шумів при збереженні динаміки реагування сигналу. Це робить його головним фільтром для сигналів, закодованих у часовій області. Однак ковзне середнє є найгіршим фільтром для сигналів, закодованих у частотній області, з невеликою здатністю відокремлювати одну смугу частот від іншої. До родичів фільтра ковзної середньої належать ковзне середнє Гаусса, Блекмана та інші. Вони мають трохи кращу продуктивність у частотній області за рахунок збільшення часу обчислень. В моєму випадку було обрано просте ковзне/рухоме середнє (англ. simple moving average).

Формула фільтрації описується наступним виразом:

$$Filtered_{k+1} := \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=0}^{m-1} Raw_{k-i} \quad (3.1)$$

Filtered – відфільтроване вихідне значення

Raw – вхідні дані сигналу (температура в нашому випадку)

m – порядок фільтру, так зване «вікно»

k – лічильник який рахує від m до n

n – кількість сигналів для фільтрації

i – лічильники, який рахує від 0 до m-1

Розглянемо графічне пояснення алгоритму для перших 2 ітерацій для $m=3$:

1)

9	6	11
---	---	----

 занесемо m невідфільтрованих даних

$$\text{Avg} = (9+6+11)/3 = 8,6$$

2)

9	6	11
---	---	----

 $\xrightarrow{\ll}$

6	11	8
---	----	---

 здійснемо зсув вліво, видаливши найперше значення і запишемо нове

$$\text{Avg} = (6+11+8)/3 = 8,3$$

В якості експерименту було здійснено три фільтрації з різним параметром m , а саме 3, 6.

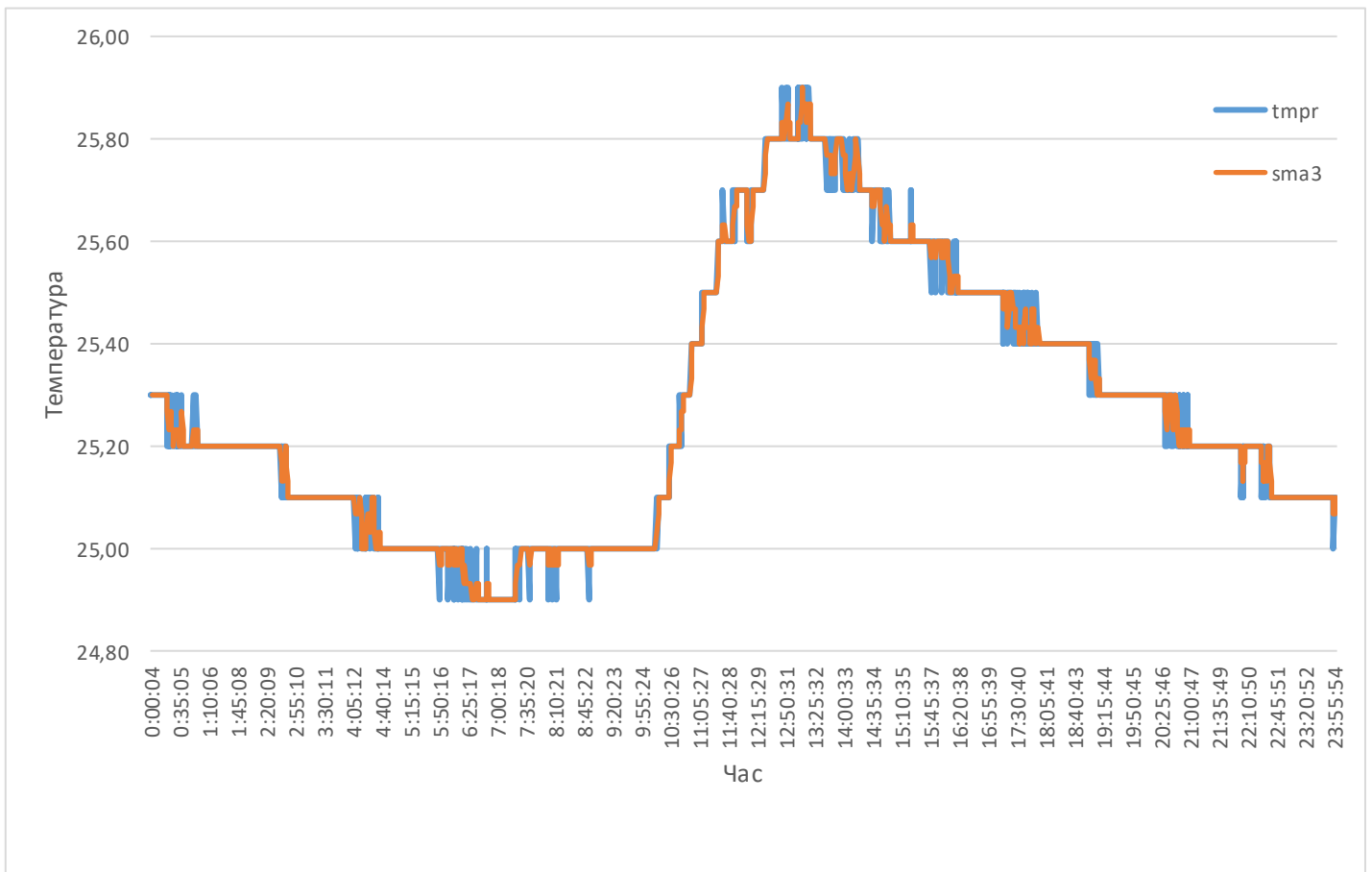


Рис. 3.1.1. Відфільтровані покази за допомогою ковзного середнього з вікном 3

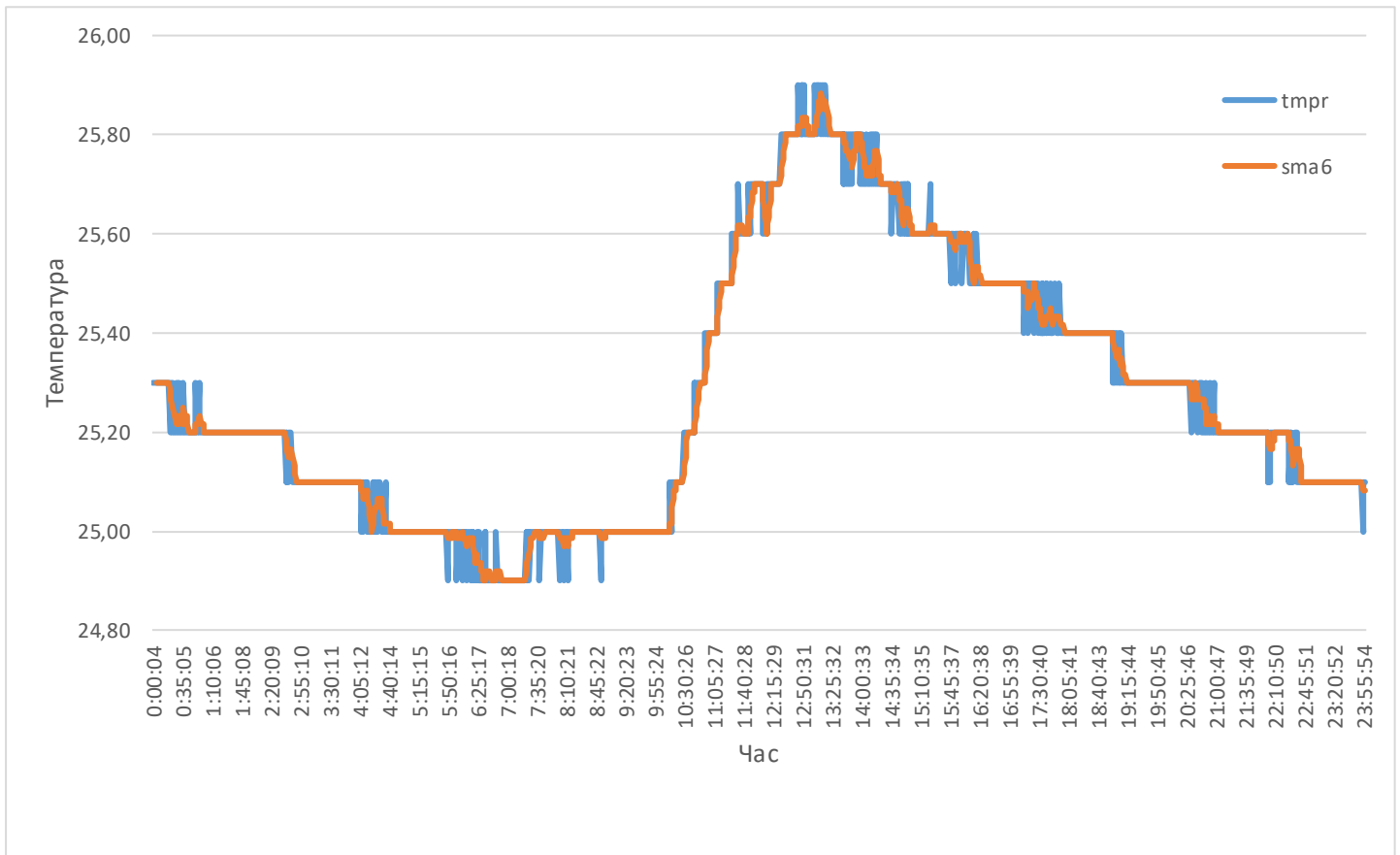


Рис. 3.1.2. Відфільтровані покази за допомогою ковзного середнього з вікном 6

Як видно з рис. 3.1.2 зі збільшенням порядку фільтру, фільтрація спричиняє все більші затримки сигналу і менш чутлива до зміни його динаміки. Оптимальним виявився *sma6*, показаний на графіку. Він зберігав динаміку не гірше *sma3* та дав можливість усунути більше шуму спричиненого датчиком теплоти. Найбільшим недоліком цього методу, є те що він надає однакові коефіцієнти ваги всім значенням, незважаючи на їх заженість від часу, хоча було б правильніше припустити, що більш нові дані важливіші, тому що краще відображають поточну динаміку сигналу.

3.2 Медіанний фільтр

Медіанний фільтр — це нелінійний фільтр, у якому кожне вихідне значення обчислюється як середнє значення вхідної вибірки вікна (набору значень для обчислення медіани), тобто результатом є середнє значення(медіана) після сортування за зростанням вхідних значень.

Зазвичай використовується непарна кількість елементів вікна. Медіанна фільтрація часто включає вибірку з 3 значень, рідше використовується 5 або навіть 7. Будь-який локальний екстремум, наприклад велике аномальне значення, викид через некоректну роботу датчика, ніколи не з'явиться у вихідній послідовності медіанного фільтру: медіанна фільтрація може бути корисною для зменшення шуму. Однак використовуючи такий вид фільтрації варто пам'ятати, що значення екстремум, яке являється правильним ніколи не стане медіанним, а отже завжди буде виключене в процесі фільтрації і ніколи не буде враховане. Тому треба бути дуже обережними при накладенні медіанної фільтрації бо це може лише нашкодити даним.

Розглянемо алгоритм фільтрації:

- 1) задання розміру вікна, кількості елементів вибірки з якої буде знайдено медіанне значення. Зазвичай це непарне число, для отримання лише 1 значення, як результуючого
- 2) сортування вибірки довжиною вікна в порядку зростання.
- 3) визначення медіанного (середнього значення)
- 4) перехід на наступну ітерацію з видаленням найстаршого значення і додаванням нового

Розглянемо графічне пояснення алгоритму для 1 ітерації для розміру вікна 3:

- 1)

65	56	110
----	----	-----

 розмір вікна рівний 3
- 2)

56	65	110
----	----	-----

 виконано фільтрацію за зростанням
- 3) filtered = 65 медіана знайдена
 <<
- 4)

65	56	110
----	----	-----

 \Rightarrow

56	110	34
----	-----	----

 набір даних для 2-ї ітерації

При збільшенні розміру вікна, алгоритм не змінюється

Розглянемо отримані результати фільтрації.

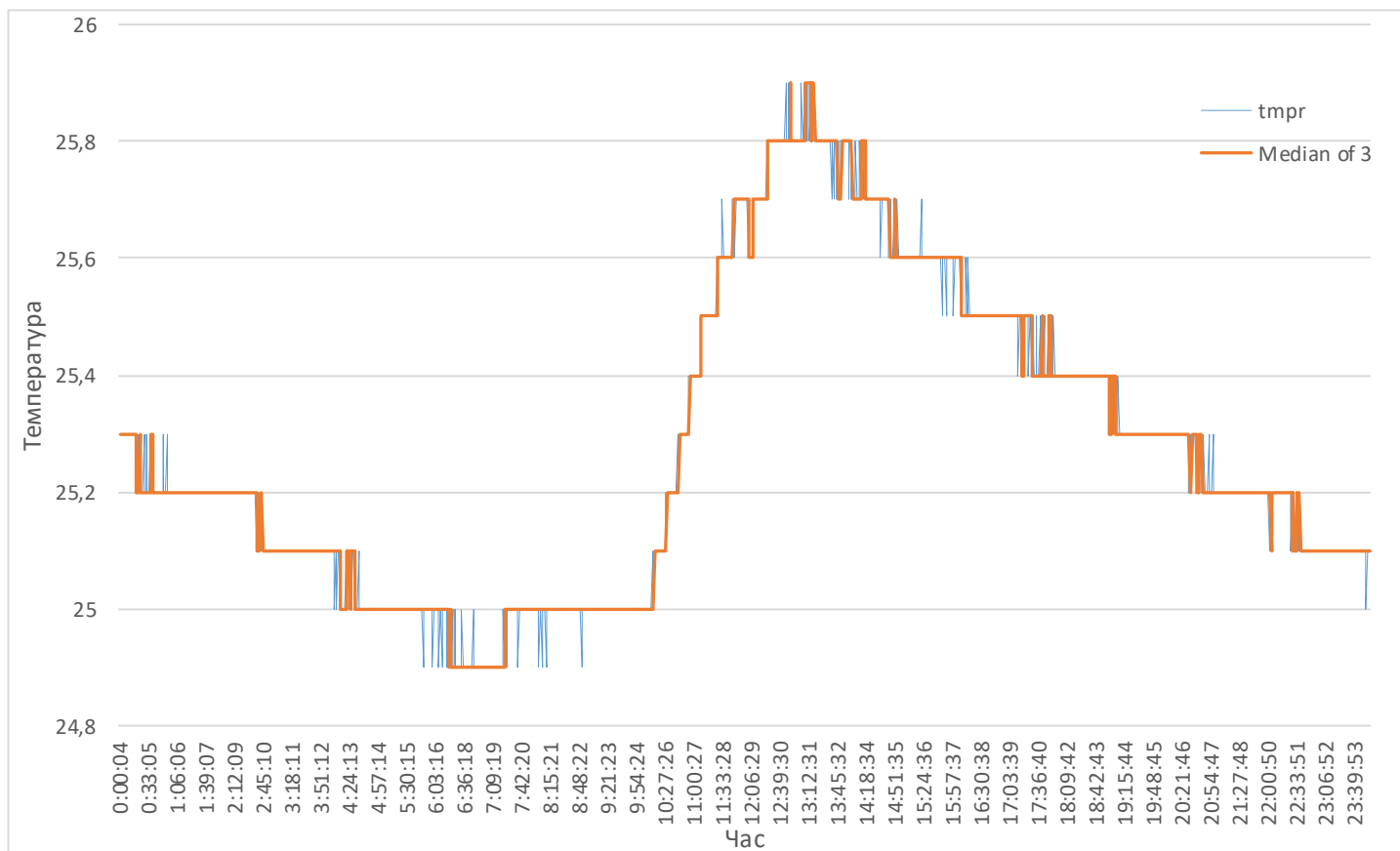


Рис. 3.2.1. Відфільтровані покази за допомогою медіанного фільтру з вікном 3

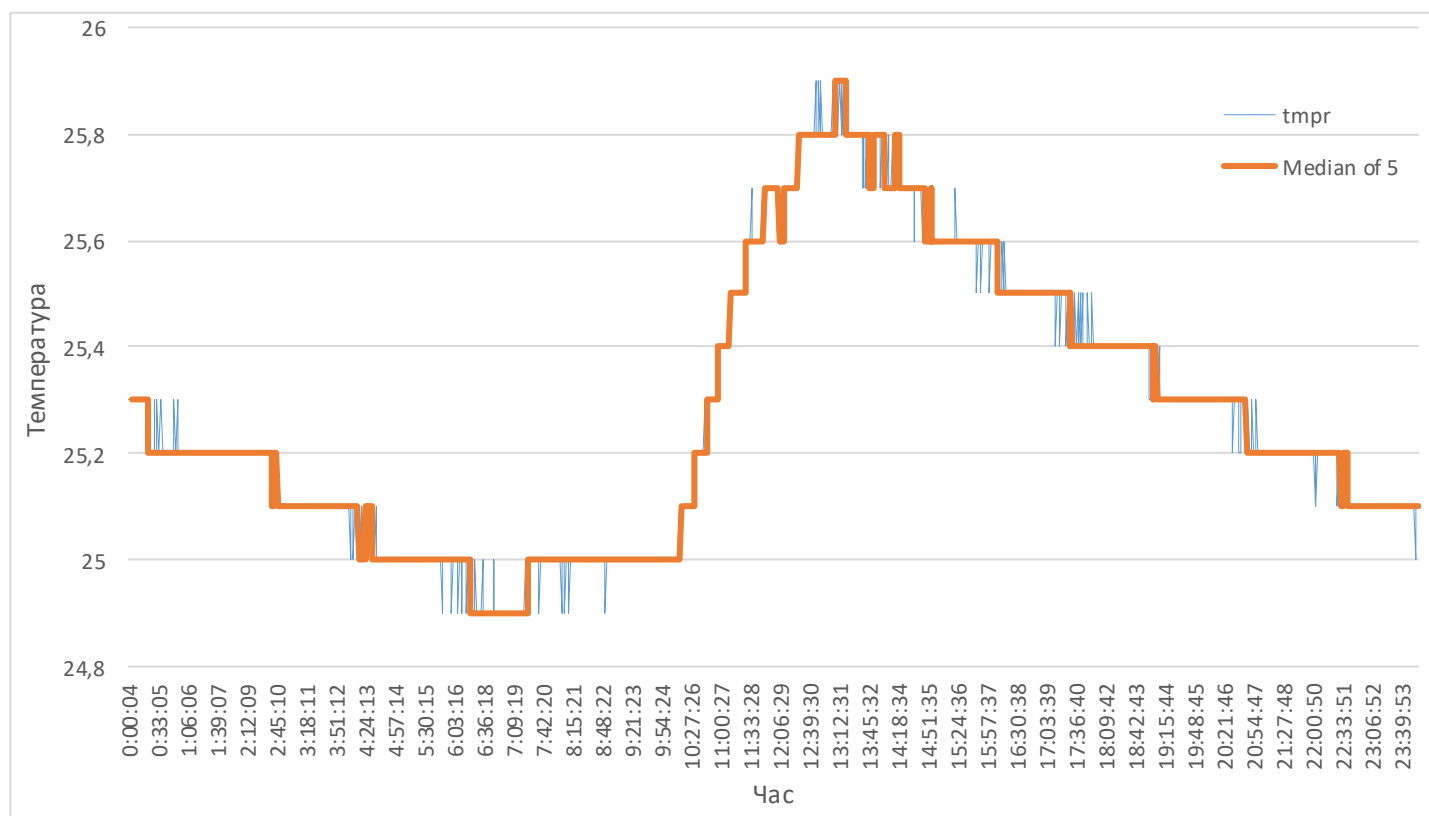


Рис. 3.2.2. Відфільтровані покази за допомогою медіанного фільтру з вікном 5

Згідно рис. 3.2.2 видно медіанний фільтр з вікном 5 справився найкраще і прибрав майже всі шуми. При цьому через те, що розмір вікна був невеликим фільтрація не вплинула на динаміку сигналу і не внесла значної затримки. Для нашої вибірки даних це виявився найкращий вид фільтрації з перевірених до цього. Але варто зазначити і мінуси такого алгоритму, оскільки медіанний фільтр не завжди видає результуюче значення із центру вікна даних, у фільтр вводиться додатковий фазовий шум [2]. Також на піках сигналу фільтр завжди обрізає в точках перегину, де похідна сигналу змінює знак. Також це найбільш ресурсозатратний алгоритм, оскільки вимагає попереднього сортування за зростанням вікна перед знаходженням кінцевого результату.

3.3 Експоненційне згладжування

Експоненційне згладжування було запропоновано наприкінці 1950-х років. Прогнози, створені за допомогою методів експоненціального згладжування, є усередненими коефіцієнтами ваги показників минулих спостережень, причому вагові коефіцієнти експоненційно зменшуються в міру старіння спостережень. Іншими словами, чим новіше було спостереження, тим вище ваговий коефіцієнт. Така структура генерує надійні прогнози швидко та для широкого діапазону часових рядів, що є великою перевагою та має велике значення для застосування в промисловості [1].

Наприклад, може бути доцільно надати більшу вагу до останніх спостережень, ніж до більш старих спостережень. Саме така концепція лежить в основі простого експоненційного згладжування. Прогнози розраховуються з використанням середньозважених показників, де вагові коефіцієнти зменшуються експоненційно, тобто найменші вагові коефіцієнти будуть надані найстарішими спостереженнями. α є коефіцієнтом згладжування, який лежить в межах $0 \leq \alpha \leq 1$. Швидкість, з якою вагові коефіцієнти зменшуються, контролюється параметром α . Якщо α малий (тобто близький до 0), більша вага надається старішим спостереженням. Якщо α великий (тобто близький до 1), більша вага надається новішим спостереженням.

Просте експоненційне згладжування застосовується і видає згладжений сигнал при наявності прийнятні двох спостережень. Термін коефіцієнт згладжування, застосовуваний до α , може бути хибно інтерпретованим, оскільки більші значення α фактично зменшують рівень згладжування, і в граничному випадку з $\alpha = 1$ вихідний сигнал рівний вхідному. α , близький до одиниці, має менший ефект згладжування, тоді як значення α , ближчі до нуля, мають більший ефект згладжування. Формально правильної процедури для вибору α немає, тому його зазвичай підбирають емпірично [15].

Використання експоненційне згладжування задається формулами:

$$\begin{aligned} s_0 &= x_0 \\ s_t &= \alpha x_t + (1 - \alpha)s_{t-1}, \quad t > 0 \end{aligned} \tag{3.2}$$

α - коефіцієнт згладжування, $0 \leq \alpha \leq 1$

x_t - необроблені дані

s_t - відфільтроване значення

Відповідно s_0 та x_0 значення в момент часу $t = 0$

Варто зауважити, що у визначенні вище s_0 визначається як x_0 , тобто як початкове значення сигналу. Оскільки експоненціальне згладжування вимагає, щоб на кожному етапі ми мали попередній прогноз, незрозуміло, як визначити початкове значення. Можна вважати, що початковий прогноз дорівнює початковому значенню сигналу, однак цей підхід має серйозний недолік оскільки експоненційне згладжування надає значну вагу минулим спостереженням, тому початкове значення сигналу матиме невиправдано великий вплив на ранні прогнози. Цю проблему можна подолати, дозволивши алгоритму брати значення перших n періодів (10 або більше) і використавши середнє їх значення, як початковий прогноз. Існує багато інших способів встановити початкове значення, але важливо зазначити, що чим менше

значення α , тим більш чутливим буде фільтрація до вибору цього початкового значення s_0 . Але це не стосується нашої вибірки, бо перші 19 значень її рівні 25,3 і тому вибір першого значення як початкового є виправданим.

Так як алгоритм фільтрації вичерпно описується формулами, графічне пояснення буде надлишковим. Перейдемо до отриманих результатів.

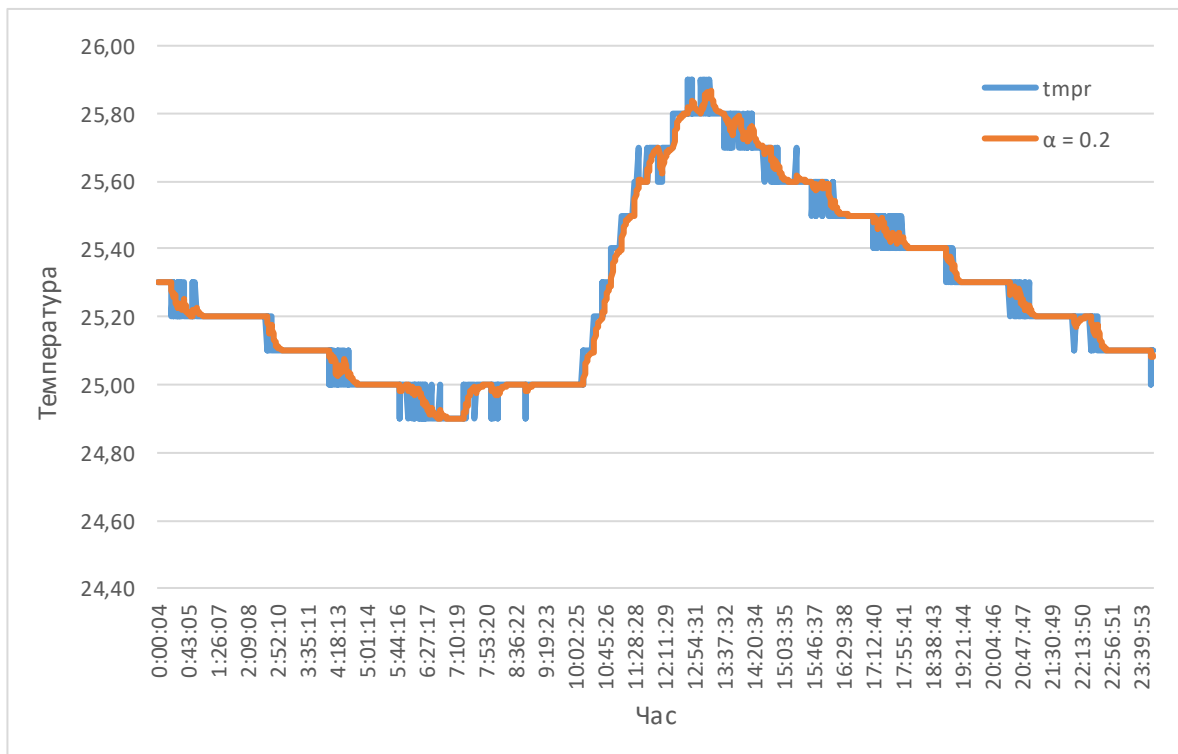


Рис. 3.3.1. Відфільтровані покази з $\alpha=0.2$

З графіків можна побачити, що дійсно $\alpha = 0.8$, має найменший ефект згладжування і більше всього порівняно з іншими випробуваними параметрами фільтра повторює вхідний сигнал, тоді як значення α , ближчі до нуля, $\alpha = 0.2$ має найбільший ефект згладжування. При цьому $\alpha = 0.5$ являється оптимальним рішенням з точки зору збереження динаміки сигналу та фільтрації шумів.

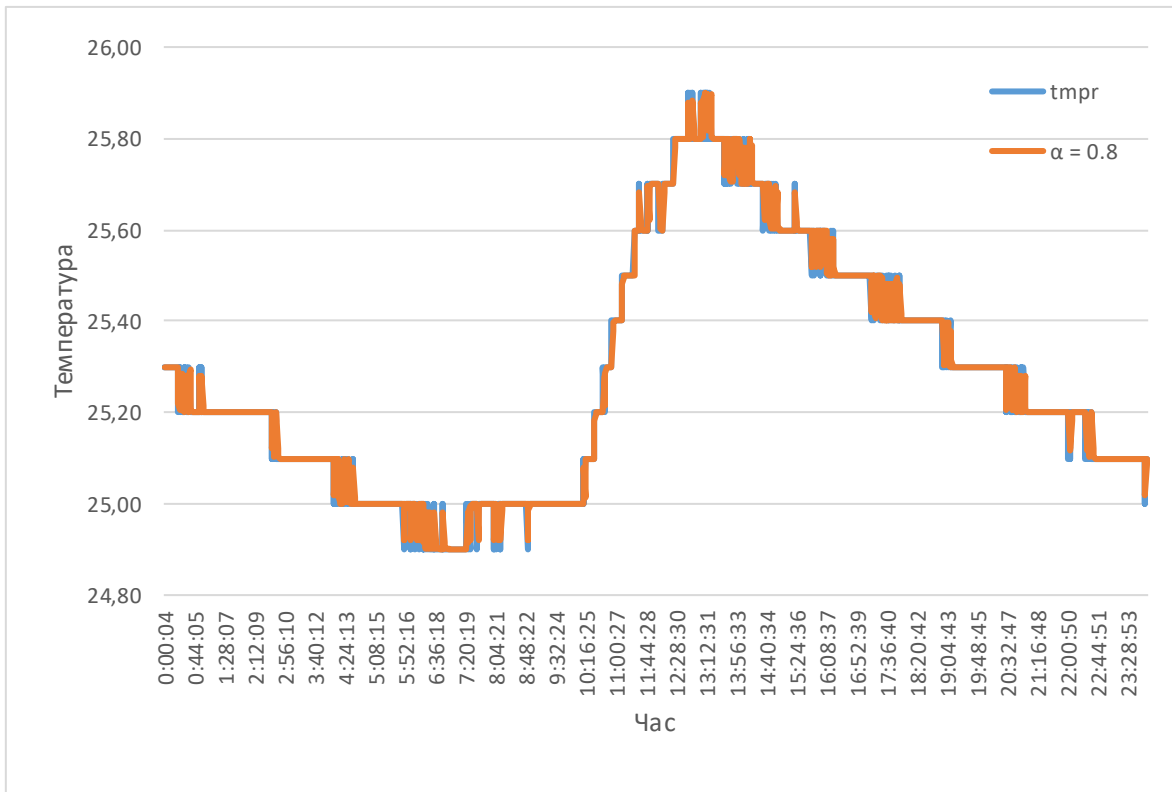


Рис. 3.3.2. Відфільтровані покази з $\alpha=0.8$

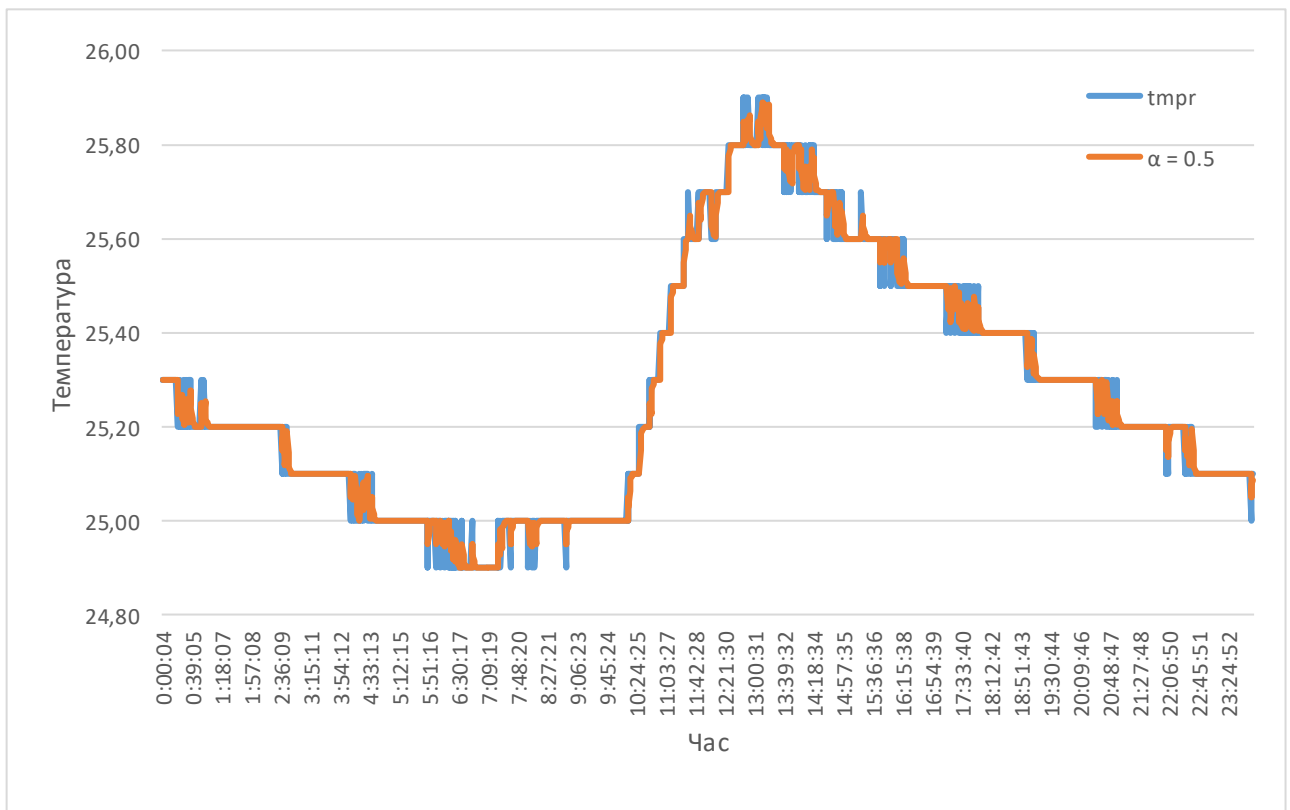


Рис. 3.3.3. Відфільтровані покази з $\alpha=0.5$

3.4 Порівняння методів фільтрації

Для того щоб визначити міру, наскільки той чи інший метод фільтрації успішно подавляє рівень шуму, підрахуємо співвідношення сигнал/шум (SNR, Signal-to-noise ratio). Підрахунки були здійснені за формулою:

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \quad (3.3)$$

Де P_{signal} та P_{noise} це середні потужності сигналу та шуму відповідно. Ці значення мають бути виміряні в еквівалентній точці в системі, тобто за однакової часової мітки в нашому випадку, також їх значення мають бути в межах однієї смуги пропускання системи.

Маючи дані часових рядів температури, було здійснено фільтрацію з використанням трьох методів фільтрації, а саме: ковзне середнє, медіанний фільтр та експоненційне згладжування. Кожен з методів перевірявся декілька разів зі зміною параметрів фільтрації.

Розглянемо формулу середнього значення SNR для всіх точок часу детальніше:

$$P_{signal} = f(x_t); P_{noise} = |f(x_t) - x_t| \quad (3.4)$$

$$\overline{SNR} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{f(x_i)}{|f(x_i) - x_i|} \quad (3.5)$$

де x_t – значення температури в момент часу t

$f(x_t)$ – відфільтроване значення температури в момент часу t

Для більш наглядного порівняння було складено характеристичну таблицю зі значеннями \overline{SNR} для кожного з методів

Порівняльна характеристика фільтрів з різними параметрами

Метод фільтрації	Налаштування	\overline{SNR}
ковзне середнє	Розмір вікна = 3	627.09
	Розмір вікна = 6	947.36
медіанний фільтр	Розмір вікна = 3	253.64
	Розмір вікна = 5	253.59
експоненційне згладжування	Коефіцієнт $\alpha = 0.2$	1338.68
	Коефіцієнт $\alpha = 0.5$	1146.16
	Коефіцієнт $\alpha = 0.8$	698.40

Для SMA3 \overline{SNR} рівний 627.09, для SMA6 відповідно 947.36. Це показує що вікно розміром в 6 елементів в 1.51 рази ефективніше. Як видно з таблиці \overline{SNR} медіанного фільтру майже не змінюються в залежності від розмірів вікна, це пов'язано з тим, що дані вибірки повільно змінюються в наслідок чого відфільтроване значення часто співпадає зі значенням вхідного сигналу. Відповідно кількість точок, де можна виділити сигнал шуму є малою в порівнянні з іншими видами фільтрації, що і результує в мале значення \overline{SNR} , незалежно від розміру вікна медіанного фільтру. Найкраще ж себе показав фільтр експоненційного згладжування, з коефіцієнтом $\alpha = 0.2$, він є в 1.17 рази ефективніше ніж при використанні $\alpha = 0.5$ і в 1.92 рази ефективніше $\alpha = 0.8$. Це підтверджує теоретичну базу даного виду фільтрації, адже дійсно чим ближче α до 0, тим більше здійснюється фільтрація і тим більша вага надається старішим спостереженням, що також спричиняє довшу затримку відфільтрованого сигналу.

Висновки

Цифрові фільтри широко використовуються в багатьох сферах, для відокремлення та/або видалення певних частотних складових цього сигналу. У роботі було на практиці досліджено роботу трьох з них, а саме : фільтру ковзного середнього, медіанний фільтр та фільтру з використанням експоненційного згладжування.

Ковзне середнє та експоненційне згладжування відрізняються тим, що для точного відновлення вихідного сигналу без втрати інформації всі дані експоненційного згладжування мають бути доступними, оскільки старі дані зменшують ваговий коефіцієнт експоненційно, на відміну від простого ковзного середнього, в якому деякі вибірки можна пропустити без великої втрати інформації через постійне усереднення даних вибірок.

Недолік медіанної фільтрації полягає в зрізанні піків сигналу внаслідок фільтрації, що добре для уникнення викидів, але може привести до хибної фільтрації якщо дані коректні. Також збільшення довжини вікна, в методах де воно є частиною алгоритму, призводить до збільшення часу реагування алгоритму на обробку нових значень. Це є характерним для таких фільтрів, як ковзне середнє та медіанний фільтр.

Якщо говорити з точки зору обчислювальних затрат, то медіанний фільтр являється найбільш затратним, оскільки крім самої фільтрації ще вимагає попереднього сортування з пошуком медіани, тому цей алгоритм краще не використовувати в сферах, де потрібна фільтрація в реальному часі, таких як обробка зображень. Найкращим же в цій області являється фільтр експоненційного згладжування, бо він може прогнозувати майбутнє значення маючи лише останнє прогнозоване значення.

Список літератури

1. Exponential Smoothing Approaches In Time Series Forecasting [Електронний ресурс] – Режим доступу URL: <https://towardsdatascience.com/exponential-smoothing-approaches-to-forecasting-time-series-34e4957ed1a>
2. Median filters – An efficient way to remove impulse noise [Електронний ресурс] – Режим доступу URL: <https://www.edn.com/median-filters-an-efficient-way-to-remove-impulse-noise/>
3. Signal Processing: Filtering Out The Noise [Електронний ресурс] – Режим доступу URL: <https://www.catchpoint.com/blog/signal-vs-noise>
4. Steven W. Smith, Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists, 2003. – 277-284 с.
5. Б.Ю. Жураковський, І.О. Зенів, Технології інтернету речей. Навчальний посібник, 2021. – 271 с.
6. Дж. Фрайден, Современные датчики. Справочник, 2005. – 34-50 с.
7. Рекурсивні фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою [Електронний ресурс] – Режим доступу URL: <https://shag.com.ua/zvyazok-roboti-z-naukovimi-programami.html?page=5>
8. The 4 Stages of IoT Architecture [Електронний ресурс] – Режим доступу URL: <https://www.digi.com/blog/post/the-4-stages-of-iot-architecture#:~:text=IoT%20system%20architecture%20is%20often,building%20or%20even%20a%20person.>
9. Managing Time-Series Data in Industrial IoT [Електронний ресурс] – Режим доступу URL: <https://thenewstack.io/managing-time-series-data-in-industrial-iot/>
10. IEEE Internet of Things Journal: Noise Removal in the Presence of Significant Anomalies for Industrial IoT Sensor Data in Manufacturing, 2020. – 7084 – 7096 с.
11. Grounding and shielding: No size fits all [Електронний ресурс] – Режим доступу URL: <https://www.edn.com/grounding-and-shielding-no-size-fits-all/>

12. Signal filtering, Signal suppression, Signal processing [Электронный ресурс] – Режим доступа URL: <https://training.dewesoft.com/online/course/filters#introduction-1>
13. R.C. Burgess, Encyclopedia of the Neurological Sciences (Second Edition), 2014.
14. Идеальная передаточная характеристика ацп [Электронный ресурс] – Режим доступа URL: <https://studfile.net/preview/3021550/page:4/>
15. Exponential smoothing [Электронный ресурс] – Режим доступа URL: <https://otexts.com/fpp2/expsmooth.html>