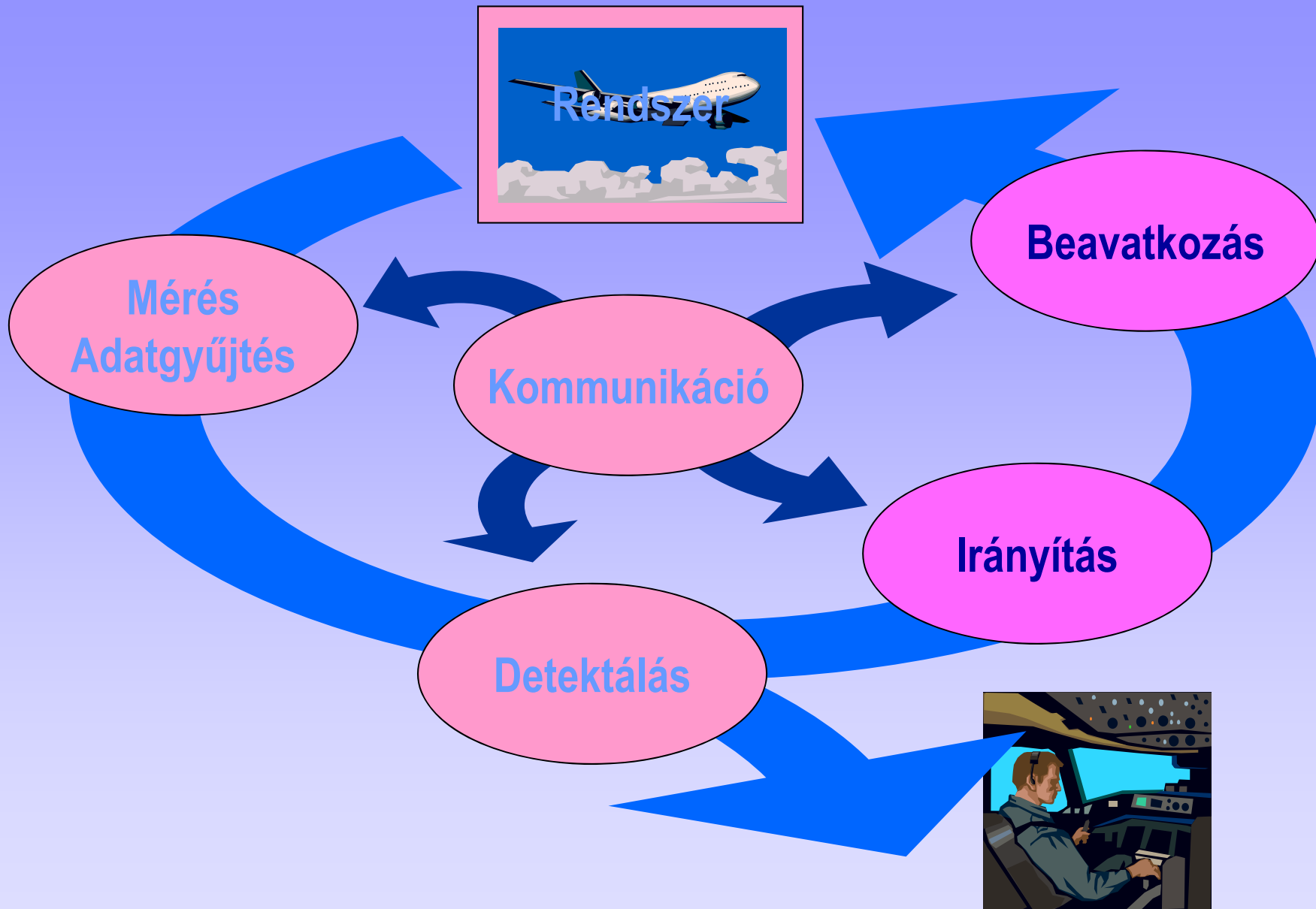


Irányítási rendszerek megvalósítása

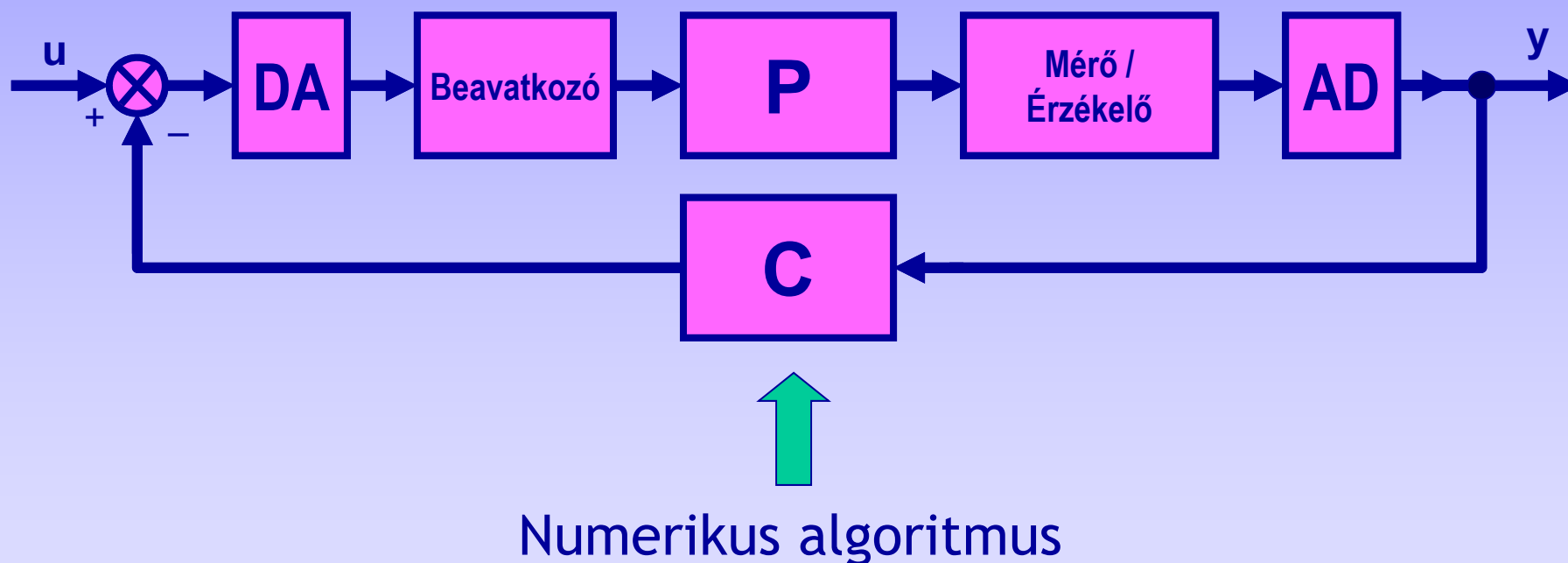
Automatikus Fedélzeti Irányító Rendszerek a Légiközlekedésben

Dr. Soumelidis Alexandros
egy. docens



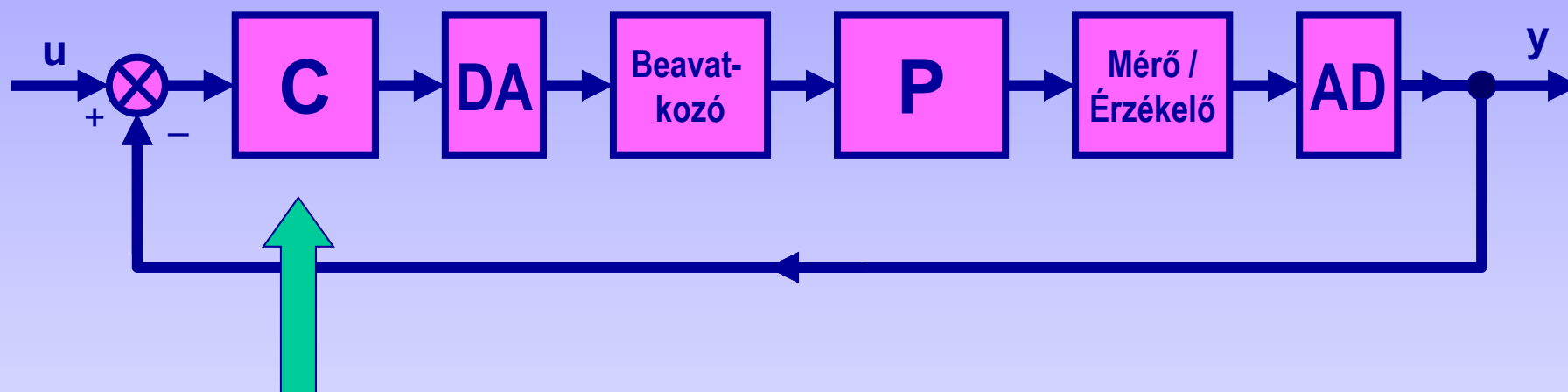
Irányítási rendszerek

Digitális irányítási séma



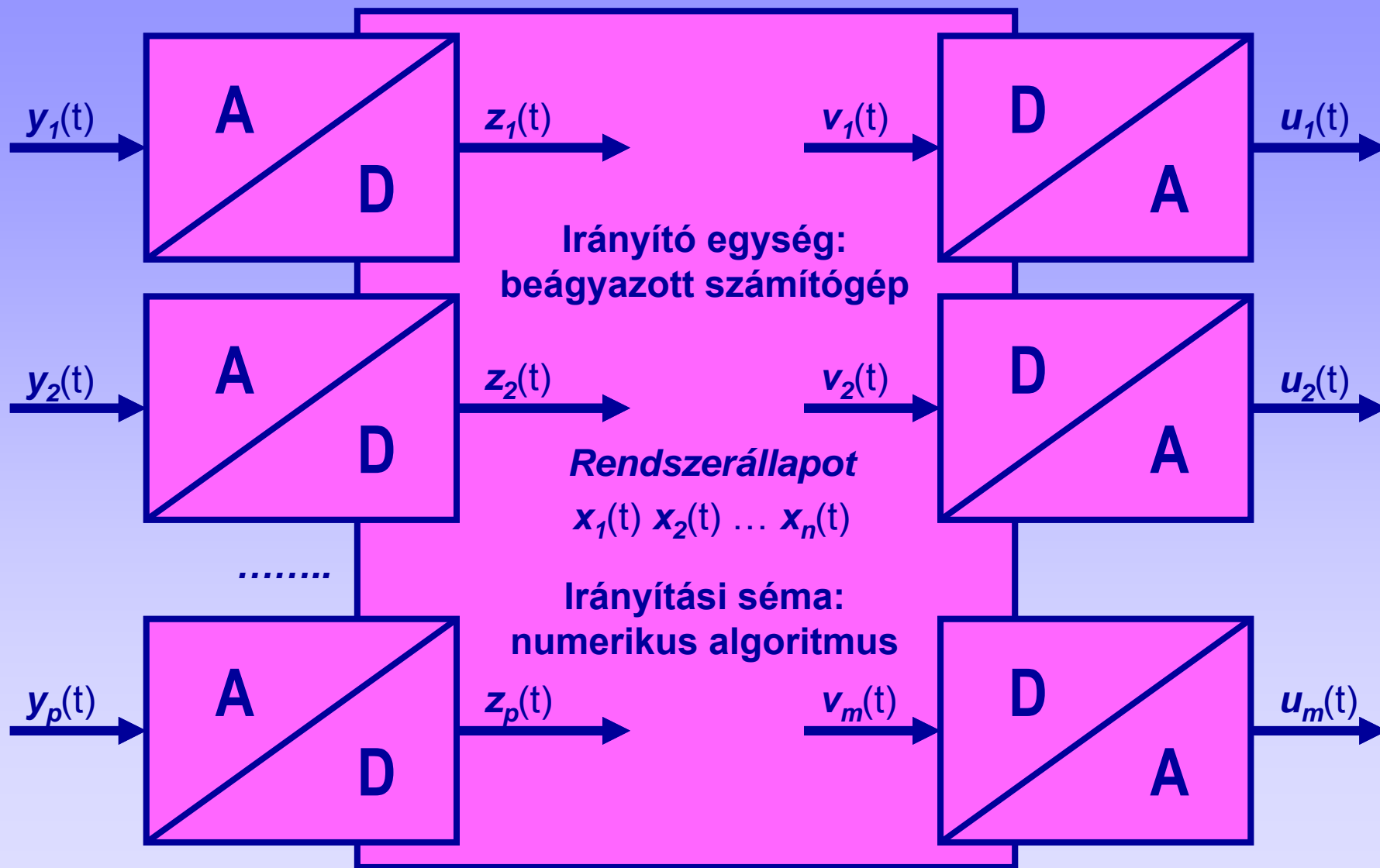
Írányítási rendszerek

Digitális irányítási séma (variáns)



Numerikus algoritmus

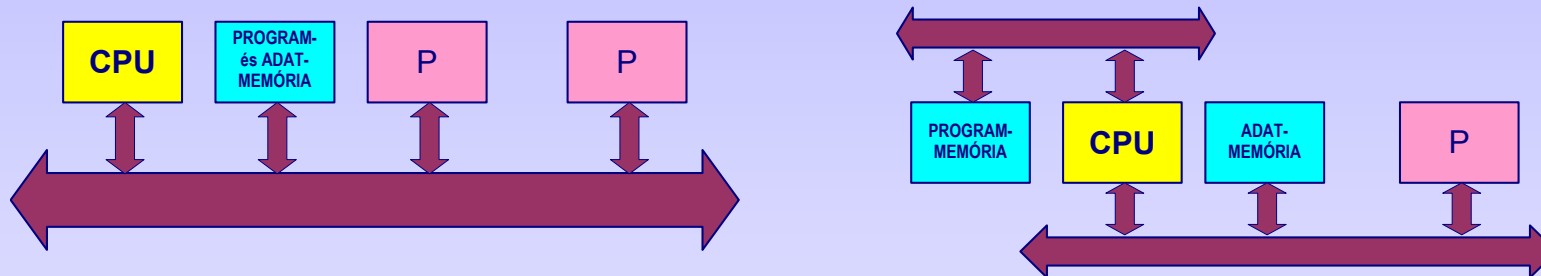
Beágyazott irányítási séma



Beágyazott számítástechnika

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

Neumann és Harvard architektúra



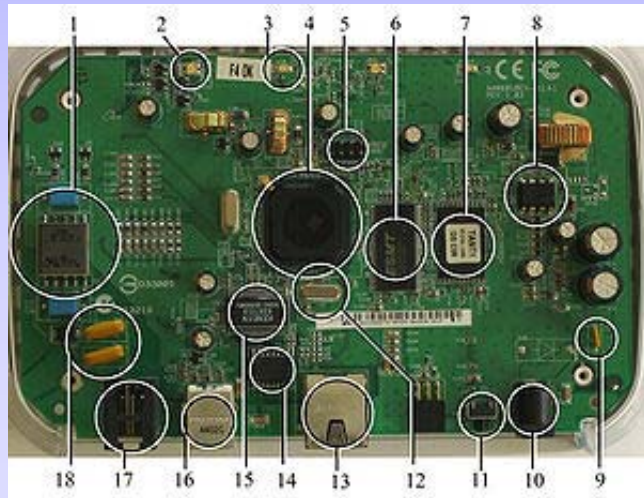
Univerzális elrendezés algoritmizálható problémák megoldására.

Beágyazott rendszerek ma

- A gyártott mikroprocesszorok 90%-a beágyazott alkalmazásban kerül felhasználásra.
- Beágyazott rendszerek mindenütt: **Mai modern gépjárművek:**
50-100 beágyazott számítógép: ECU

Netgear ADSL modem/router:

4: processzor (Texas Instruments),
6: RAM 8 MB, 7: flash memória



Mobiltelefonok:



Alapsávi
processzor

üzemanyagellátás
ABS/ASR



Beágyazott rendszerek fejlesztése

- **Komponensek**
 - Mikrovezérlők, mikroszámítógépek
 - Memória elemek - statikus/dinamikus RAM, flash
 - Periféria áramkörök - interfész, tárolás, kommunikáció
- **Fejlesztőeszközök**
 - Tervezés, prototípus előállítás, mérés, tesztelés
 - Hardver-, szoftver- és rendszerfejlesztési eszközök
- **Módszerek**
 - Alapfeladatok, algoritmusok
 - Rendszerrealizálási módszerek
 - Módszertani fejlesztés

Beágyazott rendszerek komponensei

- Számítógép komponensek
 - Mikrovezérlők - 8-16-32 bites egységek saját adat- és programmemóriával, perifériakészlettel
 - Mikroszámítógépek - 32-64 bites egységek belső és külső memória és periféria meghajtó képességgel
 - Digitális jelfeldolgozó processzorok (DSPk) - speciális utasításkészlettel kiegészített mikrovezérlők
 - Speciális feldolgozó elemek - kommunikációs processzorok, hang- és képfeldolgozó processzorok
 - Programozható logikai tömbök - FPGA - szoft-processzorok

Mikroszámítógép családok

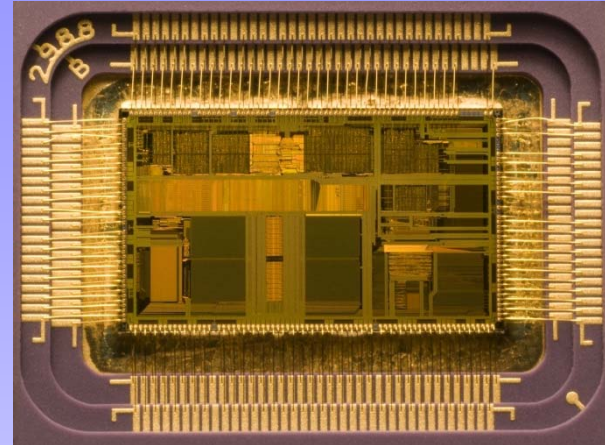
Mikroprocesszorok

- Számítógép architektúra központi egységének egy áramköri lapkán megvalósított formája

Példa: Intel

- 8-bites: 8080 (1974)
- 16-bites: 8086 (1978)
- 32-bites: I386 (1985), I486 (1989), Pentium (1993)
- 64-bites: Athlon 64 (2003), Intel Core 2 (2006)

ma: quad core

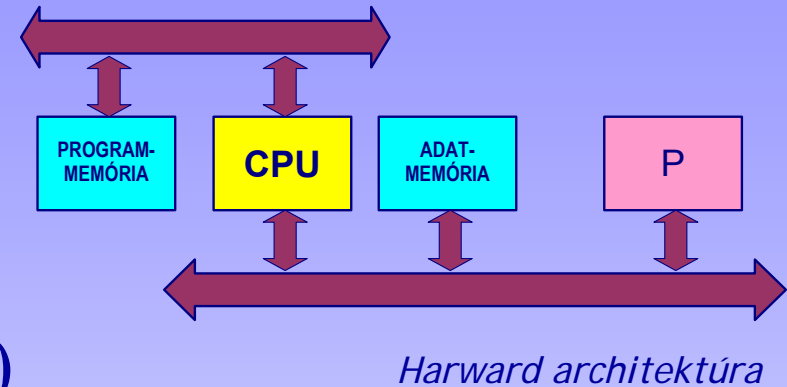


Intel486-DX2

Mikroszámítógép családok

Mikrovezérlők

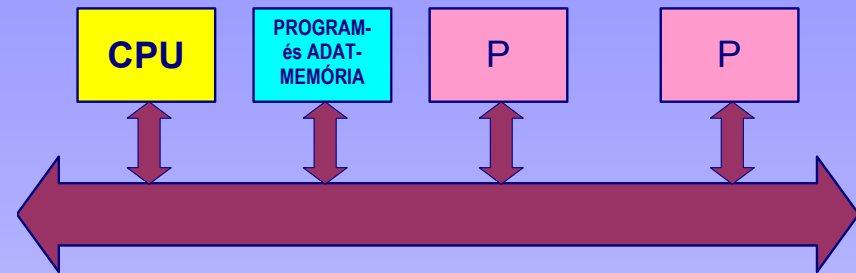
- Teljes számítógép architektúra megvalósítása egy áramköri lapkán
- Egyszerű 8-16-bites CPU (RISC)
- Belső RAM és programmemória
- Belső perifériakészlet:
 - időzítők, PWM
 - parallel digitális I/O: port-ok
 - soros interfészek: SPI, I2C, UART
 - hálózat: CAN, USB, Ethernet
 - Analóg I: AD, komparátor



Mikroszámítógép családok

Mikroszámítógépek

- Teljes számítógép architektúra megvalósítása egy áramköri lapkán
- Egyszerű 32-bites CPU (RISC)
- Kiegészítő külső RAM és „flash” memória
- Direkt memória hozzáférés (DMA)
- Lebegőpontos műveleti támogatás
- IDE, PCI, memóriakártya interfészek
- Kóderek/dekóderek: MP3, AES titkosítás
- Digitális jelfeldolgozási műveletek (DSP)



*Neumann
architektúra*

Példák:

ARM

PowerPC

DSP (TI, AD)

Beágyazott rendszerek komponensei

- Memória elemek

- Nem felejtő memóriák:

- ROM - maszkprogramozott, PROM - egyszer programozható

- EPROM - törölhető, újraprogramozható

- ma leginkább *flash* memóriák

- elektronikusan nagyon sokszor újraprogramozható
programtárolásra (Harward architektúra)
adattárolásra: adatgyűjtés, archiválás

- RAM memóriák:

- statikus

- kis méretű gyors memóriák átmeneti tárolásra

- dinamikus

- adattárolásra (Harward architektúra)

- program- és adattárolásra (Neumann architektúra)

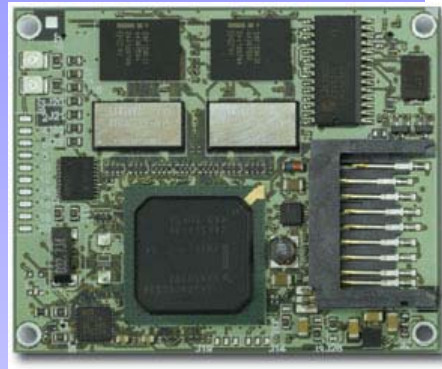
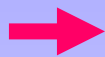
Beágyazott rendszerek komponensei

- Periféria áramkörök
 - Interfész áramkörök:
 - Analóg jelinterfészek: AD és DA konverterek
 - Logikai jelinterfészek: digitális I/O
 - Fizikai jelinterfészek: érzékelők, mérőeszközök, relék, motorok, különböző fizikai elveken alapuló beavatkozó szervek
 - Kommunikációs interfészek: vezetékes és vezeték nélküli soros vagy hálózati interfészek
 - Adattároló eszközök:
 - Mágneses tároló eszközök: keménylemezes diszkek
 - Optikai tároló eszközök: CD, DVD
 - Félvezető tároló eszközök: multimédia, SD memória kártyák
 - Kommunikációs eszközök:
 - Vezetékes hálózatok: Ethernet, CAN, FlexRay
 - Vezeték nélküli hálózatok: WLAN, ZigBee

Beágyazott rendszerek fejlesztőeszközei: hardver

- Kiindulópont:

- Modul szint

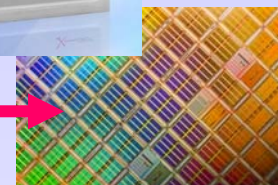


- Integrált áramköri szint



- Áramköri szint

- FPGA realizációk
- Félvezető lapka tervezés



Beágyazott rendszerek fejlesztőeszközei: hardver

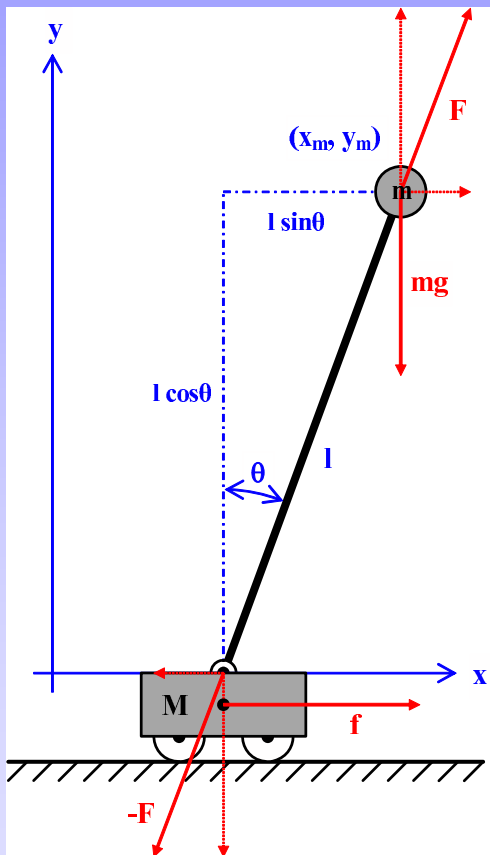
- Hardver fejlesztő rendszerek:
 - Rendszerszintű fejlesztő eszközök: rendszer specifikáló, konfiguráló eszközök, rendszerszintű teszt, validációs és verifikációs eszközök
 - Áramkör és NYÁK tervező eszközök: elvi kapcsolási rajz szintű áramkörtervező és szimulációs, nyomtatott áramkörtervező eszközök
 - Integrált áramköri lapka tervező eszközök: elvi kapcsolás, modul vagy tranzisztor szintű tervező, szimulációs és verifikációs eszközök

Beágyazott rendszerek fejlesztőeszközei: szoftver

- Szoftver és rendszerszintű fejlesztő rendszerek:
 - Alacsony szintű fejlesztőeszközök: assemblerek, letöltő programok, kódszintű hibakereső programok
 - Magas szintű programozási nyelvek: compiler, forrás-szintű debugger programok
 - C, C++, C# compilerek, Eclipse környezet
 - Magas szintű rendszerfejlesztési eszközök: szimbolikus, grafikus programgenerálási környezetek, rendszer konfigurációs eszközök
 - Matlab/Simulink (Mathworks)
 - LabView (National Instruments)

Írányítási rendszerek

Példa: inverz inga



$$M\ddot{x} + m\ddot{x}_m = f$$

$$m\ddot{x}_m \cos \vartheta - m\ddot{y}_m \sin \vartheta = mg \sin \vartheta$$

kis szögekre: linearizálás

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

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

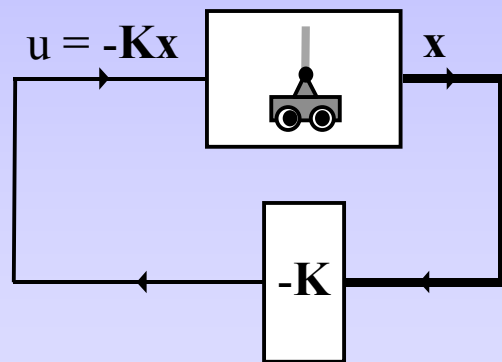
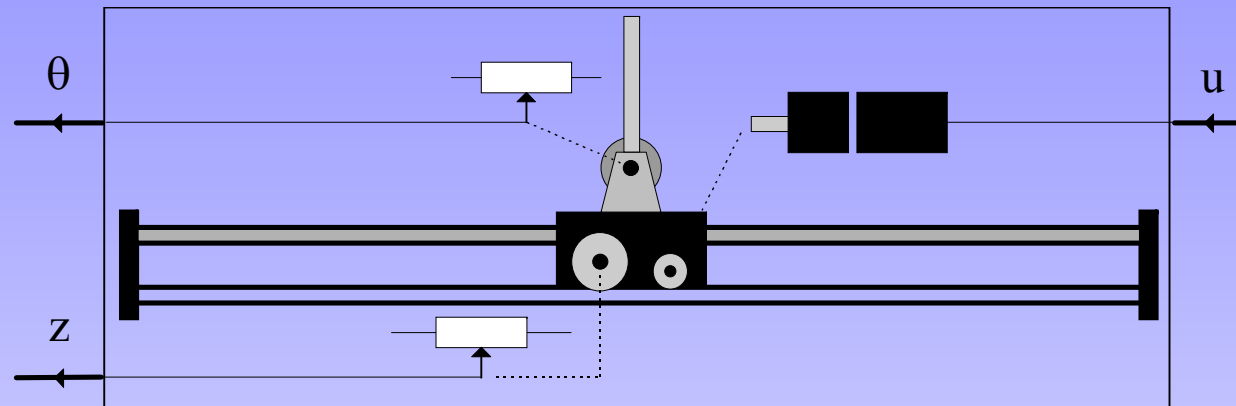
$$\dot{x}_3 = x_4$$

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

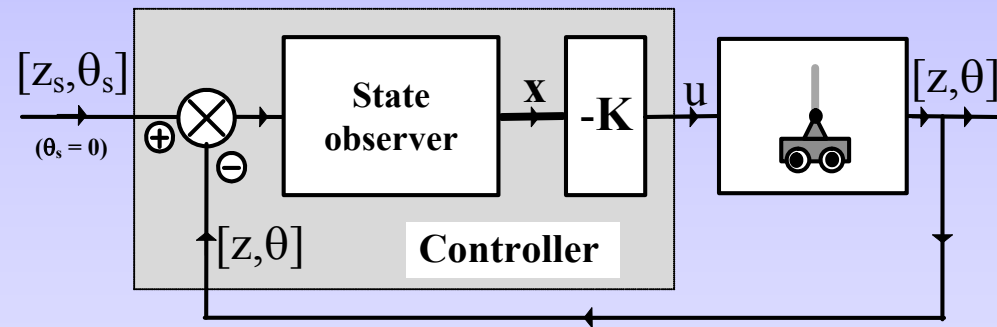
$$y_1 = x_1$$

$$y_2 = x_3$$

Példa: inverz inga



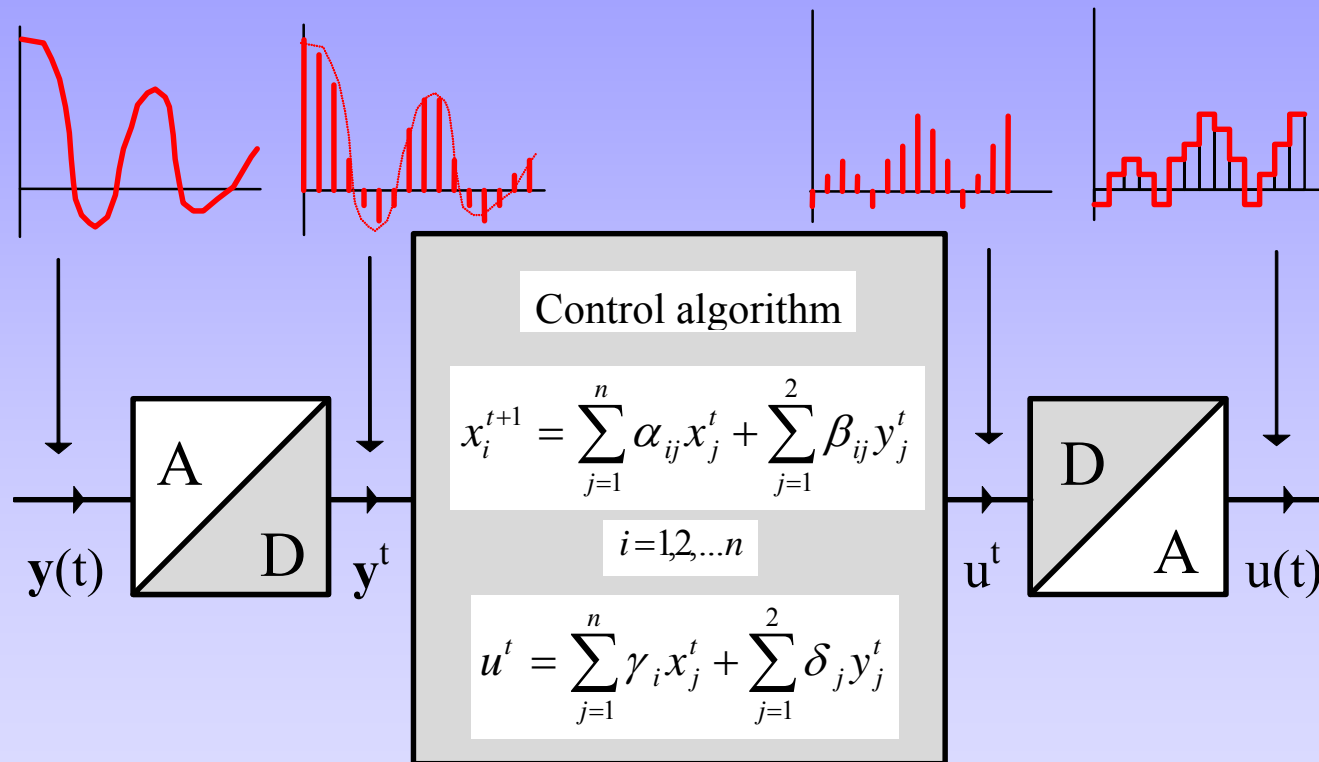
Állapot-visszacsatolás



Állapot-visszacsatolás megfigyelővel

Példa: inverz inga

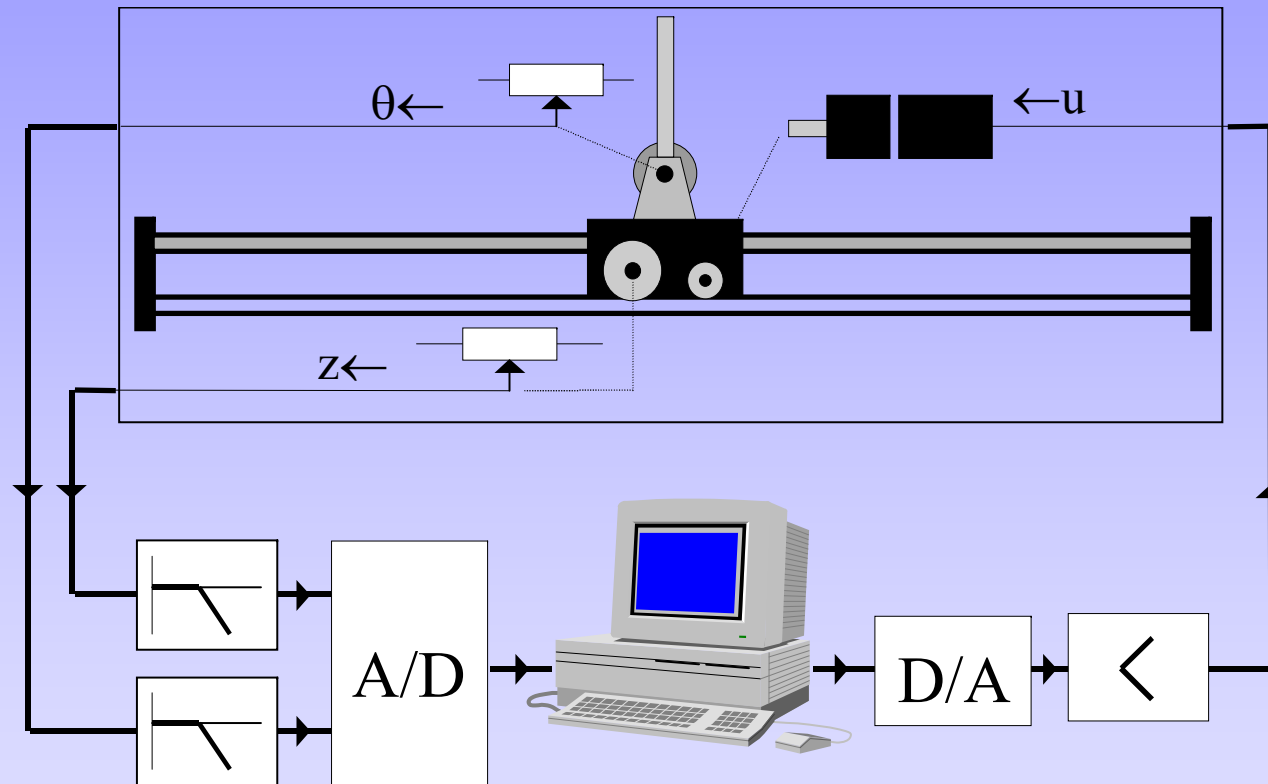
Diszkretizálás



Diszkrét idejű irányítási algoritmus

Példa: inverz inga

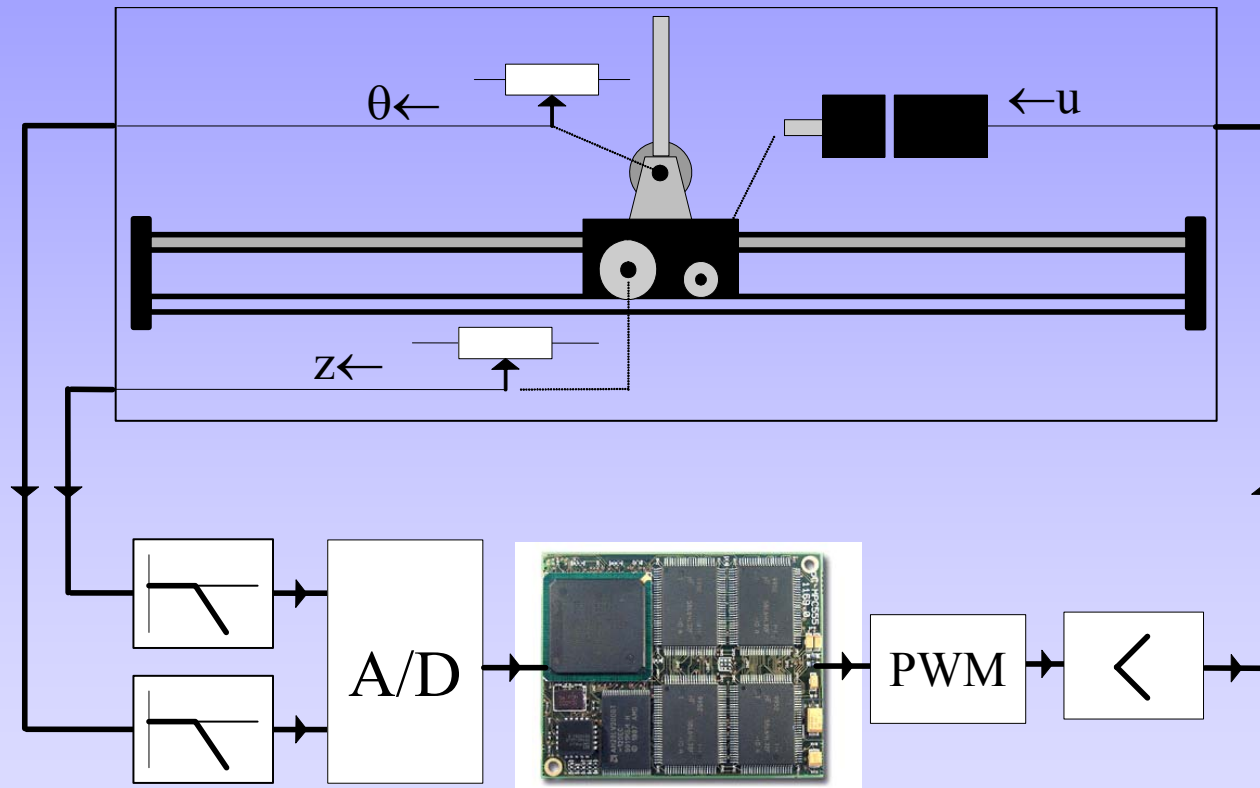
Megvalósítás



egy „klasszikus” számítógépes realizáció

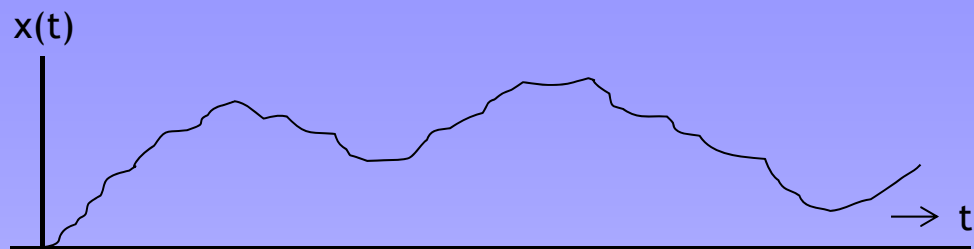
Példa: inverz inga

Megvalósítás

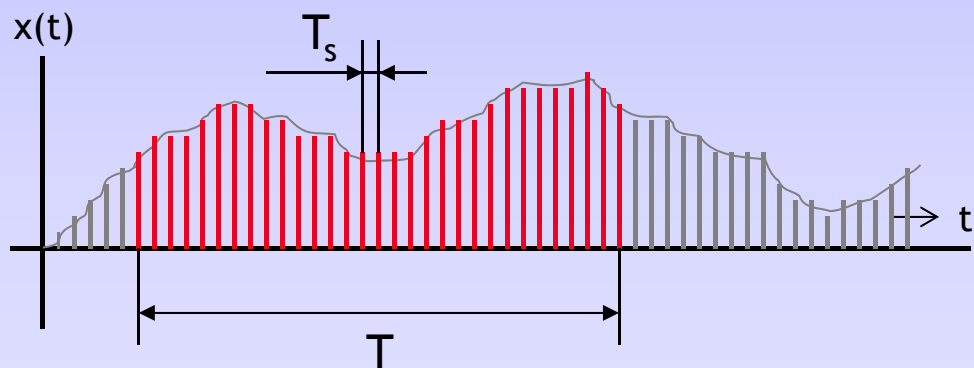
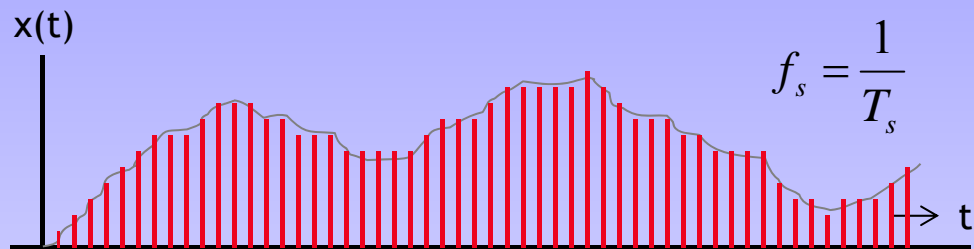


egy „modern” beagyazott realizáció

Analóg - Digitális konverzió



mintavételezés és kvantálás

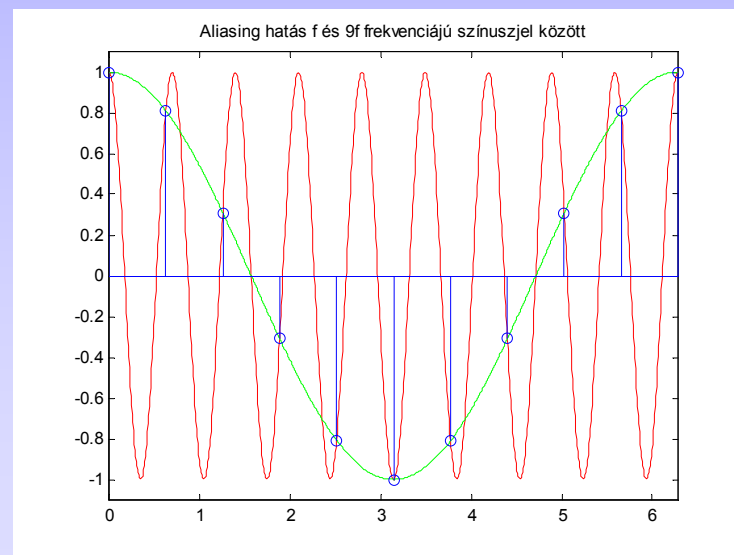


Mintavételi törvény (Shannon)

- Energiakorlátos jel
- Sávkorlátozott jel - f_B

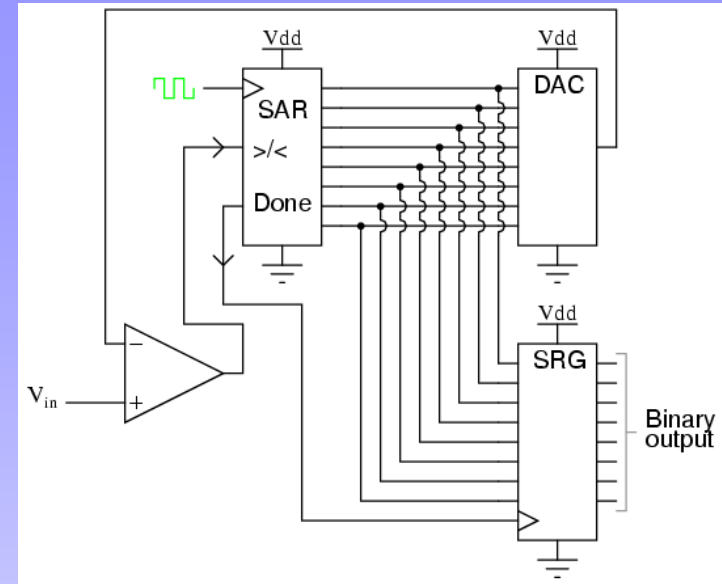
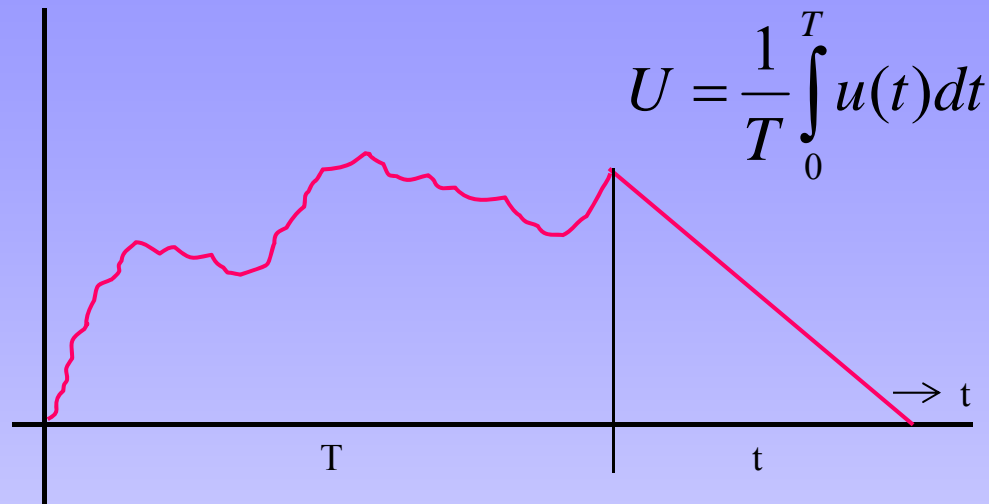
$$f_s \geq 2f_B$$

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

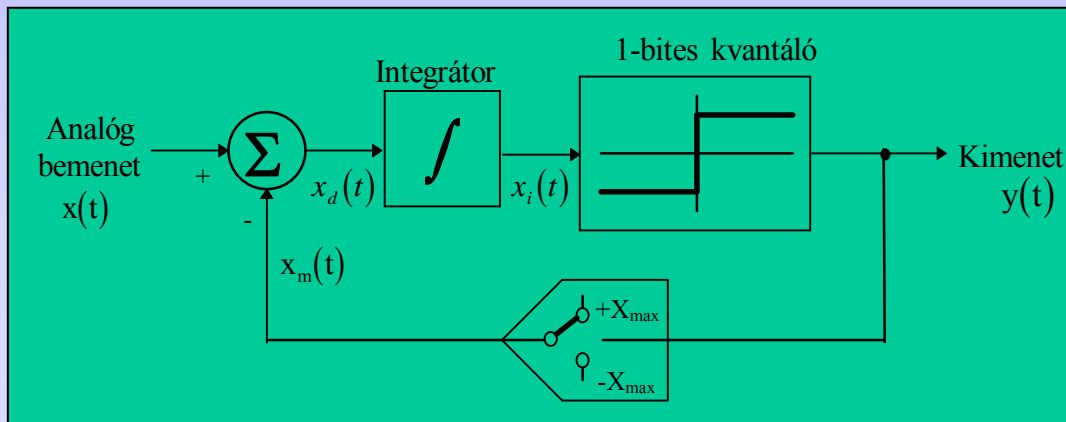


Analóg - Digitális konverzió

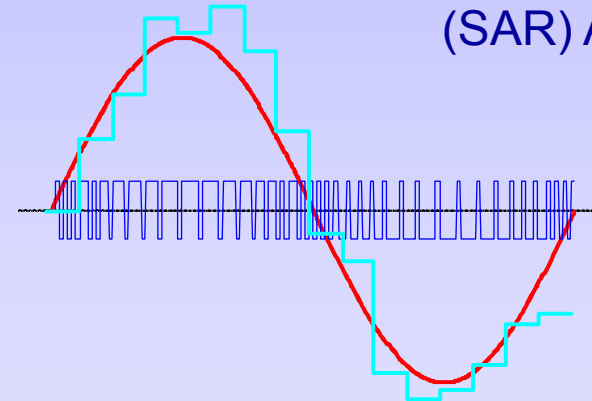
$x(t)$ Integráló típusú (dual-slope) ADC



$\delta\sigma$ -modulációs ADC



Szukcesszív approximációs (SAR) ADC



Diszkrét idejű dinamikus rendszer



$\{x_k\}$ és $\{y_k\}$
($k = 0, 1, 2, \dots$)
numerikus sorozatok

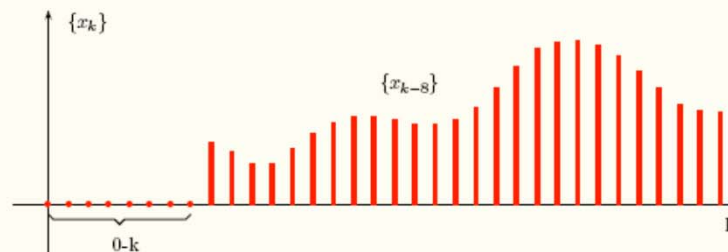
$$\mathcal{D} : \{x_k\} \rightarrow \{y_k\}$$

A dinamikus rendszer matematikai modellje:

lineáris állandó együtthatós *differenciaegyenlet*

$$a_0 y_k + a_1 y_{k-1} + a_2 y_{k-2} + \dots + a_n y_{k-n} = b_0 x_k + b_1 x_{k-1} + b_2 x_{k-2} + \dots + b_m x_{k-m}$$

$\{x_{k-i}\}$ eltolás jobbra (pozitív irányban) i egységgel



Diszkrét idejű dinamikus rendszer

Bevezetjük a **Z-transzformáció** fogalmát:

$$\mathfrak{Z}\{x_k\} = X(z) \doteq \sum_{k=0}^{\infty} x_k z^{-k}$$

A Z-transzformáció egy fontos tulajdonsága:

$$\mathfrak{Z}\{x_{k-i}\} = \sum_{k=0}^{\infty} x_{k-i} z^{-k} = \sum_{k=0}^{\infty} x_{\ell} z^{-(\ell+i)} = z^{-i} \sum_{k=0}^{\infty} x_{\ell} z^{-\ell} = z^{-i} X(z)$$

$k - i = \ell$

— **eltolási** tétel

z -vel való szorzás: eltolás balra — z egy eltolási (shift) operátor.

Diszkrét idejű dinamikus rendszer

Z-transzformáció alkalmazása a differenciaegyenletre:

$$(a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n})Y(z) = (b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m})X(z)$$

Átviteli függvény-szerű formába rendezhető:

$$\begin{aligned} W(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} &= \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} \\ &= \frac{b_0}{a_0} \frac{1 + b'_1 z^{-1} + b'_2 z^{-2} + \dots + b'_m z^{-m}}{1 + a'_1 z^{-1} + a'_2 z^{-2} + \dots + a'_n z^{-n}} \end{aligned}$$

$A = \frac{b_0}{a_0}$ erősítés (gain) bevezetésével és a (')-ket elhagyva

$$W(z) = A \frac{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}}$$

— *diszkrét* átviteli függvény.

Diszkrét idejű dinamikus rendszer

Átmenet a folytonos és diszkrét rendszerek között:

Eltolás T időtartammal (mintavételi periódus) többszörösével:

$$x_k(t) = x(t - kT)$$

A Fourier-transzformáltja $s = i\omega$ jelöléssel:

$$\begin{aligned}\mathfrak{F}\{x(t - kT)\} &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t - kT)e^{-st} dt = \int_{-\infty}^{\infty} x(u)e^{-s(u+kT)} du = \\ &\quad (u = t - kT \text{ helyettesítés} \rightarrow t = u + kT) \\ &= e^{-skT} \int_{-\infty}^{\infty} x(u)e^{-su} du = e^{-skT} X(s) = (e^{sT})^{-k} X(s)\end{aligned}$$

$z = e^{sT}$ a diszkrét eltolási operátor folytonos kifejezése

Diszkretizáció

Diszkrét átviteli függvény előállítása a folytonosból:

$$W(s) = W_z(e^{sT})$$

$$z = e^{sT} \quad \text{illetve} \quad s = \frac{\ln z}{T}$$

Példa:

$$W(s) = \frac{1 + b_1 s}{1 + a_1 s} = \frac{1 + \frac{b_1}{T} \ln z}{1 + \frac{a_1}{T} \ln z}$$

Ezt nem tudjuk egzakt módon racionális törtfüggvénné alakítani

→ közelítések.

Diszkretizáció

1. közelítés:

$$\ln(1 + u) = u - \frac{u^2}{2} + \frac{u^3}{3} - \frac{u^4}{4} + \dots -$$

$$z = 1 - u \quad \rightarrow \quad u = z - 1$$

$$\ln z = z - 1 - \frac{(z - 1)^2}{2} + \frac{(z - 1)^3}{3} - \frac{(z - 1)^4}{4} + \dots -$$

Lineáris közelítés:

$$\ln z \approx z - 1$$

z negatív hatványaival kifejezve:

$$\frac{1}{z^{-1}} - 1 = \frac{1 - z^{-1}}{z^{-1}}$$

Tehát

$$s = \frac{\ln z}{T} \approx \frac{1}{T} \frac{1 - z^{-1}}{z^{-1}}$$

Diszkretizáció

Értelmezése:

$$s = \frac{\ln z}{T} \approx \frac{1}{T} \frac{1 - z^{-1}}{z^{-1}}$$

$$\frac{1 - z^{-1}}{T} \rightarrow \frac{x_k - x_{k-1}}{T}$$

Ez a differenciálhányados legegyszerűbb *diszkrét közelítése* — differenciahányados.

$1/z^{-1} = z$ szorzás hatása:

$$z \frac{1 - z^{-1}}{T} \rightarrow \frac{x_{k+1} - x_k}{T}$$

Eltolás balra — előre menő differenciahányados.

Diszkretizáció

2. közelítés: az \ln függvény lánctört előállításából

$$\ln(1 + u) = \frac{u}{1 + \frac{u}{2 + \frac{u}{3 + \frac{u}{4 + \frac{u}{5 + \frac{u}{6 + \dots}}}}}}$$

Elsőrendű közelítés:

$$\ln(1 + u) \approx \frac{u}{1 + \frac{u}{2}} = \frac{z - 1}{1 + \frac{z-1}{2}} = 2 \frac{z - 1}{2 + (z - 1)} = 2 \frac{z - 1}{z + 1} = 2 \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$$

$u = z - 1$ helyettesítést alkalmazva, majd z negatív hatványaival kifejezve. Tehát

$$s = \frac{\ln z}{T} \approx \frac{2}{T} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$$

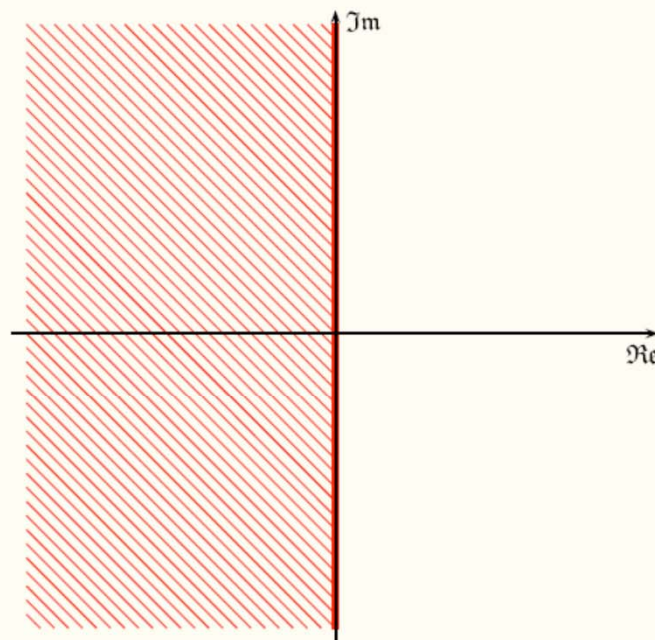
Elnevezések:

- bilineáris transzformáció
- Tustin-transzformáció
- Möbius-transzformáció

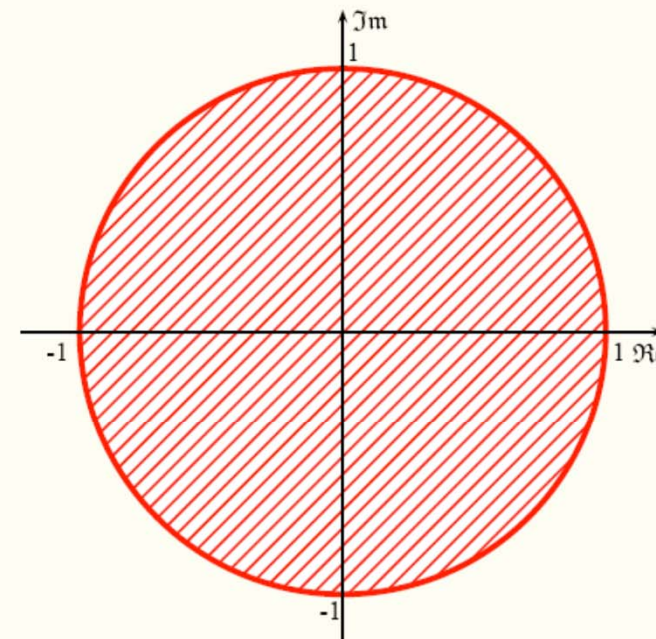
Diszkrét idejű rendszer stabilitása

Stabilitás:

$z = e^{sT}$ transzformáció a komplex síkon a félsíkot az egységkör-lapba viszi át



$W(s)$ pólusai a bal félsíkon



$W(z)$ pólusai az egységkör belsejében

Diszkrét idejű szabályozó

Példa: PID szabályozó

$$y(t) = A \left[x(t) + T_D \frac{dx(t)}{dt} + \frac{1}{T_I} \int_{-\infty}^t x(t) dt \right]$$

Folytonos PID szabályozó

Diszkrétizáció:

$$\begin{aligned} x(t) &\rightarrow \{x_k\} & x_k &= x(t_k) \\ y(t) &\rightarrow \{y_k\} & y_k &= y(t_k), \end{aligned}$$

$$y_k = A \left[x_k + T_D \frac{x_k - x_{k-1}}{T} + \frac{T}{T_I} \sum_{j=-\infty}^k x_j \right]$$

Jelölések:

$$\frac{T_D}{T} = \tau_D \quad \frac{T}{T_I} = \frac{1}{\tau_I}$$

$$y_k = A \left[x_k + \tau_D (x_k - x_{k-1}) + \frac{1}{\tau_I} \sum_{j=-\infty}^k x_j \right]$$

Diszkrét PID szabályozó

Gyakorlatban alkalmazható forma: rekurzív alak

$$\left. \begin{aligned} y_k &= A \left[x_k + \tau_D(x_k - x_{k-1}) + \frac{1}{\tau_I} \sum_{j=-\infty}^k x_j \right] \\ y_{k-1} &= A \left[x_{k-1} + \tau_D(x_{k-1} - x_{k-2}) + \frac{1}{\tau_I} \sum_{j=-\infty}^{k-1} x_j \right] \end{aligned} \right\} -$$

$$y_k - y_{k-1} = A \left[x_k - x_{k-1} + \tau_D(x_k - 2x_{k-1} + x_{k-2}) + \frac{x_k}{\tau_I} \right]$$

A végső forma:

$$y_k - y_{k-1} = A \left[\left(1 + \tau_D + \frac{1}{\tau_I} \right) x_k - (1 + 2\tau_D)x_{k-1} + \tau_D x_{k-2} \right]$$

Diszkrét PID szabályozó

Speciális esetként $\tau_D=0$ választásával diszkrét PI:

$$y_k - y_{k-1} = A \left[\left(1 + \frac{1}{\tau_I} \right) x_k - x_{k-1} \right]$$

A diszkrét PID és PI alkalmazása:

- y_k kiszámítása y_{k-1} , x_k és x_{k-1} ismeretében T-vel ütemezett ciklusokban
- Ügyelni kell az algoritmus a véges számábrázolás hatásából eredő nemlineáris hatásokra → „anti-windup”
- Figyelembe kell venni a beavatkozó szervek véges működési tartományát.

Szabályozók beágyazott realizálása

A szabályozási algoritmus számítógépes program formájában valósul meg. Formái (példák - a teljesség igénye nélkül):

- Natív lineáris program fix időzítéssel.
- Megszakításokkal vezérelt natív program.
- Operációs rendszer alatt futó program.
- Valós idejű operációs rendszer alatt futó konkurrens program.
- Valós idejű parallel (többszálú) és konkurrens program.
- Elosztott programrealizáció (konkurrens és parallel).
- Digitális kommunikációs hálózaton alapuló elosztott realizáció (konkurrens és parallel).
- Nagy megbízhatóságú redundáns és/vagy diverz realizáció.

Szabályozók beágyazott realizálása

Megszakítás (interrupt)

- Külső esemény megszakítja a program futását, egy megszakítási eljárás zajlik le, majd visszatér a végrehajtás az eredeti programra.
- Többszintű, prioritásos megszakítási rendszer, akár egymást is megszakító folyamatok.
- A megszakítások egységes kezelése: valós idejű (real-time) ütemező, kernel vagy operációs rendszer.

Megszakítás források:

- Külső és belső perifériák (pl. időzítő, ütemező, adatszolgáltató vagy kommunikációs egységek).
- Külső események (digitális jelek változása, állapotjelek, hibajelek, analóg jelek szintátmenete, zérusátmenet).

Szabályozók beágyazott realizálása

Operációs rendszer

- A programok elindulását, leállítását, a perifériakezelést, a rendszerkezelés tipikus folyamatait összefoglaló programrendszer.
- A programozó az operációs rendszer kezelő eljárásain keresztül programozza a perifériákat, a hardver részletek közömbössé válnak.
- Magas szintű nyelvek, grafikus környezetek, magas szintű kommunikációs protokollok alkalmazása

Beágyazott operációs rendszerek (példák):

- Linux
- Android
- iOS
- Beágyazott Windows
- WinCE

Szabályozók beágyazott realizálása

Valós idejű (real-time) rendszerek

- Konkurens folyamatok, valós vagy virtuális parallelitás, eseményvezéreltség.
- Holtpont: ha két vagy több folyamat egymásra vár - akár közvetetten is. A holtpontmentes vezérlés alapkövetelmény.
- Folyamatok ütemezése, a futási időkülönbségek kiegyenlítése: FIFO tárolók, cirkuláris pufferek, szemaforok, mutex-ek.
- A holtpontmentesség biztosítása: primitív utasítások, kölcsönös kizárás.

Primitív utasítások: megszakíthatatlan, egy menetben lezajló folyamat egység (gépi utasítások, interrupt tiltás).

Szemafor: jelzés, amelyek korlátozza a folyamatokat valamilyen programszakaszba való belépésben - várakoztatás.

Mutex: bináris szemafor - kölcsönös kizárás egy folyamatra nézve

Szabályozók beágyazott realizálása

Nagy megbízhatóságú rendszerek

- Redundancia: azonos funkciók többszörözése, és szavazás - hármass redundancia és 3-ból 2-es szavazás tipikus
- Diverzitás: a redundancián belül egy funkciót több különböző elven realizálunk - különböző fizikai elvek, algoritmus, HW és SW realizáció.

Példák:

- Hármass redundancia a mérésekben (pl. 3 független IMU egység, Pitot-cső, stb).
- Osztott vezérfelületek (csűrők, magassági- és oldalkormány) külön szervo vezérléssel.
- Több hajtómű, egyszeres meghibásodás nem okoz problémát.
- Hajtás és vezérfelületek különböző kombinációi helyettesítik egymást.

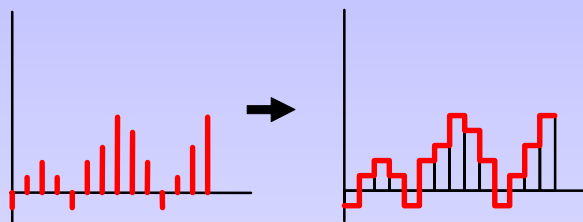
Digitális - Analóg konverzió

A Shannon törvény szerinti rekonstrukció :

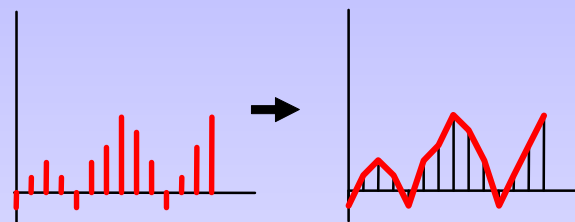
$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(kT) \frac{\sin[2\pi f_B (t - kT)]}{2\pi f_B (t - kT)}$$

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

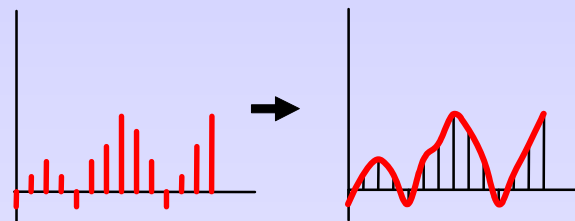
0-rendű tartószerv:
approximáció lépcsős függvénnyel



1-rendű tartószerv:
lineáris interpoláció



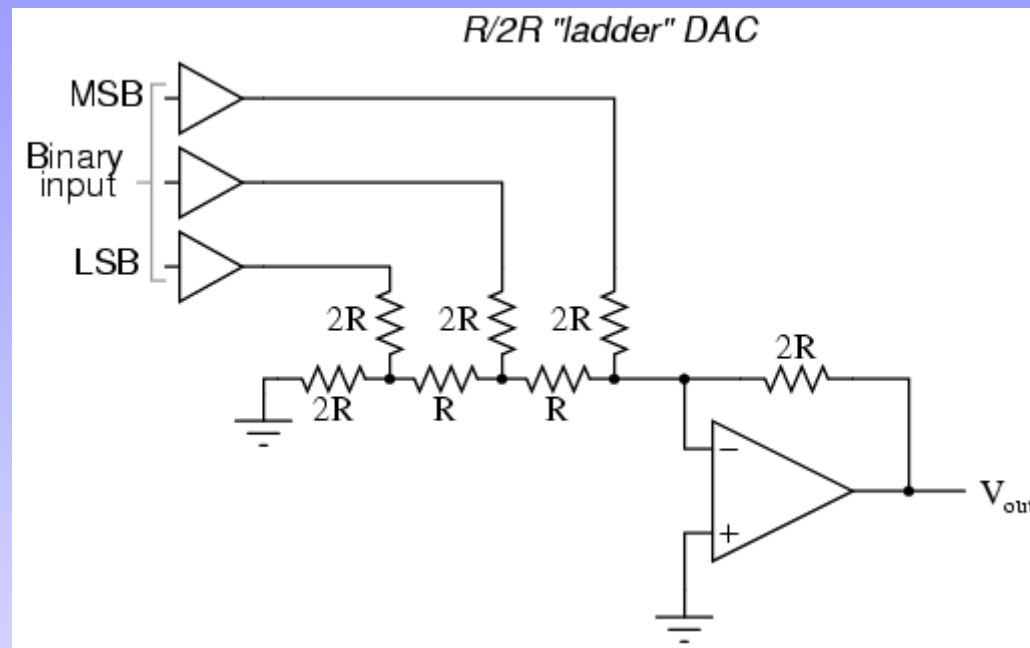
3-rendű *spline*
interpoláció:



Digitális - Analóg konverzió

Klasszikus DA
konverter:

ellenállás-létrahálózat



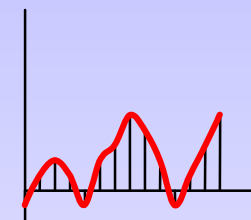
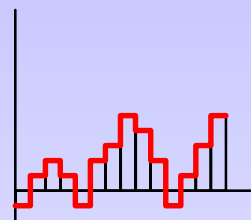
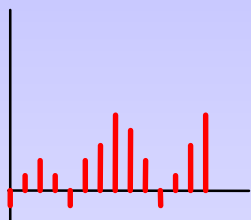
Megvalósítja a 0-rendű tartószervet
(ZOH - zero-order hold)

Digitális - Analóg konverzió

N-rendű tartó közelítő megvalósítása a gyakorlatban:



LP - Low Pass - aluláteresztő

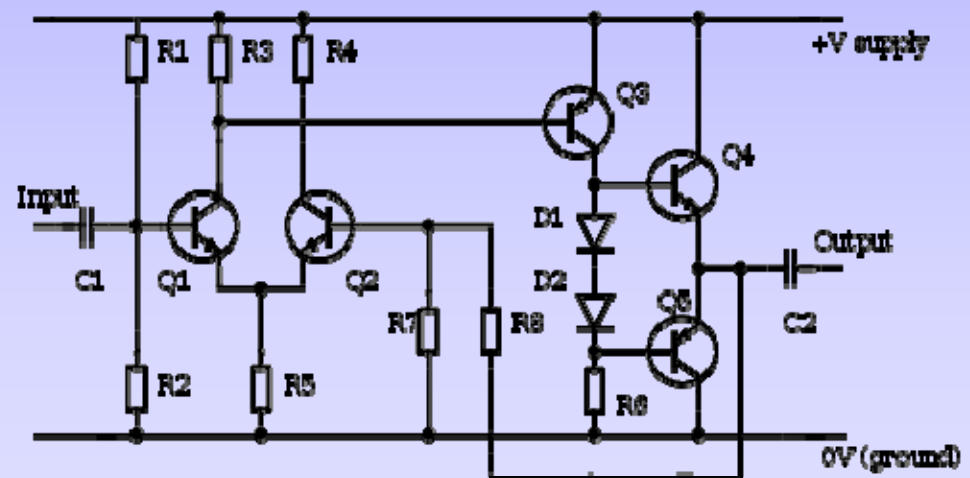


A 0-rendű tartó kimeneti jelének „simítása”.

Digitális - Analóg konverzió

A klasszikus DAC problémái:

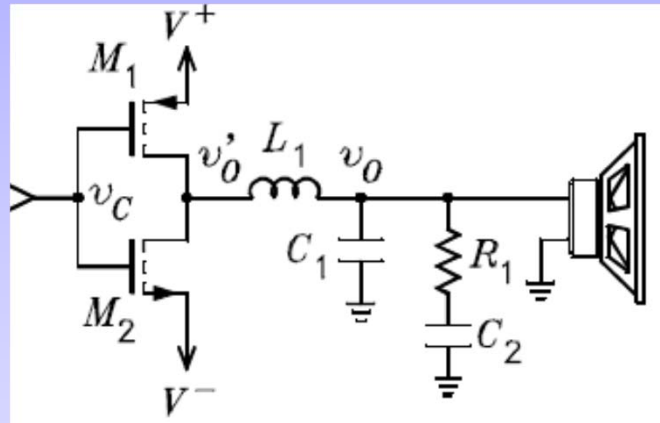
- Nagy teljesítményű beavatkozó szervek (motorok, elektromágnesek) meghajtása *analóg* végerősítőket igényel
- A, B, AB és C osztályú végerősítők: alacsony hatásfok, nagy hődisszipáció
- Kimeneti teljesítmény korlátozott (néhány kW).



Digitális - Analóg konverzió

Megoldás:

- Kapcsolóüzemű megoldások
 - D-osztályú végerősítő

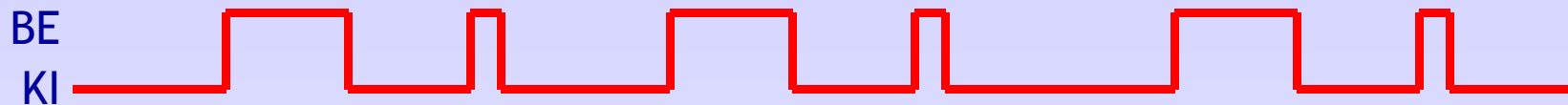


- Impulzusszélesség moduláció -
PWM - Pulse-Width Modulation

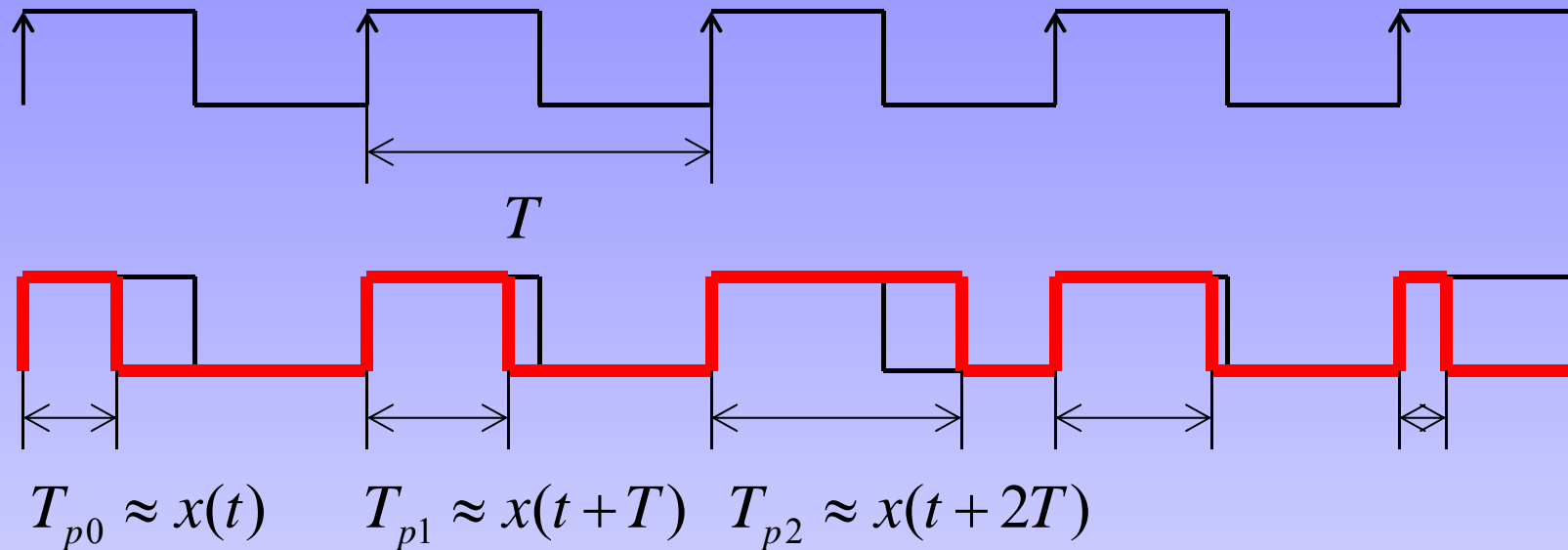
Kapcsolóüzemű működési elv

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



PWM - Pulse Width Modulation

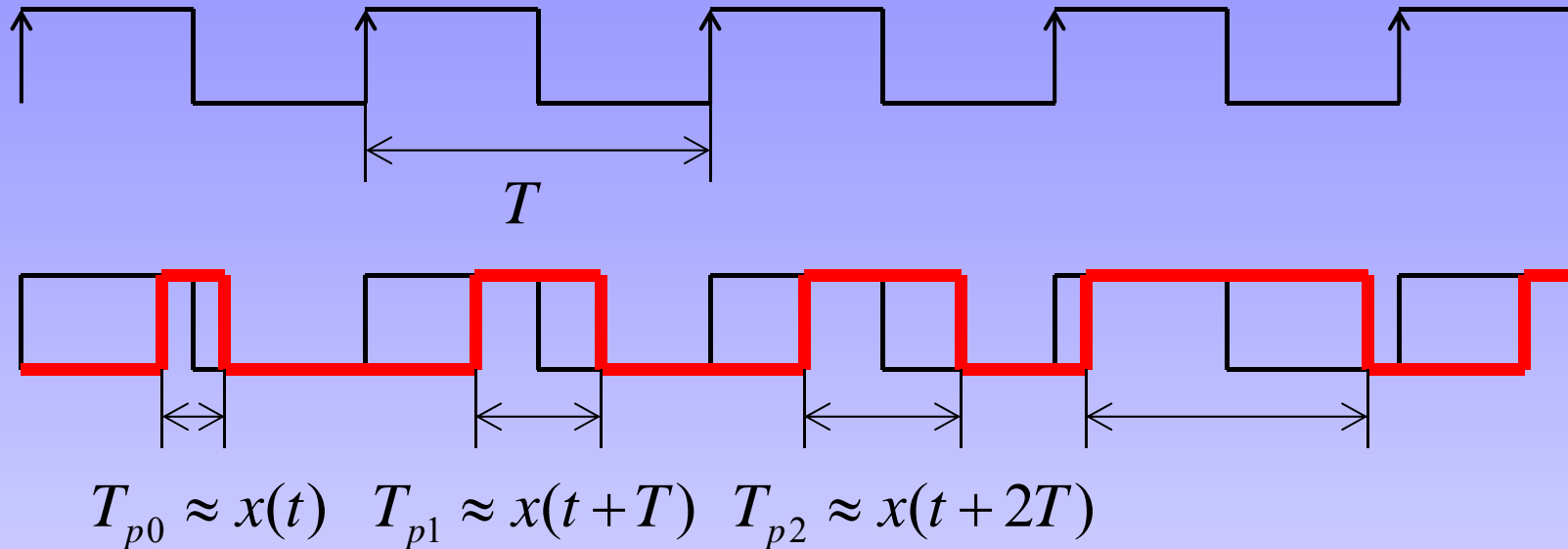


$$T_{pk} \approx x(t + kT)$$

PWM: az impulzusszélesség arányos a mintaértékekkel.

Impulzusszélesség - moduláció

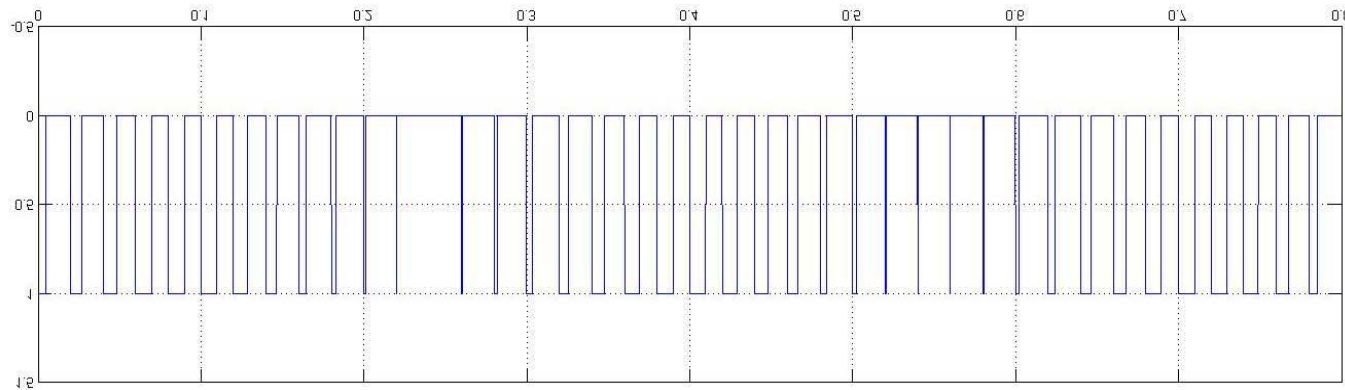
PWM - Pulse Width Modulation



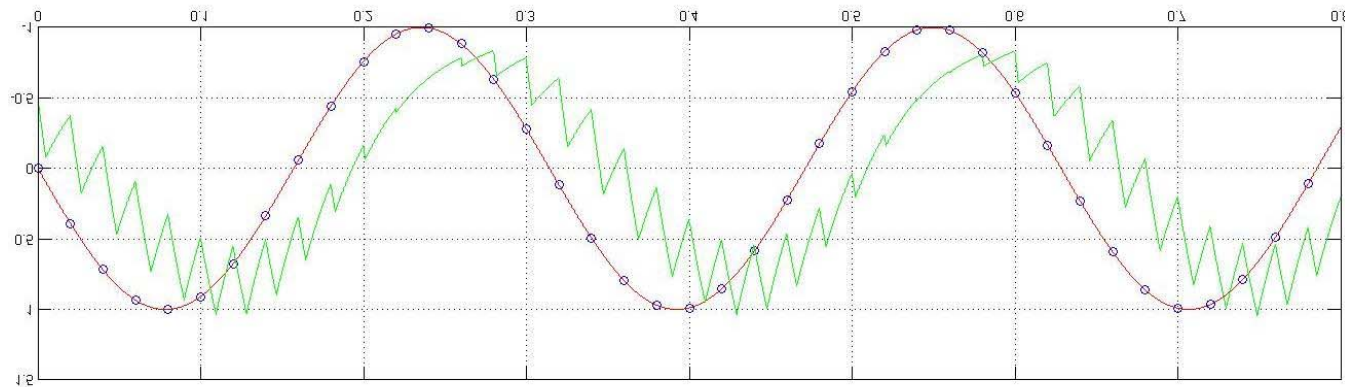
$$T_{pk} \approx x(t+kT)$$

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.

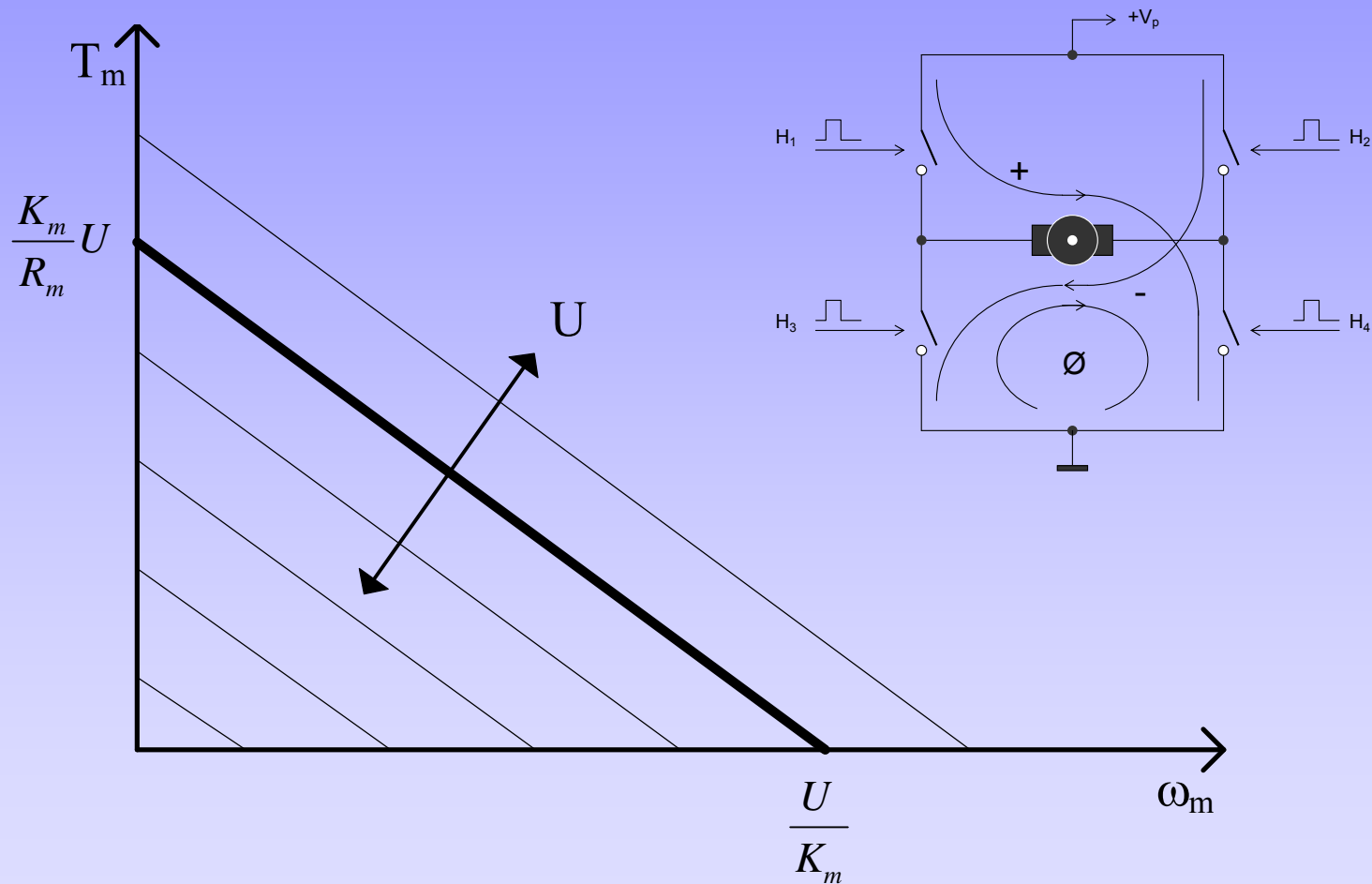
Elektromechanikus aktuátorok

- Elektromágneses beavatkozó szervek
- Elektromos motorok
 - DC (Direct Current) motor - egyenáramú motor
 - BLDC (Brushless DC) motor - kefenélküli egyenáramú motor
 - AC (Alternating Current) motor - indukciós motor, szinkron motor, aszinkron motor
 - Léptető motor

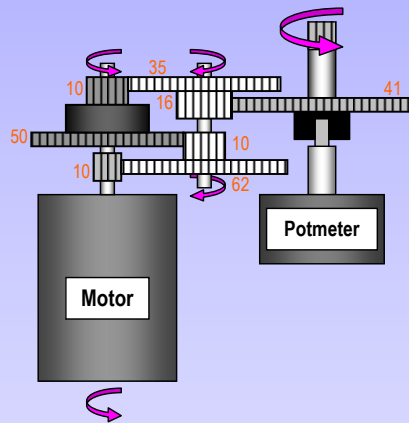
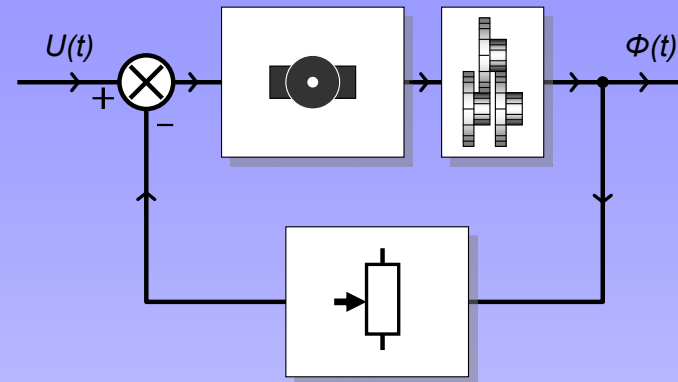
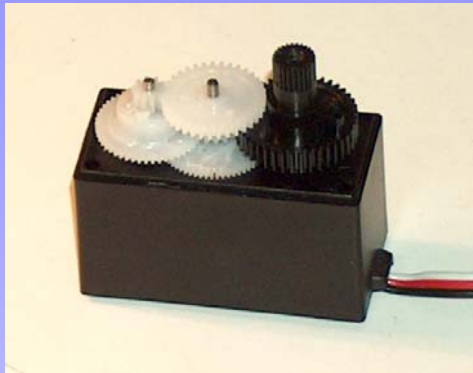
További (nem mechanikus) aktuátorok

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

Példa: DC motor



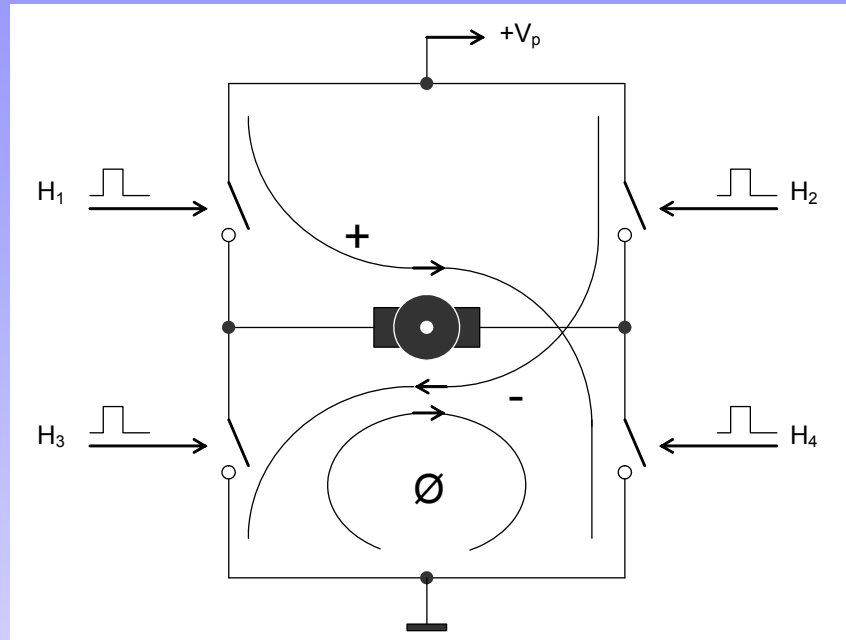
Pozíció szervó irányítás



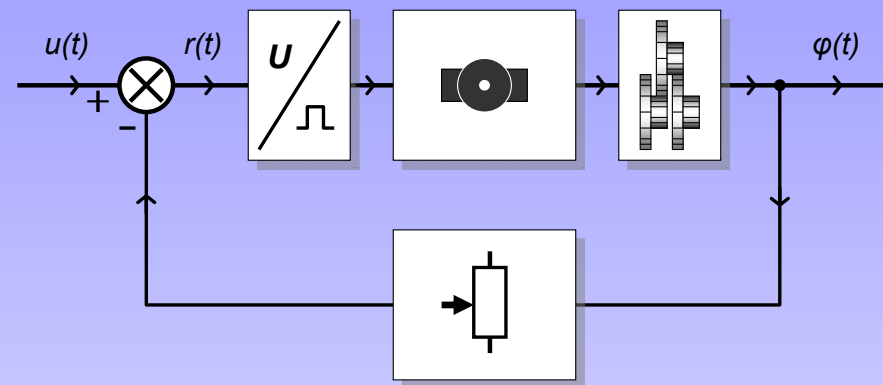
$$\frac{10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 16}{62 \cdot 50 \cdot 35 \cdot 41} = \frac{32}{8897} = \frac{1}{278.03125}$$



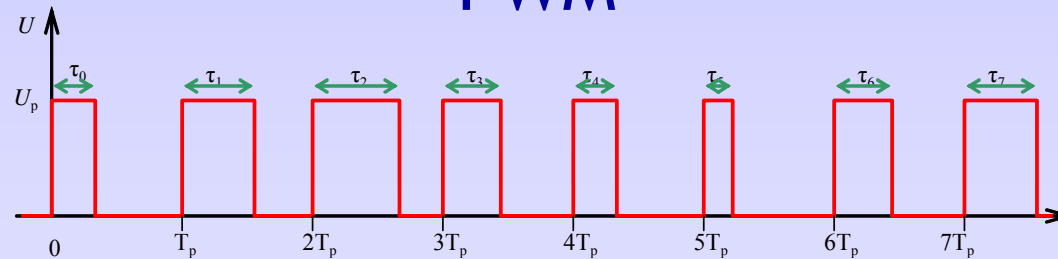
Pozíció szervó irányítás



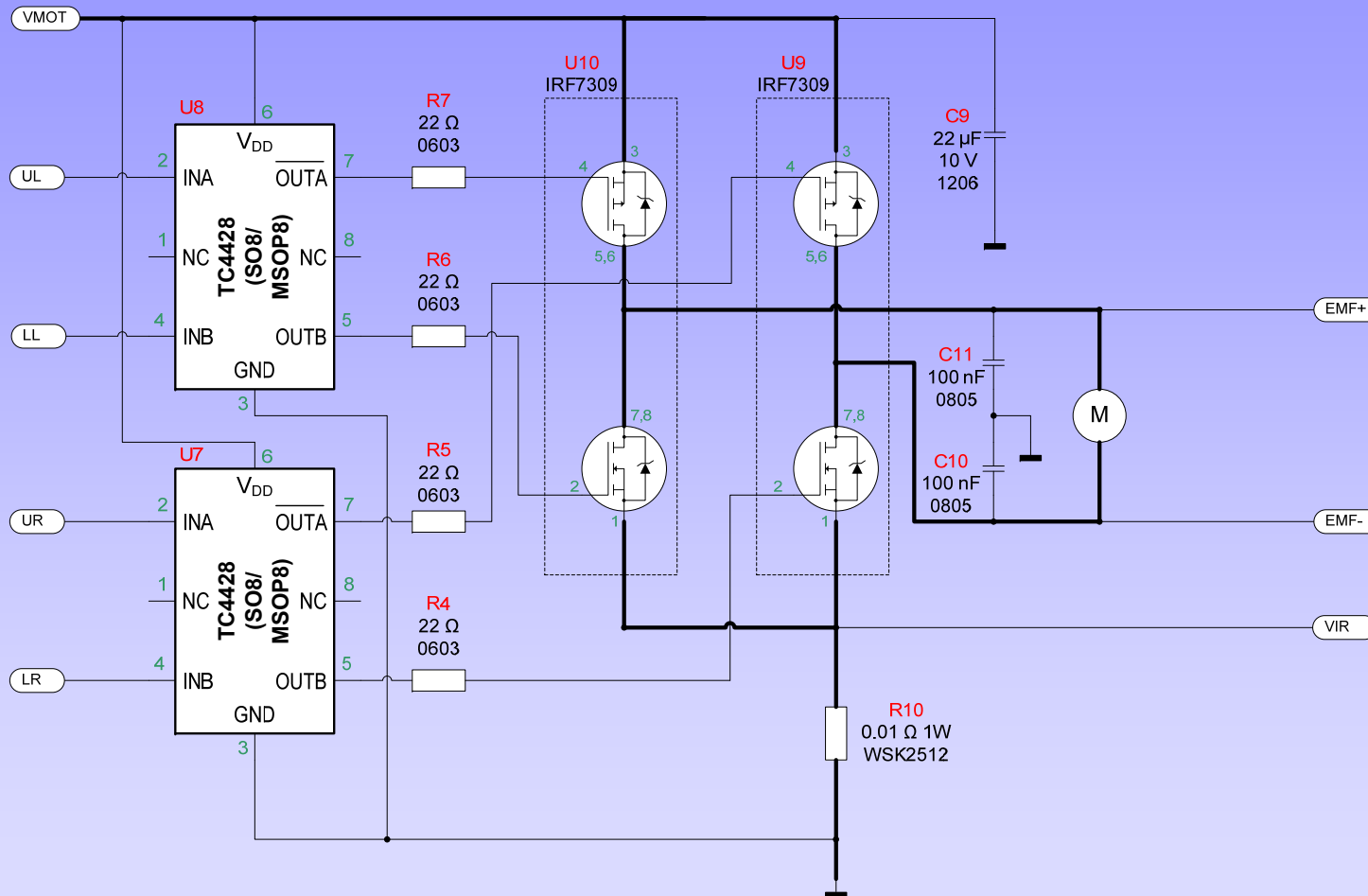
H-híd



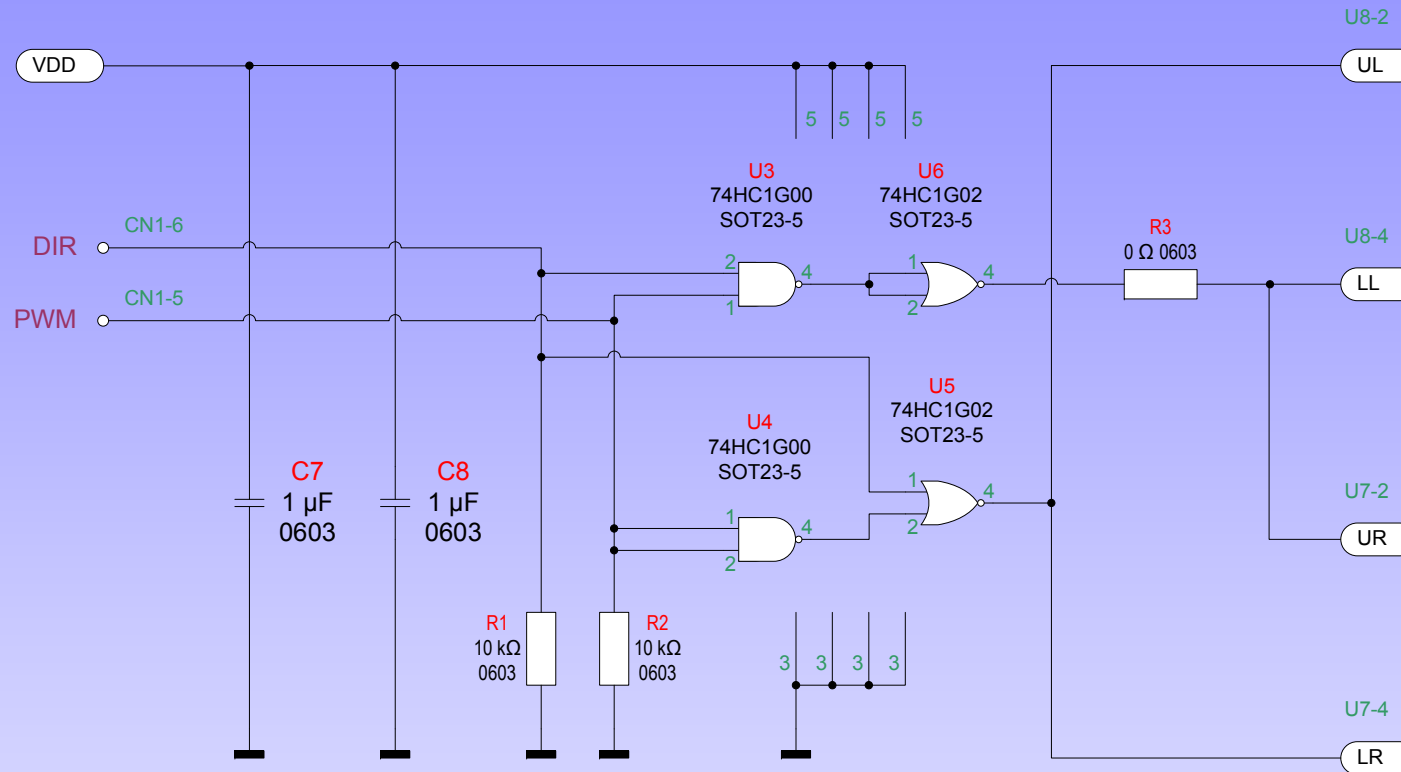
PWM



DC motorvezérlő: H-híd

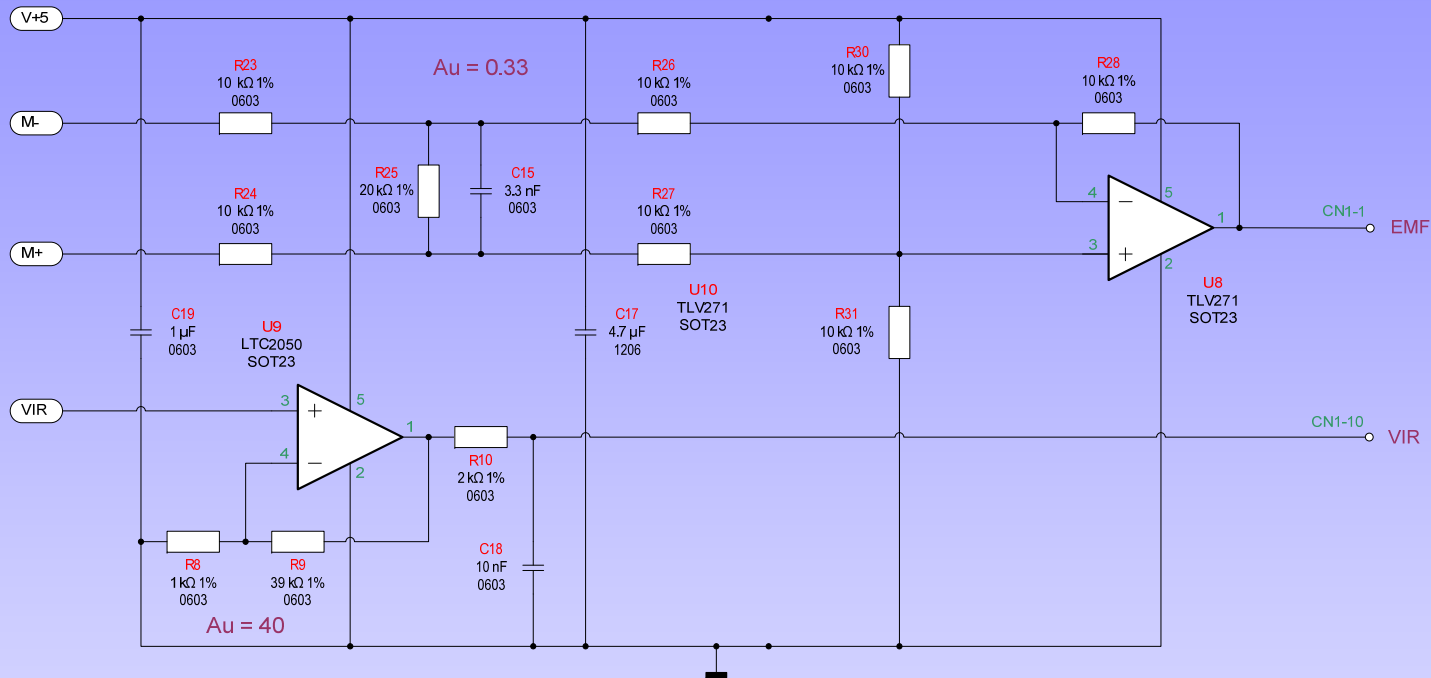


DC motorvezérlő: logika



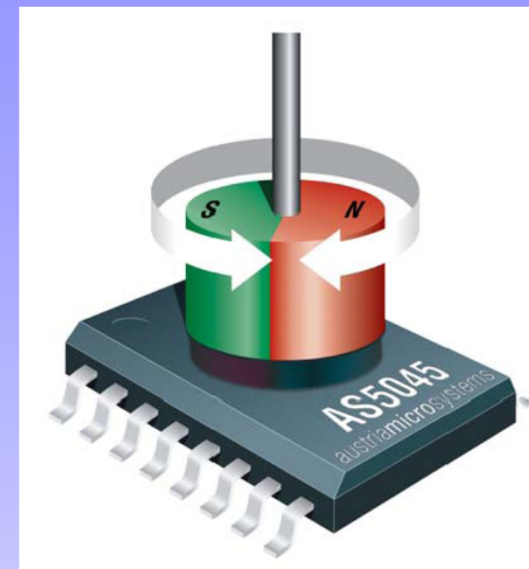
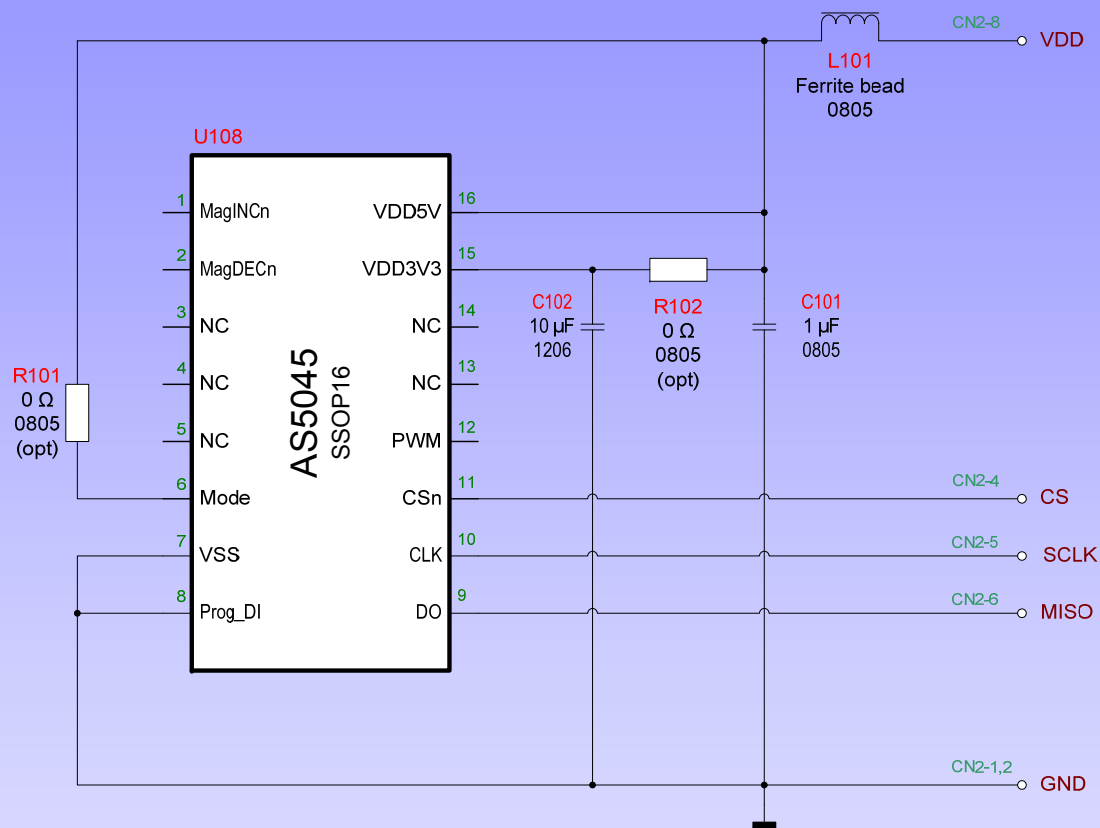
- DIR - irány - L=előre H=hátra
- PWM - az impulzusszélességgel arányos motorteljesítmény

DC motorvezérlő: mérés

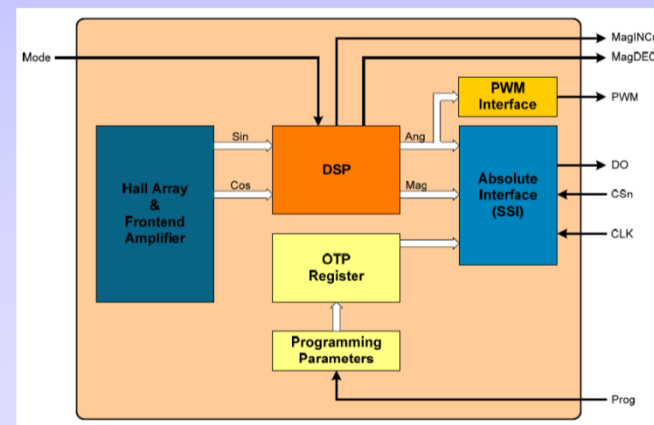


- EMF (Electro-Motive Force) - indukált feszültség
- a fordulatszámmal arányos
- Motoráram - a nyomatékkal arányos

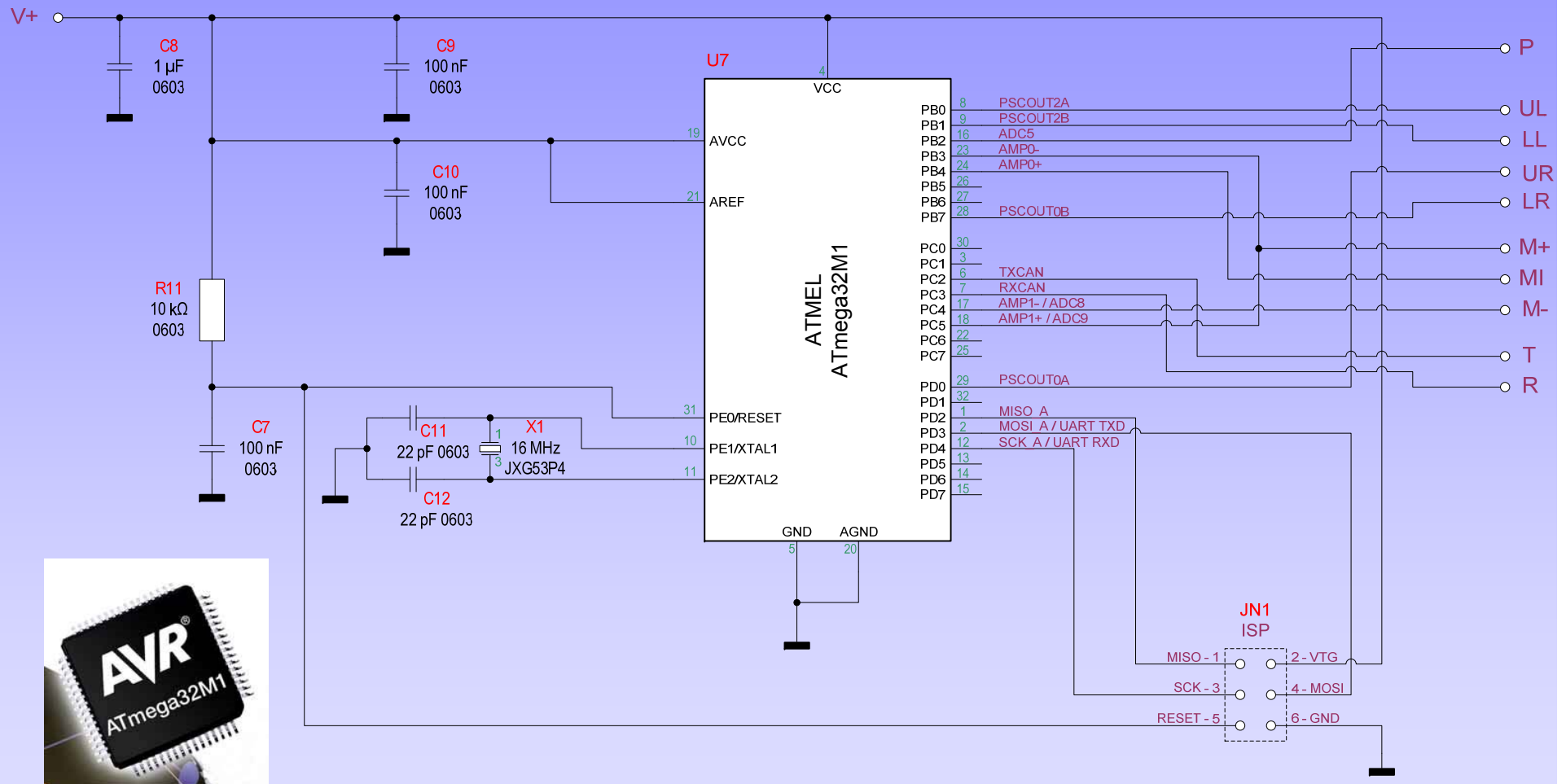
DC motorvezérlő: szögmérés



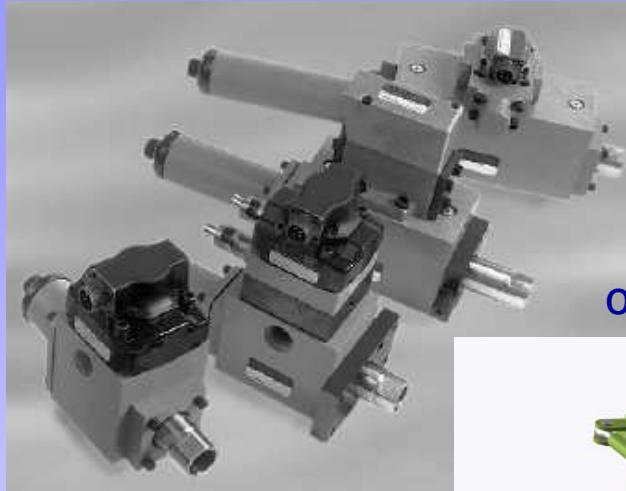
Potméter helyett:
forgó mágneses jeladó



DC motorvezérlő: μ C példa



Professzionális szervó

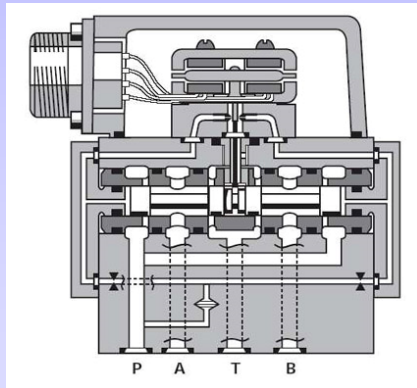
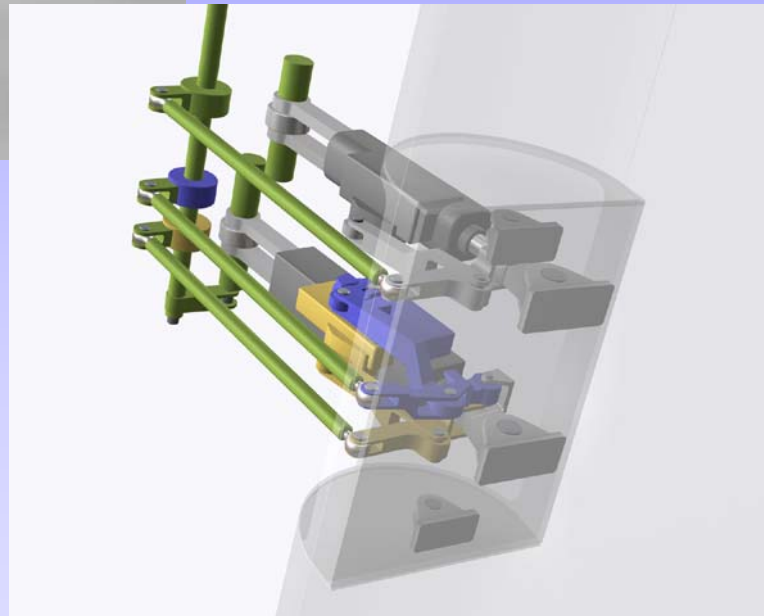


Elektromechanikus szervó
(forgó)



(lineáris)

oldalkormány hajtás (Boeing)

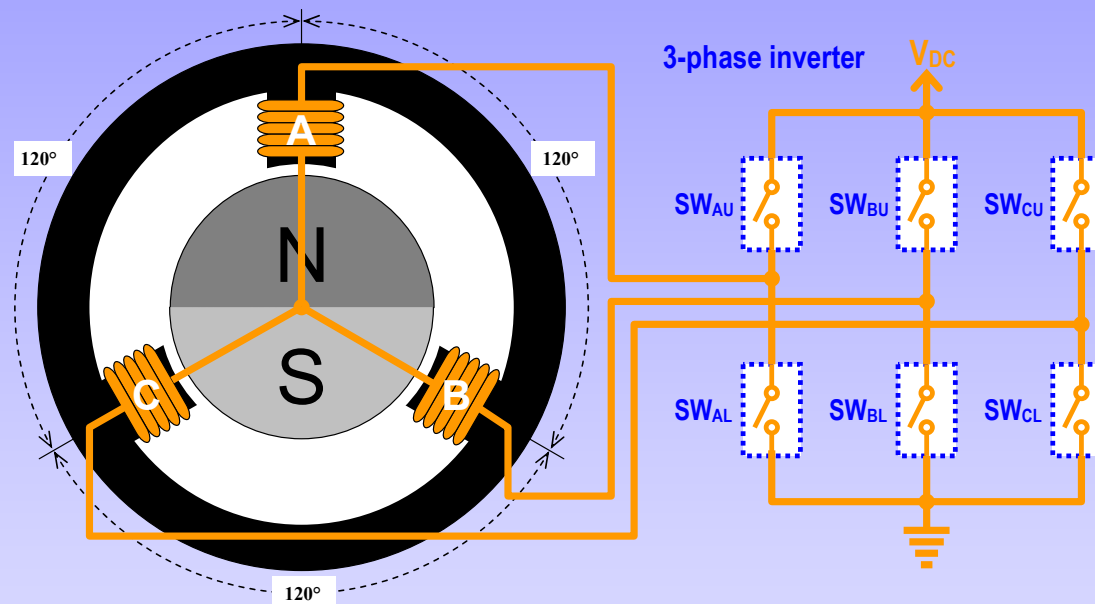


Elektro-hidraulikus szervó

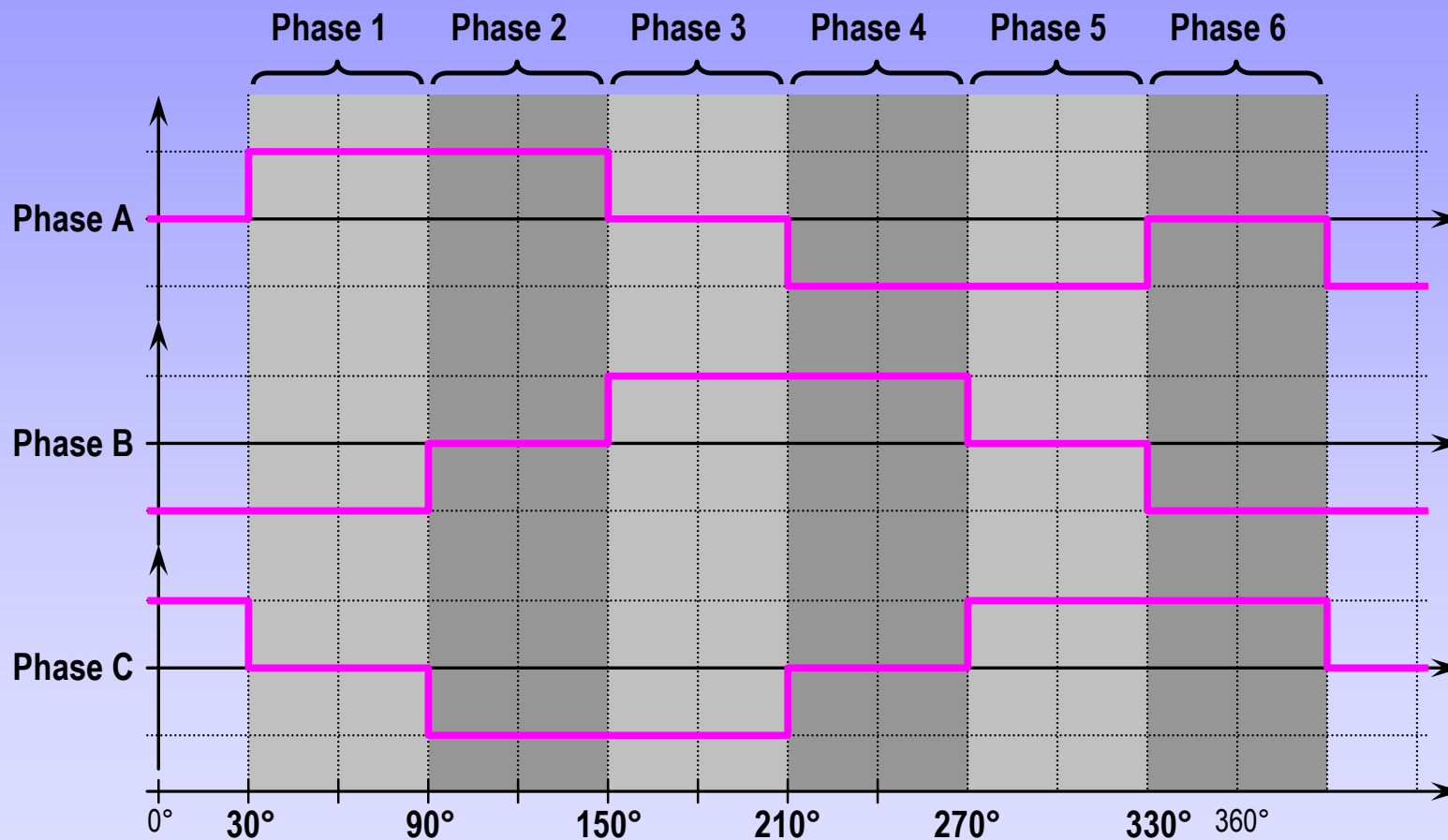


Példa: BLDC motor

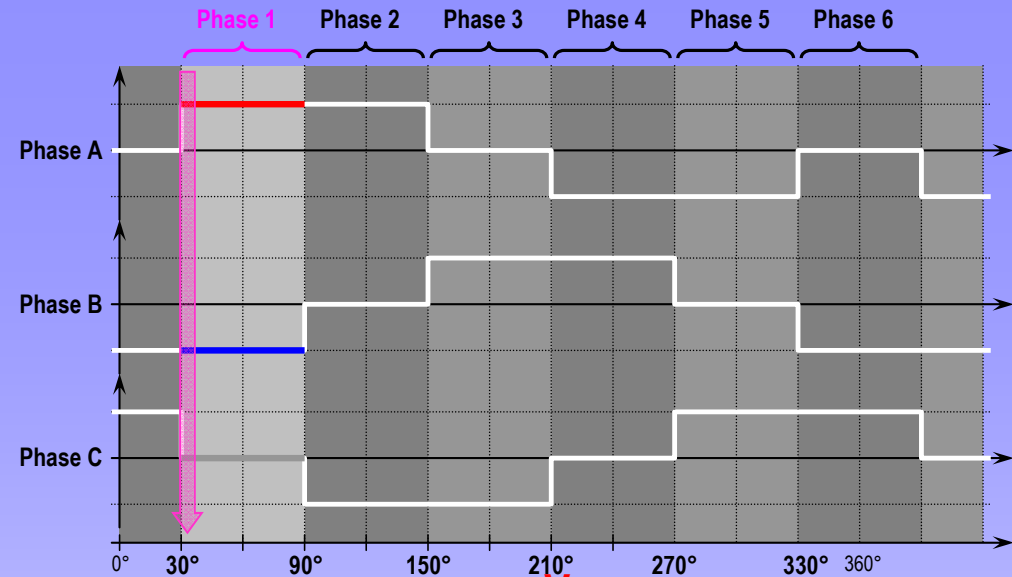
Kefe nélküli egyenáramú (BLDC - Brushless DC) motor



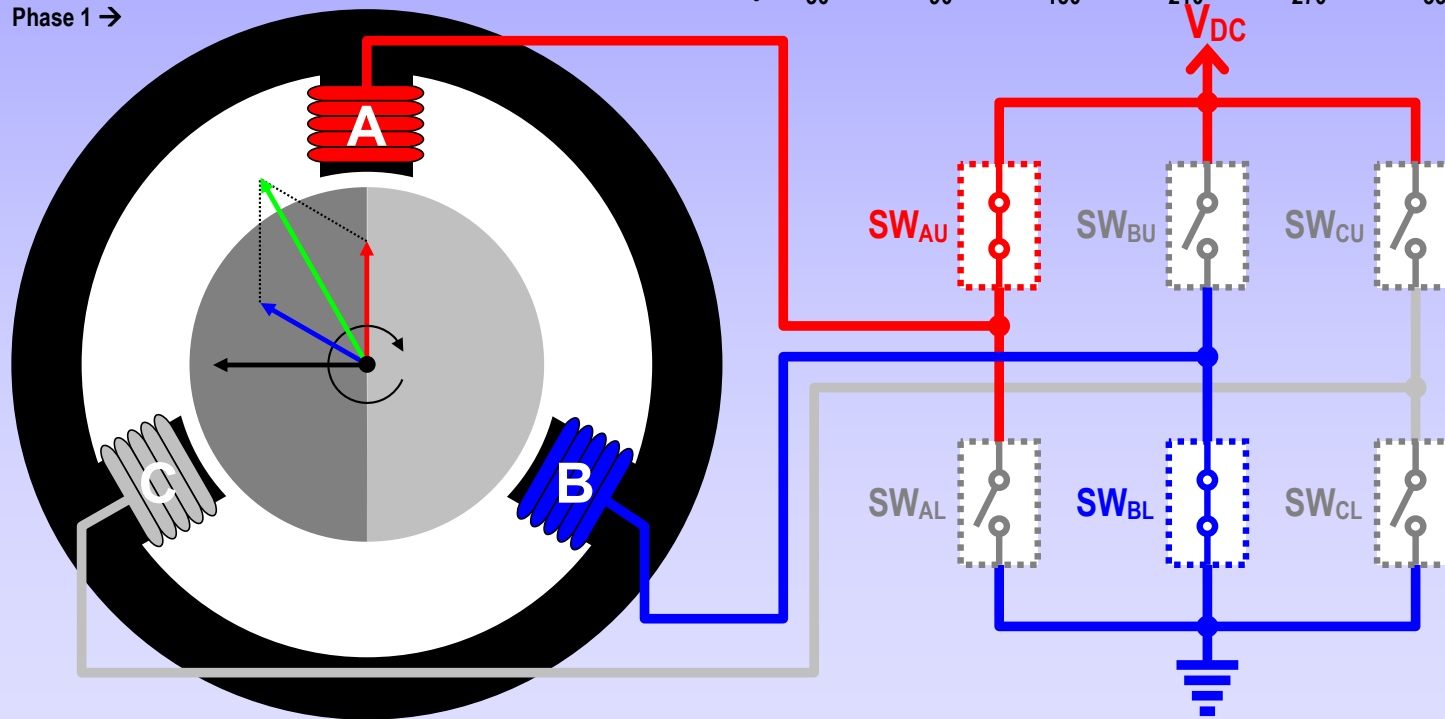
Brushless DC (BLDC) Motor



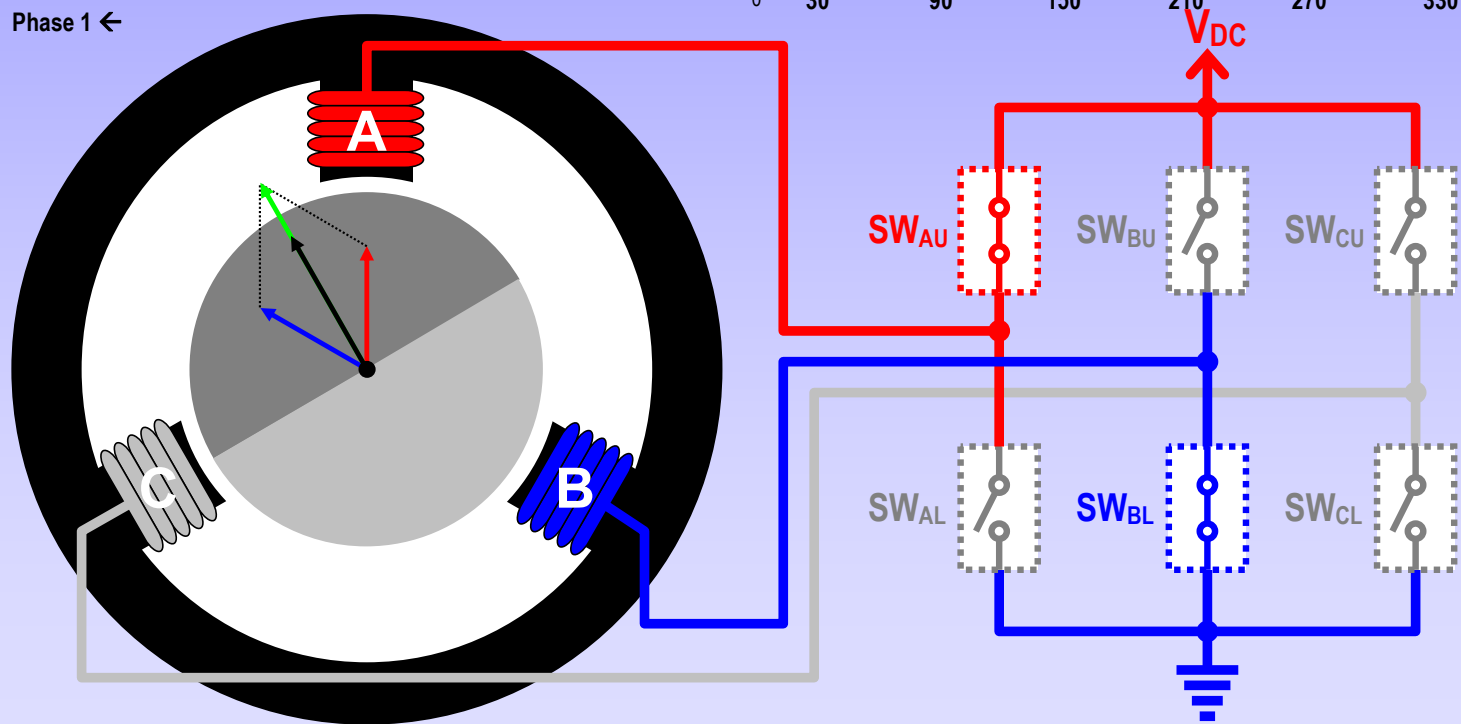
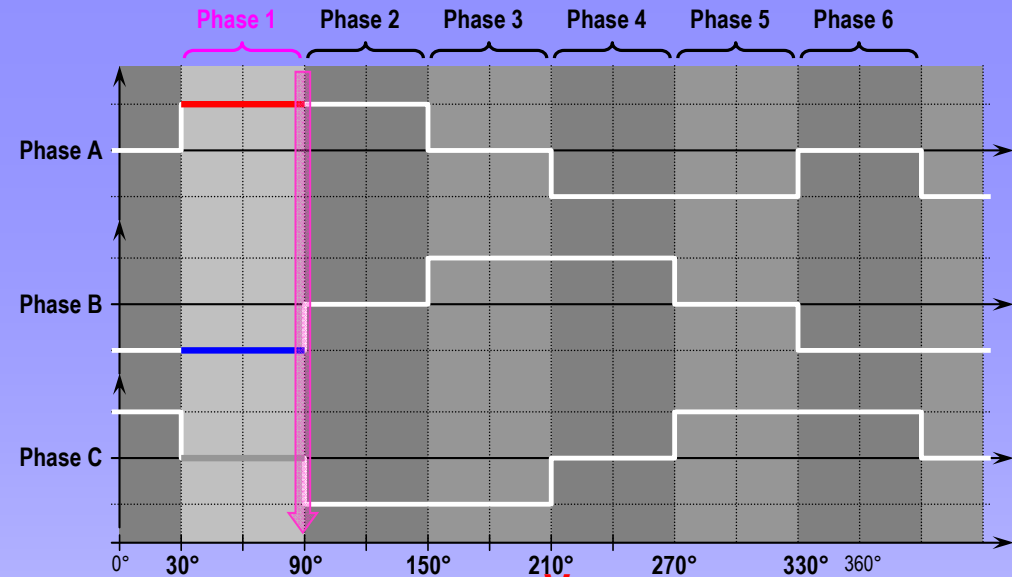
Phase 1 - start -



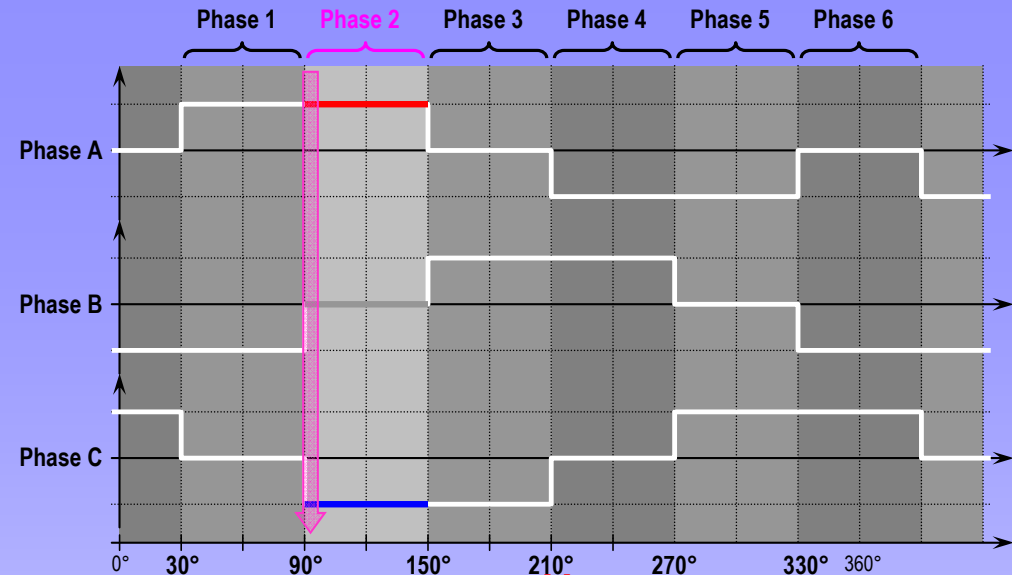
Phase 1 →



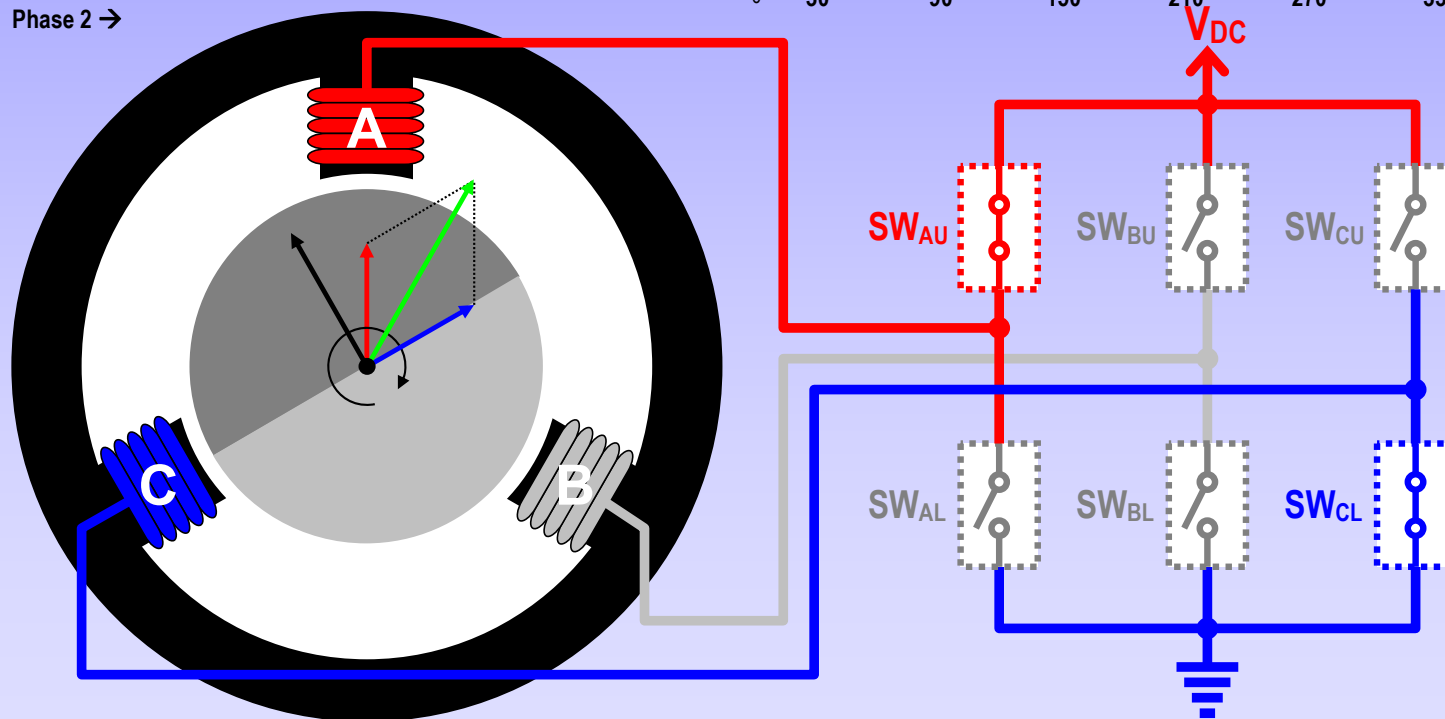
Phase 1 - stop -



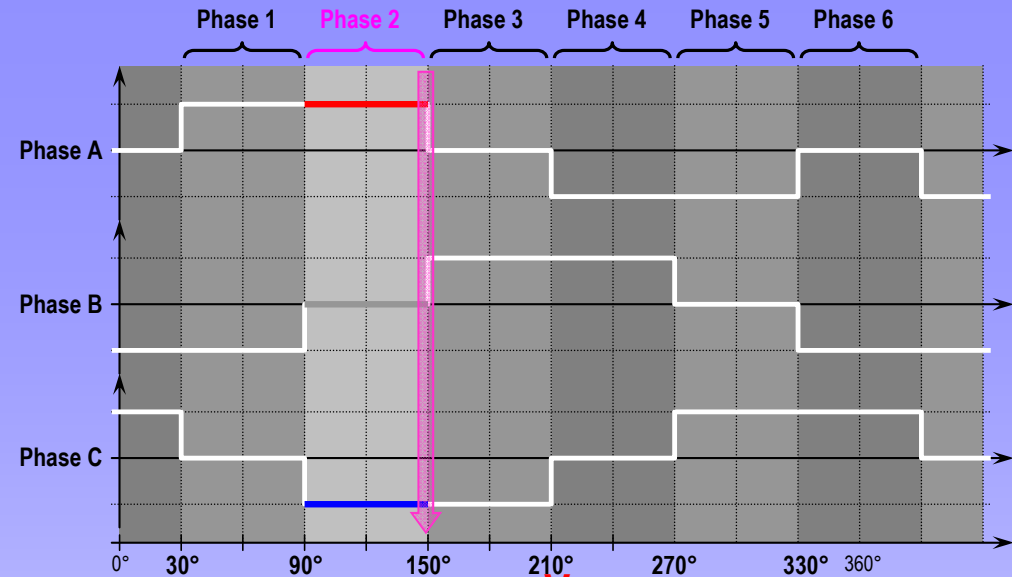
Phase 2 - start -



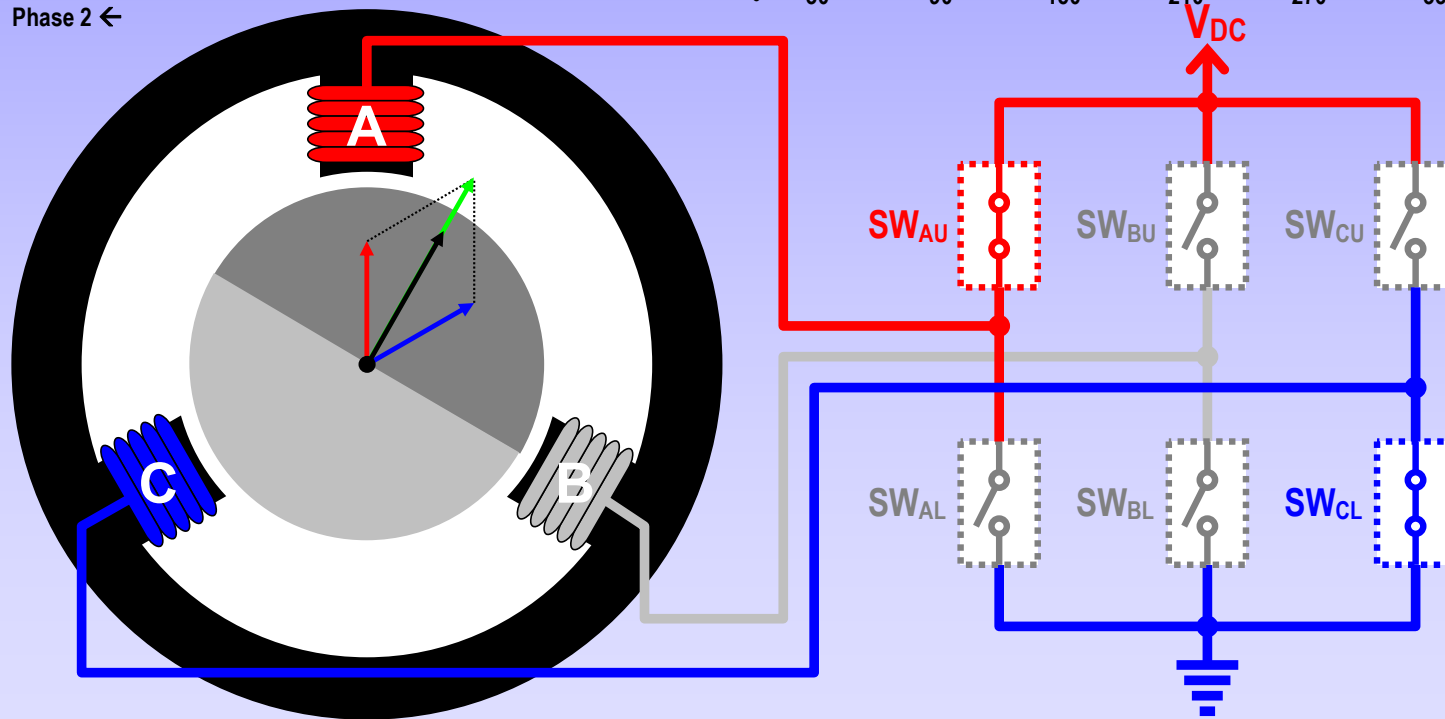
Phase 2 →



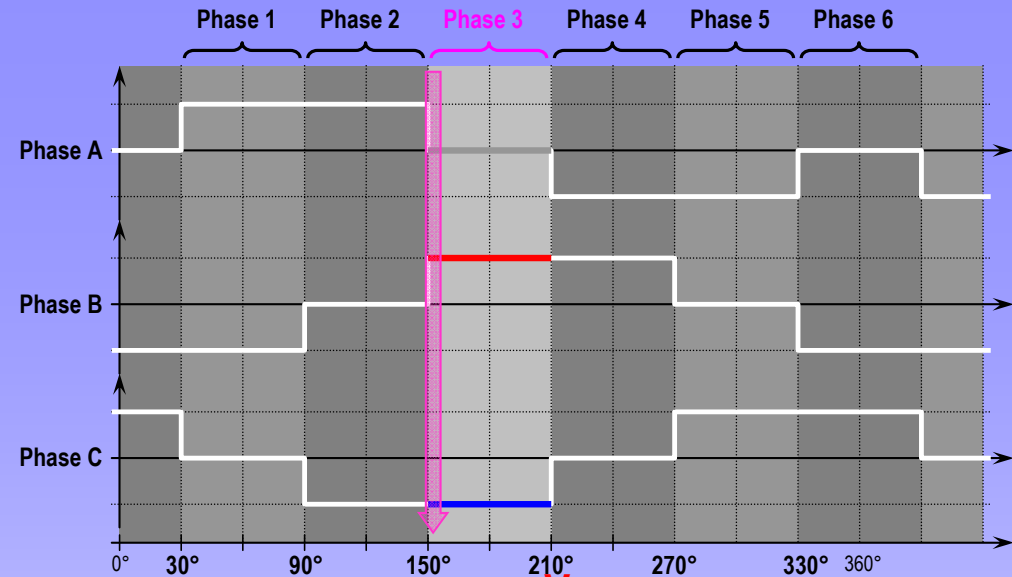
Phase 2 - stop -



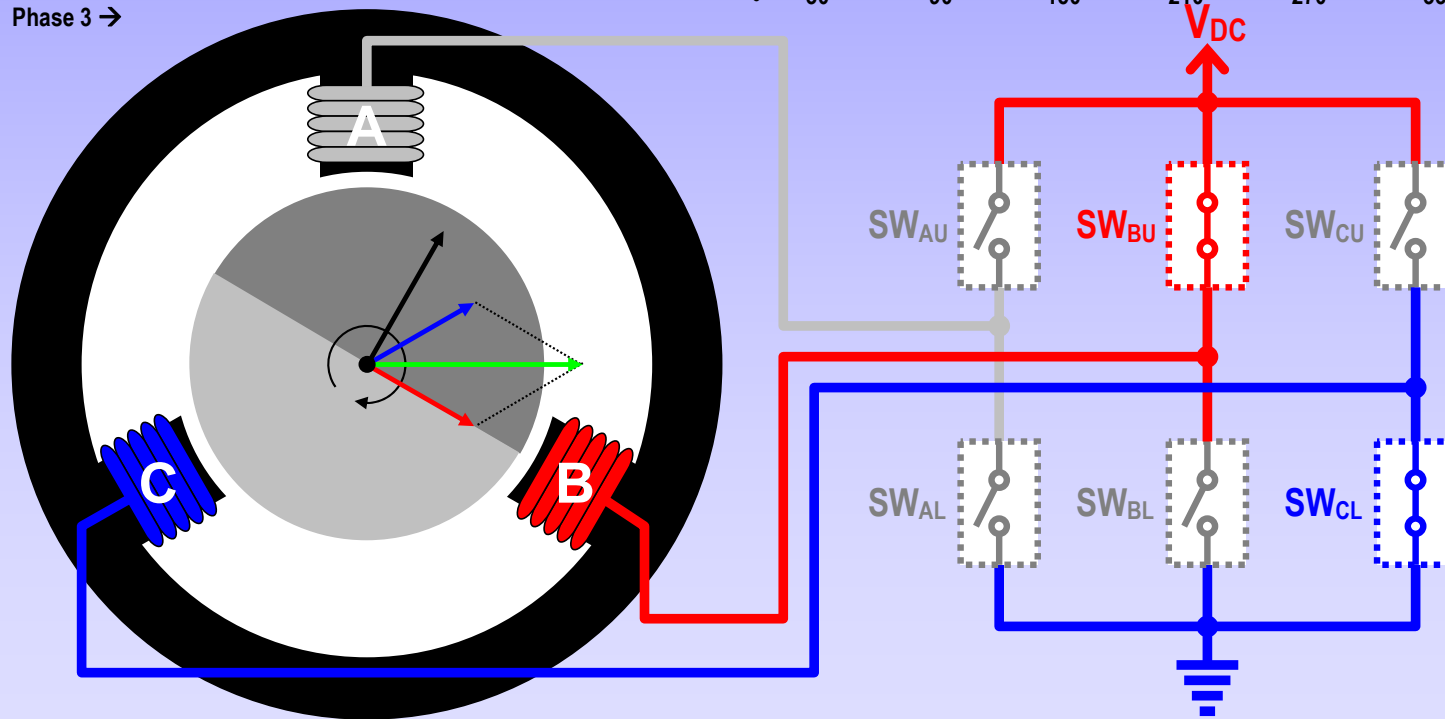
Phase 2 ←



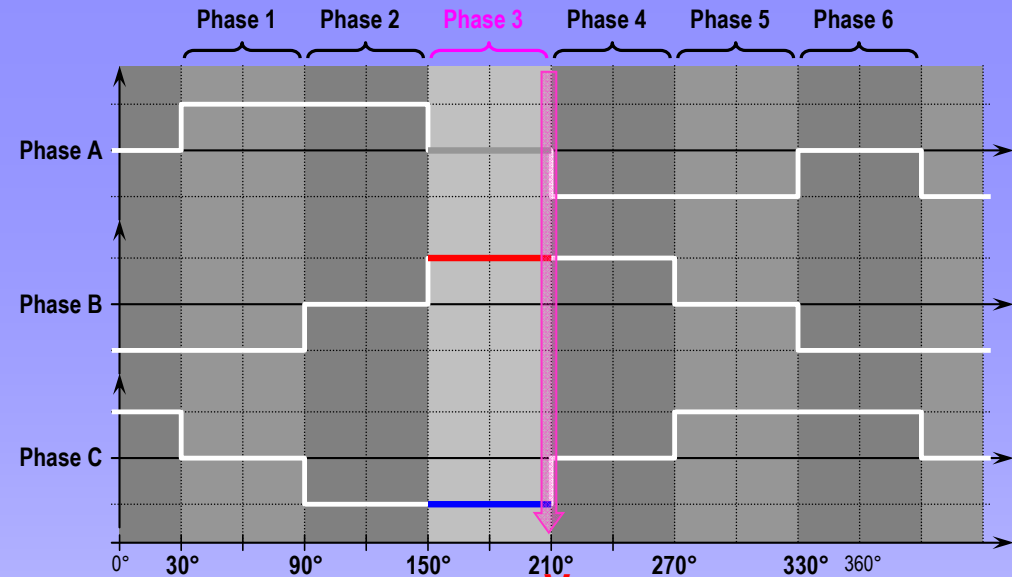
Phase 3 - start -



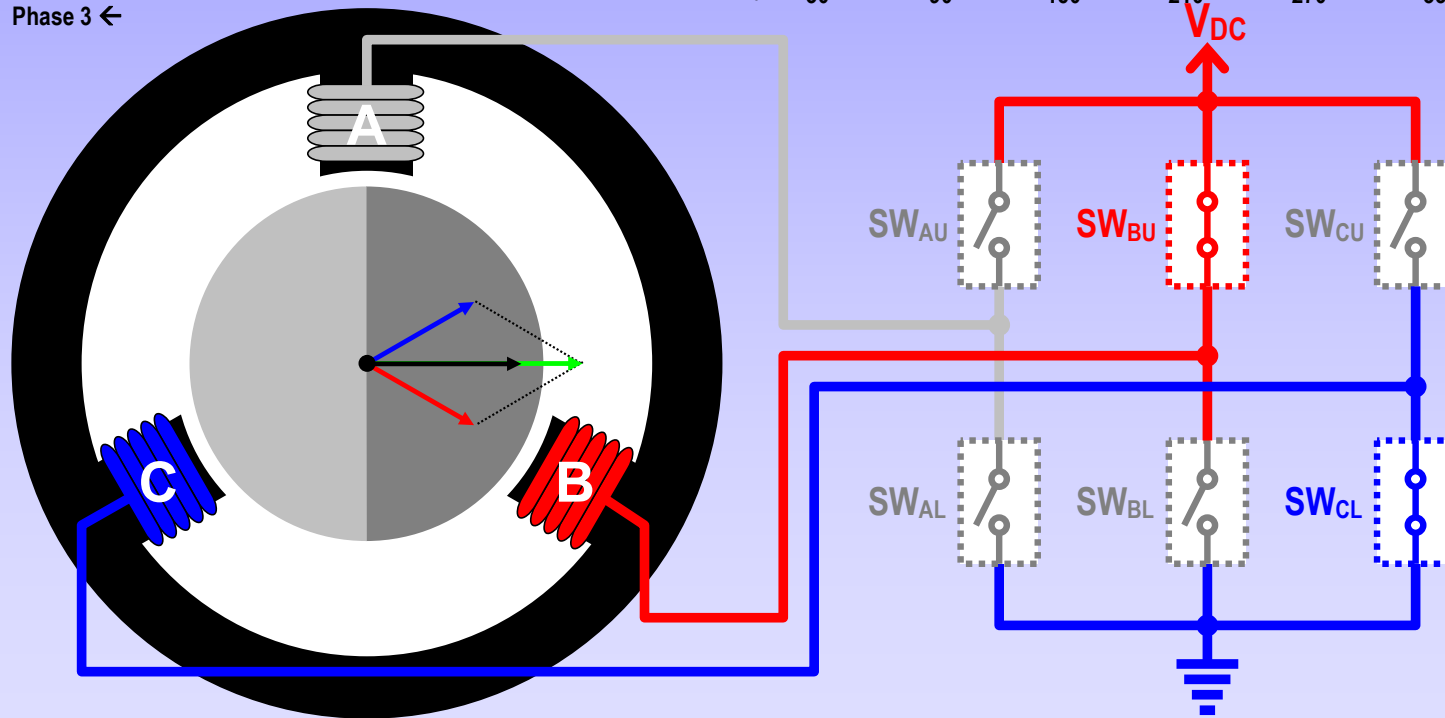
Phase 3 →



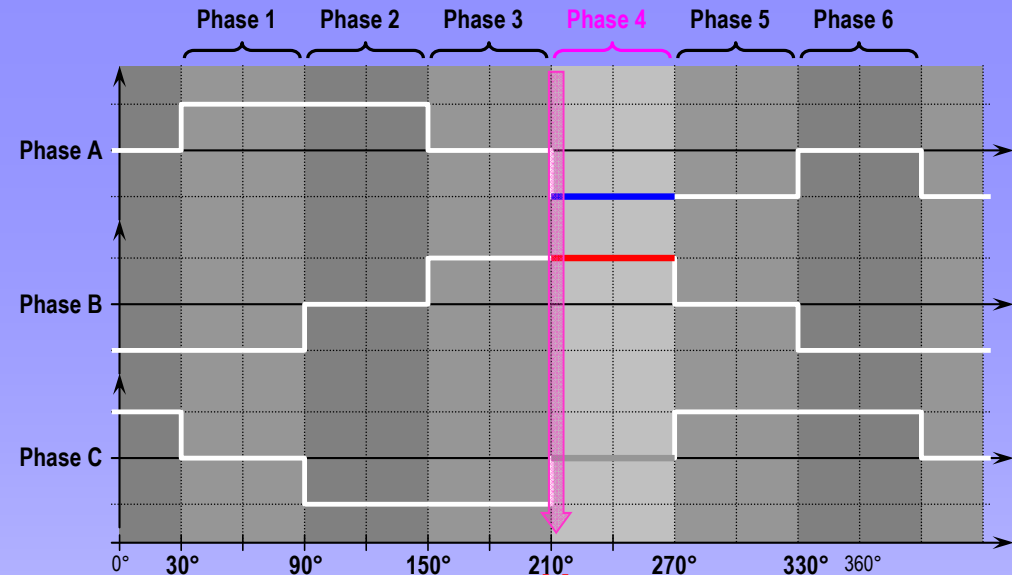
Phase 3 - stop -



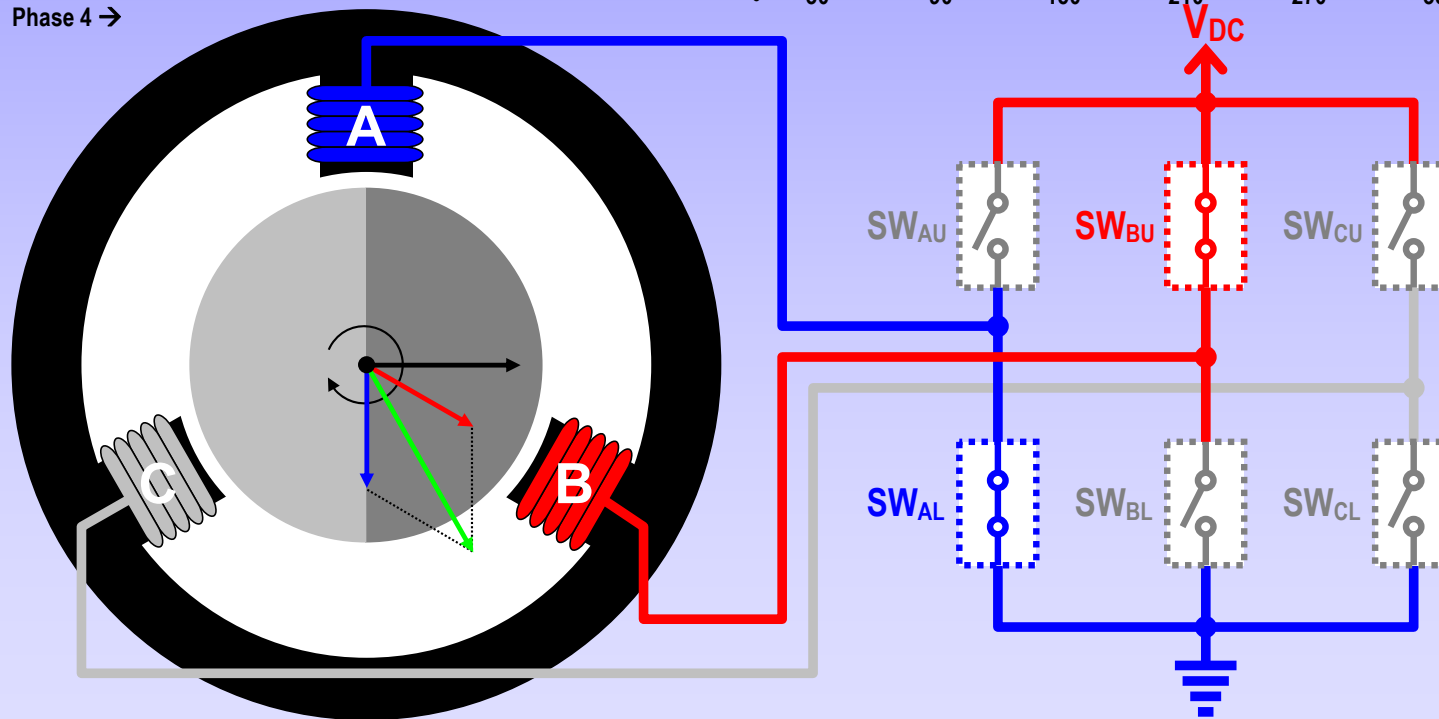
Phase 3 ←



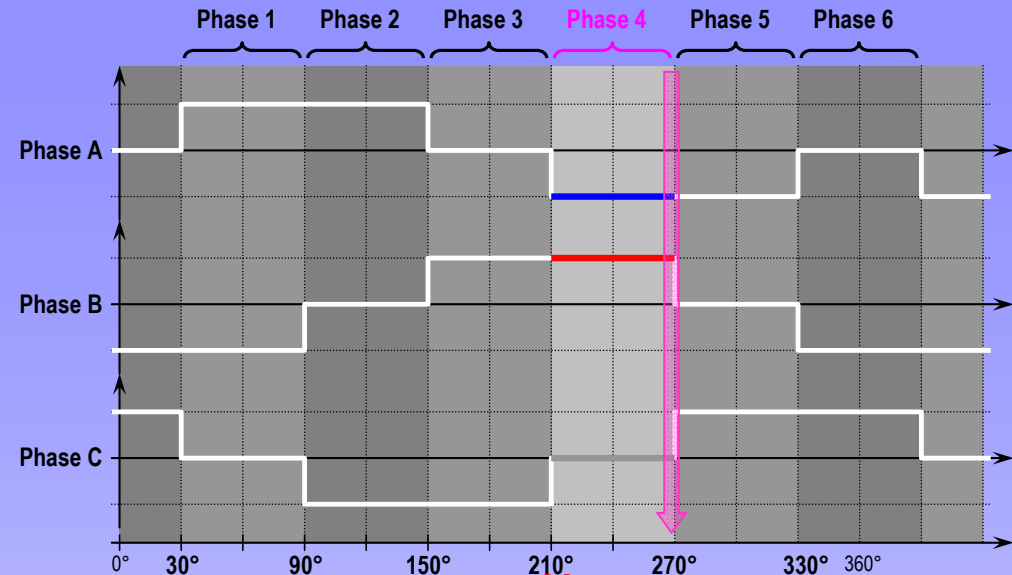
Phase 4 - start -



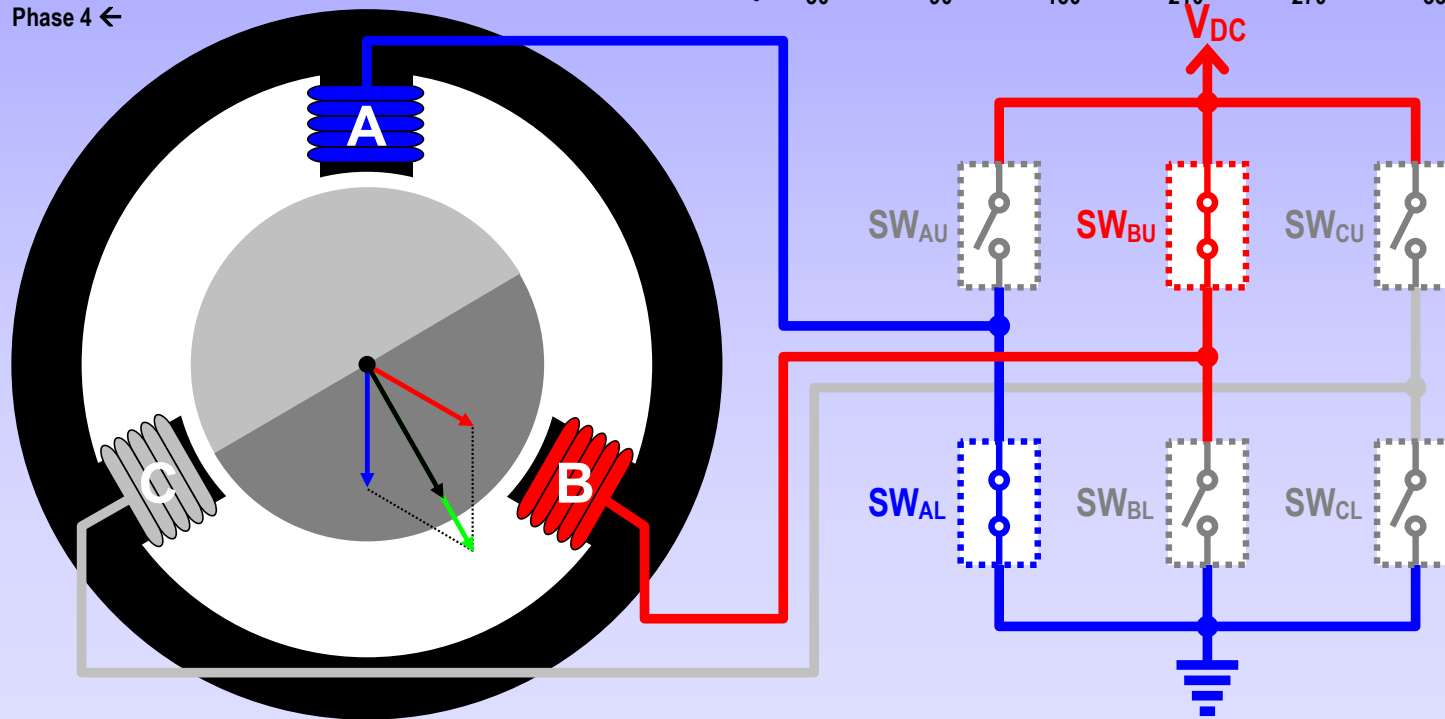
Phase 4 →



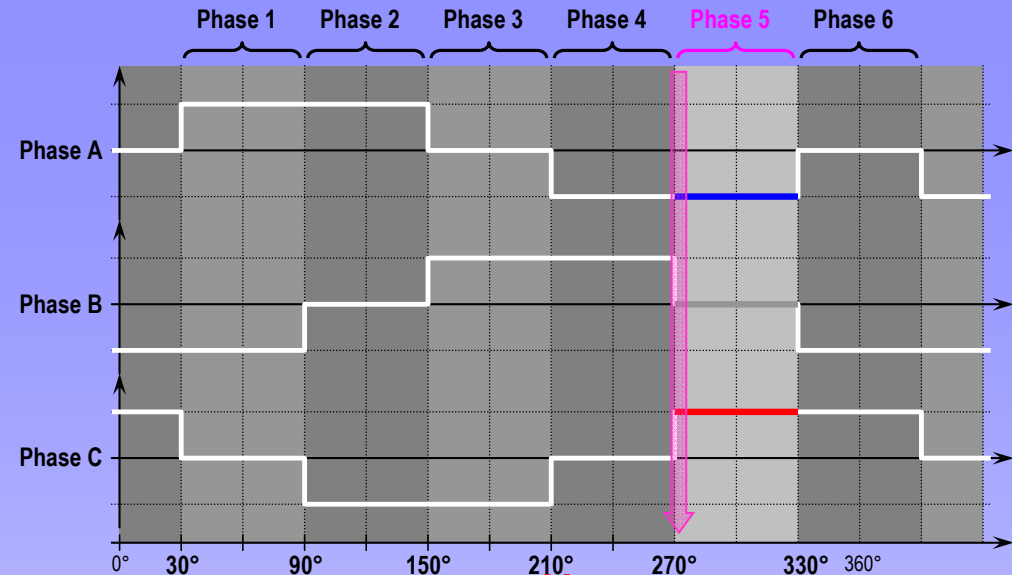
Phase 4 - stop -



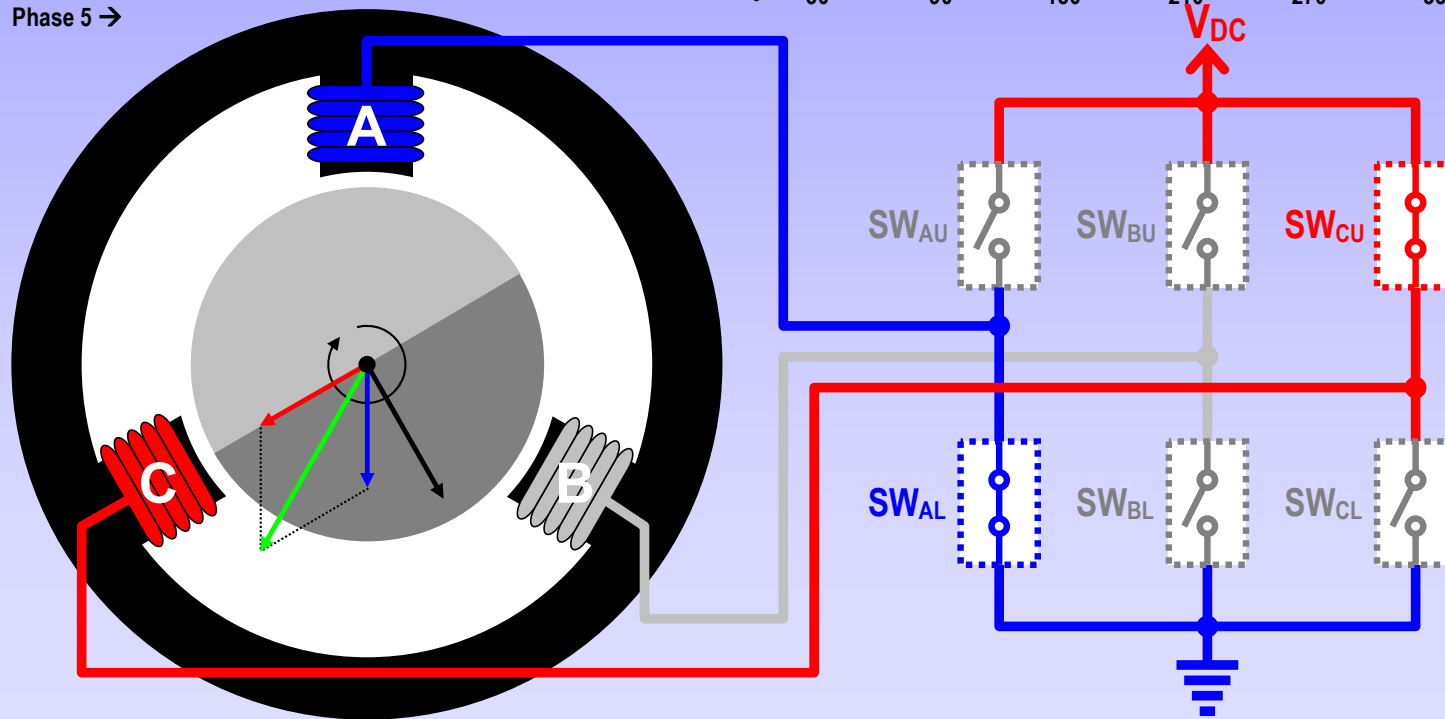
Phase 4 ←



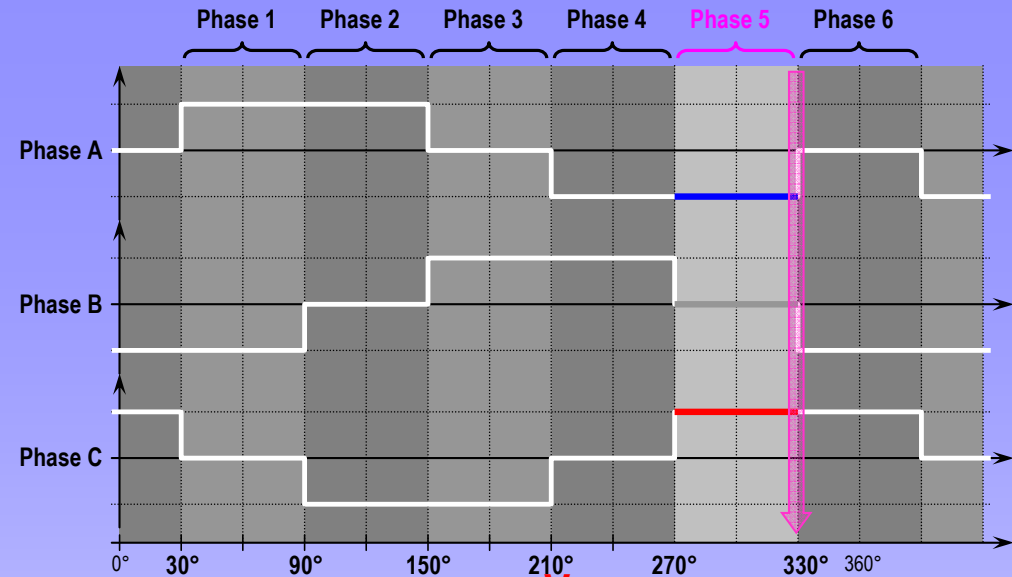
Phase 5 - start -



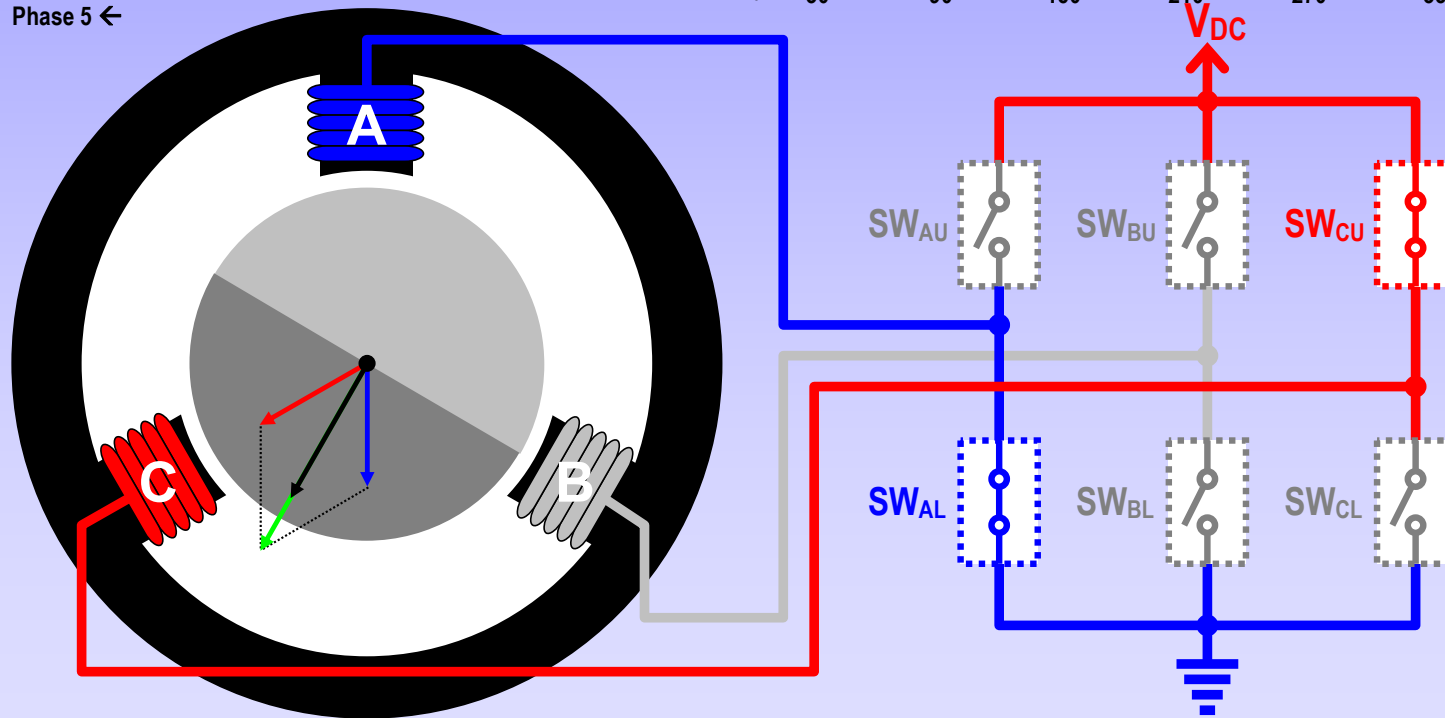
Phase 5 →



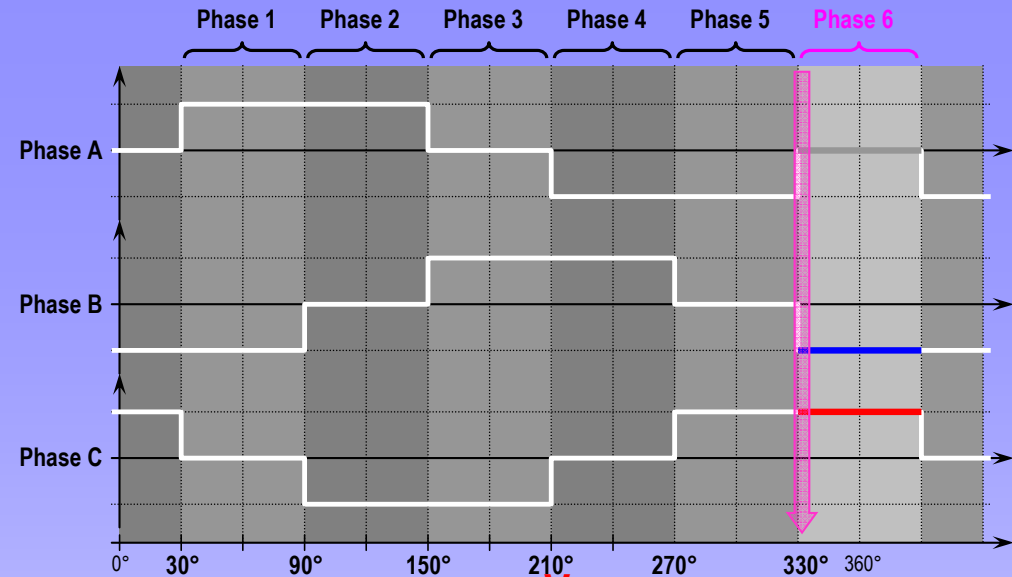
Phase 5 - stop -



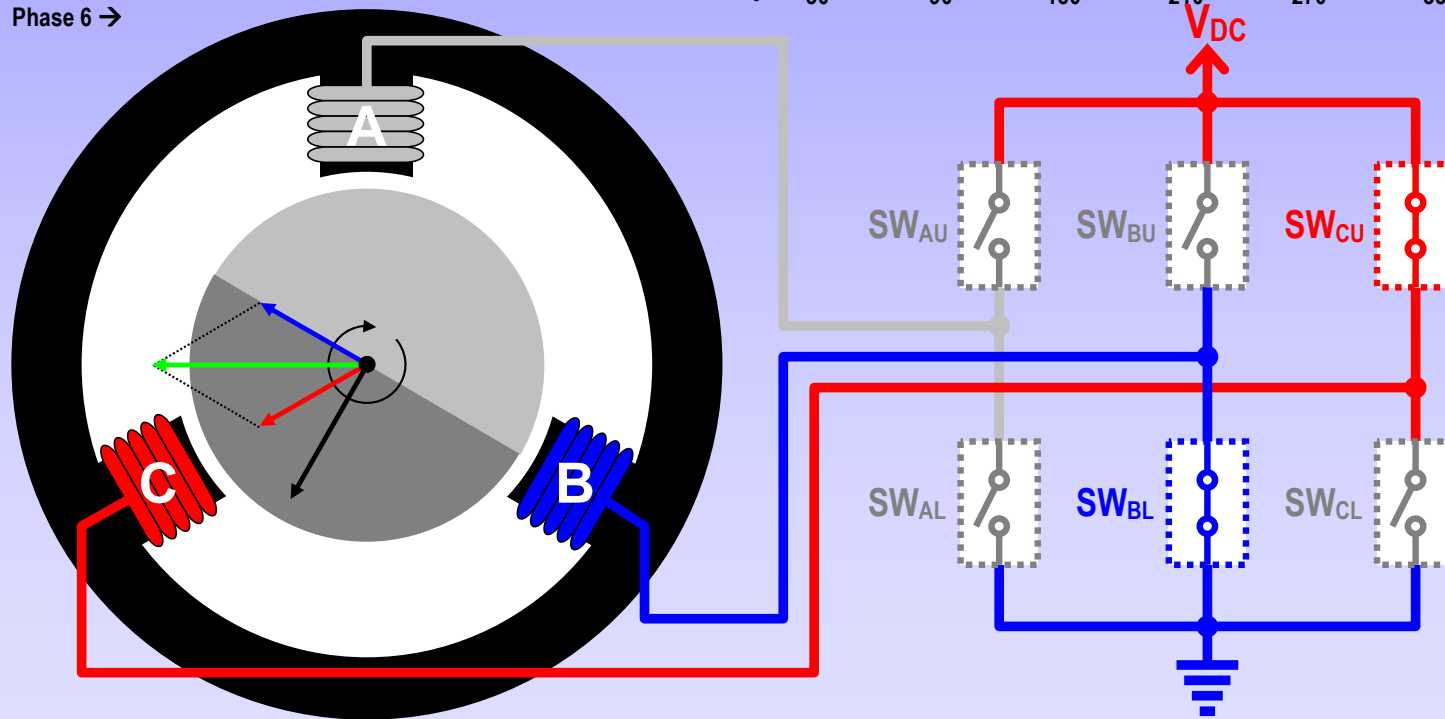
Phase 5 ←



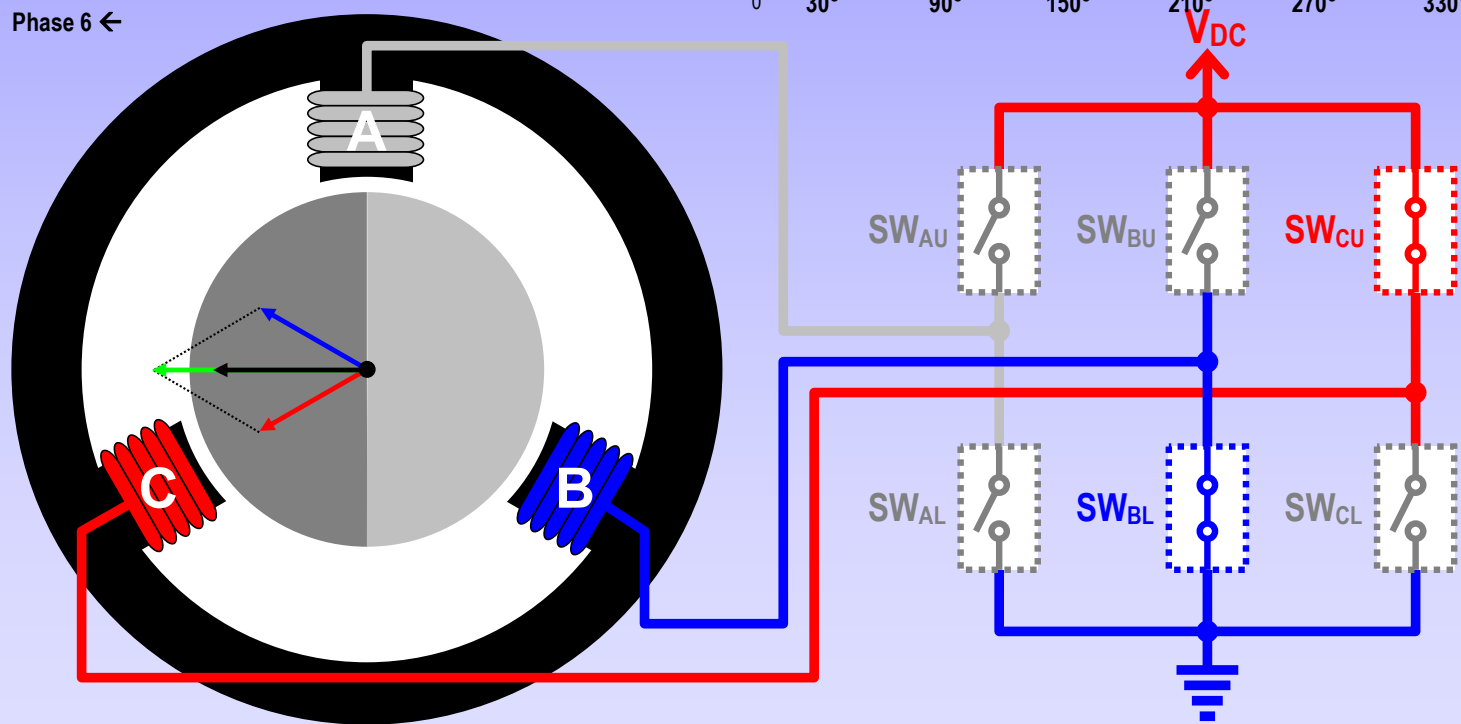
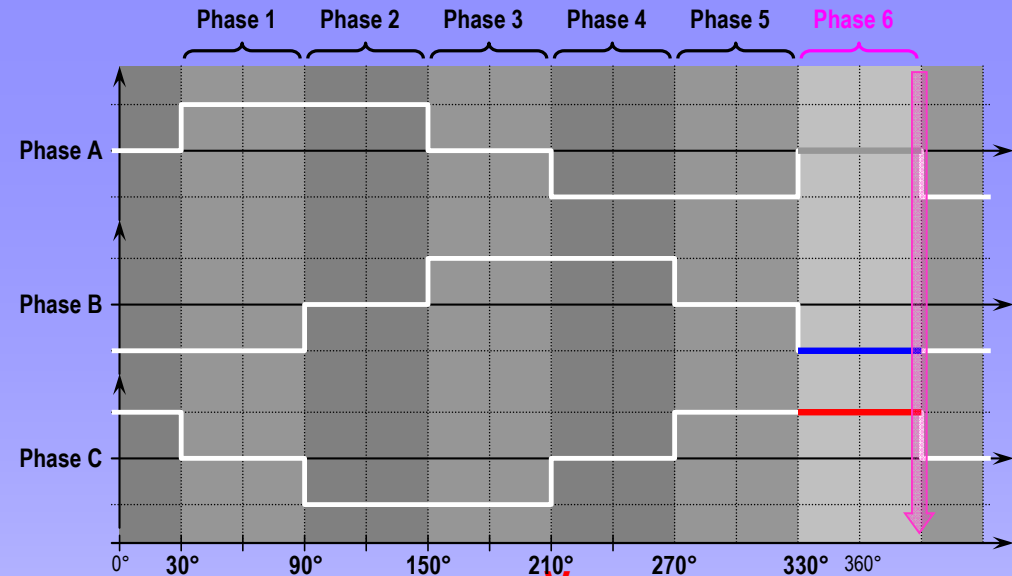
Phase 6 - start -



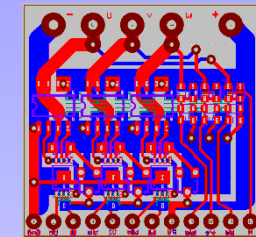
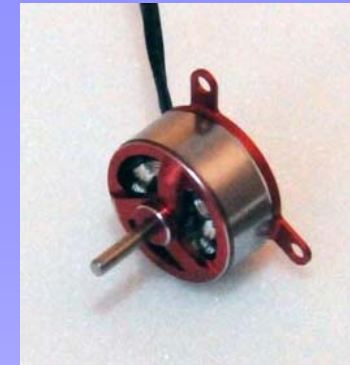
Phase 6 →



Phase 6 - stop -

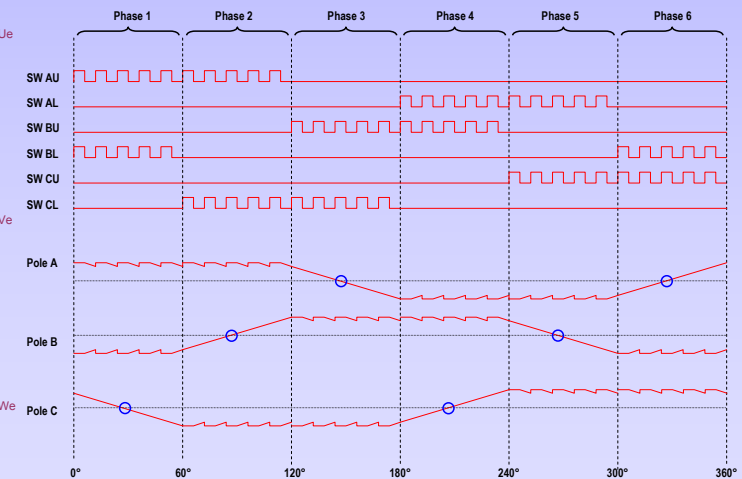
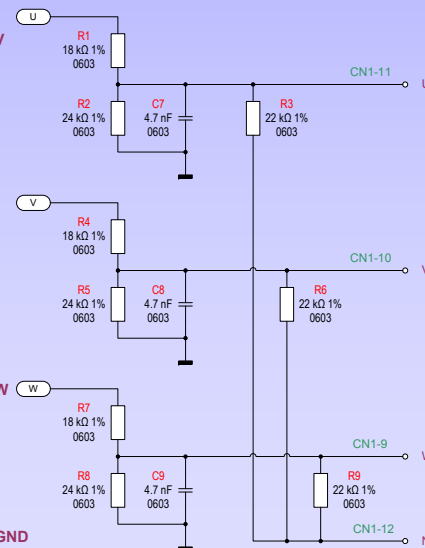
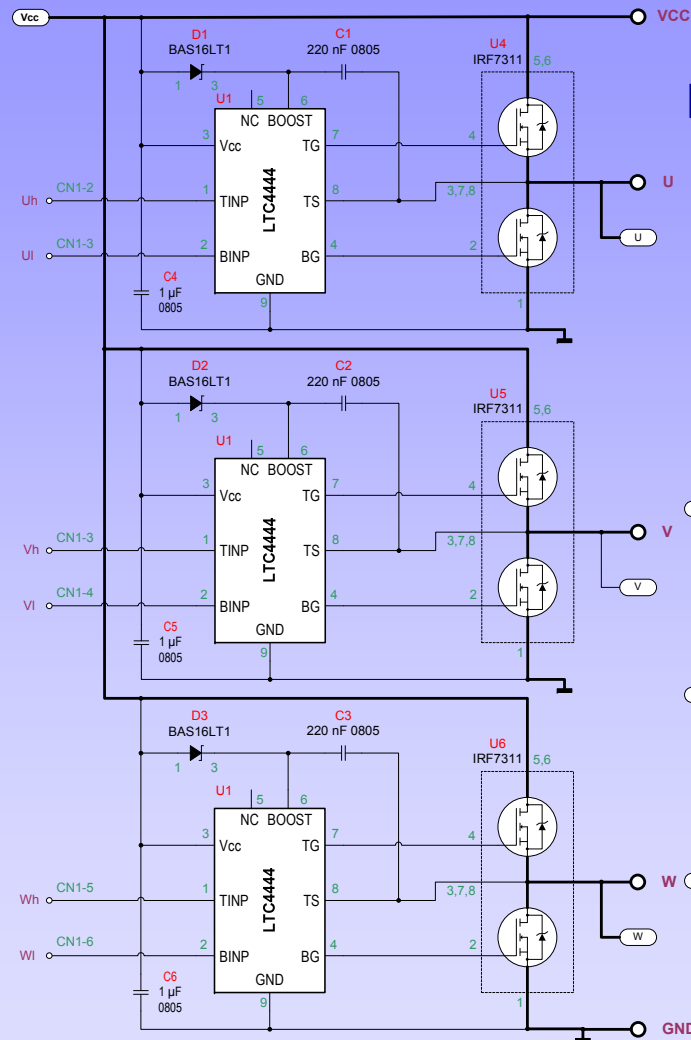


BLDC motorirányítás

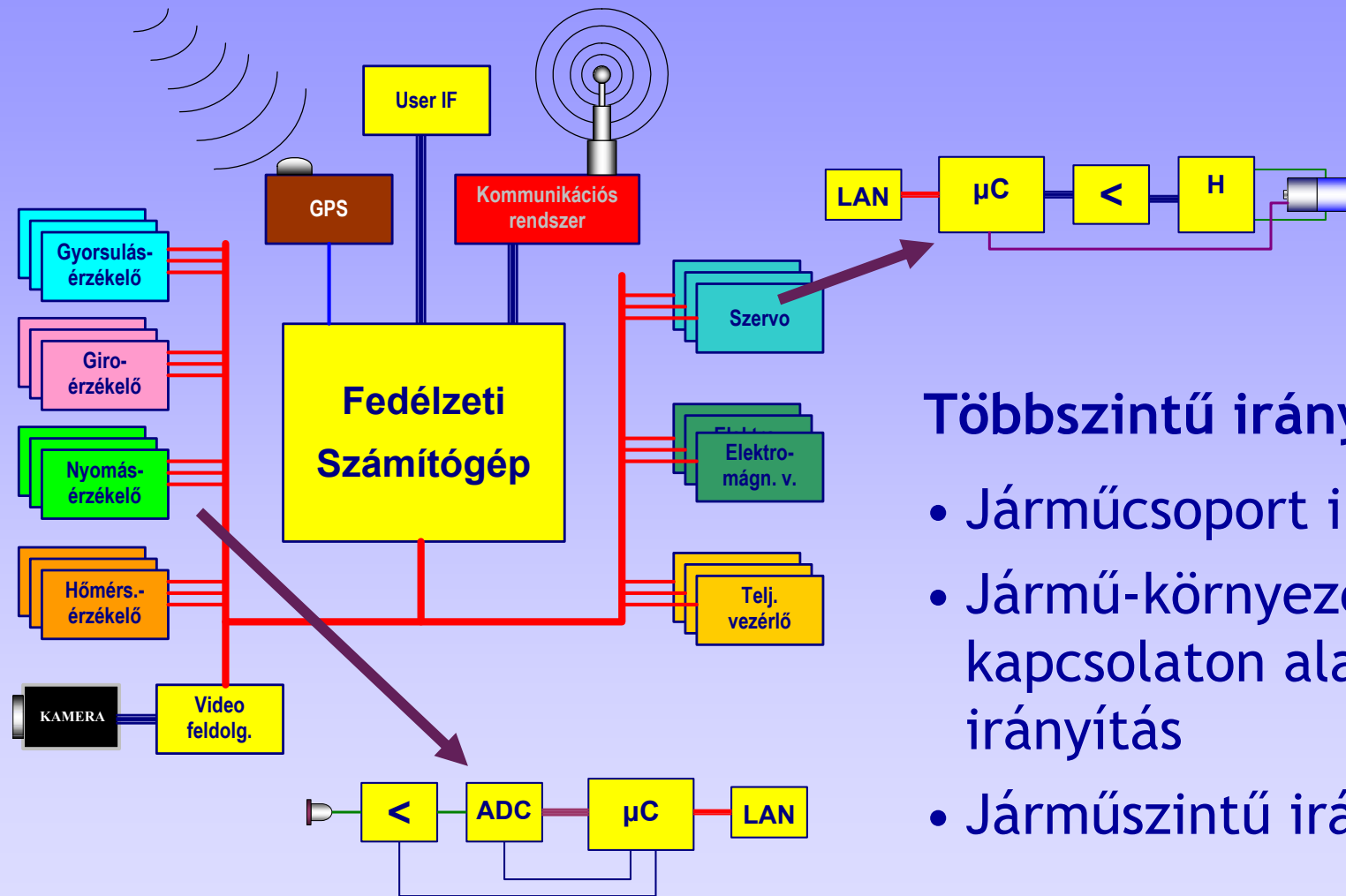


BLDC vezérlő elektronika:

- Szenzor nélküli vezérlés
- Visszacsatolás EMF mérés alapján
- N-csatornás MOSFET kapcsolók
- Félhíd meghajtó IC-k alkalmazása



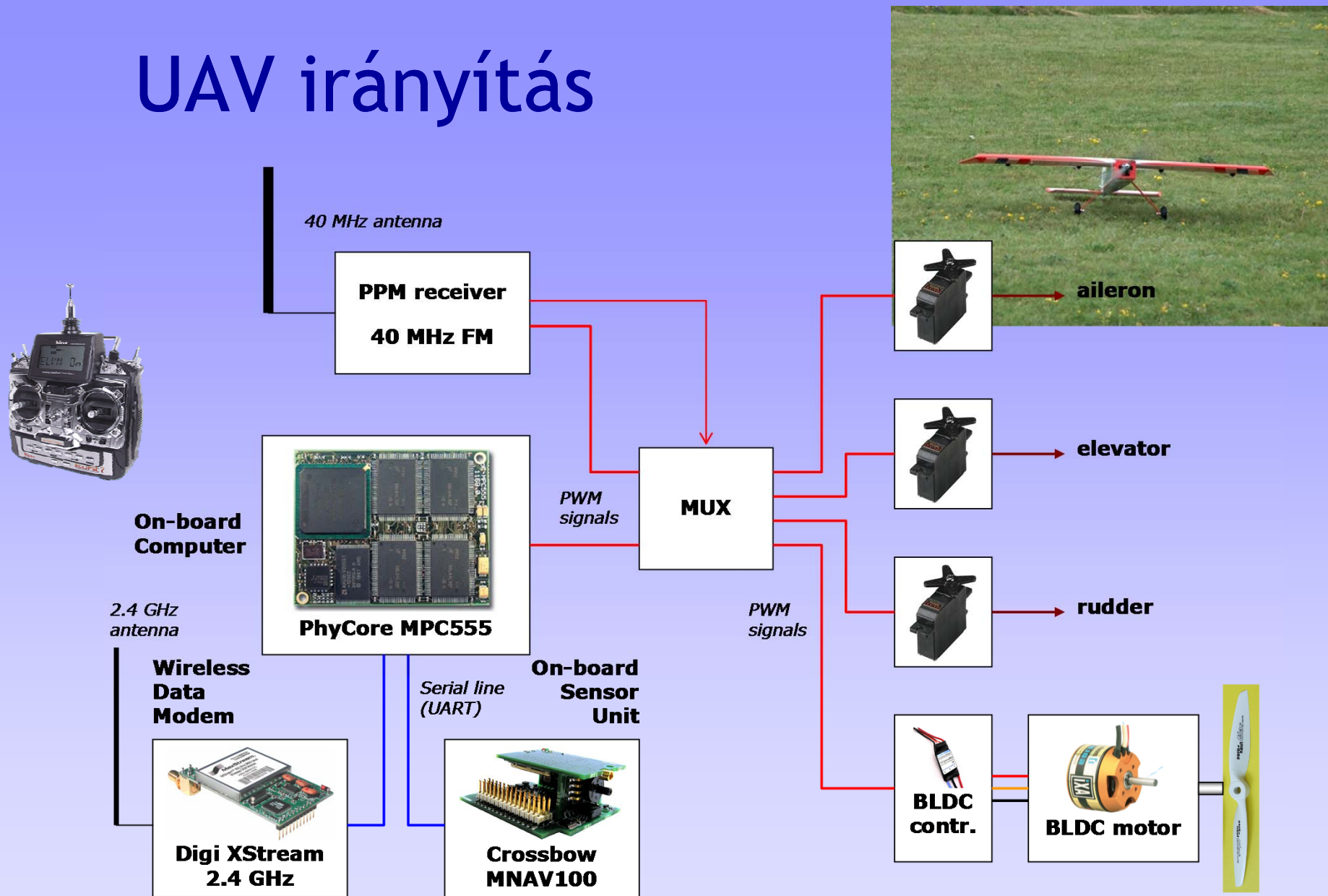
Beágyazott járműirányító rendszer



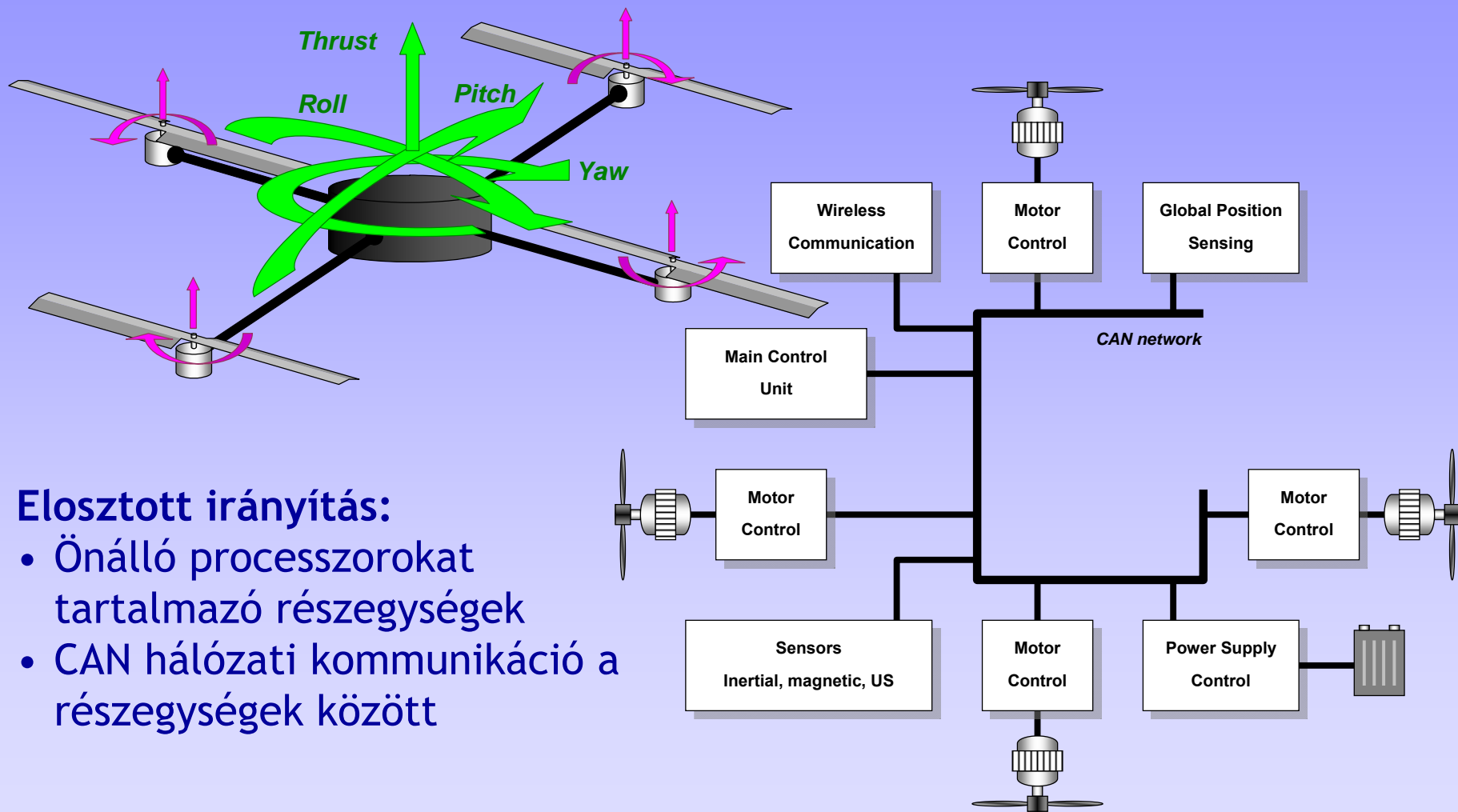
Többszintű irányítás:

- Járműcsoport irányítás
- Jármű-környezet kapcsolaton alapuló irányítás
- Járműszintű irányítás

UAV irányítás



4-rotoros helikopter irányítás



Elosztott irányítás:

- Önálló processzorokat tartalmazó részegységek
- CAN hálózati kommunikáció a részegységek között