


Wrocław University of Science and Technology

Serwomechanizmy – zasada działania i zastosowania



IEP

Servomechanisms – Principles of Operation and Applications

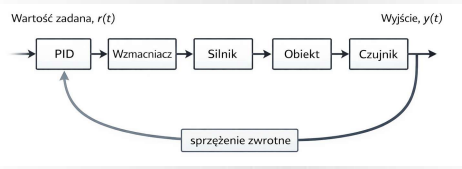

Wrocław University of Science and Technology

Definicja

- Serwomechanizm to układ automatycznej regulacji pozycją (ewentualnie prędkością lub momentem)
- Wykorzystuje sprzężenie zwrotne


Wrocław University of Science and Technology

Schemat blokowy



```
graph LR; R[Wartość zadana, r(t)] --> PID; PID --> Wzmacniacz; Wzmacniacz --> Silnik; Silnik --> Obiekt; Obiekt --> Czujnik; Czujnik --> Y[Wyjście, y(t)]; Czujnik -->|sprzężenie zwrotne| PID;
```

Zasada działania

- $r(t)$ – wartość zadana
- $y(t)$ – wartość rzeczywista
- $e(t)=r(t)-y(t)$
- $u(t)$ – sterowanie

Wzmacniacz

$$G_A(s) = K_A$$

$$G_A(s) = \frac{K_A}{T_A s + 1}$$

Silnik

$$G_M(s) = \frac{K_M}{(T_{ES} + 1)(T_{MS} + 1)}$$

TM – stała czasowa mechaniczna
odpowiada za **bezwładność układu mechanicznego**
(szybkość rozpędzania)

$$T_M = \frac{J}{B}$$

- J – moment bezwładności (wirnik + obciążenie),
- B – współczynnik tarcia lepkościowego.

☞ Interpretacja:

- duże J → silnik „wolno się rozpędza”,
- duże tarcie B → szybciej się stabilizuje, .

TE – stała czasowa elektryczna
opisuje **dynamikę obwodu elektrycznego silnika**

$$T_E = \frac{L}{R}$$

- L – indukcyjność uzwojeń,
- R – rezystancja uzwojeń.

Interpretacja:

- określa, jak szybko narasta prąd w uzwojeniu,
- zwykle **dużo mniejsza niż T_M** .

Gdy $TE \ll TM$
model pierwszego rzędu

$$G_M(s) = \frac{K_M}{T_M s + 1}$$

Obiekt

$G_O(s) = \frac{K_O}{T_O s + 1}$ inercyjny I rzędu

$G_O(s) = \frac{K_O}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$ inercyjny II rzędu

$G_O(s) = \frac{K_O}{T^2 s^2 + 2\zeta T s + 1}$ oscylacyjny (II rzędu)

$G_O(s) = \frac{K_O}{T_O s + 1} e^{-s\tau}$ Inercyjny z opóźnieniem

Czujnik

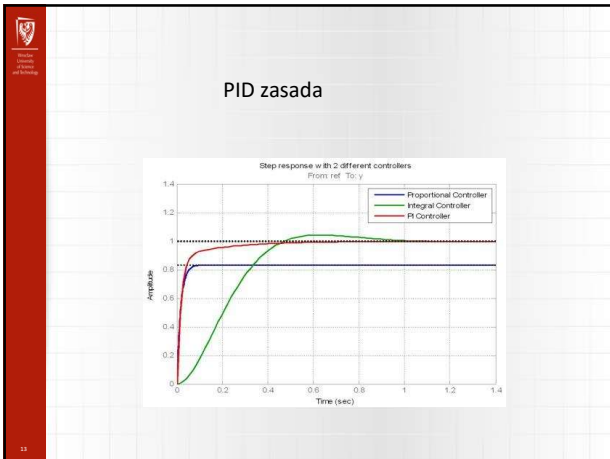
$G_C(s) = K_C$

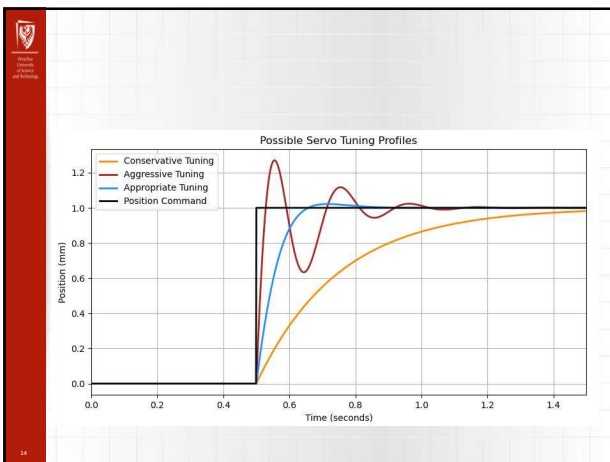
$G_C(s) = \frac{K_C}{T_C s + 1}$

Regulator PID

$G_{PID}(s) = P + \frac{I}{s} + Ds$

P – szybkość
I – dokładność
D – stabilność





Strojenie PID
Metoda Zieglera–Nicholsa (klasyczna)

1. zwiększamy P aż do oscylacji ciągłych
2. Zapamiętujemy:
 - P – wzmacnienie krytyczne
 - Tu – okres oscylacji
3. zastosuj $P' = P \cdot 0.6$; $D = 0.125 \cdot Tu$; $I = 0.5 \cdot Tu$

Przy luzie

- Jeszcze mniejsze P
- małe lub zerowe D
- ostrożnie z I

PID dostrajanie

Problem	Co zmienić
oscylacje	↓P, ↑D
wolna reakcja	↑P
błąd ustalony	↑I
szumy / drgania	↓D
przeregulowanie	↓P, ↑D

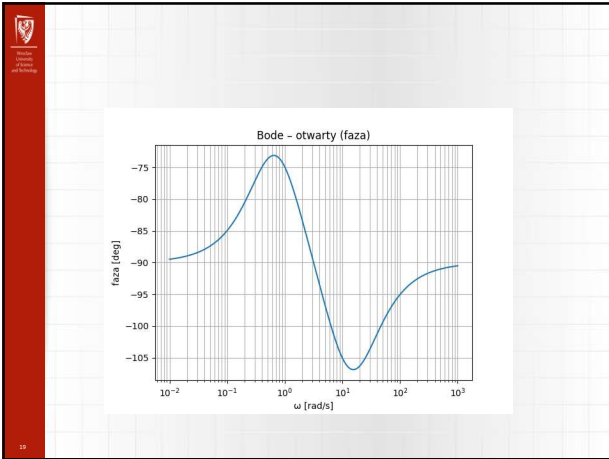
Transmitancja otwarta

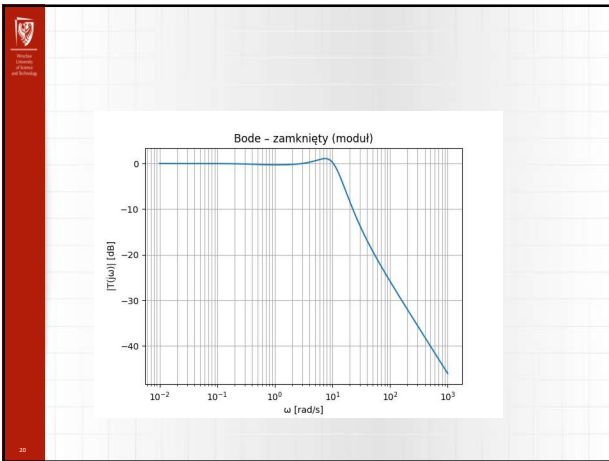
$$G_{open}(s) = G_{PID}(s)G_A(s)G_M(s)G_O(s)$$

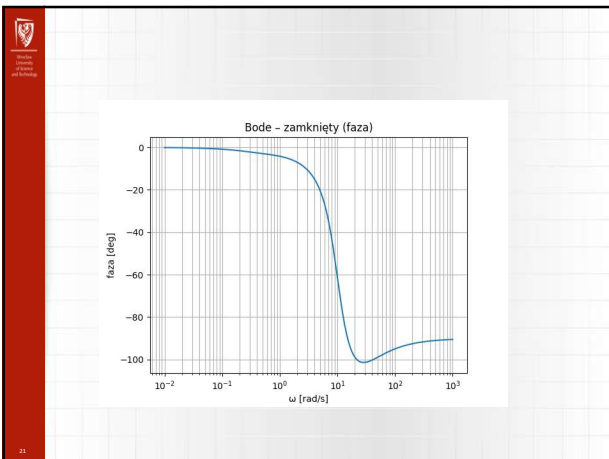
Transmitancja zamknięta


$$G_{closed}(s) = \frac{G_{open}(s)}{1 + G_{open}(s)G_C(s)}$$

Bode - otwarty (modul)









Silniki – poprzedni wykład

22


PRZEKŁADNIE (TRNSMISION)

23


Przekładnie planetarne

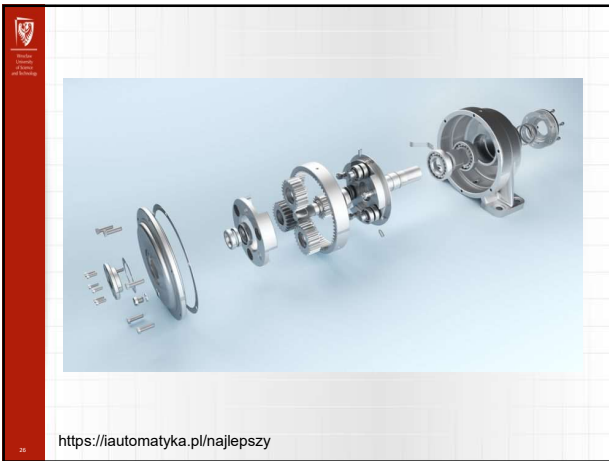
- Zalety:
 - Wysoki moment obrotowy przy małych gabarytach.
 - Wysoka sztywność skrętna.
 - Możliwość redukcji luzu (wersje *low backlash*).
- Zastosowanie: Linie produkcyjne, maszyny pakujące.

24

Przekładnie planetarne

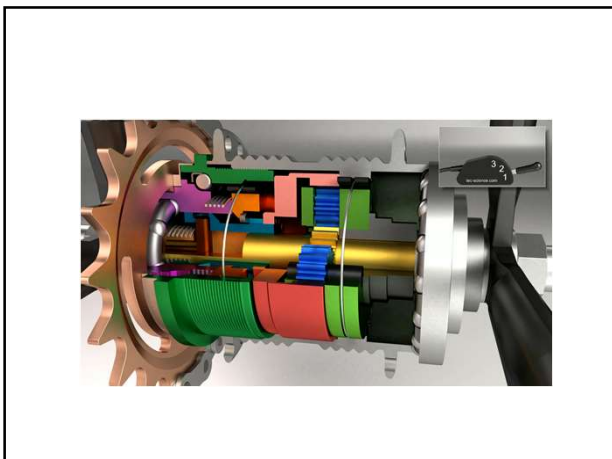
- Koło słoneczne (Sun gear): Centralny punkt przekładni, zazwyczaj połączony z wałem wejściowym serwa.
- Koła planetarne (Planetary gears): Kilka kół (zazwyczaj 3 lub więcej) krążących wokół „słońca”, zamocowanych na wspólnym jarzmie.
- Pierścień zewnętrzny (Ring gear): Nieruchoma obudowa z uzębieniem wewnętrznym, po którym toczą się satelity.

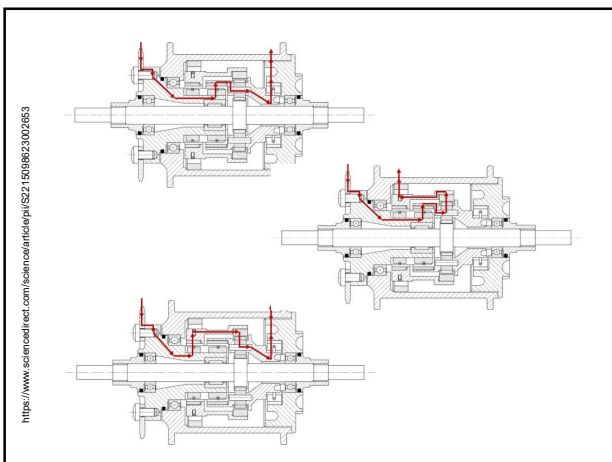
- **Rozkład obciążeń:** Moment obrotowy rozkłada się na kilka kół planetarnych jednocześnie. Dzięki temu przekładnia może przenosić znacznie większe obciążenia niż klasyczna przekładnia zębata o tych samych wymiarach.
- **Wysoka sprawność:** Sprawność przekładni planetarnych często przekracza 95-97%, co minimalizuje straty energii i nagrzewanie układu.
- **Kompaktowość:** Pozwalają na uzyskanie dużych przetożeń w bardzo małej, cylindrycznej obudowie, która idealnie pokrywa się z obrysem silnika.




$$i = \frac{Z_p}{Z_s} + 1$$

<https://iautomatyka.pl/najlepszy>







Planetarna

- **zalety**
 - Brak luzu zwrotnego (Zero Backlash): Dzięki stałemu zazębieniu wielu zębów jednocześnie (nawet 30% zębów jest w kontakcie), luz mechaniczny praktycznie nie istnieje.
 - Ogromne przełożenia: Możliwość uzyskania redukcji od 30:1 do nawet 320:1 w jednym stopniu (przy zachowaniu bardzo małych wymiarów).
 - Wyjątkowa precyzja: Pozwala na pozycjonowanie z dokładnością do pojedynczych sekund kątowych.
 - Wysoka gęstość mocy: Jest znacznie lżejsza i mniejsza od przekładni planetarnej o tym samym przełożeniu.
- **Wady**
 - Wyższy koszt: Precyzja wykonania i materiały (stal sprężynowa) sprawiają, że są droższe od innych rozwiązań.
 - Ograniczona sztywność skrętna: Przy bardzo dużych obciążeniach tuleja elastyczna może się lekko poddawać, co wpływa na charakterystykę dynamiczną.
 - Niższa odporność na uderzenia: Gwałtowne przeciążenia mogą trwale odkształcić lub uszkodzić elastyczną tuleję.

Przekładnie Falowe (Harmonic Drive)

- **Zalety:**
 - **Zerowy luz zwrotny** (Backlash).
 - Bardzo wysokie przełożenia w jednej stopniu.
 - Ekstremalnie niska masa i kompaktowość.
- **Zastosowanie:** Robotyka (przeguby ramion), przemysł kosmiczny.

<https://iautomatyka.pl/najlepszy>

$$i = \frac{Z_f}{Z_c - Z_f}$$

<https://wikipedia>

Przekładnie Falowe (Harmonic Drive)

- Generator fal (Wave Generator): Eliptyczny wkład z łożyskiem kulkowym, montowany bezpośrednio na wale silnika.
- Tuleja elastyczna (Flexspline): Cienkościenny, podatny na odkształcenia stalowy cylinder z zębami po zewnętrznej stronie.
- Koło sztywne (Circular Spline): Nieruchomy pierścień z zębami po wewnętrznej stronie, o większej liczbie zębów (zazwyczaj o 2 więcej) niż tuleja elastyczna
- Zastosowanie:
 - Roboty współpracujące (Coboty): Wszystkie przeguby nowoczesnych ramion robotycznych.
 - Przemysł kosmiczny: Napędy anten satelitarnych, manipulatory w łazikach marsjańskich.
 - Medycyna: Precyzyjne roboty chirurgiczne (np. system Da Vinci).
 - Optyka: Napędy teleskopów i radarów.



<https://iautomatyka.pl/najlepszy>

Przekładnie Cykloidalne

- **Zalety:**
 - Wyjątkowa odporność na obciążenia uderzeniowe.
 - Bardzo długa żywotność i precyzja.
- **Zastosowanie:** Ciężkie roboty przemysłowe, pozycjonery spawalnicze

$$i = \frac{Z_c}{Z_r - Z_c}$$

<https://wikipedia>

- Input shaft
- Eccentrically mounted bearing
- Cycloidal disc
- Ring pins (part of chassis)
- Output rollers and shaft

Przekładnia cykloidalna

- Zalety
 - Ekstremalna odporność na przeciążenia dzięki rozłożeniu siły na wiele punktów styku.
 - Bardzo niski luz (Backlash): W wersjach precyzyjnych luz wynosi poniżej 1 minuty kątowej (arcmin),
 - Długa żywotność: Ponieważ mechanizm opiera się na toczeniu się elementów,
 - Kompaktowość (jedna warstwa) przy dużych przełożeniach: np. 100:1 w jednym stopniu,
 - Wysoka sztywność skrętna, co ułatwia sterowanie serwowym przy szybkich zmianach kierunku.
- Wady
 - Wibracje przy wysokich obrotach (można wyważyć),
 - Wymaga bardzo precyzyjnej obróbki elementów o krzywiznach cykloidalnych, co podnosi koszt produkcji.
 - Dużamasa (zazwyczaj są cięższe niż przekładnie falowe o tym samym momencie obrotowym),
 - Nagrzewanie: Przy ciągłej pracy z dużą prędkością mogą generować więcej ciepła niż przekładnie planetarne.



Przekładnie Śrubowe:

- Skrzyżowane (zębate)
- Ślizgowe,
- Toczne,

•Zębate i krzyżowane zębate)




Four images of different types of gears: a rack and pinion, a worm gear, a set of spur gears, and a large bevel gear.

Przekładnie Śrubowo-Toczne (Kulowe)

- **Zalety:**
 - Bardzo wysoka sprawność mechaniczna (>90%).
 - Precyzja pozycjonowania rzędu mikrometrów.
 - Minimalne tarcie dzięki elementom tocznym (kulkom).
- **Zastosowanie:** Obrabiarki CNC, drukarki 3D, siłowniki elektryczne

• **Przekładnia Śrubowa-Trapezowa**







Przekładnie Pasowe:

- **Pasy płaskie:** Pasy płaskie z gładką powierzchnią.
- **Pasy klinowe:** rowki w kształcie litery V dopasowane do profilu pasa.
- **Pasy zębate:** specjalne uzębienie na kole zapewniające kształtowe przeniesienie momentu
- **Pasy okrągłe:** o okrągłym przekroju
- **Łańcuchowe:** Pas w tym przypadku ma formę łańcucha - na przykład płytkowy, zębaty).

- Cicha praca i tłumienie drgań.
- Stosowane przy dużych odległościach między osiami.

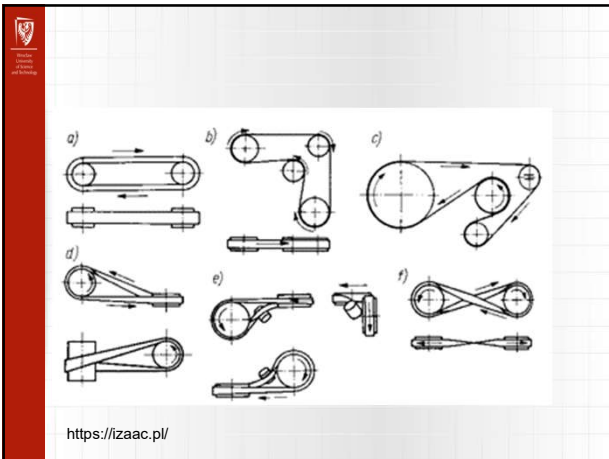
a)

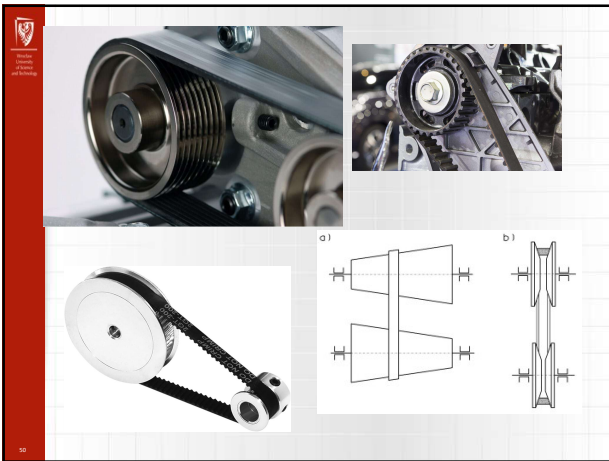
b)

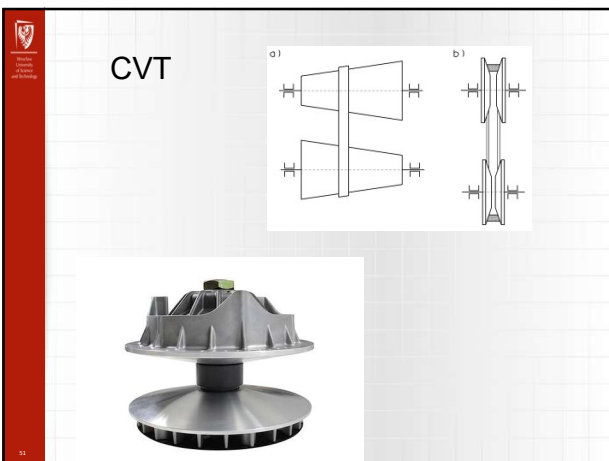
c)

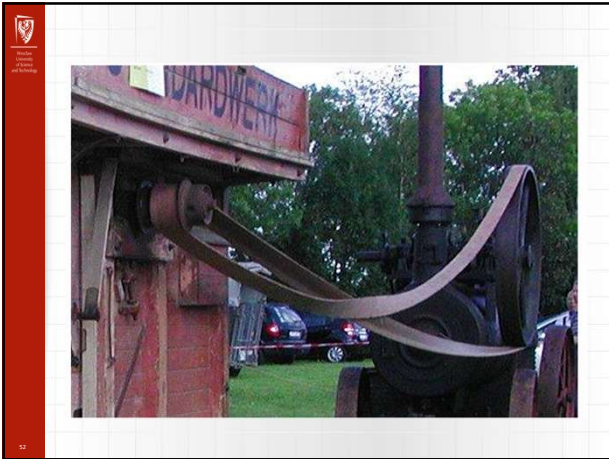
Oznaczenie	Rysunek	Nazwa
—		pas płaski
▽		pas klinowy
•		pas okrągły
		pas zębaty
		łańcuch drabinkowy
W		łańcuch zębaty

<https://izaac.pl/>



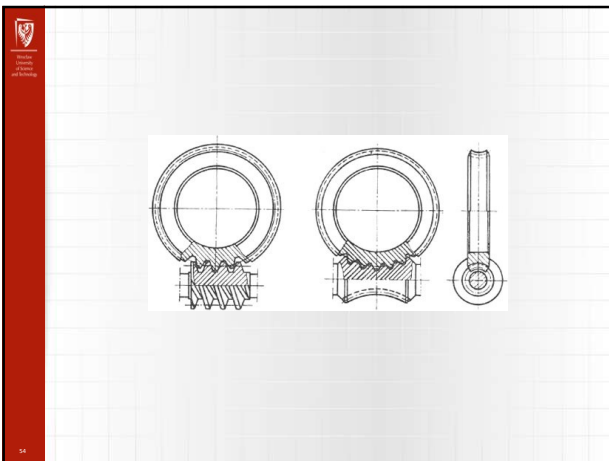






Przekładnie Ślimakowe (worm gear):

- Funkcja samohamowności (blokada mechanizmu bez prądu).
- Prostopadły układ napędu.



LUZY (BACKLASH)

Luzy (backlash)

= brak natychmiastowego przeniesienia ruchu

Występuje np. w:


- przekładniach zębatych
- połączeniach mechanicznych

Powoduje:

- opóźnienie reakcji układu
- nieliniową charakterystykę


Model:

- martwa strefa (*dead zone*)
- histereza



Własności układu z luzem

- Układ przestaje być liniowy
- Klasyczne narzędzia (Bode, Nyquist):
 - działają tylko jako przybliżenie bądź w ogóle
- Zachowanie zależy od:
 - amplitudy sygnału
 - kierunku ruchu




Efekt dead-zone

- Małe sygnały sterujące → brak reakcji wyjścia
- Regulator „nie widzi” efektu działania

Skutki:

- pogorszenie dokładności
- opóźniona reakcja
- zwiększony błąd ustalony



Luz a oscylacje

- **Oscylacje (limit cycles)**
- **Samowzbudne drgania**
- Mechanizm:
 - regulator zwiększa sterowanie
 - luz zostaje pokonany
 - układ reaguje gwałtownie
 - następuje przeregulowanie
- Efekt:
 - trwałe oscylacje
 - nawet przy stabilnym modelu liniowym

Wpływ na precyzję

- błąd zależny od kierunku ruchu
- histereza położenia
- brak powtarzalności

Problem szczególnie istotny w:

- robotyce
- CNC
- serwonapędach precyzyjnych

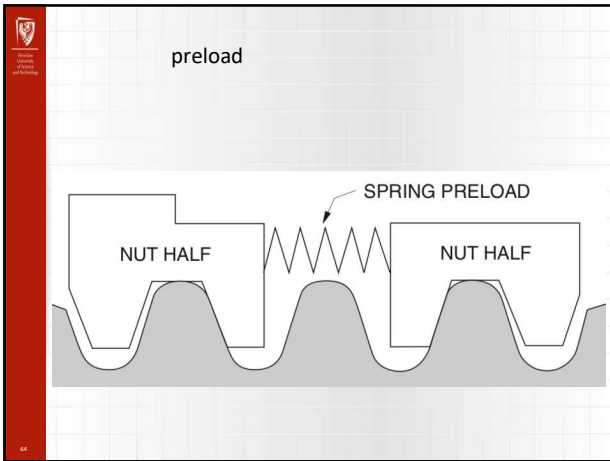
Unikanie luzów

- ✓ mechaniczne:
 - preload (wstępne napięcie)
 - eliminacja luzów
- ✓ regulacyjne:
 - zmniejszenie wzmocnienia
 - ograniczenie członu D
- ✓ zaawansowane:
 - kompensacja dead-zone
 - sterowanie adaptacyjne
 - dither (mikrowibracje)

preload

The diagram shows three methods to achieve preload in a ball screw:

- Oversized ball:** A single ball is oversized so it makes 4 point contacts with the raceway.
- Double nut:** Two nuts are used with a spacer between them, creating 2 point contacts. Arrows indicate 'Nut Internal Force'.
- Skip lead (Pitch shift):** The pitch of the second nut is shifted, creating 2 point contacts and an 'Extra space' between the balls. Arrows indicate 'Nut Internal Force'.



Zmniejszenie P i D

Zmniejszenie wzmocnienia D	tłumi impulsy od luzu
zmniejszenie wzmocnienia P	zmniejsza przeregulowanie (przerzuty)

To NIE usuwa luzu

- nadal istnieje błąd,
- ALE układ jest stabilniejszy.

Podsumowanie

- Luz = nieliniowość
- Powoduje błędy i oscylacje
- Wymaga kompensacji lub eliminacji

Metoda dither

- Dodanie oscylacji
- Eliminacja luzu

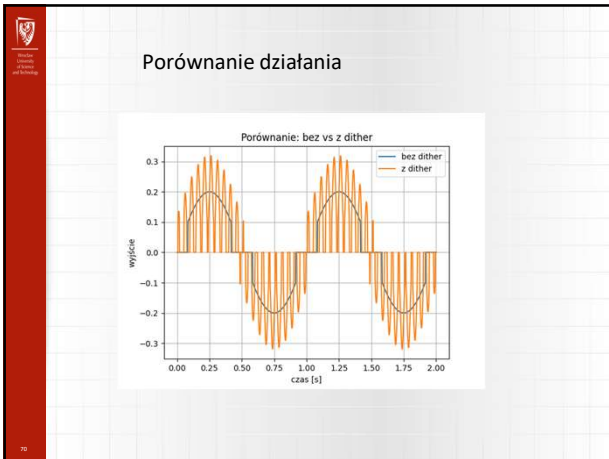
Idea działania

- $u = u_{reg} + dither$
- ciągła aktywność

Backlash (Problem)


Dither (Solution)

Result: Overcome Backlash



- Warunek działania dither
- $A_{dither} \geq \Delta_{luzu} / 2$
 - Sygnał musi przekroczyć granice dead-zone
 - Umożliwia reakcję układu


- Za mała amplituda
- $A_{dither} < luz$
 - Układ pozostaje w martwej strefie
 - Brak efektu kompensacji


Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Odpowiednia amplituda

- $A_{\text{dither}} \approx \text{luz}$
- Układ zaczyna reagować
- Skuteczna kompensacja


72


Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Za duża amplituda

- $A_{\text{dither}} \gg \text{luz}$
- Działa, ale powoduje drgania
- Pogarsza dokładność
- Zwiększa zużycie układu mechanicznego

74


Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Dobór w praktyce

- Minimalna skuteczna amplituda
- Dobór eksperymentalny
- Kompromis: skuteczność vs dokładność

75

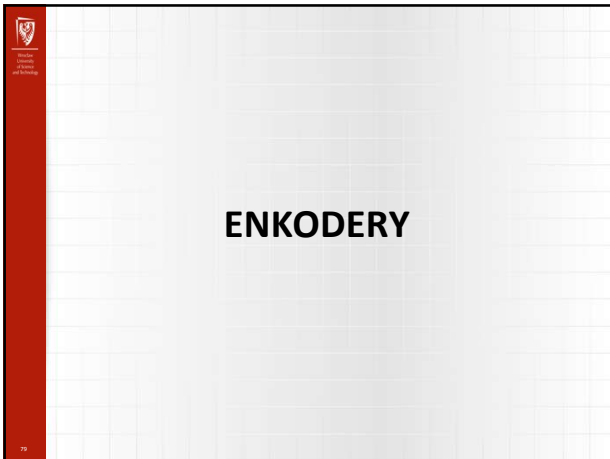
Podsumowanie

- Dither musi pokonać luz
- Amplituda \geq granica dead-zone
- Powinna być możliwie mała

Wpływ dither na dead-zone

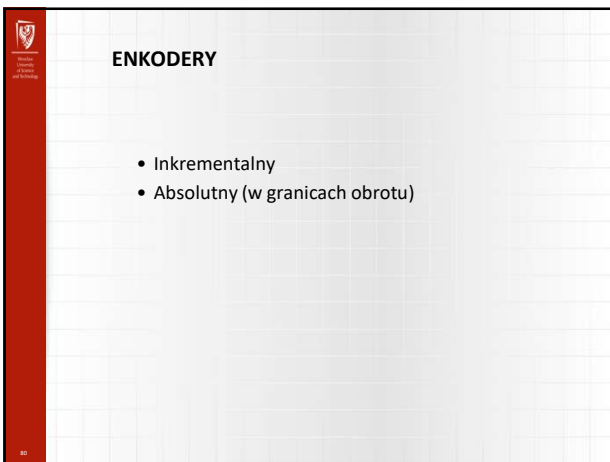
tip

- $u = u_{reg} + u_{dither}$
- Liczy się suma sygnałów
- Mniejszy dither może wystarczyć



ENKODERY

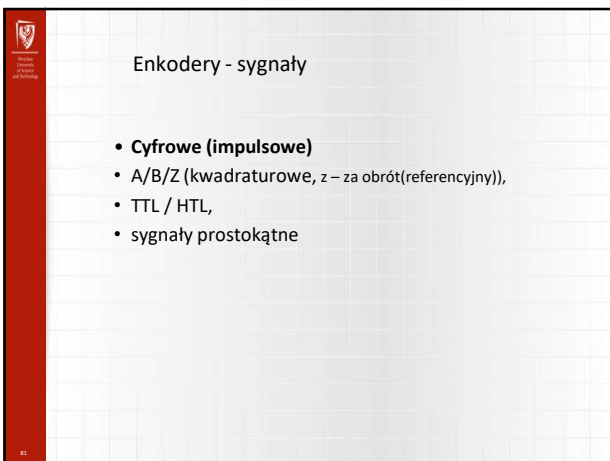
20



ENKODERY

- Inkrementalny
- Absolutny (w granicach obrotu)

21



Enkodery - sygnały

- **Cyfrowe (impulsowe)**
- A/B/Z (kwadraturowe, z – za obrót(referencyjny)),
- TTL / HTL,
- sygnały prostokątne

22

Enkodery - sygnały

- **Analogowe**
- sin/cos (przebiegi sinusoidalne),
- wymagają interpolacji.

Zalety:

- bardzo wysoka rozdzielczość,
- stosowane w precyzyjnych serwach.

Enkodery - sygnały

- **Cyfrowe magistralowe**
- SSI (SSI = Synchronous Serial Interface)
- BiSS (Bidirectional Serial Synchronous),
- CANopen,
- EtherCAT.

Typowe dla enkoderów absolutnych

Podział wg zasady fizycznej

- **Optyczne**
- dioda LED + tarcza z otworami,
- najczęściej spotykane.

Zalety:

- wysoka dokładność,
- dobra powtarzalność.

Wady:

- wrażliwe na kurz i zabrudzenia .

Podział wg zasady fizycznej

- **Magnetyczne**
- czujniki Halla lub AMR,
- magnes zamiast tarczy.

Zalety:

- odporne na warunki,
- kompaktowe.

Wady:

- niższa dokładność niż optyczne.

Podział wg zasady fizycznej

- **Indukcyjne (resolver, inductosyn)**
- działają na zasadzie transformatora.

Zalety:

- bardzo odporne (temperatura, wibracje),
- stosowane w przemyśle ciężkim.

Wady:

- bardziej złożona elektronika.

Kod Gray

Legend:

- Bit 1 (Red)
- Bit 2 (Orange)
- Bit 3 (Green)
- Bit 4 (Blue)

Gray Code values: 0000, 0001, 0011, 0010, 0110, 0111, 0101, 0100, 1000, 1001, 1011, 1010, 1110, 1111, 1101, 1100

Rozdzielczość Gray

- Typowe i maksymalne wartości 4–8 bitów (Bourns, Grayhill)
- Przemysłowe 10–16 bitów (Baumer, Dynapar)
- Wysokiej klasy (serwonapędy) 18–24 (zazwyczaj interfejs szeregowy (SSI, BiSS)) - SICK AG
- Górna granica praktyczna ~ 25–30 bitów (single-turn)

Noniusz (vernier)

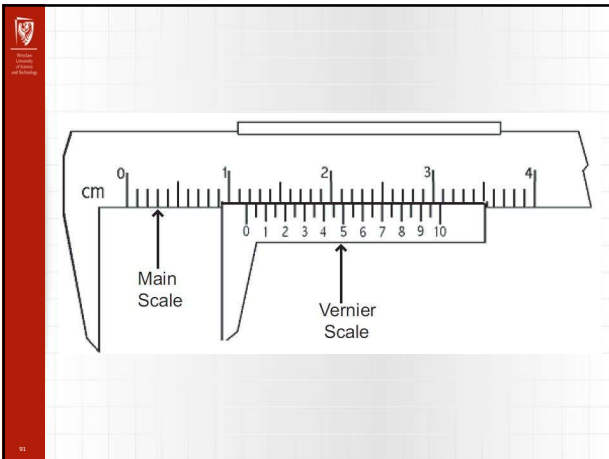
- Szukasz miejsca, gdzie kreski dwóch skal „pokrywają się” — a to przesunięcie mówi, o ile dokładnie jesteś między działkami głównej skali.

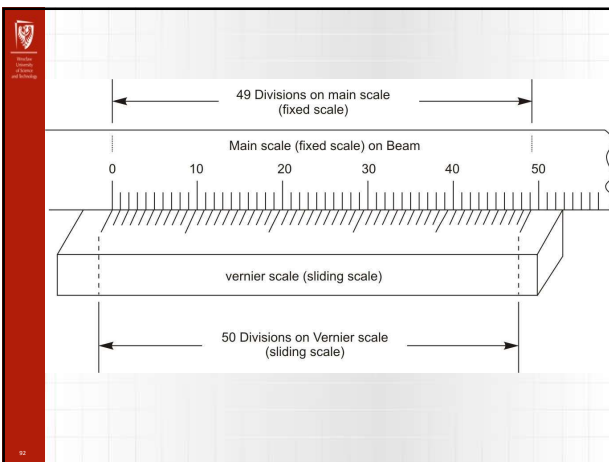
1. READ OFF THE CENTIMETRE MARK TO THE LEFT OF THE VERNIER SCALE ZERO: HERE IT IS 1 cm

2. READ OFF THE MILLIMETRE MARK TO THE LEFT OF THE VERNIER SCALE ZERO: HERE IT IS 3mm

3. FIND THE POINT WHERE THE LINE MATCHES UP WITH THE LINE ON THE BAR SCALE. THIS TELLS YOU THE NUMBER OF TENTHS OF A MILLIMETRE, HERE IT IS 0.3 mm

4. ADD THE READING TOGETHER TO GET YOUR MEASUREMENT!
 $1\text{ cm} + 3\text{ mm} + 0.3\text{ mm} = 13.3\text{ mm}$ OR 1.33 cm





Vernier Bevel protractor

A diagram of a Vernier Bevel protractor. The main scale is graduated in degrees of arc. The vernier scale has 12 divisions on each side of the center zero, marked from 0 to 60 minutes of arc. Labels include 'Main Scale Reading' and 'Vernier Scale Reading'.

- As shown in the main scale is graduated in degrees of arc.
- The Vernier scale has 12 Divisions each side of the centre zero.
- These are marked 0-60 minutes of arc, so that each division equals $\frac{1}{12}$ of 60, that is 5 minutes of arc.
- These 12 divisions occupy the same space as 23 degrees on the main scale. Therefore, each division of the Vernier is equal to $\frac{1}{12}$ of 23° or $\frac{11}{12}^\circ$.

Varnire optyczny

The diagram illustrates the internal components of an optical encoder. The top part shows a shaft with a disc attached. Light emitters are positioned to shine through the disc's tracks onto light detectors. The detectors are labeled Phase A, Phase B, and Reference. The shaft is shown rotating. The bottom part shows a cross-section of the disc with three tracks: Outer track, Middle track, and Inner track. An LED and a light sensor are positioned to detect the tracks.

Przy 1024/1023

- Możesz uzyskać:
- $1024 \times 1023 \approx 1\,047\,552$ pozycji
- zamiast impulsów → często sygnały **sin/cos**,
- stosuje się:
 - interpolację,
 - pomiar fazy,
 - DSP.

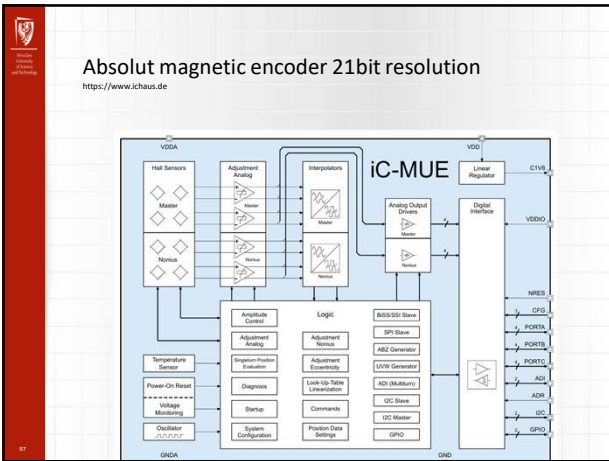
Dual(tripple)-track Nonius principle
<https://www.ichaus.de/>

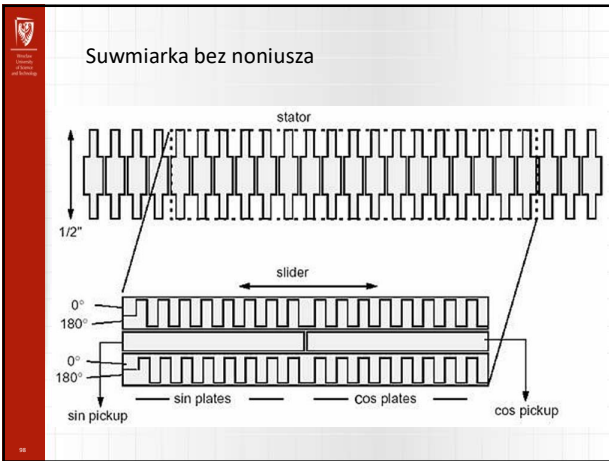
- 21 bits angle resolution from a common $\varnothing 44$ mm magnetic scale (32 pole pairs)

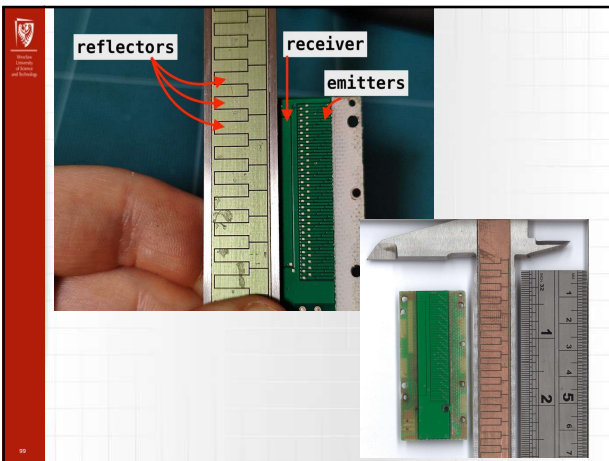
Rotary Magnetic Scales	Axial	Radial
Outer Diameter [mm]	20 ... 85	15 ... 80
Inner Diameter [mm]	5 ... 70	7 ... 72

2 mm pole width, the exact values depend on the individual design of the magnetic scale.

Linear Magnetic Scales	2-track	3-track
Max. Absolute Measurement Length [mm]	256	4096








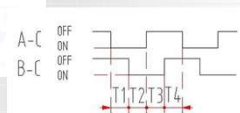
Nie noniusz

- sygnały „sin/cos”
- przesunięte w fazie o 90 deg (jak A/B w enkoderze),
- Można określić **kierunek ruchu**
- interpolować pozycję z dużą dokładnością

SINUS COSINUS

- Sygnały kwadraturowe (quadrature signals)
- Sygnały ortogonalne
- Sygnały w fazie i w kwadraturze (I/Q)
 - I (In-phase) → cos
 - Q (Quadrature) → sin
- Sygnały zespolone -complex representation
 - $I+j*Q= \cos()+j*\sin()$
- Sygnały Lissajous
- Sygnały fazowe


Enkoder inkrementalny
(mechaniczny 20imp/turn) (SR PASSIVES)

A-C OFF ON OFF ON
B-C OFF ON OFF ON

T1 T2 T3 T4

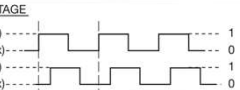
Enkoder inkrementalny
(optyczny 128 imp/turn) (Bourns)




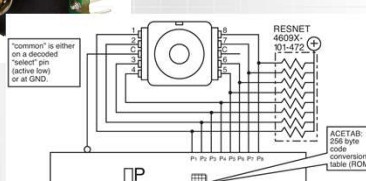
OUTPUT VOLTAGE

Channel A > 4.0 V (Min) --- 1
 0.8 V (Max) --- 0

Channel B > 4.0 V (Min) --- 1
 0.8 V (Max) --- 0



Enkoder absolutny 128 pozycji (Bourns)





"home" is either on a decoded "select" pin (active low) or at GND.

RESNET 4609X 10L-32C

ACETAB: 256 byte code conversion table (ROM)

Inkrementalny (Autonics)



Output Waveform

- Totem pole output / NPN open collector output / Voltage output
- Line driver output

A phase H L
B phase H L
Z phase H L

Time axis: $T + \frac{T}{2}$, T , $\frac{T}{2}$, 0

→ Clockwise (CW)

X/Z reverse phase output is optional.

226

Enkodery mikrosilników (magnetyczny)



227

Enkodery mikrosilników optyczny




228

RVDT (Rotary Variable Differential Transformer) (Althen Controls)

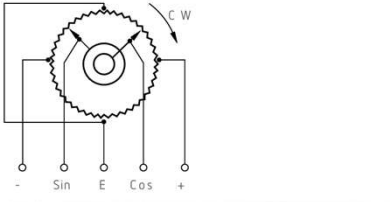


129

Enless Potentiometer – sin,cos (Althen Controls)




Terminal Connection Diagram



130

Linear pot (AS)



131

LVDT – Linear Variable Differential Transformer

The diagram illustrates the internal structure of an LVDT. It features a central movable core that can move vertically. This core is surrounded by two coils of wire. An AC excitation source is connected to the top coil, and the AC output is measured from the bottom coil. The output voltage varies linearly with the displacement of the core.

RVDT = Rotary Variable Differential Transformer

This slide compares an RVDT and a Resolver. On the left, the RVDT is shown with its electrical connections: Yellow (E), Brown (F), Red (A), Blue (B), Green (C), and Black (D). On the right, the Resolver is shown with its internal rotor and stator windings, and its connection to a Resolver Converter.

Resolver to bezkontaktowy czujnik kąta (czasem też prędkości), działający jak miniaturowy transformator obrotowy. Jest blisko spokrewniony z selsynem, ale daje sygnały sin/cos zamiast 3-fazowych.

The diagram shows a cross-section of a Resolver with a Stator and a Rotor. The stator has a primary winding and two secondary windings labeled 'Cosine winding' and 'Sine winding'. The rotor has a primary winding. The resulting signals are given by the equations: $V_C = V_s \cos \phi$ and $V_S = V_s \sin \phi$. A URL is provided at the bottom: <https://learnchannel-tv.com/en/drives/servomotor/resolver/>

Selsyn (synchro) lub CT (control transformer)

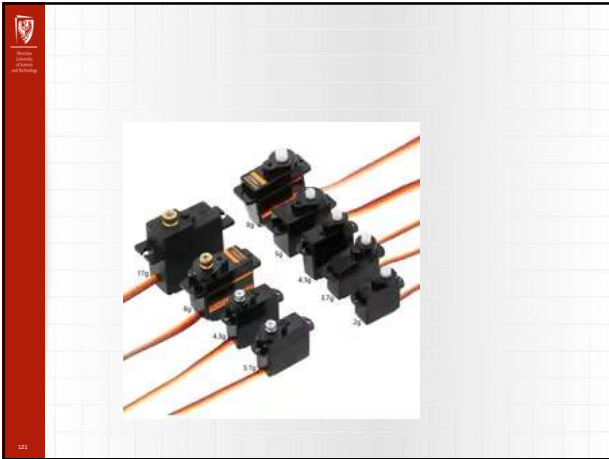
AutomationForum.in

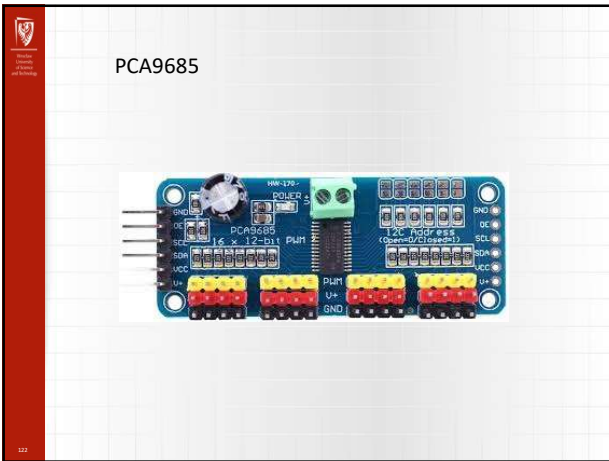
$E(t) = K_s \sin(\theta_r - \theta_c) \sin \omega t$

Serwomechanizmy modelarskie

Servo dimensions

MICRO STANDARD GIANT





- Zakres kąta obrotu (najczęściej 90, 180, 360-obrotowe)
- Zakres napięć
- Zakres momentu
- Częstotliwość PWM

