

A következő oldalakon látható dokumentumok szerzői jog védelme alatt állnak, mindenféle másolásuk, terjesztésük jogi következményeket von maga után!

Nyilatkozat

Alulírott Cenzúrázva a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója kijelentem, hogy ezt a diplomatervet meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és a diplomatervben csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átdolgozva más forrásból átvettem, egyértelműen a forrás megadásával megjelöltem.

Tartalomjegyzék

Nyilatkozat	1
Tartalomjegyzék	2
Melléklet tartalma	2
Tartalmi összefoglaló	4
1. A PLC, mint eszköz	5
1.1. A PLC funkcionális felépítése.....	5
1.2. Be- és kimenetek	6
2. Analóg-digitál (A/D) és digitál-analóg (D/A) átalakítás	7
2.1. A z-transzformáció	7
2.2. Az analóg-digitális átalakítás lépései.....	9
2.3. Az A/D átalakítók tulajdonságai.....	12
2.4. Az A/D átalakítók hibái	13
2.5. A/D átalakító típusok.....	15
2.5.1. Többkomparátoros	16
2.5.2. Lépcsős számláló	17
2.5.3. Fokozatos közelítésű	18
2.5.4. Követő	20
2.5.5. Feszültség-idő átalakításos.....	21
2.5.6. Feszültség-frekvencia átalakításos	23
2.5.7. Delta-szigma átalakítók.....	24
2.6. DA átalakítók.....	25
3. Digitális PID szabályozás	26
3.1. A PID szabályozás alapjai	27
3.2. Digitális PID	29
3.3. Digitális szabályzó kör	32
3.4. Problémák a PID algoritmussal	34
4. Az LG GM7 PLC	41

4.1. Általános leírás	42
4.2. A PLC alapfunkciói	42
4.3. Speciális funkciók.....	43
4.3.1. Kézi beállítású PID blokk	45
4.3.2. Automata hangolású PID blokk	47
4.4. A PLC bővítőmoduljai.....	48
4.4.1. AD/DA modul.....	48
4.4.1.1. Felépítés, jelek bekötése	48
4.4.1.2. A modulhoz tartozó funkcióblokkok	51
5. Alkalmazás: Festo Lineáris hajtómű pozíciószabályozása	52
5.1. A tesztrendszer elemei	52
5.2. A program	53
Összegzés	56
Köszönetnyilvánítás.....	56
Irodalomjegyzék	57
Melléklet	58

A melléklet tartalma:

- Oktatási segédanyag: LG GM7 PLC PID funkciójának leírása
- 1 db CD, tartalma:
 - Diplomaterv Microsoft Word dokumentum formátumban
 - Oktatási segédanyag Microsoft Word dokumentum formátumban
 - Laboratóriumi foglalkozásokhoz készített Powerpoint prezentáció
 - GMWIN-ben készült programok

Tartalmi összefoglaló

A feladatom a PLC-vel történő AD/DA átalakítás, PID szabályozás, ezen belül is az LG által gyártott GM7 sorozatú PLC-nek a megismerése. Ennek a megalapozására áttekintettem az analóg-digitál és digitál-analóg átalakítások elméletét, típusait, az analóg és digitális PID szabályozás alapjait, problémáit. Mindezekről elméleti összefoglalást adok a munkámban. Az elmélet alkalmazásában megismerkedtem az LG GM7 PLC AD/DA moduljával, beépített PID szabályozójával, GMWIN programjával, amivel méréseket végeztem a tanszéki laboratóriumban. A fő mérési testrendszer egy FESTO által gyártott lineáris hajtómű volt, ezzel pozíciószabályozást végeztem.

Summarizing the contents

My task was to become acquainted with digital PID control, AD/DA conversion with PLC. Inside this I have made myself familiar with the LG GM7 PLC and its integrated PID function, AD/DA module and GMWIN software. To establish the practice, I have summed up the theory and different types of the analog-digital and digital-analog conversion, the theory and problems of the analog and digital PID control. The testing system was a FESTO pneumatic linear drive, with a displacement encoder as sensor.

1. A PLC, mint eszköz [3]

A PLC vagy *Programmable Logic Controller*, azaz programozható logikai vezérlő egy mikroprocesszor alapú célszámítógép, amit ipari folyamatok vezérléséhez fejlesztettek ki, hogy kiválthassák az analóg relés, bütykös időzítő megoldásokat. Az 1970-es években való elterjedésük óta az ipari vezérlésekben gyakorlatilag egyeduralkodó szerepre tettek szert. Nagy előnyük a megbízhatóságuk, szerkezeti ellenállóságuk a környezeti ártalmakkal, mechanikai hatásokkal szemben és a tárolt program egyszerű módosíthatósága.

A hagyományos számítógépektől való fő különbség, hogy a PLC rendelkezik speciális be- és kimeneti csatlakozóssal, amivel az eszköz kapcsolódik a szenzorokhoz, illetve aktuátorokhoz.

A PLC-k két csoportba sorolhatók kivitelük alapján: kompakt és moduláris.

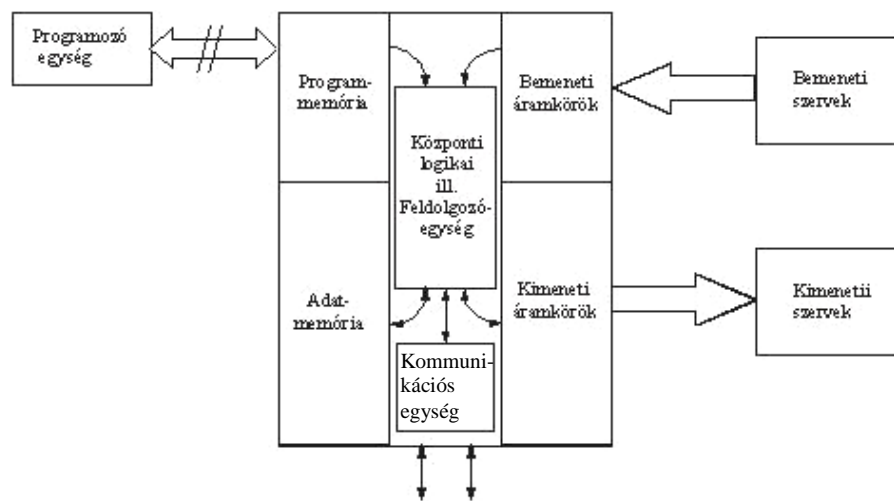
- **A kompakt PLC-k** nem bővíthetők, adott célra készülnek, helyigényük kicsi, viszonylag olcsók, ezért a nagy sorozatban gyártott berendezések (Pl.: mosogatógép) automatizálásánál, vagy egyedi vezérlésekhez használják őket.
- **A moduláris felépítésű PLC-k** egyedi feladatokat ellátó egységekkel bővíthetők. Ezek a modulok is ellenálló tokozást kapnak, és a központi egységgel a buszon keresztül kommunikálnak. A moduláris felépítésű PLC-eket közepes, ill. nagyméretű rugalmas gyártórendszerek vagy folyamatok irányítására fejlesztették ki. Ez a felépítés lehetővé teszi a különböző felhasználói igényekhez való optimális illesztést. A be- és kimeneti egységek elhelyezhetőek közvetlenül az irányított folyamat közelében, megtakarítva a huzalozási költségeket.

1.1. A PLC funkcionális felépítése[2]:

Moduláris vagy kompakt kialakítás esetén is a következők főbb egységei:

- központi logikai ill. feldolgozóegység (CPU): számítások végzése, utasítások végrehajtása. Futtatja a memóriájában elraktározott programot, és vezérli a többi alkotóelemet.
- programmemória (ROM, EPROM, EEPROM), adatmemória (RAM)

- tápegység: ez a modul szolgáltatja a PLC moduljainak az áramellátást. A RAM memóriát tartalmazó CPU-khoz általában akkumulátort is tartalmazó tápegységeket választanak, hogy a program áramszünet esetén is megmaradjon.
- bemeneti (input) egységek (digitális, ill. analóg): ezek az egységek skálázzák, alakítják a bejövő jeleket a CPU számára feldolgozhatóvá
- kimeneti (output) egységek (digitális, ill. analóg): a kimenő jeleket az ipari folyamatokhoz alakítják
- kommunikációs egységek: más PLC-kkel, PC-kkel való kommunikációt biztosítják



1. ábra: A PLC-k funkcionális felépítése

A központi egység saját kezelőfelülettel nem rendelkezik, a programot gyári programozó egységen vagy PC-n kell megírni, és letölteni a PLC saját memóriájába (már a PLC processzorának gépi kódjában), ami általában nem-felejtő EEPROM (Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory). Egyszerre több program is tárolódhat a memóriában, melyek közül a kívánt programot vagy külső jelre, vagy időzítve indíthatjuk el.

1.2. Be- és kimenetek

A PLC-k fontos jellemzője, hogy bemeneti és kimeneti egységeinek feszültségszintje illeszkedik az iparban használatos szintekhez. Ez általában digitális be- és kimenetek esetén +22-től 24V mint 1 szint és 2V alatt 0 szint. A PLC-k egyes be- és kimeneti pontjai szinte minden esetben galvanikusan le vannak választva a belső buszról, illetve a CPU egységtől.

A digitális kimenetek két csoportba oszthatók: relés és tranzistoros kimenetek.

- **A relés kimenetek** előnye, hogy nagy áramokat, így nagy teljesítményt kapcsolhatunk velük kiegészítő áramkörök nélkül. Hátránya, hogy viszonylag lassú. Kapcsolási frekvenciája kisebb, mint 10Hz, és reakcióideje is nagy.
- **A tranzisztoros kimenetek** a relés kimenetekkel ellentétben gyorsak (>100 Hz), de nem terhelhetők akkora áramokkal. Hátrány lehet még, hogy a kimenet egyik pontját mindig földelni kell.

2. Analóg-digitál(A/D) és digitál-analóg(DA) átalakítás

Olyan ipari folyamatokban, ahol nyomást, hőmérsékletet, súlyt, vagy pozíciót kell érzékelni, szükség van analóg bemenetekre is, mert e mennyiségek szenzorai többnyire nem kétállapotú jelet szolgáltatnak. Ha szabályozni is kívánunk ilyen mennyiségeket egy rendszerben, akkor szükség van analóg kimenetekre is. Az analóg kimenetek között megkülönböztetünk áram, feszültség és frekvencia kimenetet. A szokásos jelszintek 4-20mA (ún. élönnullás), 0-20mA vagy 0-10V (unipoláris), $\pm 10V$ (bipoláris). Az áram-bemenetek kevésbé érzékenyek az elektromos zajokra, mint a feszültség bemenetek.

Az adatokat a feldolgozáshoz digitalizálni kell, ezért van szükség analóg-digitál átalakításra. A digitalizált jellel már többféle műveletet végezhetünk, vagy akár digitális szabályozáshoz is felhasználhatjuk. A digitális jelet digitál-analóg átalakítással vezethetjük vissza az analóg világba. Az első PID algoritmustal ellátott PLC-t 1975-ben bocsátották ki.

Definíciók[3]:

Analóg jel definíciója: időben folytonos és két szélső érték között bármilyen értéket felvehet.

Amplitúdó-kvantált: időben folyamatos, de amplitúdójában csak meghatározott értékeket vehet fel.

Időben diszkrét vagy mintavételezett jel: csak bizonyos időpillanatokban értelmezett, de akkor két szélső érték között tetszőleges értéket vehet fel.

Amplitúdó-kvantált és időben diszkrét jel: időben és amplitúdóban is csak meghatározott értékeket vehet fel. Ezt nevezzük *digitális jel*nek. Egyik fajtája a bináris jel, ami csak 0 vagy 1 értékű lehet.

2.1. A z-transzformáció [1]

Az analóg és a digitális világ között a z-transzformáció teremt kapcsolatot. Időből frekvenciatartományba a Fourier- és a Laplace-transzformáció segítségével juthatunk. A

Fourier sorfejtési tétel alapján az állandó amplitúdójú periodikus jel felbontható szinuszos és koszinuszos jelek összegére.

A Fourier transzformáció képlete:
$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

A Fourier transzformációval kapott függvény egy spektrumeloszlást mutat, jól láthatóak rajta az egyes frekvencia-összetevők.

A Laplace transzformáció képlete:

$$F(\omega) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-\sigma t} e^{-j\omega t} dt = \int_0^{\infty} f(t)e^{-(\sigma+j\omega)t} dt$$

A $(\sigma + j\omega)$ kifejezésre az s jelölést vezették be, a neve Laplace operátor.

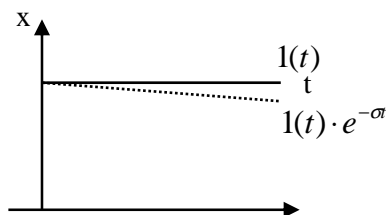
Ezzel a Laplace transzformáció:
$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$$

A két képlet csak egy $e^{-\sigma t}$ szorzóban tér el egymástól, amit azért kellett bevezetni, hogy a Dirichlet feltételt nem teljesítő függvényeket is integrálhatóvá tegyük.

Ilyen függvény például az egységugrás.

A Dirichlet feltétel: $\int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt \leq N$, ahol $N < \infty$ természetes szám.

A függvényt $e^{-\sigma t}$ -vel megszorozva, a görbe alatti terület végessé válik. $|\sigma| \ll 1$



A Laplace transzformált függvény ábrázolása már csak komplex térben lehetséges, nem szemlélteti az egyes frekvencia-összetevőket, viszont lehetővé teszi egy absztrakt térben tetszőleges bemeneti függvényekkel és az átviteli függvénnyel a kimenet meghatározását. Inverz transzformációval időtartományban is meghatározható a kimenő jel.

Az analóg rendszerből digitálisba való áttéréshez szükség van a mintavételezett rendszer matematikai leírhatóságára is. A Laplace transzformáció átalakításával kapjuk a z-transzformációt. Ehhez az integrál-kifejezést összegképzésre vezetjük vissza:

$$F(z) = \sum_{n=0}^{\infty} f_n \cdot e^{-nsT}$$

ahol: $f_n = f(t_n) = f(nT)$

$t_n = nT$ az n.-ik mintavételezési időpont

T a mintavételezési időlépés

n pozitív egész szám

A e^{sT} kifejezésre vezették be a z jelölést. Ezzel a z -transzformáció képlete:

$$F(z) = Z\{f_n\} = \sum_{n=0}^{\infty} f(nT) \cdot z^{-n},$$

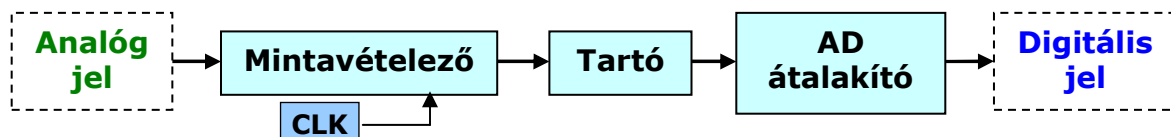
ahol: $f_n = f(nT)$ a függvény értéke az n-edik mintavételezési időpontban.

Eltolási tétel: előző mintavételi időpontok értékeinek számításához.

$$Z\{f_{n-k}\} = z^{-k} \cdot F(z)$$

2.2. Az analóg-digitális átalakítás lépései [1],[3],[12],[13]

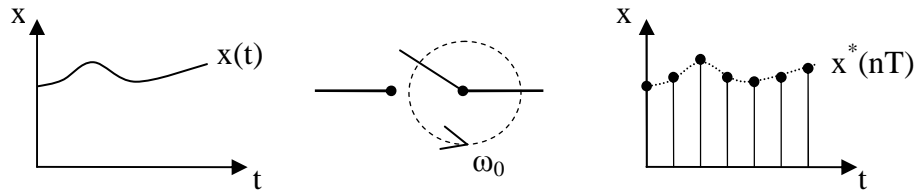
Az analóg jelek digitalizálása során a célunk az, hogy egy analóg értéket a lehetőségek szerint egyértelműen azonosítsunk egy bináris kódsorozattal.



2. ábra: Analóg-digitális átalakítás blokkdiagramja

Az átalakítás első lépése a **mintavételezés**. A mintavételezett jel impulzusok sorozata, amely impulzusok értéke egyenlő az analóg jel abban a pillanatban mérhető értékével. Ezt úgy modellezhetjük, mintha egy $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ szögsebességgel forgó kapcsolóval az analóg jelet csak

nT időpillanatokban kapcsolnánk a bemenetre. A mintavételezési frekvencia $f_{mv} = \frac{1}{T} = \frac{2\pi}{\omega_0}$.



3. ábra: Mintavételezés szemléltetése

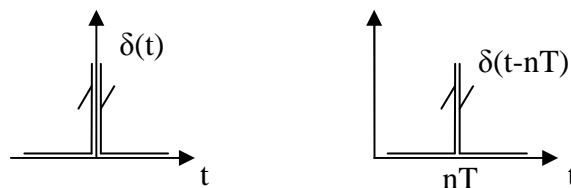
Minél nagyobb a mintavételi sebesség, annál pontosabb az analóg bemenet letapogatása. A minimális mintavételi frekvenciára a *Shannon törvény* ad útmutatást: a mintavételi f_{mv} frekvencia legalább kétszerese legyen az analóg jel legnagyobb szinuszos összetevőjénél:

$$f_{mv} \geq 2f_{\max}$$

A gyakorlatban a megfelelő eredményhez ennél sűrűbb, 10x-es mintavételezést szokás alkalmazni. Ha a mintavételezett jel tartalmaz információt nem hordozó, a mintavételi frekvencia felénél (Nyquist frekvencia) nagyobb komponenseket, ezek a komponensek bekerülhetnek a mintavételezett jelbe. Ezt a jelenséget nevezzük átlapolódásnak (vagy aliasing). Ennek megszüntetésére szűrőket szoktak alkalmazni akár mintavételezés előtt is (anti-aliasing filter).

A mintavételezés matematikai leírása: definíció szerint, ha egy függvényt megszorozzuk a Dirac-impulzussal, akkor egy olyan impulzust kapunk, amelynek értéke egyenlő a függvény abban a pillanatban értelmezett értékével.

A Dirac-impulzus: 0 helyen értelmezett, végtelen értékű impulzus.



4. ábra: A Dirac-impulzus

A Dirac-impulzus Fourier transzformáltja definíció szerint: $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) e^{-j\omega t} dt = 1$

Az eltolási törvény alkalmazásával: $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) e^{-j\omega t} dt = e^{-j\omega nT}$, $t = nT$

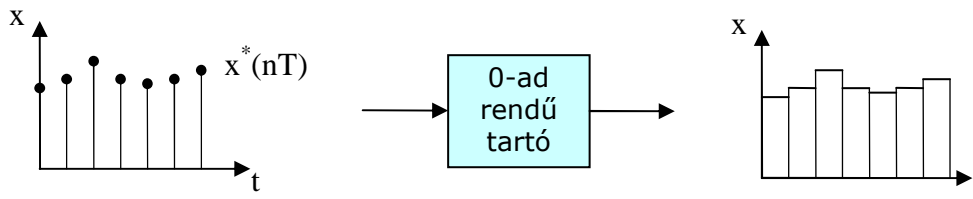
Tehát az impulzussorozat leírása a következő:

$$x^*(t) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT)\delta(t - nT)$$

Laplace transzformálva:
$$x^*(s) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT)e^{-sTn}$$

Z-transzformált alak:
$$x^*(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x_n z^{-n}$$

Az A/D átalakító bementére ez az impulzussorozat általában nem kapcsolható rá közvetlenül. Mivel az átalakítónak időre van szüksége az átalakításhoz, ezért nem biztos, hogy az adott impulzus értékét fogja átalakítani, hanem a két impulzus közötti valamely időpontban fennállót. Az impulzus értékét tartanunk kell a következő impulzusig, ezt a feladatot látja el a tartótag.

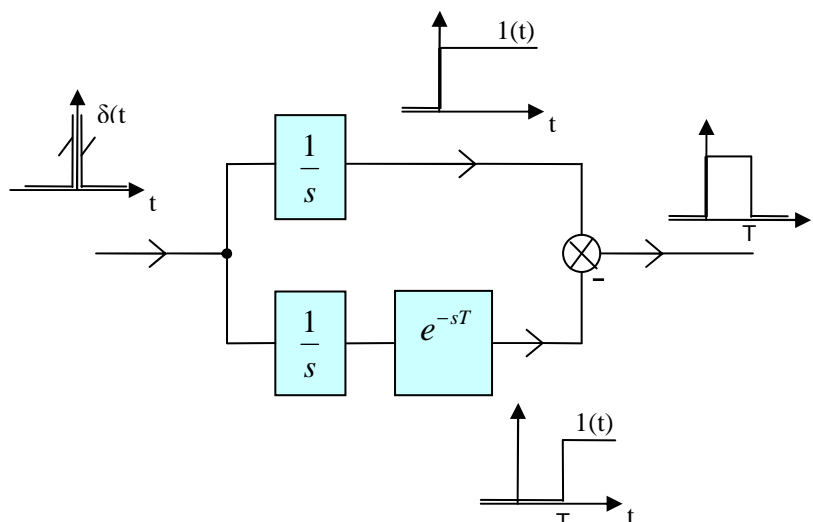


5. ábra: A nulladrendű tartótag működése

A nulladrendű tartó matematikai leírása: ha egy dirac-impulzust integrálunk, egységugrás függvényt kapunk. Négyzögjelet két, egymáshoz képest eltolt egységugrásjelből kivonással kaphatunk. Ezek segítségével a nulladrendű tartó egyenlete:

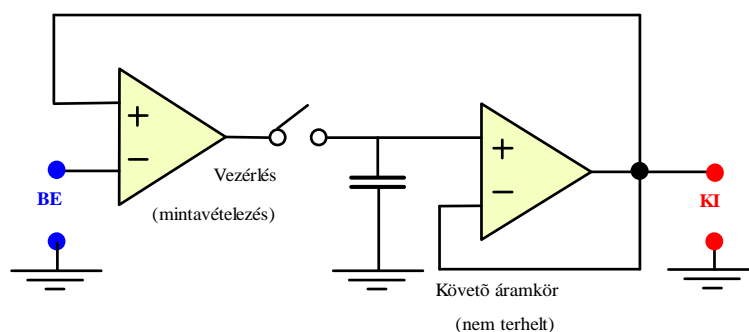
$$Y(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s}$$

Blokkdiagramon szemléltetve:



6. ábra: A nulladrendű tartótag működése

A gyakorlatban mintavevő és tartó áramkör egy egységet képez. Megvalósítása:



7. ábra: Mintavevő és tartó áramkör

Az előálló lépcsőfüggvény minden értékéhez az A/D átalakító egy kódot rendel. A számítógépes feldolgozás és jeltovábbítás miatt ez a kód célszerűen bináris. Ez a kódszám nem lehet végtelen hosszúságú, ezért kerekítésre van szükség. Ezt a kerekítést nevezzük **kvantálásnak**. A kvantálás során az analóg jeltartományon belül kvantálási szinteket jelölünk ki, és az analóg minták adott értékeit mindig a legközelebbi kvantálási szintre kerekítjük. Ezzel információt veszünk (kvantálási zaj). Minél több bittel írjuk le a jelet, azaz minél több kvantálási szintet jelölünk ki, annál kisebb ez a veszteség. A kvantálási zaj jellemzésére a jel/zaj viszonyt (SNR = Signal to Noise Ratio) használják. A közelítő képlet: $SNR=6n$, ahol n a bitek száma. Az ezek után kapott jel már kódolt digitális jel.

2.3. Az A/D átalakítók tulajdonságai [7],[12]

- **Analóg jeltartomány:** az átalakító csak az ebbe a tartományba eső jeleket alakítja át helyesen. Ez a jeltartomány lehet unipoláris vagy bipoláris. Az **unipoláris** átalakítók vagy csak pozitív vagy csak negatív értékű jeleket tudnak konvertálni. A jeltartomány alsó határa általában nulla, a felsőt pedig méréshatárnak nevezik, jele FS (**F**ull **S**cale). A teljes tartomány jele FSR (**F**ull **S**cale **R**ange). A **bipoláris** jeltartomány általában nullára szimmetrikus, -FS-től FS-ig terjed. A méréshatár legtöbbször az átalakítóban alkalmazott referenciafeszültség értékével egyezik meg. A leggyakoribb bipoláris kódolások:

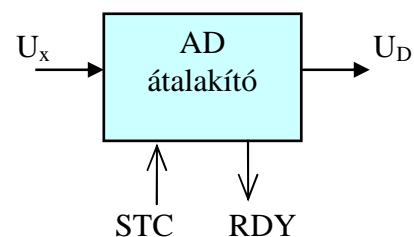
- előjel és abszolút érték,
- eltoló nullpontú,
- egyes komplement,
- kettes komplement.

- **Felbontóképesség:** az a legkisebb megváltozása az analóg jelnek, amit még megkülönböztet az átalakító. Egy n bites átalakítónál ez elvileg kiszámítható az

$$\text{analóg jeltartományból: } \text{felbontóképesség} = \frac{FSR}{2^n}$$

- **Mintavételezési frekvencia:** fontos, hogy az adott jel információt hordozó legmagasabb frekvenciájú komponense is átalakításra kerüljön, ezért a mintavételezési frekvenciát ennek tízszeresére szokás választani.

- **Átalakítási sebesség/idő:** az A/D átalakító a konverziót általában egy „átalakítás indítás” (STC = Start Conversion) jelre kezdi meg. Ha vége a műveletnek, azt egy „kész” (RDY = ReaDY) jel kiadásával adja tudtunkra.



Az átalakítási idő az indítójel és az eredmény megjelenése között eltelt idő. Az átalakítási idő bizonyos átalakító-típusoknál hosszabb is lehet, mint a mintavételezési periódusidő, ez felépítéstől függ (pl. flash átalakítók).

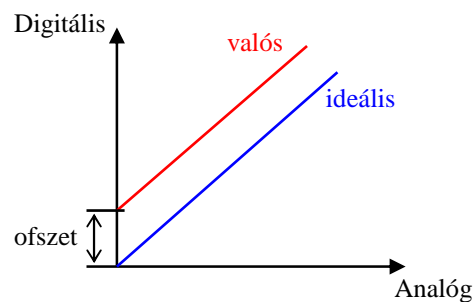
- **Pontosság:** a kvantálási zaj és az átalakító ideálistól eltérő jelleggörbéje miatt nem hibamentes a konverzió. LSB-ben (Least Significant Bit) vagy %-ban adják meg, általában méréshatáron (itt a legkisebb a hiba a teljes értékhez viszonyítva).

2.4. Az A/D átalakítók hibái [4],[7],[12]

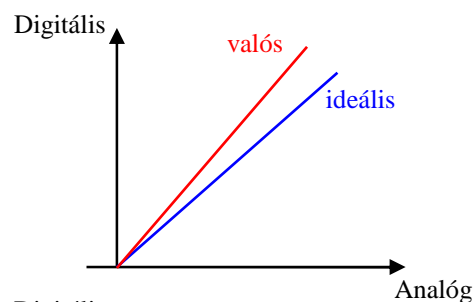
Az átalakítóknak statikus és dinamikus hibáik is lehetnek. A **statikus hibák** a lassan változó vagy DC bemenő jel esetén fellépő hibák, melyek az átalakítási karakterisztikának az ideálistól való eltéréseivel jellemezhetők. A **dinamikus hibákat** az átalakító frekvenciafüggésével és a mintavétel időzítésének hibáival szokás jellemezni.

Az átalakítási karakterisztika hibái:

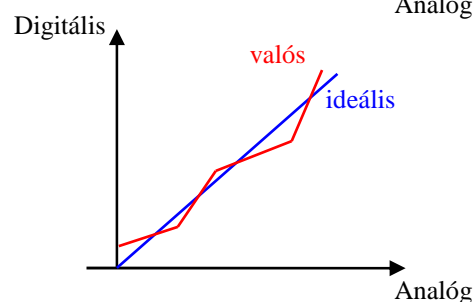
- **Nullponti, vagy ofszet hiba:** a nullpont eltolódása. Kiküszöbölhető.



- **Erősítési hiba:** a karakterisztika meredekségének ideálistól való eltérése. Általában az átalakító valamelyik erősítője okozza. Kiküszöbölhető.



- **Linearitási hiba:** a karakterisztika lineáritásól való eltérése. Általában csökkenthető, de nem szüntethető meg. Következtethetünk belőle az átalakító minőségére.



Az átalakítás frekvenciafüggése:

A mintavételi frekvencia felénél (Nyquist frekvencia) nagyobb frekvenciák az átlapolódás (aliasing) miatt hibát okoznak.

Az A/D átalakító analóg funkcionális részeinek frekvenciafüggése miatt az átalakítási tényező ill. az FS érték változik a frekvencia függvényében. Ha a bemenő jel nem szinuszos, hanem összetett jel, akkor a kimenő jelalak eltérhet ettől, a különböző frekvenciájú komponensek eltérő átvitele miatt.

A mintavétel időpontjának bizonytalansága a jelmeredekség növekedésével egyre nagyobb hibát okoz. A mintavétel időpont bizonytalansága által okozott hibát *apertúra-hibának* szokás nevezni. A mintavétel időpontjának bizonytalanságát több tényező okozhatja. Például ingadozhat a mintavételt indító vezérlőjel periódusideje, vagy a mintavétel késhet az indítójelhez képest (apertúra-késés). A bemenő jel frekvenciájának növelésekor megnőnek az átalakító linearitási hibái és zajai.

Az átalakítási jellemzők függhetnek még a környezeti hatásoktól is, elsősorban a hőmérséklettől és a tápfeszültség ingadozásától. Az adatlapokon a szobahőmérsékleten értendő értékek vannak feltüntetve. Továbbá a környezet elektromágneses zavarása is hibát okozhat (EMI, ElektroMágneses Interferencia), ami rendszerint az átalakító saját zajának jelentős megnövekedéseként jelentkezik.

2.5. A/D átalakító típusok [1],[3],[4],[7],[9]

Közvetlen:

- Többkomparátoros (Flash ADC (Analog to Digital Converter))

Számlálót alkalmazó megoldások:

- Lépcsős számláló (Ramp ADC)
- Fokozatos közelítésű (Successive Approximation ADC)
- Követő (Tracking ADC)

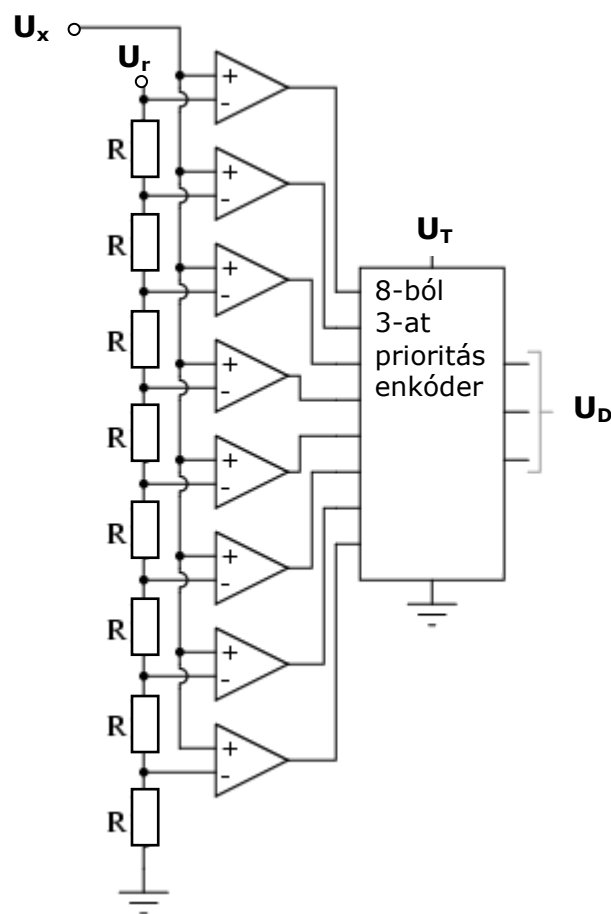
Közvetett:

- Feszültség-frekvencia átalakításos
- Feszültség-idő átalakításos (integráló, kettős meredekségű integráló)

- Delta-sigma ($\Delta\Sigma$) átalakítók

Közvetlen átalakítók:

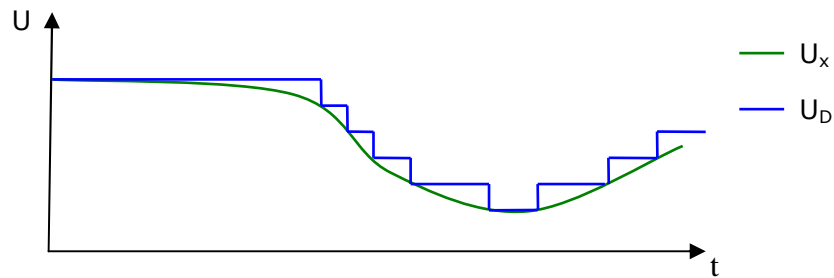
2.5.1. Többkomparátoros: a leggyorsabb (innen a neve: flash converter), de egyben a legdrágább típus. Az átalakítás egy órajel alatt, párhuzamosan történik, ehhez 2^n számú komparátorra van szükség, ahol n a bitek száma. A képen látható három bites változatnál ez még csak 8 darabot jelent, de egy 12 bites átalakításnál már 4096-ot. A flash konverterek tipikus működési frekvenciája 100-200 MHz, az ehhez tartozó integrálási idők 5-10 ns értékűek. Digitális, tárolós oszcilloszkópokban használják.



8. ábra: Többkomparátoros AD átalakító (3 bites)

A mérés elve: a mérendő jelet egy időben több komparátorral hasonlítjuk össze, melyeknek különböző bemeneti feszültséget állít elő az ellenálláslétra. A komparátorok akkor adnak kimenő jelet, ha a pozitív bemenetre kapcsolt U_x feszültség nagyobb, mint a negatív bemenetre kapcsolt leosztott referencia

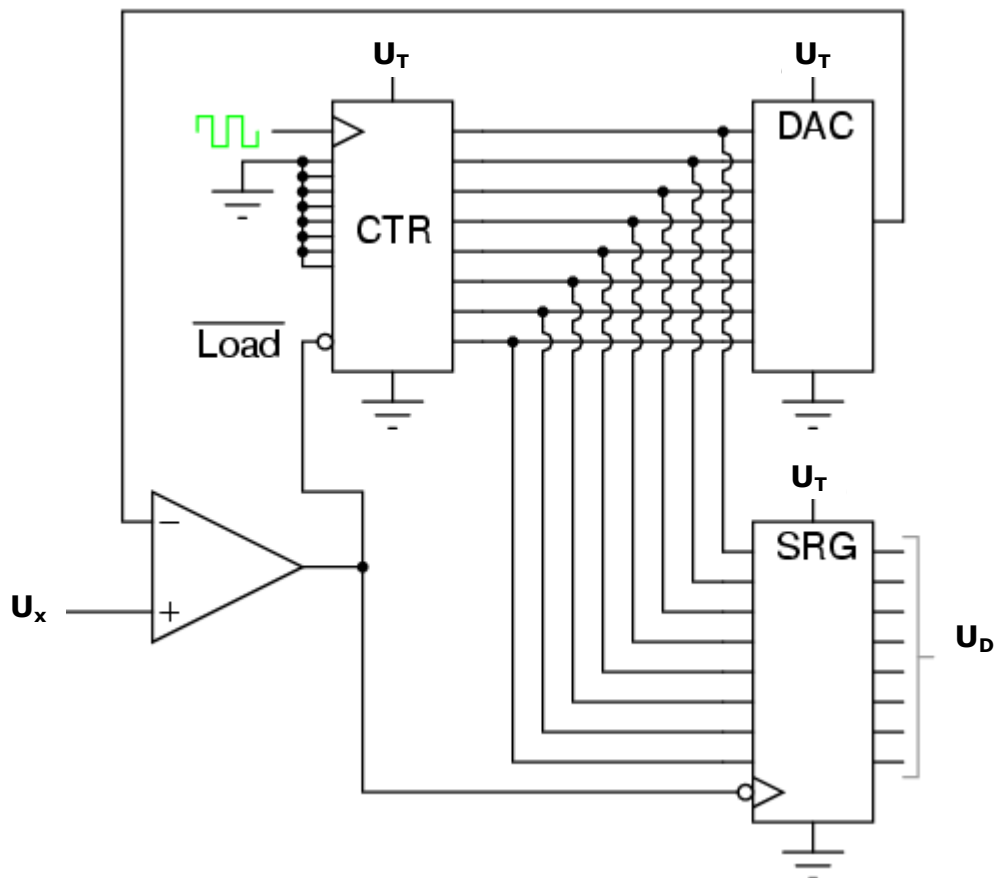
feszültség, vagy azzal egyenlő. A referencia feszültség egy stabilizált tápegységtől kapott precíz, állandó érték. Az átalakító, működési elve miatt egy polarítású.



9. ábra: Többkomparátoros AD átalakító működése

2.5.2. Lépcsős számláló

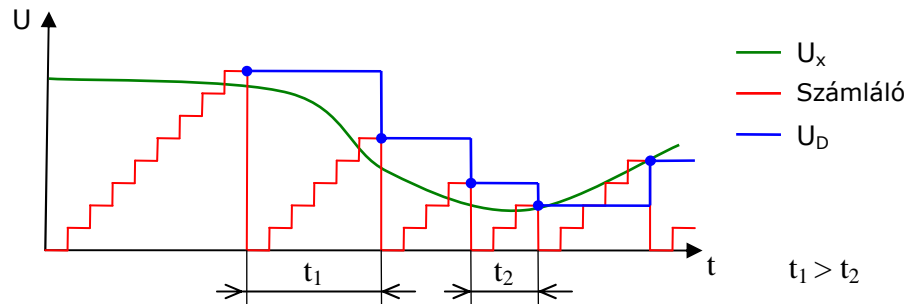
Egyszerű felépítésű átalakító, melynek azonban számos hátránya van.



10. ábra: Lépcsős számláló AD átalakító

Működése: egy szabadon futó bináris számláló (CTR) kimenetét egy DA átalakítóra kötjük, a kapott analóg jelet pedig egy komparátorral összehasonlítjuk a bemenő jellel. Amikor a felfelé számláló eléri az analóg jelet, a komparátor kimenete 0-ra vált, mert a negatív bemenetére nagyobb értékű feszültség kerül. Ez

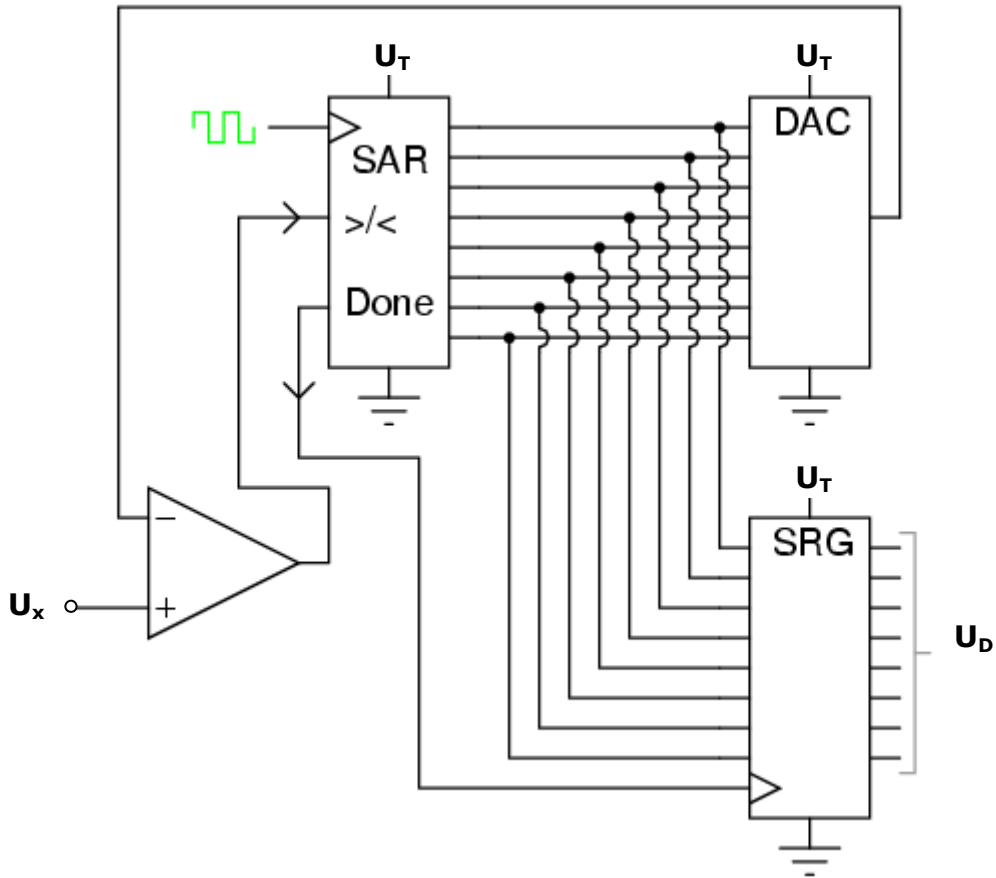
a 0 jel két helyen is változást okoz: a felfelé számlálót nullázza, és a shift-regiszter (SRG) kiadja a bementén abban a pillanatban lévő bináris számot. A számláló mindig nulláról indul újra, ezért a mérés ideje az analóg jel nagyságától függően más-más hosszúságú lehet. Ez az átalakító egyik hátránya, a másik, ami szintén ebből következik, hogy lassú. Konverziós ideje rendszerint 1ms és 1s közé esik. Előnyei, hogy olcsó, kevés alkatrészből felépíthető, és zajvédettsége is jó. Bipoláris működésű.



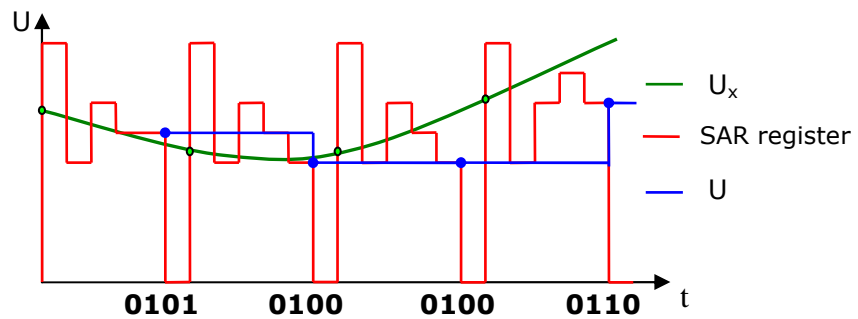
11. ábra: Lépcsős számláló AD átalakító működése

2.5.3. Fokozatos közelítésű vagy szukcesszív approximációs (successive approximation)

Nevezik még kétoldali közelítésesnek is. Az egyik legelterjedtebb átalakító a számítógépes mérésadatgyűjtő berendezésekben. A lépcsős számláló hátrányainak kiküszöbölése érdekében a számláló áramkör helyett egy speciális SAR regisztert (successive approximation register) alkalmaznak. Ez az áramkör a legmagasabb helyértékű bittel (MSB – Most Significant Bit) kezdve végigpróbálja a bináris szám egyes jegyeinek lehetséges értékeit. Azaz először a legmagasabb helyértékű bitre 1 értéket állít be, az ennek megfelelő feszültséget a komparátor összehasonlítja a bemenettel, és ha ez kisebb, akkor a következő bitet is 1-re állítja, megismételve az eljárást. Ha nagyobb lett a beállított szám, akkor visszaállítja 0-ra, és a következő bitet váltja egyre. Ez egészen a legkisebb helyértékig (LSB – Least Significant Bit) folytatódik. Fontos, hogy az átalakítás alatt a jel állandó legyen (tartó!). Ha a jel nem állandó, akkor az átalakítási időtartam valamelyik pillanatában fennálló értéket szolgáltatja az átkódoló.



12. ábra: Fokozatos közelítésű AD átalakító

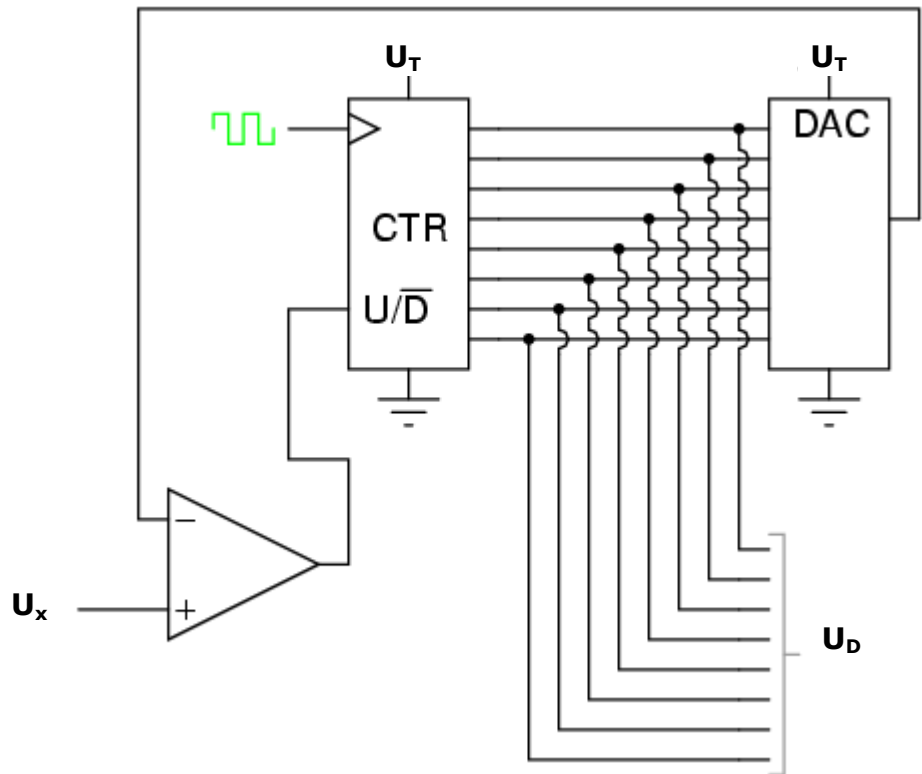


13. ábra: Fokozatos közelítésű AD átalakító működése

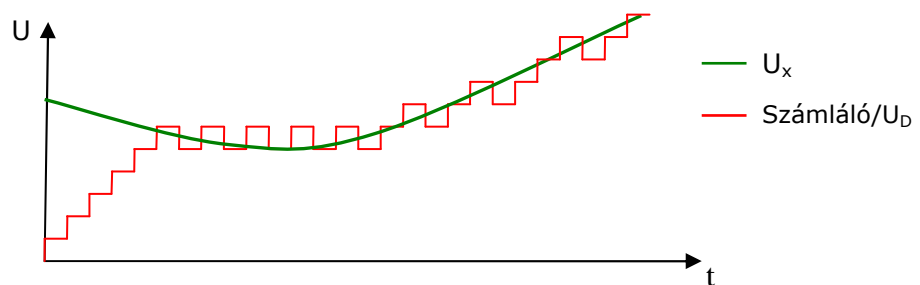
Az diagramon látható, hogy az átalakítás mindig ugyanynyi ideig tart, a mintavételezési idő állandó. Nagyobb ugrásokkal, hatékonyabban közelíti meg az analóg jelet, mint a lépcsős számláló. Az ábrán természetesen az előző ábrához képest nagyított a lépték, a jobb láthatóság kedvéért és a mintavételezés is sűrűbb a valóságban. Az átalakító pontos, de hátránya, hogy pillanatértéket mér, és ebből kifolyólag zajérzékeny. Működése bipoláris.

2.5.4. Követő A/D átalakító

Ez a harmadik, számlálót alkalmazó megoldás. A lépcsős megoldásban alkalmazott felfelé számláló helyett itt egy föl-le számlálót használnak.



14. ábra: Követő AD átalakító



15. ábra: Követő AD átalakító működése

Működése: a föl-le számlálást váltó bemenetre a komparátor kimenetét kötik, így a számláló mindig a megfelelő irányba fogja változtatni az értékét. Ha a bemenő analóg jel nem változik túl gyorsan, a kimenő digitális jel jól követi azt.

A kimeneten nincsen szükség shift-regiszterre, mert a számláló kimenete minden órajelre követi a bemenő jelet. Ezzel az átalakítás sebessége is jobb, mint az előző esetekben. Bekapcsolásnál természetesen időre van szüksége, amíg a

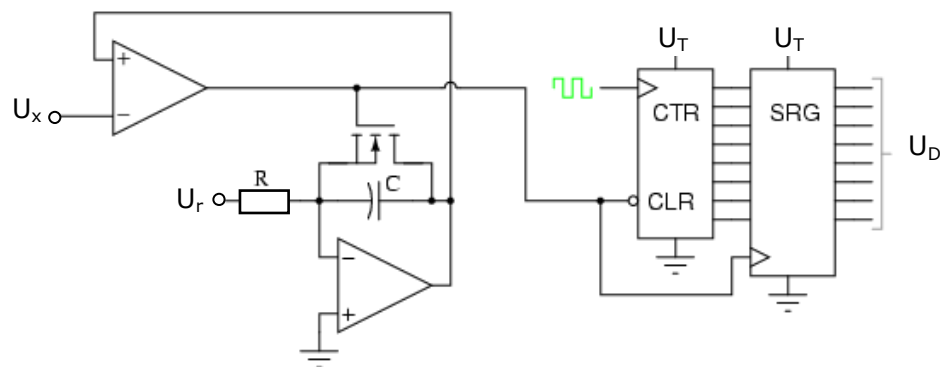
számláló eléri a jelet, de utána nem távolodik el tőle. Hátránya, hogy a kimenő jel „ugrál” az órajel ütemében és amplitúdójával, ezt sok alkalmazás nem tűri.

Közvetett átalakítók:

Az előbbiekhöz hasonlóan a következő két megoldás is alkalmaz számláló áramkört, de az már egy közvetett mennyiséget számol, nem a bemenő jelet méri.

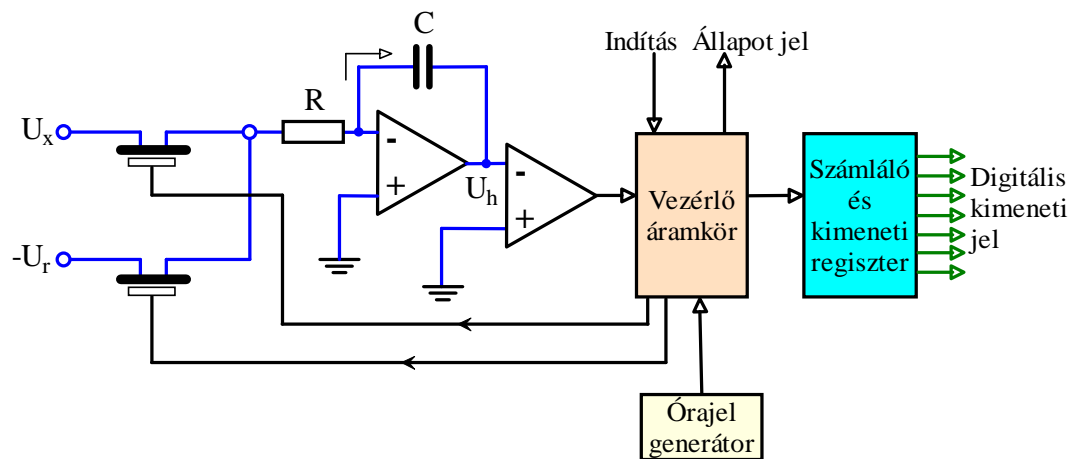
2.5.5. Feszültség-idő átalakításos

A feszültség idő átalakítást integrálással érjük el. Létezik egyszeresen és kétszeresen integráló átalakító. Az egyszeresen integráló átalakító működése nagyon hasonlít a lépcsős számláló megoldásra. A bemenő jelet egy integrátor kimenetével hasonlítjuk össze. Amikor a lineárisan emelkedő integrátor kimenet eléri a bemenő jelszintet, az integrátorral párhuzamosan futó számláló kimenetét egy shift-regiszterrel a kimenetre juttatjuk, az integrálás pedig újra kezdődik.

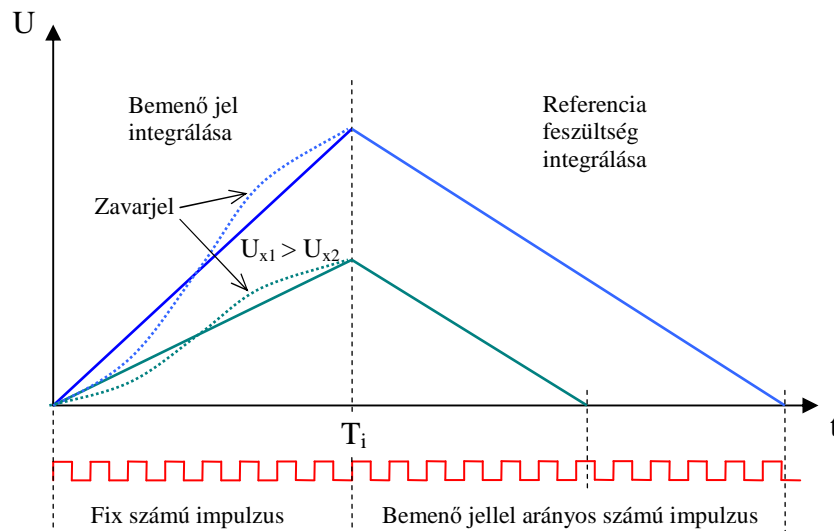


16. ábra: Integrátoros AD átalakító

Ez a módszer ugyanolyan hátrányokkal rendelkezik, mint a lépcsős számláló, ráadásul még a számlálót is szinkronizálni kell az integrátorral. Egyetlen előnye, hogy nem kell DA átalakítót alkalmazni, így valamivel egyszerűbb az áramkör. A 70-es évek vége óta nem gyártanak ilyeneket. A helyét a kettős meredekségű integráló vette át, ahol a bemenő analóg jelet egy rögzített T_i ideig integráljuk, majd egy ellenkező előjelű állandó értékű egyenfeszültség bekapcsolásával a kondenzátort kisütjük. A kisülés ideje arányos a bemenő jel nagyságával.



17. ábra: Kettős meredekségű AD átalakító



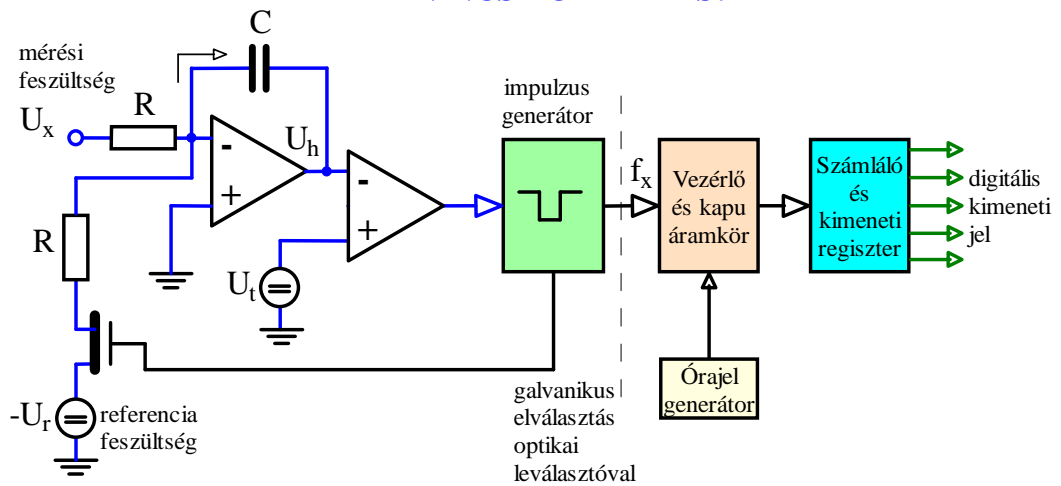
18. ábra: Kettős meredekségű AD átalakító működése

Az átalakító fontos tulajdonsága, hogy az integrálási idő (T_i) megválasztásával $1/T_i$ frekvenciájú zavarjel kiszűrhető. Mivel az átalakító nem pillanatértékből mér, hanem egy tartomány átlagából számol, ezért például ha egy szinuszos zavarjelnak ebbe a tartományba egy periódusa fér bele, úgy annak integrálja 0 lesz. Magyarországon ez az időállandó a hálózati 50 Hz hatásának megszüntetéséhez 20ms-ra választandó. Az átalakító ezért és működéséből kifolyólag nem tartozik a leggyorsabbak közé (maximum 40ms mérési idő), mégis elterjedten alkalmazzák, kedvező ára és zajtűrése miatt. Az átalakítás pontossága nem függ az R, C elemek és az órajel pontosságától, mivel a töltéshez és a kisütéshez ugyanazokat az elemeket használják. Digitális multiméterekben használják többek közt.

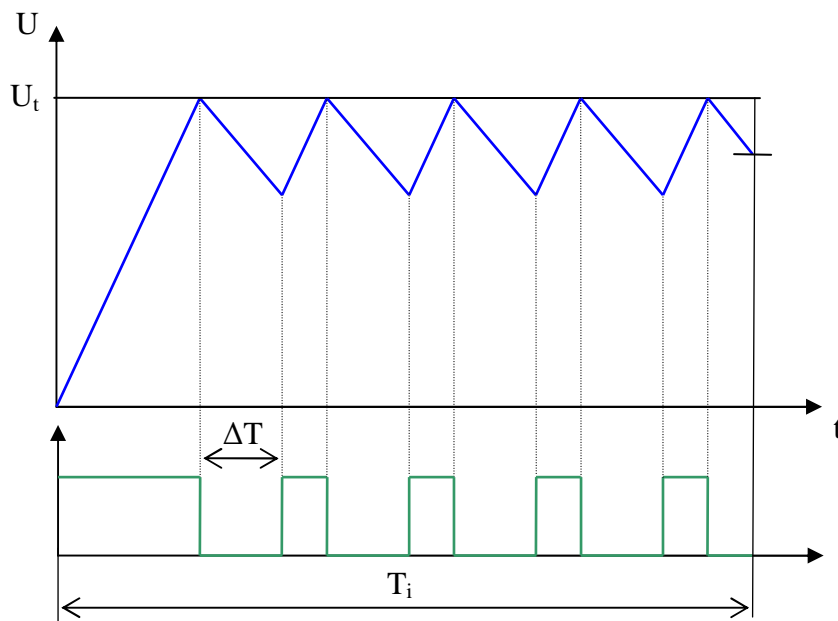
2.5.6. Feszültség-frekvencia átalakítás

A feszültség-frekvencia konvertereket általában egyszerűbb, kis igényű rendszerekben alkalmazzák.

Működési elve: a bemenő jelet integráljuk, amíg el nem érünk egy komparálási szintet, utána az átalakító egy ellenkező előjelű feszültséget kapcsol ΔT ideig az integrátorra, amely azt részben kisüti, majd újra a bemenő jelet integrálja a komparálási szintig. Így egy fűrészjelet kapunk, melynek frekvenciája arányos a bemenő jel nagyságával.



19. ábra: Feszültség-frekvencia átalakításos AD átalakító



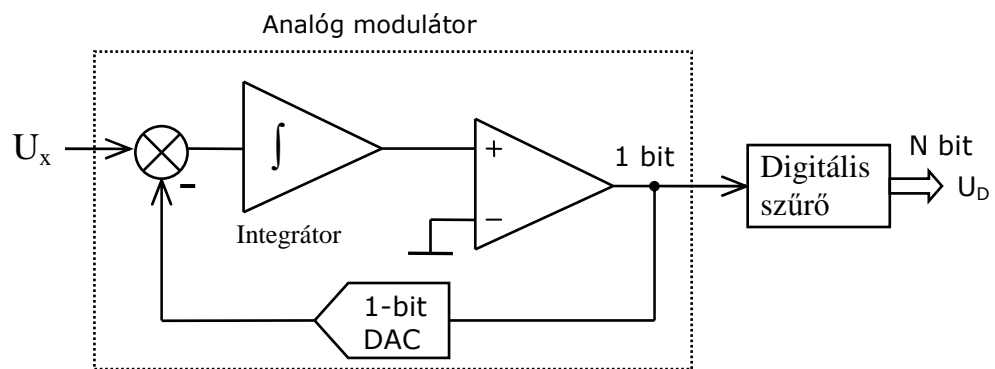
20. ábra: Feszültség-frekvencia átalakításos AD átalakító működése

Ez az átalakító valamivel gyorsabb, mint a kettős meredekségű integráló A/D (~25ms átalakítási idő). A zajelnyomási tulajdonsága olyan jó, hogy ipari perifériákban gyakran alkalmazzák.

2.5.7. Delta-sigma átalakítók [8],[11]

Az utóbbi években váltak elterjedtté a kvantálási zaj-formáláson alapuló 1 bites delta-sigma vagy szigma-delta átalakítók. Előnyük, hogy gyors, nagy pontosságú, kis teljesítményigényű és olcsó megoldást kínálnak.

Két részből tevődik össze: egy egyszerű analóg és egy komplexebb digitálisból. Az analóg fele az átalakítónak egy 1 bites A/D átalakító, amivel túlmintavételezzük (oversampling) a bemenetet. Ez azt jelenti, hogy a szükséges mintavételezési frekvencia többszörösét (akár 64x-esét) alkalmazzuk. Az A/D átalakítóból jövő túlmintavételezett bitsorozatot a digitális modul szűri, és átalakítja megfelelő frekvenciában érkező bináris szavakra.

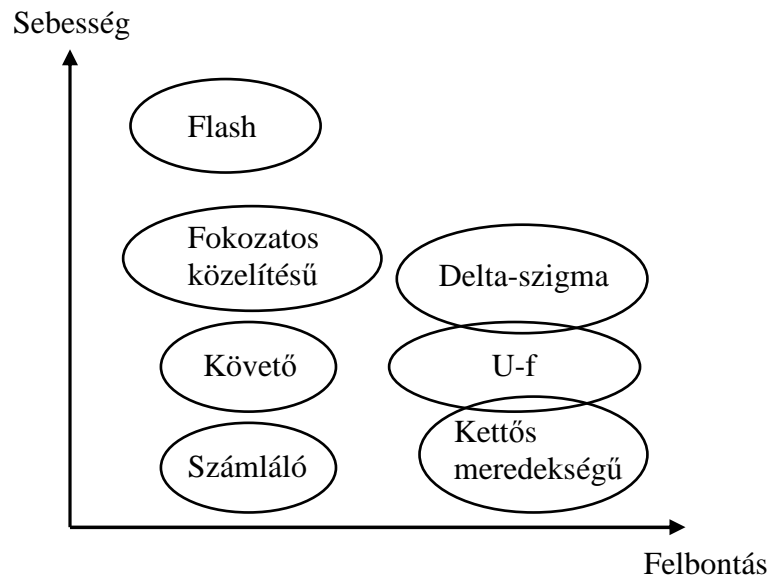


21. ábra: Szigma-delta AD átalakító vázlatos felépítése

Az analóg modulátorban található 1 bites DA konverter áramkör tulajdonképpen egy egyszerű kapcsoló, ami a pozitív és negatív referenciafeszültséget váltja. Az a feladata, hogy az integrátor kimenetét a komparátor referenciaszintje közelében tartsa.

Főként audió és telekommunikációs eszközökben, illetve frekvencia analizátorokban alkalmazzák.

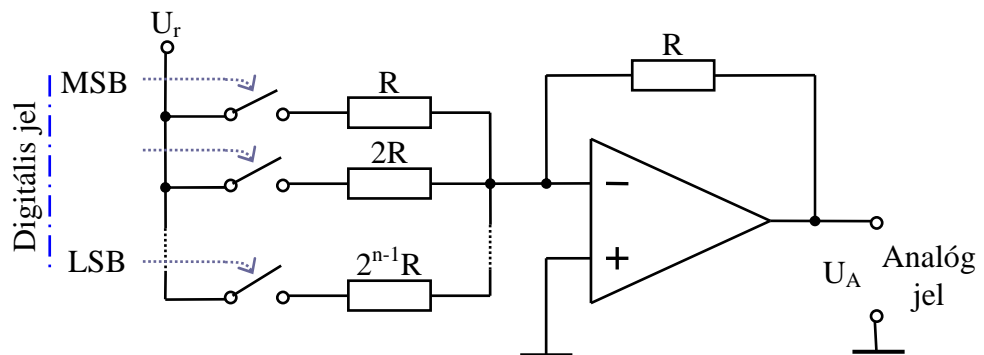
Az átalakítók összehasonlítása sebesség és felbontás tekintetében:



22. ábra: AD átalakítók összehasonlítása

2.6. DA átalakítók [1],[3],[7]

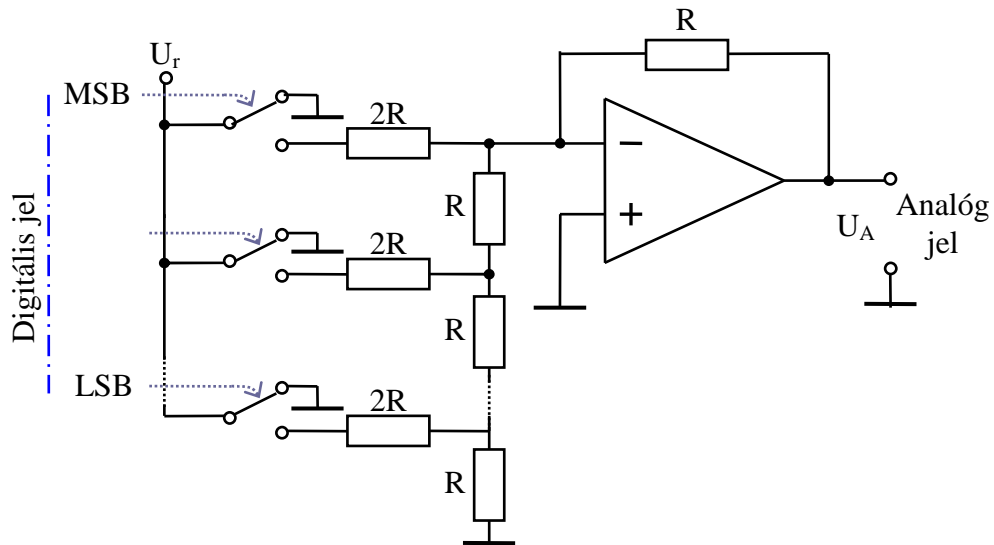
A digitál-analóg átalakítók között nincs annyiféle módszer, mint az A/D átalakítók körében. A leggyakrabban alkalmazott megoldás az ellenálláslétrás leosztás. Ez az áramkör alapvetően egy speciálisan beállított és vezérelt analóg összegző áramkör.



23. ábra: n-bites $R/2^{n-1}R$ ellenálláslétrás DA átalakító

A vezérlést a digitális jel végzi a kapcsolósor segítségével. Ha az adott bit értéke 0, a kapcsoló nyit, ha a bit 1, a kapcsoló zár, kapcsolva U_r referenciafeszültséget, ami az analóg jeltartomány maximális feszültség értékének a fele.

Az ún. $R/2^{2-1}R$ ellenálláslétrás DA átalakító hátránya, hogy pontos, széles átfogású ellenállásokra van szükség. Ezért helyette $R/2R$ létrahálózatot használnak.



24. ábra: $R/2R$ létrahálózatos DA átalakító

A valós áramkörökben a mechanikus kapcsolók helyett FET tranzisztorok vannak. Az átalakító beállási ideje μs nagyságrendű. A bipoláris technikában feszültségosztás helyett súlyozott áramgenerátorok áramait is összegezzük egy ellenállás segítségével.

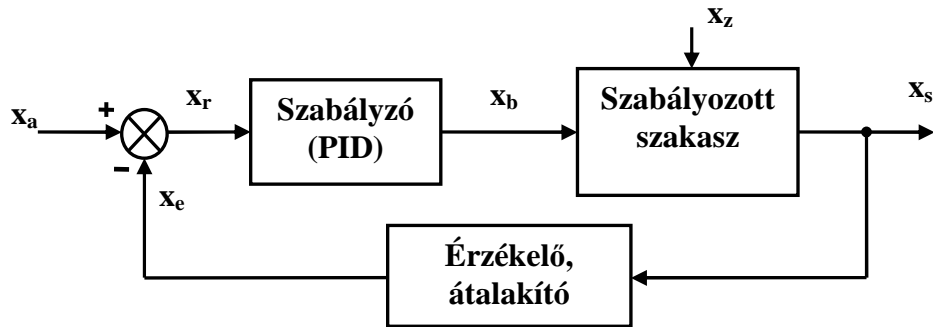
Léteznek még delta-sigma átalakítók is, ezek hasonló kialakításúak, mint az A/D átalakítóknál leírt változat. A különbség annyi, hogy itt analóg helyett digitális modulátor van és digitális helyett analóg szűrő. Ezekkel nagy felbontású digitális jeleket lehet jó minőségben átkonvertálni.

A DA átalakító után szűrőt kell beépíteni, hogy a nemkívánatos, kvantálásból adódó frekvenciakomponenseket leválasszák.

3. Digitális PID szabályozás

3.1. A PID szabályozás alapjai

A több mint 60 éve használt PID a legelterjedtebb visszacsatolásos szabályzó-algoritmus az ipari folyamatirányításban. Köszönheti ezt annak, hogy a robusztus, könnyen megérthető algoritmus kiváló szabályzási teljesítménnyel rendelkezik, a szabályozott folyamatok különböző dinamikus paramétereinek esetén is. Más, egyszerűbb algoritmusokhoz képest a PID gyorsabb és pontosabb beállást biztosít.



Jelmagyarázat:

- x_a = alapjel
- x_r = rendelkező vagy hibajel
- x_b = beavatkozó jel
- x_s = szabályozott jellemző
- x_e = ellenőrző jel
- x_z = zavarjel

25. ábra: Általános (analóg) szabályozókör

Ahogy a nevéből is látszik, a PID három részből tevődik össze:

- P, proporcionális, azaz arányos tag
- I, integráló tag
- D, differenciáló tag

Ezek a tagok párhuzamosan, egymás hatását erősítve, vagy gyengítve működnek. Az irányított folyamat típusától függően használhatjuk csak a P, vagy PI részét a PID-nek. Lomha, nagy időállandós folyamatoknál, vagy ahol nem számít a gyorsaság, ott elég a PI szabályzó.

Az arányos algoritmus (P tag)

A jelek aktuális értékéből számol. Egy konstanssal szorozza meg a rendelkező jelet. Ha a rendelkező jel zérus, a P tag is nullát ad a kimenetén.

Képlete: $x_b = K_c \cdot x_r$, ahol K_c az arányossági tényező

Az arányossági tényező növelésével a szabályzó gyorsabban, arányosan nagyobb beavatkozó jellel reagál a hibajel változására, így hamarabb beáll a rendszer. Bizonyos határon túl való növelésével a rendszer instabillá válik, lengeni kezd.

Integráló tag

Az integráló tag felelős a pontosságért. Az arányos tag nem tudja a szabályozás végén maradó hibát kezelni, erre vezették be az integráló tagot, ami a hibajel integrálásával folyamatosan növeli, vagy csökkenti a beavatkozó jelet.

Így eltünteti a legkisebb hibát is. Ezért nem lehet kihagyni az I tagot a PID szabályozóból, ezért nem alkalmaznak PD szabályzót.

Képlete:
$$x_b(t) = \frac{1}{T_i} \int x_r(t) dt,$$

frekvenciatartományban:
$$X_b(s) = \frac{1}{sT_i} x_r(s),$$

ahol T_i az integrálási időállandó.

Az integrálási időállandó értékének növelésével a beállási idő is nő, míg csökkentésével gyorsíthatjuk a folyamatot. Túlzott csökkentésével azonban a rendszer lengési hajlama is megnő. Ez a lengés lehet csillapódó, állandó és növekvő amplitúdójú is, az időállandótól függően.

Differenciáló tag

Ez a tag a gyors változások követésében, a szabályozás sebességének növelésében játszik szerepet. Ellensúlyozza az integráló tag lassító hatását. A differenciáló tag a rendelkező jel változásának mértéke alapján növeli, vagy csökkenti a beavatkozó jelet.

Képlete (elméleti):
$$x_b(t) = T_D \frac{dx_r(t)}{dt}$$

Frekvenciatartományban:
$$x_b(s) = sT_D x_r(s),$$

ahol T_D a differenciálási időállandó.

A differenciálási időállandó növelésével gyorsíthatjuk a beállási folyamatot, túlzott növelésével lengések keletkezhetnek.

Párhuzamos és soros PID

Általában kétféle változatát különböztetjük meg a P, I és D tagok használatban lévő elrendezéseinek.

A párhuzamos elrendezésekben az egyes tagok állandóit külön-külön módosíthatjuk, nincsenek egymásra hatással.

$$x_b = K_c x_r + \frac{K_i}{sT_i} x_r + sK_D T_D x_r$$

A soros elrendezésben, ha módosítjuk az erősítést (K), ami egy kiemelt konstans, mindhárom tag működését befolyásoljuk. Ez a klasszikusabb megoldás, de nehezebben, szinte csak megérzésen alapulva hangolható.

$$x_b = K \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_D \right) x_r$$

Ezek természetesen elméleti PID algoritmusok, az analóg valóságban különböző problémák miatt nem valósíthatóak a fenti képletek szerint.

A szabályzó hangolása [14]

A szabályzó algoritmusban szereplő konstansokat (K , T_i , T_D) több módszer alapján is meghatározhatjuk. Ha a valós rendszer matematikai modellje a rendelkezésünkre áll, akkor abból egyértelműen meghatározhatók ezek az értékek. Ha a rendszer túl bonyolult ahhoz, hogy modellezzük, vagy a modellezés nem ad pontos eredményt, akkor tapasztalati hangolási módszerekhez folyamodhatunk. Ezen módszerek közül a legelterjedtebb a Ziegler-Nichols.

Ziegler-Nichols módszer. A szabályozókör nyitott és zárt állapotára is létezik megoldás ezzel az algoritmussal. Én a zárt kör hangolását részletezem. A méréshez szükség van a folyamatváltozó időbeli változásának regisztrálására. A legalkalmasabb erre egy digitális oszcilloszkóp.

A szabályzóban először csak a P tagot kapcsoljuk be, kezdetben kis K értékkel. Az alapjel legyen egy átlagos érték. Majd kezdjük el növelni K értékét. A rendszer egyre több lengéssel fog beállni, míg végül be sem áll, csak leng, először állandó, majd növekvő amplitúdóval. Addig növeljük K értékét, amíg konstans amplitúdójú lengéseket kapunk. Ez az érték a kritikus erősítés, K_H . Mérjük meg a lengés periódusidejét (t_p). Ebből a két értékből számolható K , T_i és T_D .

	K	T_i	T_D
P	0,5K _H	-	-
PI	0,45K _H	t _p /1,2	-
PID	0,6K _H	t _p /2	t _p /8

3.2. Digitális PID [14]

A digitális PID algoritmusának létrehozásához szükség van az egyes tagok digitális, rekurzív alakjára. A tagok z-transzformált alakjából z-tartománybeli átviteli függvényt kaphatunk.

Az arányos tag esetén a digitális algoritmus nem különbözik sokban az analógtól:

$$x_b(kT) = K_C x_r(kT)$$

egyszerűsített jelölés: $x_b(kT) = y_k$, és $x_r(kT) = x_k$

ezzel: $y_k = K_C x_k$

A z-átviteli függvény:
$$P(z) = \frac{y_z}{x_z} = K_C,$$

ahol $y_z = Z\{y_k\}$ és $x_z = Z\{x_k\}$ a bemenő és a kimenő jelek z-transzformáltjai.

Integráló tag:

Diszkrét formája:

1-es típus:
$$y_k = \frac{1}{T_i} \sum_{i=1}^{k-1} x_i T$$

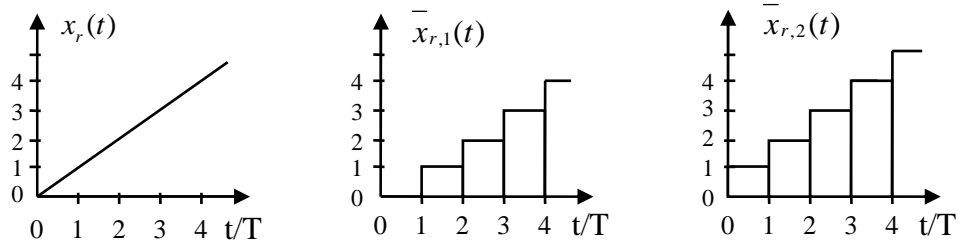
2-es típus:
$$y_k = \frac{1}{T_i} \sum_{i=1}^k x_i T$$

Rekurzív formula:

1-es típus:
$$y_k = \frac{1}{T_i} \sum_{i=1}^{k-2} x_i T + \frac{1}{T_i} x_{k-1} T \rightarrow y_k = y_{k-1} + \frac{T}{T_i} x_{k-1}$$

2-es típus:
$$y_k = \frac{1}{T_i} \sum_{i=1}^{k-1} x_i T + \frac{1}{T_i} x_k T \rightarrow y_k = y_{k-1} + \frac{T}{T_i} x_k$$

Mindkét változat téglányintegrálás, annyiban térnek el egymástól, hogy az első a kimenet és a bemenet előző állapotából számol, míg a második a kimenet előző és a bemenet aktuális értékét veszi figyelembe.



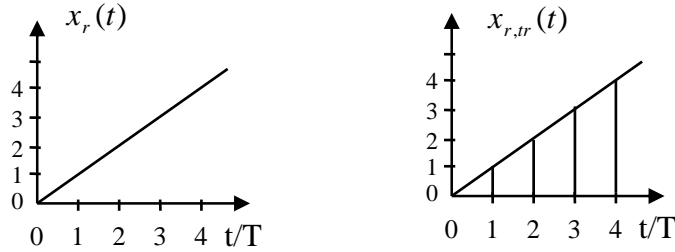
26. ábra: 1-es és 2-es típusú integráló algoritmus

A harmadik típusú algoritmus a trapéz-közelítést alkalmazza.

Képlete:
$$y_k = \frac{1}{T_i} \sum_{i=1}^k \frac{1}{2} (x_i + x_{i-1}) \cdot T = \frac{T}{2T_i} \sum_{i=1}^k (x_i + x_{i-1})$$

(k-1)-edik mintavételezési időpontban:
$$y_{k-1} = \frac{T}{2T_i} \sum_{i=1}^{k-1} (x_i + x_{i-1})$$

Rekurzív formula:
$$y_k = y_{k-1} + \frac{T}{2T_i} (x_i + x_{i-1})$$



27. ábra: Trapéz-közelítésű integráló algoritmus

Z-transzformált alak (1-es típus):
$$y_z = y_z \cdot z^{-1} + \frac{T}{T_i} x_z z^{-1}$$

z-átviteli függvényhez:
$$y_z(1 - z^{-1}) = \frac{T}{T_i} z^{-1} x_z$$

$$I(z) = \frac{y_z}{x_z} = \frac{T \cdot z^{-1}}{T_i(1 - z^{-1})} = \frac{T}{T_i(z - 1)}$$

Differenciáló tag:

Hasonlóan az integráló taghoz, itt is létezik kétféle típus: az első a k-adik és a k-1-edik rendelkező jelből számol, a második a k+1-edik és k-adikból. Mivel a k+1-edik adat még nem áll rendelkezésünkre, ez a típus úgymond jövőbe látást feltételez, ami még digitális világban sem megvalósítható, ezért csak az 1-es típussal foglalkozom.

Diszkrét formája:
$$y_k = T_D \frac{\Delta x(kT)}{\Delta t} = T_D \frac{x_k - x_{k-1}}{T}$$

Ez egyben rekurzív alak is.

Z-transzformált alak:
$$y_z = \frac{T_D}{T} (x_z - x_z \cdot z^{-1}) = \frac{T_D}{T} x_z (1 - z^{-1})$$

Z átviteli függvénye:
$$D(z) = \frac{y_z}{x_z} = \frac{T_D}{T} (1 - z^{-1}) = \frac{T_D(z - 1)}{T \cdot z}$$

A digitális PID átviteli függvény a három tag z-átviteli függvényének összege:

$$PID(z) = P(z) + I(z) + D(z)$$

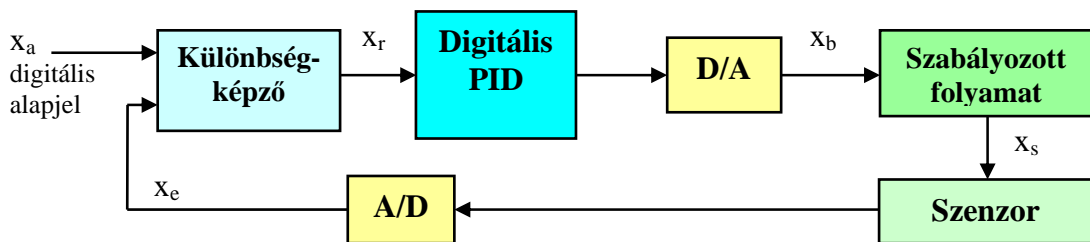
$$P(z) = K_z + \frac{T}{T_i(z - 1)} + \frac{T_D(z - 1)}{T \cdot z}$$

Digitális világban nincsenek olyan áramkör-megvalósítási, technikai problémák, mint analóg esetben, de mivel a valós rendszerek eltérnek az elméletben leírt vagy leírható modellektől, ezért szükség lehet egyéb kis módosításokra a PID algoritmusában.

A gyártók a végleges megoldásokat nem szokták közzétenni, de sok problémára vannak általános megoldások.

3.3. Digitális szabályzó kör

A digitális formájú alapjelből egy különbségképző áramkör kivonja az A/D átalakító után szintén digitális ellenőrző jelet, ez kerül a digitális PID bemenetére. A folyamatra a beavatkozó jel egy DA átalakító után, már analóg formában kerül. A folyamatváltozó állapotát a szenzor kimenő jele mutatja, ezt digitalizálnunk kell.

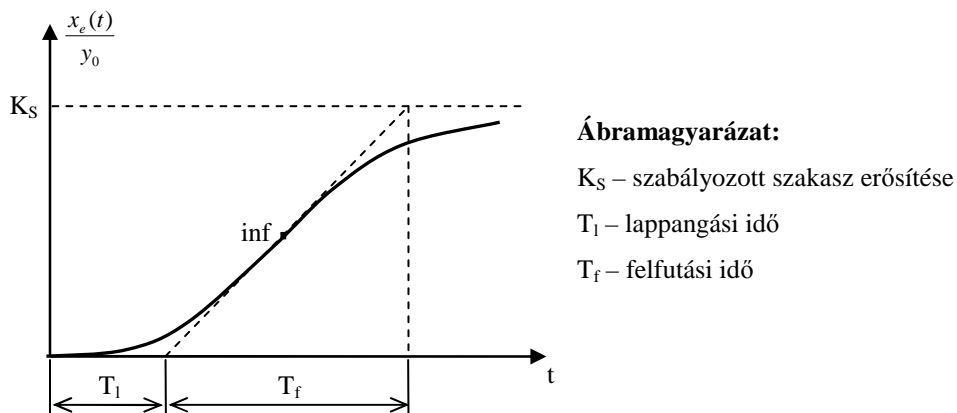


28. ábra: Digitális szabályzó kör

Az alapjel bevezetése történhet analóg formában is, ekkor vagy kettő A/D átalakítóra van szükség, vagy egy kétcsatornásra.

A digitális szabályzó kör hangolása [14]

A digitális szabályzó körnél a mintavételi frekvencia is befolyásolja a rendszer lengési tulajdonságait, ezért a Ziegler-Nichols módszer Takahashi által módosított változatát használhatjuk. Ez a módszer a szabályozott szakasz átmeneti függvényéből, azaz egységugrásra való válaszból számolja ki az optimális PID paramétereket.



29. ábra: Az ugrásfüggvény kiértékelése a Ziegler-Nichols hangolási módszerhez

A Takahashi féle hangolási módszer használatának feltétele: $T \leq 2T_l$

Takahashi a hangolási módszerében trapéz-közelítésű integráló tagot használ.

Ezzel a PID algoritmus:

$$y_k = y_{k-1} + K \left[x_{r,k-1} + \frac{T}{T_i} \cdot \frac{x_{r,k-1} + x_{r,k}}{2} + \frac{T_D}{T} (x_{r,k} - 2x_{r,k-1} + x_{r,k-2}) \right]$$

$$= y_{k-1} + K \left[\left(1 + \frac{T}{2T_i} + \frac{T_D}{T} \right) x_{r,k} - \left(1 - \frac{T}{2T_i} + 2 \frac{T_D}{T} \right) x_{r,k-1} + \frac{T_D}{T} \cdot x_{r,k-2} \right]$$

Ebben az egyenletben már szerepel a mintavételi idő, a többi együtthatót táblázatból számolhatjuk ki:

	K	T_i	T_D
P	$\frac{T_f}{K(T_l + T)}$	-	-
PI	$\frac{0,9 \cdot T_f}{K(T_l + \frac{T}{2})}$	$3,33 \cdot \left[T_l + \frac{T}{2} \right]$	-
PID	$\frac{1,2 \cdot T_f}{K(T_l + T)}$	$\frac{2 \left(T_l + \frac{T}{2} \right)^2}{T_l + T}$	$0,5 \cdot (T_u + T)$

A táblázatban a PID mellett P és PI szabályzókhöz is útmutatást kapunk. Összefoglalva a P, PI és PID szabályzó algoritmusát, a következő, egyszerűbb alakú, együtthatós egyenletet írhatjuk fel:

$$y_k = a_1 y_{k-1} + b_0 x_{r,k} + b_1 x_{r,k-1} + b_2 x_{r,k-2} ,$$

ahol a jelölések az eddigiekkel egyezők:

y_k : beavatkozó jel a k-adik mintavételezési időpontban

$x_{r,k}$: rendelkező jel a k-adik mintavételezési időpontban

Az együtthatók P, PI és PID szabályzó esetére visszahelyettesíthetők a táblázatból:

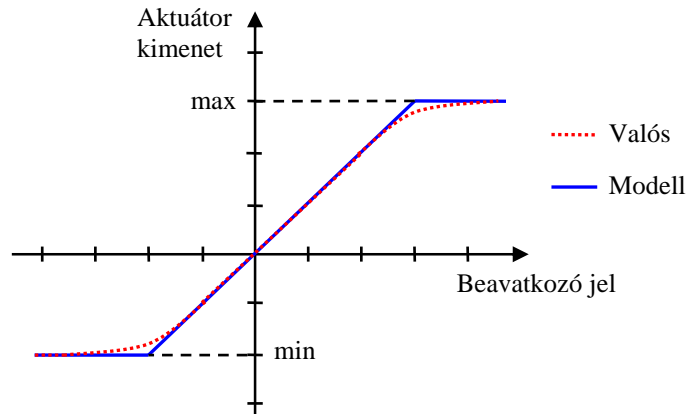
	a₁	b₀	b₁	b₂
P	0	K	0	0
PI	1	$K \left[1 + \frac{T}{2T_i} \right]$	$-K \left[1 - \frac{T}{2T_i} \right]$	0
PID	1	$K \left[1 + \frac{T}{2T_i} + \frac{T_D}{T} \right]$	$-K \left[1 - \frac{T}{2T_i} + 2 \frac{T_D}{T} \right]$	$K \frac{T_D}{T}$

A mai modern ipari környezetben gyakran alkalmaznak automata hangolási módszereket. Ezekben egy szoftver segítségével, matematikai módszerekkel találják meg az optimális szabályzó-paramétereket. Ezek azon alapulnak, hogy a rendszerbe egy impulzust vezetnek, és regisztrálják, majd elemzik a válasz frekvencia-összetevőit. Néhány digitális szabályzó önhangolásra is képes, ezek kis alapjel-változtatások mellett optimalizálják a szabályzót.

3.4. Problémák a PID algoritmussal [2]

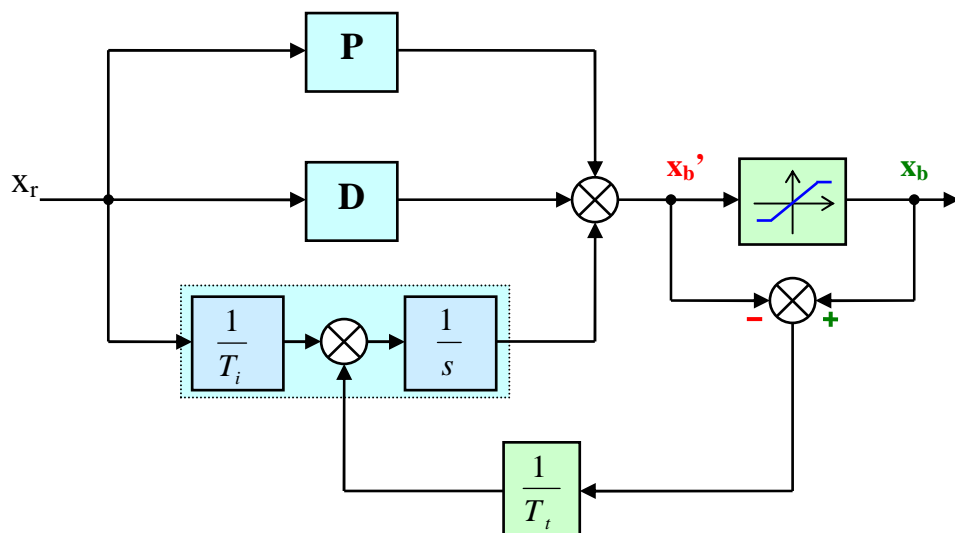
- **Digitális tüske:** a digitális világban a jelek hirtelen ugrásokkal is változhatnak, például ha az alapjelet nem potméterrel, hanem kapcsolóval változtatjuk meg, akkor a szabályzónk D tagja hirtelen nagy értéket, tüskét ad a kimenetre. Ennek megakadályozására azt a módszert alkalmazzák, hogy az alapjelet nem vezetik rá a deriváló tagra. Így a rendszer lassabban reagál az alapjel megváltozásaira, de káros túllövések nélkül.
- Probléma lehet a túl **agresszív alapjel-követés**. Ezt az arányos tag okozza. Egyik módszer ennek javítására, hogy az arányos taghoz sem vezetik az alapjelet. Így csak az integráló tag felelős az alapjel-követésért. Ez gyakran túl lassú működéshez vezet. Jobb megoldás egy súlyozó tényező bevezetése, amivel az alapjelet szorozzuk meg az arányos tag előtt.
- **Integrátor túltöltődés** (integral windup). [5],[6]

A windup, magyarul talán túltöltődés, az integrátor miatt következhet be olyan rendszerben, ahol jelkorlátozás van érvényben. A gyakorlati rendszerekben az aktuátorok, fizikai határaiknál fogva nem képesek bármekkora nagyságú beavatkozó jel végrehajtására, például egy szelepet nem lehet jobban kinyitni, ha már egészen nyitva van, vagy egy motornak is van fordulatszámhatára. Ez nemlinearitást okoz a szabályozási körben, mivel míg az aktuátor arányosan viselkedik a beavatkozó jel meghatározott tartományában, a korlátokon kívül nem képes növelni értékét, szaturál, telítődik. Ezt a következő ábrával szemléltethetjük:

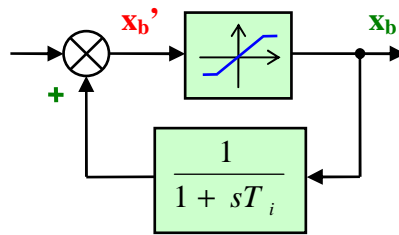


30. ábra: Korlátozott aktuátor karakterisztika

A valós görbe három lineáris egyenessel közelíthető. Ha az aktuátor elérte például a maximum határt, és a beavatkozó jel tovább növekszik, az aktuátor kimenete nem változik, tartja a megszabott korlátot. Ebben az esetben a szabályozási kör látszólag megszakad, mert ebben a tartományban a beavatkozó jel már nem befolyásolja a kimenetet.. Továbbá, mivel a szabályozási eltérés negatív marad, az integrátor növeli értékét, túltöltődik, ezt nevezzük integrator windup-nak. Amikor a szabályozott jellemző eléri az alapjelet, a szabályozónak bizonyos időre van szüksége, amíg visszanyeri az irányítást, a nagy integrátor értéknek le kell csökkennie. A szabályozott jellemző eközben túllendül az alapjelen. Az integrátor túltöltődésének a megakadályozására anti-windup áramköröket vezettek be.



31. ábra: PID párhuzamos anti-windup áramkörrel

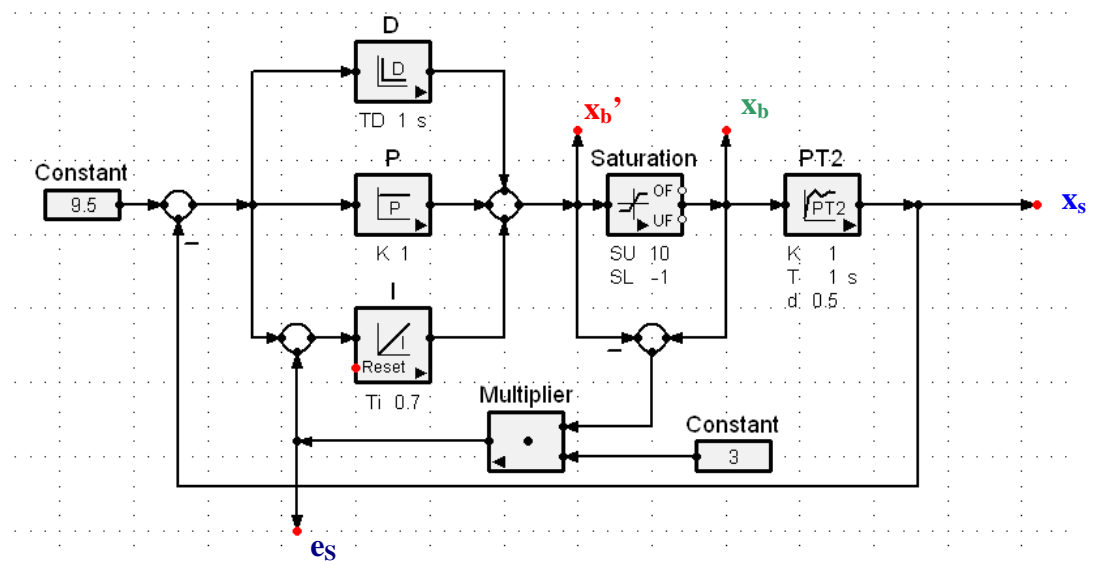


32. ábra: Soros anti-windup áramkör

Az LG GM7-es PLC-ben a 31. ábra szerinti párhuzamos megoldást valósították meg. Ez az áramkör az aktuátor jelkorlátozó kimenete (x_b) és bemenete (x_b') közötti különbséget csatolja vissza az integrátorhoz.

Amikor a rendszer telítődik, a visszacsatolt negatív jel csökkenti az integrátor bemenetére kerülő értéket. A csökkentés mértékét, azaz a visszacsatolt jel súlyozását a T_t követési időkonstanssal (tracking time constant) állíthatjuk be. Ennek az áramkörnek természetesen megszűnik a hatása, ha az aktuátor visszakerül a lineáris tartományába, mert ilyenkor 0 a visszacsatolt jel. Mivel az aktuátor jelkorlátozott kimenete nem minden esetben elérhető, hogy visszacsatolhassuk, ezért gyakran alkalmaznak a szabályozóba beépített korlátozót (saturation). Ennek határai megegyeznek az aktuátor határaival, és ebből kifolyólag visszacsatolhatjuk a korlátozott beavatkozó jelet.

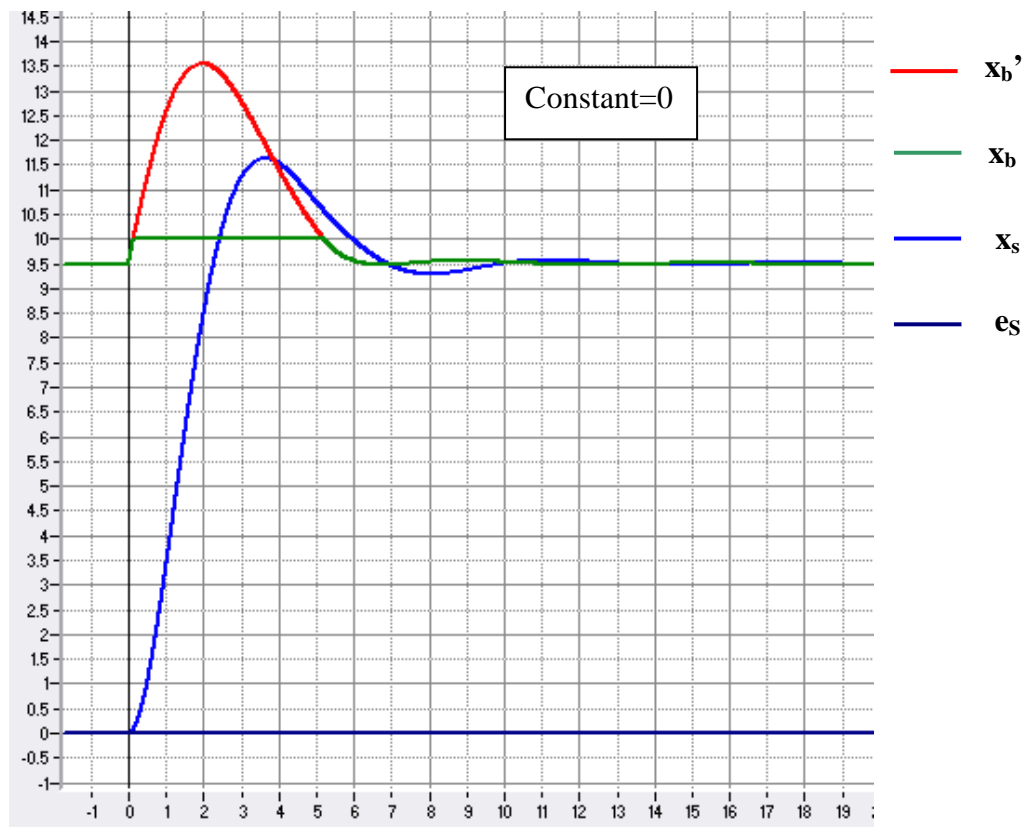
Az áramkör működését a *Simapp* nevű szimulációs programmal ellenőriztem. Az ebben összeállított áramkör:



33. ábra: Jelkorlátozott PT2 tag PID szabályozása, párhuzamos anti-windup áramkörrel

A szabályozott rendszer egy arányos kéttárolós tag, az alapjel konstans 9,5. Az egyszerűség kedvéért a legtöbb paramétert 1-re állítottam, csak az integrálási időt csökkentettem 0,7-es értékre, hogy láthatóvá váljék a visszacsatolás ezt látszólag növelő hatása. A jelkorlátozás 10-es értéknél lép működésbe, valamint -1-nél negatív tartományban. Az $1/T_t$ -vel szorzást itt egy konstanssal való szorzás helyettesíti, azaz $1/T_t = \text{Constant}$.

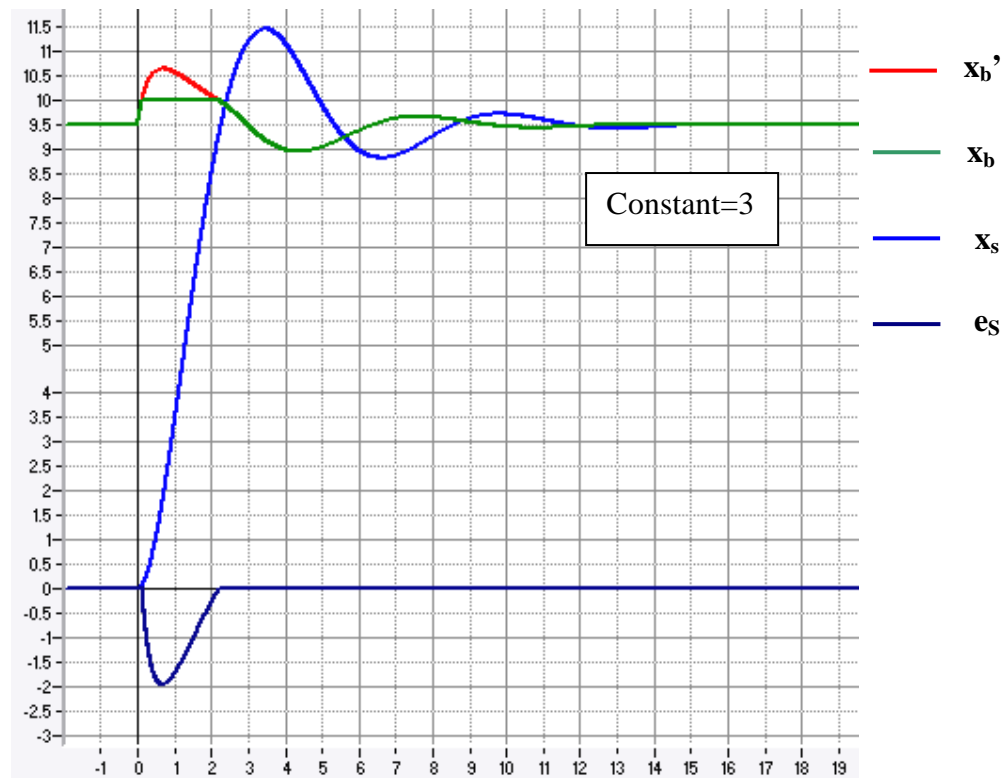
Az első esetben a konstans értékét 0-ra választottam, ez gyakorlatilag az anti-windup áramkör nélküli esetet valósítja meg.



34. ábra: A rendszer válasza anti-windup nélkül

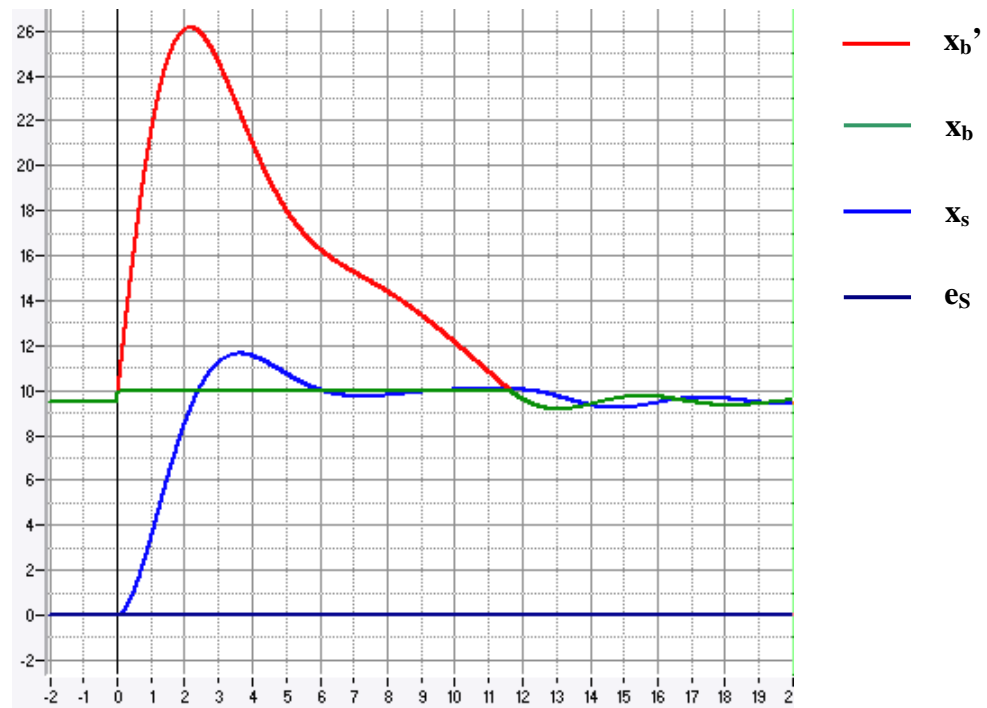
Ezen jól látszik, hogy a szabályzó növelné a beavatkozó jel értékét, de a szaturáció lekorlátozza 10-nél. Persze a szabályozási eltérés ekkor beáll egy értékre, így az integrátor töltődik, amíg a szabályozott jellemző meg nem közelíti az alapjelet. Ekkor elkezd kiszűlni, de ez sok idő vesz igénybe, így a szabályzó kimenete is túllendül. Mindaddig, amíg a jel korlátozva van, azaz 10-es értéken van, a szabályzó gyakorlatilag visszacsatolás nélkül működik, ami nem a legszerencsésebb, stabilitási okokból. A visszacsatolás feléledésekor visszkapjuk az irányítást, de ekkor bizonytalan, hogy a szabályzó hogyan reagál, akár lengések is létrejöhetnek.

A második esetben a konstans értékét 3-nak választva már működésbe lép az Anti-windup áramkör. Az integrátor túltöltődése jelentősen lecsökkent, és a szaturált tartomány is jóval rövidebb, ezáltal biztonságosabb a működés. Látható, hogy az integrátor bemenetéhez visszacsatolt jel (e_s) hogyan változik az idő függvényében. Csak a túlvezérelt állapotban van értéke, és akkor is csak negatív.



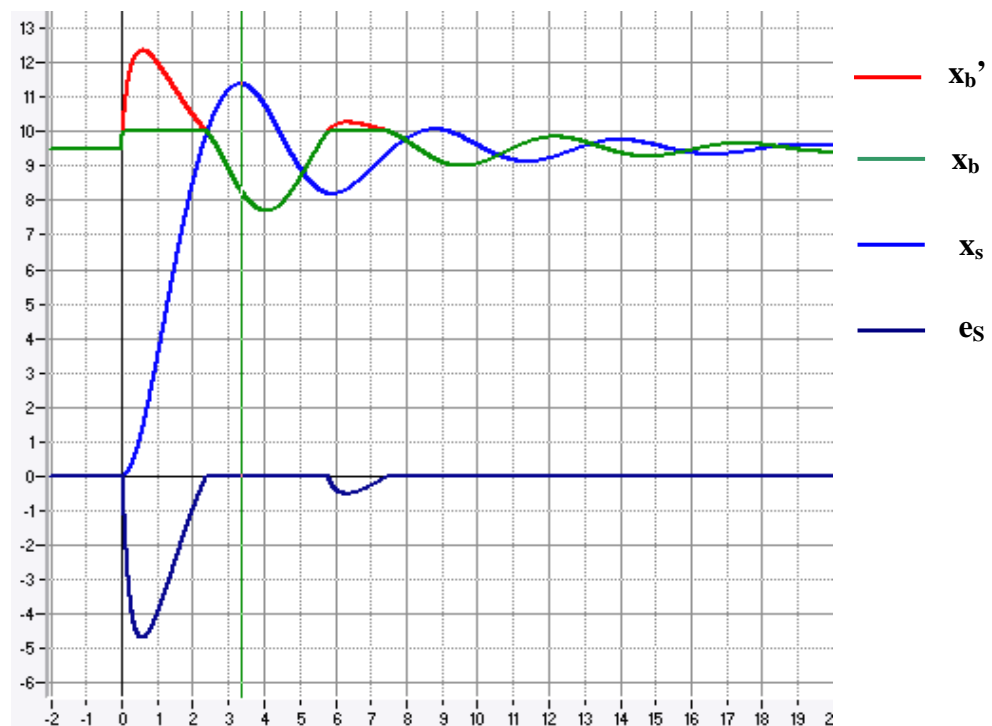
35. ábra: A rendszer válasza anti-winduppal

A túl rövidre választott integrálási időállandó a következő problémát okozza:



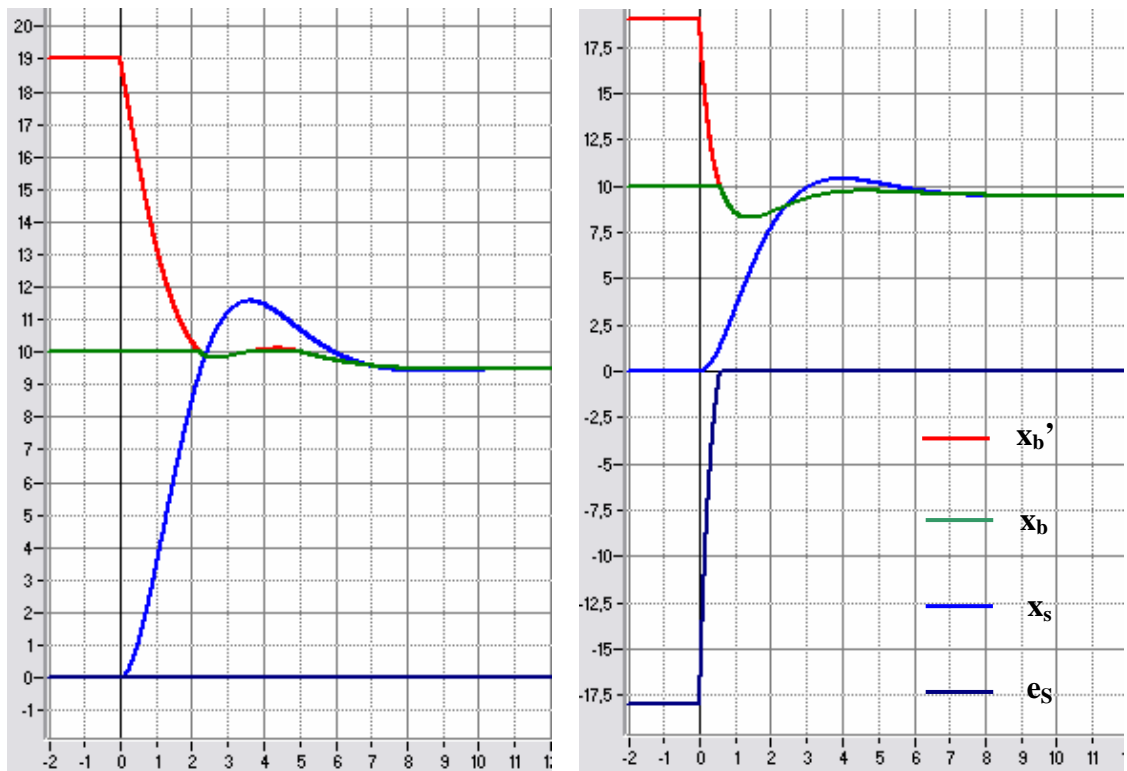
36. ábra: A rendszer válasza anti-windup nélkül, kis T_i esetén

A 36. ábrán látható módon a rendszer először az aktuátor felső korlátjához áll be, az integrátor túlzott feltöltődése miatt, majd miután az integrátor visszatért a működési tartományba, lengeni kezd a rendszer, de végül beáll az alapjelhez. A visszacsatoló áramkör bekapcsolásával sem lehet javítani a rendszer lengési hajlamán, csak kordában lehet tartani az integrátort (37.ábra).



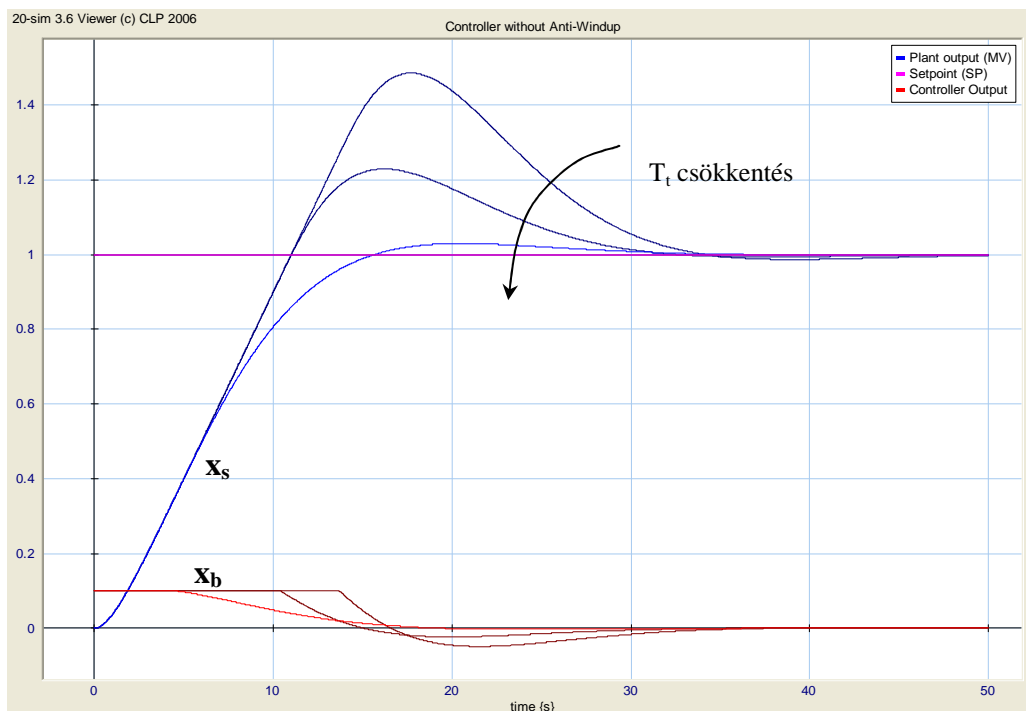
37. ábra: A rendszer válasza anti-winduppal, kis T_i esetén

1-nél nagyobb arányos tagnál szintén jól látható az Anti-windup áramkör hatása:



38-39. ábra: A rendszer válasza anti-windup nélkül és anti winduppal $K=2$ esetén

Összefoglalva az Anti-windup visszacsatoló áramkör hatását; a rendszer nem fog gyorsabban beállni, de az integrátor okozta kezdeti túllendülés minden esetben lecsökkent. Egy másik programmal (20-sim 3.6 Viewer) végzett szimuláció eredménye, mely jól szemlélteti a T_t változtatás hatását:



4. Az LG GM7 PLC [2]

4.1. Általános leírás

Az LG PLC-i az IEC61131-3 (International Electrotechnical Commission – Nemzetközi Elektrotechnikai Bizottmány) nemzetközi szabvány előírásainak megfelelő programozási nyelvet alkalmaznak. Könnyen programozhatóak az ingyenes GMWIN PC-s szoftver segítségével.

Ebben a szoftverben három féle programnyelvet használhatunk. Ezek, a szabványban is szereplő:

1. Utasításlista (IL – Instruction List)
2. Létradiagram (LD – Ladder Diagram)
3. Sorrendi folyamatábra (SFC - Sequential Function Chart).

Átláthatósága, gyorsasága és egyszerű utólagos módosíthatósága miatt a létradiagramot használtam a programok elkészítéséhez. A sorrendi folyamatábra lefutó vezérlésekhez ajánlott.

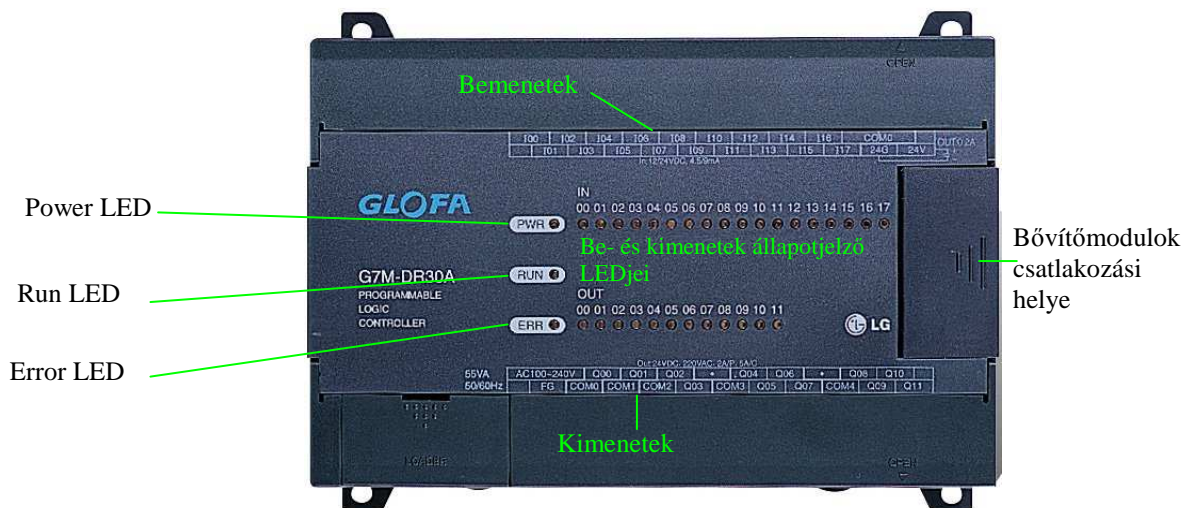
A létradiagram úgynevezett áramutas grafikus programnyelv, a bemeneteket és a kimeneteket jelképező reléérintkezőket és jelfogótekerceket huzalozással kapcsolhatjuk össze, a műveleteket, függvényeket blokkok formájában vihetjük fel. A PC-ről PLC-be történő letöltési folyamatban a programunkat a szoftver lefordítja gépi kódra, így kerül a PLC memóriájába. A GMWIN programban lehetőség van szimulált futtatásra is, ekkor még nem a PLC-n fut a program, csak a PC-n. Mi változtathatjuk tetszőlegesen a bemenetek értékeit, így a programhibákat könnyen felderíthetjük, mielőtt a valós berendezésekben azok esetleg károkat okoznának. A program rendelkezik továbbá *online* futtatási és szerkesztési móddal is. Online módban a PC képernyőjén is láthatjuk az egyes változók, ki- és bementek aktuális állapotát, figyelemmel kísérhetjük a változásokat, illetve adott esetben módosíthatunk bizonyos értékeket.

4.2. A PLC alapfunkciói

Ciklikus működésű, ami azt jelenti, hogy a PLC feldolgozza a programot sorrendben az elsőtől az utolsó lépésig, ezt scan-nak nevezik. A PLC ciklikus üzemmódja mindaddig fennáll ameddig egy megszakítás (interrupt) művelet be nem következik.

A megszakítás lehet idő, vagy feltétel alapú. Az idő alapú megszakítás meghatározott időszakonként hajtódik végre, amit a központi egységben állíthatunk be. Ez állandó időszakonkénti feladatok végrehajtására használható. A feltétel alapú megszakítás egy megadott esemény bekövetkezése esetén azonnal megszakítja a ciklikus programfutását. A megszakítás történhet külső, vagy belső jelre is. A PLC programjában alkalmazhatunk korlátlan számban időzítőket, számlálókat.

A ki- és bemenetek számát tekintve ötféle méret létezik a GM7-es termékcsaládban: 10, 20, 30, 40, 60. A számok a ki- és bemeneti sorkapcsok összeadott számát jelentik. Az adatok ezeken keresztül kötegelten közlekednek, ami azt jelenti, hogy a központi egység az összes bemenetet egyszerre olvassa be, és a kimenetek is egyszerre kapnak értéket. Ezzel elkerülhetők a házárdjelenségek. A belső áramkörök védelmét a csatlakozási pontok optikai csatolóval történő leválasztása biztosítja. A MOM tanszéki laboratóriumban a 30 csatlakozós, GM7 GLOFA DR30A modell áll rendelkezésre. Ebben 18 DC bemenet és 12 relés kimenet található. A jelszintek a 24V-os szabványhoz igazodnak.



40. ábra: LG GLOFA GM7 PLC alapegység (DR30A)

4.3. Speciális funkciók

Bemenet szűrés: képes a bemenetek szűrésére 0-15ms változtatható periódusidővel. A beállított időtartamnál rövidebb impulzusokat a PLC figyelmen kívül hagyja.

Gyorsszámláló (HSC – High Speed Counter): ez a funkció blokk olyan nagy frekvenciájú jelek számlálását végzi, melyeket hagyományos számláló funkció használatával már nem tudunk megszámlolni. Útmérő vagy egyéb impulzusgenerátor elven működő eszköz jeleit képes a HSC feldolgozni.

Impulzus elkapás: Az első 8 bemenet 0,2 ms minimális impulzusszélességű jelet képes feldolgozni, ellentétben hagyományos digitális bemenetekkel.

Impulzus kimenet: Ez a GM7 PLC által vezérelt pozicionáló rendszereknél léptetőmotor vagy szervó motor hajtás vezérlésére használható.

1db, 2kHz-es, tranzisztoros kimenet esetén.

Hálózat (CNET I/F): A GM7 sorozatú PLC beépített Cnet kommunikációs funkcióval rendelkezik, és így lehetséges számtalan külső egységgel való kommunikálás extra Cnet csatoló modul nélkül. Lehetséges protokollok:

- Modbus protokoll
- LG Industrial Systems (LGIS) által kialakított protokoll
- Felhasználói protokoll

A felhasználó által létrehozott protokoll következtében a GM7 PLC számos eszköz egyedi protokolljához tud illeszkedni.

Csatornák száma: 2db beépített RS-232C

PID szabályzó: a központi egység rendelkezik beépített, digitális PID egységgel. A PID7CAL funkcióblokkon számtalan paramétert beállíthatunk. A PID7AT segítségével önhangolásra is képes az eszköz.

A szabályzó működése:

1. Konstansok képzése

$$\text{Integrátor konstans: } K_i = K \frac{T}{T_i}$$

$$\text{Differenciáló konstans (A): } K_{D,A} = \frac{2T_D - TN}{2T_D + TN}$$

$$\text{(B): } K_{D,B} = \frac{2KT_D N}{2T_D + TN}$$

(N nagyfrekvenciás zajelnyomási tényező)

$$\text{Anti-windup konstans: } K_t = \frac{T}{T_t}$$

2. Alap- és ellenőrző jel beolvasása: $x_{a,k}, x_{e,k}$

3. Arányos tag számítása:

$$P_k = K(b \cdot x_{a,k} - x_{e,k})$$

4. Differenciáló tag aktualizálása (kezdeti érték $D_0=0$)

$$D_k = K_{D,A} \cdot D_{k-1} - K_{D,B}(x_{e,k} - x_{e,k-1})$$

5. Beavatkozó jel számítása (Integráló tag kezdeti értéke $I_0=0$)

$$x_{b,k} = P_k + I_k + D_k$$

6. Telítődés ellenőrzése

7. Beavatkozó jel kiírása a kimenetre (DA modulra)

8. Integrátor tag frissítése

$$I_k = I_{k-1} + K_i(x_{a,k} - x_{e,k}) + K_t(x_{b,k} - x_{b,k}')$$

9. Ellenőrző jel aktualizálása

$$x_{e,k-1} = x_{e,k}$$

A szoftverben látható PID funkcióblokkok:

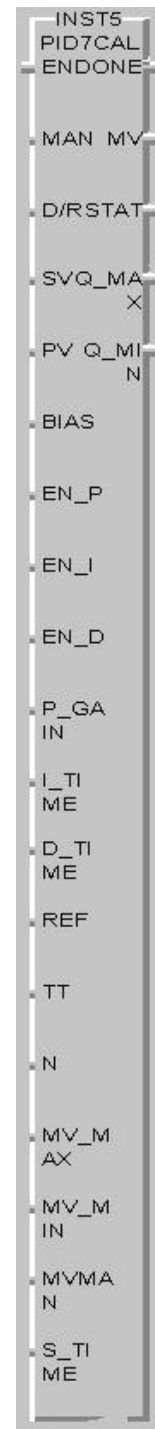
4.3.1. Kézi beállítású PID blokk (PID7CAL)

Bemeneti oldal:

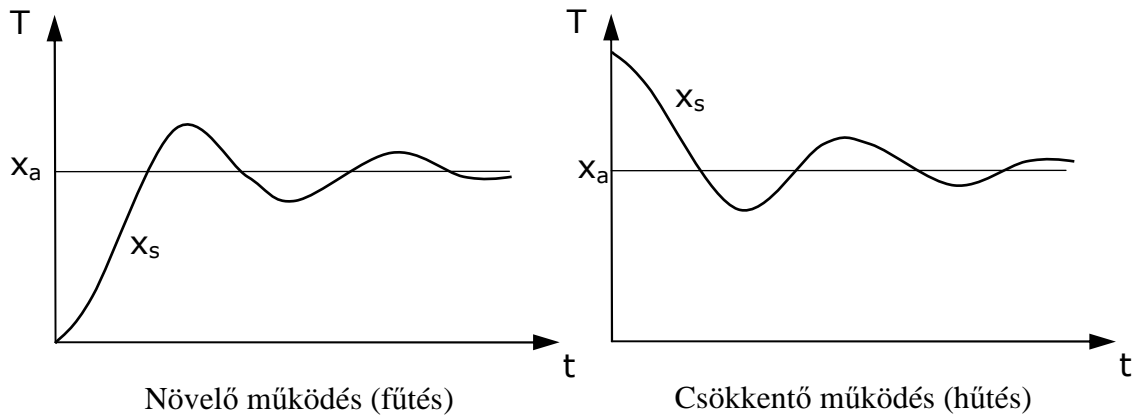
- EN: a funkcióblokk engedélyező bemenete
- MAN: manuális beavatkozó jel engedélyezése (0-auto, 1-manuális)
- D/R: működési irány (0-növekvő, 1-csökkenő)^(*1)
- SV: alapjel bemenet (Set Value) (0~4000)
- PV: visszacsatolt jel (Present Value)(0~4000)
- BIAS: zavarkompenzációs eltolási érték (0~4000)
- EN_P: arányos (proporcionális) tag engedélyezés
- EN_I: integráló tag engedélyezés
- EN_D: differenciáló tag engedélyezés
- P_GAIN: arányos tag konstans (0.01~100, beállításakor 100x-os értéket kell beírni, azaz 1~10000)^(*2)
- I_TIME: integrálási idő beállítás (0~2000, 10x-esen beírva 0~20000)
- D_TIME: differenciálási idő beállítás (0~2000, 10x-esen 0~20000)
- REF: referencia érték (0.1~1, 10x-esen beírva 1~10)^(*3)
- TT: követési idő konstans (Tracking Time constant)(0.01~10, szintén 100x-os szorzó megadásakor, azaz 1~1000)^(*4)
- N: nagyfrekvenciás zavarelnyomási tényező (0~10)^(*5)
- MV_MAX: maximális beavatkozó jel (0~4000)
- MV_MIN: minimális beavatkozó jel (0~4000)
- MVMAN: manuális (kényszerített) beavatkozó jel bemenet (0~4000)
- S_TIME: (sampling time) adatbeolvasási időköz (0.1~10s, 10x-esen 1~100)

Kimeneti oldal:

- DONE: befejezést jelző flag: 1, ha kész
- MV: beavatkozó jel (0~4000)
- STAT: hibakód kimenet
- Q_MAX: 1, ha a beavatkozó jel maximális értéken
- Q_MIN: 1, ha a beavatkozó jel minimális értéken



(*1) a PLC beépített PID szabályozója kétféle működési iránnyal is rendelkezik. Azaz tulajdonképpen fűtésre és hűtésre is beállíthatjuk. Fűtésekor, ha a visszacsatolt jel kisebb, mint az alapjel (pozitív értékű rendelkező jel), akkor a beavatkozó jel nő, míg hűtésnél ebben az esetben csökken (kisebb teljesítménnyel kell hűtenünk).

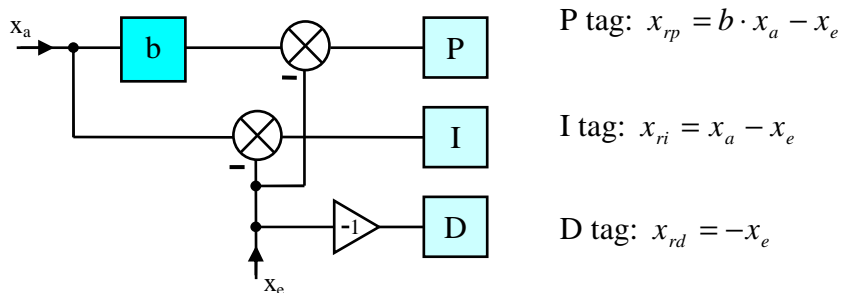


39-40. ábra: A PID-blokk kétféle működési módja

(*2) a funkcióblokk bemenetei vagy boole, vagy integer (egész) típusúak, így az 1-nél kisebb értékek beállíthatósága érdekében szorzótényezőt vezettek be. A beállított konstans egy kiemelt érték, az arányos tag kvázi soros kapcsolatban van a másik kettővel, tehát mindhárom tag működését befolyásolja (K).

(*3) a referencia érték egy, az arányos tag súlyozására használható tényező.

A rendelkező jelet tagonként más módon képzik a PID blokk:



41. ábra: A beépített PID rendelkezőjel-képzése

A referenciaérték az a bizonyos b -szorzótényező, ami 0 és 1 között változtatható. Ezzel úgy csökkenthetjük az arányos tag hatását, hogy a másik két tag hatását nem befolyásoljuk. Erre akkor van szükség, ha a szabályozónk túl agresszíven reagál az alapjel változásaira.

(*4) a követési idő konstanssal a beépített anti-windup áramkör hatását befolyásolhatjuk.

(*5) az elméleti részben leírtaktól eltér az itt megvalósított D tag képlete. Szerepel benne egy tényező, ez a nagyfrekvenciás jelek elnyomásáért felel.

$$y_k = \frac{2T_D - TN}{2T_D + TN} y_{k-1} - \frac{2KT_D N}{2T_D + TN} (x_k - x_{k-1})$$

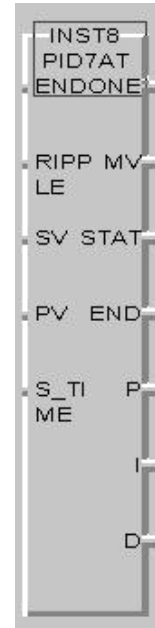
4.3.2. Automata hangolású PID blokk (PID7AT)

Bemeneti oldal:

- EN: a funkcióblokk engedélyező bemenete
- RIPPLE: hullámforma választás (0-1)^(*4)
- SV: alapjel bemenet (Set Value) (0~4000)
- PV: visszacsatolt jel (Present Value)(0~4000)
- S_TIME: adatbeolvasási időköz (0.1~10s, 10x-esen 1~100)

Kimeneti oldal:

- DONE: hangolás befejezését jelző flag: 1, ha kész
- MV: beavatkozó jel (0~4000)
- STAT: hibakód kimenet
- END: 1, ha a művelet hiba nélkül lezajlott
- P: megkapott arányos tag konstans
- I: megkapott integrálási időállandó
- D: megkapott differenciálási időállandó



(*4) Az automata hangolású PID-funkció frekvenciaválasz alapján találja meg a helyes paramétereket. A RIPPLE érték 0-ra állítása esetén a PID paraméterek a visszacsatolt jel első ciklusában kerülnek kiszámolásra, míg egyre állítva a második ciklus alatt. Legtöbb esetben 1-es érték a megfelelő.

A funkcióblokk engedélyező jelét triggerelni, szaggatni kell, mégpedig – a helyes működés eléréséhez – az adatbeolvasási időközzel (S_TIME) szinkronizáltan.

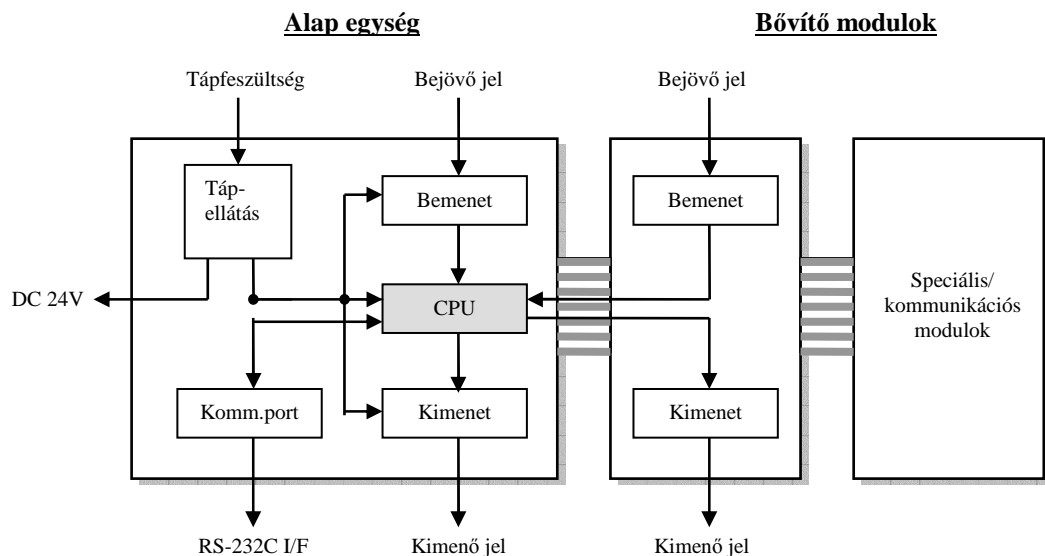
4.4. A PLC bővítmóduljai

A beépített alapfunkciókon kívül a GM7-es különféle bővítmódulokat is fogad, megadott számban. Ezek a bővítmódulok a buszra csatlakoznak egy szalagkábel segítségével.

Mindegyik speciális modulnak saját speciális funkció blokkja van

Bővítmódul	Csatlakoztatható
Digitális I/O(ki/bemeneti egység)	2 db
AD/DA modul	2 db
Analóg timer (időzítő)	3 db
Cnet I/F module	1 db

Összesen három csatlakoztatható egy alapegységhez.

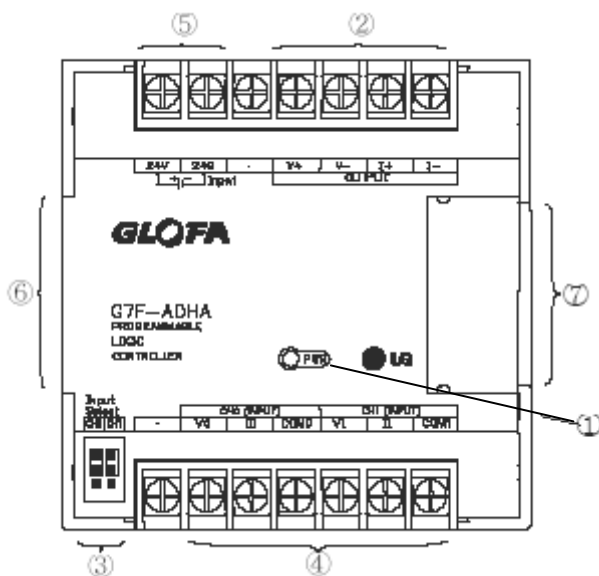


42. ábra: A GM7 PLC-nek és bővítmóduljainak felépítése

4.4.1 AD/DA modul (G7F-ADHA)

4.4.1.1 Felépítés, jelek bekötése

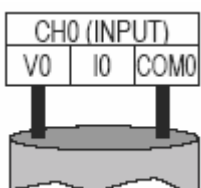
A csatlakozási pontok száma jól illeszkedik a szabályozókörben, ugyanis 2 bemeneti és 1 kimeneti pontja van. Az egyik bemenetre a szabályozott folyamatból visszacsatolt ellenőrző jelet, a másikra az alapjelet köthetjük, ha analóg formában kívánjuk megadni.



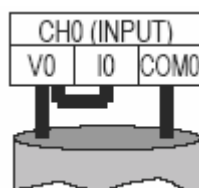
Szám	Név
1	RUN LED
2	Analóg kimeneti pontok
3	Analóg bemenet (feszültség/áram) választó jumper
4	Analóg bemeneti pontok
5	Tápfeszültség csatlakozás (DC24V)
6	Bővítő kábel
7	Bővítő kábel csatlakozási végződés

43. ábra: A G7F-ADHA analóg modul felépítése

A bemenetre köthetünk áram és feszültség kimenetű eszköz jelét is. Áram bemenet esetén rövidre kell zárni a feszültség és árambemeneti pontot. A be és kimenetek optocsatolóval vannak leválasztva tápellátó áramkörtől.



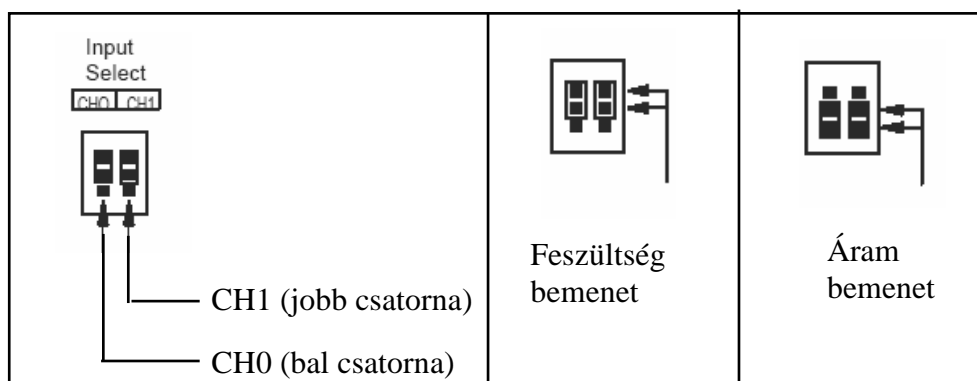
Feszültség bemenet



Feszültség bemenet

44. ábra: Feszültség és áram jel bekötése

A feszültség és áram kimenet között a jumperek elhelyezésével választhatunk:



45. ábra: Az analóg modul két csatornájának feszültség/áram bemenet választása

A kimeneten is választhatunk áram és feszültség kimenet között, a megfelelő csatlakozási pontok bekötésével. Ha a kábelnek van árnyékolása, akkor azt az aktuátor oldalán kell földelni.



46. ábra: Feszültség és áram kimenet választása

Az analóg jeltartományok:

Feszültség bemenet	DC0..10V	>1M Ω bemenő ellenállás
Áram bemenet	0..20mA	FB(Function Block) szerint. 250 Ω bemenő ellenállás
	4..20mA	
Maximális bemenő jelszintek	DC 12V	
	DC 24mA	
Feszültség kimenet	DC0..10V	2k Ω -1M Ω terhelő ellenállás
Áram kimenet	0..20mA	FB(Funkció Blokk) szerint. <510 Ω terhelő ellenállás
	4..20mA	
Maximális be- és kimenő jelszintek	DC 12V	
	DC 24mA	

Az átalakító 12 bites, 0 és 4000* közötti egész számokkal dolgozik, felbontása:

DC 0..10V	2.5 mV
DC 0..20mA	5 μ A
DC 4..20mA	5 μ A

*(elvileg -48..4047, de a szélső értékeket levágja)

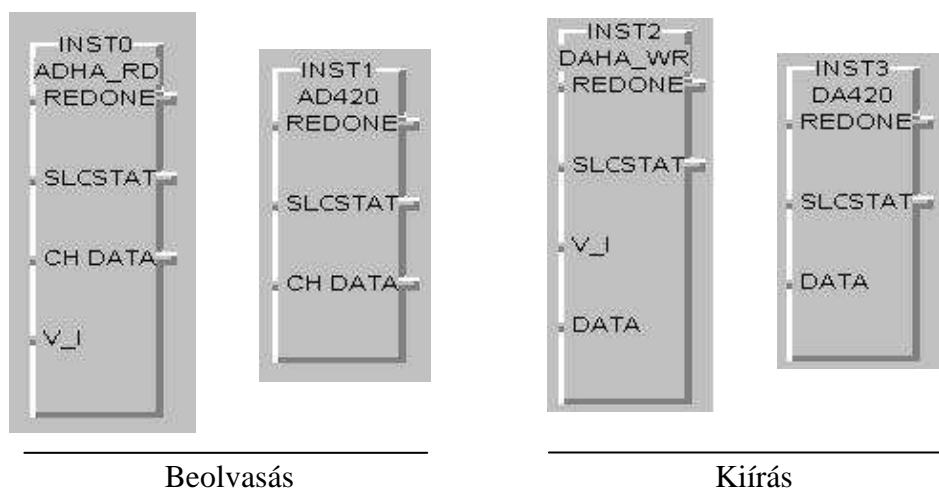
A felbontási érték 4..20mA esetén a kézikönyvben hibásan, 6.25 μ A-nek van feltüntetve. Ez semmiképpen nem lehet helyes érték, mivel 4..20mA esetén is a teljes tartományt alakítjuk át, a 0mA a 0 értéknek, a 4mA 800-as értéknek és a 20mA a 4000-nek felel meg. Ezzel érzékeltetni tudjuk, hogy működik-e a szenzor.

Az átalakítás pontossága $\pm 0,5\%$ méréshatáron.

Az átalakítási idő 2ms/csatorna, de ehhez hozzáadódik a scan-ciklus ideje.

4.4.1.2. A modulhoz tartozó funkcióblokkok

A GMWIN programban az analóg bemenetek olvasásához és az analóg kimenet írásához is két-két funkcióblokk áll rendelkezésre. Az ADHA_RD áram és feszültségbemenetet is képes beolvasni, az AD420 csak árambemenetet. Hasonlóképpen a DAHA_WR áram és feszültség, a DA420 csak áramkimenet írására képes.



47. ábra: Analóg modulhoz tartozó funkcióblokkok

A blokkokon található csatlakozási pontok:

REQ: a blokk engedélyezése

SLOT: bővítőmodul helye (1..3)

CH: csatorna választása (0,1)

V_I: feszültség/árambemenet, illetve kimenet (0-áram, 1-feszültség)

DONE: normális lefutás

STAT: hibakód

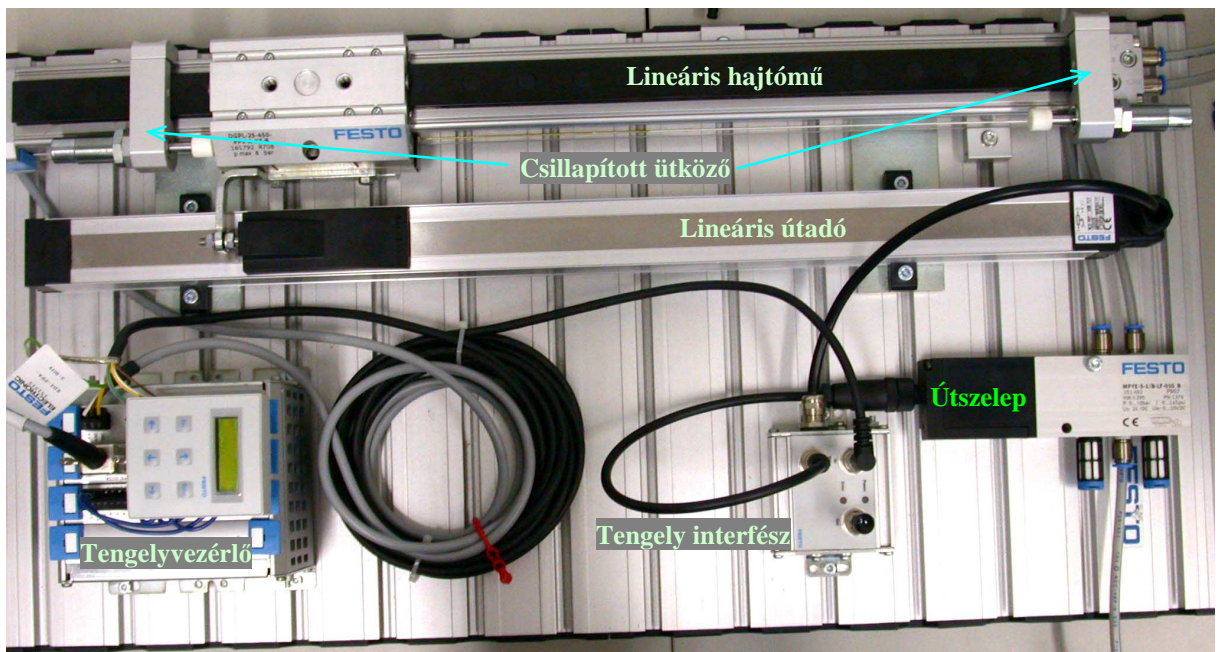
DATA: - beolvasott analóg jel digitalizált formája (beolvasó blokkok)
 - kiírandó analóg kimenet digitális formában (kiíró blokkok)

5. Alkalmazás: Festo Lineáris hajtómű pozíciószabályozása [15]

A tanszéki laboratóriumban rendelkezésre álló komplett Festo rendszerből a lineáris hajtóművet összekapcsoltuk az LG GM7-es PLC-vel. A pozíciószenzor szerepét a lineáris útdő tölti be, az aktuátor pedig a proporcionális útszelep. Így pozíciószabályozással tesztelhető a PLC AD/DA átalakítója és PID funkciója.

5.1. A tesztrendszer elemei:

- LG GM7 Glofa PLC
- LG G7F ADHA modul
- Festo lineáris hajtómű DGPL-25- -PPV-A-KF-B
- Festo proporcionális útszelep MPYE-5-1/8-LF-010-B
- Festo lineáris útdő MLO-POT-500-TLF

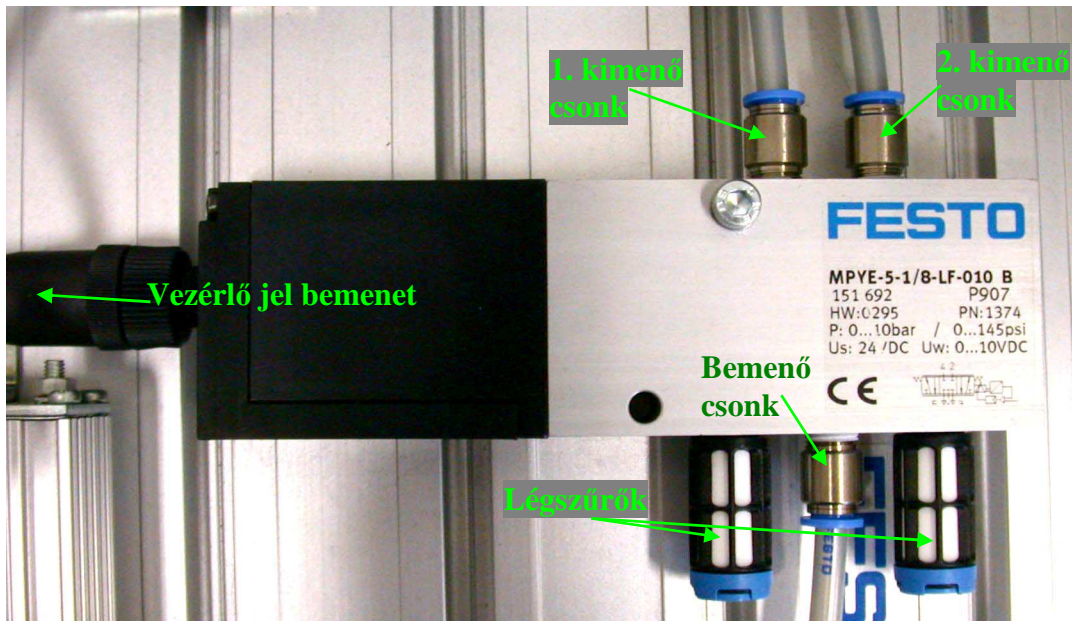


48 ábra: FESTO pneumatikus rendszer

Lineáris hajtómű: 2-8 bar-os üzemi nyomással működő, golyóscsapágyas vezetékű hajtómű. Mindkét oldalon pneumatikus csillapítással szerelt. Kettős működésű: a két bemenő csonkon két irányban mozgathatjuk.



Proporcionális útszelep: Elektromos, közvetlen működtetésű 5/3-as útszelep. A vezérlő jel 0-10V-os. Ennek a közéértékén, 5V-nál mindkét kimenő ágon azonos a térfogatáram, 5V-tól távolodva az egyik csonkon arányosan nő, a másikon arányosan csökken az átmenő változó.



49 ábra: FESTO proporcionális útszelep

Lineáris útdadó: Egyszerű feszültségosztás elvén működik. A 10V-os tápfeszültséget osztja le a pozíció függvényében.



A tengelyvezérlőre és a tengely interfészre nem volt szükség, hiszen a berendezést a különálló LG PLC-vel vezéreltük Ezeket megkerülve közvetlenül a szelep bemenetére csatlakoztattuk a PLC analóg kimenő jelét, az útdóról is az interfész lekapcsolásával, mindenféle átalakítás nélkül kapjuk az analóg szenzorjelet. Ehhez a tápfeszültséget egy 10V-os transzformátor adja.

5.2 A program

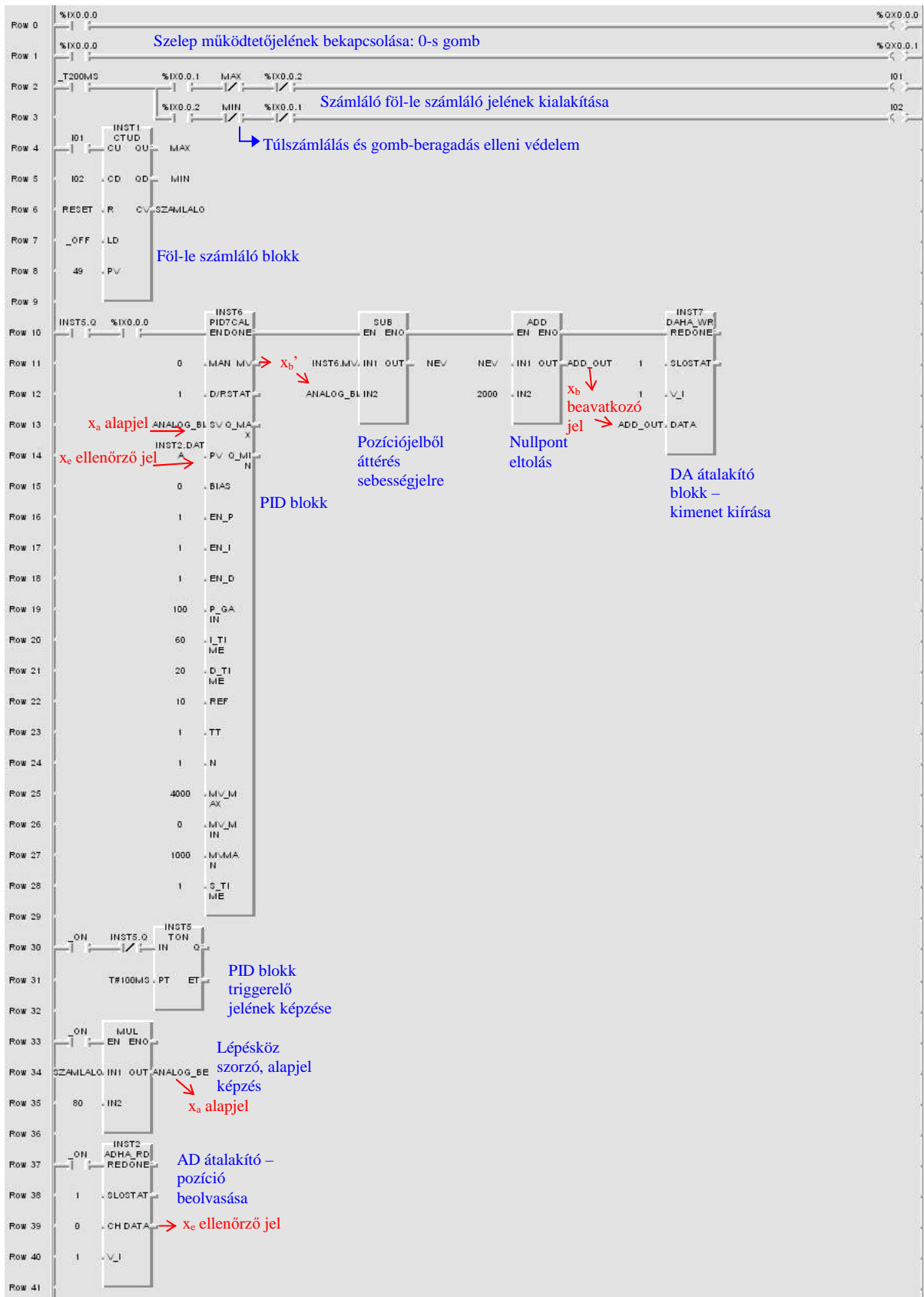
A megoldandó problémák:

- A lineáris hajtómű sebességvezérelt, azaz, ha a szelep konstans térfogatáramot kapcsol rá, akkor egyenletes sebességgel mozog.
- A hajtómű csak akkor nem mozog, ha mindkét csonkján azonos nyomás van. A szelep csak akkor ad ki azonos nyomást a csonkjain, ha 5V a bemenő jele. Ez a programban nullponteltolással megoldható.

A program működése:

Három gomb működteti a hajtóművet. Kettővel állíthatjuk a pozíciót, a harmadik az indítógomb, amíg ez nincs benyomva, a beállított érték nem kerül érvényre.

A pozícióérték, ami egyben alapjel, beállítását egy 200ms-os impulzusgenerátor jelének föl- vagy leszámlálásával oldottam meg.



50.ábra: GMWIN programban készített létradiagram-program a FESTO lineáris hajtóműhöz

Az alapjelet működés közben is változtathatjuk, 0.2V-os lépésekben a számláló segítségével.

A PID-ből kapott beavatkozójel az alapjelre áll be, ha a szabályozási hiba 0. Ezért, ha a beavatkozó jelből kivonjuk az alapjelet, akkor 0 körüli beavatkozójel kapunk. Ez kvázi-sebességjelnek tekinthető. Ahhoz, hogy 5V körül változó jelet kapjunk, hozzá kell adnunk a beavatkozójelhez 5V-nak megfelelő 2000-et (4000 a 10V).

A PID paramétereinek megfelelő beállítására a Ziegler Nichols módszer nem alkalmas, mert a rendszer időállandóihoz képest nagy mintavételezési időköz a lengési időt nagyban befolyásolja. A mérések idején a Takahashi módszert még nem ismertem, így próbálkozással először a P tag konstansát állítottam be, majd PI taggal az integrálót. A végén a differenciáló tag hozzáadásával nagyban gyorsítani lehetett a rendszer beállítását.

A rendszer egy alkalommal sem állt be stabilan a beállított értékre, ez a stick-slipnek nevezett súrlódási jelenség miatt nem lehetséges. A súrlódás miatt a mozgó elem nem pont a beállított pozícióba áll be, az integráló tag a maradó kis hiba integrálásával egy idő után feltöltődik akkora értékre, hogy meg tudja mozdítani a csúszkát. Nagy valószínűséggel ez a tapadási súrlódás legyőzéséhez szükséges erő azonban átlendíti a mozgó elemet a másik oldalra. Így a kívánt pozíció körül billeg.

A méréseim során teszteltem, hogy mi történik, ha a scan-idő és a PID triggerelő jele nincs szinkronban. Mivel a legkisebb scan-idő 0.1, ezt növelni nem érdemes, a triggerelési időközt változtattam. Sűrűbbre vettem, mivel ritkábbra nincs értelme beállítani, hiszen akkor a PID rossz adatokat is beolvas egyes mérési pontokban. A szaggató jel frekvencia-növelésének a rendszer lengési hajlamait csökkentették egyes esetekben, a beállási idő csökkent.

A következő lépés a PLC PID szabályozóként való felhasználásában egy FESTO pneumatikus izom pozíciószabályozása lesz. Ezt a témát, és az izommal kapcsolatos további kutatásokat Bicskei Zoltán évfolyamtársam munkájában ismerhetik meg részletesebben. A berendezést már összeszereltük, üzemképes, a PID paraméterek hangolása adja a fő problémát. Ehhez vagy modellezni kell az izmot egy végeselemes programban, vagy a meglévő mérési eredmények alapján kell felállítani a matematikai modellt. A harmadik lehetőség a mérés, ehhez azonban meg kell teremteni a kellő feltételeket, és összegyűjteni a szükséges műszereket.

Összegzés

A jövő PLC-i egyre több funkciót fognak magukba integrálni, így folyamatosan bővíthet az alkalmazási körük. Az LG is ebbe az irányba tesz lépéseket a bővítőmodulok és a beépített funkciók számának és sokféleségének növelésével. Az LG PLC-jének nagy előnye a GMWIN PC-s program, aminek segítségével könnyen és gyorsan programozhatjuk az eszközt. A programban kiválasztható, hogy melyik programnyelvet szeretnénk használni, így mindenki a neki és az alkalmazásnak legmegfelelőbbel, létradiagrammal, utasításlistával vagy sorrendi folyamatábrával írhatja meg az algoritmusát.

A PLC működési módjából, a ciklikus programból következően a szabályozás mintavételi ideje korlátozott. Az általam választott mechanikai tesztrendszer időállandói már kritikusnak számítanak a beépített PID 0,1 másodperces leggyorsabb mintavételi idejéhez képest. Ezért ezzel a PLC-vel még csak lassabb rendszerek szabályozása oldható meg problémamentesen. Ilyenek például a hőtechnikai rendszerek, ahol a fűtési és a hűtési feladatok, a rendszerint nagyon nagy időállandók miatt jól szabályozhatóak.

Köszönetnyilvánítás

Külön köszönettel tartozom:

Dr. Szabó Tibor témavezetőmnek (BME, Mechatronika, Optika és Műszertechnika tanszéken mestertanár), tanulmányaim alatt és diplomamunkám megírásában való támogatásért.

Dr. Huba Antalnak (BME, Mechatronika, Optika és Műszertechnika tanszék docense), tanulmányaim alatt és diplomamunkám megírásában való segítségéért.

Köszönettel tartozom még:

Bicskei Zoltán évfolyamtársamnak, akivel közösen végeztük a mérések javát, a Festo pneumatikus izommal folytatott méréseink az ő diplomamunkájában lesznek megtalálhatóak.

Takács Zoltán szakmai konzulensemnek (TECH-CON kft., okleveles gépészmérnök) technikai jellegű kérdéseimre adott válaszáért.

Irodalomjegyzék:

- 1) Dr. Lipovszki György: Számítógépes irányítások elmélete (2004)
- 2) LG GM7 manual (gm7_all.pdf)
- 3) Szabó Géza: Analóg jelek digitális feldolgozása és továbbítása (előadásvázlat)
- 4) Dr. Hegedűs János: Analóg/digitál és digitál/analóg átalakítók (El_11.pdf)(2005)
- 5) Christian Schmid: Control system with anti-windup measure (2005-05-09)
<http://www.atp.ruhr-uni-bochum.de/rt1/syscontrol/node92.html>
- 6) PID control with anti-windup
http://www.20sim.com/webhelp4/library/signal/Control/PID_Control/AntiWindup.htm
- 7) Dr.Hrivnák István: Digitális-Analóg (D/A) és Analóg-Digitális (A/D) átalakítók.
(BME, Közlekedésautomatikai tanszék - 1995)
- 8) http://www.hitequest.com/Kiss/A_D.htm
- 9) James R. Drummond: Microprocessor Interfacing Techniques, Analogue-to-Digital Conversion (1997)
- 10) A/D átalakítás, http://en.wikipedia.org/wiki/Analog-to-digital_converter
- 11) Delta-sigma A/D átalakítók,
https://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/appnote_number/1870
- 12) Hainzmann: Analóg-digitális átalakítók jellemzői és vizsgálatuk (2004)
- 13) Aliasing and Sampling at Frequencies Above the Nyquist Frequency,
<http://digital.ni.com/devzone/conceptd.nsf/webmain/7C24348B34500BA386256F2C00628667>
- 14) Prof.Dr.-Ing. Holger Lutz, Prof.Dr.-Ing. Wolfgang Wendt: Taschenbuch der Regelungstechnik (Verlag Harri Deutsch - 2003),
- 15) www.festo.com