**Лекція 11**

**Тема 11. Найпоширеніші фільтри для датчиків у автоматизованих системах АУТП**

*Низькочастотні (Low-Pass) фільтри (RC-фільтр (пасивний) та активний фільтр Баттерворта). Високочастотні (High-Pass) фільтри. Смугові (Band-Pass) фільтри. Фільри Калмана, Чебишова, Бесселя.*

**Мета**: ознайомити студентів з найпоширенішими типами фільтрів, які використовуються для обробки сигналів датчиків в автоматизованих системах управління технологічними процесами (АУТП); розкрити принципи дії низькочастотних, високочастотних, смугових та спеціалізованих фільтрів (Калмана, Чебишова, Бесселя); сформувати уявлення про їхні частотні характеристики, переваги та обмеження; навчити обирати тип фільтра залежно від характеристик сигналу, вимог до точності, швидкодії та наявних ресурсів системи.

У сучасних автоматизованих системах управління технологічними процесами (АУТП) фільтрація сигналів від датчиків є ключовим етапом обробки інформації. Шуми, спотворення, імпульсні завади — усе це погіршує точність вимірювань та керування. Застосування **електронних (аналогових)** і **цифрових фільтрів** дозволяє значно підвищити якість сигналу та стабільність роботи системи.

**Низькочастотні фільтри (Low-Pass Filters)**

* **Пасивний RC-фільтр**

Переваги: простота, дешевизна

Недоліки: обмежена крутизна зрізу, залежність від допусків

**Активний фільтр Баттерворта**

## Особливості:

## Реалізується на операційних підсилювачах

## Дає плавну амплітудно-частотну характеристику

## Без «завалів» у діапазоні пропускання

## Рівномірна передача сигналу у дозволеній смузі

## Типовий варіант — 2-го порядку, формула залежить від обраної схеми (Sallen-Key, тощо)

## **Високочастотні фільтри (High-Pass Filters)**

## **Принцип:** фільтрують низькочастотні сигнали (наприклад, зміщення, температурний дрейф) і пропускають зміни, пов’язані з динамікою процесу.

## Аналогічна реалізація — інверсія RC-фільтра

## Часто використовується для виявлення імпульсів, швидких змін

## **Смугові фільтри (Band-Pass Filters)**

## Призначення: **пропускають** тільки вузький частотний діапазон, пригнічують решту.

## Наприклад, використовуються в системах: вимірювання вібрацій, акустичних датчиках (ультразвук), фільтрації резонансних сигналів.

## Типова реалізація: два каскади — LPF + HPF, або активні на ОП з визначеним Q-фактором.

## **Спеціалізовані цифрові фільтри**

### ****Фільтр Калмана (Kalman Filter)****

* Оптимальний фільтр для **шумних, змінних у часі систем**
* Враховує **статистику шумів та модель об'єкта**
* Широко використовується в:
	+ гіроскопах і акселерометрах,
	+ GPS,
	+ системах навігації і стабілізації.

### ****Фільтр Чебишова (Chebyshev Filter)****

* Забезпечує **крутіший спад АЧХ** у порівнянні з Баттервортом
* Має **рябіння в зоні пропускання** (тип I) або **загасання** (тип II)
* Підходить для систем, де потрібно **швидко обмежити високочастотні завади**

### ****Фільтр Бесселя (Bessel Filter)****

* Має **лінійну фазову характеристику**, зберігає форму імпульсу
* Перевага — **мінімальні фазові спотворення**
* Застосовується в:
	+ аудіообробці,
	+ прецизійних вимірюваннях,
	+ ПІД-регуляторах.

## **Приклади застосування фільтрів у датчиках**

| **Датчик** | **Тип фільтра** | **Призначення** |
| --- | --- | --- |
| Гіроскоп (IMU) | Калмана + LPF | Стабільна орієнтація, зменшення шуму |
| Датчик температури | RC-фільтр, експоненційне згладжування | Уникнення стрибків, плавна зміна |
| Датчик вібрації | Смуговий фільтр | Виділення резонансної частоти |
| Ультразвуковий рівнемір | Медіанний + фільтр Бесселя | Усунення імпульсних завад, стабільність |
| Привод (частотник) | LPF Баттерворта | Зменшення шуму ПІД-сигналу |

**Правильний вибір типу фільтра базується на:**

* характері завад,
* частотних властивостях сигналу,
* вимогах до **фази**, **точності**, **швидкодії**, **обчислювальних ресурсів**.

**Фільтр Калмана**

**Фільтр Калмана** — це **математичний алгоритм**, який дозволяє **оптимально оцінити** стан системи на основі **шумного, неповного або неточного сигналу**.

Він:

* поєднує *модель динаміки об'єкта* та *реальні вимірювання*,
* забезпечує **статистичну мінімізацію похибки оцінки**,
* працює **в реальному часі**, коригуючи попередній прогноз на основі нового виміру.

Фільтр Калмана має численні застосування у технології. Поширеним є застосування для наведення, навігації та керування транспортними засобами, особливо літаками та космічними апаратами. Крім того, фільтр Калмана є широко застосовуваною концепцією в аналізі часових рядів, що використовується у таких галузях як обробка сигналів та економетрія. Фільтри Калмана також є однією з головних тем у плануванні та керуванні роботизованим рухом, й іноді включаються до оптимізації траєкторії.

Цей алгоритм працює як двокроковий процес. На кроці передбачення фільтр Калмана видає оцінки змінних поточного стану, разом із їхніми невизначеностями. Щойно отримано спостереження виходу наступного вимірювання (неодмінно якоюсь мірою спотворене відхиленням, включно з випадковим шумом), ці оцінки уточнюються з використанням середнього зваженого, в якому більше ваги надається оцінкам з вищою визначеністю. Через рекурсивну природу алгоритму він може працювати в реальному часі, використовуючи лише наявні вхідні вимірювання, попередньо обчислений стан та його матрицю невизначеності; ніякої додаткової інформації не потрібно.

Поширеним є хибне уявлення, що фільтр Калмана передбачає, що всі вектори помилок та вимірювання мають нормальний розподіл. Оригінальна робота Калмана виводила цей фільтр з використанням теорії прямокутної проєкції, щоби показати, що коваріація мінімізується, і цей результат не вимагає жодного припущення, наприклад, що похибки мають нормальний розподіл. Він потім показав, що цей фільтр видає точну оцінку умовної ймовірності в особливому випадку, коли похибки мають нормальний розподіл.

Як приклад застосування, розгляньмо задачу визначення точного положення вантажівки. Вантажівку може бути обладнано пристроєм [GPS](https://uk.wikipedia.org/wiki/GPS), що надає оцінку положення в межах кількох метрів. Оцінка GPS, ймовірно, буде зашумленою; зчитування швидко «стрибають довкола», проте завжди залишаючись в межах кількох метрів від дійсного положення. Крім того, оскільки вантажівка, як очікується, слідує законам фізики, її положення також може бути оцінене шляхом інтегрування її швидкості за часом, визначеної відстежуванням обертів коліс та кута повороту керма. Цей прийом відомий як [зчислення](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A7%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D0%BA%D0%BE%D0%BE%D1%80%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D1%82%22%20%5Co%20%22%D0%A7%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D0%BA%D0%BE%D0%BE%D1%80%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D1%82). Як правило, зчислення надаватиме дуже плавну оцінку положення вантажівки, але вона [дрейфуватиме](https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%94%D1%80%D0%B5%D0%B9%D1%84_(%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D1%83%D0%BD%D1%96%D0%BA%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%97)&action=edit&redlink=1)[[en]](https://en.wikipedia.org/wiki/Drift_%28telecommunication%29) з часом у процесі накопичення маленьких помилок.

У цьому прикладі фільтр Калмана можна розглядати як такий, що працює у дві окремі фази: передбачення та уточнення. У фазі передбачення старе положення вантажівки модифікуватиметься відповідно до фізичних [законів руху](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%B8_%D0%9D%D1%8C%D1%8E%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%B0) (динамічна модель, або модель «переходу стану»), плюс будь-які зміни, створені педаллю газу та кермом. Обчислюватиметься не лише оцінка нового положення, але й нова коваріація. Можливо, коваріація пропорційна швидкості вантажівки, оскільки ми менш впевнені у точності оцінки положення зчисленням на високих швидкостях, але дуже впевнені в такій оцінці положення при повільному русі. Далі, у фазі уточнення з пристрою GPS отримується вимірювання положення вантажівки. Разом з цим вимірюванням надходить певна невизначеність, і її коваріація по відношенню до невизначеності передбачення з попередньої фази визначає, наскільки нове вимірювання вплине на оновлене положення. В ідеалі, якщо оцінки зчислення, як правило, дрейфують від дійсного стану, то вимірювання GPS повинні притягувати оцінку положення назад до дійсного положення, але не збурювати її до такої міри, що вона стане швидко змінюваною та зашумленою.