

**SZÉCHENYI ISTVÁN EGYETEM
MŰSZAKI TUDOMÁNYI KAR
AUTOMATIZÁLÁSI TANSZÉK
AUTONÓM ÉS INTELLIGENS ROBOTOK LABORATÓRIUM**

**Dolgozat a
XXXI. Országos Tudományos Diákköri Konferenciára**

Inverz inga alapú egyensúlyozó robot

Írta:

Németh Ferenc

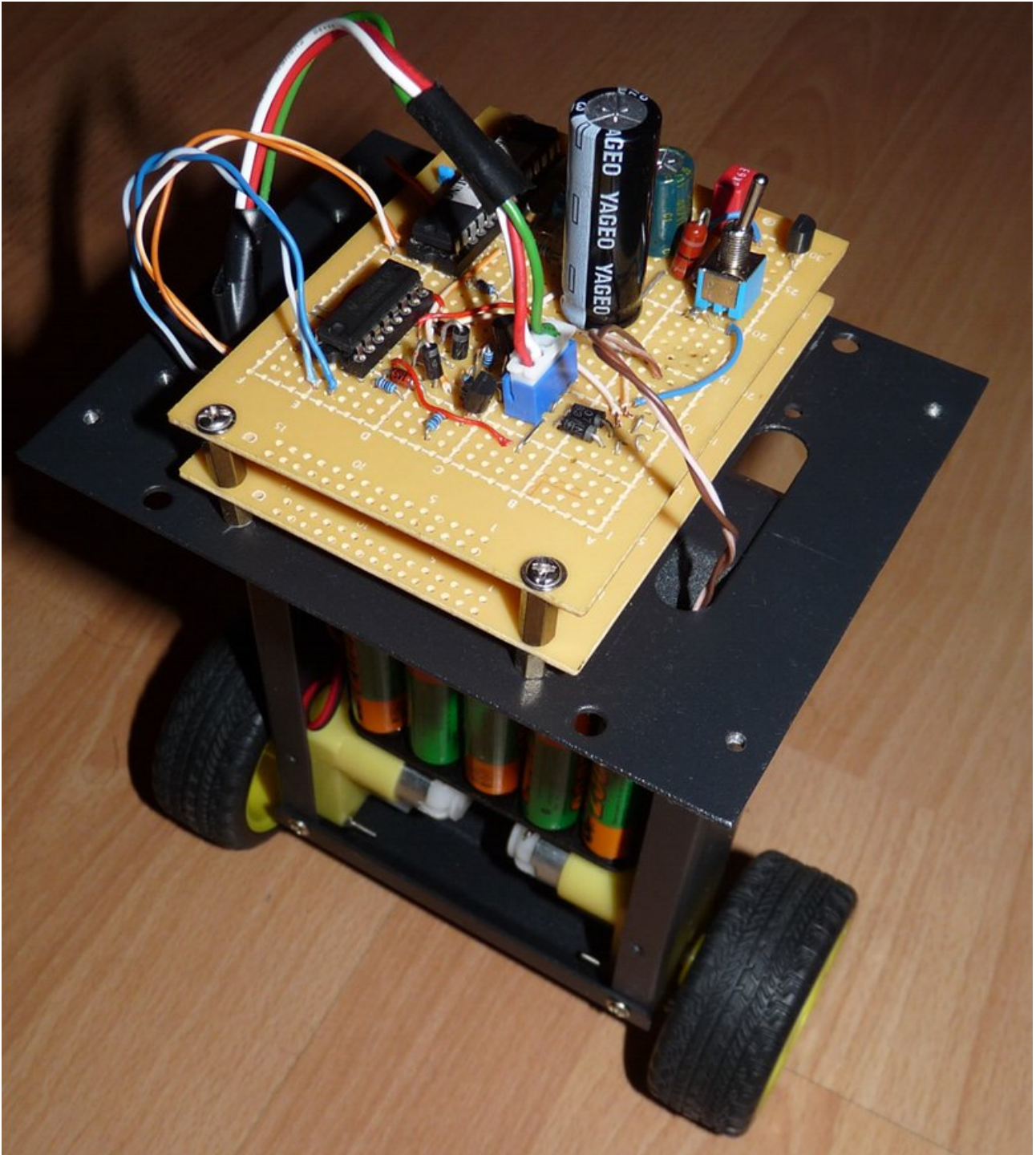
3. évfolyamos

Villamosmérnöki Bsc szakos hallgató

Konzulens:

Ballagi Áron

**tanszékvezető-helyettes,
egyetemi adjunktus**





Tartalomjegyzék

1. Bevezetés, célkitűzés.....	6.
2. Az inverz inga.....	7.
2.1. Mi is az az inverz inga?.....	7.
2.2. Az inverz inga gyakorlati alkalmazása.....	8.
2.2.1. Rakétatechnika.....	9.
2.2.2. Közlekedési járművek, személyszállítás.....	10.
2.2.3. Elektromos kerekesszék.....	12.
2.2.4. Mobilrobotok.....	13.
3. A tehetetlenségi mérőegység.....	14.
3.1. A MEMS gyorsulásmérő.....	14.
3.1.1. MMA8451Q - három szabadságfokú digitális gyorsulásmérő.....	16.
3.1.2. A dőlésszög meghatározása gyorsulásmérővel.....	18.
3.2. A MEMS giroszkóp.....	19.
3.2.1. LPY450AL - két szabadságfokú analóg giroszkóp.....	20.
3.1.2. A dőlésszög meghatározása giroszkóppal.....	22.
3.3. A szenzorfüzió.....	23.
4. A fő vezérlő egység.....	25.
5. A tápegység.....	28.
6. A motorok és a motorvezérlő egység.....	30.
6.1. A motorok.....	30.
6.2. A motorvezérlő.....	30.
7. A szabályozó.....	32.
7.1. A PID szabályozót felépítő tagok.....	32.
7.1.1. Az arányos tag.....	32.
7.1.2. Az integráló tag.....	35.
7.1.3. A differenciáló tag.....	37.
7.2. A szabályozó méretezési kritériumai.....	38.
7.3. A tagok működése.....	40.
7.3.1. P szabályozó.....	41.
7.3.2. PI szabályozó.....	43.
7.3.2. PID szabályozó.....	44.
7.4. A PID szabályozó: összegzés.....	45.
7.5. A szabályozó behangolása.....	47.
8. A robot szerkezete.....	48.
9. Befejezés, jövőbeli tervek.....	50.
10. Irodalomjegyzék.....	51.

1. Bevezetés, célkitűzés

Németh Ferenc vagyok, harmadéves villamosmérnök hallgató a Széchenyi István Egyetemen. Érdeklődési körömbbe tartoznak az automatizálási rendszerek, a szabályozás- és irányítástechnika, illetve a robottechnika.

Napjainkban különösképpen népszerűek a különböző önműködő járművek, mobilrobotok. Ezek a szerkezetek mind más-más megvalósítást használnak a mozgásra. Van, amelyik láncalpakon gurul, van, amelyik kerekeket használ a helyzete változtatására, de még olyanok is vannak, amelyek az emberhez, illetve állatokhoz, rovarokhoz hasonlóan kettő, négy vagy akár hat lábon mozognak. E dolgozat is egy sajátos platform tervezését, valamint vizsgálatának a folyamatát mutatja be.

A cél egy olyan kétkerekű, inverz inga alapú mobilrobot fejlesztése, mely egy szabadságfok (vagy tengely) mentén képes önmagát egyensúlyozni. A robot a rajta elhelyezett szenzorok segítségével képes megmérni a függőleges helyzettől való eltérését, dőlését. Az így nyert adatok, a szabályozó algoritmus és két motor segítségével hozza önmagát újra álló, stabil helyzetbe.

A dőlésszög meghatározásáért két MEMS kialakítású szenzor, egy giroszkóp és egy gyorsulásmérő szenzorfüzije felelős. A kerekek működtetéséért és a robot függőleges helyzetben tartásáért két DC motor, a szabályozó algoritmus a klasszikus PID (Proporcinális, Integráló és Differenciáló tagokból álló) szabályozó. Az egyes részegységek helyes működését és irányítását egy Atmel AVR mikrokontroller végzi.

A dolgozatban a fent említett egységek felépítését, működésük elvét, valamint konkrét működését egy lehetséges alkalmazáson keresztül mutatom be.

Kívánok az olvasónak jó szórakozást és kellemes időtöltést a jegyzetem olvasásához!

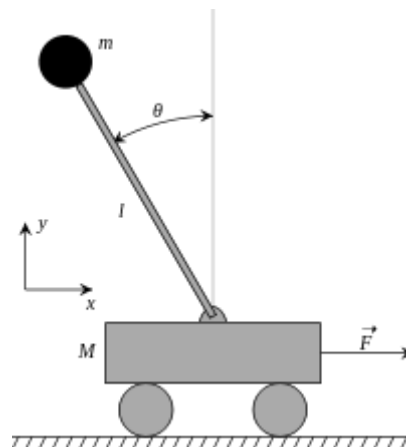
Németh Ferenc,
a szerző

2. Az inverz inga

Mielőtt a robot szerkezetéről, viselkedéséről esne szó, érdemes előbb pár gondolatot szólni a robot alapjául szolgáló inverz ingáról. Mi is egyáltalán az? Hogyan működik? Mire jó? E fejezetben az inverz inga működését néhány konkrét példán keresztül mutatom be.

2.1. Mi is az az inverz inga?

Az inverz inga (vagy más néven fordított inga) napjaink egyik fontos kutatási témája a dinamika és a szabályozástechnika területén. Az inverz inga kiválóan használható a különböző szabályozó algoritmusok (PID és fuzzy szabályozók, genetikus algoritmusok, neurális hálózatok, stb.) tesztelésére, demonstrálására. [2]

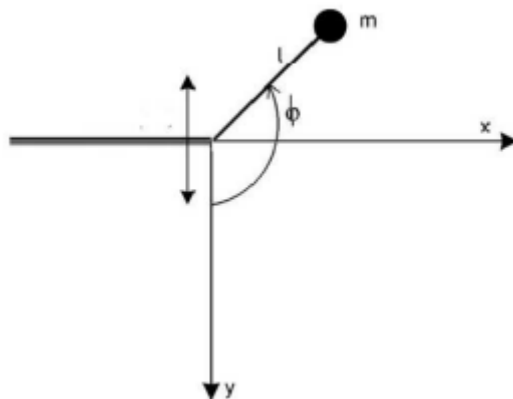


1. ábra. Az inverz inga rajza [2]

A fordított ingának tömegközéppontja - a „hagyományos” ingával ellentétben - nem az inga forgáspontja alatt, hanem felette helyezkedik el. Ezért nyugalmi állapota nem függőleges helyzetben, hanem vízszintesen, az egyik oldalára dőlve van. Ahhoz, hogy vertikálisan stabil legyen, különféle szenzorok, szabályozók és motorok segítségével aktívan egyensúlyoznia kell a szerkezetnek.

Ugyanakkor stabil, függőleges helyzetbe lehet hozni akkor is, ha az ingarúd gyors fel-le mozgásnak van kitéve.

Ez utóbbit még 1908-ban A. Stephenson állapította meg, miszerint lehetséges állva tartani az ingát, ha vertikális irányba ható, rövid pályán, nagyfrekvenciájú oda-vissza oszcillációnak van kitéve. Majd 1951-ben Pyotr Kapitza Nobel-díjas fizikus volt az első, aki mélyrehatóbban vizsgálta a módszert. Az inverz inga ezen fajtáját *Kapitza's pendulum*-nak (Kapitza ingája) nevezik. [3] [4]



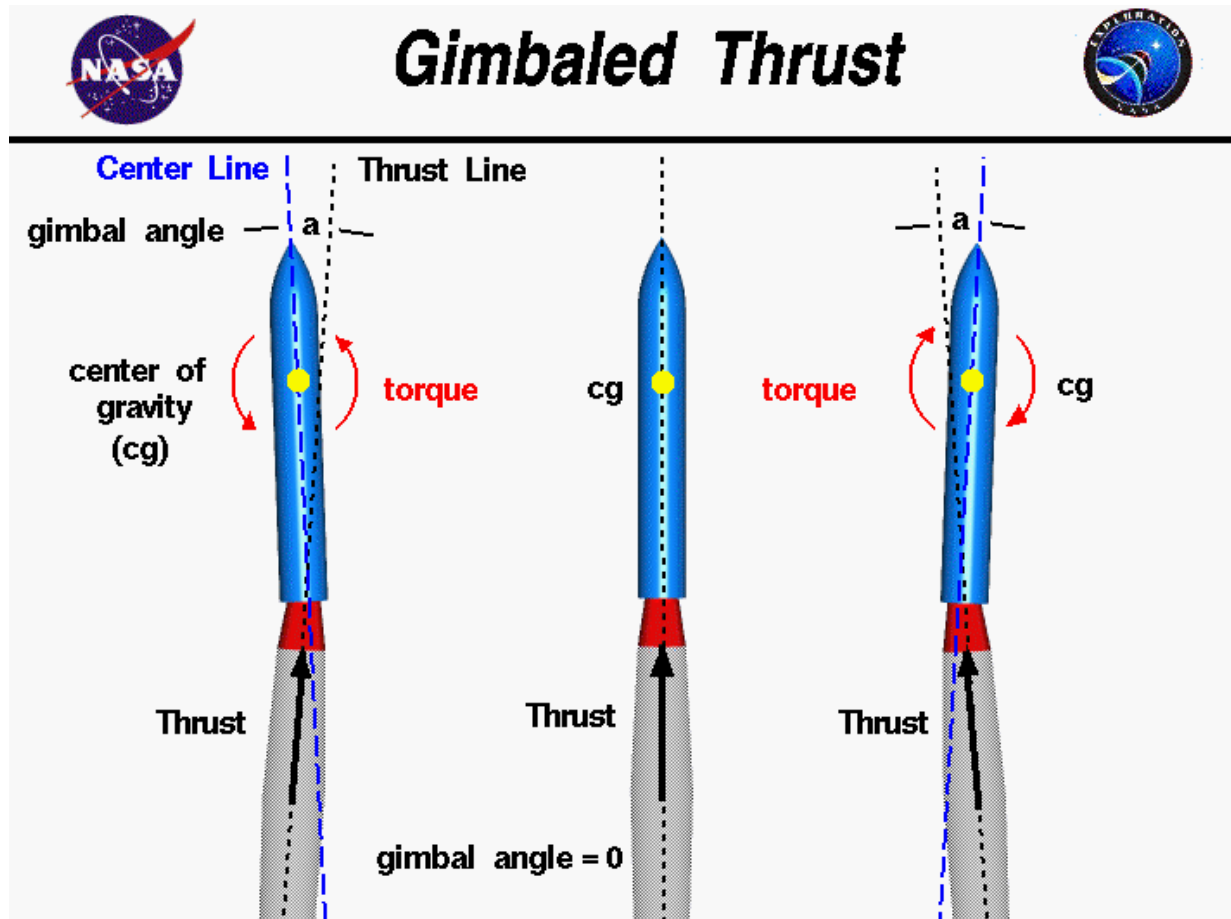
2. ábra. A Kapitza-féle inga sematikus ábrája [3]

2.2. Az inverz inga gyakorlati alkalmazása

Az előző (2.1.) fejezetben említett szabályozó algoritmusok tesztelésén kívül más, gyakorlati felhasználása is van a fordított ingának. A. következő részekben erre látható néhány példa.

2.2.1. Rakétatechnika

A repülő rakétát az időjárás viszontagságai, a *Coriolis-erő*, illetve a hajtómű nem megfelelő működése letéríthetik annak pályájáról.



3. ábra. Egy rakéta stabilitása[8]

Az atmoszférán belül maradó változatok a manőverezéshez mozgatható aerodinamikai felületet, légterelőket használnak. A modern űrrakétáknál a hajtómű fűvókájának dőlése változik meg, annak függvényében, hogy a gép milyen irányba dől.[8]

A rakéta tekinthető egy speciális inverz ingának, a rakéta teste az ingarúd, a függőleges helyzettől való eltérést valamilyen dőlésszögmérő vagy giroszkóp végzi, a beavatkozásszerv a légterelő, illetve a hajtómű szórófeje, ezek korrigálják a szerkezet irányát.[8]

2.2.2. Közlekedési járművek, személyszállítás

Az inverz inga alapú mobilrobotok egy forradalmian új megközelítést jelentenek a közlekedésben, illetve a személyszállításban. Az ilyen jellegű járművek két keréssel és egy közös testtel rendelkeznek. A kerekek differenciálisan, azaz egymástól függetlenül vezérelhetők, így a kanyarodáshoz, irányváltatáshoz nincs szükség különleges kormányműre. Ebből kifolyólag a felépítésük egyszerű, a gép könnyű, gyors. A kétkerekű járműveknek az előnye, hogy helytakarékos és a három- vagy négykerekű kocsikkal szemben ezek feldönthetetlenek, hiszen ha megpróbálná valaki feldönteni, az újra visszaállna stabil helyzetbe.

Ilyen eszköz például a világszerte is jól ismert *Segway Personal Transporter*.



4. ábra. A Segway x2 PT (Personal Transporter)[10]

A *Segway PT* egy gyors és hatékony szállítóeszköz. Nem csak emberek szállítására, hanem kisebb csomagok elvitelére is alkalmas. Kicsi, egyszerű kialakítása miatt kevés helyet foglal, össz tömege viszonylag kicsi. Az irányítása roppant egyszerű, a vezető személynek csupán a tömegközéppontját kell változtatni (előre dől, előre megy, jobbra dől, jobbra kanyarodik, stb...). [10]

Ideális:

- belvárosi közlekedésre
- rendezvényeken és bevásárlóközpontokban reklámhordozónak
- parkolóőröknek, biztonsági őröknek gyors és olcsó közlekedési eszköz

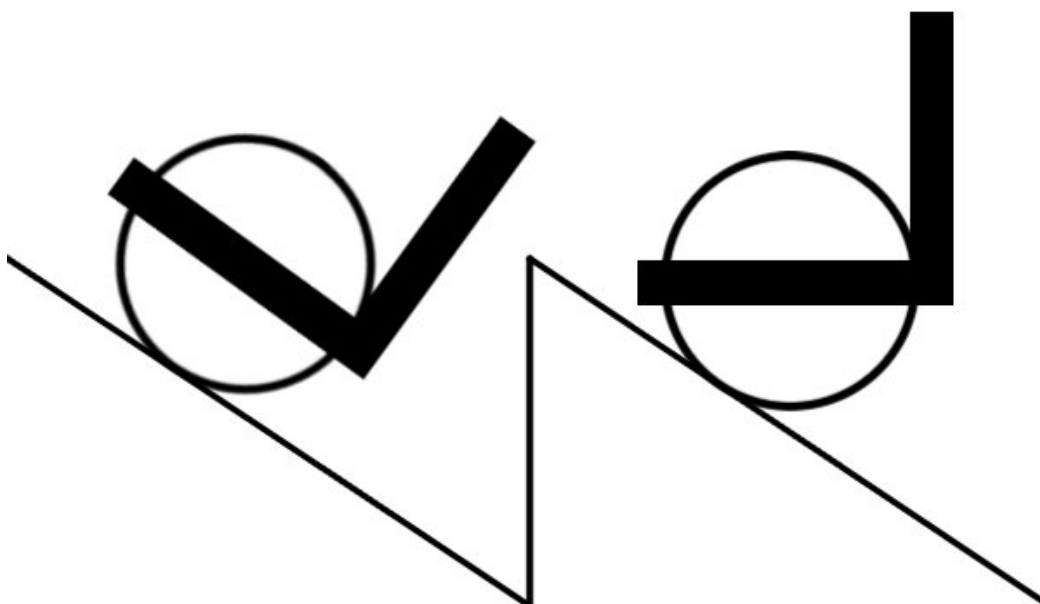


5. ábra. A Segway használat közben [10]

2.2.3. Elektromos kerekesszék

Az eszköz célcsoportja a mozgáskorlátozottak is lehetnek. Egy ezen az elven működő kerekesszék jóval hatékonyabb, mint a hagyományos. Mint a közlekedésben, itt is igaz, hogy egyszerűbb, kisebb kialakítású az eszköz, így könnyebben el lehet férni a szűk lakásban, folyosókon, ezáltal kényelmesebbé téve a mindennapokat. Az egyszerűbb kialakítás révén olcsóbb is lenne, a gyártás során csökken a felhasznált anyagmennyiség. Az önegyensúlyozó elv miatt a rámpán is kényelmesebb lehet a fel- és lejutás.

A szenzoroknak hála, a szék a Föld középpontjához képest mindig függőleges marad, emiatt a kerekesszéket használó személynek nem kell félnie a meredek rámpán: olyan érzése lenne, mintha végig vízszintes talajon haladna.



6. ábra. A hagyományos (bal) és az önegyensúlyozó (jobb) kerekesszék egy meredek rámpán

2.2.4. Mobilrobotok

A következő felhasználási terület az olyan önműködő mobilis robotok, melyek az inverz inga elve miatt gyakorlatilag feldönthetetlenek. Ennek nagy előnye a három-, illetve a négykerekű verziókkal szemben az, hogy ha egy ilyen robot nekiütközik valaminek, vagy valaki véletlenül meglöki, akkor ez nem fog feldőlni, ellenben a többkerekűekkel szemben.

Az ilyen önműködő gépeket a háztartásban idős vagy fogyatékossgal élő emberek megsegítésére lehetne használni. Ilyen segítő robotokat gyakran lehet látni a különböző tudományos-fantasztikus regényekben, filmekben.

Ezeket a robotokat még a hadiiparban is lehet használni: már napjainkban is vannak láncotalpas vagy négykerekű harci robotok. A kétkerekűeknek viszont nagy előnye a többivel szemben, hogy kis helyet foglalnak el, ezért könnyű szállítani, tárolni őket. Ha találat éri, de még működőképesek maradnak, akkor nem kell amiatt aggódni, hogy a még ép robot feldőlne, s emiatt mozgásképtelenné válna.

A fenti példákon kívül a szórakoztatóiparban is lehet hasznosítani ezeket a robotokat, mint játékokat, például focizó robotokként:



7. ábra. Tanulók által irányított robot-foci [12]

3. A tehetetlenségi mérőegység

A tehetetlenségi mérőegység, vagy más néven *Inertial Measurement Unit* (IMU) felelős azért, hogy a robot a függőlegestől mért dőlésszögét meghatározza. Erre két MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) szenzor áll rendelkezésre, egy giroszkóp és egy gyorsulásmérő.

A mikro-elektromechanikus giroszkóp és gyorsulásmérő előnye, hogy:

- érzékeny
- kompakt kialakítású (kis méret és tömeg)
- olcsó

Hátrányuk viszont, hogy önmagukban nem alkalmasak a dőlésszög megmérésére. Ezért az úgynevezett szenzorfüziót (részletek a 3.3. fejezetben) kell alkalmazni, mely a két érzékelőből nyert hasznos adatok segítségével pontosan képes meghatározni a dőlésszöget.

3.1. A MEMS gyorsulásmérő

A gyorsulásmérő egy olyan elektromechanikai érzékelő, mely a ráható gyorsulás nagyságát méri meg. Ez a gyorsulás lehet nyugvó, mint például a föld gravitációs gyorsulásából (g) eredő, vagy dinamikus, mely szenzor mozgásából, vibrációjából ered.

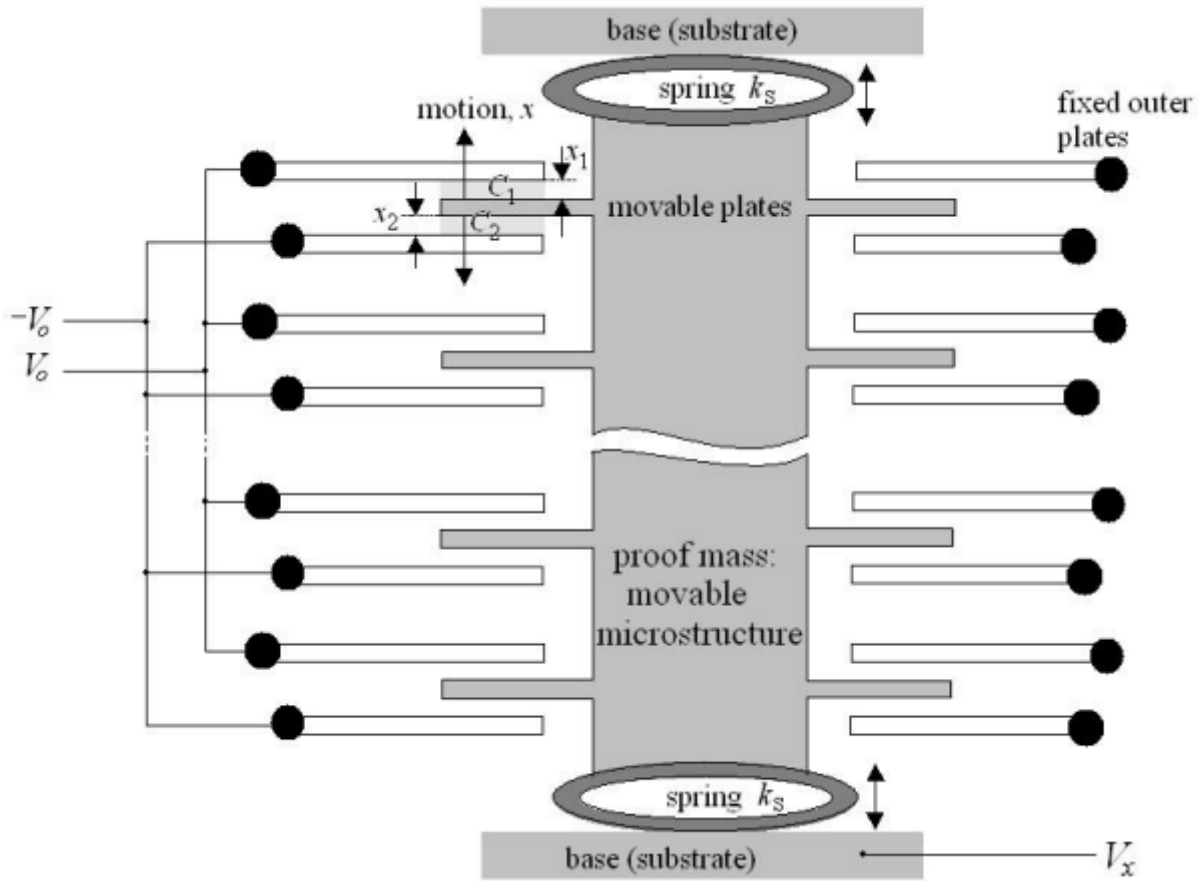
A MEMS gyorsulásmérő a benne található kondenzátoron mérhető kapacitásváltozás segítségével méri meg a szenzor gyorsulását.

$$C = \varepsilon \frac{A}{x}$$

Ahol:

- C a kondenzátor kapacitása
- ε a két fegyverzetet elválasztó dielektrikum permittivitása
- A elektródák felülete
- x a két fegyverzet távolsága

A MEMS gyorsulásmérőkben egy felfüggesztett hitelesített test van. A felfüggesztés a gyorsulás következtében fellépő tehetetlenség következtében megnyúlik vagy összehúzódik. Az így változó felület az, ami változtatja a vezetőrétegek közötti kapacitást. [13]



8. ábra. A gyorsulásmérő elvi felépítése [13]

A két fegyverzetre az alábbi egyenletek írhatóak fel: [13]

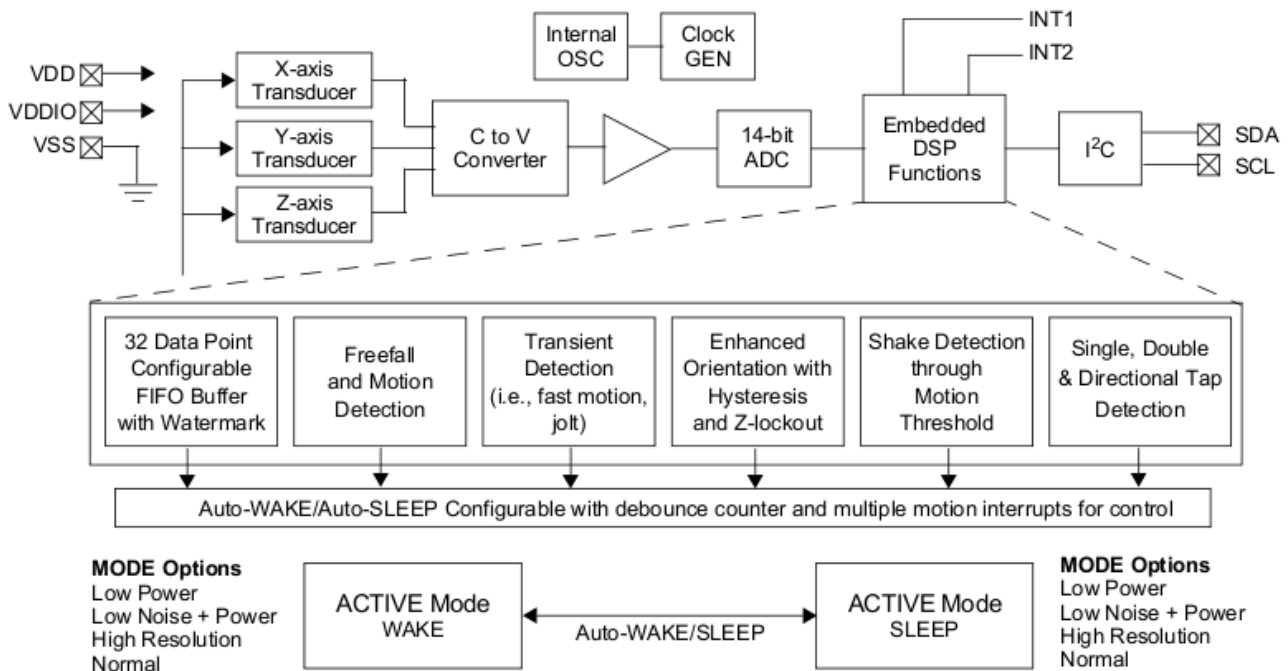
$$C1 = \varepsilon \frac{A}{x1} = \varepsilon \frac{A}{(d+x)} \text{ és } C2 = \varepsilon \frac{A}{x2} = \varepsilon \frac{A}{(d-x)}$$

Ha a gyorsulás nulla, akkor $C1$ és $C2$ kapacitás egyenlő, mert $x1$ és $x2$ távolságok is egyenlőek. Ha x nem nulla értékű, akkor a kapacitásváltozás: [13]

$$C2 - C1 = 2 \Delta C = 2 \varepsilon A \frac{x}{(d-x^2)}$$

3.1.1. MMA8451Q - három szabadságfokú digitális gyorsulásmérő

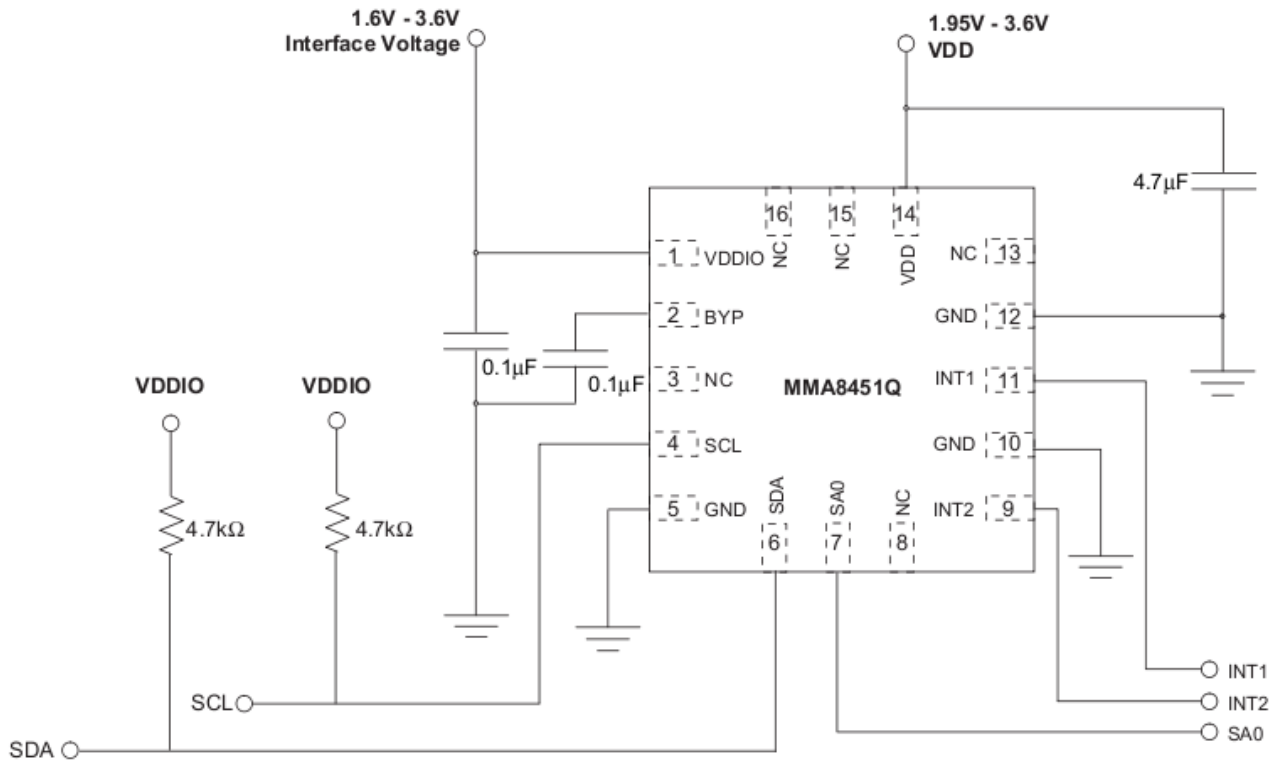
Az *MMA8451Q* egy alacsony fogyasztású, három szabadságfokú, 14 bites, digitális gyorsulásmérő.



9. ábra. A gyorsulásmérő hatásvázlata [14]

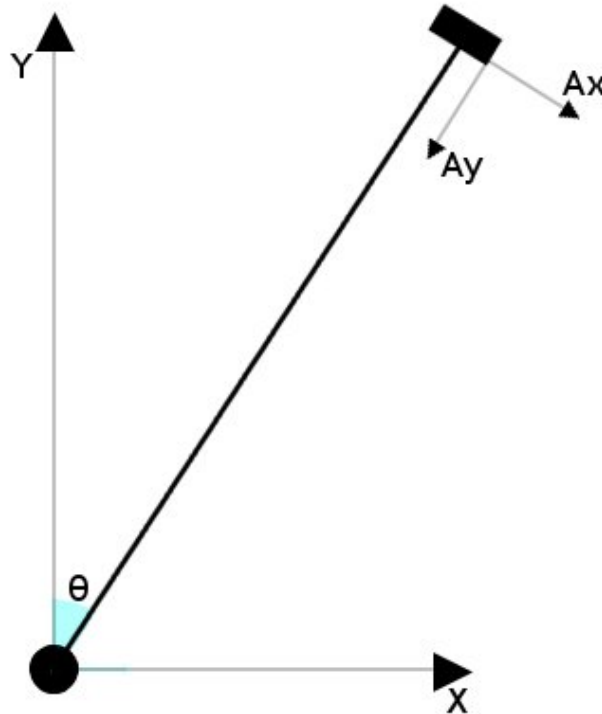
Főbb tulajdonságai: [14]

- 1,95-3,6 V feszültségtartomány
- széles hőmérséklet tartomány (-40 °C-tól +85 °C-ig)
- ± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g dinamikusan állítható tartomány
- adatátvitel: 1,56-800 Hz
- alacsony fogyasztás
- 14 és 8 bites digitális kimenet
- I²C
- self-test



10. ábra. A szenzor kapcsolási rajza [14]

3.1.2. A dőlésszög meghatározása gyorsulásmérővel



11. ábra. A dőlésszög

Az x tengely mentén érzékelt gyorsulás nagysága egyenlő a nehézségi gyorsulás és dőlésszög szinuszának szorzatával:

$$Ax = g \sin(\theta)$$

A fenti egyenletből kifejezhető a dőlésszög:

$$\theta = \sin^{-1} \frac{Ax}{g}$$

Mivel a nehézségi gyorsulás függ a földrajzi szélességtől és a tengerszinttől való távolságtól, ezért annak értékét is érdemesebb kiszámolni, mintsem egy konstansként kezelni. Az x és y tengely mentén érzékelt gyorsulás nagysága és a nehézségi gyorsulás vektorai egy derékszögű háromszöget alkotnak, ahol Ax és Ay a háromszög befogói és g az átfogó. Pitagorasz-tétel segítségével könnyedén kiszámítható: [15] [16]

$$g^2 = Ax^2 + Ay^2$$

Ebből g kifejezve:

$$g = \sqrt{Ax^2 + Ay^2}$$

Behelyettesítve a fenti egyenletbe:

$$\theta = \sin^{-1} \frac{Ax}{\sqrt{Ax^2 + Ay^2}}$$

Ezzel a formulával már meghatározható a dőlésszög, attól függetlenül, hogy a robot a bolygó mely pontján van, de még akkor is, ha a Holdon lenne.

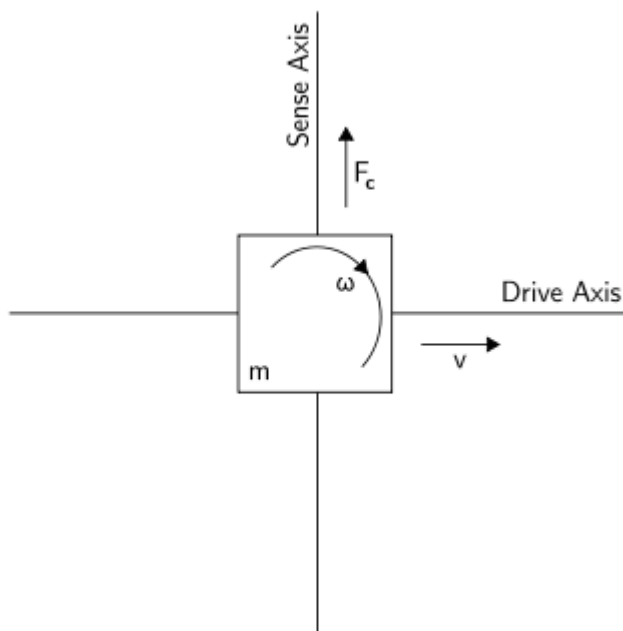
Kis szögek esetén θ jó közelítést ad $\sin(\theta)$ -re, így a szögfüggvény használata elvethető.

Kód formájában az alábbi alakban néz ki a dolog: [15]

```
float GetGyorsSzog() {  
    GyorsSzogXYZ(&VxGyors, &VzGyors, &VyGyors);  
    GyorsSzog = VxGyors / (sqrt((float) VxGyors * (float) VxGyors + (float)  
VyGyors * (float) VyGyors));  
    return GyorsSzog;  
}
```

3.2. A MEMS giroszkóp

A giroszkóp egy olyan elektromechanikai érzékelő, mely egy adott tengely szögsebességét méri meg.



12. ábra. A giroszkóp működése [17]

Ennek gyakorlati megvalósításaként egy szilíciumhordozó lapkán egy felfüggesztett tehetetlenségi elem van rögzítve, mely ha a szenzor forgásnak van kitéve, akkor rá egy a szögsebességgel arányos *Coriolis -erő* hat: [17]

$$F_c = -2m(\omega \times v)$$

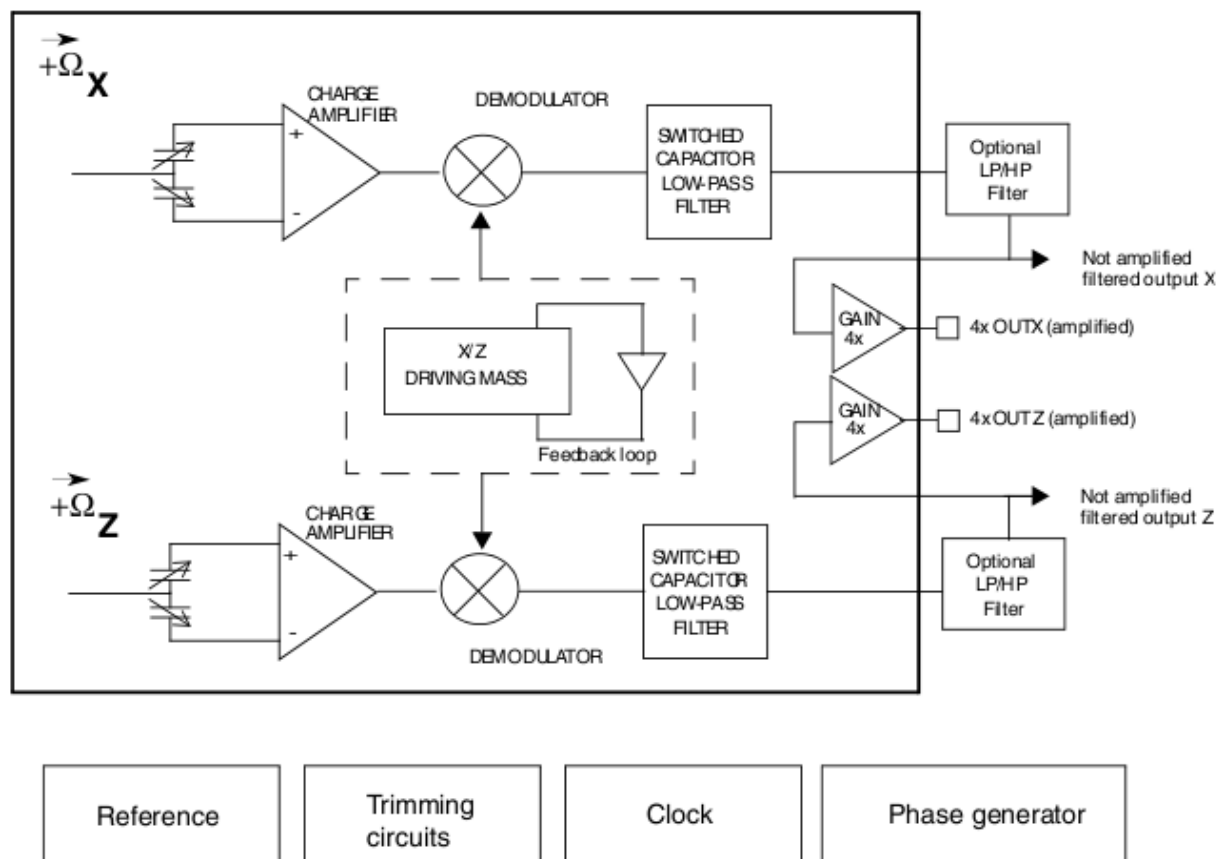
Ahol:

- F_c a *Coriolis -erő*
- m a tehetetlenségi elem tömege
- ω a tehetetlenségi elem szögsebessége
- v a tehetetlenségi elem sebessége

Az elem elmozdulása kapacitív módon érzékelhető.

3.2.1. LPY450AL - két szabadságfokú analóg giroszkóp

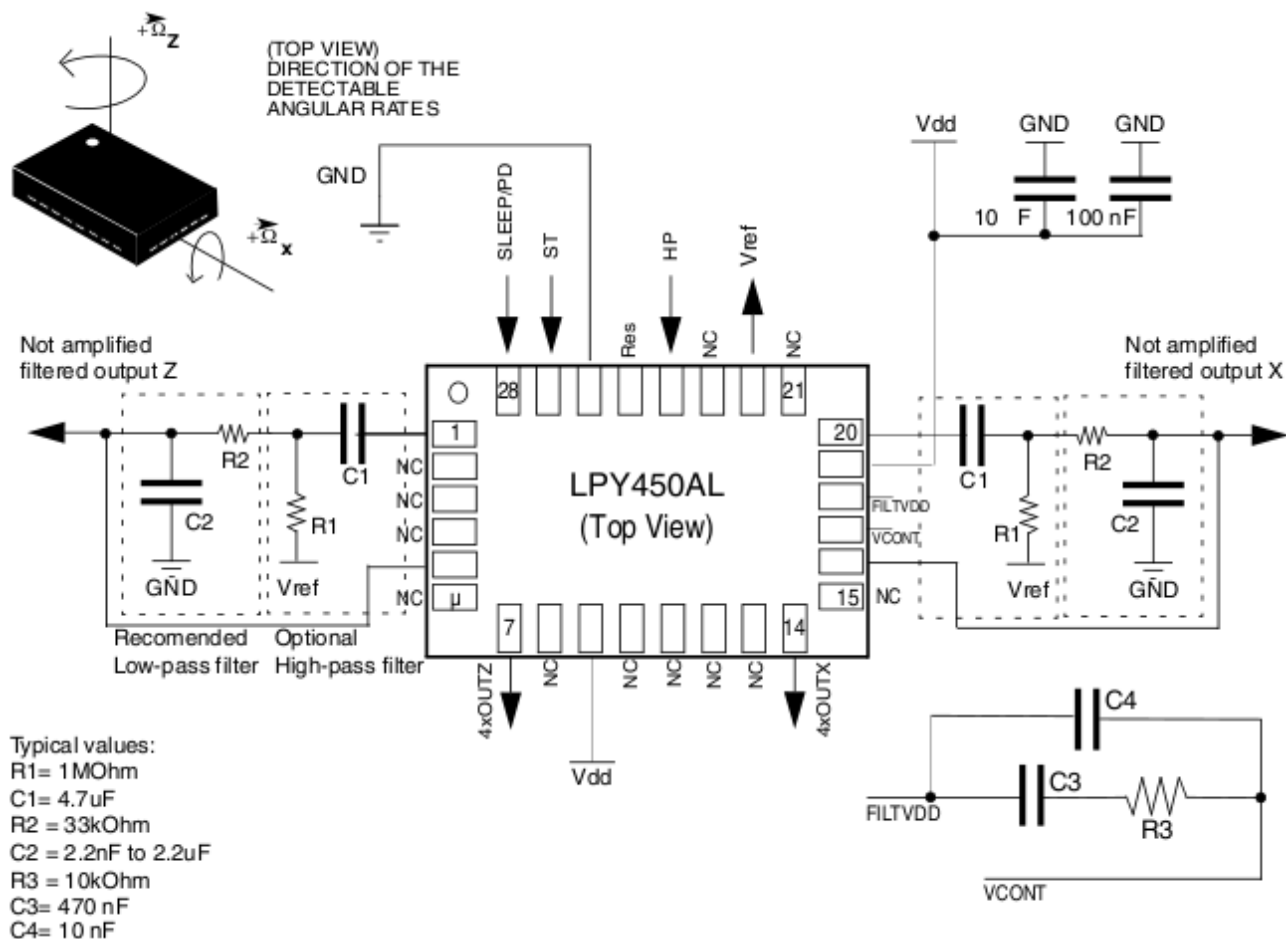
Az *LPY450AL* egy alacsony fogyasztású, két szabadságfokú analóg giroszkóp.



13. ábra. A giroszkóp hatásvázlata [18]

Főbb tulajdonságai: [18]

- 2,7-3,6 V feszültségtartomány
- széles hőmérséklet tartomány (-40 °C-tól +85 °C-ig)
- két-két kimenet mindegyik tengelynél
- integrált aluláteresztő szűrő
- alacsony fogyasztás
- ± 500 dps mérési tartomány
- self-test
- sleep mode
- ellenálló a rázkódás és vibrációval szemben



14. ábra. A szenzor kapcsolási rajza [18]

Mielőtt a giroszkóppal bármilyen mérés történne, előtte kalibrálni kell, meg kell határozni a pontos függőleges helyzetet. Ezt a robot bekapcsolásakor 20 (automatikus) mérési ciklus segítségével állapítja meg. A mérés ideje alatt egy állapotjelző LED fog világítani. [15]

```

float GyroCalib() {
    float val = 0.0;
    digitalWrite(LED_Calib, HIGH);
    for (int i = 0; i < 20; i++) {
        val += analogRead(Gyro);
        delay(5);
    }
    val /= 20.0;
    digitalWrite(LED_Calib, LOW);
    return val;
}

```

3.2.2. A dőlésszög meghatározása giroszkóppal

A MEMS giroszkóp egy adott tengely szögsebességének nagyságát méri meg. A szögsebesség $t1$ és $t2$ időpontok között vett integráljával meghatározható a dőlésszög. Röviden: [15]

$$\theta(t) = \int_{t1}^{t2} \omega(t) dt$$

A fenti folytonos idejű formulát a következő diszkrétidejű közelítéssel lehet megkapni:

$$\theta[k] = \theta[k-1] + \omega[k] Ts$$

A mikrokontroller és a szenzorok is 3300 mV-ról üzemelnek, az ADC felbontása 10 bit, a giroszkóp érzékenysége pedig 2 mV/fok, ezért annak a dőlésszöge (radiánban) a következőképpen kapható meg: [15]

$$\theta = \frac{V_{gyro} * 3300 * 2}{2^{10} * 180} Ts = \frac{V_{gyro} * 3300}{512 * 180} Ts$$

Kódként: [15]

```

(float) (VGyro - GyroInit) * 3300.0f * (float) Eltido
/ (512.0f * 180.0f) ;

```

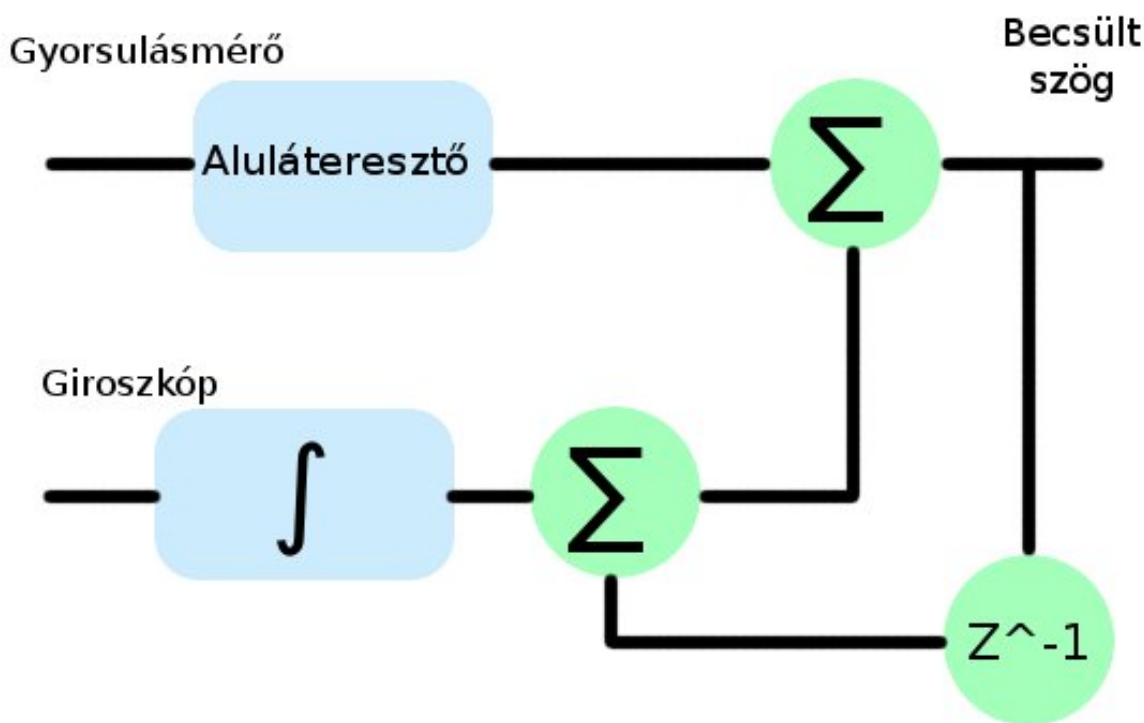
3.3. A szenzorfüzió

Az előző fejezetekből ismertté vált a szenzorok működése, felépítése, illetve az, hogy hogyan lehet a robot dőlésszögét kiszámolni velük.

Mivel sajnos a két szenzor önmagában nem alkalmas a dőlésszög pontos megmérésére, ezért az úgynevezett szenzorfüzióhoz kell folyamodni. A fúzió következtében a gyorsulásmérő javítja a giroszkóp alapértékének csúszását, a giroszkóp pedig csökkenti a gyorsulásmérő zajos eredményeit. [16]

A szenzorfüzió egyik legismertebb és leghatékonyabb módszere a *Kálmán-szűrő*.

Sajnos a *Kálmán-szűrő*t bonyolultsága miatt nem érdemes ebben az esetben használni, mivel olyan adatok, mérések szükségesek hozzá, melyek jelenleg nem állnak rendelkezésre. Ezért inkább az úgynevezett *Balance filter* (egyensúlyozó-szűrő) alkalmazása a célszerű. Ahogy a nevéből is sejthető, ez a szűrőalgorithmus kifejezetten önegyensúlyozó eszközökre alkalmazva lett kifejlesztve, gyorsulásmérő és giroszkóp használatával. Ez a szűrő jóval egyszerűbb, mint a *Kálmán-szűrő*, ugyan nem olyan pontos és hatékony, de a célra tökéletesen megfelel. [19]



15. ábra. A szenzorfüzió hatásvázlata

Előnyei: [19]

- kiszűri a zajokat
- nem terheli a processzort
- gyorsan meg lehet vele határozni a dőlésszöget

Hátrányai: [19]

- kissé bonyolult, de még mindig egyszerűbb, mint a Kálmán-szűrő

A működése röviden: a gyorsulásmérő jele egy aluláteresztő szűrőn halad át, amely a vibrációból származó zajokat szűri ki. A giroszkópból jövő szögsebesség integrálásával megkapható a dőlésszög, amihez a múltbéli értéket adva kapható meg a becsült dőlésszög.

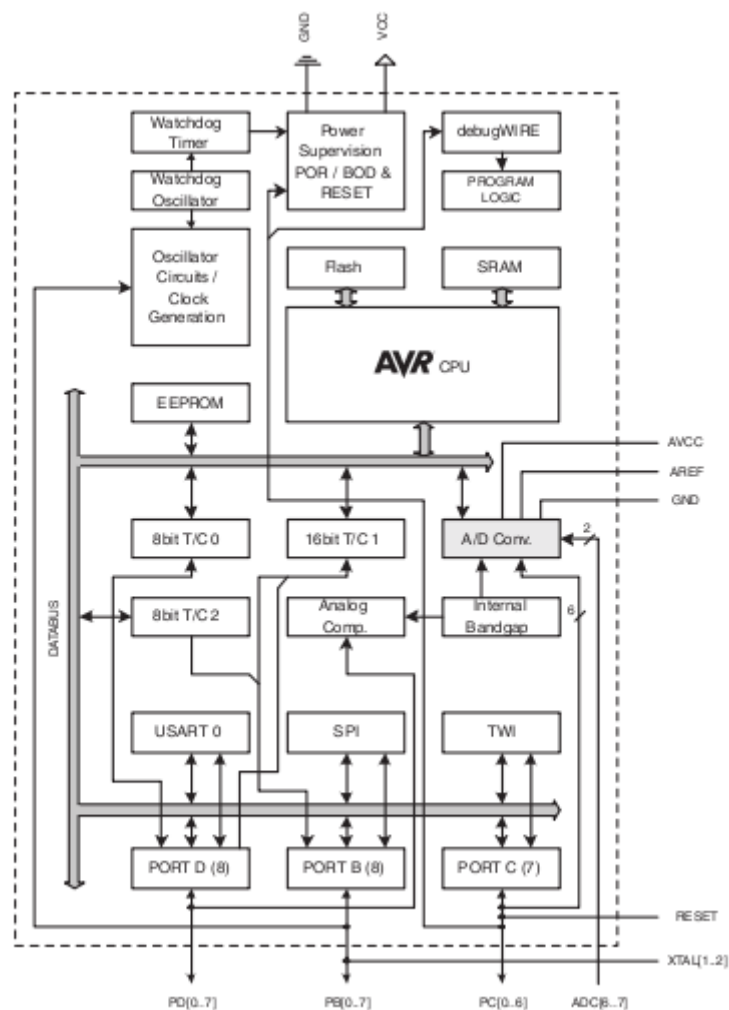
Mindez kód formájában: [15]

```
float EstSzog() {
    Currido = micros();
    Eltido = Currido - Prevido;
    Prevido = Currido;
    Eltido = (float) Eltido / 1e6f;
    float Szog = GetGyorsSzog();
    if (Firsttime) {
        CurrSzog = Szog;
        Firsttime = false;
    } else {
        VGyro = analogRead(Gyro);
        X = (float) (VGyro - GyroInit) * 3300.0f * (float) Eltido
            / (512.0f * 180.0f) ;
        CurrSzog = 0.9 * (PrevSzog + X) + 0.1 * Szog; //aluláteresztő
    }
    PrevSzog = CurrSzog;
    return CurrSzog;
}
```

4. A fő vezérlő egység

A *Main Control Unit* (MCU), magyarul fő vezérlő egység a robot központi része, ez felelős a szenzorok által mért adatok feldolgozásáért, a motorok irányításáért, a szabályozó helyes működéséért, stb.

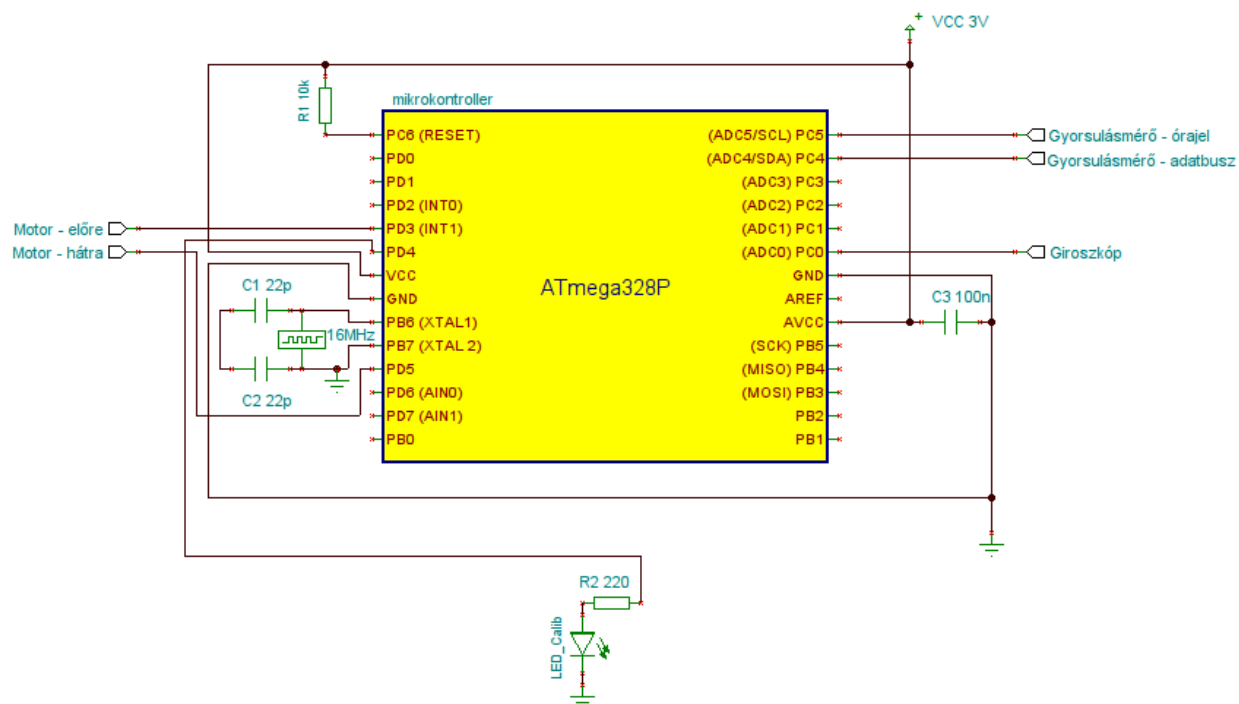
Az MCU-ban egy *Atmega328P* típusú Atmel AVR mikrokontroller található.



16. ábra. A mikrokontroller hatásvázlata [20]

Az *Atmega328P* főbb tulajdonságai: [20]

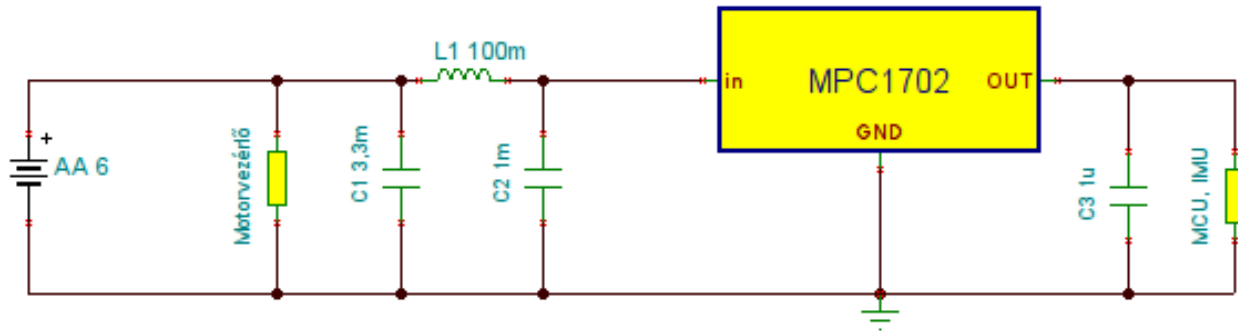
- nagy teljesítmény, kis fogyasztás
- 1,8-5,5 V feszültségtartomány
- hőmérséklet tartomány: -40°C-tól +85°C-ig
- memória:
 - 32 kB Flash memória
 - 1 kB EEPROM
 - 2 kB Internal SRAM
 - írási/törlési ciklus: 10.000 Flash/100.000 EEPROM
 - adatmegőrzés: 20 év 85°C-on/ 100 év 25°C -on
- periférikus tulajdonságok:
 - kettő 8 bites időzítő/számláló
 - egy 16 bites időzítő/számláló
 - valós idejű számláló önálló oszcillátorral
 - hat PWM csatorna
 - hat csatorna 10 bites ADC
 - programozható soros USART
 - Master/Slave SPI soros interfész
 - I2C soros interfész
 - programozható *WatchDog* timer
 - analóg komparátor



17. ábra. Az MCU kapcsolási rajza

A *LED_Calib* nevű LED jelzi a bekapcsolás pillanatában a giroszkóp kalibrációját (3.2.1. fejezet).

5. A tápegység



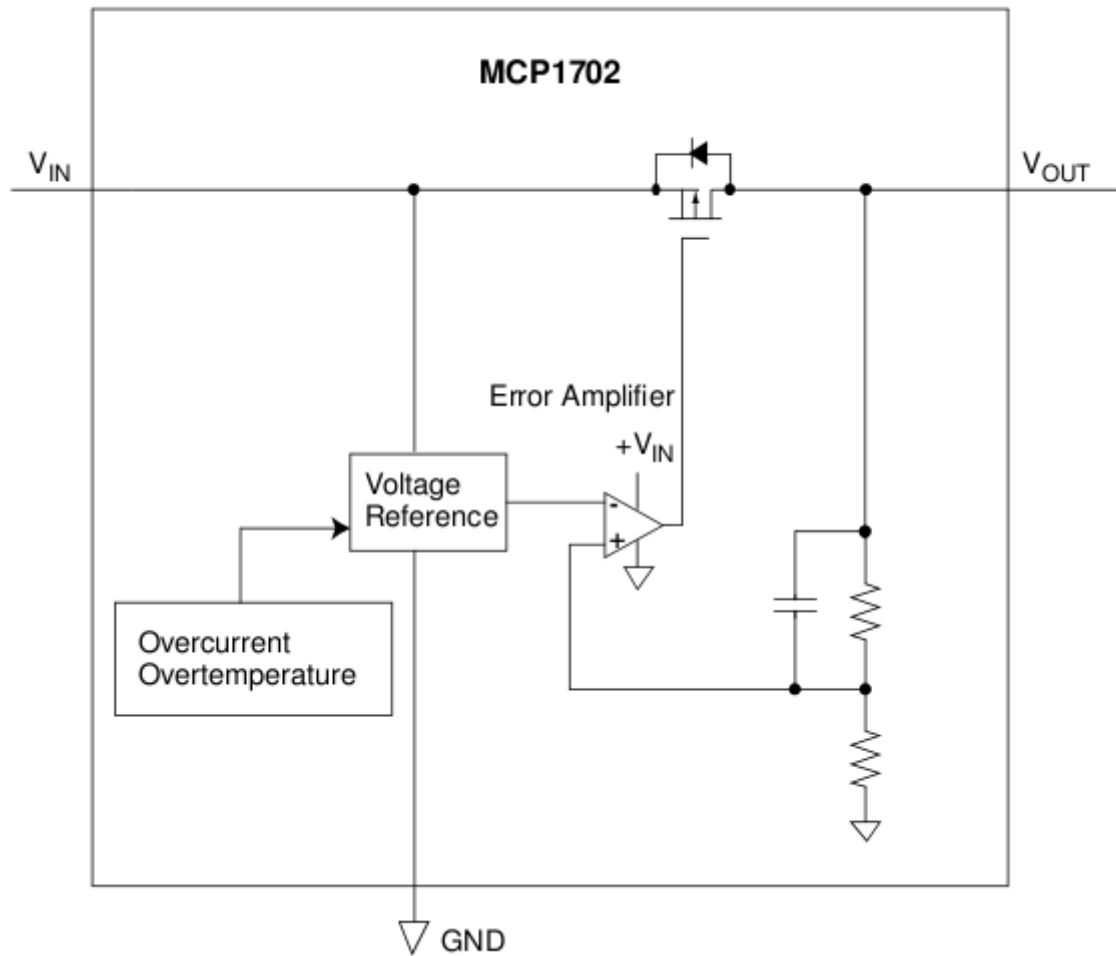
18. ábra. A tápegység áramköre

A robot feszültségforrása 5 darab, egyenként 1,2V-os AA típusú akkumulátor, melyek összesen 6V-ot biztosítanak.

Mivel mind a mikrokontrollernek, mind a szenzoroknak 3,3V az ideális feszültség, ezért egy feszültségszabályozó (MCP1702) IC-t kell beiktatni a rendszerbe.

Az IC főbb tulajdonságai: [21]

- bemeneti feszültség: 2,7-13,2V
- kimeneti feszültségek: 1,2V; 1,5V; 1,8V; 2,5V; 2,8V; 3,0V; 3,3V; 4,0V; 5,0V
- nagy pontosságú kimeneti feszültség: max. $\pm 2\%$ szórás
- rövidzárlat védelem
- hőmérséklet tartomány: -40°C -tól $+125^{\circ}\text{C}$ -ig



19. ábra. A feszültszabályozó hatásvázlata [21]

A kapcsolási rajzon látható egy LC szűrő: ennek oka, hogy a DC motorok működésük közben elektromos zajt generálnak, ami ha nincs megfelelően szűrve, az áramkörökben kárt tehetnek. Ennek elkerülése érdekében egy aluláteresztő szűrő van beiktatva a motor és a feszültszabályozó közé, mely ennek a zajnak a mértékét csökkenti. [15]

6. A motorok és a motorvezérlő egység

E fejezetben a motorokról és az azokat vezérlő áramkörökről lesz szó.

6.1. A motorok

A motorok szerepe, hogy, ha a robot kitér függőleges helyzetéből, akkor a dőlésszög függvényében visszaállítsák azt stabil, egyenes helyzetbe. Ezt a feladatot két DC motor látja el, melynek fő tulajdonságai:

- feszültség: 3-12 V
- áttétel: 1:120
- üresjárat fordulatszám(6 V-on):180 RPM
- üresjárat áram (6 V-on):71 mA
- nyomaték (6 V-on): 1,92 kgcm

Az egyensúly megtartására egy motor is elegendő lenne, mely egy fogaskerék segítségével hajtaná a közös tengelyen lévő kerekeket. Viszont a két motorra a jövőben szükség lesz (lásd.: 9. fejezet), így a későbbiekben nem kell az egész szerkezetet átépíteni, csak a kapcsoláson és a programon kell változtatni.

6.2. A motorvezérlő

A motorok előre, illetve hátramenetét egy *SN754410* típusú H-hidas motorvezérlő irányítja.

Ha az IC *1A* és *EN* bemenetére magas jel , az *2A*-ra pedig alacsony érkezik, akkor a motorok előre mennek. Ha az *2A* és *EN* bemenetre magas, az *1A*-ra alacsony, akkor visszafelé. Ha mind az *1A*, illetve *2A* bemenetekre alacsony jel érkezik, akkor a motorok állnak.

Mindkét bemenetre külön-külön tranzisztor van kötve. Mindkét FET *gate*-je a „kisebbik” (3 V) tápfeszültségre van kötve, a *source* a mikrokontroller kimenetére, a *drain* pedig a „magasabbik” (6 V) oldalra.

7. A szabályozó

A szabályozó feladata, hogy a szenzorokból jövő adatokat feldolgozva a DC motorokat mozgásba hozza, melyek majd korrigálják a robot dőlésszögét. A szabályozó, mely ezt a feladatot ellátja a klasszikus PID szabályozó, mely részletes működése a következőkben olvasható.

7.1. A PID szabályozót felépítő tagok

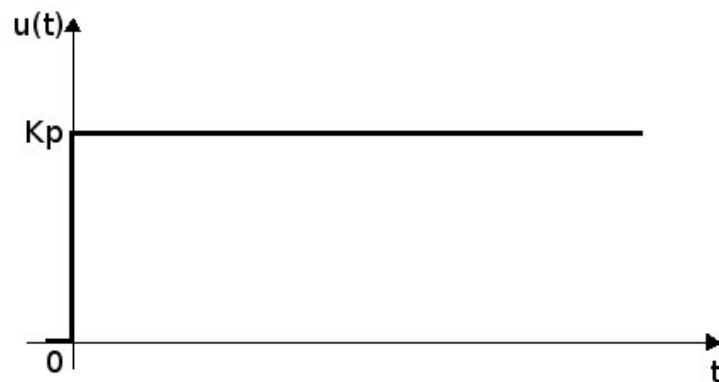
Ebben a fejezetben látható a szabályozási körök három alapvető típusa: az arányos, az integráló és a differenciáló tag. Bemutatásra kerül az egyes tagok működési elve, illetve néhány egyszerű példa a tagok megvalósítására. Továbbá az alaptagok egységugrásra adott válasza, azaz az átmeneti függvényük.

7.1.1. Az arányos tag

Ha egy tag átmeneti függvénye egy nem-nulla K_p konstans értékhez tart, akkor a tagot arányos tagnak nevezzük. Az ilyen blokkokat önbeálló-tagoknak nevezzük. [1]
A tag y kimenőjele, az u bemenőjellel arányos:

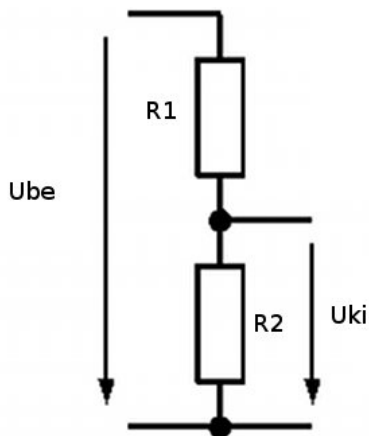
$$y(t) = K_p u(t)$$

ahol K_p az arányossági átviteli tényező, mely meghatározza, hogy a kimenőjel nagysága hányszorosa a bemenőnek.



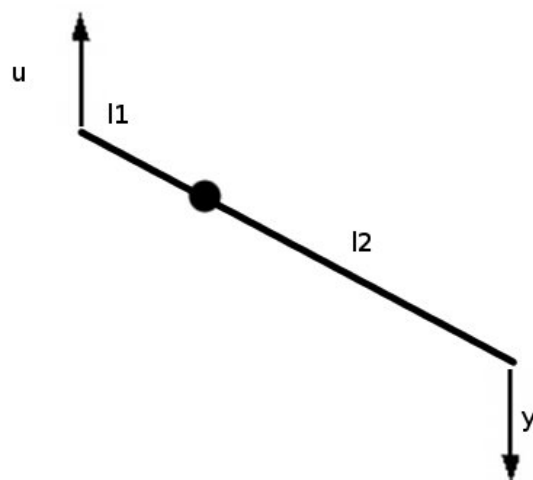
21. ábra. Arányos tag átmeneti függvénye [11]

Néhány példa az arányos tag fizikai megvalósítására:



22. ábra. Feszültségosztó áramkör, mint arányos tag [11]

Ebben az esetben az $u=U_{be}$, $y=U_{ki}$ és a K_p arányossági tényező az $R_2/(R_1+R_2)$ osztóképlet.



23. ábra. Billenőkar, mint arányos tag [1]

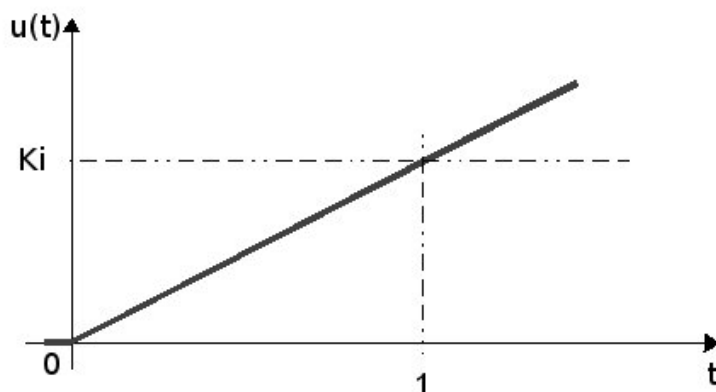
Itt az u a kar baloldala által megtett út, míg a kimenő jel pedig a kar jobboldala által megtett út. A K_p arányossági tényező pedig a kar két oldalhosszának hányadosa l_2/l_1 .

7.1.2. Az integráló tag

A kimenőjel pillanatnyi értéke a bemenő jel összes múltbéli értékétől függ. Tehát, ha a bemenőjel pillanatnyi értéke 0, akkor a kimenőjel nem változik. Ha a bemenőjel pozitív, akkor a kimenőjel növekszik, ha pedig negatív, akkor a kimenőjel csökken. A szabályozási idő hosszú, mivel ha kicsi az eltérés, akkor a kimenőjel lassan változik. Hátránya az arányos taggal szemben, hogy lassabb, ezért lengésre hajlamos, az egyensúlyi állapotba hosszan tartó lengések után áll be. [1] A bemenőjel és a kimenőjel az alábbi összefüggés szerint alakulnak:

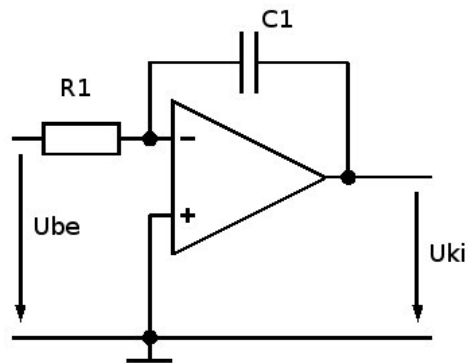
$$y(t) = K_i \int_0^t u(\tau) d\tau$$

ahol K_i az integrálási átviteli tényező.



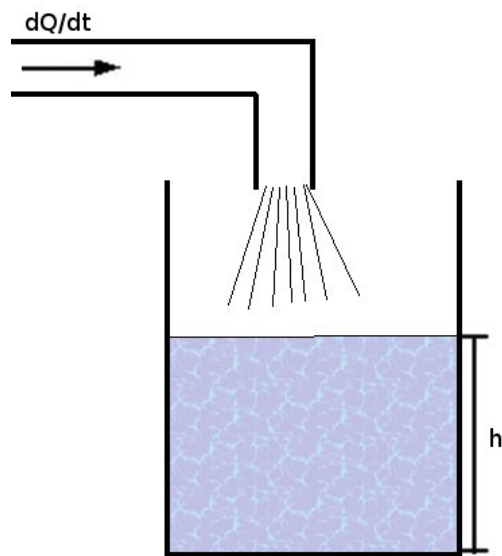
24. ábra. Az integráló tag átmeneti függvénye [11]

Néhány példa az integráló tag fizikai megvalósítására:



25. ábra. Integráló áramkör, mint integráló tag [11]

Ennél a kapcsolásnál $u = U_{be}$, $y = U_{ki}$ és $K_i = -1/(RC)$



26. ábra. Folyadéktartály, mint integráló tag

Ebben az esetben a bemenőjel a tartályba egységnyi idő alatt áramló folyadék, a kimenőjel a folyadékoszlop magassága. A K_i arányossági tényező pedig a tartályban lévő folyadékmennyiség negáltja.

7.1.3. A differenciáló tag

A differenciáló tag esetén a kimenőjel a bemenőjel változási sebességével arányos. Ezt a tagot önmagában nem alkalmazzák, mivel a kimenetén csak akkor van jel, ha a bemenőjelen valamilyen időbeli változás történik. Általában P taggal együtt alkalmazzák (PD szabályozó). A stabil állapot elérést gyorsítja a differenciáló tag. [1]

A bemenőjel és a kimenőjel az alábbi összefüggés szerint alakulnak:

$$y(t) = K_d \frac{u(t)}{dt}$$

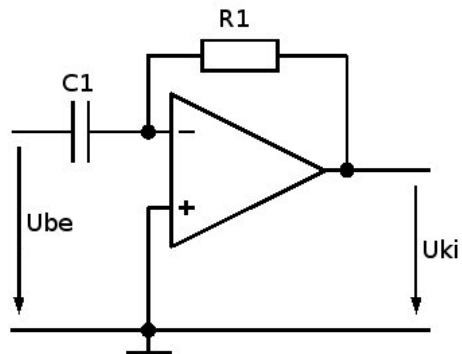
ahol K_d a differenciálási átviteli tényező.



27. ábra. A differenciáló tag átmeneti függvénye.[11]

Az ideális differenciáló tag átmeneti függvénye egy nulla időpillanatig tartó, végtelenül nagy impulzus. Természetesen ilyen a valóságban nem létezik, csak közelíteni lehet egy rendkívül rövid ideig tartó, rendkívül nagy fel- és visszaugrással.

Egy példa az differenciáló tag fizikai megvalósítására:

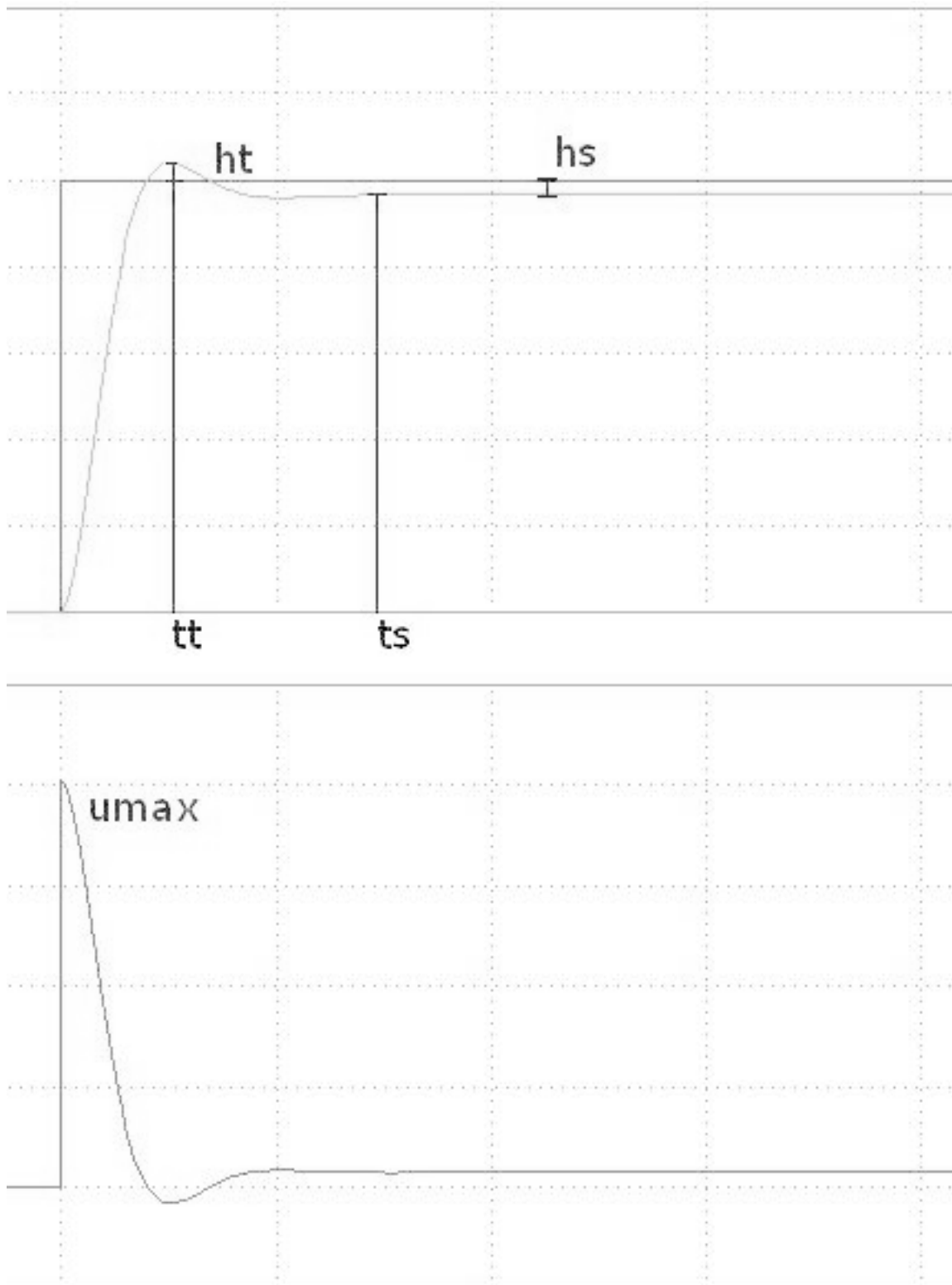


28. ábra. Differenciáló áramkör, mint differenciáló tag [11]

Ebben az esetben az $u=U_{be}$, $y=U_{ki}$ és $Kd=-CR$

7.2. A szabályozó méretezési kritériumai

Egy szabályozási körnek az alapjel követésére elengedhetetlen méretezésbeli kritériumai vannak. Ezek általánosan megszabhatóak az összes szabályozási rendszerszerre, függetlenül attól, hogy épp milyen típusú szabályozásról van szó. [5]



29. ábra. Egy szabályozási kör az egységugrásra adott válasza, illetve a vezérlőjele

Ahol:

ht	a rendszer túllendülése
hs	a statikus hiba
ts	a beállási idő
tt	a túllendülés időpontja
$umax$	a dinamikus túlvezérlés

Az átmeneti függvényt tekintve egy szabályozási rendszernek az alábbi kritériumoknak kell megfelelnie:

- A ht túllendülés nem léphet át egy megengedett értéket.
- A ts beállási idő legyen a lehető legrövidebb, ez garantálja a rendszer gyors működését.
- A hs statikus hiba legyen minél kevesebb, ideális esetben nulla.
- Az $umax$ dinamikus túlvezérlés ne lépjen túl egy bizonyos értéket.

7.3. A tagok működése

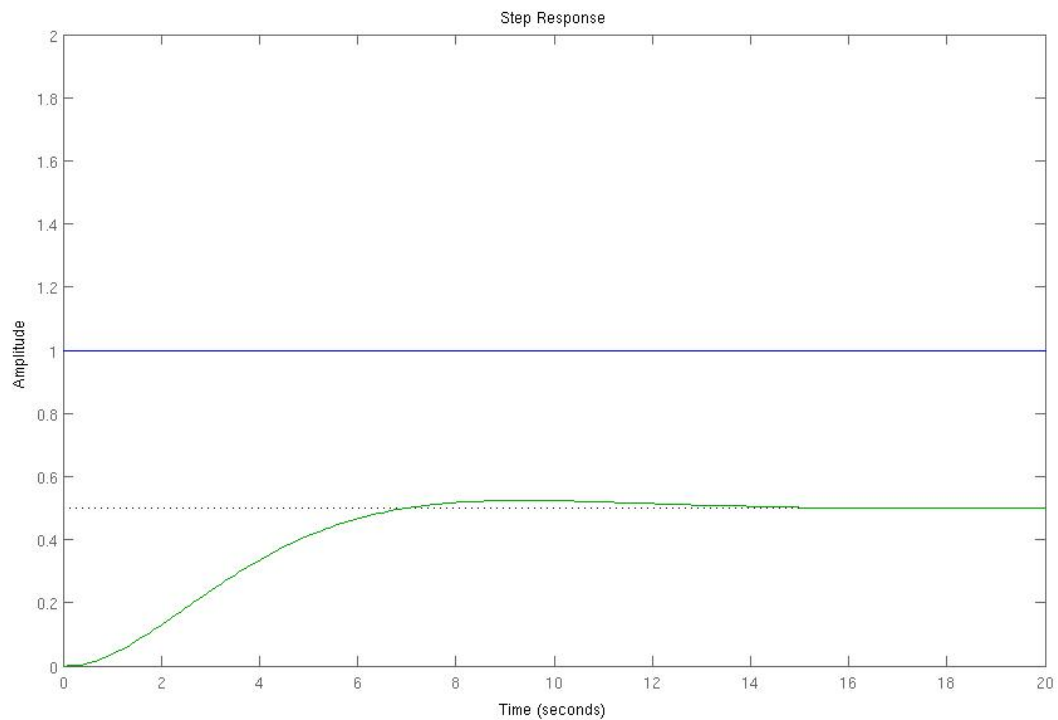
A 7.1. fejezetben ismertté vált a szabályozási köröket felépítő alaptagok, azok viselkedés és átmeneti függvénye. Ebben a fejezetben világossá fog válni, hogy a PID szabályozót felépítő három alaptag hogyan viselkedik, milyen válaszjelet ad egy konkrét rendszerre és nem utolsósorban az, hogy miért is van szükség e három alaptag együttműködésére egy szabályozási körben.

A szabályozandó rendszer átviteli függvénye, melyen keresztül mindez szemléltetve lesz, egy tetszőlegesen választott átviteli függvény:

$$sys(s) = e^{-0.1s} \frac{1}{9s^2 + 6s + 1}$$

7.3.1. P szabályozó

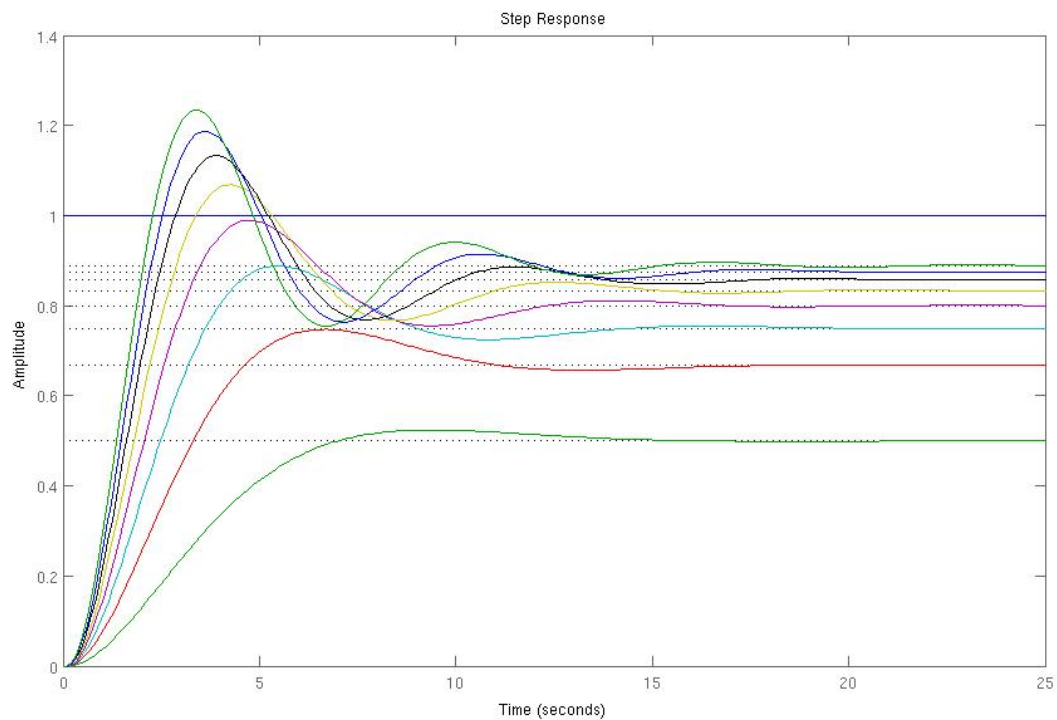
Először csak egy P (arányos) tagból álló szabályozó kör.



30. ábra. A szabályozási kör egységugrásra adott válasza, $c=pid(1)$ érték esetén.

A grafikonról egyértelműen leolvasható, hogy a függvény nem felel meg a 7.2. fejezetben leírt méretezési kritériumoknak. Jól látható, hogy a rendszernek hatalmas a statikus hibája, a várt szintet, az egységugrásnak csupán a felét éri el. [9]

Ha a P szabályozó K_p erősítési tényezője nő, akkor a függvény a következő szerint alakul:

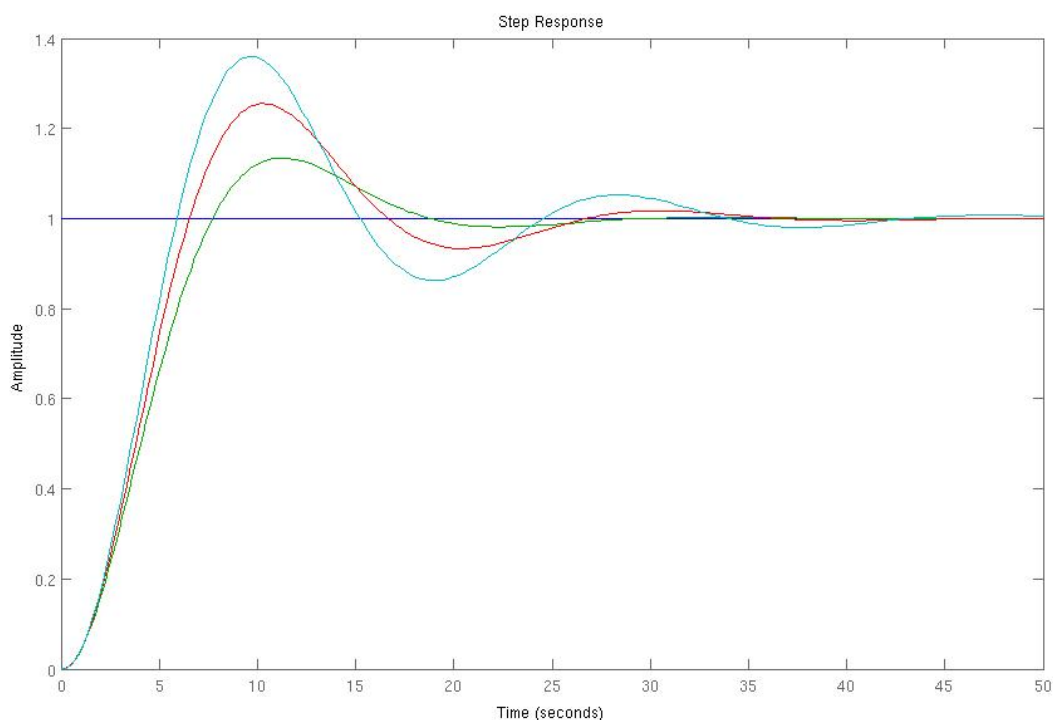


31. ábra. A szabályozási kör egységugrásra adott válasza, $c=\text{pid}(1); c=\text{pid}(2); \dots; c=\text{pid}(8)$ értékek esetén.

Megfigyelhető, hogy ahogyan nő a K_p arányossági átviteli tényező értéke, a függvény egyre inkább megközelíti a kívánt értéket. Ám ezzel egyidejűleg nő a rendszer túllendülése, illetve nő a függvény oszcillációja, csökken a stabilitás. Továbbá ezzel arányosan nő a beállási idő is. [9]

7.3.2. PI szabályozó

Ahelyett, hogy a végtelenségig növelnénk az arányossági átviteli tényezőt (hogy a statikus hiba nulla legyen), inkább egy I (integráló) tag beiktatása a célszerű a rendszerbe. Így egy PI szabályozót kapunk. A szabályozási kör az alábbi alakban fog változni:

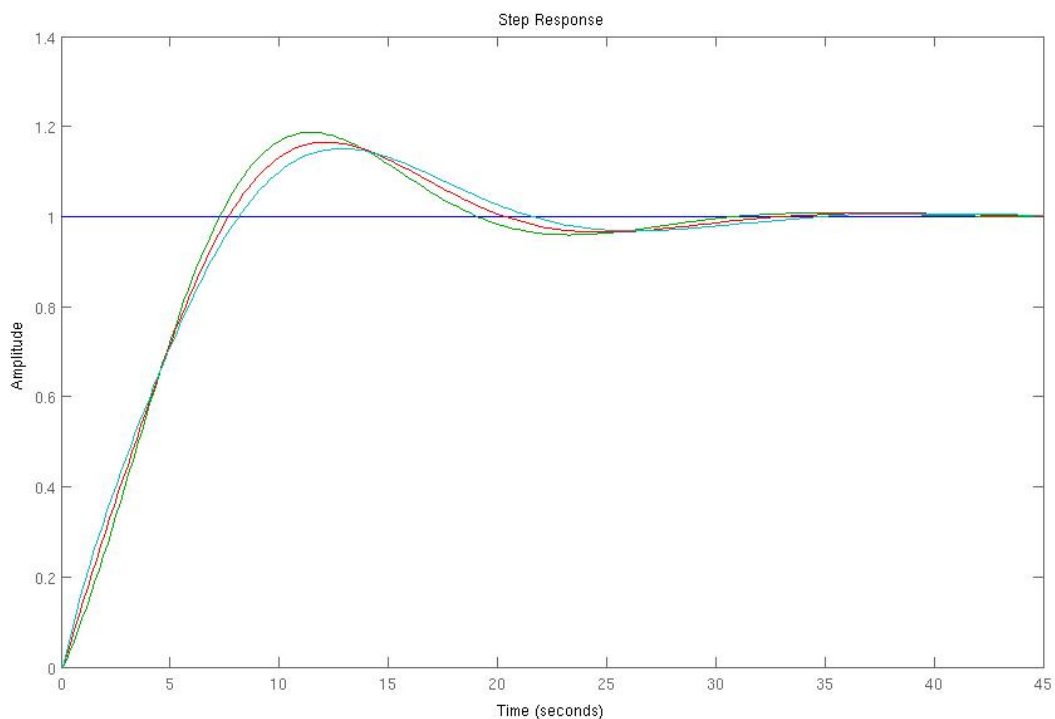


32. ábra. A szabályozási kör egységugrásra adott válasza. $c=pid(1,0.3)$; $c=pid(1,0.4)$; $c=(1,0.5)$ értékek esetén.

Azonnal észrevehető, hogy egy integráló tag hozzáadásával nullára csökkent a statikus hiba. Valamint az is, hogy az integráló tag hozzáadásával gyorsult a stacionárius állapot beállása. [9]

7.3.3. PID szabályozó

Harmadjára a szabályozóhoz alkalmazunk még egy D (differenciáló) tagot. Így egy klasszikus PID szabályozó születik.



33. ábra. A szabályozási kör egységugrásra adott válasza. $c=pid(1,0.4,1)$; $c=pid(1,0.4,1.5)$; $c=(1,0.4,2)$ értékek esetén.

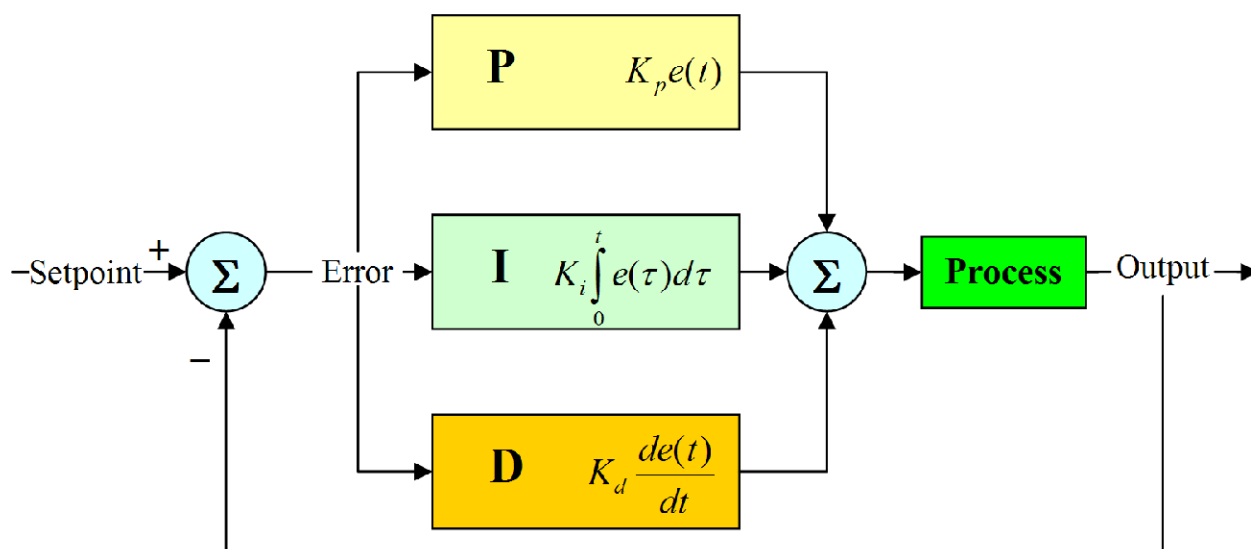
A differenciáló tag csökkenti az integráló tag túllendülését és tovább gyorsítja a stacionárius állapot beállítását, növeli a stabilitást. Így egyértelműen látható, miért is fontos a három alaptag együttes használata. [9]

7.4. A PID szabályozó: összegzés

A PID szabályozó a szabályozás- és irányítástechnikában alkalmazott párhuzamos kompenzáción alapuló szabályozótípus. Nevét az azt felépítő három alaptagról kapta: az arányos-*(Proportional)*, az integráló *(Integral)*, illetve a differenciáló *(Derivative)* tagokról. Egy szabályozót célszerű úgy felépíteni, hogy az reagáljon az aktuális hibára, a múltbéli hibára, illetve a hiba várható jövőbeli alakjára. Az 7.1. fejezetben látható alaptagok működési elvét ismerve, könnyen belátható, hogy erre e három alaptag párhuzamos kapcsolása a legalkalmasabb. [6]

Ha a tagokat párhuzamosan kapcsoljuk, akkor az egyes tagok hatásai összegződnek. Tehát a PID szabályozóra az alábbi összefüggés írható fel:

$$y(t) = K_p u(t) + K_i \int_0^t u(\tau) d\tau + K_d \frac{du(t)}{dt}$$



34. ábra. A PID szabályozó idealizált hatásvázlata [7]

ahol $e(t)=u(t)$, illetve $e(\tau)=u(\tau)$.

A szabályozási kör kódja: [15]

```
void loop() {
    float a = EstSzog() - InitSzog;
    SzogBuffer[SzogBufferIndex] = a;
    SzogBufferIndex = (SzogBufferIndex + 1) % SzogBufferHossz;
    float sz = GetAtlSzog();
    curErr = sz - InitSzog;
    SumErr += curErr;
    if (SumErr > SumErrMax) SumErr = SumErrMax;
    else if (SumErr < SumErrMin) SumErr = SumErrMin; //Ki*SumE/(Kp*Fs*X)
    integral = SumErr * EltIdoSec * Ki / Kp * 10.0;
    derivative = curErr - prevErr;
    if(derivative > 0.1) derivative = 0.1;
    else if (derivative < -0.1) derivative = -0.1; // Kd(curErr-
prevErr)*Ts/(Kp*X)
    derivative = derivative * Kd * EltIdoSec / Kp;
    if(derivative > 120) derivative = 120;
    else if (derivative < -120) derivative = -120;
    Cn = (curErr + integral + derivative) * Kp / 10.0;
    MotorDirec dir;
    if (Cn > 0) dir = DIR_FORWARD;
    else if (Cn < -0) dir = DIR_BACKWARD;
    else dir = DIR_STOP;
    throttle = abs(Cn);
    else MoveMotor(dir, throttle);
    prevErr = curErr;
}
```

7.5. A szabályozó behangolása

E fejezet a szabályozó behangolását ismerteti.

A hangolás az úgynevezett manuális módszerrel történik, melynek lényege, hogy az erősítési tényezőket manuálisan állítjuk, majd a rendszer (ebben az esetben robot) megfigyelésével megállapítjuk, hogy az adott változtatás kedvezően, vagy éppen negatívan hatott-e rá.

A hangolás elején a K_i és K_d tényezőket nullára kell állítani, így csak az arányos tag hat a rendszerre. A K_p értéket addig kell állítani, amíg a robot a függőleges tengely mentén oszcillál.

Ha ez megvan, akkor a K_i tényező módosítása a következő lépés. Ezt az értéket addig kell változtatni, amíg a statikus hiba teljesen meg nem szűnik, ahogy ez 7.3.2. fejezetben is látható.

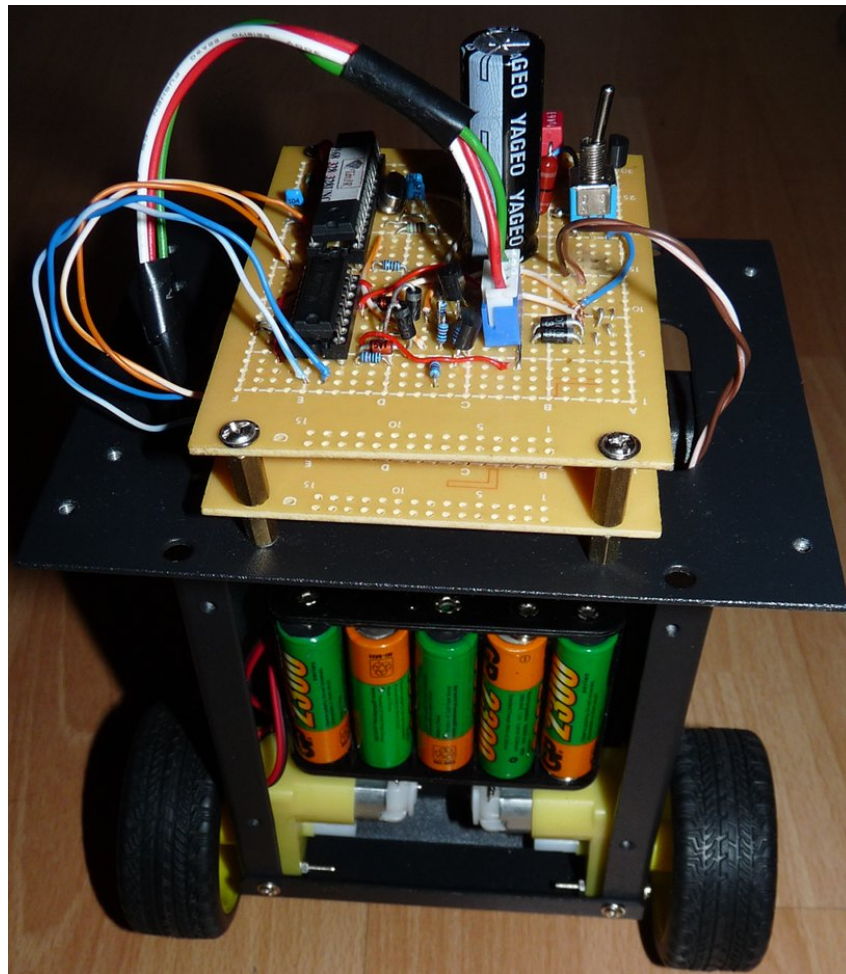
Végezetül a K_d érték segítségével stabilizálni, finomítani lehet a rendszert.

1. Táblázat. Az egyes paraméterek növelésének hatása. [7]

Paraméter	Túllövés	Beállási idő	Statikus hiba
K_p	nő	kis változás (nő)	csökken
K_i	nő	nő	eliminálja
K_d	csökken	csökken	nincs hatás

8. A robot szerkezete

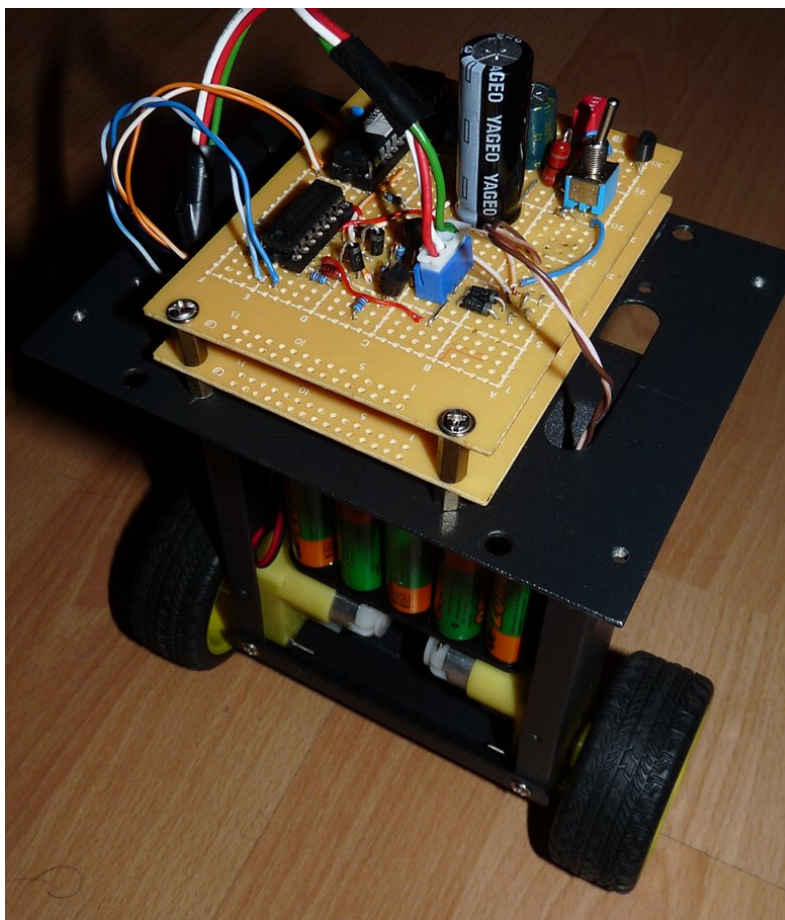
A robotot felépítő egyes részegységek felépítése, elméleti és gyakorlati működése az előző fejezetben bemutatásra került. Végezetül a robot konkrét szerkezetének elemzése maradt hátra. Erről fog szólni az utolsó fejezet.



35. ábra. A robot

A 35. ábrán látható, hogy a robot szerkezete egy masszív fémtestre van építve. A akkumulátortelep a gép közepén helyezkedik el. Ennek az a célja, hogy megadja a robot stabilitását, hiszen ez az egész eszköz legnehezebb része, leegyszerűsítve ez a robot tömegközéppontja.

Az IMU-t célszerű a robot tetején elhelyezni, így az a nagyobbik fémlemez tetejére került, mely (nagysága miatt) a későbbiekben bővítésre ad lehetőséget.



36. ábra. A robot

Az MCU, a tápegység áramköre, valamint a motorvezérlő egy közös univerzális-NYÁK-ra került, ami a könnyebb hozzáférés érdekében szintén a motor tetejére került, közvetlenül az IMU fölé. Mivel ez van a legfelsőbb ponton, ezért a mikrokontroller és motorvezérlő IC-ket könnyen ki-be lehet venni az esetleges javítások, tesztelések alatt.

Végezetül a motor alján van a két DC motor, amik két-két erős modell kerékhez csatlakoznak.

9. Befejezés, jövőbeli tervek

A téma kidolgozása során az egyes fejezetekben részletesen ismertettem a robot funkcionális egységeit, felépítését, bemutattam az IMU két szenzorának működését és használatát, az MCU, a tápegység, a motorvezérlő tulajdonságait, jellemzőit. PID szabályozó jellegzetességeit, a három alaptag viselkedését, a szabályozástechnikában betöltött szerepét. A viselkedési jellemzőik alapján megindokoltam, hogy miért szükséges mindhárom szabályozó tag együttes alkalmazása. A hetedik fejezetben arra is kitértem, hogyan lehet manuálisan behangolni egy PID szabályozót.

A robot továbbfejlesztését tekintve több lehetőség is adódik. Ezek közül talán a legfontosabb, hogy a robot ne csak egyensúlyozni tudjon, hanem képes legyen mozogni is, a saját helyzetének változtatására távvezérlés segítségével. A távvezérlés miatt valamilyen kommunikációs modul beültetése szükséges, ha pedig egy ilyen eszköz beépítésre kerül, akkor akár a szenzorok, motorok adatait is lehet továbbítani, melyeket aztán ki lehet értékelni. A mért adatok segítségével a robot pontos kinematikai és dinamikai tulajdonságait fel lehet írni, s egy precíz egyenletrendszert lehet alkotni a robot viselkedéséről. Ha mindezek megvalósulnak, akkor a robotot akár egyfajta járművé, szállítóeszközzé is lehetne fejleszteni.

10. Irodalomjegyzék

- [1] M. Peschel: Szabályozási körök PID-szabályozókkal; 1964; Műszaki Könyvkiadó
- [2] Wikipedia – Inverted pendulum:
http://en.wikipedia.org/wiki/Inverted_pendulum (letöltés: 2012.11.11.)
- [3] Inga Koszalka : Vibrating pendulum and stratified fluids
- [4] J. A. Holyst and W. Wojciechowski: The effect of kapitza pendulum and price pendulum
- [5] Szilágyi Béla: Folytonos szabályozás rendszertechnikai méretezése; 1997; BME automatizálási tanszék
- [6] Dr. Tuschák Róbert: Szabályozástechnika; 1996; Műegyetem Kiadó
- [7] Wikipedia – PID controller:
http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller (letöltés: 2012.11.11.)
- [8] Nasa: Gimbaled Thrust:
<http://exploration.grc.nasa.gov/education/rocket/gimbale.html> (letöltés: 2012.11.11.)
- [9] Somlay Gergely: PID szabályzó egyszerűen:
<http://www.mathworks.com/company/events/webinars/wbnr60212.html?id=60212&p1=939581482&p2=939581477> (letöltés: 2012.11.11.)
- [10] Segway:
<http://segway.hu> (letöltés: 2012.11.11.)
- [11] Szabályozás:
<http://www.kando-kkt.sulinet.hu/brain/aut/jegyzet/irtech/szabalyozas.html> (letöltés: 2012.11.11.)
- [12] SIMOES, Eduardo do Valle, ICMC, TWO-WHEELED PENDULAR MOBILE ROBOTIC DEVICE (2008)
- [13] Matej Andrejašič MEMS ACCELEROMETERS University of Ljubljana (2008)
- [14] 3-Axis, 14-bit/8-bit Digital Accelerometer, Freescale Semiconductor, Data Sheet: Technical Data (letöltés: 2012.11.11.)
- [15] Kerry Wong: A self-balancing robot:
<http://www.kerrywong.com/2012/03/08/a-self-balancing-robot-i/> (letöltés: 2012.11.11.)
- [16] Odry Ákos: Két kontaktus ponttal rendelkező differenciális meghajtású mobilis robot tervezése, megvalósítása és matematikai modelljének verifikálása , BME-VIK
- [17] Oliver J. Woodman : An introduction to inertial navigation , University of Cambridge (2007)
- [18] LPY450AL MEMS motion sensor: dual-axis pitch and yaw ± 500 dps analog gyroscope, ST (letöltés: 2012.11.11.)
- [19] Shane Colton : The Balance Filter , A Simple Solution for Integrating Accelerometer and Gyroscope Measurements for a Balancing Platform (2007)
- [20] Atmel AVR Atmega328P 8-bit Microcontroller with 4/8/16/32K Bytes In-System Programmable Flash (letöltés: 2012.11.11.)