Кафедра електроніки
Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій (ФАЕТ)

Електронні системи

Electronic Systems

Lecture #2

Яновський, Фелікс Йосипович
професор, доктор технічних наук,
лауреат Державної премії України, IEEE Fellow
Завідувач кафедри електроніки НАУ

Орієнтовний тематичний план лекцій

Основи теорії систем, сигнали і первинні перетворювачі електронних систем

1.	Вступ. Визначення і термінологія, класифікація	2
2.	**Характеристики електронних систем**	2
3.	Теорія систем, аналіз електронних систем	2
4.	Первинні перетворювачі електронних систем	4
5.	Сигнали електронних систем	2
6.	Компоненти і обробка сигналів в ЕС	1
7.	Експлуатаційні характеристики електронних систем	2
8.	Технічні характеристики електронних систем	2
9.	Технічна реалізація системи	1
10.	Електронні системи мобільного зв'язку	4
11.	Електронні системи локації	15
12.	Електронні системи авіоніки	8
	Всього годин	**45**

Characteristics of systems

- Accuracy – Точність
- Sensitivity – Чутливість
- Resolution – Роздільна здатність
- Linearity – Лінійність
- Bandwidth – Смуга частот
- Response time – Час відгуку
- Dynamic characteristics – Динамічні характеристики (поведінка системи у часі)
- System stability – Стійкість системи (Устойчивость)

Accuracy - Точність

- Відмінність поняття точності вимірювань і точності системи.
- Точність вимірювань - якість вимірів, що відбиває близькість їх результатів до істинного значення вимірюваної величини.
- Точність засобу вимірювань - це його якість, що відображає близькість до нуля його похибок.
- Розрізняють правильність і прецизійність вимірювань:
  - **Правильність** - ступінь близькості результату вимірювань до істинного значення вимірюваної величини. Показником правильності зазвичай є значення систематичної похибки
  - **Прецизійність** - ступінь близькості один до одного незалежних результатів вимірювань, отриманих в конкретних встановлених умовах, залежить тільки від випадкових факторів і не пов'язана з істинним значенням вимірюваної величини. Міра прецизійності - стандартне відхилення результатів вимірювань, при цьому менша прецизійність відповідає більшому стандартному відхиленню

Accuracy – Точність електронної системи

- Якщо дати просте пояснення, ТОЧНІСТЬ системи показує наскільки робота системи близька до очікуваної. У випадку регулятора швидкості електровоза нас цікавить, чи дійсно швидкість дорівнює 80 км/год?
- Якщо фактично може бути 88 або 72, то точність ±8 км/год
- Або у відсотках ±10%.
- Але ці дві оцінки точності є еквівалентними лише за умови, що номінальна швидкість є 80 км/год.
- Для того, щоб уникнути необхідності наводити номінальну швидкість (швидкість – це лише приклад), говорять про ***максимальну похибку*** або ***найнижчу точність***. Вона зазначається або в абсолютних цифрах (наприклад, відхилення від номіналу на ±8 км/год), або у відсотках від певної МАКСИМАЛЬНОЇ величини.
- В останньому випадку доведеться дати максимальну ходову швидкість потягу V_{max}=321 км/год, а тоді дати точність у % від V_{max}:

$$Error_{max} = \frac{\Delta x_{max} \cdot 100}{x_{max}} = \frac{\Delta V_{max} \cdot 100}{V_{max}} = \frac{8 \cdot 100}{321} = 2.5\%$$

- Це подібно тому, як точність вольтметра визначається відносно всієї робочої шкали (в масштабі всього робочого діапазону).

Accuracy - Точність

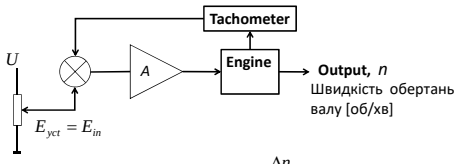
- З точністю пов'язана і на неї впливає інша кількісна величина, яку називають ***відтворюваність*** (воспроизводимость, precision, reproducibility, repeatability). Фактично – це **прецизійність**.
- Приклад. Регулятор температури встановлений на 10 град. Вимірювання дає 7.3. Похибка складає 2.7. Але повторюючи таку установку, виявляємо, що дані вимірювань є: 7.3, 7.8, 6.7, 7.8 град (вони всі в діапазоні 6.7 – 7.8).
- Тобто в той час коли похибка складає 2.7, показання повторюються у межах 1.1.
- Це означає, що якщо замінити у шкалі 10 на 7.3, отримаємо точність ±1.1. Тобто необхідне градуювання (калібрування).

Sensitivity - Чутливість

- Чутливість може трактуватися по-різному. Це залежить від конкретної системи.
- Приклади: 1)приймач системи зв'язку, 2)радіолокаційний приймач виявлення.
- Чутливість до відхилення. Наприклад, ЕПТ: відношення лінійного відхилення плями на екрані до величини напруги, що спричиняє відхилення, або розмах відхилення на одиницю напруги.
- Останнє визначення може бути узагальнено наступним чином.
- Чутливість: **Змінювання вихідної величини на одиницю змінювання вхідної величини**.
- Тоді чутливість підсилювача звуку U_{out}/U_{in}, тобто майже те саме, що коеф. підсилення.
- А що з регулятором швидкості?

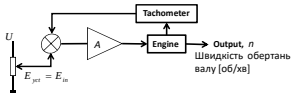
Sensitivity - Чутливість

- Для регулятора швидкості чутливість визначається як величина змінювання швидкості на одиницю змінювання вхідної напруги. При цьому припускається (розуміється), що задана величина швидкості перетворюється в електричну напругу.
- Тоді функціональна схема системи регулятора швидкості:



$$Sensitivity = \frac{\Delta n}{\Delta E_{in}}$$

Sensitivity - Чутливість



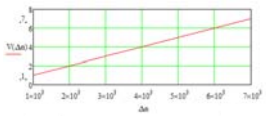
$E_{уст}$, V	n, rev/min
5	3000
6	4000

$$\Delta E_{in} = 6 - 5 = 1V$$

$$\Delta n = 4000 - 3000 = 1000\, rev/\min$$

$$Sensitivity = \frac{\Delta n}{\Delta E_{in}}$$

$$Sensitivity = 1000\frac{rev/\min}{V}$$

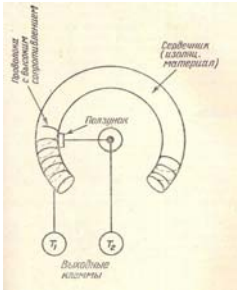


- Чутливість показує, **що** необхідно зробити з вхідною величиною, щоб отримати бажану вихідну.
- Якщо ми хочемо змінити швидкість на +3000 об/хв, то необхідно $E_{уст}$ на 3000:S=3000:1000=3; тобто 6+3=9 ⟹ 7000

Resolution – Роздільна здатність

- Роздільна здатність визначається як найменша кількість, що розрізнюється системою.
- Наприклад, в грошовій системі України найменшою кількістю, що розрізнюється системою, є одна копійка. Тобто 25.3 коп. і 25.1 коп. – означає те ж саме.
- Приклади:
  - Дротовий реостат (Wire-wound rheostat)
  - Радіолокаційна система
  - Цифрова система формування і відображення зображень

Rheostat. Resolution



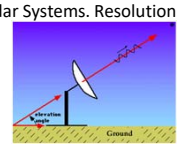
Ползунок – **slider**

Выходные клеммы - **output terminal**

Сердечник (изоляц. матерал) – **core (insulating material)**

Проволока с высоким сопротивлением – **high-resistivity wire**

Radar Systems. Resolution



Digital Imaging System

Sampling of image

Normal, 72pixels/inch

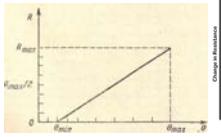
Sampled Image, 10 pixels/inch

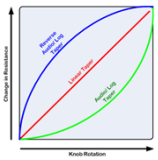
Resolution – Роздільна здатність

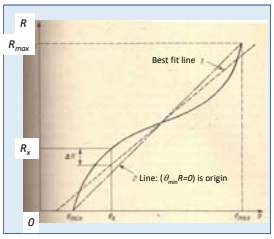
- Роздільна здатність може бути «віднесена» до входу або до виходу. Ми можемо говорити про найменшу величину, яку можна розрізнити на вході або на виході.
- РЗ за вхідною величиною є найменше змінювання, розрізнюване системою, яке призводить до зміни вихідної величини.
- Відповідне змінювання вихідної величини є роздільна здатність за вихідною величиною.
- Ці дві роздільні здатності пов'язані таким самим чином, як вхідна величина пов'язана із вихідною.
- Про деякі пристрої кажуть, що вони мають безмежну роздільну здатність, тобто можуть розрізняти будь-яку найменшу кількісну величину. Але це лише теоретично.

Linearity - Лінійність

- Ми класифікували системи на л. і н/л і констатували, що фізичні системи можуть прийматися за лінійні. Яку неточність при цьому ми вводимо? Ступінь лінійності або не лінійності є кількісною мірою цієї неточності.
- Як приклад візьмемо регульований резистор, у якого опір R залежить від кута повороту θ вісного стрижня.







Taper (конус); тут: функціональна характеристика змінного резистора

Linearity - Лінійність

- Лінійність може бути виражена у відповідних одиницях (оми і градуси у даному випадку)

або у відсотках від максимуму

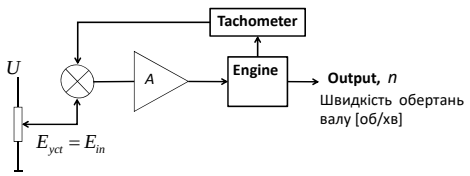
$$Linearity = \frac{\Delta R}{R_{\max}} \cdot 100\%$$

або у відсотках від виміряної величини (якщо вона вимірюється)

$$Linearity = \frac{\Delta R}{R_x} \cdot 100\%$$

Bandwidth – Смуга частот

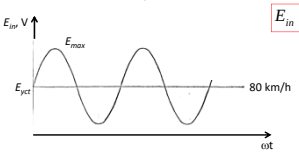
- Смуга частот – в підсилювачах. Схоже визначення - для системи в цілому.
- Смуга частот системи є діапазон між верхньою і нижньою частотами, де потужність зменшується на 3 дБ.
- To clarify this definition for general case let's go back to the speed control system.



Bandwidth – Смуга частот

- В ідеальному випадку $E_{уст}$=*const*, але припустимо, що воно змінюється:

$$E_{in} = E_{уст} + E_{\max} \sin \omega t$$



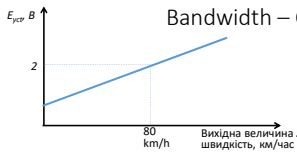
Тоді швидкість має змінюватися синусоїдально.

- Але це передбачає, що система реагує достатньо швидко!

Якщо це не так? Тоді вихідна величина не буде точно наслідувати вхідну.

- Розглянемо кількісний приклад. Дана залежність вхідної та вихідної величин:

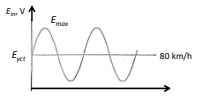
Bandwidth – Смуга частот



Відправною величиною для всіх величин є $E_{уст}$ регулятора швидкості.

- Note that at ***S*=80 km/h;** $E_{уст}$ **=2V**; *and* $Sensitivity = 40\frac{km/h}{V}$

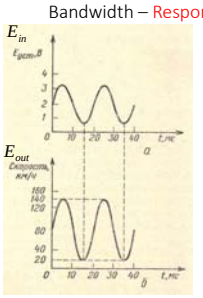
If E_{max}*=1.5V⇒* $E'_{уст}$*=2+1.5sin*ωt



Let's *f=50Hz*

Then $\omega=2\pi f=314$ *rad/s*

Bandwidth – Response time – Час відгуку – Время отклика



It is an ideal case.

E_{out} can reach the expected amplitude (±40 km/h) only if the system is able to accelerate so quickly to follow the sine signal of 50 Hz.

So, the **Response Time** of the system should be short enough!

Calculations:

$$E_{in} = 2 + 1.5\sin 314t$$

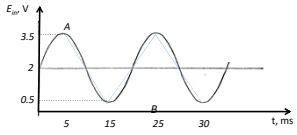
$$\frac{dE_{in}}{dt} = 1.5 \cdot 314 \cos 314t$$ Скорость изменения / Change rate

Max change of the speed is when cos314t=1 and sin314t=0. So, the velocity of voltage change is: 1.5 ·314 V/s=**471 V/s**.

In application to the output (*Sensitivity=40*), it means the change rate of 471·40 km/h per sec. So, 18840 km/h per sec!!! Note: the change rate is proportional to the frequency!

Bandwidth – Response time – Час відгуку – Время отклика

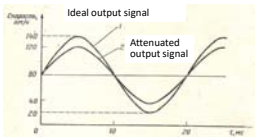
Можна апроксимувати швидкість зміни (velocity rate), замінивши синусоїду пилкоподібною лінією (сукупність двох ліній швидкого лінійного змінювання сигналу з додатною і від'ємною крутизною.



Conclusion: Зміни вихідної величини синхронно змінам вхідної величини реально лише якщо система здатна змінювати швидкість на 18840 км/час за 1 с або менше.
Якщо це не так, то вихідна величина буде мати меншу амплітуду. (Bad frequency characteristic)

From A to B:
3.5-0.5=3 V
15-5=10 msec
Change Rate=(3/10)·10³=**300 V/s**

This is **average rate** in contrast to 471 that was **maximum rate**



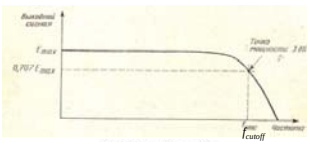
Частотна характеристика

- frequency characteristic
- response function
- frequency response
- response
- frequency behavior
- frequency-response characteristic
- response characteristic
- sine-wave response
- harmonic response characteristic
- frequency-response curve
- bandpass response
- harmonic response

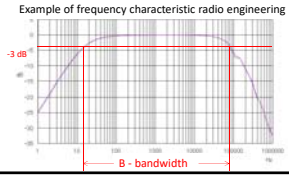
Частотна характеристика - frequency characteristic

- Коли частота вхідного сигналу збільшується, а його амплітуда залишається постійною, амплітуда вихідного сигналу зменшується.
- Частота, за якої рівень вихідного сигналу знижується до рівня 0.707 від вихідного сигналу в середині полоси частот (макс. вих. сигналу), називається частотою зрізу (cutoff frequency) – точкою половинного спаду потужності (-3дБ).
- Частотна характеристика системи керування зазвичай визначається за верхньою частотою зрізу. Нижня частота зрізу в системах керування зазвичай близька до 0 (постійний струм).

Частотна характеристика - frequency characteristic



Example of frequency characteristic radio engineering

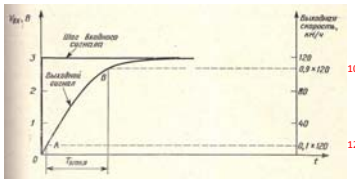


Sometimes, instead of Bandwidth the Response Time is used. **Response time** is the time a system or functional unit takes to react to a given input.

Іноді замість смуги пропускання (пропускної здатності) використовується час відгуку. **Час відгуку** - це час, який система (або функціональний блок) потребує, щоб відреагувати на задану вхідну дію.

Response time (час відгуку)

- More exactly, RT can be defined as the time spent for change of output signal from 0.1 to 0.9 of its final maximum value when the step-like waveform is applied to the input.
- Example: Приложим ступенчатое напряжение с шагом от 0 до 3 В и посмотрим выходной сигнал в одной и той же шкале времени.



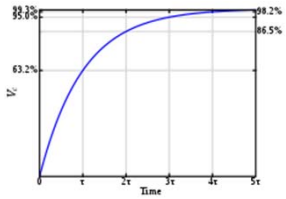
108km

12km

- In case of such definition: $T_{response} = \frac{0.35}{f_{cutoff}}$

Ширша смуга пропускання – менше час відгуку !!!

Время отклика системы математически совпадает с выражением для переходного процесса цепи заряда RC-цепи.



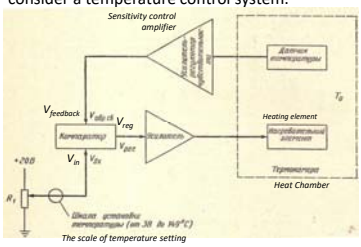
Тому час відгуку може виражатися у еквівалентних величинах опору R і ємності C, які фактично можуть не бути присутніми в системі.

$\frac{1}{e} = 0.368$ $\quad 1 - 0.368 = 0.632$

$T_{response} = \frac{0.35}{f_{cutoff}} = 2.2RC$

Точність системи в цілому
The total accuracy of the system

- For better understanding of the relationships between the characteristics let's consider a temperature control system.

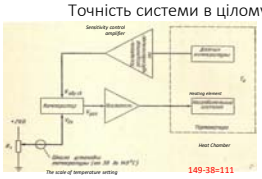


В установившемся режиме (steady state)

$V_{in} = V_{feedback}$

$V_{feedback}$ directly depends on the temperature.

Точність системи в цілому - The total accuracy of the system



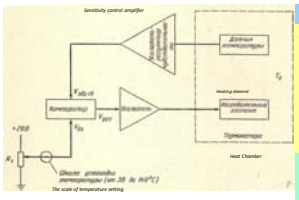
149-38=111

1. Відхилення чутливості від номінальної.
Приклад.
Дано: V_{in}=10 V відповідає 93°C на шкалі; V_{in}=15 V відповідає 121°C .
Тоді **номінальна чутливість**=28/5=5.6[°C/V]
Датчик видає 9mV/°C
Коеф. підсилення=20
Це означає, що зміна $V_{feedback}$=на 0.18 V відповідає 1°C.
Насправді: Чутливість=6.1; тоді зміна V_{in} на 1V дасть зміну температури на 6.1 замість 5.56. Похибка ≈10%.

3. Дискретність – роздільна здатність.
Ми вважали наразі, що можемо встановити будь-яку температуру. Але роздільна здатність системи не безмежна.
Приклад. Потенціометр має роздільну здатність 1% від номінального діапазону регульованих температур (111°C). Тоді роздільна здатність ≈1 °C. Тобто встановлення температури має проводитися з кроком 1 °C, менший приріст не розрізняється.
Повна роздільна здатність (РЗ) є комбінацією РЗ компонентів і датчика системи (тут – потенціометра, підсилювачів температур.

2. Відхилення від лінійності.

Точність системи в цілому - The total accuracy of the system



1. Відхилення чутливості від номінальної.
2. Відхилення від лінійності.

3. Дискретність – роздільна здатність.

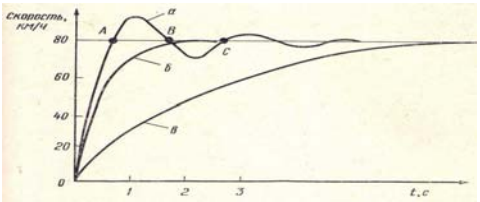
Якщо вимагається, щоб система підтримувала температуру з точністю ± 0.28 °C, то очевидно, що необхідно мати похибку всієї системи (разом із роздільною здатністю) менше за ± 0.28 °C .

Динамічні характеристики
Dynamic characteristics

- За умови зміни встановленої температури з 49 град. на 54 град. доводиться доволі довго чекати, поки T^o досягне 54 град.
- Якби ми визначали T^o одразу після встановлення, то виявили б, T^o =49 ☺, **тобто похибка 10%.**
- Причина – повільна реакція системи, або великий час відгуку (низькочастотна характеристика).
- Похибку такого типу називають **динамічною**, бо вона є функцією часу та існує **лише протягом перехідних режимів**.
- Динамічна похибка залежить від поведінки системи у часі.
- **Тепер не будемо обмежуватися лише усталеним режимом (steady state), а розглянемо поведінку системи в будь-які моменти часу.**

Dynamic characteristics

- Електровоз за установкою шкали має набрати швидкість 80. **Яким чином він може це зробити?**
- Є різні варіанти:
  1. Різко стартувати. Спочатку перевищити задану швидкість, а потім знизити її до 80.
  2. Повільно монотонно підвищувати швидкість до 80
  3. Максимально швидко, але монотонно підвищувати швидкість до заданої.



1. Система досягла швидкості 96 км/год за ≈1 с, тобто викид на 16 км/год, потім провал до 69 км/год, і встановилася швидкість 80 за ≈3.5 с. Такий режим називається ***недодемпфованим. (sub-damped)***

2. Шляхом змін різних компонентів системи можна забезпечити її поведінку в режимі, коли коливання (викиди) усунені. У прикладі швидкість 80 досягнена за ≈3.0 с. Такий режим називається ***критично демпфованим. (critically damped)***

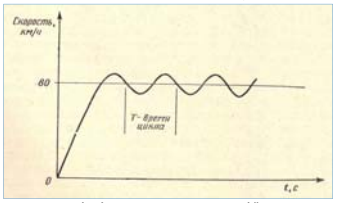
3. Подальша зміна компонентів системи або знов приведе до коливань, або просто збільшить час виходу на задану швидкість. Такий режим називається ***передемпфованим. (overdamped)***

Зазвичай доцільно досягнути бажаної величини якомога скоріше (у межах раціонального допуску). **Для цього зменшують динамічну похибку.**
Іноді можна допустити викид, який за величиною є меншим за допуск за швидкістю (наприклад, 80км/год ± 5%), і таким чином отримати більш швидкий відгук.

В обох випадках - загасні коливання.

damped [decaying] oscillation

Але може статися так, що коливання набудуть постійної амплітуди, і система так і не прийде у стан спокою, тобто **не досягне усталеного режиму постійної швидкості** 80 км/год; це буде коливальна система.
Різні відгуки систем та їх математичний опис розглядає **теорія систем**.



Ми розглянули різні параметри системи і їх вплив на точність.
Це важливо, бо найважливіше призначення ЕС - діяти у межах певної точності.
Але точність є не єдиним міркуванням, що береться до уваги у процесі проектування ЕС.