

ÉRZÉKELŐK ÉS BEAVATKOZÓK II.

1. BEVEZETÉS



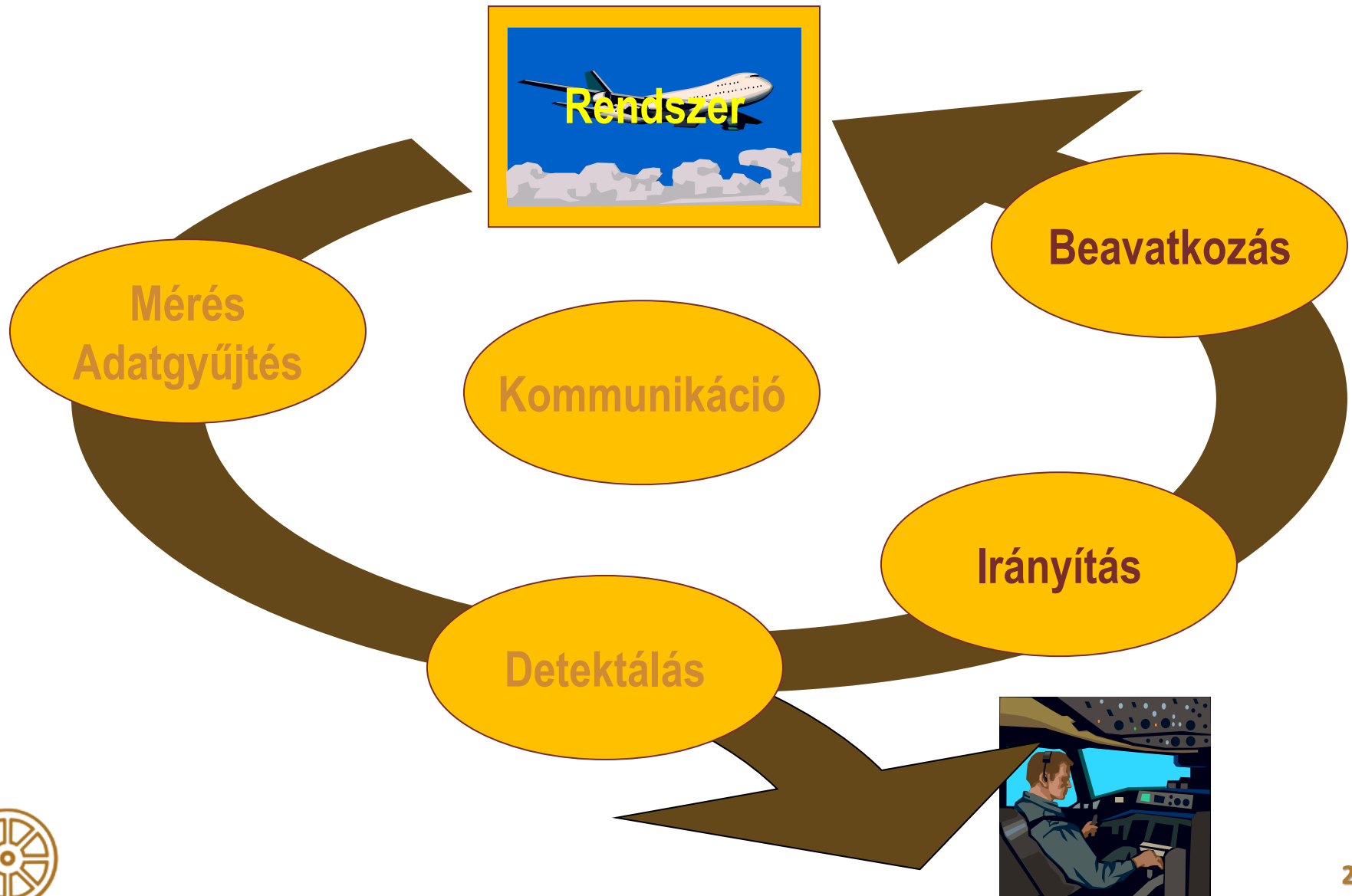
Dr. Soumelidis Alexandros

2020.02.12.



BME KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI ÉS JÁRMŰMÉRNÖKI KAR
32708-2/2017/INTFIN SZÁMÚ EMMI ÁLTAL TÁMOGATOTT TANANYAG

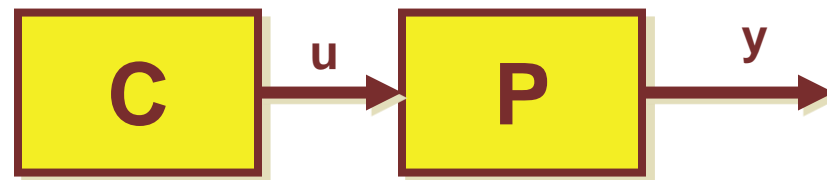
Mivel foglalkozunk?



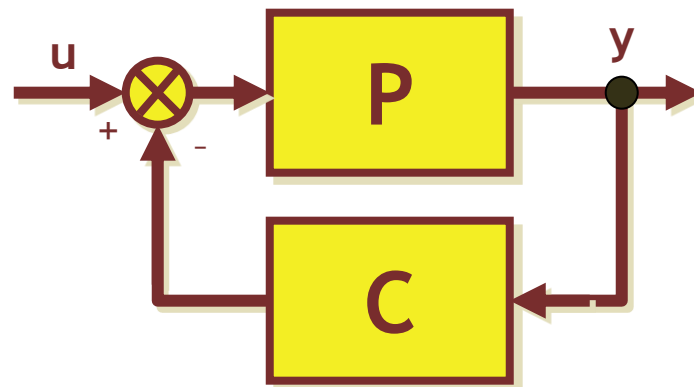
Írányítási rendszerek

Az irányítások típusai:

- Vezérlés

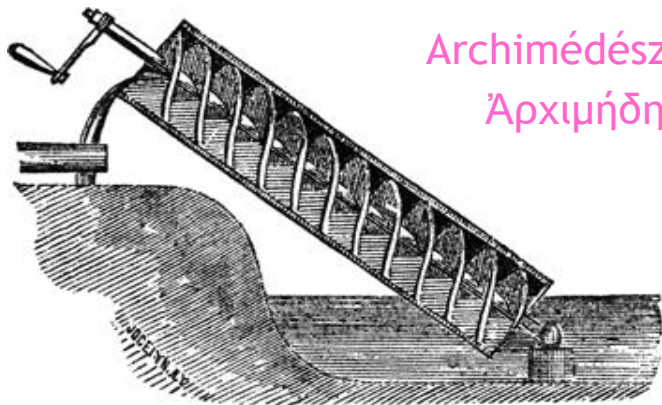


- Szabályozás - visszacsatolt irányítás

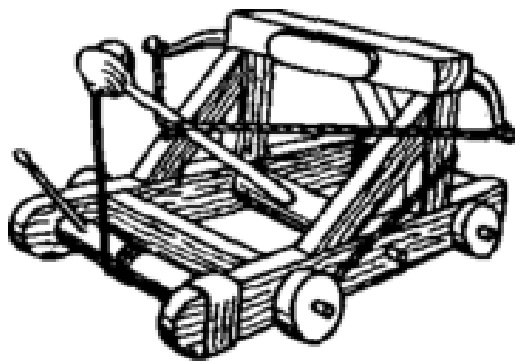


Történelmi áttekintés

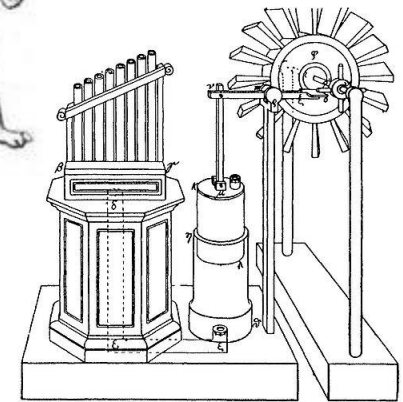
Már az ókori görögök is ...



Archimédész
Ἀρχιμήδης



Héron
Ἡρώων



Kteszibiosz

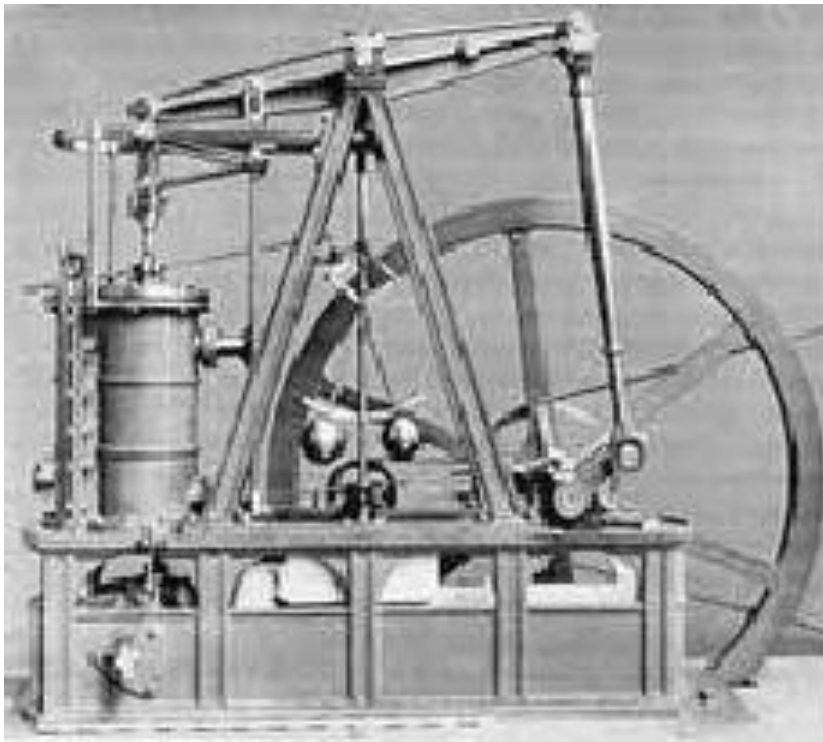
Κτησίβιος

az első visszacsatolt
szabályozás megalkotója.

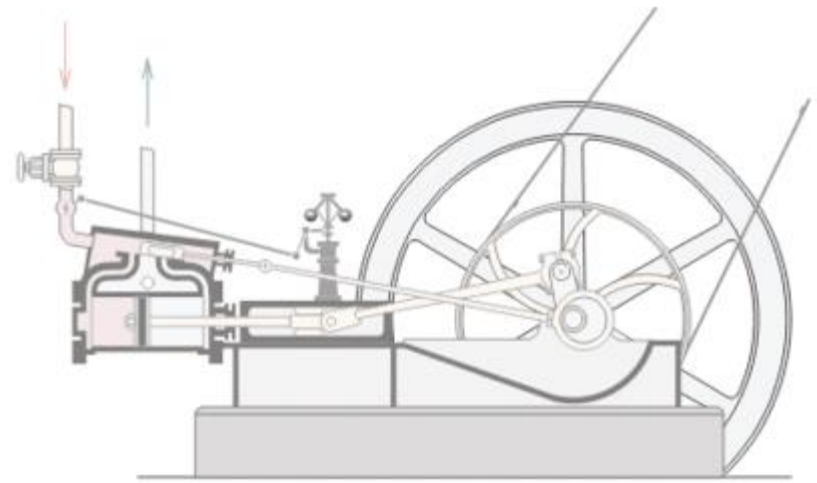


Történelmi áttekintés

Ipari forradalom: a gőzgép



- Vezérlés
- Nyomás-szabályozás
- Fordulatszám-szabályozás

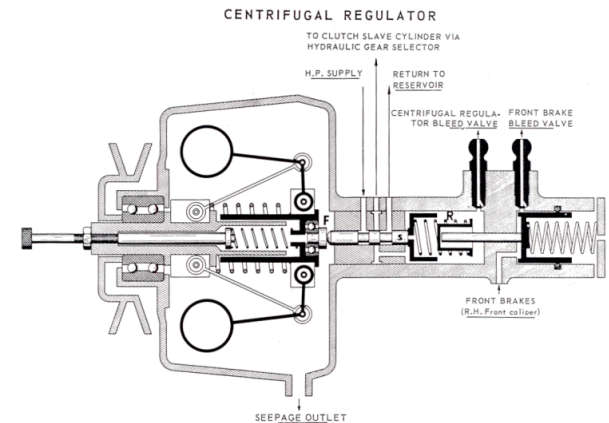


Történelmi áttekintés

Röpsúlyos centrifugális regulátor (James Watt)



- Stabilitás
Maxwell,
Ljapunov,
Visnyegradszkij,
Ruth-Hurwitz



Szabályozások

Elméleti problémák

- Stabilitás
- Irányíthatóság
- Megfigyelhetőség
- Minőségi kritériumok: statikus pontosság, követési pontosság, beállási idő, sebesség, energiaigény



Szabályozások

Kulcsfontosságú rekvizitumok

- A szabályozott objektum matematikai modellje
- Tervezési módszerek, amelyek biztosítják a kritériumok teljesülését
- Szabályozó realizálás



Szabályozások

Matematikai modell

- Lineáris időinvariáns rendszerek: szisztematikus módszerek
- Linearizált modellek: a szisztematikus módszerek átmentése - munkapont körüli linearizálás
- Nemlineáris, időben változó rendszerek: egyes modellosztályokra szisztematikus módszerek, pl. bilineáris, LPV



Szabályozások

A modellalkotás módszerei:

- A fizika törvényeinek alkalmazása
- Tapasztalati úton való modellalkotás: „fekete-doboz” - rendszer-identifikáció
- Vegyes módszerek: „szürke-doboz” - paraméteres modellek, paraméterbecslés



Szabályozások

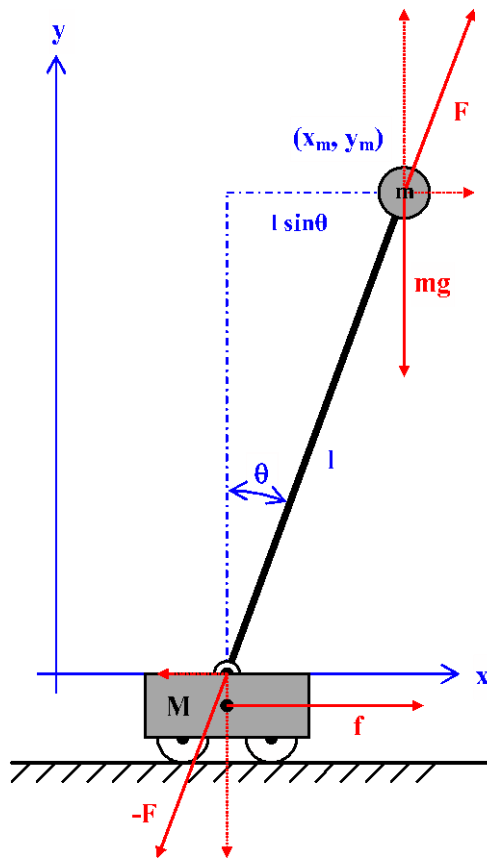
Szabályozástervezés:

- Klasszikus szabályozástervezés: ad-hoc módszerek, a stabilizálás, kritériumok, PID
- Modern módszerek: optimális szabályozások (Norbert Wiener, Kálmán Rudolf), lineáris kvadratikus kritériumok (L^2 , H^2)
- Posztmodern módszerek: robusztus szabályozások, korlátok, paraméter-bizonytalanságok kezelése (L^1 , L^∞ , H^∞)
- Poszt-posztmodern módszerek: nemlineáris, hibrid rendszerek



Írányítási rendszerek

Példa: inverz inga



$$M\ddot{x} + m\ddot{x}_m = f$$
$$m\ddot{x}_m \cos \vartheta - m\dot{y}_m \sin \vartheta = mg \sin \vartheta$$

kis szögekre: linearizálás

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{m}{M}gx_3 + \frac{1}{M}f$$

$$\dot{x}_3 = x_4$$

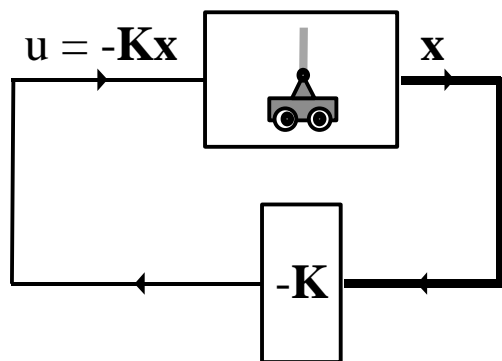
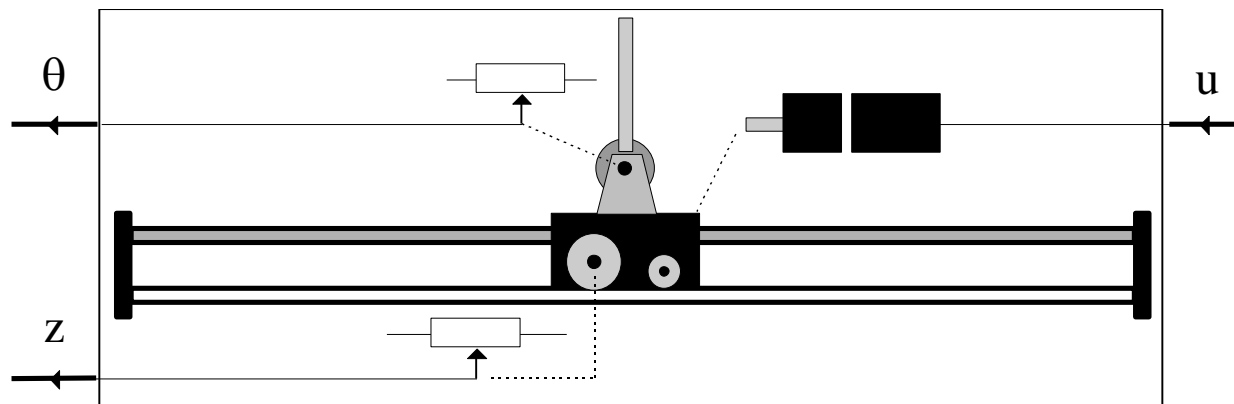
$$\dot{x}_4 = \frac{M+m}{Ml}gx_3 - \frac{1}{Ml}f$$

$$y_1 = x_1$$

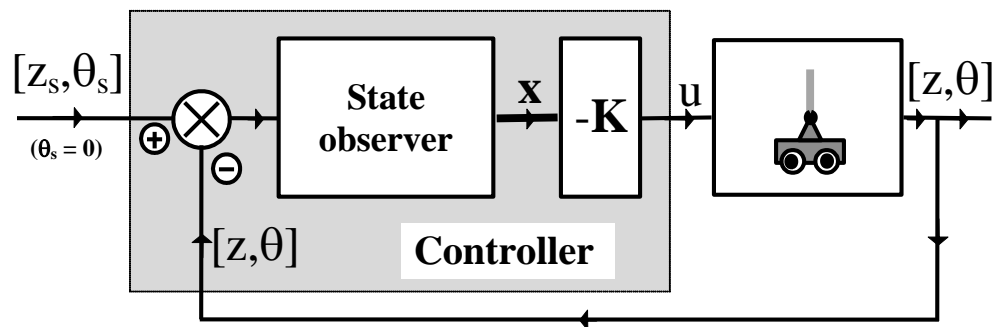
$$y_2 = x_3$$



Példa: inverz inga



Állapot-visszacsatolás

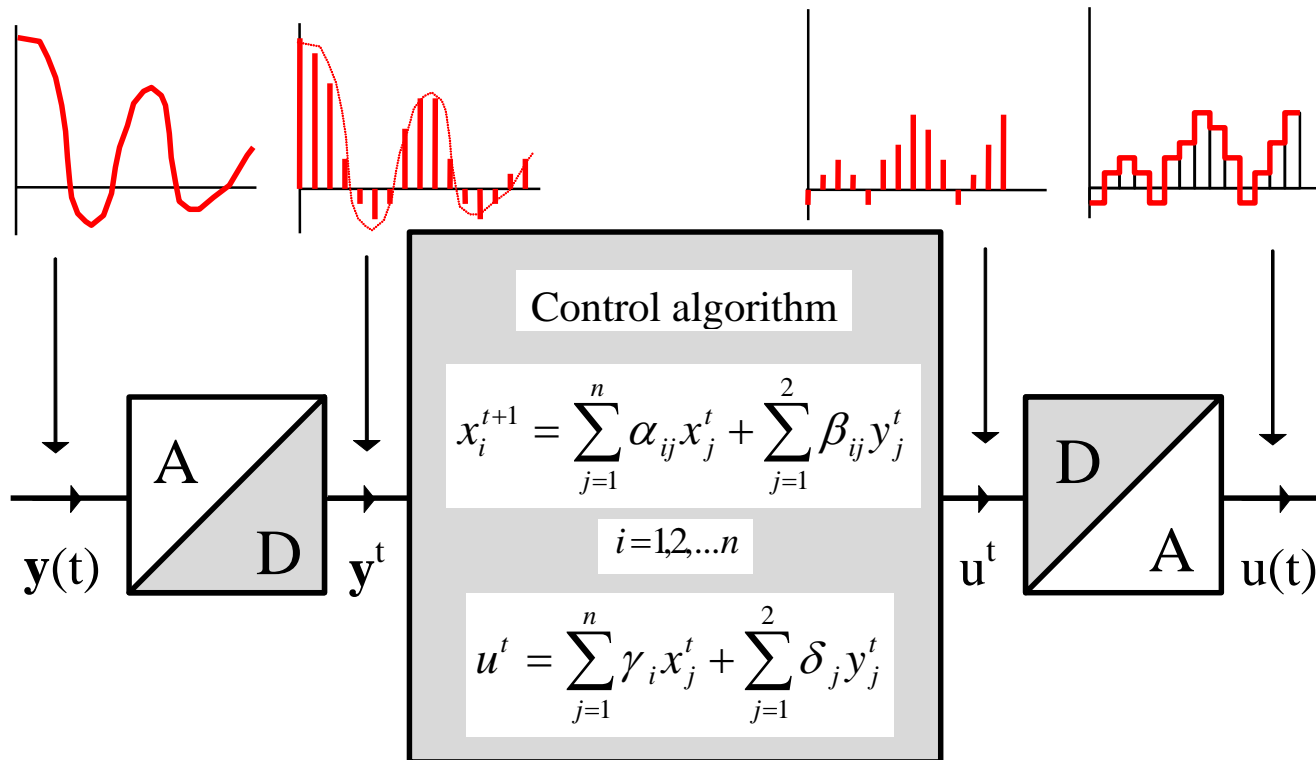


Állapot-visszacsatolás megfigyelővel



Példa: inverz inga

Diszkretizálás

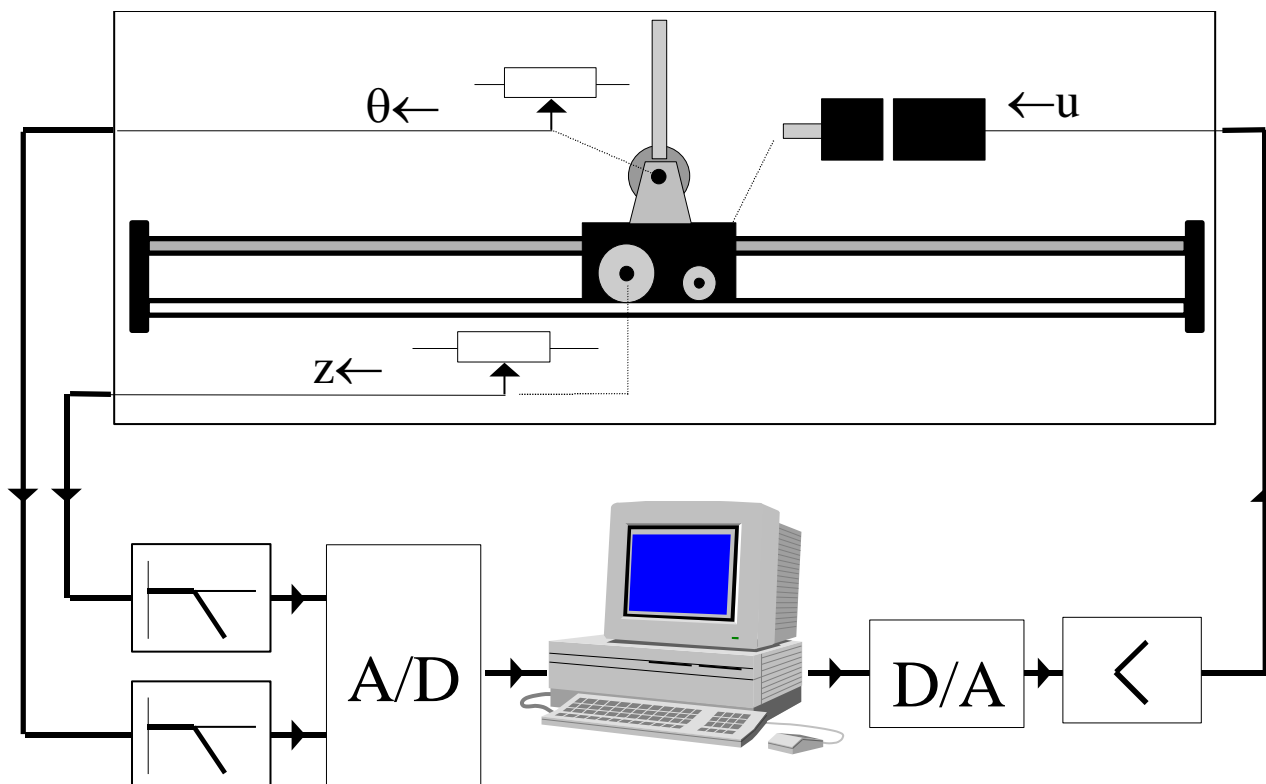


Diszkrét idejű irányítási algoritmus



Példa: inverz inga

Megvalósítás

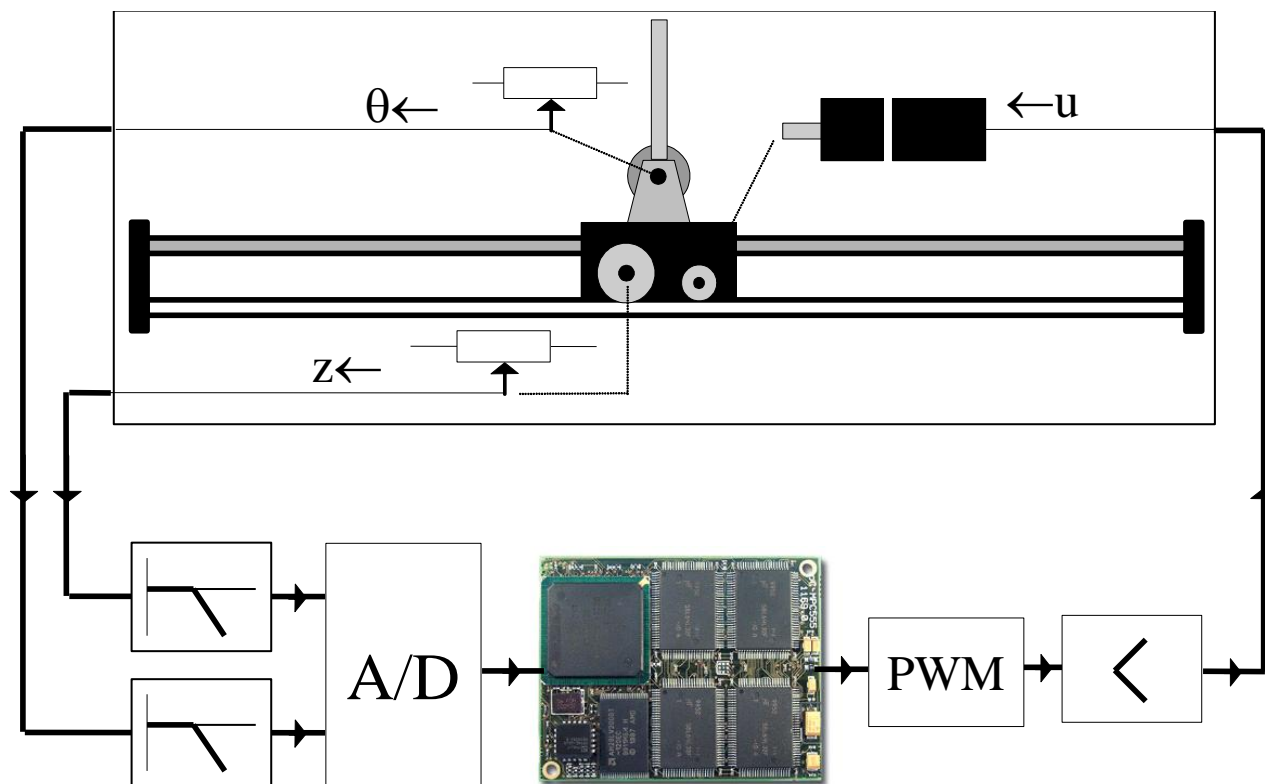


egy „klasszikus” számítógépes realizáció



Példa: inverz inga

Megvalósítás

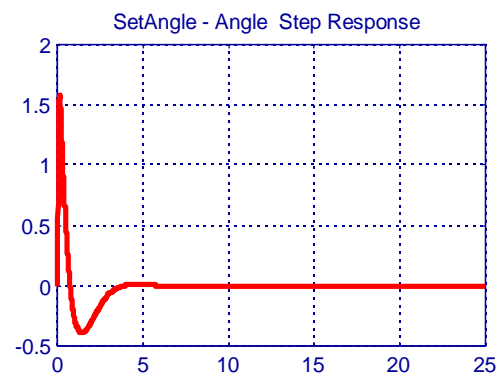
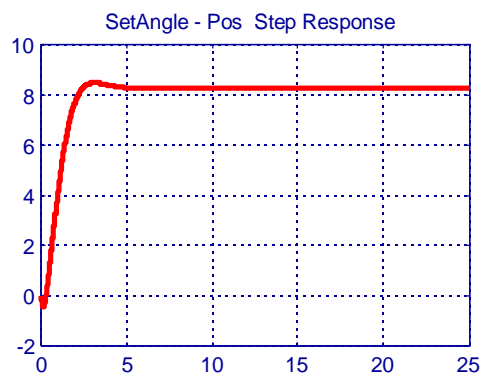
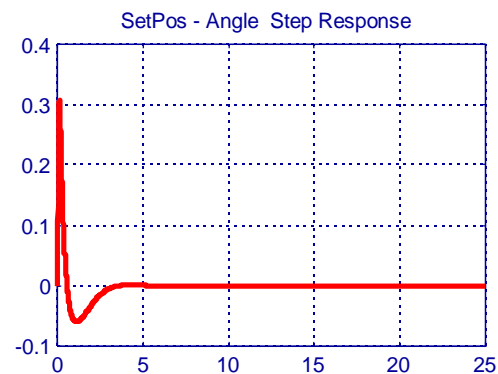
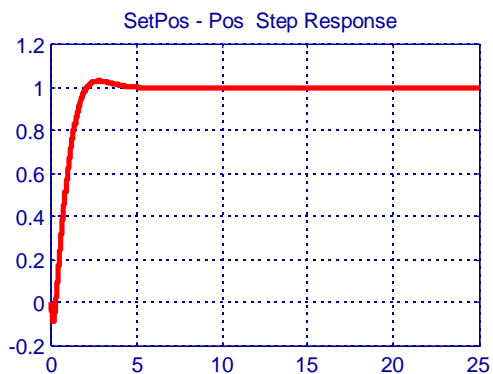


egy „modern” beágyazott realizáció



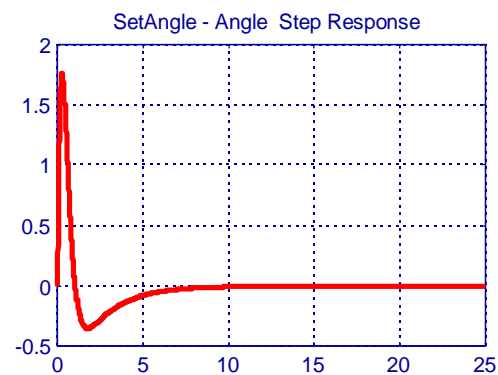
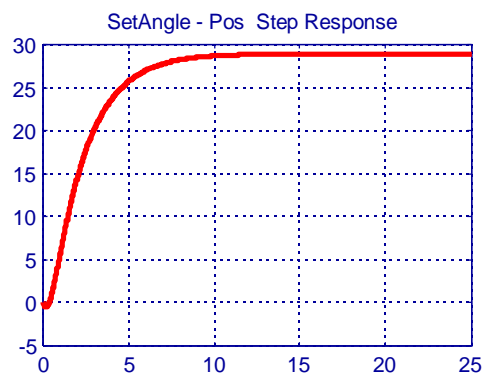
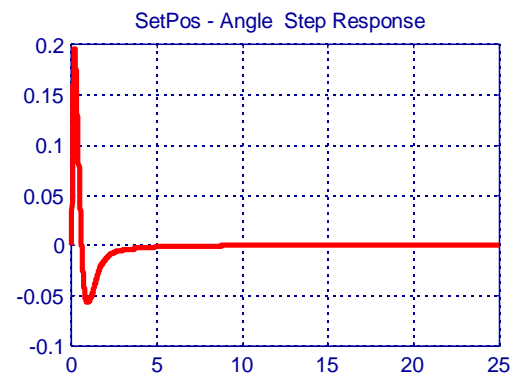
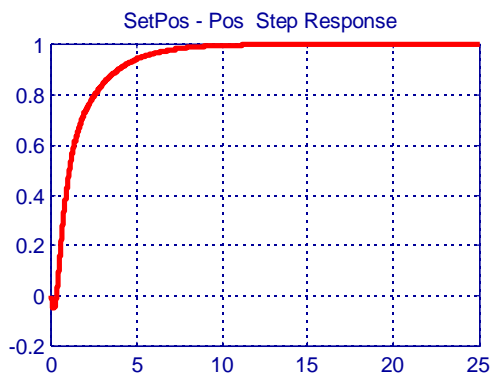
Példa: inverz inga

1. szabályozó



Példa: inverz inga

2. szabályozó



Realizálás: történelmi áttekintés

Analóg és digitális irányítórendszerek

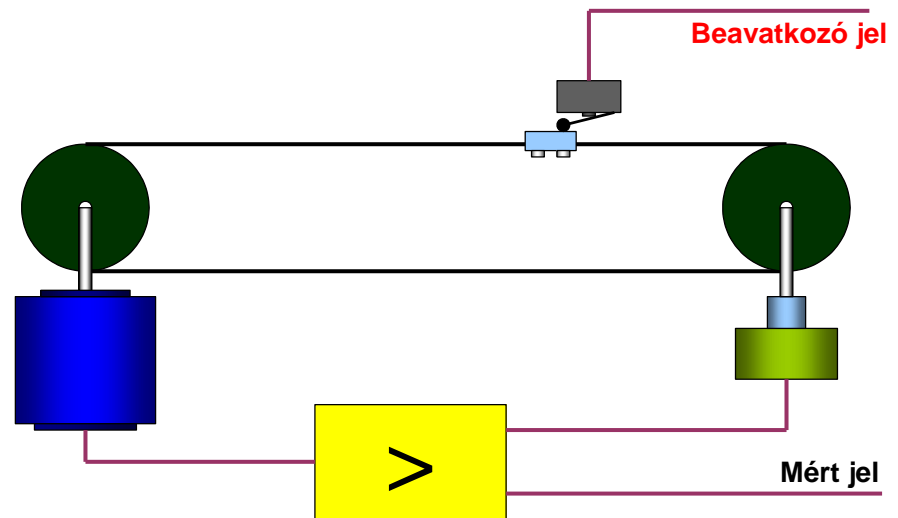
- Elektromechanikus rendszerek
- Elektronikus rendszerek: diszkrét áramkörök és logika alkalmazása
- Számítógépes mérő- és irányítórendszerek
- Mikroprocesszorok alkalmazása
- Beágyazott számítógépek, elosztott rendszerek



Történelmi áttekintés

Elektromechanikus rendszerek

- Relék, kapcsolók
- Elektromágnesek
- Elektromos motorok
- Analóg szervo rendszerek
- Relés logikák



Történelmi áttekintés

Elektronikus rendszerek

Analóg áramkörök

- Elektroncsövek
- Egyedi félvezetők: diódák, tranzisztorok
- Egyszerű integrált áramkörök: műveleti erősítők, komparátorok, analóg jelformálók
- Komplex integrált áramkörök: pl. integrált analóg szűrők, motorvezérlő áramkörök, stabilizált tápegység áramkörök
 - Analóg és digitális határán: kapcsolóüzemű áramkörök
 - Kombinált analóg - digitális áramkörök

Logikai áramkörök

- Egyedi félvezetők: diódák, tranzisztorok
- Bipoláris logikai áramkörök: TTL áramkörök
- CMOS logikai áramkörök
- MSI, LSI, VLSI logikai áramkörök: funkcionális logika, memóriák
- Mikroprocesszorok
- Programozható logikai áramkörök: PLA, GAL, FPGA



Történelmi áttekintés

Számítógépes mérő- és irányítórendszerek: hőskor

Felépítés:

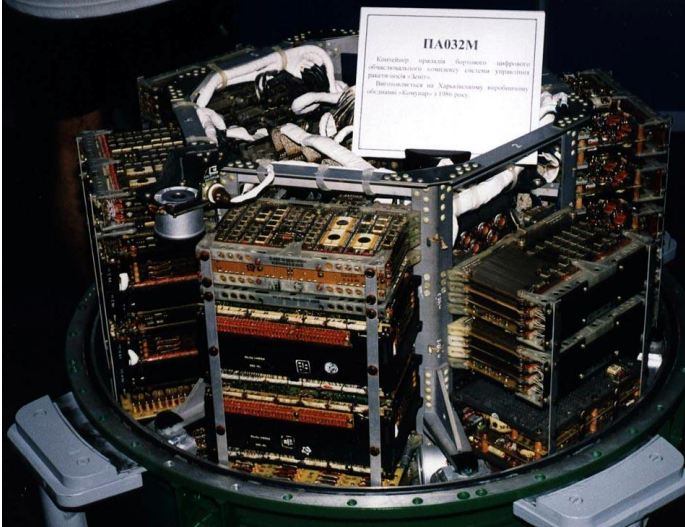
- Számítógépek légkondicionált géptermekekben, műszerszekrényekben.
- Analóg jelek fogadására: ADC perifériák.
- Analóg jelek kiadására: DAC perifériák.
- Kétállapotú jelek (állapotjelek) fogadására: bináris bemeneti perifériák.
- Kétállapotú jelek (vezérlőjelek) kiadására: bináris kimeneti perifériák.
- Speciális mérésekre, vezérlésekre speciális perifériák, pl. időmérés, eseményszámlálás, motorvezérlés.

Problémák:

- Centralizált rendszer: sérülékeny, megbízhatatlan.
- Hosszan vezetett analóg és digitális jelek: zavarérzékenység, sérülésre való hajlam.



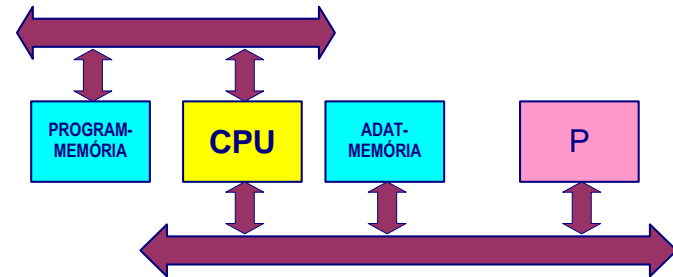
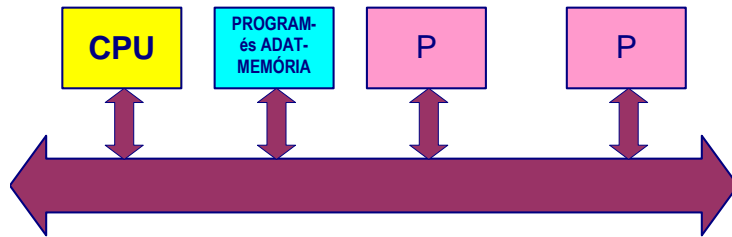
Történelmi példák



Beágyazott számítástechnika

- Számítógép architektúra - általános séma
- A specifikus funkcionalitást a *szoftver* valósítja meg.

Neumann és Harvard architektúra

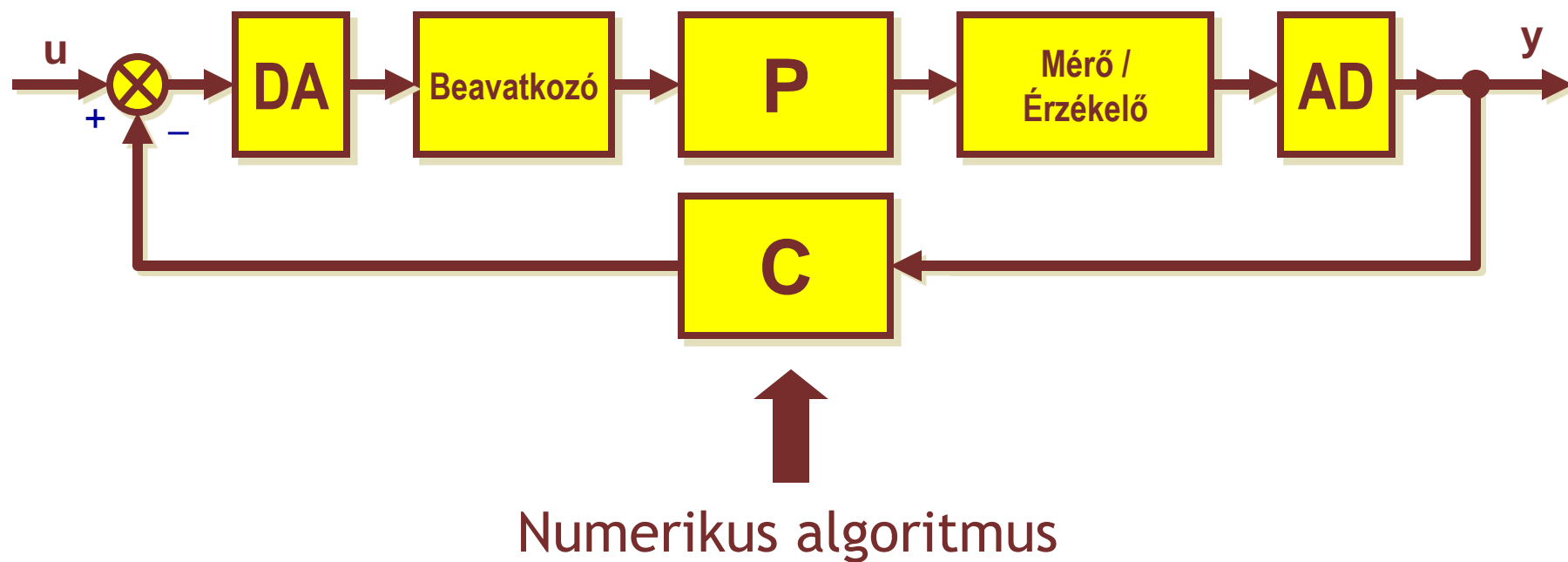


Univerzális elrendezés algoritmizálható problémák megoldására.

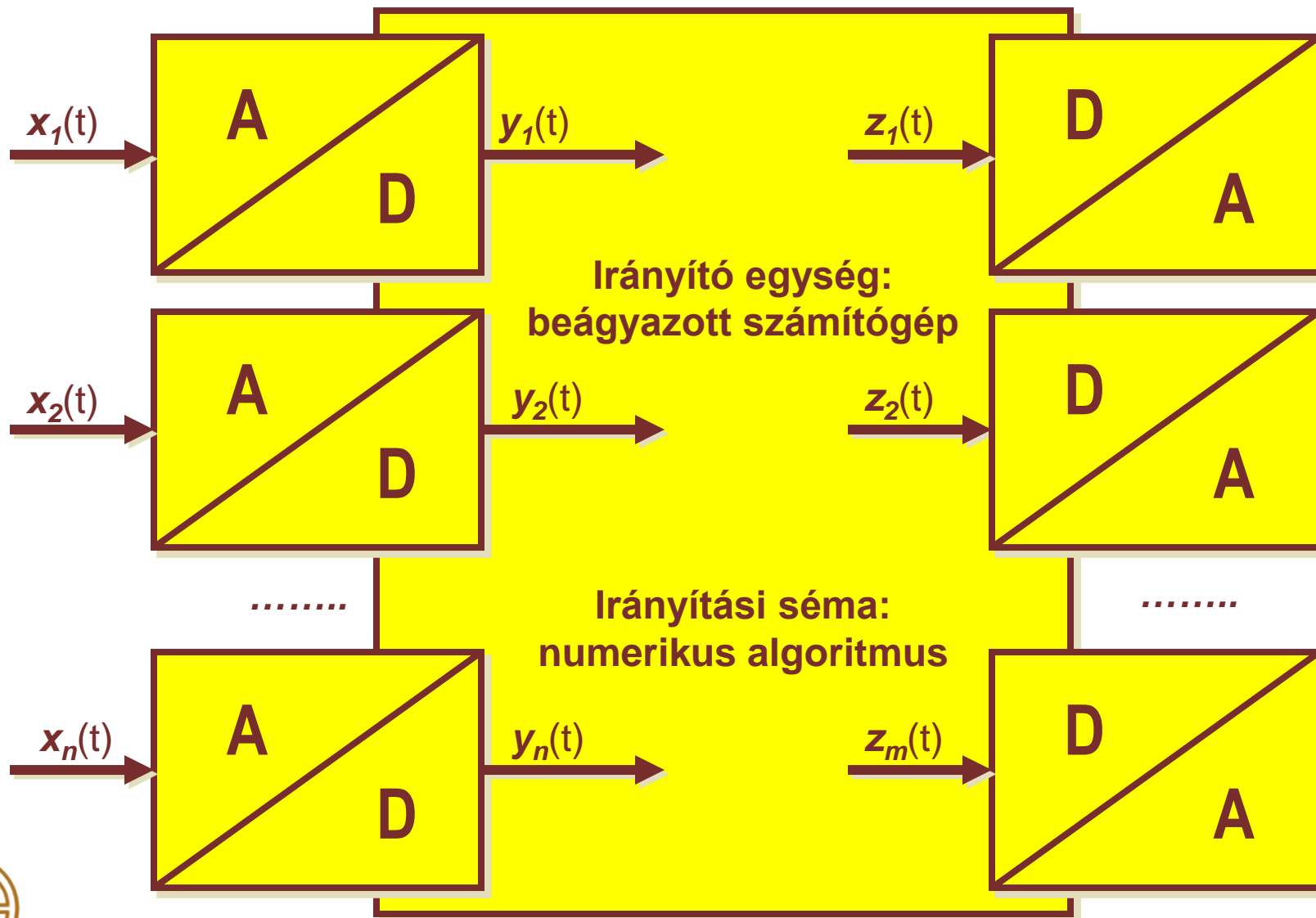


Irányítási rendszerek

Digitális irányítási séma



Beágyazott irányítási séma



Beavatkozó szervek

a digitális irányítási sémában

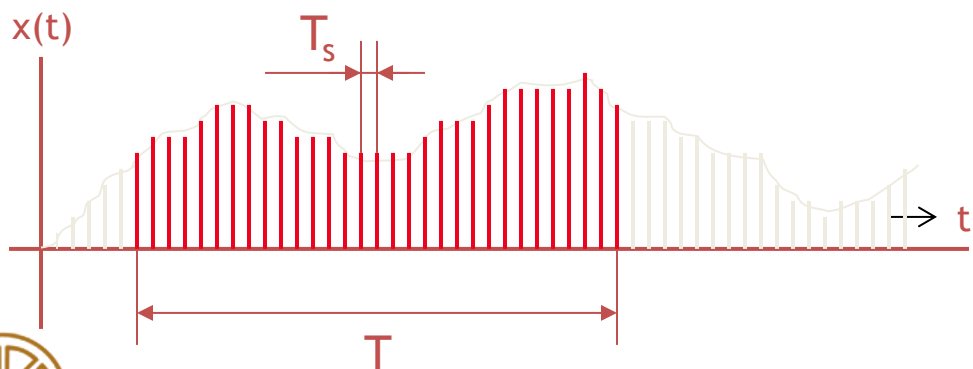
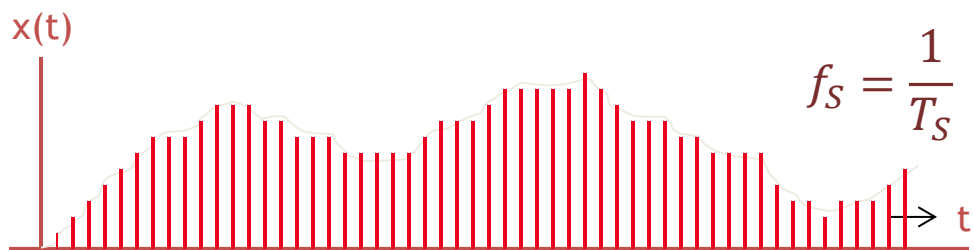
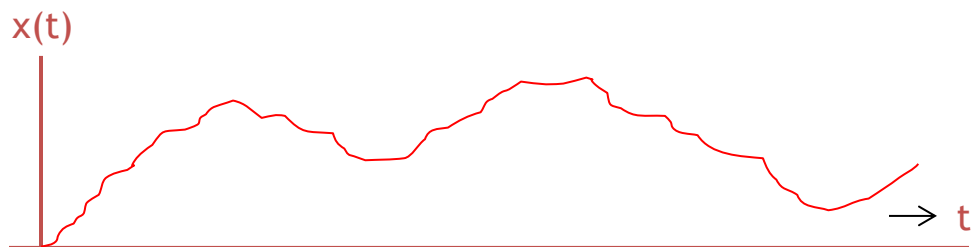
- Az irányítási algoritmusok által kiszámított numerikus értékeket analóg fizikai mennyiségekké alakítják.
- Teljesítményt szolgáltatnak a kívánt fizikai hatás elérése érdekében.

Követelmények:

- Pontosság, torzításmentesség, sebesség.
- Kis teljesítményveszteség, magas hatásfok.



Analóg – Digitális (AD) konverzió



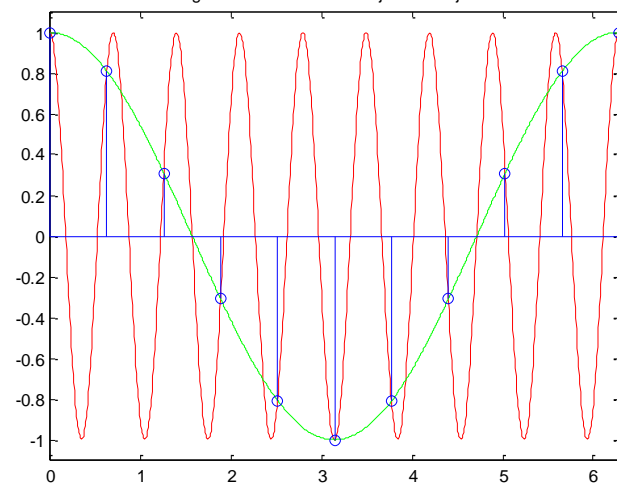
Mintavételi törvény (Shannon)

- Energiakorlátos jel
- Sávkorlátozott jel - f_B

$$f_s \geq 2f_B$$

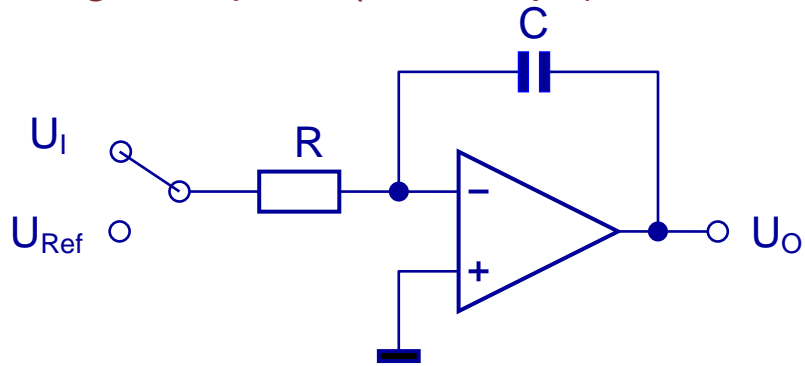
- „Aliasing” hiba
- „Anti-aliasing” szűrő

Aliasing hatás f és 9f frekvenciájú szinuszjel között



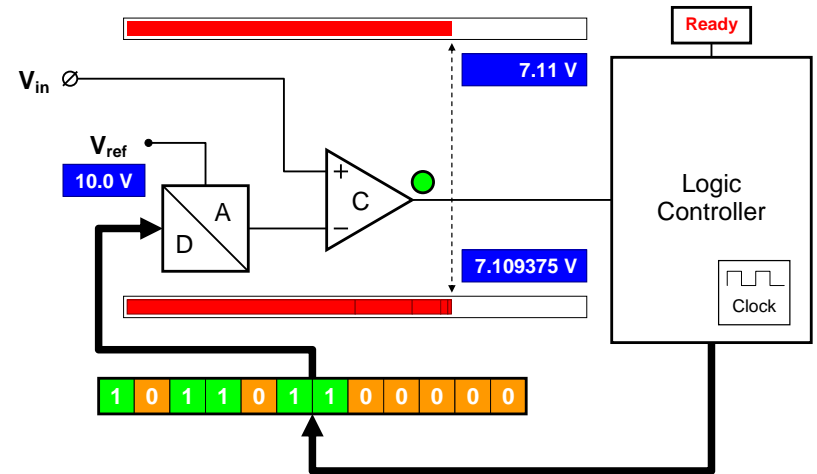
Analóg – Digitális (AD) konverzió

Integráló típusú (dual-slope) ADC

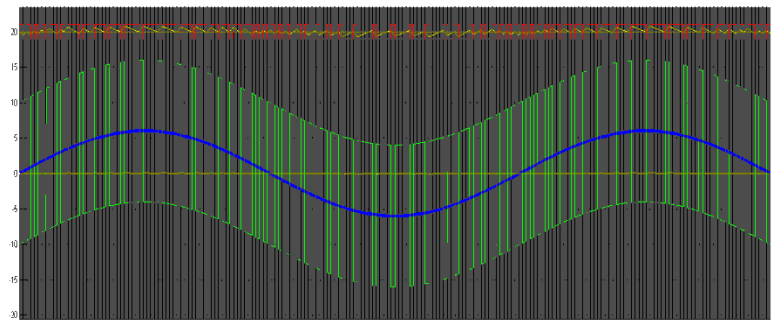
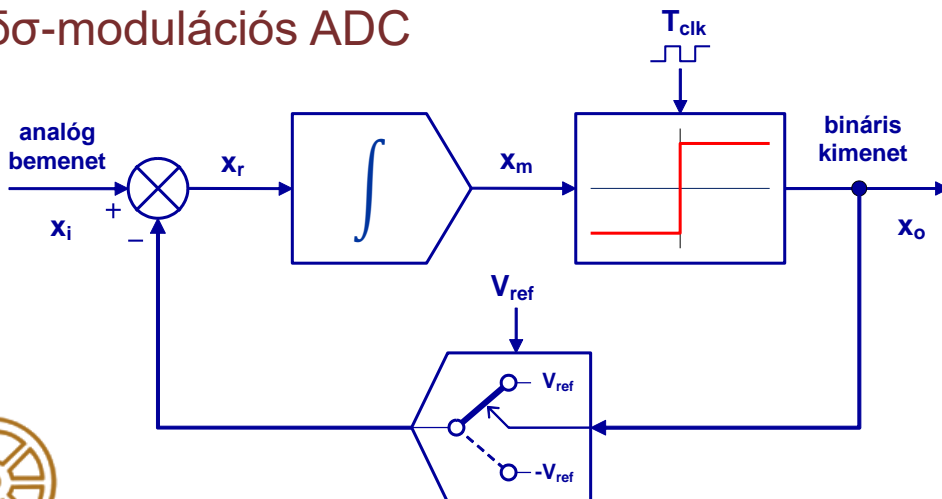


$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T u_I(\tau) d\tau = \frac{\tau}{T} U_{Ref}$$

Szukcesszív approximációs (SAR) ADC



δσ-modulációs ADC



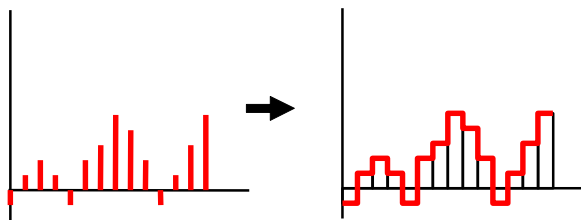
Digitális – Analóg (DA) konverzió

A Shannon törvény szerinti rekonstrukció :

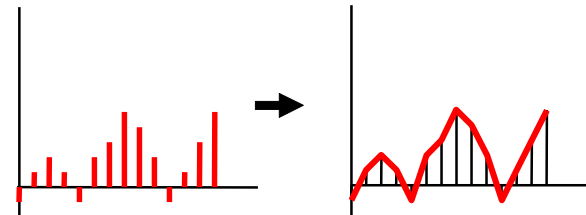
$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(kT) \frac{\sin[2\pi f_N(1 - kT)]}{2\pi f_N(1 - kT)}$$

- Egzakt rekonstrukció a gyakorlatban nem valósítható meg
- A gyakorlat számára túl komplikált

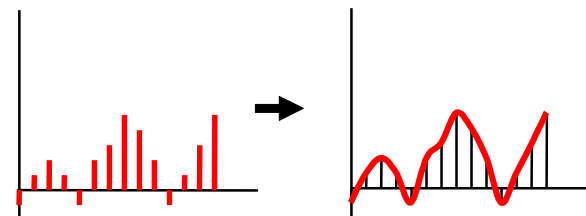
0-rendű tartószerv:
approximáció lépcsős függvénnyel



1-rendű tartószerv:
lineáris interpoláció



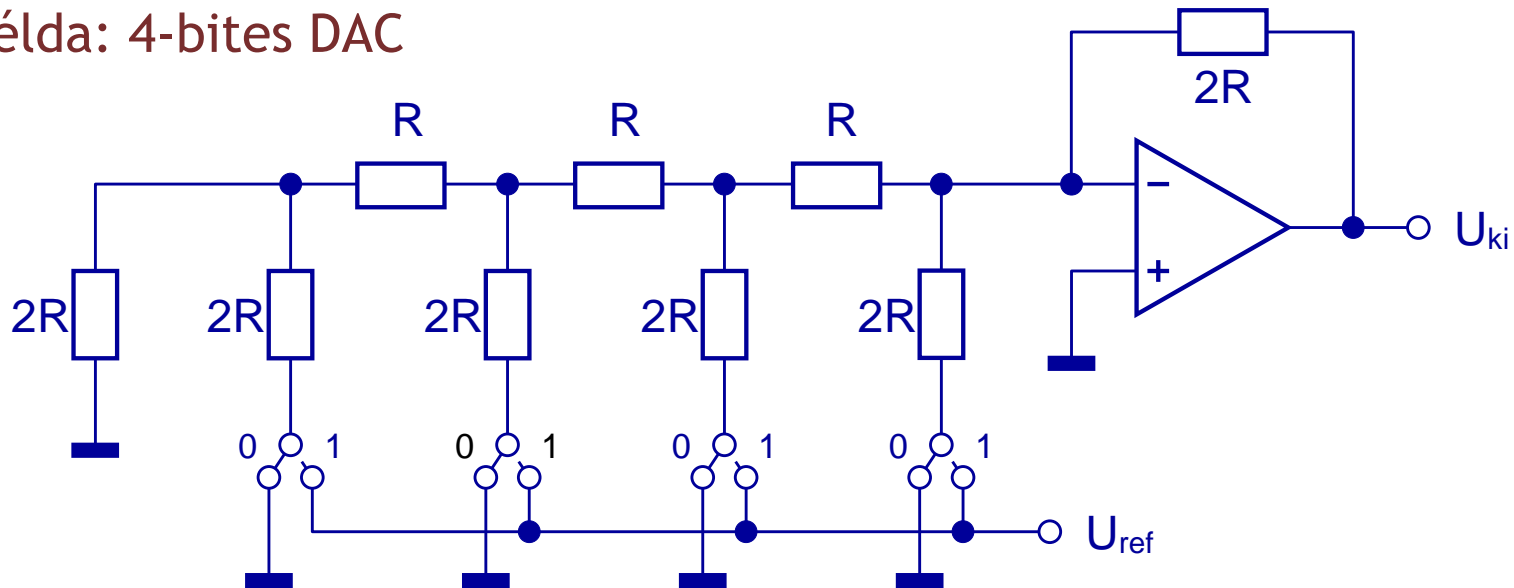
3-rendű *spline*
interpoláció:



Digitális – Analóg (DA) konverzió

Klasszikus DA konverter: R-2R ellenállás létrahálózat

Példa: 4-bites DAC



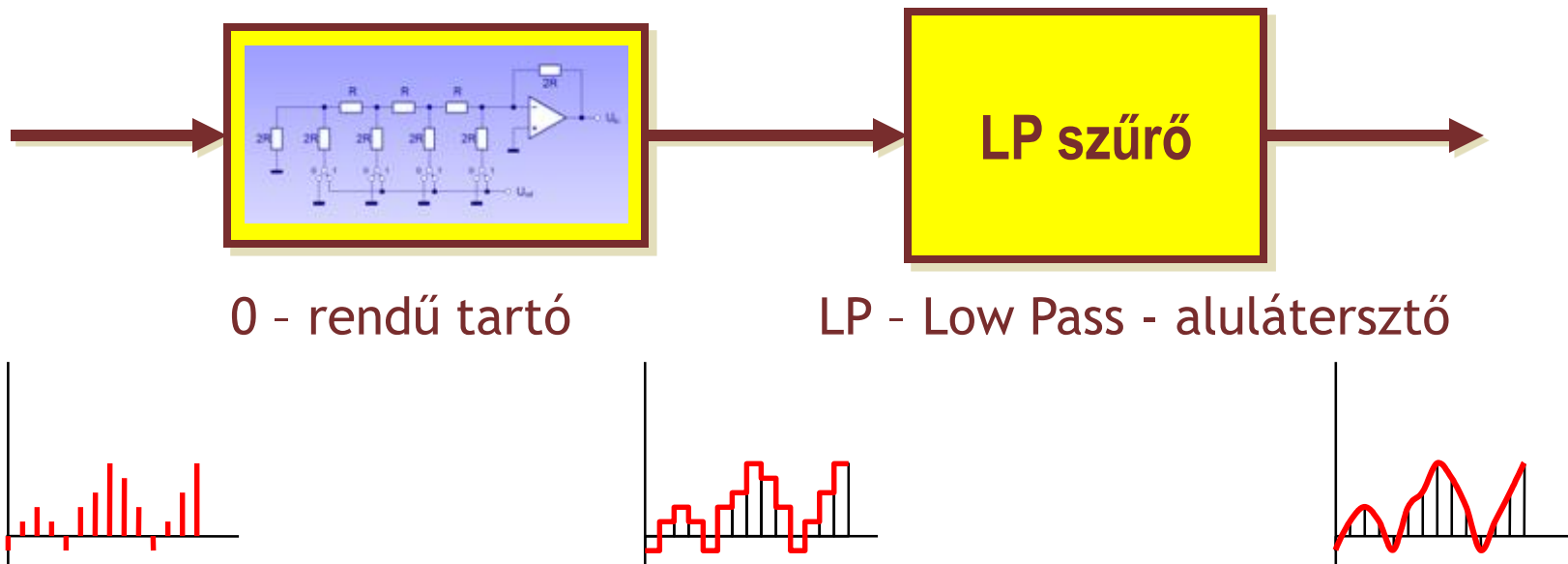
$$U_{ki} = b_3 \frac{U_{ref}}{2} + b_2 \frac{U_{ref}}{4} + b_1 \frac{U_{ref}}{8} + b_0 \frac{U_{ref}}{16}$$

Megvalósítja a 0-rendű tartószervet
(ZOH - zero-order hold)



Digitális – Analóg (DA) konverzió

N-rendű tartó közelítő megvalósítása a gyakorlatban:



0 - rendű tartó

LP - Low Pass - aluláteresztő

A 0-rendű tartó kimeneti jelének „simítása”.



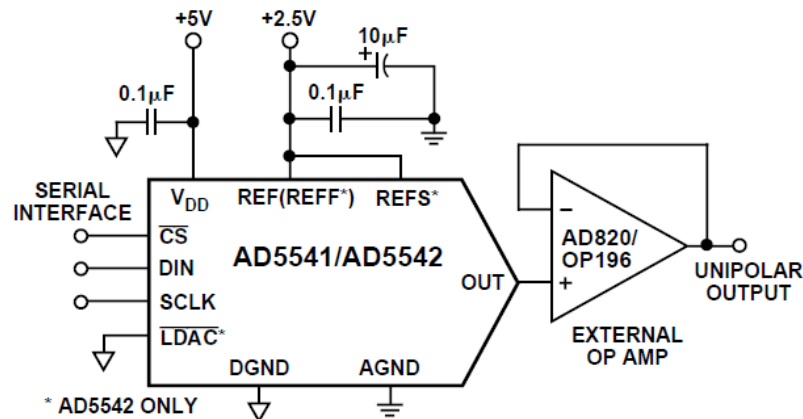
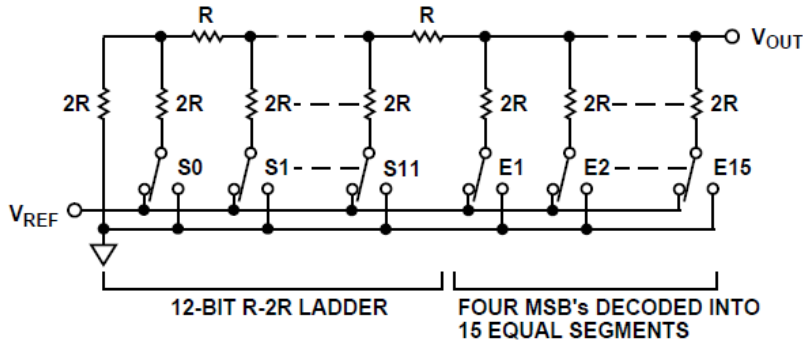
DA konverter megvalósítása

Integrált áramköri realizáció:



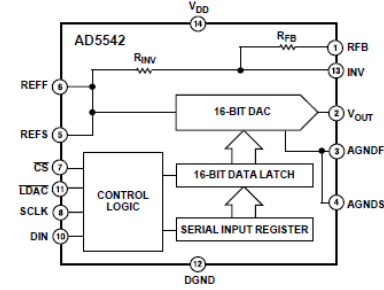
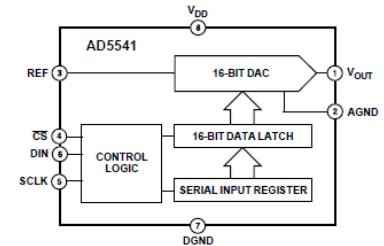
5 V, Serial-Input Voltage-Output, 16-Bit DACs

AD5541/AD5542



- FEATURES**
- Full 16-Bit Performance
 - 5 V Single Supply Operation
 - Low Power
 - Short Settling Time
 - Unbuffered Voltage Output Capable of Driving 60 k Ω Loads Directly
 - SPI™/QSPI™/MICROWIRE™-Compatible Interface Standards
 - Power-On Reset Clears DAC Output to 0 V (Unipolar Mode)
 - Schmitt Trigger Inputs for Direct Optocoupler Interface
- APPLICATIONS**
- Digital Gain and Offset Adjustment
 - Automatic Test Equipment
 - Data Acquisition Systems
 - Industrial Process Control

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAMS



GENERAL DESCRIPTION

The AD5541 and AD5542 are single, 16-bit, serial input, voltage output DACs that operate from a single 5 V \pm 10% supply.

The AD5541 and AD5542 utilize a versatile 3-wire interface that is compatible with SPI, QSPI, MICROWIRE, and DSP interface standards.

These DACs provide 16-bit performance without any adjustments. The DAC output is unbuffered, which reduces power consumption and offset errors contributed to by an output buffer.

The AD5542 can be operated in bipolar mode generating a $\pm V_{REF}$ output swing. The AD5542 also includes Kelvin sense connections for the reference and analog ground pins to reduce layout sensitivity.

The AD5541 and AD5542 are available in an SO package.

PRODUCT HIGHLIGHTS

- Single Supply Operation. The AD5541 and AD5542 are fully specified and guaranteed for a single 5 V \pm 10% supply.
- Low Power Consumption. These parts consume typically 1.5 mW with a 5 V supply.
- 3-Wire Serial Interface.
- Unbuffered output capable of driving 60 k Ω loads. This reduces power consumption as there is no internal buffer to drive.
- Power-On Reset circuitry.

SPI interfész

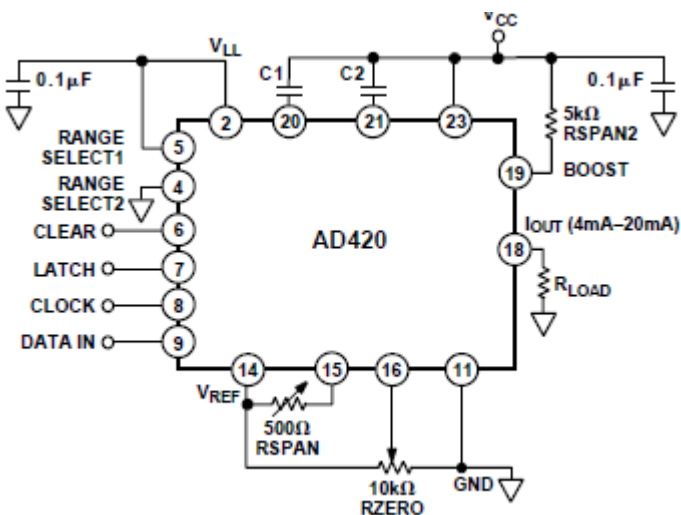


DA konverter megvalósítása

Áramkimenetű DA

4...20 mA ipari szabvány

Miért nem 0 a minimum?



SPI interfész



Serial Input 16-Bit
4 mA–20 mA, 0 mA–20 mA DAC

AD420

FEATURES

- 4 mA–20 mA, 0 mA–20 mA or 0 mA–24 mA Current Output
- 16-Bit Resolution and Monotonicity
- $\pm 0.012\%$ Max Integral Nonlinearity
- $\pm 0.05\%$ Max Offset (Trimable)
- $\pm 0.15\%$ Max Total Output Error (Trimable)
- Flexible Serial Digital Interface (3.3 MBPS)
- On-Chip Loop Fault Detection
- On-Chip 5 V Reference (25 ppm/°C Max)
- Asynchronous CLEAR Function
- Maximum Power Supply Range of 32 V
- Output Loop Compliance of 0 V to $V_{CC} - 2.5$ V
- 24-Lead SOIC and PDIP Packages

PRODUCT DESCRIPTION

The AD420 is a complete digital to current loop output converter, designed to meet the needs of the industrial control market. It provides a high precision, fully integrated, low cost single-chip solution for generating current loop signals in a compact 24-lead SOIC or PDIP package.

The output current range can be programmed to 4 mA–20 mA, 0 mA–20 mA or an overrange function of 0 mA–24 mA. The AD420 can alternatively provide a voltage output from a separate pin that can be configured to provide 0 V–5 V, 0 V–10 V, ± 5 V or ± 10 V with the addition of a single external buffer amplifier.

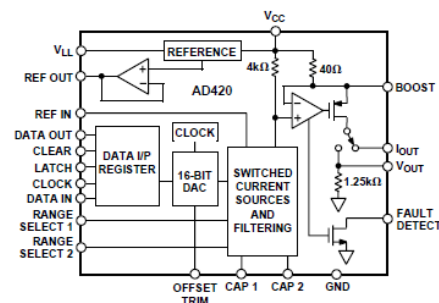
The 3.3M Baud serial input logic design minimizes the cost of galvanic isolation and allows for simple connection to commonly used microprocessors. It can be used in three-wire or asynchronous mode and a serial-out pin is provided to allow daisy chaining of multiple DACs on the current loop side of the isolation barrier.

The AD420 uses sigma-delta ($\Sigma\Delta$) DAC technology to achieve 16-bit monotonicity at very low cost. Full-scale settling to 0.1% occurs within 3 ms. The only external components that are required (in addition to normal transient protection circuitry) are two low cost capacitors which are used in the DAC output filter.

If the AD420 is going to be used at extreme temperatures and supply voltages, an external output transistor can be used to minimize power dissipation on the chip via the “BOOST” pin.

The FAULT DETECT pin signals when an open circuit occurs in the loop. The on-chip voltage reference can be used to supply a precision +5 V to external components in addition to the AD420 or, if the user desires temperature stability exceeding 25 ppm/°C, an external precision reference such as the AD586 can be used as the reference.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



The AD420 is available in a 24-lead SOIC and PDIP over the industrial temperature range of -40°C to $+85^{\circ}\text{C}$.

PRODUCT HIGHLIGHTS

- The AD420 is a single chip solution for generating 4 mA–20 mA or 0 mA–20 mA signals at the “controller end” of the current loop.
- The AD420 is specified with a power supply range from 12 V to 32 V. Output loop compliance is 0 V to $V_{CC} - 2.5$ V.
- The flexible serial input can be used in three-wire mode with SPI[®] or MICROWIRE[®] microcontrollers, or in asynchronous mode which minimizes the number of control signals required.
- The serial data out pin can be used to daisy chain any number of AD420s together in three-wire mode.
- At power-up the AD420 initializes its output to the low end of the selected range.
- The AD420 has an asynchronous CLEAR pin which sends the output to the low end of the selected range (0 mA, 4 mA, or 0 V).
- The AD420 BOOST pin accommodates an external transistor to off-load power dissipation from the chip.
- The offset of $\pm 0.05\%$ and total output error of $\pm 0.15\%$ can be trimmed if desired, using two external potentiometers.

A DA konverzió problémái

A klasszikus DAC problémái:

- A beavatkozás fizikai rendszerekbe nagy teljesítményt igényel - pl. mechanikai, hő-, villamos teljesítményt
- Nagy teljesítményű beavatkozó szervek (motorok, elektromágnesek) meghajtása nagy villamos teljesítményt igényel - valamilyen feszültség mellett nagy áramot

A DA konvertereket teljesítményerősítő (végerősítő) fokozattal kell ellátni:

- analóg végerősítők: A, B, AB és C osztályú
- alacsony hatásfok, nagy hődisszipáció



Analóg végerősítők

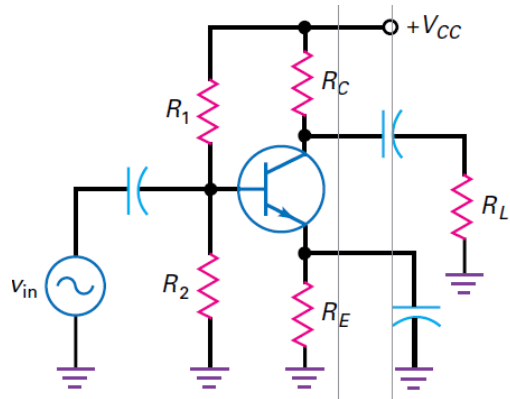
A, B, AB (C) osztályú végerősítők:

- Tranzisztoros (régebben elektroncsöves) áramkörök
- A kimeneti jel nagyságával arányban a tranzisztorokon nagy áram mellett kisebb vagy nagyobb feszültség esik - **nagy hődisszipáció, korlátozott hatásfok**
- Kimeneti teljesítmény korlátozott (néhány kW).

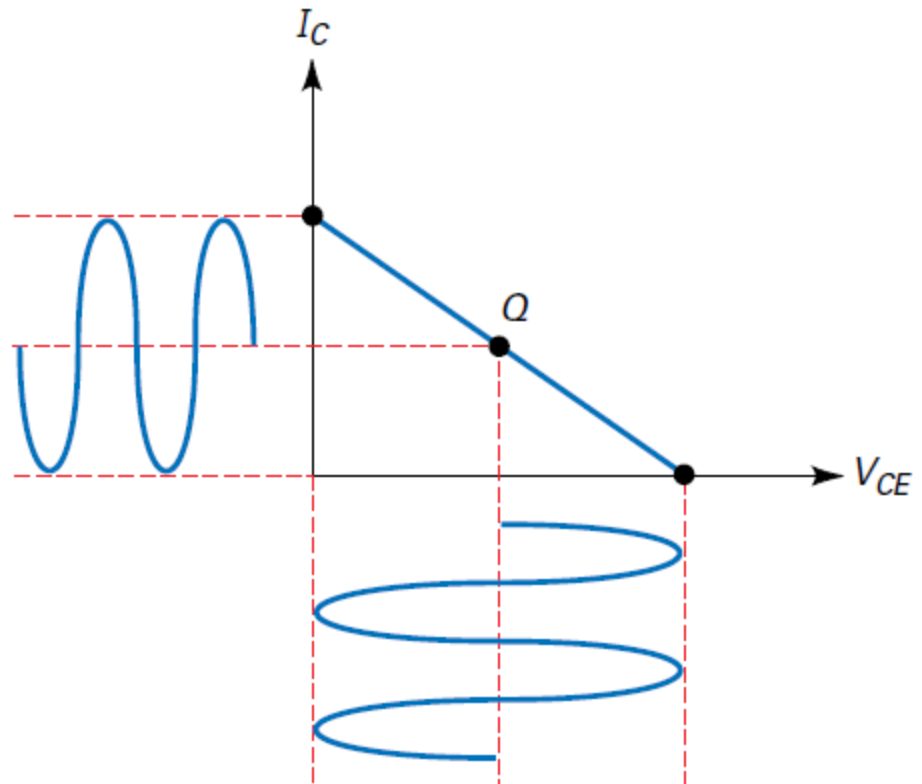
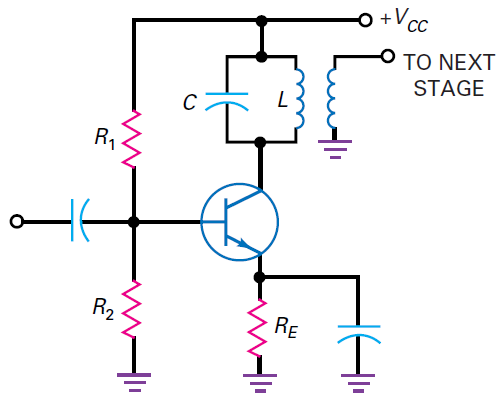


Analóg végerősítők

A

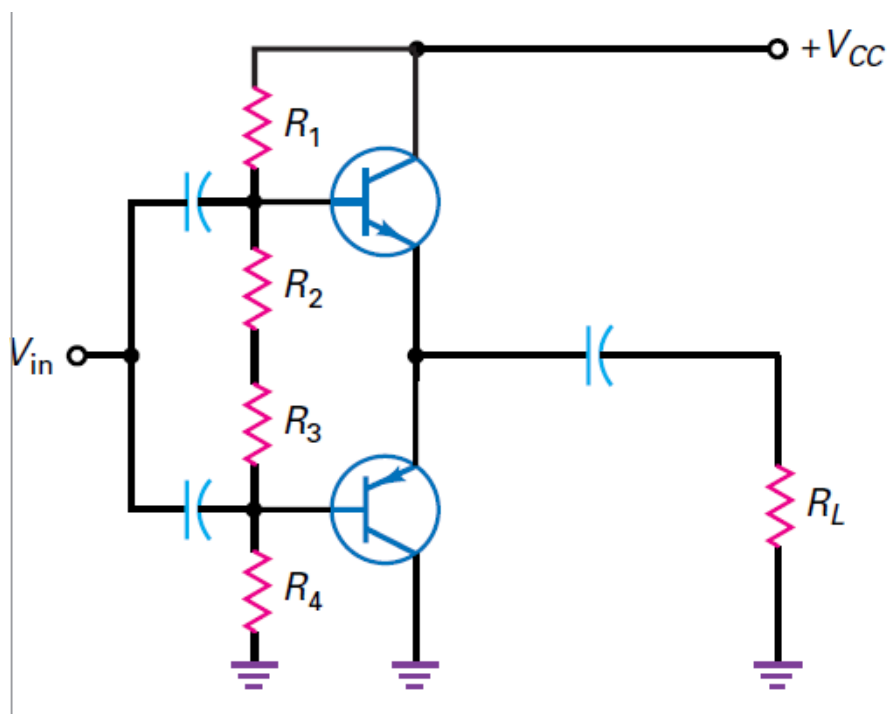


földelt emitteres
alapkapcsolás

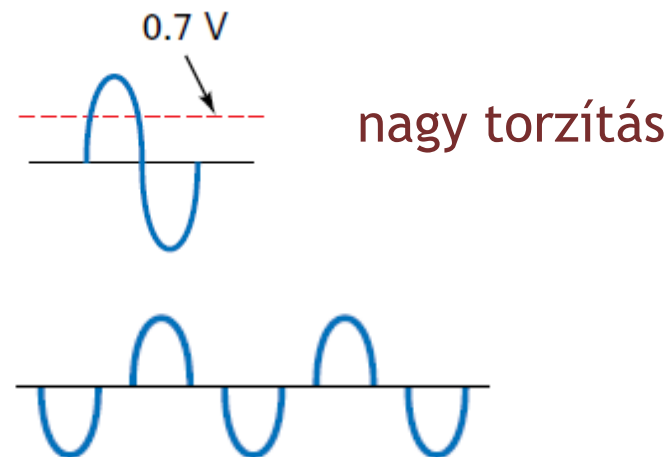
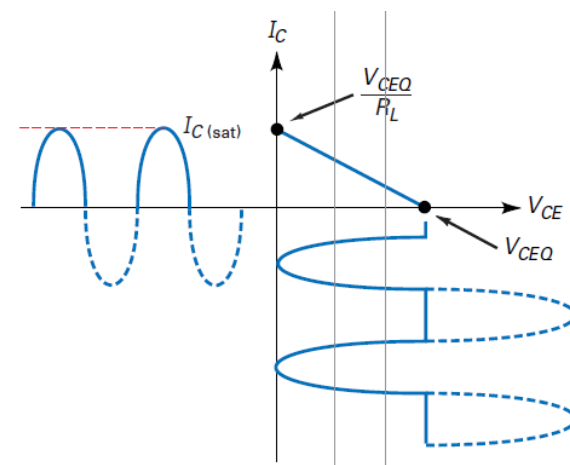


Analóg végerősítők

B „push-pull” kimenet

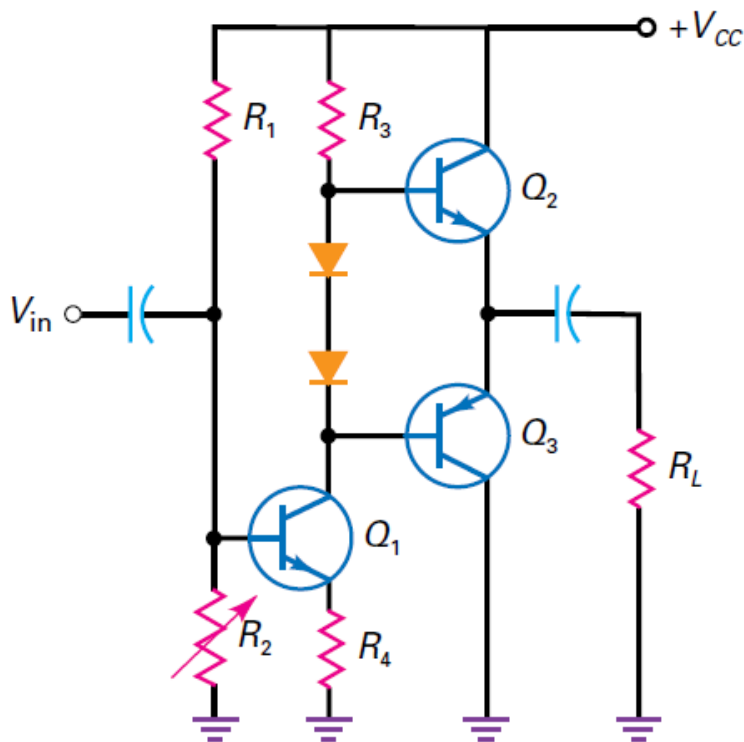


emitterkövető (földelt kollektoros)



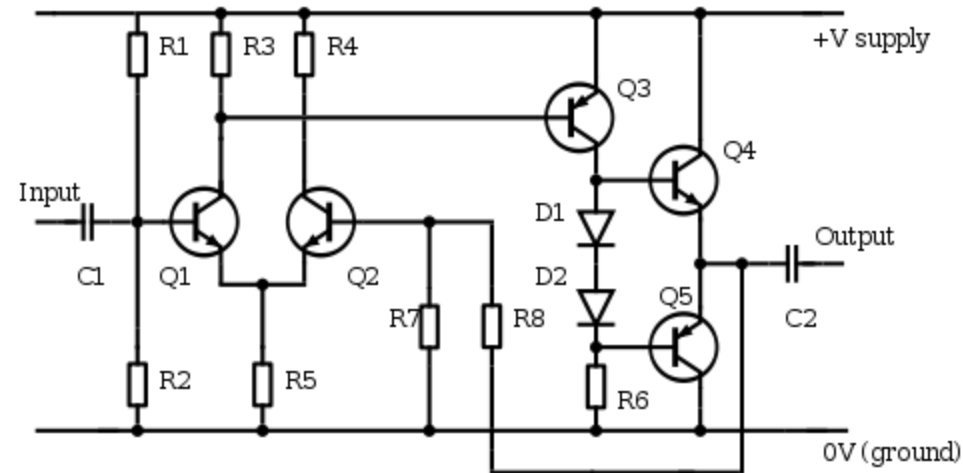
Analóg végerősítők

AB „push-pull”



A munkapont eltolásával:
kiseb torzítás

egy gyakorlati példa:



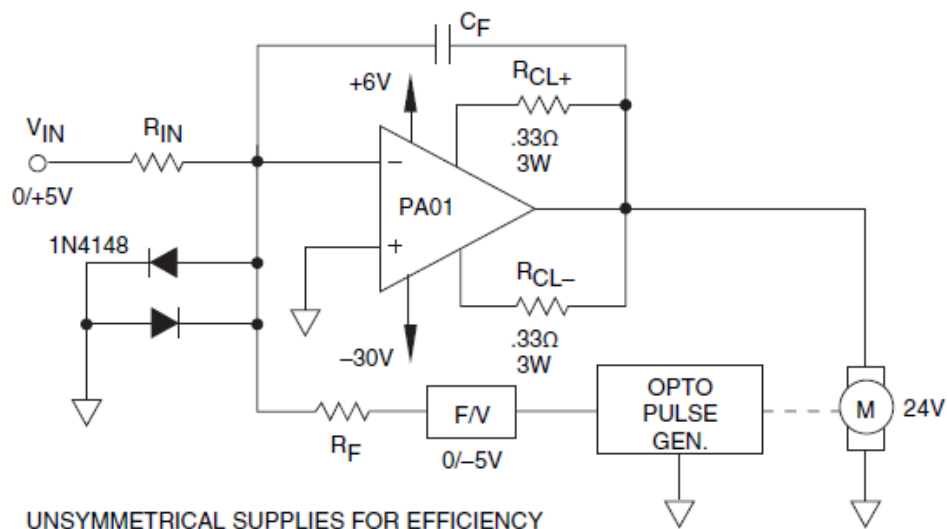
Példa – Analóg teljesítmény erősítő

Az irányítástechnikában:

- DC-től valamekkora határfrekvenciáig lineáris erősítő
- „Teljesítmény-műveleti erősítő”

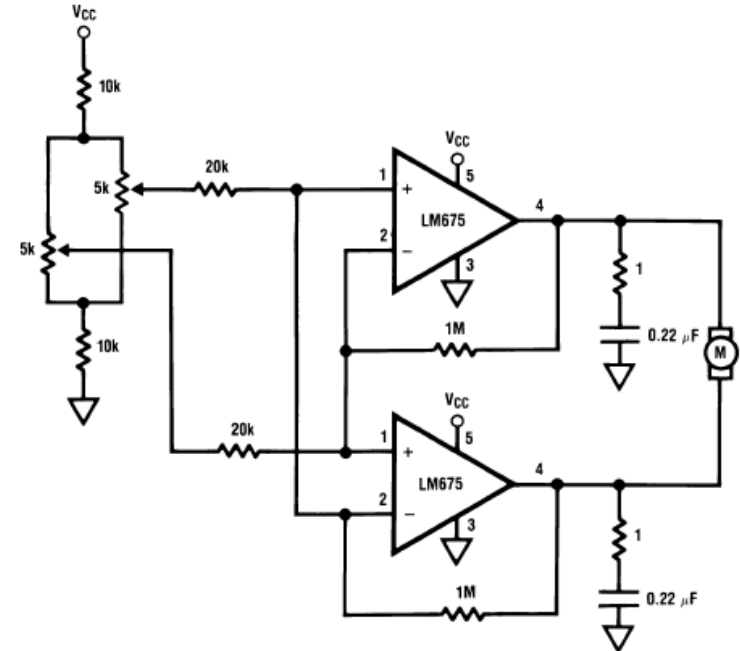
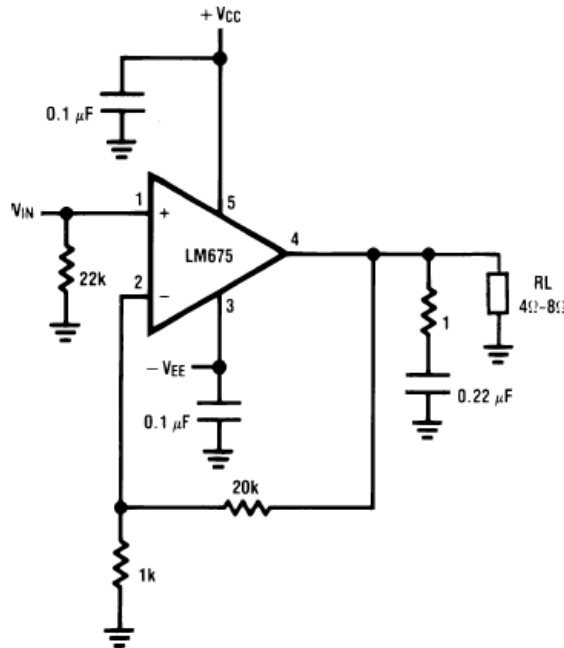


Apex PA01



Példa – Analóg teljesítmény erősítő

TI LM675:

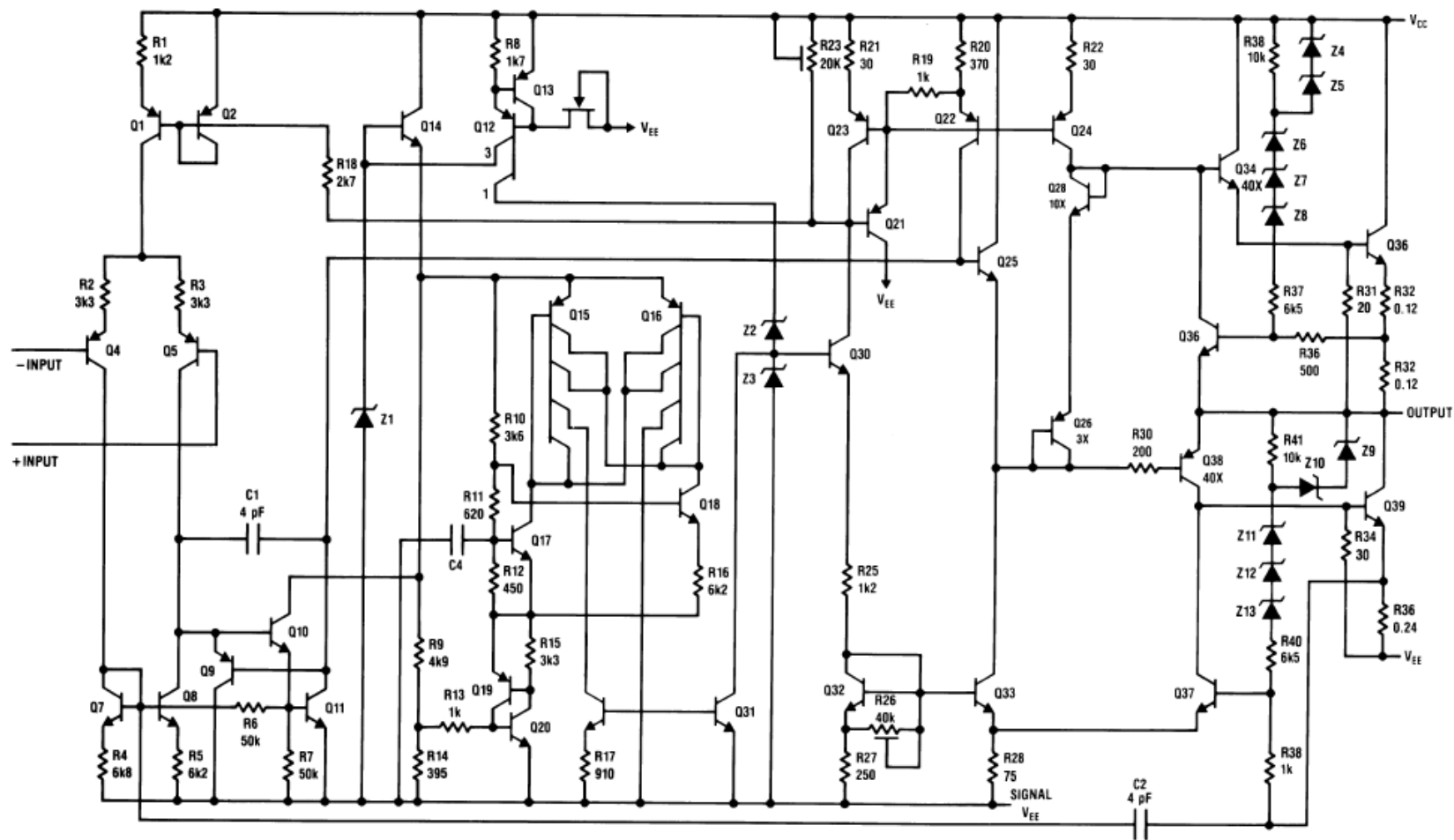


- 3A current capability
- A_{VO} typically 90 dB
- 5.5 MHz gain bandwidth product
- 8 V/μs slew rate
- Wide power bandwidth 70 kHz
- 1 mV typical offset voltage
- Short circuit protection
- 16V–60V supply range



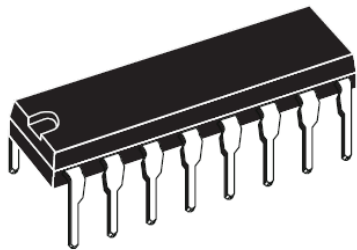
Példa – Analóg teljesítmény erősítő

TI LM675:

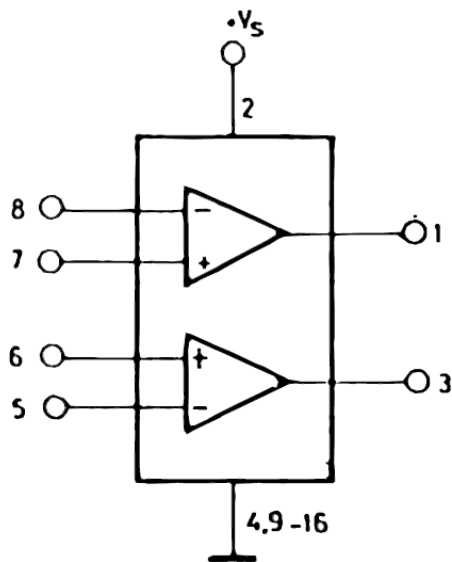


Példa – Analóg teljesítmény erősítő

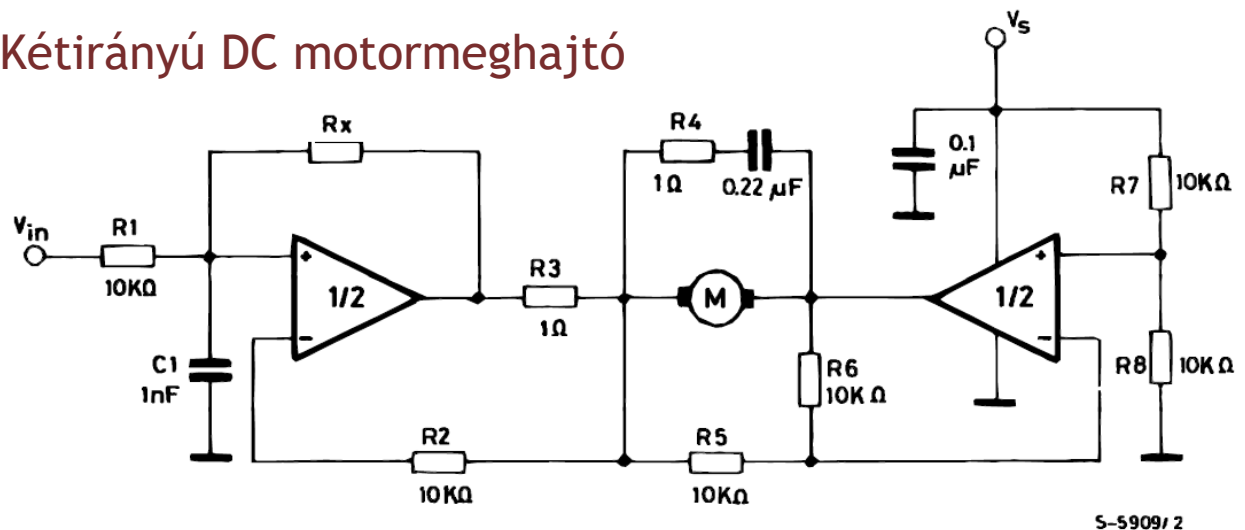
ST L272: kettős teljesítmény műveleti erősítő



- Max. 1A kimeneti áram, 28 V feszültség
- Nyílt hurkú erősítés: 70 dB
- Erősítés-sávszélesség szorzat: 350 kHz
- Harmonikus torzítás: 0.5 %



Kétirányú DC motormeghajtó



Analóg végerősítők

Hátrányok:

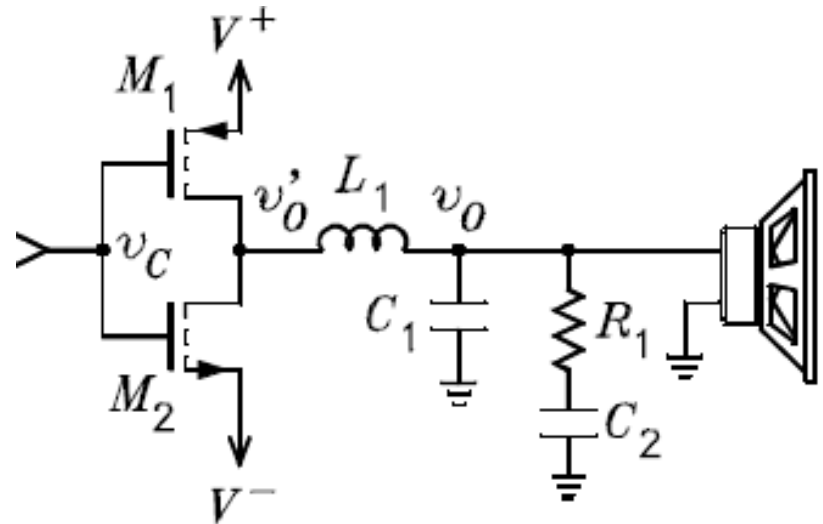
- Kis hatásfok,
- Nagy hődisszipáció,
- Korlátozott kimeneti teljesítmény (max. néhány kW).



Kapcsolóüzemű megoldások

Lényegesen nagyobb hatásfokot eredményeznek:

- Kapcsolóüzemű megoldások
 - D-osztályú végerősítő



- Impulzusszélesség moduláció -
PWM - Pulse-Width Modulation



Kapcsolóüzemű működés

Ideális kapcsoló

Két állapot:

- Nyitott: ellenállása végtelen
 - Áram: 0
 - Feszültség: véges
 - Teljesítmény disszipáció: 0
- Zárt: ellenállása 0
 - Áram: véges
 - Feszültség: 0
 - Teljesítmény disszipáció: 0



Átmenet: 0 időtartamú, energia disszipáció 0



Kapcsolóüzemű működés

Valóságos (de jó minőségű) kapcsoló

Két állapot, közöttük >0 ideig tartó átmenet:

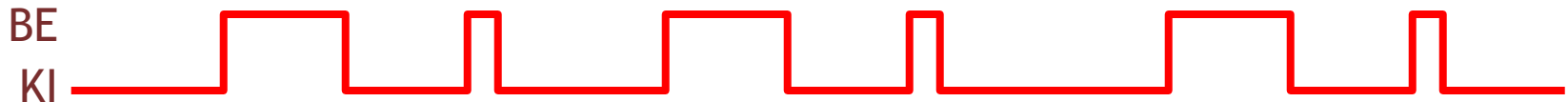
- Nyitott: ellenállása nagyon nagy
 - Áram: nagyon kicsi
 - Feszültség: véges
 - Teljesítmény disszipáció: nagyon kicsi
- Zárt: ellenállása kicsi
 - Áram: véges
 - Feszültség: kicsi
 - Teljesítmény disszipáció: kicsi
- Átmeneti: rövid ideig tartó véges teljesítményű disszipáció



Kapcsolóüzemű működési elv

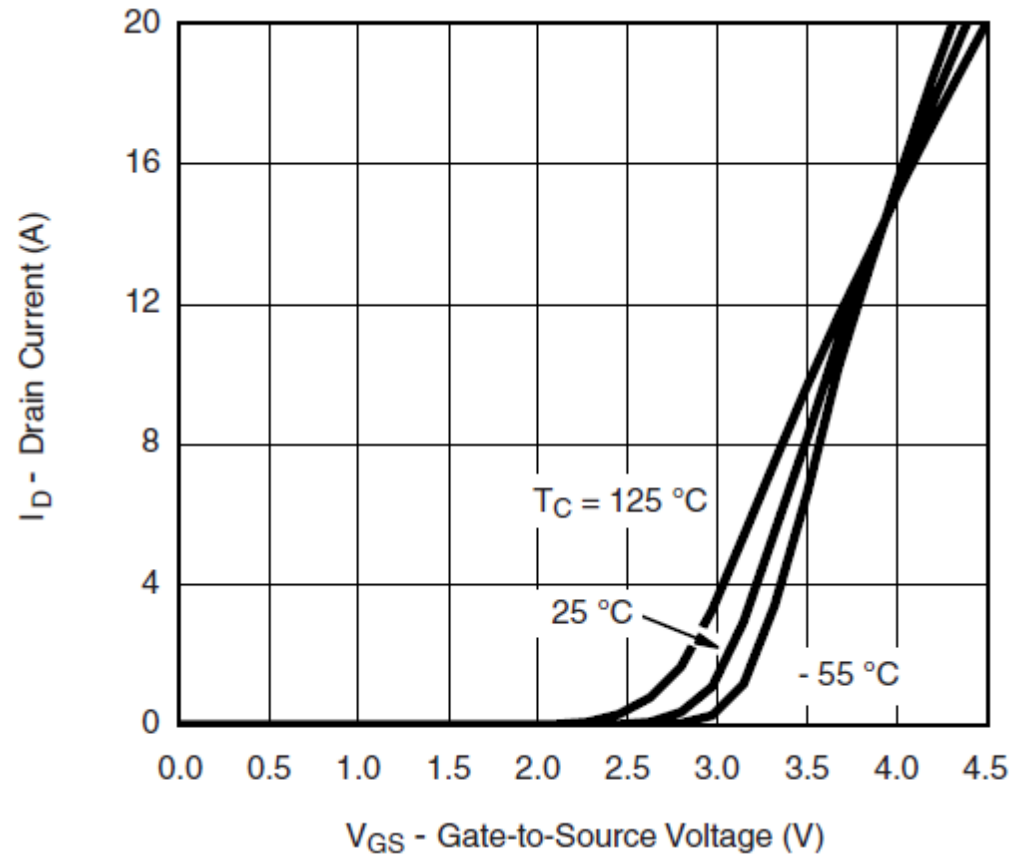
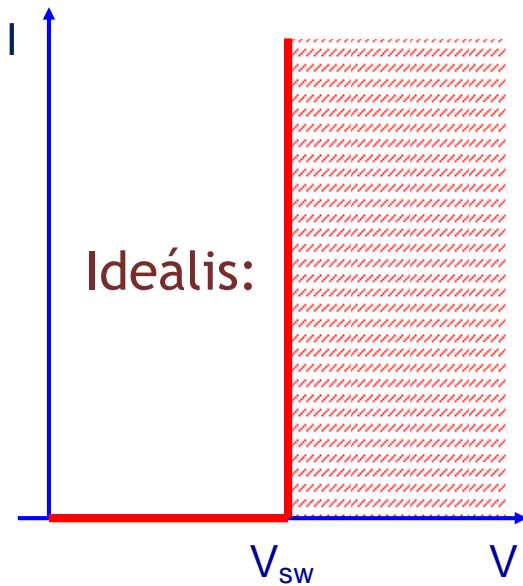
BE- és KI-kapcsolás - kétállapotú rendszer:

- Megfelel a digitális működési elveknek
- Nagy hatásfok, kis teljesítményveszteség és hődisszipáció
- Egyszerű megvalósítás félvezető eszközökkel:
 - tranzisztorok
 - MOS FET-ek
 - IGBT-k - Insulated-Gate Bipolar Transistor

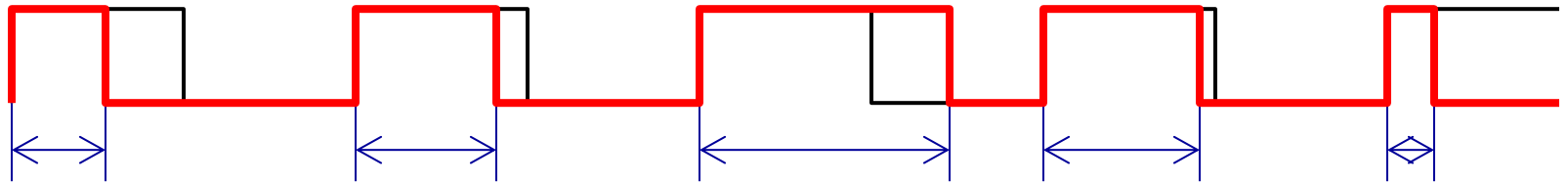
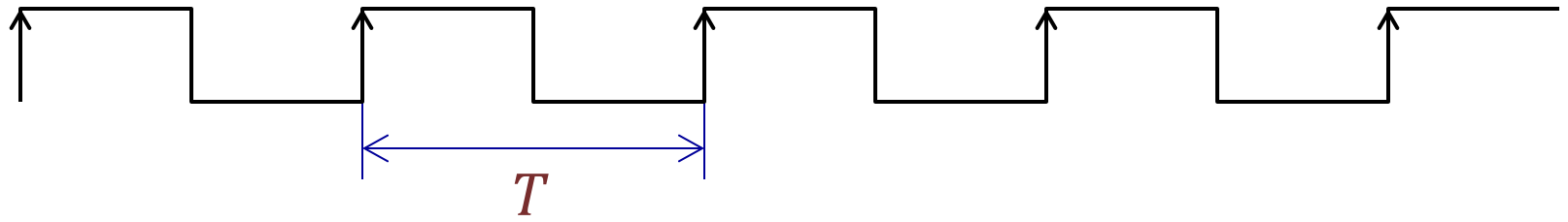


Kapcsolóüzemű működési elv

MOS FET-ek
transzfer
karakterisztika



PWM – Pulse Width Modulation



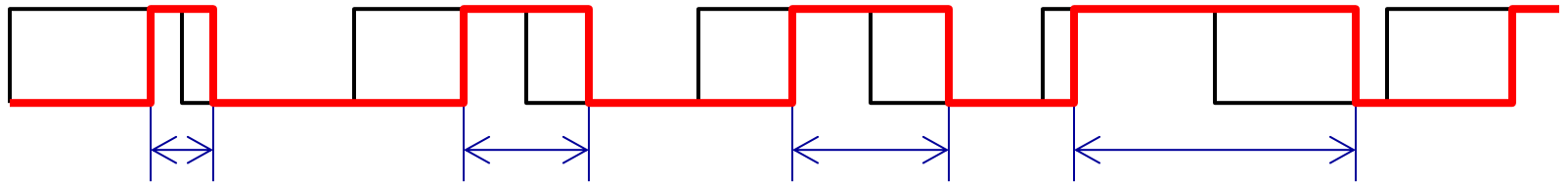
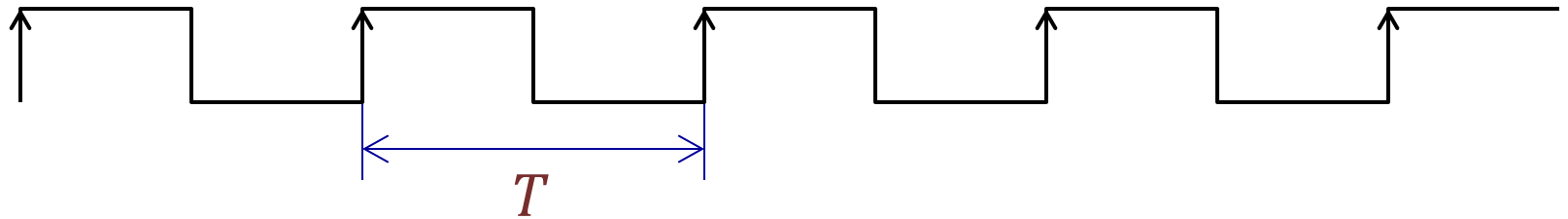
$$T_{p0} \sim x(t_0) \quad T_{p1} \sim x(t_0 + T) \quad T_{p2} \sim x(t_0 + 2T)$$

$$T_{pk} \sim x(t_0 + kT)$$

PWM: az impulzusszélesség arányos a mintaértékekkel
– impulzusszélesség - moduláció.



PWM – Pulse Width Modulation



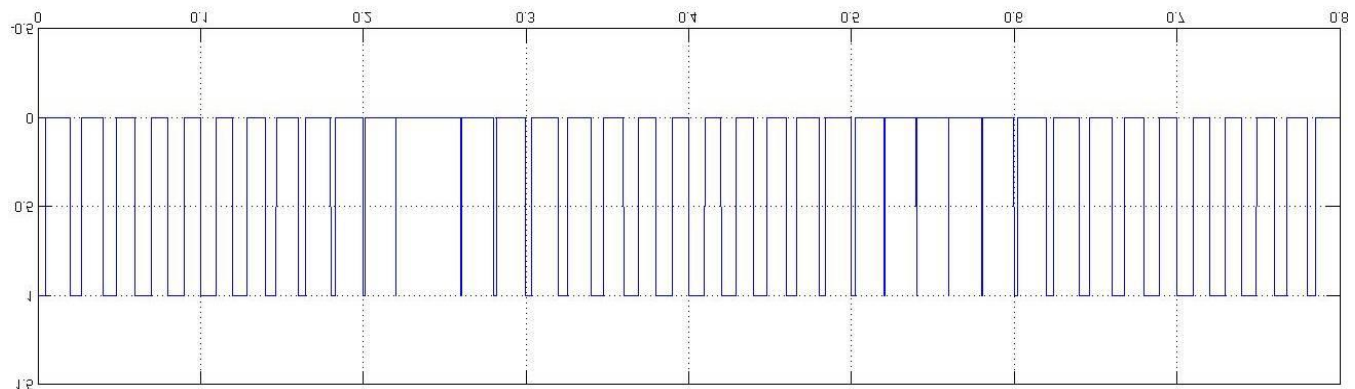
$$T_{p0} \sim x(t_0) \quad T_{p1} \sim x(t_0 + T) \quad T_{p2} \sim x(t_0 + 2T)$$

$$T_{pk} \sim x(t_0 + kT)$$

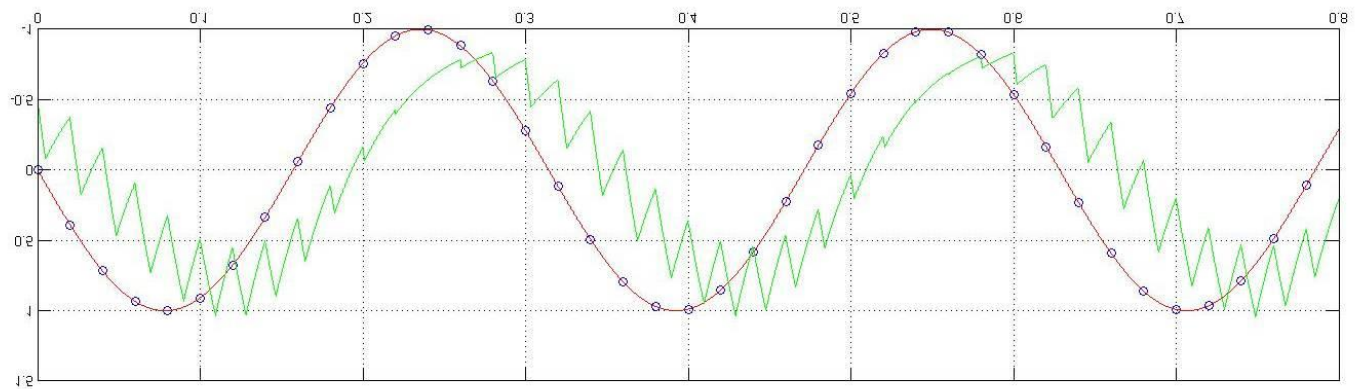
Fázishelyes PWM: szimmetrikus impulzusok a korrekt időpontokban.



PWM – Pulse Width Modulation



Aluláteresztő (LP) szűréssel (1-rendű RC szűrő):



PWM – Pulse Width Modulation

Az analóg jel közelítő visszaállítása:

aluláteresztő (LP) szűrés

Hibák:

- Torzítás - a hordozó frekvencia nem tűnik el nyomtalanul.
- Pontatlanság az interpolációban.
- Késleltetés, fáziskésés.

Gondos tervezéssel a gyakorlati alkalmazások szempontjából elegendő pontosság érhető el.

LP szűrés: sok esetben az aktuátorok maguk realizálják - az elektromechanikus elemek lassú dinamikájúak.



Elektromechanikus aktuátorok

- Elektromágneses működtető elemek (működtető mágnes, szolenoid, relé)
- Elektromos motorok
 - DC (Direct Current) motor - egyenáramú motor
 - BLDC (Brushless DC) motor - kefenélküli egyenáramú motor
 - PMS (Permanent Magnet Synchronous) - állandó mágneses szinkron motor
 - AC (Alternating Current) motor - indukciós motor, aszinkron motor
 - Léptető motor



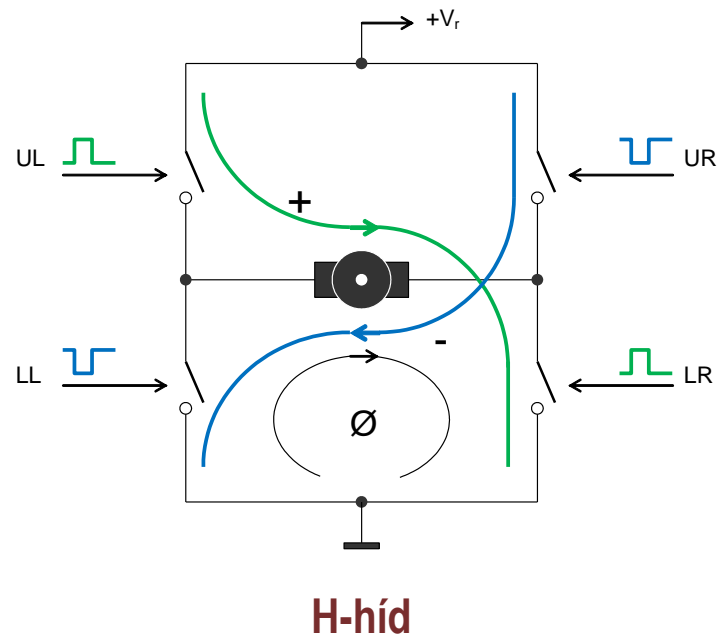
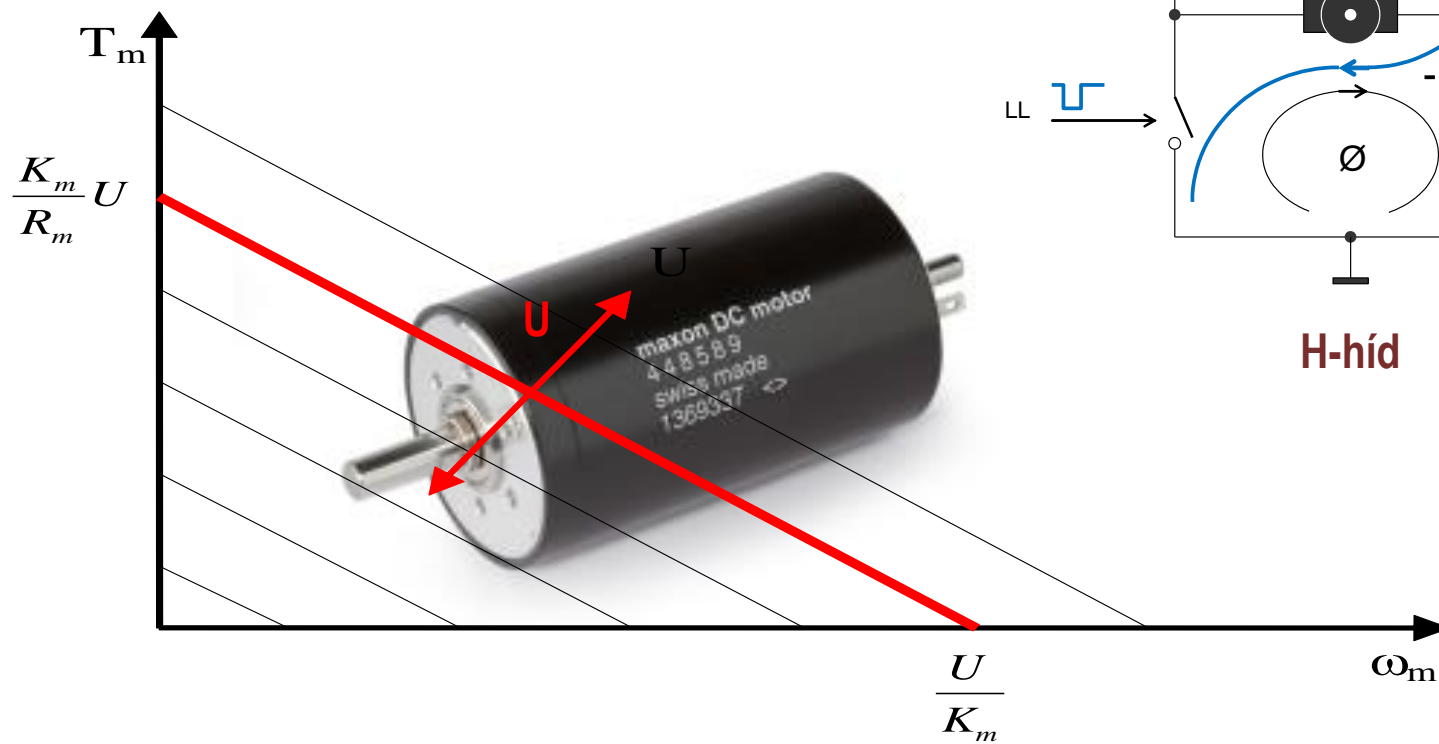
További (nem mechanikus) beavatkozó szervek:

- Fűtő (hőközlő) eszközök
- Világító (fényemittáló) eszközök
- ...

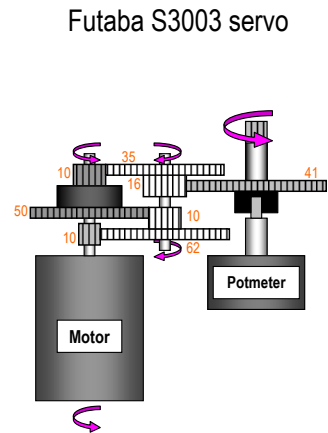
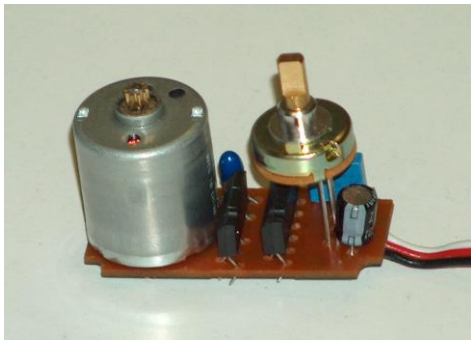
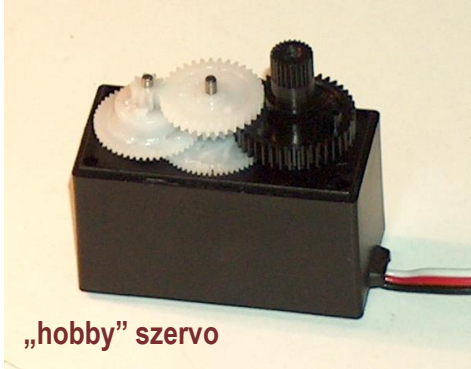
- Hidraulikus ?
- Pneumatikus ?
aktuátorok ■



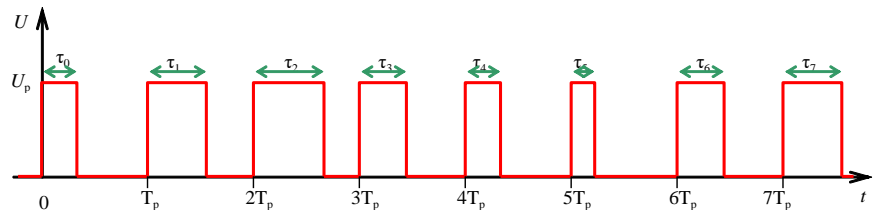
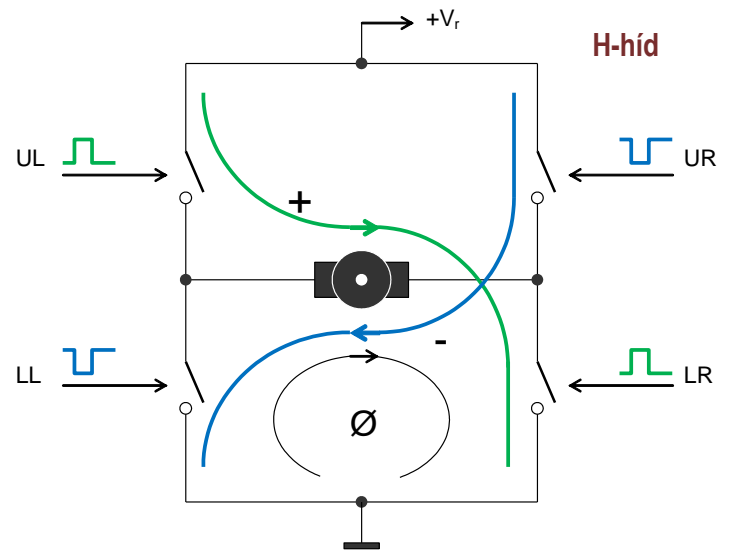
Példa: DC motor



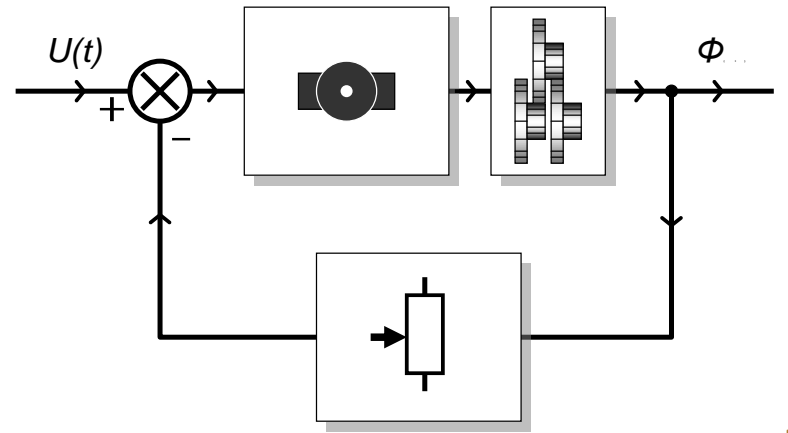
Példa: pozíció szervo szabályozás



$$\frac{10 \ 10 \ 10 \ 16}{62 \ 50 \ 35 \ 41} = \frac{32}{8897} = \frac{1}{278.03125}$$



PWM



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

Dr. Soumelidis Alexandros



email: soumelidis@sztaki.hu



BME KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI ÉS JÁRMŰMÉRNÖKI KAR
32708-2/2017/INTFIN SZÁMÚ EMMI ÁLTAL TÁMOGATOTT TANANYAG