

Mechatronika

Szépe Tamás, Mingesz Róbert, Gingl Zoltán



2014

A tananyag a TÁMOP-4.1.2.A/1-11/1-2011-0104 "A felsőfokú informatikai oktatás minőségének fejlesztése, modernizációja" c. projekt keretében a Pannon Egyetem és a Szegedi Tudományegyetem együttműködésében készült.



Mechatronika Jegyzet

Szerzők:

Szépe Tamás [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10] fejezetek

Dr. Gingl Zoltán [4, 5] fejezetek

Dr. Mingesz Róbert [4, 5] fejezetek

Lektorálta:

Dr. Bencsik Attila

Hálás köszönet a jegyzet megírásában nyújtott segítségért Nagy Tamásnak, Makan Gergelynek és Vadai Gergelynek.

Szeged, 2014

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés.....	6
1.1	Mechatronika fejlődése, történelmi áttekintés	6
1.1.1	Egy egyszerű mechanikus átalakító	6
1.1.2	Szabályozott mechanikus rendszerek	6
1.1.3	Analóg elektronikával szabályozott rendszerek	8
1.1.4	Digitális elektronikával szabályozott rendszerek.....	8
1.2	Mechatronika definíciója.....	8
1.3	Mechatronika felépítése	9
1.4	Felhasznált irodalom:	10
2	Mechatronikai rendszerek mindennapjainkban	11
2.1	Mechatronikai eszközök a háztartásban	11
2.2	Mechatronikai eszközök a munkahelyen	12
2.3	Egyéb hétköznapi mechatronikai eszközök.....	13
2.4	Mechatronikai példák felépítésük és működésük kifejtésével	13
2.5	Felhasznált irodalom:	15
3	Mechatronikai rendszerek tervezése	17
3.1	Felhasznált irodalom:	21
4	Szenzorok	22
4.1	Szenzorok és alkalmazásaik.....	22
4.1.1	Potenciométer, reosztát.....	22
4.1.2	Kapacitív elmozdulásérzékelő	23
4.1.3	Induktív elmozdulásérzékelők	24
4.1.4	Nyúlásmérő ellenállás	25
4.1.5	Erőszenzor	26
4.1.6	Nyomássenzor.....	27
4.1.7	Gyorsulássenzor	27
4.1.8	Szögsebesség-senzor - giroszkóp	28
4.1.9	Mágneses tér szenzorok.....	29
4.1.10	Optikai szenzorok	30
4.1.11	Hőmérsékletszenzorok	32
4.1.12	Szenzorokmodulok	36

4.2	Szenzorok jelének elektronikai kezelése	39
4.2.1	Feszültségkimenetű szenzorok.....	40
4.2.2	Rezisztív szenzorok	42
4.2.3	Áramkimenetű szenzorok.....	44
4.2.4	Kapacitív és induktív szenzorok.....	44
4.3	Felhasznált Irodalom	45
5	Aktuátorok.....	47
5.1	Motorok.....	47
5.1.1	Egyenáramú, DC motorok	47
5.1.2	Aszinkron (indukciós) és szinkron motorok.....	48
5.1.3	Léptetőmotorok	49
5.1.4	Szervomotorok	52
5.1.5	Motorok összehasonlítása.....	53
5.2	Pneumatikus és hidraulikus aktuátorok	54
5.3	LED-ek, lézerdiódák	55
5.4	Fűtőelemek, Peltier elemek	56
5.5	Az aktuátorok vezérlőjeleinek elektronikai kezelése	57
5.5.1	Egyirányú áram kapcsolása	57
5.5.2	Kétirányú áram kapcsolása.....	59
5.5.3	Váltófeszültség kapcsolása	59
5.5.4	Áram és feszültség folyamatos vezérlése.....	60
5.5.5	Relé, mágneskapcsoló	61
5.5.6	Mágnesszelepek, mágneses reteszek.....	62
5.6	Felhasznált irodalom	62
6	Mechatronikai rendszerek megbízhatósága	64
6.1	Életciklus görbe	64
6.2	Definíciók és jelölések	65
6.3	Konstans meghibásodási ráta modell.....	67
6.4	Összetett rendszerek megbízhatósága.....	67
6.5	Felhasznált irodalom	69
7	Ipari megmunkálók.....	70
7.1	Ipari megmunkálók fajtái, felépítésük.....	70
7.1.1	Eszterga	70

7.1.2	Marógép	70
7.1.3	Megmunkálóközpont	70
7.1.4	3D nyomtató	70
7.2	CNC gépek	71
7.2.1	CNC gépek szerkezete, alapfogalmak.....	71
7.2.2	G-kód alapjai.....	74
7.3	Felhasznált irodalom	81
8	Ipari robotmanipulátorok.....	82
8.1	Robotok programozása	82
8.2	Ipari robotok programozása	83
8.3	Biztonsági megfontolások	85
8.4	Szingularitás.....	86
8.5	Példa program	86
8.6	Felhasznált irodalom:	91
9	Szabályozások, hardverek és algoritmusok.....	92
9.1	Szabályozó hardverek digitális szabályozáshoz.....	92
9.1.1	PLC	92
9.1.2	Mikrovezérlő.....	92
9.1.3	FPGA	93
9.1.4	Beágyazható és személyi számítógépek.....	93
9.1.5	HIL.....	94
9.2	Szabályozó algoritmusok.....	94
9.2.1	On-Off szabályozás	95
9.2.2	PID szabályozás.....	95
9.2.3	Intelligens szabályozás	97
9.3	Felhasznált irodalom:	98
10	Függelék.....	100
10.1	G programozási nyelv betűkódjai.....	100
10.2	G-kódok és jelentésük	101
10.3	M kódok és jelentésük.....	109
10.4	Felhasznált irodalom	112



1 Bevezetés

Az emberiség az eszközhasználat megjelenésétől fogva folyamatosan a saját céljának megfelelően alakítja a környezetét. Az eszközök idővel tovább tökéletesedtek az egyre bonyolultabb problémák hatékony megoldása érdekében. A modern mérnöki fejlesztések az elérhető legmodernebb technológiák kombinált alkalmazásával képesek csak lépést tartani a piac által támasztott igényeknek. Ennek megfelelően alakult ki a különböző tudományterületek és technológiák határain átívelő, új interdiszciplináris terület, a mechatronika.

1.1 Mechatronika fejlődése, történelmi áttekintés

A mechatronika eszközeit fejlődésük alapján egyszerűen csoportosíthatjuk aszerint, hogy mennyire hatékonyan képes a munkát végezni. A korai eszközöket az egyszerű mechanikus átalakítás képessége jellemezte, melyek a szabályozás megjelenésével önszabályozó mechanikus rendszerekké fejlődhettek. Az igazi áttörést a rendkívüli hatékonysága miatt az elektromosság alkalmazása hozta, kezdetben analóg, később digitális, akár szoftvereket futtató elektronikával a mai legkorszerűbb mechatronikai gépek is fel vannak szerelve.

1.1.1 Egy egyszerű mechanikus átalakító

A környezetünk átforgalmazására használt első eszközök egyike az egyszerű emelő volt, melyről az első írásos feljegyzést i.e. 3. században élt Arkhimédész [1.2.] elhíresült mondásaként jegyezték fel:

„Adjatok egy szilárd pontot és kimozdítom helyéből a világot.”

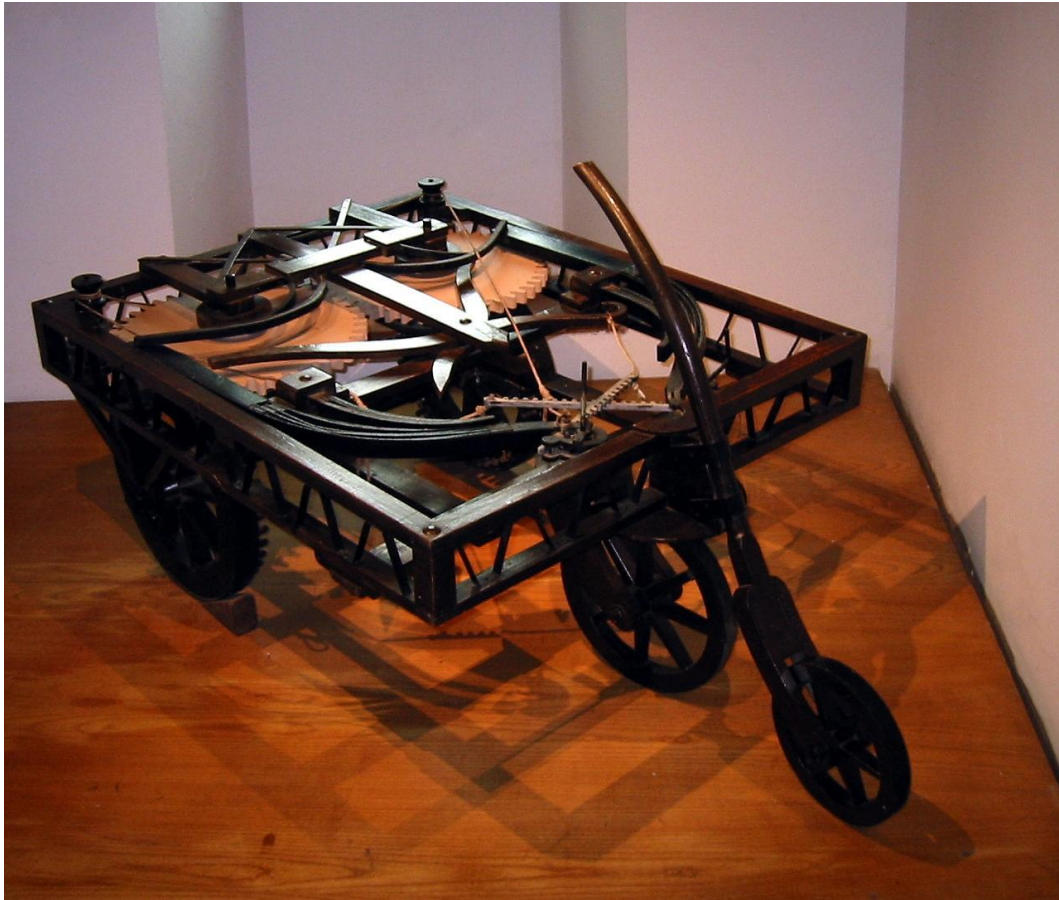
Az emelő felfogható egyszerű áttételként is, így működtetéséhez külső erőforrásra van szüksége, ezért nem is tekinthetjük valódi gépnek. A jelentősége mégis számottevő, így példaként állhat a jövő mechatronika mérnökei előtt azzal, hogy nem a megoldás bonyolultsága adja annak értékét, hanem az alkalmazhatósága és a hatékonysága. A fejlődés további lépcsőfokaira is igaz, hogy a kor technológiai színvonalát felhasználva lehetséges kiemelkedő eredményeket elérni pusztán a szellemi érték hozzáadásával.

1.1.2 Szabályozott mechanikus rendszerek

A következő fejlődési szakaszba sorolhatjuk azokat a mechanikus szerkezeteket, amelyek képesek az önálló működésre, így ide tartoznak a korai szabályozó rendszerek. Az áramlásszabályozó mechanizmus kifejlesztésével az automatikus szabályozás korai alkalmazásai már i.e. 300 és 1 között megjelentek, így ide tartozik Ktészibiosz vízórája a klepszüdra, mely idő mérésére volt alkalmas, valamint egy Philón által fejlesztett olajlámpa, amely úszó szabályozót használt a lámpaolaj folyamatos szinten tartásához.

Az első században élő alexandriai Hérón nevéhez fűződik olyan gép építése, mely a szél erejének felhasználásával működik [1.3.]. A szél erejét praktikusán felhasználó vízszintes tengelyű szélmalomról a 9. században tesznek először említést. Az első gabona őrlésére is alkalmas függőleges tengelyű szélmalomok a 12. században jelentek meg. A 13. században már olyan tornyos szélmalomokat készítettek, melyeknek csak a felső része mozgott, így farokrotor segítségével automatikusan szélirányba tudtak állni.

Leonardo da Vinci 15. századi munkásságához számos korát meghaladó szerkezet leírása és megépítése fűződik, például ő tervezte meg az első önműködő programozható mobil robotot is, mely rugóban tárolt erő felszabadításával képes volt mozogni és a programozott útvonalat követve kanyarodni is. A korabeli tervek alapján rekonstruált kocsi fényképe látható a 1.1.1. ábrán [1.4.].



1.1.1. ábra: Leonardo da Vinci önműködő kocsijának rekonstrukciója

A holland Cornelis Drebbel [1.5.] a 16. században dolgozta ki az első hőmérsékletszabályozós kazánt, mely korának első visszacsatolt rendszere volt. Ezt követően, Dennis Papin [1.6.] a 17. században feltalálta a biztonsági nyomás szabályozót gőz főző berendezésekhez, amely a mai kukták szabályozó szelepéhez hasonló. Az első mechanikus számológép is a ebben a században jelent meg Pascal munkássága nyomán.

A 18. században James Watt találmányának eredményeképp kezdtek elterjedni a gőzgépek [1.7.], melyeket gyárakban használtak fel központi erőforrásként. Az egyenetlen égés miatt változott a nyomás, így a motor fordulatszáma is. Ezt a problémát centrifugál regulátor segítségével oldották meg.

A legfejlettebb mechanikus gépek egyike a Joseph M. Jacquard nevéhez fűződő szövőgép [1.8.] volt a 18. században. A gép különlegessége abban állt, hogy lyukkártyával kódolták a szövéshöz szükséges információt, amivel átépítés nélkül alkalmassá vált a gép többféle szövésminta elkészítésére. Ez a technológia vezetett el a lyukkártyás mechanikus számítógépekig, mint amiket Charles Babbage tervezett a 19. században [1.9.].

1.1.3 Analóg elektronikával szabályozott rendszerek

Az igazán nagy hatékonyságot a elektromos áramkörök megjelenése adta, így lehetővé vált az elektromos jelfeldolgozás, valamint az elektromos szabályozás létrejötte is. A gépek hatalmas feldolgozási sebességre tettek szert, ami részben a fő alkotóelemüknek, az elektroncsöveknek volt köszönhető [1.10.].

A 20. század telekommunikációs fejlesztéseit a nagy sebességű erősítők tették lehetővé, így terjedhetett el a rádió és a televízió is. A világháború miatt megnövekedett igény a radar technológiáját is ekkor lendítette fel. A 19. század végén kifejlesztett katódsugárcsővel [1.11.] készítették el az első elektromos kijelzővel szerelt oszcilloszkópot.

Az új műszerek és a korszerű vezérművek, a mechanikus csatolások és a lánchajtás kifejlesztése tették lehetővé további új termék előállítását, valamint a nagy sebességű, precíziós gyártás kifejlődését. Ilyenek pl. a textil, a varrógép, vagy a nyomtató és nyomdagépek. Ezekben az években vált realitássá a precíziós nagy volumenű tömeggyártás is.

1.1.4 Digitális elektronikával szabályozott rendszerek

Napjaink leghatékonyabb, így legfejlettebb mechatronikai eszközei digitális elektronikával rendelkeznek. A hatékonyságuk a jelfeldolgozó képességük szintjében, és megbízhatóságukban rejlik. Nagyon gyorsan képesek a különféle szenzorok bemenetét feldolgozva, megfelelően reagálni. A szabályozás művelete matematikai eljárásokból áll, aminek kézenfekvő megvalósítása a digitális elektronika, mely az analóg elektronikával szemben nem válik kezelhetetlenül zajossá, pontatlanná és bonyolulttá a számítás komplexitásának növelésével. A digitális rendszerek processzorokat is tartalmazhatnak [1.12.], így képesek szoftvereket futtatni. A szoftver végezi a jelfeldolgozást, ami jelenleg a leghatékonyabb ismert módszer erre a feladatra. Ezzel emellett rendkívüli rugalmasság érhető el, a hardver változtatása nélkül is fejleszthető egy rendszer, akár a funkciója is megváltoztatható.

Ennek következtében a 20. század második felétől tovább gyorsult az automatizálás fejlődése. A gyártósorokon megjelenő programozható CNC megmunkálók és robotmanipulátorok egyszerűen átállíthatóvá váltak az új termékek gyártására. A precíz és gyors szabályozásnak köszönhetően a mechanikai színvonal alacsonyabb szintje mellett is lehetségessé vált a pontos működés, így az optikai meghajtók olvasófejét olcsó, csupán néhány tized milliméteres pontosságot biztosító mechanikával is lehet gyártani, ami a korszerű szabályozóelektronika miatt képes mikrométeres pontossággal üzemelni.

A valósidejű jelfeldolgozás szintje mára lehetővé teszi, hogy a robotpilótával szerelt repülőkből pilóta nélküli drónok, a környezetérzékelőkkel felszerelt gépjárművek teljesen autonómmá váljanak. A mindennapi életben található eszközök a felhasználó szokásaihoz igazodva intelligensebbé válnak, tovább növelve azok hatékonyságát, és a felhasználó kényelmét.

1.2 Mechatronika definíciója

A piaci igényeket szem előtt tartva olyan hatékony eszközök kifejlesztésére volt szükség, melyeket nem lehetett csupán egyetlen tudományág és technológia felhasználásával kielégíteni. A korai elektronikus vezérlésű mechanikus gépek elnevezésére a Yaskawa Electric cég vezette be először 1969-ben a mechatronika elnevezést, melyet a cég 1972-ben szabadalmaztatott, de az elnevezés

széles körű elterjedését követően 1982-ben feloldották a szabadalmi védettségét. Eredetileg a mechatronika olyan rendszerekre utalt, amelyek csak mechanikai és egyszerűbb elektronikai komponensekből álltak, így nem is volt bennük számítógép, mint amilyen a fotocellás ajtónyitó vagy a jegykiadó automata.

A technológiák fejlődésével az érintett tudományok köre is tovább bővült, egyúttal megfogalmazták a mechatronikai termékek osztályozását is. Ennek megfelelően az 1970-es évek végén a japán Society for the Promotion of Machine Industry (JSPMI) négy kategóriába sorolta a mechatronikai termékeket [1.14.]:

1. osztály: Elsődlegesen mechanikus termékek, melyek elektronikával egyesítve megnövelt funkcionalitással bírnak.

Például automata sebességváltó

2. osztály: Hagyományos mechanikai rendszerek jelentősen korszerűsített belső elektronikai eszközökkel.

Például automata mosógép

3. osztály: Olyan rendszerek, amelyek megtartják a hagyományos mechanikai rendszer funkcionalitását, de a belső mechanizmusait elektronikával helyettesítik.

Például a digitális sebesség vagy fordulatszám-mérő

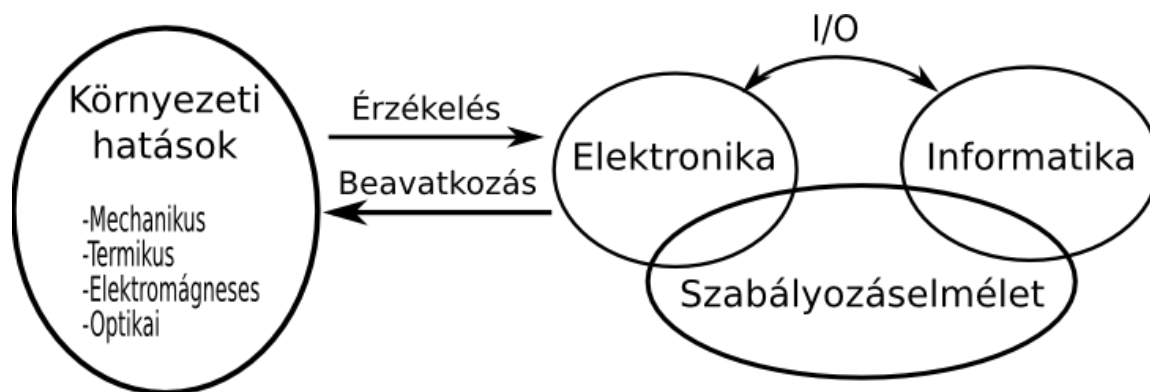
4. osztály: Olyan termékek, amelyeket mechanikai és elektronikai technológiák egymást erősítő egyesítésével terveztek.

Például: robotporszívó

A legtöbb definíció a mechatronika gyakran használt építőköveit összegyűjtve próbálja a lényegét megfogalmazni. Ilyen definíció található az első IEEE/ASME „Transactions on Mechatronics” publikációban [1.15.], ahol így fogalmaztak: „a mechatronika a gépészet, az elektronika és az informatika egymás hatását erősítő integrációja a termékek, folyamatok tervezésében és gyártásában”

1.3 Mechatronika felépítése

A definíciókból jól kivehetőek a fontosabb alkotóelemek. Leggyakrabban az elektronika, az informatika és a szabályozástechnika pilléreket kapcsolják össze a mechanikával. Talán szemléletesebb, ha az eredeti célnak megfelelően, a környezetbe való beavatkozás képessége felől közelítjük meg a szerkezet magyarázatát. Ebben a felfogásban az első alappillér a környezet, valamint a benne foglalt fizikai folyamatok halmaza, úgymint mechanikus, termikus, optikai vagy bővebben elektromágneses kölcsönhatások találhatóak. A következő pillér az elektronika, ami a környezet felől szenzorok, a környezet irányába pedig aktuátorok segítségével kapcsolódik. Harmadik pillér az informatika, ami az elektronikával be és kimeneteken keresztül van összekötve. Ezeken kívül a negyedik pillér a szabályozáselmélet, aminek van az elektronikával és az informatikával is átfedő része. A mechatronika felépítését a 1.3.1. ábra szemlélteti.



1.3.1. ábra: Mechatronika felépítése

1.4 Felhasznált irodalom:

- [1.1.] Robert H. Bishop: „The Mechatronics Handbook Mechatronic systems, sensors, and actuators Fundamentals and Modeling”, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008.
- [1.2.] Thomas L. Health, ed.: „The Works of Archimedes”, Cambridge University Press, 1897
- [1.3.] Shepherd, Dennis G.: „Historical Development of the Windmill”, Ithaca, New York: Cornell University 1990, elérhető: <http://wind.nrel.gov/public/library/shepherd.pdf>
- [1.4.] Wikipedia: Leonardo da Vinci mobil robotja, elérhető: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Leonardo_Amboise_Automobile.jpg
- [1.5.] Gerrit Tierie, „Cornelis Drebbel (1572-1633)”, H. J. P A R I S, AMSTERDAM 1932, elérhető: <http://www.drebbel.net/Tierie.pdf>
- [1.6.] Denis Papin munkássága, elérhető: <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Papin.html>
- [1.7.] Robert Henry Thurston: „A history of the growth of the steam-engine”, D. Appleton and company, New York 1884
- [1.8.] Delve, Janet.: „Joseph Marie Jacquard: Inventor of the Jacquard Loom”, IEEE Annals of the History of Computing, vol. 29, no. 4, pp. 98–102, 2007
- [1.9.] Anthony Hyman: „Charles Babbage: Pioneer Of The Computer”, Princeton University Press, 1985
- [1.10.] S. Okamura: „History of electron tubes”, IOS Press, 1994
- [1.11.] A televízió történelme – A katódsugárcső, elérhető: <http://inventors.about.com/od/cstartinventions/a/CathodeRayTube.htm>
- [1.12.] Kleitz W.: „Digital and Microprocessor Fundamentals: Theory and Application (4th Edition)”, Prentice Hall 2002
- [1.13.] Wikipedia: Mechatronics, elérhető: <http://en.wikipedia.org/wiki/Mechatronics>
- [1.14.] N. Kyura, H. Oho.: „Mechatronics—An Industrial Perspective”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 1, No. 1, 1996, pp. 10–15., 1996
- [1.15.] IEEE/ASME Transactions on Mechatronics Journal, elérhető: <http://www.ieee-asme-mechatronics.org/>

2 *Mechatronikai rendszerek mindennapjainkban*

A különböző mechatronikai eszközök sokasága megtalálható a hétköznapi használati tárgyaink között éppúgy, mint a munkahelyen, vagy a bevásárlóközpontokban. A következő fejezetben ilyen eszközöket veszünk sorba előfordulási helyszíneik szerint, majd néhány példa működését is áttekintjük.

2.1 *Mechatronikai eszközök a háztartásban*

Egy tipikus városi háztartásban, és közvetlen környezetében a kertben, és a garázsban a mechatronika széles választékával találkozhatunk. A mosó- és mosogatógépek már kezelőfelületükön tartalmaznak mechanikus komponenseket nyomógombok, és csavarható beállítógombok formájában, melyek belsejükben elektronikus szenzorokhoz, érzékelőkhöz kapcsolódva teremtik meg az ember-gép interakciót. Természetesen a felhasználói felülethez tartoznak a kijelzők is: LED-ek, szám, szöveg vagy akár grafikus kijelzők, hangszórók, melyeket szintén az elektronika vezérel. A feldolgozott jelek a gép belsejébe továbbítják a felhasználó szándékát, ahol a belső szenzorok jeleivel együtt a feldolgozóegységhez jut, ami a beprogramozott mosási ciklus alapján időzíti a beavatkozókat. A gép a kívánt hőfokra melegíti a vizet, és vezérli a motor sebességét, míg egyéb kiegészítők segítségével a biztonságos üzemeltetést garantálva működés közben zárva tartja az ajtót, blokkolja annak kinyitását.

A korszerű háztartások fűtését is komplex mechatronikai rendszerek együttese látja el. A fűtést biztosító hőforrás jellemzően valamilyen fűtőanyag elégetéséből származik. Ha a fűtőanyag földgáz, akkor ennek adagolása szeleppel, míg ha pellet, akkor csigás adagolóval a szükséges mennyiségben szabályozható. A rendszer érzékelői a fűtőcsövekre vagy tartályra kötött hőmérsékletérzékelőkből, illetve a lakószobában elhelyezett termosztátból állnak. A beavatkozók a fűtőanyag adagolóján kívül a keringetőszivattyúból, esetleg a fűtőkörök térfogatáramait szabályozó további motoros szelepekből állnak.

Ételeink elkészítését és tárolását is gyakran összetett mechatronikai eszközök végzik. A mikrohullámú sütő a beállított teljesítménnyel melegíti a behelyezett ételt, miközben egy tányéron forgatja az egyenletes hőelosztás miatt. Az egyszerűbb kenyérpirítók beállítható időzítés alapján működnek, de a bemelegedett fűtőszálak nagyobb hőleadását érzékelve a pirítási idő lecsökkentésével kompenzálható. A korszerű indukciós főzőlapok képesek érzékelni azt is, ha nincs rajtuk melegíthető edény, így automatikusan lekapcsolják az üresen hagyott főzőzónákat. Élelmiszerek hosszabb tárolását hűt, vagy fagyasztó gépek oldják meg, a beállított hőmérséklet alapján, míg a hűtés hatékonyságát automatikus leolvasztási funkció biztosítja.

Az egyszerűbb takarító és tisztítóberendezéseket is szenzorokkal és szabályozókkal látják el, de léteznek teljesen automatizált változatok is, melyek videojelet, vagy lézeres radart felhasználva térképezik fel és járká be a szobákat. Munkájuk során figyelik akkumulátoruk töltöttségét, amit a dokkoló állomáson tudnak visszapótolni.

A szórakoztatóelektronika termékei is jól példázzák a mechatronika elterjedését. A CD, DVD, vagy Blu-Ray lemezek lejátszását házimozi rendszerek végzik. A lemezkiadást végző elektromechanikus alrendszer mindegyikben megtalálható, de a miniatűr aktuátorok segítségével az olvasófejet pozicionáló egységet is tartalmaznak. Játékkonzolok beviteli moduljai a gamepad-ok képesek beépített motor segítségével visszajelzést küldeni a felhasználónak hasonlóan a mobiltelefonok

rezgőfunkciójához.

A ház közvetlen környezetében is sok példát találhatunk. A tetőn elhelyezett napkollektor, antennamozgató elektronika, vagy a távirányítóval működtethető motoros kapu rendszereken kívül az automata öntözőrendszerek és házi vízművek is ide sorolhatóak.

2.2 *Mechatronikai eszközök a munkahelyen*

A munkahelyre jutást leggyakrabban valamilyen gépjárművel a legegyszerűbb megoldani. Egy személyautó nagyon sok mechatronikai alrendszert foglalhat magában. Ide tartozik az alapvető működést biztosító motorvezérlés, a fék és kormány szervó, és az ezeket felhasználó blokkolásgátló, kipörgésgátló, vagy menetstabilizátor.

Az ABS (Anti Lock Brake System) vagyis blokkolásgátló úgy működik, hogy érzékeli a kerekek egymáshoz képest mért lassulását, és ha nagy eltérés mérhető valamelyiken, akkor csökkenti a hozzá tartozó fékhidraulika teljesítményét, hogy megszüntesse a kerék csúszását. A közhiedelemmel ellentétben azonban nem azért fejlesztették ki, hogy minél rövidebb féktávolságot érjenek el, hanem a fékezés során a jármű kormányozhatóságának megtartása volt a fő cél. Emiatt bizonyos esetekben (kissé havas; vagy csúszós és rázós felületek) nem csökkenti, hanem inkább növeli a féktávolságot.

A TCS (Traction Control System) vagyis kipörgésgátló a gyorsulás során a kerekek kipörgését érzékeli, és lemodulálja a kerékre eső nyomtatékot. Ez az eljárás biztosítja, hogy a jármű a fizikai képességeihez és az útviszonyokhoz képest a maximális gyorsulásra legyen képes.

A VDC (Vehicle Dynamics Control) vagyis menetstabilizátor a TCS-hez hasonlóan működik, azzal a különbséggel, hogy érzékeli a gépjármű fordulási sebességét, és a sodródását gyorsulásérzékelőkkel. A sofőr szándékát a kormány pozíciójából állapítja meg, amit összevet a jármű mozgásával, ez alapján pedig a TCS alrendszert hozza működésbe, ami a kerekek által leadott teljesítményt szabályozza a jármű megfelelő sebességéhez, és minimalizálja a kormányzott kerék és a jármű haladási iránya közötti különbséget. Néhány esetben az ABS-t is igénybe veszi, hogy a jármű a kívánt sebességre lassuljon. Egy modern autó már arra is képes, hogy egy gomb megnyomásával beparkoljon egy szűk helyre vagy akár önmagát vezesse városi környezetben is.

Városi munkahelyek jellemző formája az iroda, melyekben a munkavégzéshez szükséges klímát szellőző és légkondicionáló berendezések biztosítják. Ventilátorok segítségével vezetik be a frisslevegőt, melyek működési idejét egyszerűbb esetben időzítővel a munkaidőre korlátozhatjuk, de létezik olyan változat is, ami a levegő összetétele alapján képes alkalmazkodni akkor is, ha egy irodába többen is tartózkodnak. Ez utóbbi rendszer jóval hatékonyabb, mivel ha egy dolgozó szabadságon van, akkor ehhez alkalmazkodva csökkenti a légcserét, így nem csak a ventilátor, de a fűtés vagy hűtés fogyasztását is csökkentheti.

Ha a külső hőmérséklet túl meleg, vagy túl hideg, akkor nem lehet közvetlenül beengedni a külső levegőt, csak kondicionálás után. Ez a folyamat nem csak a hőmérséklet szabályozását, de a páratartalom beállítását is magában foglalja, így a megfelelő szenzorok jelei alapján az úgynevezett kaloriferen (vagy hőcserélőn) keresztül áramoltatott levegőt párasító berendezéssel tovább klimatizálhatják a jobb hőérzet elérése érdekében.

Elsősorban munkahelyi kellékként, de gyakran a háztartásokban is találkozhatunk különböző nyomtatógépekkel, melyek közül a lézeres, vagy tintasugaras változatok terjedtek el. A lapok adagolását precíz léptetőmotor végzi a papír felső részét detektáló optikai végálláskapcsoló és a

lapok továbbítását végző hengerre erősített optikai enkóder jelei alapján. Felbontásuk mértékegységét az inchenként nyomtatott pontok számával adják meg, melynek mértéke legalább 1200, fényképek nyomtatása esetén ennek a többszöröse is lehet.

Papír alapú információk digitalizálására a síkágyas szkennerek, vagy a fax gépek alkalmasak. Általában fekete-fehér, vagy szürkeárnyaltos felvételeket készíthetünk velük.

Ipari folyamatirányító rendszerek, és gyártósorok léte is bizonyítja a mechatronika térhódítását. A gyártott terméktől függően megmunkálógépek sorozatát összekötő futószalagos rendszert kiegészíthetjük robotmanipulátorok vagy autonóm mobil szállítóeszközök, melyek a gyárrészek között biztosítják az alkatrészek mozgását. A gyártás során elérhető automatizálás foka elérheti azt a szintet, amikor a gyárban elég a nyersanyagot pótolni, és az elkészült terméket elszállítani, így emberi beavatkozásra csak a gépek karbantartása miatt lehet szükség.

2.3 Egyéb hétköznapi mechatronikai eszközök

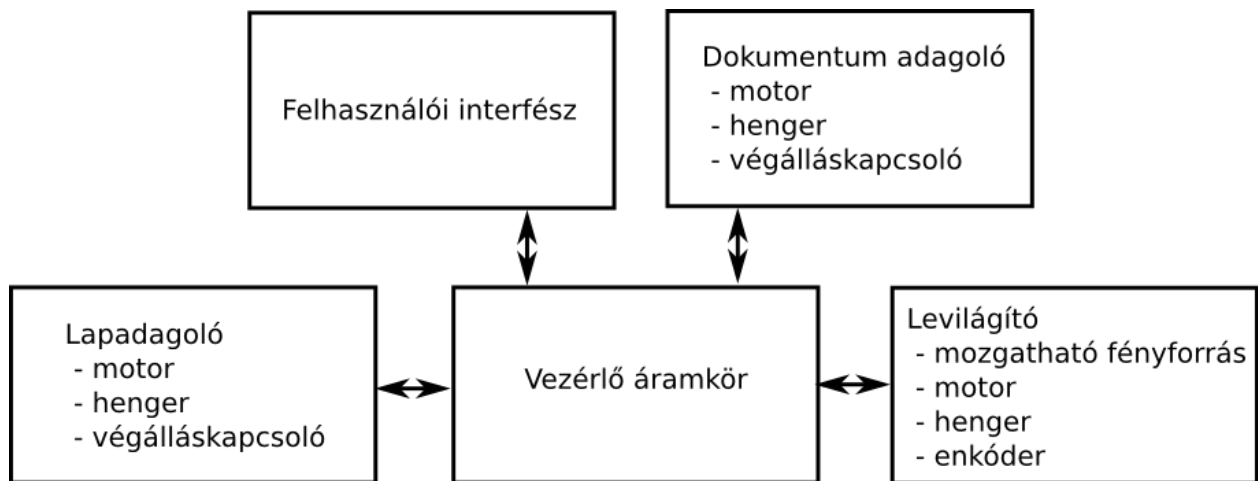
Szintén rendszeresen használt összetett mechatronikai eszköz a készpénz felvételét biztosító ATM (automated teller machine) gép. Már a mágnesszalagos vagy chipkártyás azonosítás során is a biztonság növelése érdekében szaggatott behúzású kártyaolvasót építenek be, amivel megnehezítik az utólag illegálisan felszerelt kártyaolvasók dolgát. A pin-kód és az ügyfélhez tartozó számlaegyenleg ellenőrzése után a gépben található bankjegyek számát is ellenőrzi, végül kiadja a pontosan kiszámolt összeget az ügyfél részére.

Az ATM-ekhez hasonló funkciót, azaz készpénz kezelését is ellátnak a bevásárlóközpontokba telepített önkiszolgáló pénztárak, melyeknek megbízhatóan kell a vásárolt termékeket azonosítani. Ehhez vonalkódolvasót, és nagyon pontos mérleget is használnak. A feladatra alkalmas mérlegszenzornak egyszerre nagy (több tíz kilogramm) tartományban, és mindvégig nagyon pontosan (egy grammos) felbontásban kell üzemelnie, hogy a kis tömegű termékeket is bármikor képes legyen detektálni. A készpénz kezeléséhez itt a pénzürmék felismerése és válogatása is hozzá tartozik.

Internetre kötött jegykiadó automaták állnak rendelkezésre az utazni vágyók számára a legtöbb vasútállomáson. Az azonosító kód ellenőrzését követően hőre sötétedő papírszalagra nyomtatja ki a jegyet. Ezzel a hőnyomtatás technológiával találkozhatunk a legtöbb bank, vagy hivatal ügyfélfogadó pultjainál is, ahol a megoldandó feladat az ügyfelek és ügyintézők egymáshoz rendelése.

2.4 Mechatronikai példák felépítésük és működésük kifejtésével

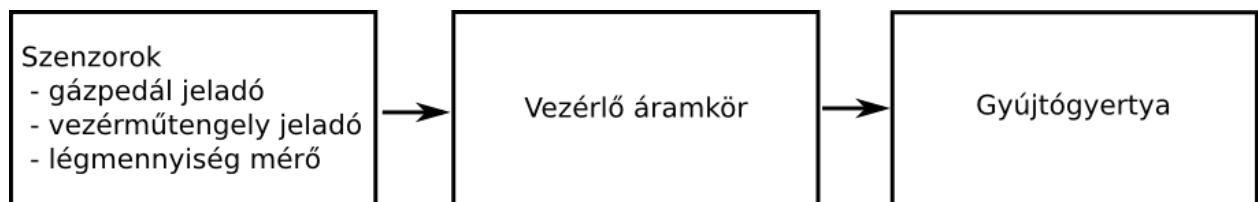
A mindennapokban használt összetett mechatronikai rendszerre jó példa a fénymásológép. Ez az eszköz analóg és digitális áramkörök, érzékelők, aktuátorok, mikroprocesszorok és persze a mechanikus összetevők építik fel. Feltalálásában aktív részese volt a magyar tudósoknak, Selényi Pál fizikusprofesszornak. Selényi 1928-ban dolgozta ki azt az eljárást, amely képek rögzítését teszi lehetővé elektromos töltéshordozón, ami porszórással előhívható. 1935-ben publikált egy új, elektrosztatikus képátviteli eljárást és annak alkalmazásait, így ezt tekintjük az első fénymásológép megjelenésének. A fénymásoló elvi felépítését a 2.4.1. ábra mutatja.



2.4.1. ábra: Fénymásoló felépítése

Működési elvük röviden összefoglalva a következő: a másolandó dokumentumot az adagolóba helyezését követően az adagolóautomatika egy üveglapra szállítja azt. Ezután egy nagy intenzitású fénynyaláb besugárzásával a másolandó dokumentum képe rávetítődik a fotoreceptorra, ami egy elektrosztatikusan feltöltött henger. A fény hatására a dob elveszíti töltését, így csak azokon a helyeken fogja a festékport vonzani, ahol a másolandó dokumentumon sötét régió volt. A dob elfordulásával a rászórt festék a lapadagolóból érkező üres lapra kerül, majd ott hő hatására fixálódik.

A modern mechatronika evolúcióját jól szemlélteti a személygépjárművek fejlődése. Egészen az 1960-as évekig, a rádió volt az egyetlen jelentős elektronika a gépjárművekben. Az autó minden fontosabb funkciója teljesen mechanikus, vagy elektronikus volt, mint az indítómotor, vagy az akkumulátortöltő rendszer. A teljes motorrendszer mechanikusan szabályozott volt. A szenzorok és mikrovezérlők bevezetése előtt például a gyújtásvezérlés a főtengely végén lévő bütykök segítségével történt, amelyek az úgynevezett megszakító kalapácsokat mozgatták. A kalapácsok egy fordulat során nyitották és zárták a gyújtógyertya áramkörét. A gyújtás időzítése volt a szabályozás változója. A mechanikus gyújtásvezérlés nem volt hatékony az üzemanyag felhasználására nézve. A gyújtás modellezése során kiderült, hogy a hatékonyabb fogyasztáshoz precízen kell időzíteni az üzemanyag begyújtását, ami függ a leadott nyomatéktól, a fordulatszámtól és a gázpedál szögétől is. Az 1970-es években bemutatott elektromos gyújtásszabályozás volt az egyik első mechatronikai rendszer, amit gépjárművekben alkalmaztak. Felépítése a 2.4.2. ábrán látható.

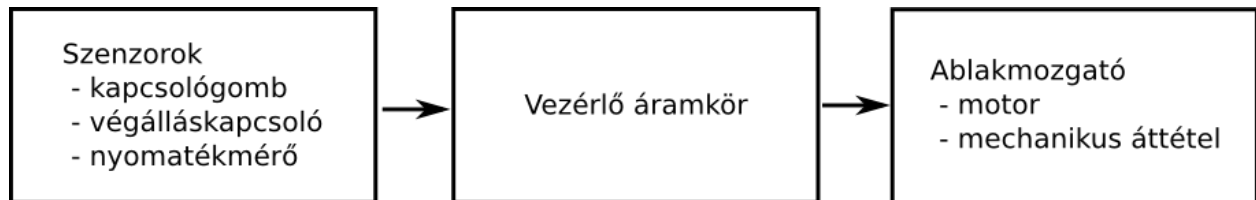


2.4.2. ábra: Elektromos gyújtásvezérlő felépítése

A ma is használt elektromos gyújtásvezérlő érzékeli a forgattyús és bütykös tengelyek pozícióját a vezérműtengely jeladójával, a beáramló levegő mennyiségét, a gázpedál helyzetét és sebességét, melyek segítségével egy mikrokontroller kiszámítja a gyújtás pontos pillanatát. A korai változatokban egyetlen Hall szenzor érzékelt a gyújtás elosztóban a rotor helyzetét, később a teljes elosztót felváltotta egy processzor, ami közvetlenül végezte a gyújtás vezérlését.

Az elektromos ablakemelő nem létfontosságú a gépjárműben, viszont egyike a legalapvetőbb

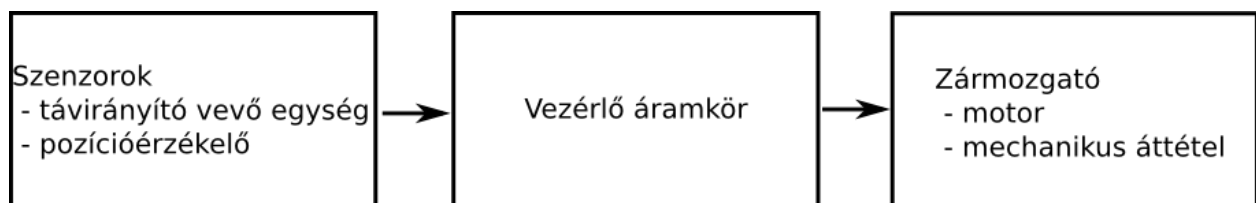
kényelmi funkcióknak és a biztonságosabb vezetést is támogatja, mivel a sofőrnek kevésbé vonja el a figyelmét. Szerepe az ablakok biztonságos mozgatása gombnyomásra az utas által, de gyakran a vezetőoldali ajtóról a jármű többi ablaka is mozgatható. A biztonságos használat megkívánja, hogy legyen beépített érzékelő arra az esetre, ha az utas valamely testrésze a csukódó ablak útjába kerül. Biztonságos ablakemelő elvi vázlata a 2.4.3. ábrán látható.



2.4.3. ábra: Elektromos ablakemelő felépítése

Az elektromos ablakemelő akkor lép működésbe, ha az ajtóra szerelt kapcsolóval az utas jelzi az ablak mozgatásának szándékát. Ennek hatására a vezérlőáramkör utasítást küld a motornak az ablak mozgatására. A műveletet alapvetően három esemény állíthatja le. Az utas elengedi a kapcsolót, vagy az ablak végálláskapcsolója jelzést ad, vagy a nyomaték-mérő rendellenes hatást érzékel.

A központi zár feladata az ajtóreteszelő berendezések kényelmes működtetése. Általában egy vagy két, jellemzően a vezetőoldalon található fő zár állapotát kiterjeszti a jármű többi zárára is, így elég egy ajtót bezárni vagy kinyitni ahhoz, hogy az összes többi ajtó is ilyen állapotba kerüljön. Központi zár elvi vázlata a 2.4.4. ábrán látható.



2.4.4. ábra: Központi zár felépítése

A központi zárat lehet közvetlenül belülről a belső retesz, vagy a kulcs elfordításával kívülről aktiválni. Ezen kívül a távirányító segítségével is működésbe hozható.

A gépjárművekben alkalmazott mechatronikai rendszerek fejlődése a központosodás irányába zajlik. Egy korszerű autóban szinte minden elektromos alrendszer közvetlenül a fedélzeti számítógépbe is be van kötve, így megoldható a műszaki állapot folyamatos monitorozása, de pusztán a központosítás miatt új kényelmi szolgáltatások is kifejlődhetnek. A központi zár és az elektromos ablakemelő összekötésével egyszerű szoftverfrissítéssel megoldható, hogy az autó távirányítóval történő bezárásakor az összes ablak felhúzódjon. Hasonló elven a komponensek egymás szenzorait használhatják, így ha van az ülésbe épített utasérzékelő, akkor amennyiben nem érzékelhető utas az anyósülésen, úgy a klíma és az ülésfűtés egyik oldala kikapcsolható, de egyúttal az anyósülés felőli légzsák is letiltható. Ennek hatására egy esetleges koccanás miatt nem kell azon az oldalon légzsákot cseréltetni, ahol nem is ült utas.

2.5 Felhasznált irodalom:

[2.1.] Silicon Laboratories Inc.: Automotive applications, elérhető: <http://www.silabs.com/Marcom%20Documents/Resources/automotive-applications-guide.pdf>

- [2.2.] Tar Domokos: „SELÉNYI PÁL ÉS A XEROGRÁFIA”, Fizikai Szemle 47. évf. 1. sz. 1997, elérhető: wwwold.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz9701/TAR-199701.pdf
- [2.3.] Horváth Péter: „A mechatronika alapjai”, Győr: Széchenyi István Egyetem, 2006
- [2.4.] Forgó Zoltán: „Bevezetés a mechatronikába”, Az Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár 2009, elérhető: <http://mek.niif.hu/07300/07377/07377.pdf>
- [2.5.] Robert H. Bishop: „The Mechatronics Handbook”, CRC Press, 2007

Új mechatronikai rendszer tervezésére vagy valamilyen ipari alkalmazáshoz, pl. gyártósor építéséhez, átalakításához; vagy új fogyasztói termék, esetleg kutatáshoz szánt prototípus elkészítéséhez lehet szükséges. Az ipari alkalmazásoknál gyakran jóval szigorúbb előírásokat kell betartani, így a felhasznált komponenseknek tanúsítványokkal kell rendelkezni, melyek garantálják a működés biztonságát. Emiatt az ipari fejlesztések inkább csak megbízható hardverek összeválogatásából, telepítéséből, és konfigurálásából állnak, míg egy új termék, vagy prototípus fejlesztése gyakran jár egyedi elektronika kifejlesztésével is.

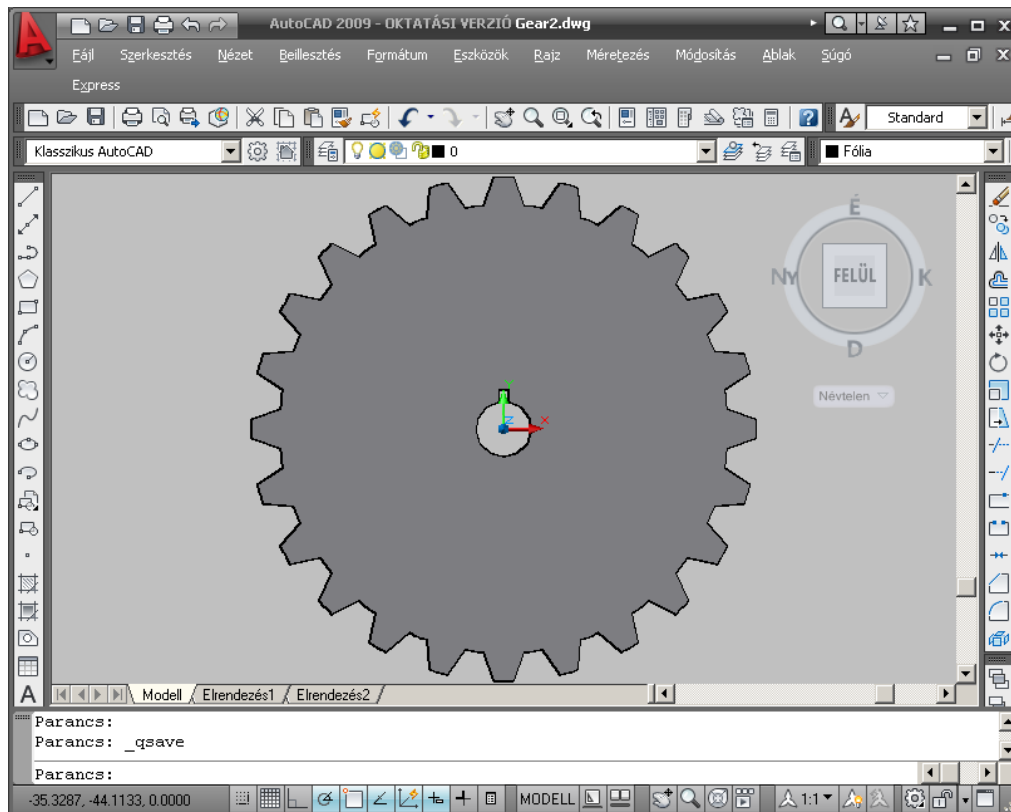
A korszerű mechatronikai rendszerek fejlesztését is számítógépes segítséggel végzik. A tervezés és modellezés folyamatát a következő négy részre lehet bontani:

- Mechanikus komponensek tervezése Computer Aided Design (CAD) szoftverrel
- Elektromos komponensek tervezése Electronic Design Automation (EDA) szoftverrel
- A rendszer kritikus részeinek tesztelése Computer Aided Engineering (CAE) szoftverrel szimulálva
- Mechatronikai szoftver implementálása Integrated Development Environment (IDE) szoftverrel

Egy egyszerű mechatronikai rendszer példáján keresztül követhetjük végig a tervezéshez használható szoftverek fajtáit és funkcióit. A példában nem ipari felhasználásra szánt prototípus fontosabb tervezési fázisait követhetjük végig. A megoldandó feladat egy víztartályban a víz automatikus utánpótlása lesz. Ehhez a tartály tömegét mérő cella segítségével mérjük, míg a beavatkozást a tartályba vezető csövön motorizált golyóscsap végzi. A szabályozó hardver egy oktatási és hobbi célokra szánt mikrovezérlőn lesz szemléltetve.

Mechanikus komponensek tervezését 2D vagy 3D módban Computer Aided Design (CAD) szoftverrel, ritkább esetben egyszerű grafikus tervezővel végzik. A mérnöki munkára alkalmas CAD szoftverek leggyakrabban az AutoCAD, a Solid Edge, vagy ezek funkcionalitását biztosító alternatíva lehet. A tervezett rendszer geometriai felépítésén kívül kiegészítőkkal némi szimulációs lehetőséget is biztosíthatnak, így a tervező szoftver egyben mechanikai vagy hőtani modellezést is végezhet. Felhasználható CAD szoftverek összehasonlítása a [3.1.] referencián található.

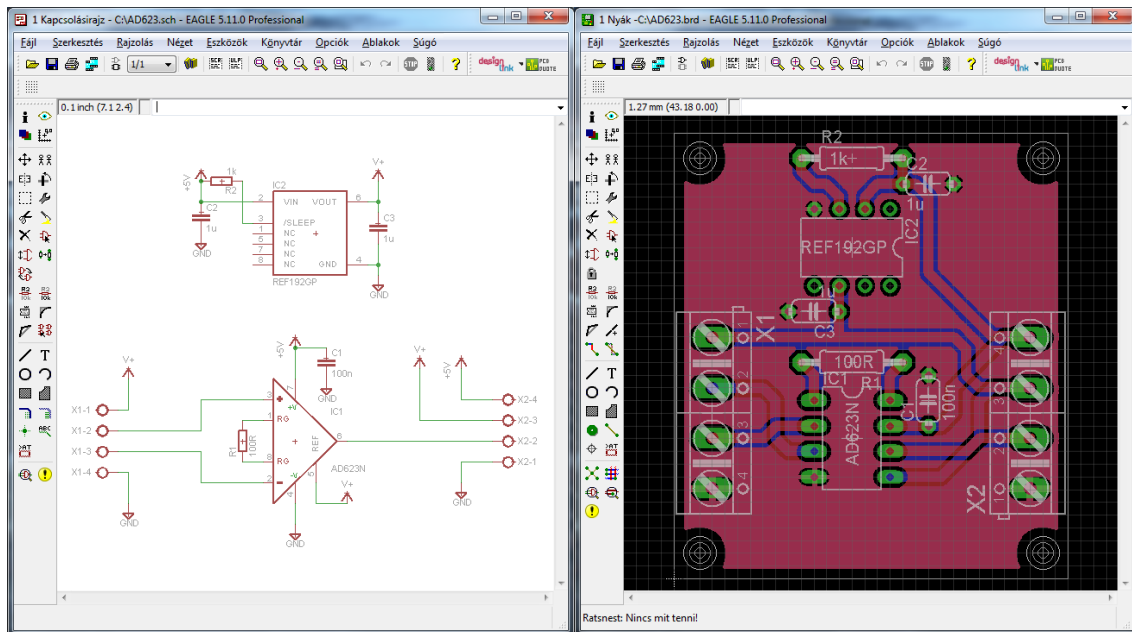
A példafeladatban a motoros szelep egyik fogaskerekének 3D modellje látható AutoCAD tervezőprogramban megalósítva a 3.1. ábrán.



3.1. ábra 24 fogú fogaskerék AutoCAD-ben

Ha a feladat megkívánja, egyedi áramkör tervezésére is szükség lehet, amihez az Electronic Design Automation (EDA) szoftvereket használhatjuk. Egy ilyen program nem csupán a logikai kapcsolási rajz, hanem gyakran a beültetési terv elkészítésében is segíthetnek. Elterjedtebb EDA szoftverek az EAGLE és a NI Multisim. Utóbbi képes a megtervezett áramkör szimulálására is. A nyomtatott áramkörök gyártásakor szabványossá vált az RS-274X Gerber fájlformátum, amiben a nyák vektorgrafikus leírását tárolhatjuk. Az EAGLE segítségével a nyák tervén kívül a beültetéshez szükséges fájlt is előállíthatjuk, amivel a panel gyártása tovább egyszerűsödik. EDA szoftverek összehasonlítása a [3.2.] referencián található. A nyomtatott áramkör elkészítéséhez előállított fájlok a számítógéppel segített gyártás (computer aided manufacturing, CAM) bemeneti adatait tárolják.

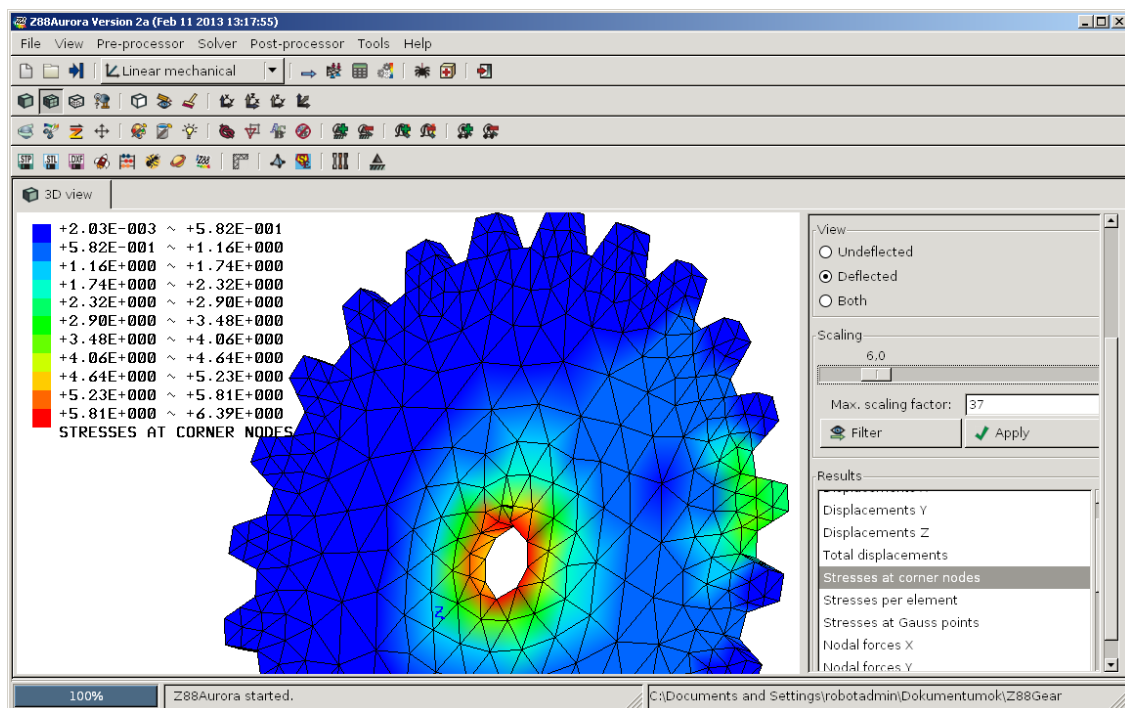
A példafeladatban a mérlegcellát meghajtó, és a kimenetét erősítő áramkört kell megtervezni. A szükséges erősítést a szenzor érzékenységéhez kell méretezni. Ebben az esetben 2mV/V érzékenységgel, és a $2,5\text{V}$ referenciafeszültséggel számolható ki, hogy 1000-szeres erősítésre van szükség ahhoz, hogy a teljes tartományt a mikrovezérlő $0\text{-}5\text{V}$ analóg bemenetére képezzük. A kapcsolási rajz, és a beültetési nézetek az EAGLE szoftverben tervezve a 3.2. ábrán láthatóak.



3.2. ábra: EAGLE szoftverben tervezett analóg differenciál erősítő áramkör

A Computer Aided Engineering szoftverek elsősorban funkcionális tesztelést biztosítanak a rendszer modelljén keresztül. Bonyolult, vagy nagyon pontos szabályozást igénylő feladatok esetében hardveres szimulációra is szükség lehet Hardware In the Loop (HIL) eszközökkel. A gyakorlatban általában ilyen eszköz használata nélkül kell megoldani a modellezést, amit skálázható pontosságú numerikus szimulálással érhetünk el. Erre a feladatra a MATLAB vagy LabView programok is jól használhatóak, míg analitikus szimulációkat a Maple szoftvercsomag segítségével készíthetünk. Mechanikus vagy hőtan szimulációkhoz használhatunk erre specializált véges elemes analízis (FEA - Finite Element Analysis) programokat, mint amilyen a Z88 Aurora. FEA szoftverek összehasonlítása a [3.3.] referencián található.

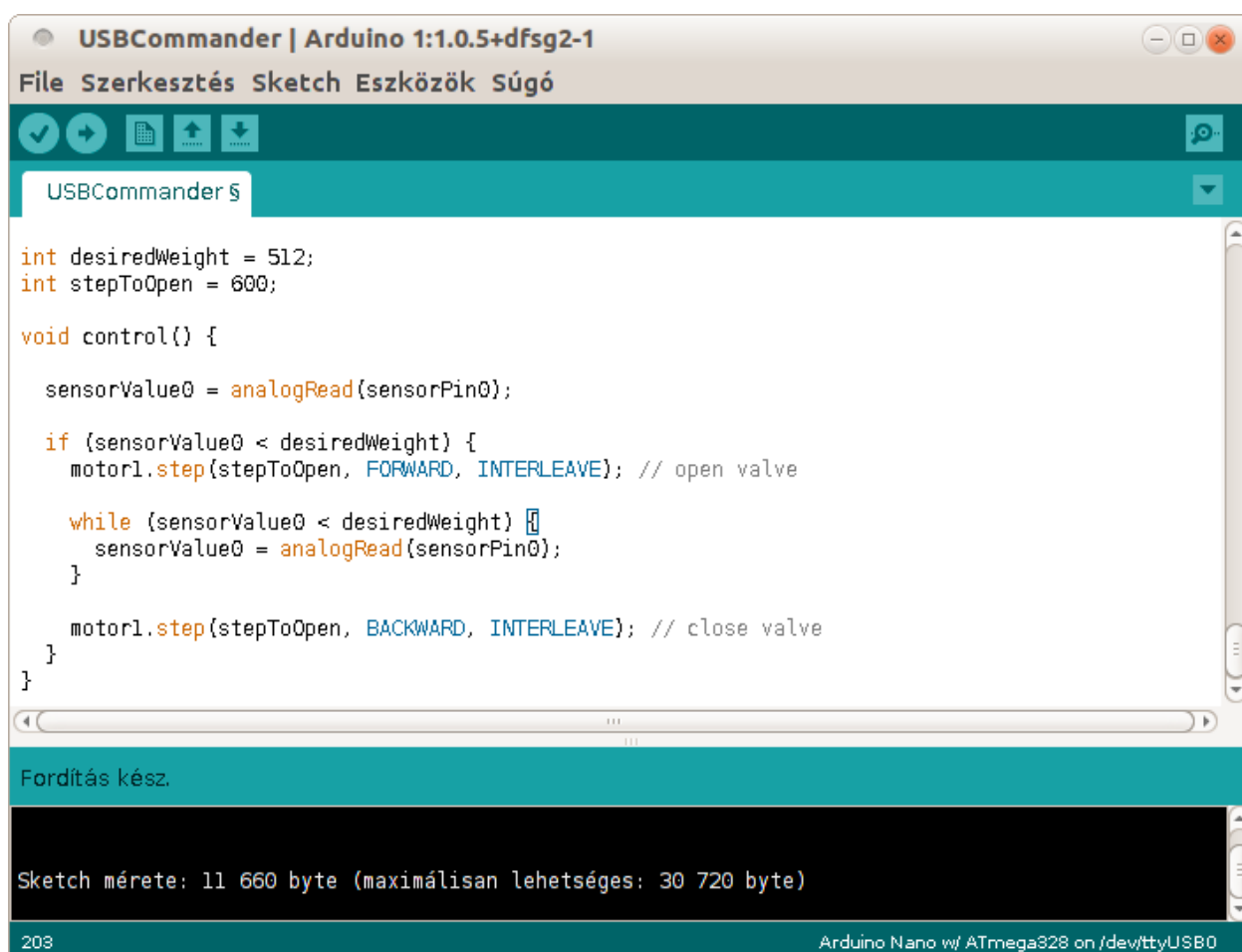
A példafeladatban a 24 fogú fogaskerék egyik fogát érő terhelésnek a tengely körül tapasztalható deformációs hatását vizsgálhatjuk meg Z88Aurora szoftverben. A fogaskerék anyaga a szimulációban HDPE műanyag volt, aminek a deformációs zónái a 3.3. ábrán láthatóak.



3.3. ábra: Z88Aurora szoftverben szimulált deformációs hatások a fogaskeréken

A szoftver komponensek fejlesztéséhez az alkalmazott hardverhez igazodó integrált fejlesztői környezetet (IDE) érdemes használni. A legnépszerűbb és legtöbb bővítménnyel rendelkező IDE szoftverek az Eclipse és a NetBeans. Beépülő modulokkal egyszerűen adaptálhatóak a gyakran használt programnyelvekhez, így akár a célhardveren történő kód futtatást vagy hibakeresést is képesek támogatni a célnyelv szintaxisát ellenőrző kódszerkesztés mellett. Néhány hardverhez fejlesztenek saját IDE szoftvert is, amivel telepítés után azonnal minden fontos funkciót megkapunk a fejlesztéshez. A népszerű Arduino mikrovezérlőhöz elérhető Arduino IDE ilyen speciális fejlesztői környezet, ami az Atmel AVR mikrovezérlő család köré tervezett Arduino Board-ok fejlesztését támogatja. Programnyelvek szerinti bontásban elérhető IDE szoftverek gyűjteménye a [3.4.] referencián elérhető.

A példafeladat szabályozó algoritmusának az erősített analóg bemenet adott küszöbérték alá csökkenésekor ki kell nyitnia a szelepet, majd ha a jel újra eléri a kívánt szintet, akkor el kell zárnia azt. A feladatot megoldó algoritmust az Arduino IDE kódszerkesztőjében láthatjuk a 3.4. ábrán.



3.4. ábra: Arduino IDE szoftverrel írt szabályozó

3.1 Felhasznált irodalom:

- [3.1.] Wikipedia: „Comparison of computer-aided design editors”, elérhető: http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_CAD_editors_for_AEC
- [3.2.] Wikipedia: „Comparison of EDA software”, elérhető: http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_EDA_software
- [3.3.] Wikipedia: „List of finite element software packages”, elérhető: http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_finite_element_software_packages
- [3.4.] Wikipedia: „Comparison of integrated development environments”, elérhető: http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_integrated_development_environments

Eszközök, gépek, műszerek hatékony működését elektronikai módszerekkel lehet a legmegfelelőbben biztosítani. Az eszközöknek információt kell szerezniük a külső jelekről, hogy megfelelően reagálhassanak rá, belső feldolgozás eredményeképp akár külső hatást hozhassanak létre. Maga a felhasználói felület is ilyen: nyomógombokkal, kapcsolókkal, forgatógombokkal, érintőpontokkal befolyásolhatjuk a működést, miközben információt kaphatunk LED-ek, számkijelzők, grafikus kijelzők, hangjelek útján. Ezek mellett természetesen szüksége lehet hőmérséklet, elmozdulás, nyomás követésére, erő kifejtésére, hűtésre, fűtésre, tárgyak mozgatására is. Látható tehát, hogy a valódi jeleket át kell ahhoz alakítani, hogy elektronikával kezelhetők legyenek és az elektronikus résznek tudnia kell beavatkozó hatást létrehozni. Ennek megfelelően érzékelőkről és beavatkozókra beszélhetünk, melyeket szokás szenzoroknak és aktuátoroknak is nevezni.

4.1 Szenzorok és alkalmazásaik

A szenzorok feladata az, hogy különböző jeleket elektronikusan kezelhetővé alakítsanak át. Ez azt jelenti, hogy a külső jelek hatására megváltozzon valamilyen elektromos paraméterük. Ilyen lehet az ellenállás, kapacitás, induktivitás, de adhatnak áramot, feszültséget is. A szenzorokat számos szempont alapján osztályozhatjuk, többek között aszerint, hogy igényelnek-e tápforrást, gerjesztést vagy nem, emellett felépítésük alapján is osztályozhatjuk, vannak egyszerű szenzorok, melyek önállóan képesek a jelek érzékelésére és összetett szenzorok, melyek esetén több elem együttes működése szükséges az információszerzéshez.

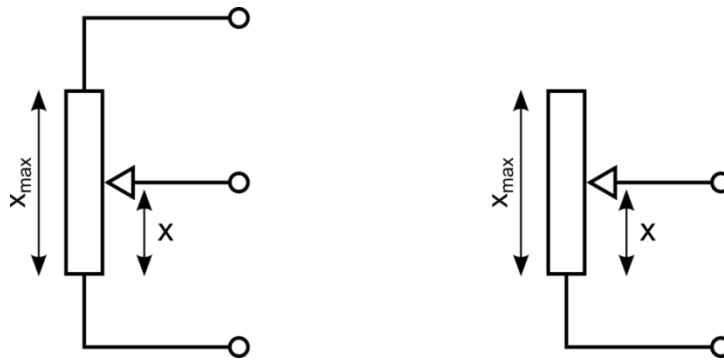
A fentiek figyelembevételével foglaljuk össze a mechatronikában leggyakrabban alkalmazott szenzorok legfontosabb tulajdonságait a következőkben.

4.1.1 Potenciométer, reosztát

Az egyik legegyszerűbb elmozdulás érzékelésére alkalmas eszköz a potenciométer. A potenciométer egy változó értékű ellenállás, amit mechanikai elmozdulás befolyásol. Létezik egyenes mentén létrejött elmozdulás és elfordulás érzékelésére kialakított kivitel is. Az elmozdulással vagy elfordulási szöggel arányos ellenállás mérésével kaphatjuk meg a kívánt információt. Az ellenállás a legtöbb esetben lineáris függvénye a mechanikai megfelelőjének:

$$R(x) = R_0 \frac{x}{x_{\max}}$$

ahol x jelöli az elmozdulás vagy elfordulás értékét, R_0 pedig a maximális értékhez ($x_{\max}$) tartozó ellenállást jelöli. A potenciométerek általában három kivezetéssel rendelkeznek, ami méréstechnikailag előnyös, ahogy majd a szenzorok elektronikai kezelésénél látni fogjuk. Két kivezetésű kivitelben esetén reosztátnak szokás nevezni az ilyen elven működő érzékelőket.



4.1. ábra: A potenciométer (balra) és a reosztát (jobbra) áramköri rajza

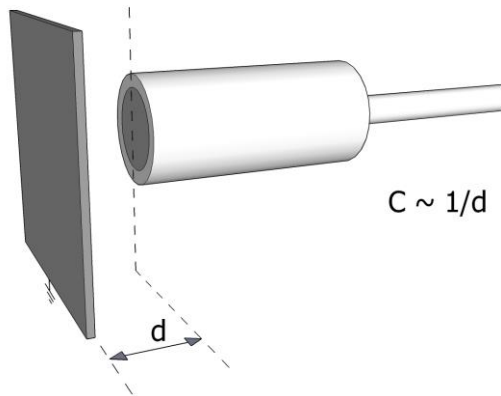
Potenciométerek esetén az R_0 ellenállás értéke a pontosságot megfelelő kapcsolás esetén nem befolyásolja, de reosztát alkalmazás esetén igen. A szenzor pontosság szempontjából igen fontos tulajdonság a nemlinearitás, amit általában százalékban ad meg a gyártó, tipikus értéke 0,1 % körül van. A nemlinearitás azt fejezi ki, hogy az $R(x)$ függvény az R_0 értékének hányad részével térhet el maximálisan az $R(x)$ görbére legjobban illeszkedő $R_{lin}(x)$ egyenestől:

$$100 \frac{\Delta R_{\max}}{R_0} = 100 \frac{\max_{0 \leq x \leq x_{\max}} (|R(x) - R_{lin}(x)|)}{R_0}$$

Az R_0 értéke sokféle lehet, mikroelektronikai áramköri megfontolásokból 10 k Ω nagyságrendjébe szokott esni. A szenzor érzékelési tartománya tipikusan néhány mm-től pár 10 cm-ig terjed.

4.1.2 Kapacitív elmozdulásérzékelő

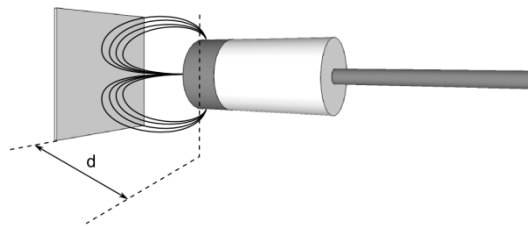
A kondenzátorok kapacitása függ a fegyverzetek távolságától, ez használható ki arra, hogy elmozdulás mérését kapacitás mérésre vezethessük vissza. Könnyen kezelhető, gyakorlatias értékeket kicsit, mm vagy annál kisebb elmozdulások esetén kaphatunk, így ez a szenzor kimondottan kis elmozdulások érzékelésére alkalmas. Az elvet alkalmazzák mikrofonokban is, ahol a hang parányi időfüggő elmozdulásokat hoz létre, melyek elég nagy pontossággal detektálhatók. A kondenzátor fegyverzeteinek távolsága nem 0 és egy maximális érték között változik, hanem a maximumhoz viszonyítva jelentős nagyságú minimumtól kezdődik. Ez jelentősen csökkenti a kapacitás-elmozdulás függvény nemlinearitását, hiszen a kapacitás a fegyverzetek távolságával fordítottan arányosan változik. A szenzorral akár nm mértékű változások is érzékelhetők. Számos egyéb szenzor is működhet kapacitív elven, ahogy a későbbiekben is látni fogjuk.



4.2. ábra: Kapacitív elmozdulásérzékelő működési elve

4.1.3 Induktív elmozdulásérzékelők

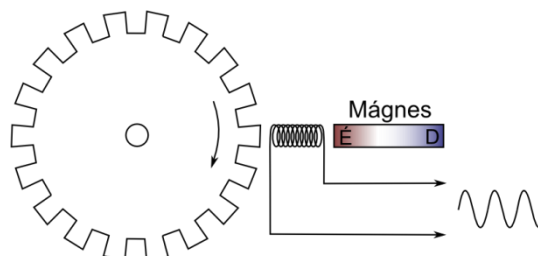
Az induktív elmozdulásérzékelők egyik csoportja az induktív közelségérzékelők (inductive proximity sensor). A szenzor belsejében egy oszcillátor van, melynek eleme egy tekercs. Ez a tekercs váltakozó mágneses teret hoz létre, mely a hozzá közel kerülő fémtárgyban örvényáramokat kelt. Ez az örvényáram növeli a tekercs veszteségét, mely csökkenti a rezgőkör amplitúdóját. Ilyen módon a rezgés amplitúdója fordítottan arányos a tárgy távolságával.



4.3. ábra: Induktív közelségérzékelő működési elve

Az induktív közelségérzékelőket széleskörűen alkalmazzák végállás-kapcsolóként, valamint a megmunkálendő tárgy jelenlétének érzékelésére.

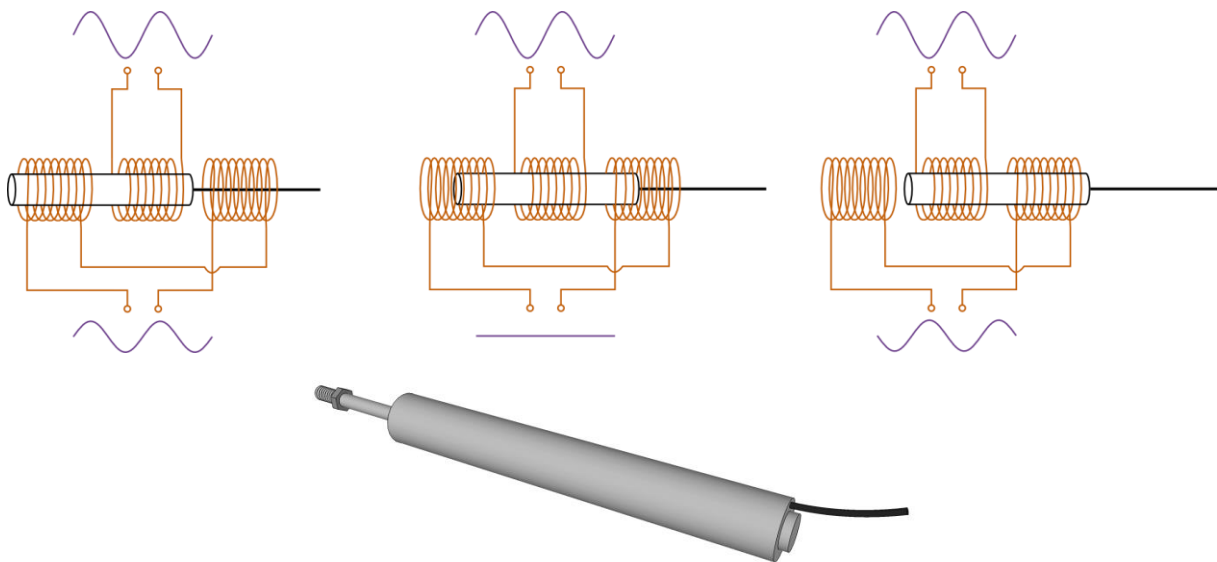
Induktív szenzorokat alkalmazhatunk fordulatszám-mérésre is. Az elforduló acél fogazott tárcsa a szenzorban feszültséget indukál, a keletkező jel frekvenciája pedig megegyezik a fordulatszám és a fogak számának szorzatával.



4.4. ábra: Fordulatszám-érzékelés indukciós szenzorral

Elmozdulások precíz mérésére a lineáris változó differenciáltranszformátorokat (LVDT, Linear Variable Differential Transformer) használják széleskörűen. A szenzor három tekercset tartalmaz,

valamint egy vasmagot, mely pozíciója változhat a tekercsekhez képest. A középső tekercset egy szinuszos váltakozó feszültséggel gerjesztik, ennek hatására a két mérőtekercsen feszültség indukálódik. Az indukált feszültség nagysága attól függ, hogy a vasmag hol helyezkedik el, annak a tekercsnek lesz nagyobb a kimenőfeszültsége, melyhez közelebb van a vasmag. A két tekercs ellenütembe van kötve, a kimenő jel fázisát meghatározza, hogy a vasmag mely tekercshez van közelebb. Az amplitúdó pedig a középtértéktől való kitéréssel lesz arányos. A tekercsek jelét egy elektronika dolgozza fel, a szenzor kimenete így már az elmozdulással arányos feszültség lesz.



4.5. ábra: Az LVDT működési elve

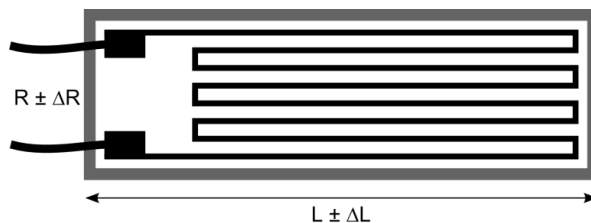
Az LVDT-t a potenciométerekhez hasonlóan alkalmazhatjuk, ugyanakkor, mivel nincs csúszó érintkező sokkal hosszabb az élettartama, valamint mostoha körülmények között is megbízhatóan működik.

4.1.4 Nyúlásmérő ellenállás

Kicsiny elmozdulások által létrehozott deformáció érzékelésére gyakran alkalmaznak piezorezisztív anyagokat. Egy vékony rétegben felvitt félvezető ellenállása megnyújtás vagy összenyomás hatására megváltozik egyrészt a geometriai adatainak megváltozása, másrészt a félvezető tulajdonságai miatt. Összességében egy alapállapotban L hosszúságú és R ellenállású vezető szál ellenállása a következő összefüggéssel írható le:

$$\frac{\Delta R}{R} = G \frac{\Delta L}{L}$$

ahol ΔR az ellenállásváltozás, ΔL a hosszváltozás, a G pedig a vezető szál tulajdonságaitól függő állandó.



4.6. ábra: Nyúlásmérő ellenállás (nyúlásmérő bélyeg) felépítése

A fenti relatív változás maximális értéke kicsi, általában 1 % alatti, aminek akár ezred vagy még kisebb részét is mérni kell, ami nem egyszerű feladat. A szenzorok jeleinek elektronikai kezelésénél látjuk majd, hogy ilyen esetekben célszerű ellenálláshidat használni.

Az ellenállás értéke pár száz Ohmtól pár kiloOhmig szokott terjedni, a deformáló elmozdulás általában jóval mm alatti. Ezt az elvet is alkalmazzák számos más szenzor esetében.

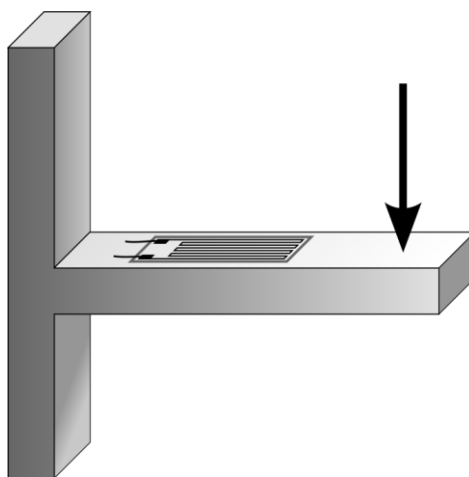
4.1.5 Erőszenzor

Az előző pontban bemutatott elv alkalmas erő mérésére is. Ha egy rugalmas anyag (fém) felületére piezorezisztív szálát rögzítenek, akkor erő hatására a Hooke-törvény szerint a tárgy és vele a szál L hossza megváltozik:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{E \cdot A}$$

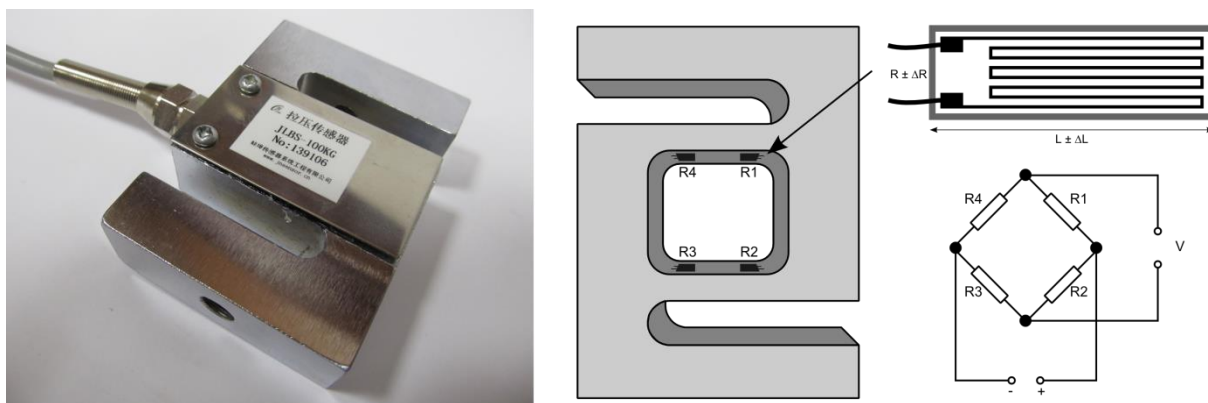
$$\frac{\Delta R}{R} = G \frac{F}{E \cdot A}$$

ahol R a szál nyugalmi ellenállása, ΔR az ellenállásváltozás, ΔL a hosszváltozás, G a vezető szál tulajdonságaitól függő állandó, az E pedig a Young modulus.



4.7. ábra: Erő mérése nyúlásmérő bélyeggel

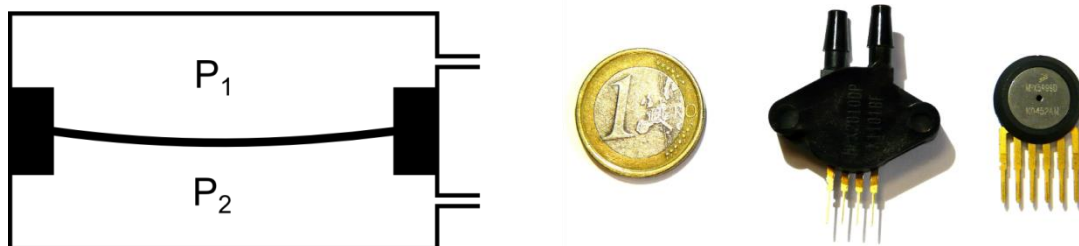
A hordozó rugalmas anyag méretétől és anyagától függően igen széles erőtartomány mérhető. Hasonlóan készíthetők úgynevezett mérlegcellák, amik a rájuk helyezett tömeg hatására létrejövő deformációt érzékelik, így tömeg mérésére alkalmasak. Mérlegcellák találhatók levélmérlegekben de akár kamionok súlyát mérőrámpákban is.



4.8. ábra: A mérlegcella mérőhídja és elrendezése

4.1.6 Nyomásszenzor

Folyadék vagy gáz nyomása egy rugalmas anyag felületre hatva deformációt hoz létre, így a fenti elvet követve nyomásszenzorokat is lehet készíteni. A mérlegcellákhoz hasonlóan nyomásszenzorokban is négy piezorezisztív ellenállást szoktak hídba kapcsolni, ami nagy tartományú mérést tesz lehetővé. A méréstartomány többféle lehet, pár 10 mbartól akár több bar nyomásig terjedhet. Léteznek differenciális, légnyomáshoz képest mérő, illetve abszolút nyomást mérő (úgynevezett barométer típusú) nyomásszenzorok.



4.9. ábra: Nyomásszenzor működési elve. Differenciális és abszolút nyomásszenzor.

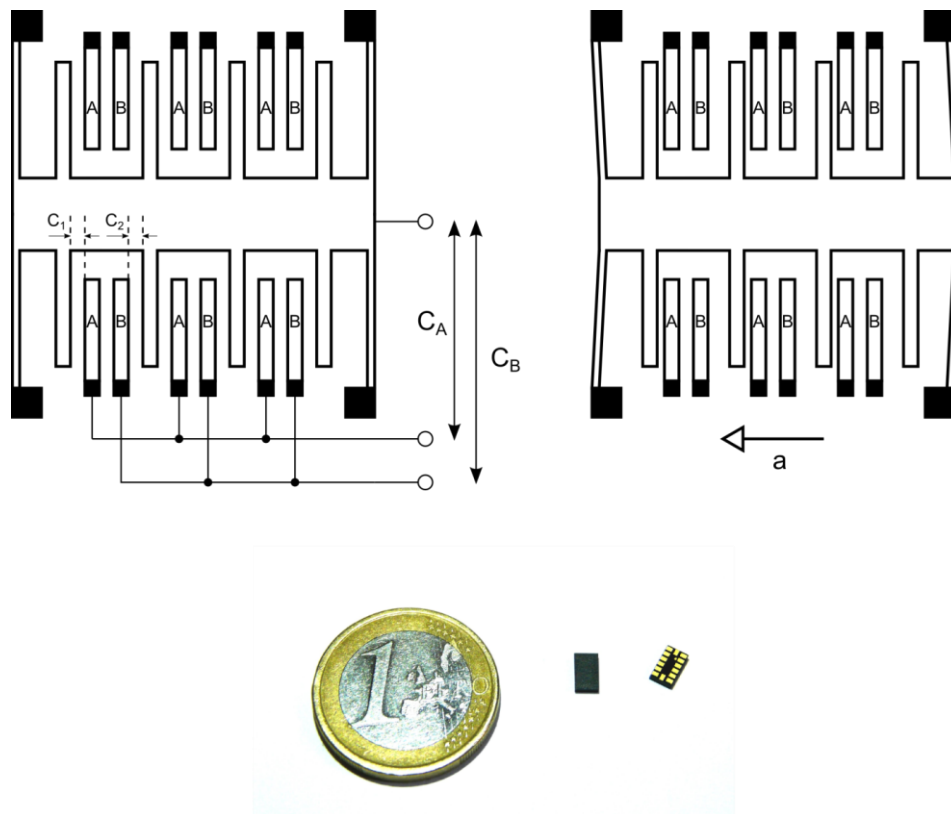
A nyomásszenzorok fő alkalmazásai: folyadékok és gázok nyomásának mérése, guminyomás ellenőrzése, folyadékszint mérése, magasság meghatározása a barometrikus magasságformulát felhasználva.

4.1.7 Gyorsulásszenzor

Egy test gyorsulása a súlyos vagy tehetetlen tömeg miatt erőhatás is jelent, ami a fentiek szerint szintén okozhatja rugalmas anyag deformációját. A súly a gravitáció miatt lép fel, míg ha gyorsítunk egy testet, arra erővel hatunk. A gyorsulásszenzorok így mindkét fajta gyorsulást mérhetővé teszik, a gravitációs gyorsulást is. A gyorsulás vektormennyiség, ennek megfelelően szükség lehet akár három független irány mentén is a gyorsulás mérésére. Léteznek 1, 2 és 3 tengelyű szenzorok, a mérési tartományuk a g gravitációs gyorsuláshoz van általában viszonyítva. A legérzékenyebb szenzorok 1,2 g méréshatárúak, de akár 50 g , 100 g is mérhető bizonyos szenzorokkal.

A gyorsulásszenzorokban a kapacitív elmozdulás-mérési elvet alkalmazzák, mikrométerű kivitelben. A szenzorok integrált áramkörben vannak, a felhasználónak nem kell a nagyon kicsi kapacitást mérni

(ami igen nehéz feladat lenne), a gyorsulási jel feszültség vagy digitális jel formájában kerül a kimenetre. A digitális forma lehet pulzusszélesség-moduláció (PWM), vagy I2C, SPI formátumú.

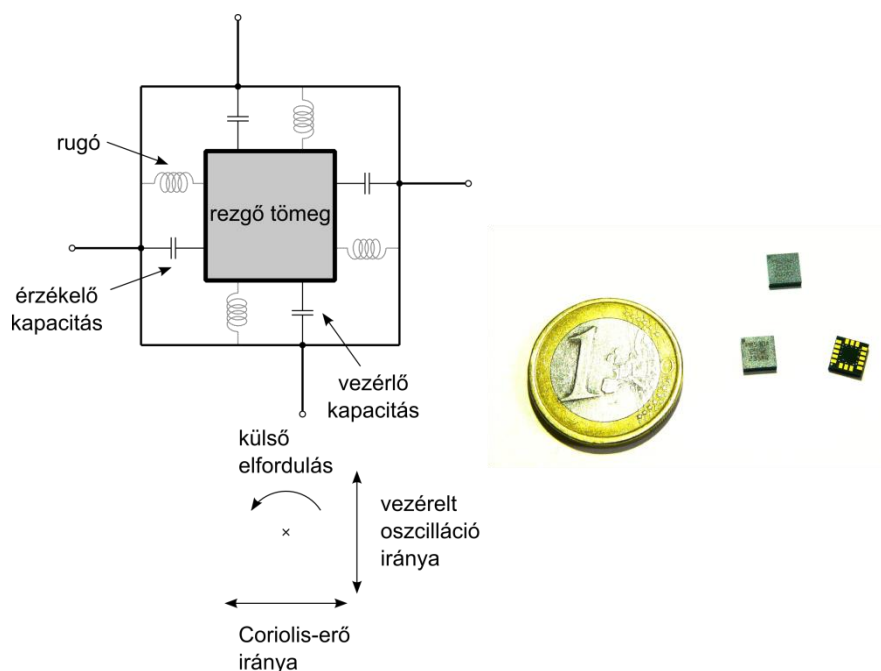


4.10. ábra: Gyorsulásszenzor működési elve valamint fényképe

A gyorsulásmérők alkalmazásai közé tartozik a rezgés, ütés, gyorsulás, dőlésszög, forgás és szabadesés érzékelése. A gyorsulásérzékelőket felhasználják játékok irányítására, gesztusok érzékelésére okostelefonokban, sportolók mozgásának követésében (pl. lépésszámlálás), GPS-ek adatainak kiegészítésére, robotok irányítására.

4.1.8 Szögsebesség-szenzor - giroszkóp

A szögsebesség-szenzorokat gyakran giroszkópnak is nevezik. A mérési elvük hasonlít a gyorsulásszenzorokéra. Az integrált áramkörön parányi tömeget rezgetnek egyenes mentén, amire forgáskor a tömeggel arányos Coriolis erő hat, úgynevezett Coriolis gyorsulás jön létre, ami az előbbi módon mérhető. Szögsebesség-szenzorok is léteznek 1, 2 és 3 tengelyű kivitelben. Ma már a giroszkópok is közel olyan elterjedtek, mint a gyorsulásszenzorok, áruk is rendkívül nagyot csökkent az utóbbi pár évben. A giroszkópok fő alkalmazási területe: mozgások érzékelése, forgásszabályozás, navigáció.



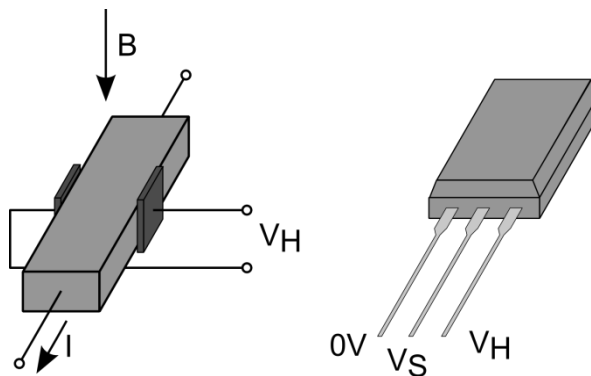
4.11. ábra: A giroszkóp működési elve és fényképe

4.1.9 Mágneses tér szenzorok

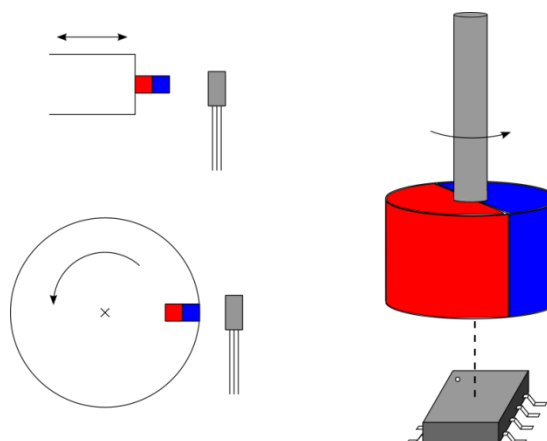
Mágneses tér mérése számos mechanikai rendszer esetén lehet hasznos közvetett módon. Követhető mágnes mozgása, elfordulása is, sőt, akár a Föld mágneses terét is használhatjuk pozicionálási problémák megoldására.

4.1.9.1 Hall-effektus szenzor

A Hall-effektus alapelve szerint egy vezetőben folyó áramra merőlegesen feszültség lép fel az áramra és feszültségre is merőleges mágneses tér komponensével arányosan. Állandó áramot biztosítva ez egy feszültségkimenetű szenzort készítését teszi lehetővé. A Hall-szenzorokat integrált áramkörbe foglalják, így csak tápfeszültséget kell rákötni és a kimeneten mérhető feszültségből meghatározható a mágneses tér erőssége. Vannak kétállapotú digitális kimenettel rendelkező szenzorok, melyek a mágneses tér jelenlétének kimutatására alkalmasak, amit egy mozgó alkatrészre erősített mágnes szokott létrehozni. Ez alkalmas arra, hogy detektáljuk egy tárgy áthaladását, forgását. A folytonos kimenetű szenzorok a mágnes közelségét, elfordulási szögét is képesek érzékelni. A tápfeszültség értéke 2,7 V-5 V között szokott lenni, ami a digitális rendszereknél is tipikus. Ne felejtjük, hogy a legtöbb szenzor kimeneti feszültsége a tápfeszültséggel is arányos, így az általában pontatlan tápfeszültség hibái a kimenetet is terhelik. Ezt ki lehet küszöbölni külön stabilizált tápfeszültséggel, és arányos mérési elrendezéssel, amiről szó lesz később a szenzorok elektronikai kezelésénél. A Hall-szenzorok alkalmazhatók távolság és fordulatszám mérésére, jelenlét érzékelésre és elfordulás detektálására.



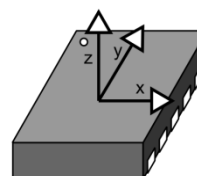
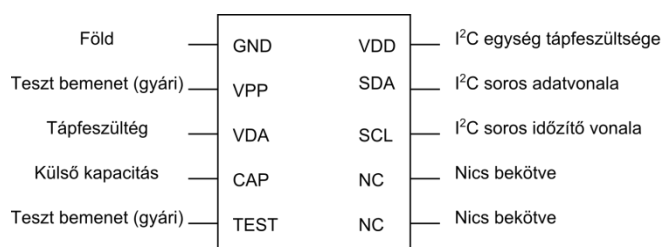
4.12. ábra: Hall-szenzor működési elve és egy lehetséges tokozása



4.13. ábra: Hall-szenzor alkalmazása fordulatszám és szögpozíció detektálására

4.1.9.2 Magnetométer

A Hall-szenzorok érzékenysége általában nem elég a Föld mágneses terének pontos méréséhez, bár ma már készítenek ilyen elven működő elektronikus iránytűket, magnetométereket. Léteznek magnetorezisztív anyagok is, melyek a nyomásszenzorokéhoz hasonló ellenálláshíd elrendezésben működnek és kellő erősítés mellett elég érzékenyek. Kezelésük elég bonyolult, ezért leggyakrabban áramkörökbe integrálják őket, amiknek feszültség vagy digitális kimenetük van. A magnetométerek általában háromtengelyűek, alkalmasak a Föld mágneses teréhez viszonyított irány meghatározására. Ennek köszönhetően használhatók iránytűként, pozicionálásra, valamint a dőlésszög mérésére.



4.14. ábra: Egy egyszerűbb, háromtengelyű digitális iránytű integrált áramkör (MM328xMS)

4.1.10 Optikai szenzorok

Az optikai szenzorok a mágneses érzékelőkhöz hasonlóan széles körűen alkalmazhatók közvetett mechanikai mérésekhez.

4.1.10.1 Fotoellenállás

A fotoellenállás vagy más néven fényérzékeny ellenállás, fotocella a rájutó fény hatására jobb vezetővé válik, az ellenállása lecsökken. Erősen nemlineáris szenzor, a karakterisztikája alapján nem pontos mérésekre, hanem inkább fény jelenlétének kimutatására való. Érzékenységét az alábbi képlet definiálja:

$$\gamma = \frac{\log(R_{100} / R_{10})}{\log(100\text{lux} / 10\text{lux})}$$

ahol R_{10} és R_{100} a 10 lux illetve 100 lux megvilágításhoz tartozó ellenállás. Az érzékenység nagysága tipikusan 0,6-0,9 közötti. Teljes sötétben a szenzor ellenállása 1 M Ω körüli, ami fény hatására akár 1 k Ω alá is csökkenhet. A szenzor viszonylag lassú és aszimmetrikus reagálása: ha megvilágítjuk, akkor pár ms alatt veszi fel a megfelelő ellenállásértéket, a fény eltakarásakor ez akár tízszer lassabb is lehet.



4.15. ábra: Fotoellenállás áramköri rajza és fényképe

Spektrális érzékenysége a látható tartománynál szélesebb, körülbelül 400 nm-700 nm tartományban számottevő.

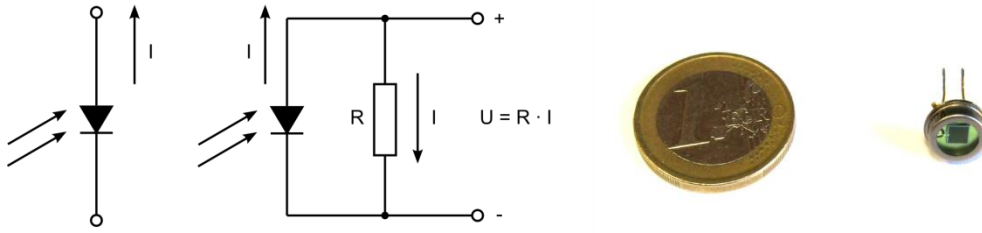
A fotoellenállásokat használhatjuk fény jelenlétének detektálására, például kazánokban lángórként, valamint fotokapukban és fényfüggőnyökben.

4.1.10.2 Fotodióda

A fotodióda fényintenzitás pontos mérésére szolgáló eszköz. Használható úgynevezett fotofeszültség vagy fotoáram módban, vagy akár a kettő kombinációjában. Ha a fotodióda kivezetéseit szabadon hagyjuk, fény hatására töltésmegoszlás jön létre, ami a dióda anódja és katódja között feszültséget eredményez. Ha a két kivezetést egy vezetékkel összekötjük, akkor természetesen 0V feszültség van a diódán, ekkor fény hatására záróirányú áram kezd el folyni, ami a rá jutó E fényintenzitással igen pontosan arányos.

$$I = \alpha \cdot E$$

Ez utóbbi üzemmód használható ezért a legpontosabb mérésekhez. Ha egy ellenálláson keresztül kötjük össze a kivezetéseket, akkor az áram hatására az ellenálláson és így a diódán is feszültség lép fel, ez tehát a két mód kombinációja, ami pontosabb feszültségkimenetet ad, mint a fotofeszültség mód. A fotodióda működési sebessége növelhető, ha záró irányú állandó feszültséget alkalmazunk, mivel ekkor a dióda kapacitása erősen lecsökken, gyorsabban halmozódhatnak fel rajta a töltések.



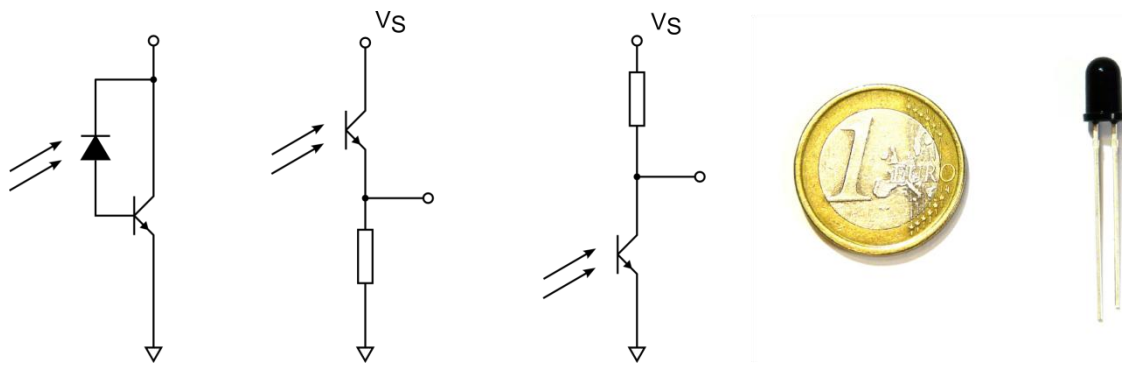
4.16. ábra: Fotodióda működési elve, tipikus bekötése valamint fényképe

A fotodióda tehát szenzorként fotoáram módban használható, azaz áramot ad. Kisebb pontossági igény esetén egy ellenállással lezárva feszültségkimenetű szenzorhoz jutunk. Mindkét esetben elég kicsi jelekkel kell számolnunk (pár μA , mV), általában erősítés szükséges. Fotodiódák többféle spektrális érzékenységgel rendelkezhetnek, elterjedten használják mechatronikában a nem látható infravörös tartományt, mivel kevésbé zavarja a nappali fény.

A fotodiódákat alkalmazhatjuk fénymennyiség pontos mérésére, fotókapukban, valamint a visszavert fény érzékelése révén távolságmérésre.

4.1.10.3 Fototranzisztor

A fototranzisztor ekvivalens modellje lényegében egy bipoláris tranzisztor, melynek kollektora és bázisa közé egy fotodiódát képzelünk a kollektorhoz kötött katóddal. A valóságban maga a tranzisztor kollektor-bázis diódája jelenti a fotodiódát. Ez az elrendezés azért előnyös, mert így a záróirányú áram a bázison át az emitter felé folyik, és a tranzisztor áramerősítése miatt sokszorosára növekszik, ha külső tápforrást használunk. Lényegében a tranzisztort áram helyett fényintenzitással vezéreljük.



4.17. ábra: Fototranzisztor ekvivalens rajz, mérőkapcsolás

A fototranzisztorok tehát tápfeszültséget igényelnek, viszont sokkal nagyobb áramot adnak, mint a fotodiódák. Karakterisztikájuk lényegesen pontatlanabb, így főleg fény jelenlétének kimutatására használatosak, pontos mérésekre nem alkalmasak.

A fototranzisztorokat fotókapukban alkalmazhatjuk, valamint digitális optikai jelátvitelre, pl. távirányítóknak.

4.1.11 Hőmérsékletszenzorok

Mechatronikában a mechanikai mennyiségek mellett nagy jelentősége lehet a hőmérsékletmérésnek is. Biztonsági okok (túlhevülés, tűz érzékelése) mellett feladat lehet folyadékok, gázok

hőmérsékletének mérésére, szabályozására, mint például egy fűtési rendszerben, autók motorjának hűtésében.

Többféle hőmérsékletszenzor létezik, melyeket a különböző előnyeik alapján választhatunk ki az adott mérési, szabályozási feladathoz.

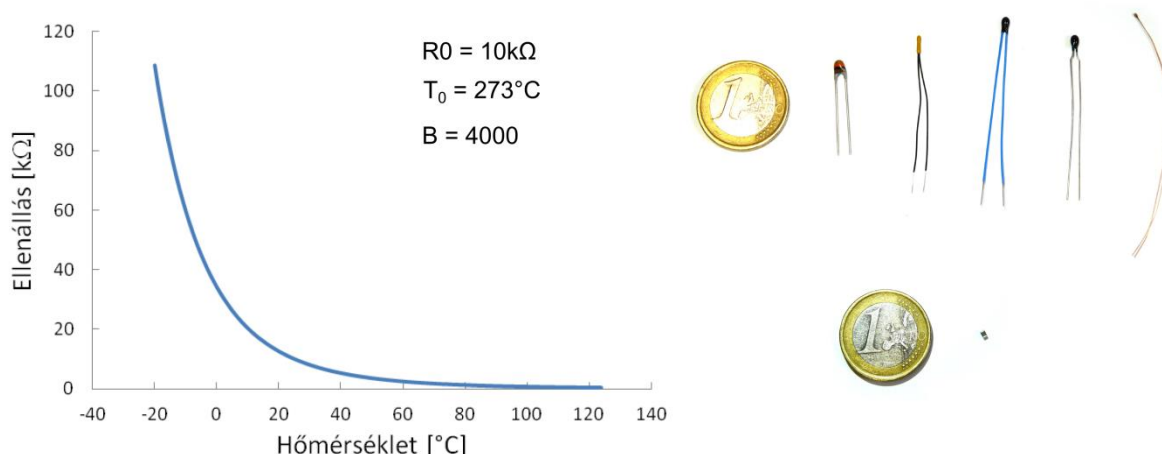
4.1.11.1 Termisztor

A termisztor félvezető, melynek erősen hőmérsékletfüggő az ellenállása jó közelítéssel a Steinhart-Hart egyenlettel adható meg:

$$R(T) = R_{25} \cdot e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{25}} \right)}$$

$$T(R) = \frac{1}{\frac{1}{T_{25}} + \frac{1}{B} \ln \frac{R}{R_{25}}}$$

R_{25} és T_{25} a 25°C hőmérséklethez tartozó ellenállás és Kelvinben megadott hőmérsékletérték, T is Kelvinben értendő. B értéke 3000 K és 4500 K között van, míg R_{25} értéke változatos, elterjedt a 10 kΩ használata, de lehet ettől eltérő is.



4.18. ábra: A termisztor karakterisztikája, valamint példák termisztorokra

A termisztorok általában -40°C..125°C hőmérséklettartományban használhatók. Érzékenységük igen nagy, többféle pontossági osztályban kaphatók. Bizonyos típusok akár 1°C-2°C pontosságú mérésre alkalmasak kalibrálás nélkül. A termisztorokat legfőképp kisebb tartományú, mérésekre használják, ahol fontos, hogy a szenzor olcsó legyen.

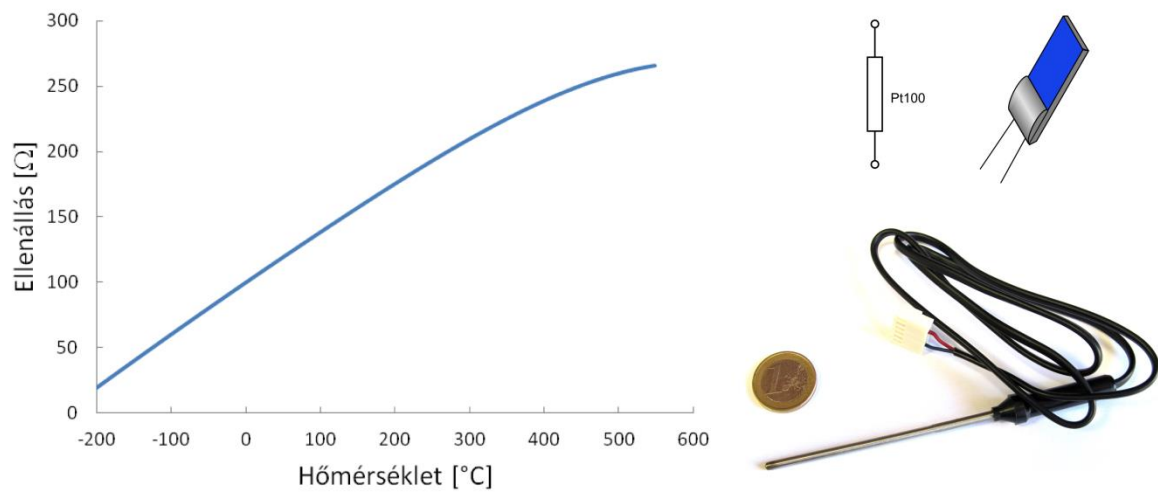
4.1.11.2 Pt100

A Pt100 szintén ellenállásszenzor, lényegében egy 0°C-on 100 Ω névleges ellenállású platinaszál vagy réteg megfelelő hordozóra rögzítve. A szenzor nem teljesen lineáris, kellően pontos közelítést a Callendar Van Dusen egyenlettel adhatunk meg:

$$R(T) = \begin{cases} R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2) & \text{ha } T \geq 0 \\ R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot (T - 100^\circ\text{C}) \cdot T^3) & \text{ha } T < 0 \end{cases}$$

$A = 3.9083 \cdot 10^{-3}$, $B = -5.775 \cdot 10^{-7}$, $C = -4.183 \cdot 10^{-12}$, T itt °C-ban értendő.

Kivitelről függően széles hőmérséklettartományban használható, elvileg akár -200°C..850°C között. A Többféle pontosságú Pt100 szenzorok kapható, tipikusan 0°C-on a hiba 0,5°C körüli.

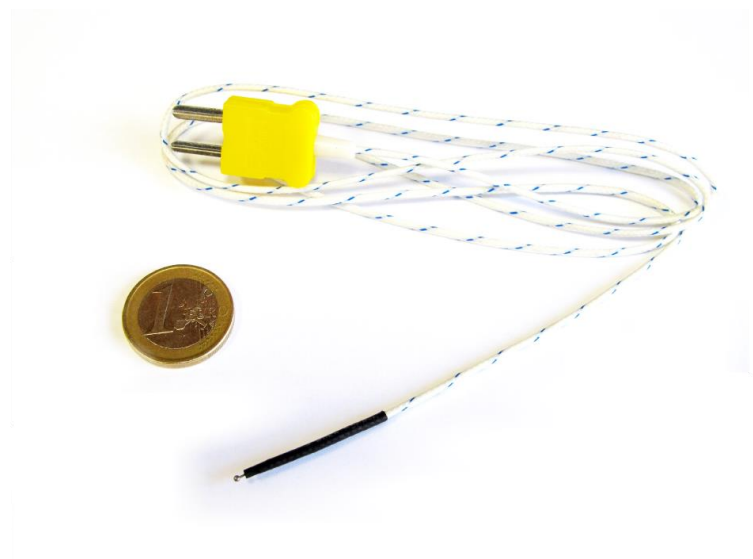
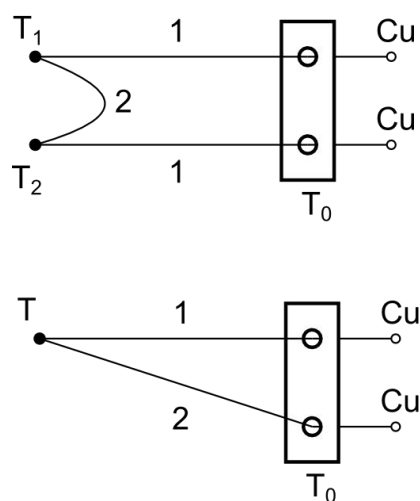


4.19. ábra: A Pt100 karakterisztikája valamint képe

A PT100-at széles hőmérséklettartományban használhatjuk pontos hőmérsékletmérésre.

4.1.11.3 Termoelem

A termoelem két különböző fém érintkezési pontjának hőmérsékletéről ad információt. A termoelem lényegében három sorba kötött vezetékből áll, középen ez egyik fémből készült vezetéssel. Tehát a végpontok között két csatlakozási pont van, és ha ezen két pont hőmérséklete különbözik (miközben a végpontok hőmérséklete azonos!), akkor a végpontok között a hőmérsékletkülönbséggel jó közelítéssel arányos feszültség jön létre.



4.20. ábra: Tipikus termoelem elrendezések

A gyakorlatban használt termoelemek csak két vezetékszakaszból állnak. Mivel ezt a két pontot a fogadó elektronikához vezetjük réz vezetékekkel, létrejön még két csatlakozási pont. Ezeknek hőmérsékletét azonos értéken kell tartanunk, ráadásul tudnunk is kell, mert ez reprezentálja a hiányzó kontaktus. Ekkor tehát a termofeszültség értéke a mérőpont és a két csatlakozási pont közötti hőmérsékletkülönbségtől függ. Ismerve a csatlakozási pontok hőmérsékletét ki tudjuk számítani a mérőpont hőmérsékletét.

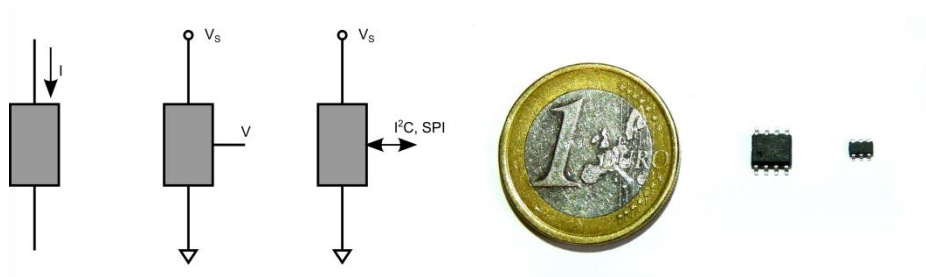
A termoelem érzékenysége elég kicsi, az alkalmazott fémek típusától függ. A leggyakrabban használt K-típusú termoelem esetében az érzékenység közelítőleg $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Tehát igen kicsi feszültség mérését kell megoldanunk. Ugyanakkor a termoelem nagy előnye, hogy igen széles hőmérséklettartományban használható, nem igényel gerjesztést, így nincs önfűtése sem, mint a rezisztív szenzoroknak. Ha a vezetékek nagyon vékonyak, akkor a hőelvonása is igen kicsi, a válaszája pedig a leggyorsabb az ebben a tárgyalt szenzorok között.

A termoelemeket pontos hőmérsékletmérésekre használjuk széles hőmérséklettartományban.

4.1.11.4 Integrált áramkörös hőmérsékletszenzorok

A félvezető P-N átmenetek áram-feszültségkarakterisztikájának hőmérsékletfüggését is fel lehet használni szenzorok készítésére. Tulajdonképpen a diódák, tranzisztorok egyben hőmérsékletszenzorok is. Precíz szenzorokat integrált áramkörökkel valósítanak meg, melyek elvégzik a szükséges gerjesztő jelek előállítását és a megfelelő kimeneti jel előállítását is.

A kimeneti jel lehet áram vagy feszültség, ami lineáris függvénye a hőmérsékletnek, de a mai szenzorok leggyakrabban digitális kimenetűek. A digitális szenzorokban tehát megfelelő pontosságú analóg-digitális átalakító is van. A digitális kimenet általában I²C vagy SPI protokoll szerint értelmezhető. A szenzorok programozhatóak is lehetnek, beállíthatók jelzési hőmérsékletküszöbök, az adatok felbontása a mérési pontossághoz illeszkedően.



4.21. ábra: Példák integrált hőmérsékletszenzorokra

Az integrált áramköri kivitel többféle tokozású lehet. A tranzisztorokéhoz hasonló TO-92 tokok akár hosszabb vezetékekkel köthetők az áramkörhöz, míg a többi tokozás nyomtatott áramkörbe való beforrasztást tesz csak lehetővé. Ez természetesen azt jelenti, hogy a szenzor lényegében a nyomtatott áramkör hőmérsékletét méri, amit az alkalmazásoknál figyelembe kell venni. Nem okoz ez problémát alacsony fogyasztási, elemről működő szenzormoduloknál, ahol az áramkör önfűtése minimális, tehát az áramkör felveszi környezete hőmérsékletét.

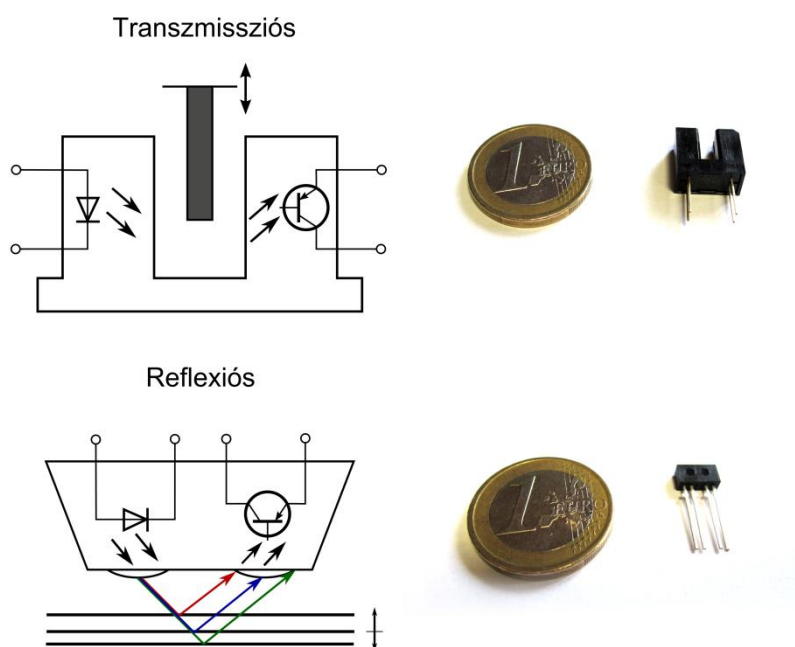
Alkalmazások: kisebb tartományú, olcsó, pontos hőmérsékletmérés, hidegpont-kompenzálás, vezeték nélküli szenzormodulok. Digitális szenzorokkal termosztátok is egyszerűen készíthetők.

4.1.12 Szenzorokmodulok

Érzékelőként használható olyan komplettebb modulok is, melyek többféle komponenst tartalmaznak, a szenzor mellett tartalmaznak alkalmazásukhoz szükséges gerjesztő elemeket is. Tulajdonképpen már az integrált áramkörös hőmérsékletszenzorok is hasonló felépítésűek.

4.1.12.1 Fotokapu

A fotokapu egy fényforrásból és fényérzékelőből áll, tipikusan infravörös LED és infravörös tartományban érzékeny fototranzisztor alkotja. A LED és fototranzisztor lehet egymással szemben elhelyezve, ekkor egy áthaladó tárgy blokkolja a fényt, így detektálható. Azonos oldalon elhelyezve egy tárgyról visszaverődő fény érzékelése is lehetséges. Ebben az esetben a tárgy távolsága is becsülhető, bár a mérés pontossága erősen függ a tárgy alakjától, felszínének optikai tulajdonságától is.



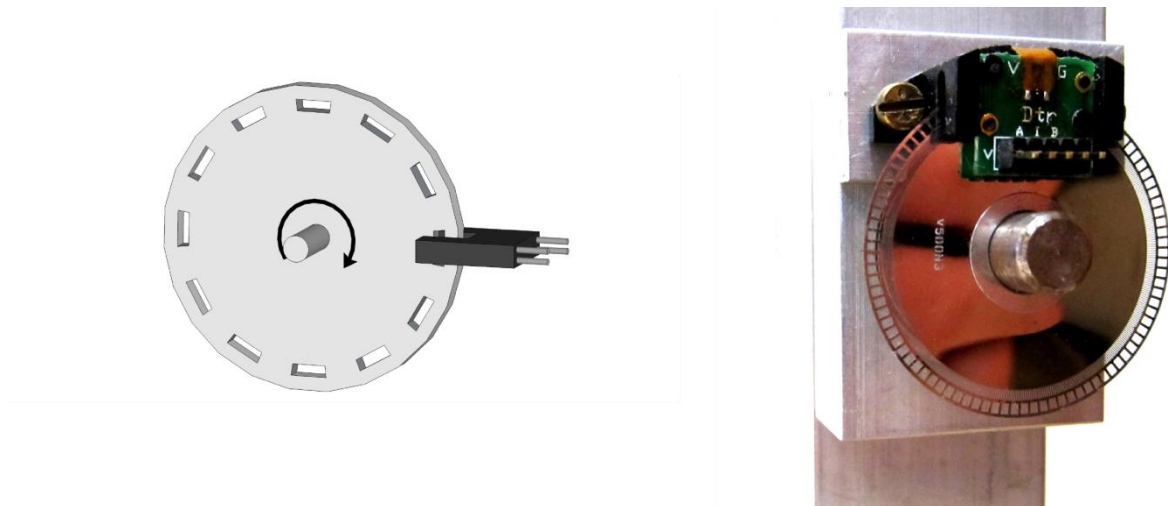
4.22. ábra: Transzmissziós és reflexiós fotokapu elrendezések

Alkalmazás: tárgyak áthaladási időpillanatának érzékelése, tárgyak jelenlétének érzékelése, közvetetten sebesség, forgás, távolság detektálása.

4.1.12.2 Pozíció enkóder

Az enkóderek feladata elfordulás, elmozdulás digitális elvű detektálása. Az enkóderek a fotokapuhoz hasonlóan működnek, de itt a jel blokkolását végző tárgy is része a modulnak.

Egy tengely elfordulását detektáló enkóderben van egy tárcsa, melynek szélén egyforma távolságban rések vannak, így az enkóderbe integrált fotokapu kétállapotú kimeneti jele felhasználható ez elfordulás mérésére. Adott szögű elfordulás hatására a kimeneti jelben annyi impulzus jelenik meg, ahány rés áthalad a fotokapun, tehát számlálással az elfordulás mértéke mérhető, míg a jelváltások időpillanatainak, gyakoriságának mérésével a forgási sebesség is meghatározható.



4.23. ábra: Szögelfordulást detektáló enkóder felépítése

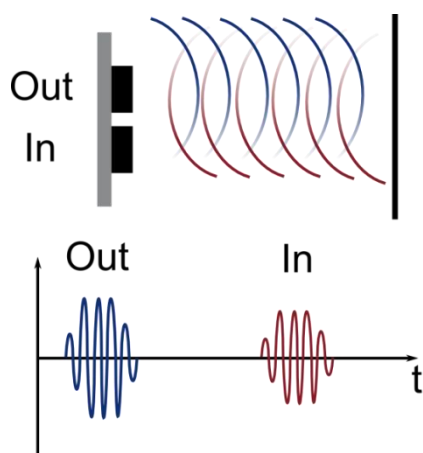
Az enkóderekbe gyakran több fotokaput és réssorozatot is integrálnak. Ha a peremhez közelebbi réssorozat alatt egységi eltolással újabb réssorozat van, akkor két fotokapuvál a forgási irány is meghatározható. Abszolút pozíció mérését segítheti, ha egy harmadik fotokapu a tárcsán egyetlen további rés detektálásával jelez egy ismert pozíciót.

A rések sűrűségével a felbontás növelhető, ekkor adott forgási sebesség mellett a kimeneti jel gyorsabban változik. Természetesen ez korlátozott, csak egy maximális forgási sebességig használható.

Alkalmazások: elfordulás mérése, szabályozása, kerekre szerelve megtett út és sebesség mérése.

4.1.12.3 Ultrahang alapú távolságszenzor

A fotokapuhoz hasonlóan fény helyett hangot is használhatunk tárgyak jelenlétének detektálására. Ahogy a fény esetében egy szűk, nem látható tartomány használatos, hang esetében egy adott frekvenciájú, 40kHz közeli nem hallható ultrahangos adó és vevő a modul része. A modult leginkább távolság becslésére, adott küszöb alatti vagy feletti értékének megállapítására használják.

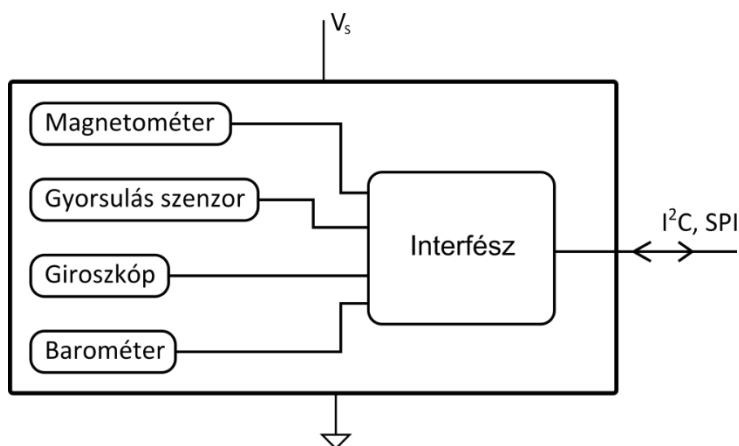


4.24. ábra: Ultrahangos detektor működése és fényképe

Ultrahang alapú szenzorokat használhatunk távolság és mélységmérésre (pl. folyadékszintmérés), tolatóradarokban valamint robotok navigációjában.

4.1.12.4 Inerciamodulok

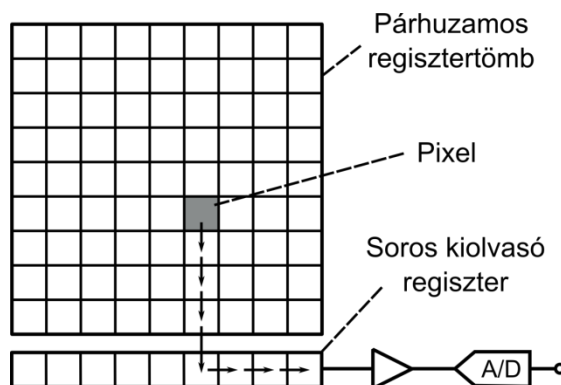
Tárgyak pozíciójának, mozgásának, forgásának érzékelését támogató szenzorok közé tartozik a gyorsulásszenzor, szögsebesség-szenzor, magnetométer. Ma már léteznek szenzormodulok, melyek több ilyen szenzor integrálásából jönnek létre. A modul szabadsági foka adja meg, hány egymástól különböző mennyiség mérését teszik lehetővé. Ennek megfelelően találhatunk 4 szabadsági fokú (3 gyorsulás, 1 szögsebesség), 6 szabadsági fokú (3 gyorsulás, 3 szögsebesség), 9 szabadsági fokú (3 gyorsulás, 3 szögsebesség, 3 magnetométer) modulokat. Ma már 10 szabadsági fokú modult is gyártanak, mely egy barometrikus nyomásszenzort is integrál, ami a barometrikus magasságformula alkalmazásával magasságváltozások mérésére is alkalmas.



4.25. ábra: Inerciamodul blokkdiagram

4.1.12.5 CCD modul

Érdemes megemlíteni egy modult, mellyel közvetlenül ritkán találkozunk mechatronikai rendszerek fejlesztői. A CCD (azaz charge coupled device) lényegében sok fotodiódát tartalmazó szenzortömb, melyeken a fény hatására töltések keletkeznek. Az egyes elemeken felhalmozódott töltések sorba egymás után a kimenetre vezethetők és így mérhetők. Vannak egydimenziós elrendezések, melyeknél egy egyenes mentén helyezkednek el az érzékelők (25,512 1014 vagy akár több is). Kétdimenziós CCD áramkörök vannak beépítve a kamerákba, így ma már szinte mindenki zsebében van CCD áramkör, a telefon kamerája.



4.26. ábra: Kétdimenziós CCD működési elve

A CCD modulok mechatronikai alkalmazásokban is leginkább kamerákba építve használatosak. Néhány speciális esetben előfordul, hogy a fejlesztő közvetlenül dolgozik beágyazott rendszerekhez kötött egy- vagy kétdimenziós CCD modulokkal pozíció, alakzat egyedi mérésére. A CCD alkalmazásai képfeldolgozást igényelnek, főbb területek: alakzatok felismerése, pozíció és elmozdulás figyelése, navigálás.

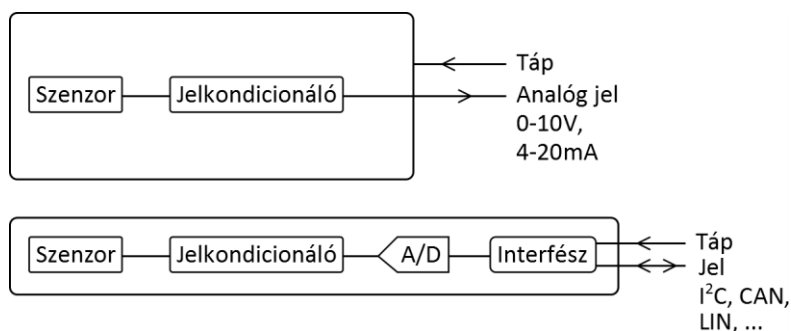
4.2 Szenzorok jelének elektronikai kezelése

A szenzorok jeleit a feldolgozó egységnek kell fogadnia információszerzés és feldolgozás céljából. A szenzorok ugyan elektronikával kezelhetők, mégis sokféle jelet adnak, ahogy ezt az előző fejezetekből is jól látható. A szenzorok illesztését, kimenő jeleik elektronikai egységesítését ezért el kell végezni. Ennek alapvetően kétféle megoldása létezik. Az egyiknél a szenzor egy komplett egység része (bár néha továbbra is szenzornak hívják), tartalmaz megfelelő áramköröket, amik a szabványos illesztést biztosítják. A másik esetben a szenzor jelének feldolgozásához a fejlesztőnek kell illesztőáramköröket készítenie. Az előbbi esetén egyszerűbb egy rendszer felépítése, hiszen csak egymáshoz kell csatlakoztatni a rendszer részeit, a másiknál lényegesen több feladat hárul a tervezőre, viszont sokkal kompaktabb, hatékonyabb céleszköz fejleszthető.

Ahhoz, hogy láthassuk, a szenzorok jelének milyen átalakítására van szükség, át kell néznünk, milyenek a fogadó oldal követelményei. A feldolgozó intelligens egység ipari környezetben tipikusan egy PLC, míg céleszközökben mikrovezérlő vagy hasonló funkciókat elvégző céláramkör. Ennek megfelelően a következő típusú jelek fogadására alkalmasak.

PLC-k, ipari berendezések esetén:

- feszültség: 0 V-5 V, 0 V-10 V, ± 5 V, ± 10 V tartományban;
- áram: 0 mA-20 mA vagy 4 mA-20 mA tartományban;
- digitális jelek: RS232, RS422, RS485, Ethernet, Modbus, Profibus, Devicenet, CAN vagy egyéb szabvány szerint.



4.27. ábra: Ipari szenzorok blokkdiagramja és illesztése a feldolgozó egységekhez

Az ipari kivitelű komplett szenzoregységek lehetnek távadók, melyek tipikusan 0 V-10 V vagy 4 mA-20 mA kimenőjeleket adnak. Ezeket az eszközöket adott hosszúságú vezetékkel köthetjük a feldolgozó egységekhez. Általában a PLC rendszerek tápellátásában használatos 24 V tápfeszültséggel működnek, így PLC-khez közvetlenül használhatók. Az áramkimenetű távadók előnye, hogy nem zavarérzékenyek, jelük minősége elhanyagolható mértékben függ a vezeték hosszától és a tápfeszültséget a jelvezetéken is megkaphatják: a felvett szabályozott tápáram adja ekkor a jelet.

Digitális kimenetű távadók számos kivitelben léteznek, szintén közvetlenül a vezérlő egységhez köthető komplett eszközök.

A fentiekkel szemben mikroelektronikai áramkörök, mikrovezérlők, céláramkörök esetén a tápfeszültség értéke 5 V, 3,3 V vagy akár még kisebb. Ebben az esetben a következő jelek kezelhetők:

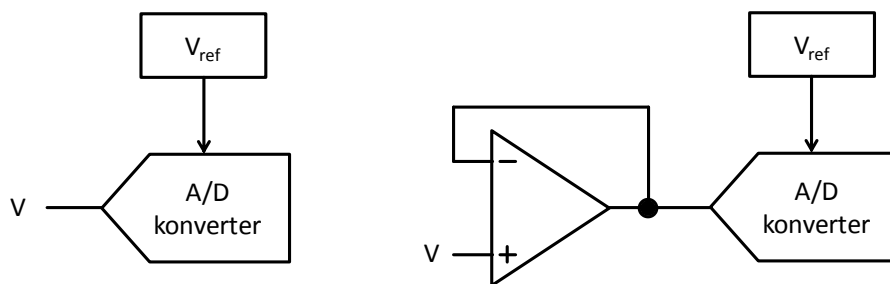
- feszültség: 0 V- V_{ref} tartományban. V_{ref} értéke változó, de általában 2,5 V közelében van;
- digitális jelek: PWM, I2C, SPI, CAN, LIN, IO-Link, ZigBee szabvány vagy speciális protokoll szerint.

A feszültségjelet egy külső vagy belső analóg-digitális átalakító fogadja, melynek felbontása általában 10 bit vagy 12 bit, de akár igen nagy, 16 bit-24 bit is lehet.

A fentiek alapján tehát az analóg szenzorok jelét megfelelő (0V- V_{ref}) tartományú feszültséggé kell alakítani. Digitális kimenetű szenzorok, szenzormodulok általában közvetlenül csatlakoztathatók. A következőkben megadjuk a legfontosabb szenzorillesztő-áramkörök kapcsolását.

4.2.1 Feszültségkimenetű szenzorok

Ha a feszültség eleve a megfelelő 0 V- V_{ref} tartományba esik, akkor közvetlenül az A/D átalakítóhoz köthető. Arra ügyelni kell, hogy a feszültségforrás alacsony impedanciájú legyen (célszerűen pár kΩ alatti), hogy a konverter bemenetét megfelelő módon meg tudja hajtani. Ha ez nem garantálható, akkor egy egyszeres erősítésű műveleti erősítőt kell használni.

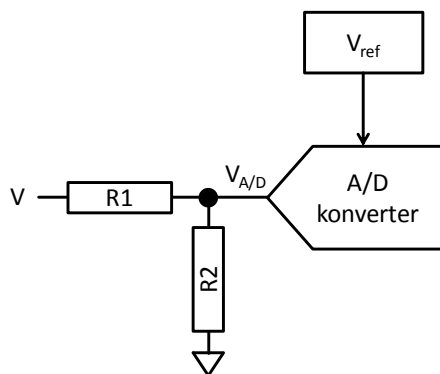


4.28. ábra: Szenzor jelének közvetlen bekötése valamint követő erősítőn keresztül való bekötése az A/D konverterbe

Ha a feszültség túl nagy, akkor passzív feszültségosztót alkalmazhatunk a jel csökkentésére. Unipoláris feszültség esetén a feszültség értéke:

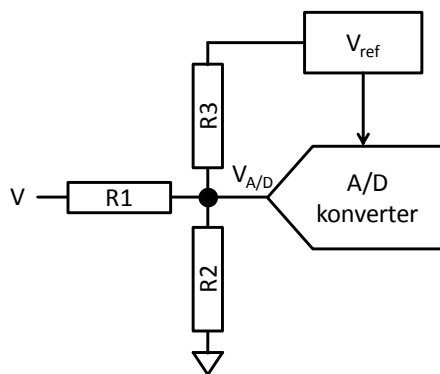
$$V = V_{A/D} \frac{R_1 + R_2}{R_1},$$

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{V_{ref}}{V_{max}}$$



4.29. ábra: Feszültségosztó alkalmazása a bemenő feszültség csökkentésére

Bipoláris feszültség ($-V_{\max}$ - $V_{\max}$) esetén egy harmadik ellenállás is szükséges.



4.30. ábra: Bipoláris feszültség konverziója unipoláris jellé mindössze három ellenállás felhasználásával

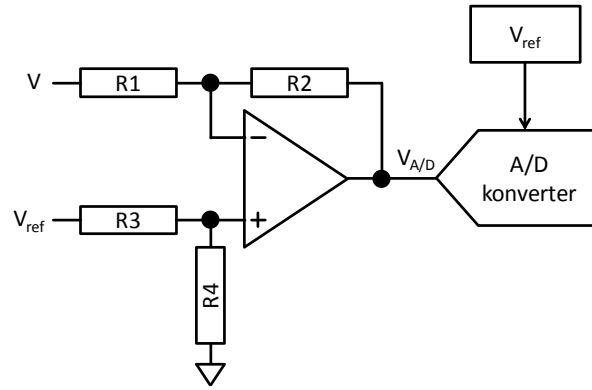
Ekkor úgy tekinthetjük, hogy két ellenállás először $-V_{\text{ref}}-V_{\text{ref}}$ tartományba konvertálja a jelet, majd ezt $0V-V_{\text{ref}}$ tartományba alakítja a harmadik ellenállás, ha egyenlő az első kettő párhuzamos eredőjével:

$$V = \left(V_{A/D} - \frac{V_{\text{ref}}}{2} \right) \cdot \frac{2(R_1 + R_2)}{R_1},$$

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{V_{\text{ref}}}{V_{\max}}$$

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Bipoláris vagy unipoláris feszültség esetén aktív, műveleti erősítős megoldás alkalmas kicsi vagy nagy feszültségek kezelésére is.



4.31. ábra: Aktív skálázása a bemenő jelnek

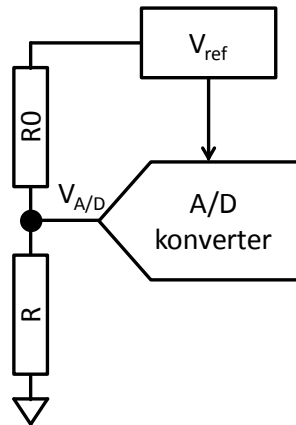
Az ellenállásokat a következő számolás alapján méretezhetjük:

$$V = \left(\frac{V_{ref}}{2} - V_{A/D} \right) \cdot \frac{R_1}{R_2},$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{2 \cdot R_4 + R_3}{R_3} = \frac{V_{ref}}{V_{max}}$$

4.2.2 Rezisztív szenzorok

Ha a V_{ref} feszültséget a rezisztív szenzorból és egy ismert ellenállásból készített osztóra kötjük, akkor a kimeneti feszültség digitalizálásával meghatározható az szenzor ellenállásának értéke. Nagy előny, hogy mivel az A/D átalakító is a V_{ref} feszültséget használja, így ennek pontossága nem befolyásolja a mérési pontosságot. Nagy ellenállások esetén itt is szükség lehet egyszeres feszültségerősítőre.



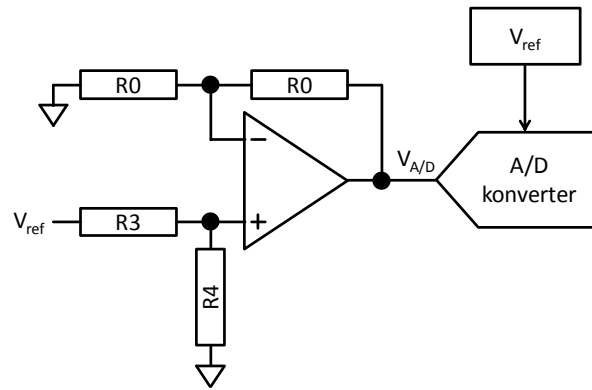
4.32. ábra: Egy rezisztív szenzor tipikus bekötése

Az ellenállás értékét a következő képlettel számolhatjuk ki:

$$R = R_0 \frac{V_{A/D}}{V_{ref} - V_{A/D}} = R_0 \frac{z \cdot V_{ref} / 2^b}{V_{ref} - z \cdot V_{ref} / 2^b} = R_0 \frac{z}{2^b - z}$$

ahol b az A/D átalakító felbontása bitekben és z az A/D átalakító kimenetén kapott egész szám.

Létezik olyan kapcsolás is, amikor a feszültség az ellenállás lineáris függvénye.

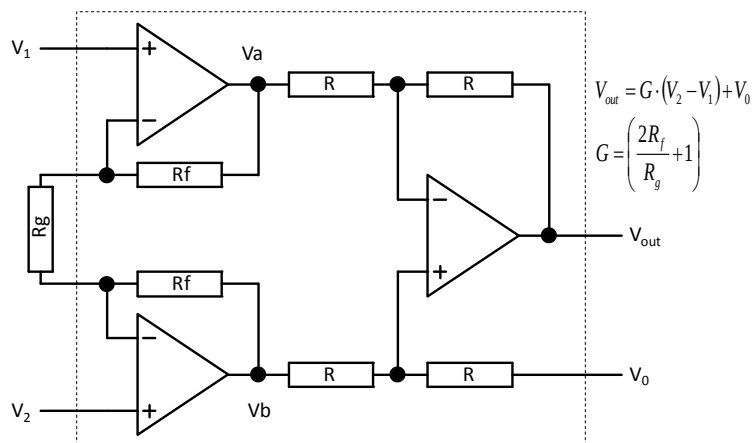


4.33. ábra: Lineáris ellenállás-feszültség konverter

Ebben az esetben az ellenállás az alábbi módon számítható ki:

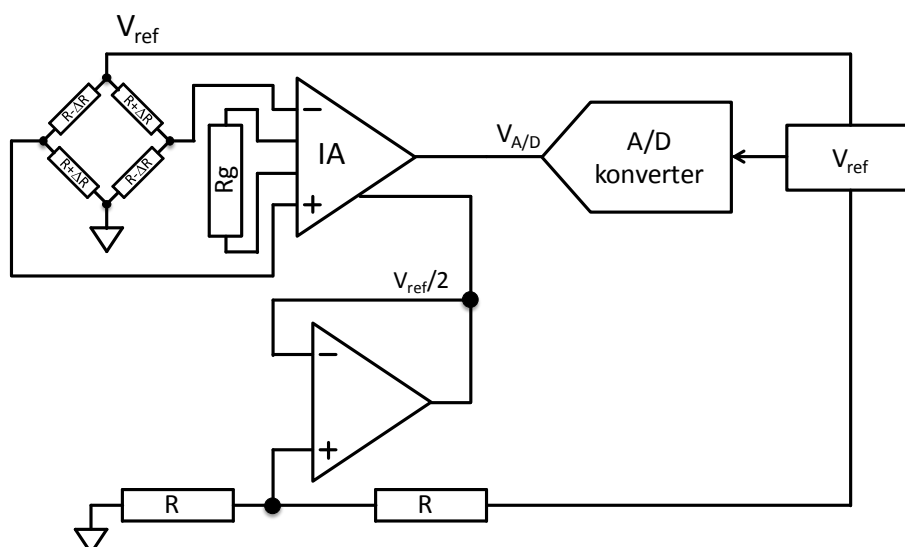
$$R = V_{A/D} \cdot \frac{R_0 \cdot (R_3 + R_4)}{V_{ref} \cdot R_4} - R_0$$

Ellenálláshidak jelének erősítésére műszererősítőt érdemes használni. A műszererősítő tulajdonképpen három műveleti erősítőtől felépített differenciálerősítő. Előnye nagy bemeneti impedancia, és precíz működés. Az erősítést egy ellenállással lehet beállítani. A műszererősítőket egyetlen tokba integrálva is gyártják.



4.34. ábra: Műszererősítő kapcsolási rajza

Az ellenálláshidat általában a referenciafeszültség hajtja meg, a híd két másik két kivezetésén fellépő feszültséget műszererősítővel erősíthetjük fel.

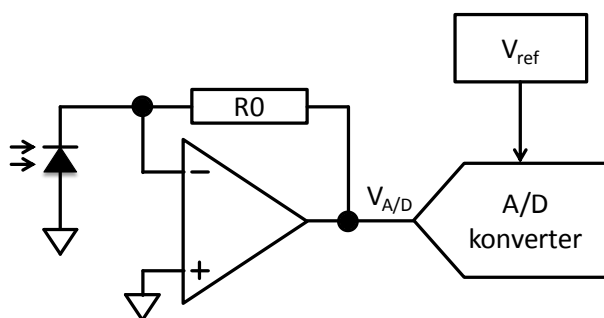


4.35. ábra: Ellenálláshíd mérése műszererősítő segítségével

4.2.3 Áramkimenetű szenzorok

Az áramkimenetű szenzorok tipikusan kicsi, μA nagyságú áramot adnak, így csak nagy értékű ellenálláson átfolyva kaphatunk megfelelő tartományú feszültséget. A legcélszerűbb műveleti erősítő kapcsolást használni. A következő kapcsolás az egyik legelterjedtebb fotodióda erősítőt mutatja be. A fotodióda áramát a következőként tudjuk kiszámolni a mért feszültségből.

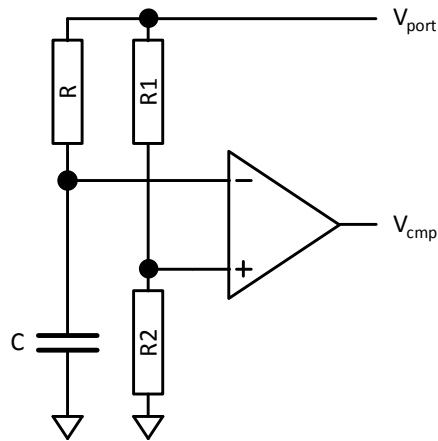
$$I = \frac{V_{A/D}}{R_0}$$



4.36. ábra: Fotodiódaerősítő kapcsolási rajza

4.2.4 Kapacitív és induktív szenzorok

Kapacitív szenzorok kapacitását kétféle módon szokták elterjedten mérni. Az egyik esetben a kondenzátort sorba kötjük egy ellenállással, ahogy a feszültségesztőnél is láthattuk. Ha a kezdetben 0V feszültséget hirtelen átkapcsoljuk egy másik értékre, akkor a kondenzátor elkezd tölteni. Ha egy feszültség-komparátorral vizsgáljuk, hogy a feszültség egy adott értéket mennyi idő alatt ér el, akkor a kapacitás értéke meghatározható. Mikrovezérlőkbe integrált számlálókkal és komparátorral így a feladat egyszerűen megoldható.



4.37. ábra: Kapacitás mérésére szolgáló kapcsolás

A mért t idők alapján a C kapacitás értékét a következőként kaphatjuk meg:

$$1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$C = \frac{t}{R \cdot \ln\left(\frac{R_1 + R_2}{R_2}\right)}$$

Kapacitás és induktivitás elvileg mérhető szinuszos váltófeszültségű gerjesztéssel is. Ebben az esetben is egy feszültségosztót alkalmazhatunk egy ismert értékű ellenállás és a mérendő kondenzátor vagy induktivitás sorba kötésével, ahogy ellenállásmérésnél is tettük. A váltófeszültségű gerjesztés és mérés lényegesen bonyolultabb, így ritkábban használatos.

Ha a szinuszos gerjesztőfeszültség frekvenciája f , amplitúdója V_g a mért jel amplitúdója V_a , akkor a C kapacitás és L induktivitás értéke az alábbi összefüggésekkel számítható ki:

$$C = 2\pi \cdot f \cdot \frac{V_g - V_a}{R_0 \cdot V_a}$$

$$L = \frac{R_0 \cdot V_a}{2\pi \cdot f \cdot (V_g - V_a)}$$

4.3 Felhasznált Irodalom

[4.1] U. Tietze, Ch Schenk: „Analóg és digitális áramkörök”, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1990.

[4.2] Lambert Miklós: „Szenzorok – elmélet és gyakorlat”, Invest – Marketing Bt., Budapest, 2009.

[4.3] Walt Kester, „Practical Design Techniques For Sensor Signal Conditioning”, Analog Devices, Inc., 1999, elérhető: <http://www.analog.com/en/training-tutorials-seminars/resources/analog-to-digital-converters/ad-converters/index.html>

[4.4] Rockwell Automation: “HVAC Sensors”, elérhető: <http://ab.rockwellautomation.com/Sensors-Switches/HVAC-Sensors>

- [4.5] Rockwell Automation: "Condition Sensors", elérhető: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/br/836e-br001_-en-p.pdf
- [4.6] Rockwell Automation: "Inductive Proximity Sensors", elérhető: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/ca/c116-ca502_-en-p.pdf
- [4.7] Measurement Specialties: "LVDT Technology", elérhető: http://www.meas-spec.com/downloads/LVDT_Technology.pdf
- [4.8] Capacitance-sensors: "Capacitive Position Sensors", elérhető: <http://www.capacitance-sensors.com/index.htm#Tutorial>
- [4.9] Rockwell Automation: "Sensors & Switches", elérhető: <http://ab.rockwellautomation.com/Sensors-Switches>
- [4.10] Rockwell Automation: "Capacitive Proximity Sensors", elérhető: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/ca/c116-ca504_-en-p.pdf
- [4.11] Analog Devices: "The Five Motion Senses", elérhető: http://www.analog.com/static/imported-files/overviews/The_Five_Motion_Senses.pdf
- [4.12] Analog Devices: "Accelerometers", elérhető: <http://www.analog.com/en/technical-documentation/analog-dialogue-technical-articles/resources/mems-sensors/mems-accelerometers/listing.html>
- [4.13] Analog Devices: "Sensors", elérhető: <http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/43-09/EDCh%20%20sensors.pdf>
- [4.14] Hahn Emil, Harsányi Gábor, Lepsényi Imre, Mizsei János, „Érzékelők és beavatkozók”, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1999.
- [4.15] BME, ETT: Sens-Edu – an Internet-Based Short Course in Sensorics, elérhető: <http://www.ett.bme.hu/sensedu/>

5 Aktuátorok

A aktuátorok vagy más néven beavatkozók a vezérlésnek megfelelően hatást gyakorolnak a környezetükre. Ez lehet tárgyak mozgatása, deformálása, folyadékok és gázok mozgatása, hőmérséklet növelése vagy csökkentése, hang és fény keltése. Mechanikai hatások elektronikusan közvetlenebbül elektromágnessel oldhatók meg: egy tekercsben folyó áram által létrehozott mágneses tér mechanikai erő kifejtésére használható. Mivel a távolság növelésével az erő gyorsan csökken, közvetlenül csak kis elmozdulások és távolság esetén használható az elv. Mechanikai áttételekkel, fogaskerekekkel, hajtóelemekkel viszont a mozgások rendkívül széles körben kiterjeszthetők. Az aktuátorok tehát a szenzorokhoz hasonlóan lehetnek közvetlenül használhatók, de általában komplexebb felépítésűek, az elektromos vezérlőjel mellett sok más komponenst is tartalmazhatnak.

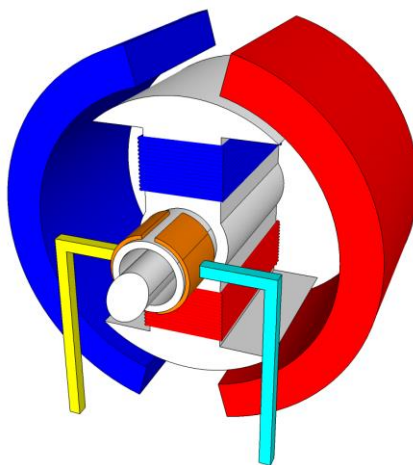
5.1 Motorok

A villanymotorok olyan villamos gépek, melyek az elektromos áram energiáját mozgássá alakítják. A leggyakrabban forgó mozgást hoznak létre, ugyanakkor léteznek lineáris motorok is. A mozgást többféle módon is létre lehet hozni, ennek megfelelően a motoroknak a fő fajtái:

- Egyenáramú gépek
- Aszinkron gépek
- Szinkron gépek

5.1.1 Egyenáramú, DC motorok

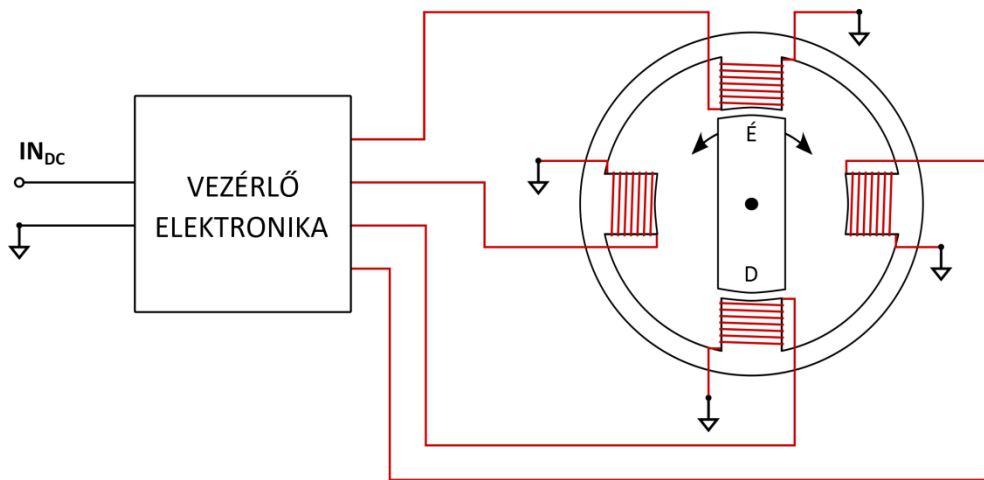
Az egyenáramú motor két fő részből áll, az állórészből, mely lehet egy állandó mágnes vagy elektromágnes, és a forgórészből, mely egy elektromágnes. Ha a tekercseken áram folyik keresztül, azok mágnesként viselkednek, az azonos mágneses pólusok taszítják, az ellenkező pólusok pedig vonzzák egymást; ennek hatására a forgó rész elfordul. Amikor kialakulna az egyensúly, a kommutátor megfordítja a forgórészben az áram irányát, ennek hatására a forgórész továbblendül, és megtesz még egy fél fordulatot. A folyamat ismétlésével egy állandó forgómozgás jön létre. A kommutátor általában szénkefékből áll, melyek a forgórész szögének függvényében kapcsolják az áram irányát.



5.1. ábra: Kommutátoros DC motor felépítése

Az egyenáramú motorok indító áram 10-20-szorosa is lehet az üzem közbeni áramának, ezért nagy teljesítményű motorok esetén külön indítómotorokat alkalmaznak. A szénkefés motoroknak egy speciális változata az univerzális motor, mely állandó mágnesek helyett csak elektromágneseket tartalmaz és mind DC, mint AC árammal működőképes. Háztartási készülékekben ez a legelterjedtebb motorfajta.

Jóval egyszerűbb felépítésű motorokat lehet készíteni, ha a forgó részen állandó mágnesek vannak (Brushless DC motor). Az áram váltakozását egy elektronika vezérli, szinkronban a forgórész mozgásával. A forgórész mozgását tipikusan Hall-szenzorokkal érzékeli az elektronika. Kefe nélküli motorok rendszerint két és három fázisban készülnek, széleskörűen alkalmazzák őket a számítástechnikában (ventillátorok, merevlemezek meghajtása), valamint modellautók és modellrepülőök meghajtásánál.

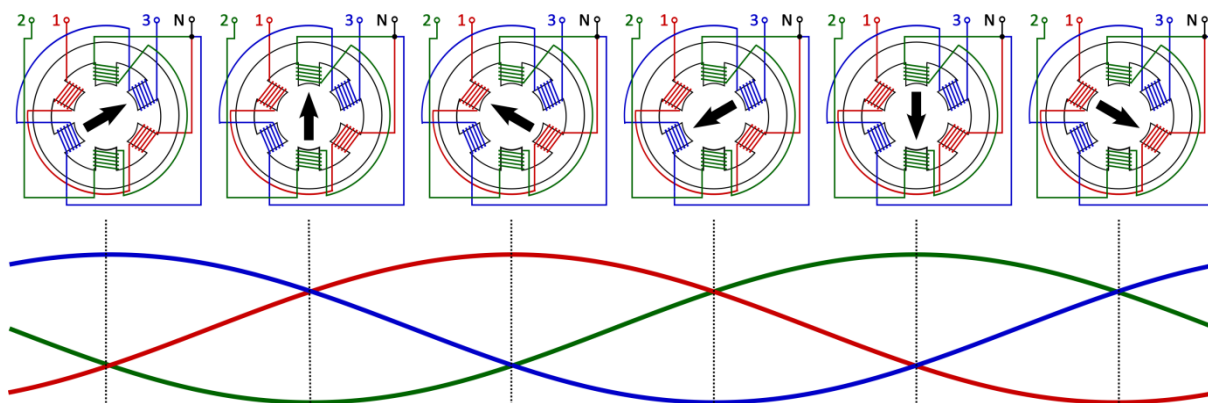


5.2. ábra: Elektronikus kommutációjú (kefe nélküli) DC motor

5.1.2 Aszinkron (indukciós) és szinkron motorok

Az aszinkron motor az egyik legelterjedtebb motor. Nagyobb teljesítmények elérésére háromfázisú motorokat használunk. Ezekben a három tekercsre kapcsolt háromfázisú áram egy forgó mágneses teret hoz létre. Ez a forgó mágneses tér a bele helyezett forgórészre, ami akár egy alumínium-henger is lehet, örvényáramot hoz létre, az örvényáram és a forgó mágneses tér közötti kölcsönhatásnak köszönhetően pedig egy állandó forgatónyomaték hat a forgórészre. A forgórész fordulatszáma mindig kisebb a tér forgási sebességénél, a különbséget pedig csúszásnak hívják.

A gyakorlatban nem egy egybeöntött hengert alkalmaznak, hanem kalickás forgórészt, mely javítja a motor tulajdonságait. Mivel a motor nem tartalmaz szénkeféket, így kicsi a karbantartási igénye.



5.3. ábra: A három fázisú motor működése közben fellépő mágneses tér iránya

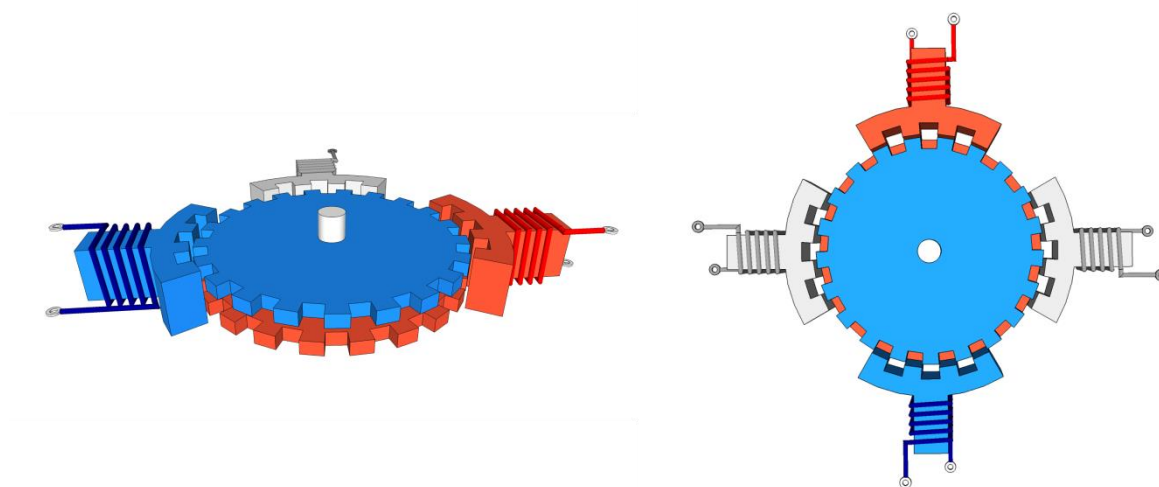
Az aszinkron motor fordulatszámát két fő módon lehet szabályozni. Az egyik megoldás a tápláló feszültség szabályozása, a feszültség csökkenésével nő a motor csúszása. Ennek a megoldásnak az a hátránya, hogy a csúszás növelésével nő a motor vesztesége, csökken a hatásfok. Sokkal hatékonyabb megoldás frekvenciaváltókkal megváltoztatni a tápláló feszültség frekvenciáját.

Háromfázisú motorok mellett vannak egyfázisú aszinkron motorok. Egyfázisú motorban egy pulzáló mágneses tér jön létre, mely képes fenntartani a forgórész forgását. A motor indításához segédtekercseket használnak fel.

A szinkronmotor forgórésze egy állandó vagy egy elektromágnes. Szinkron motor esetén a forgórész szinkronban forog a változó mágneses térrel. A gép fordulatszáma a hálózati feszültség fordulatszámától valamint a motor pólusainak számától függ.

5.1.3 Léptetőmotorok

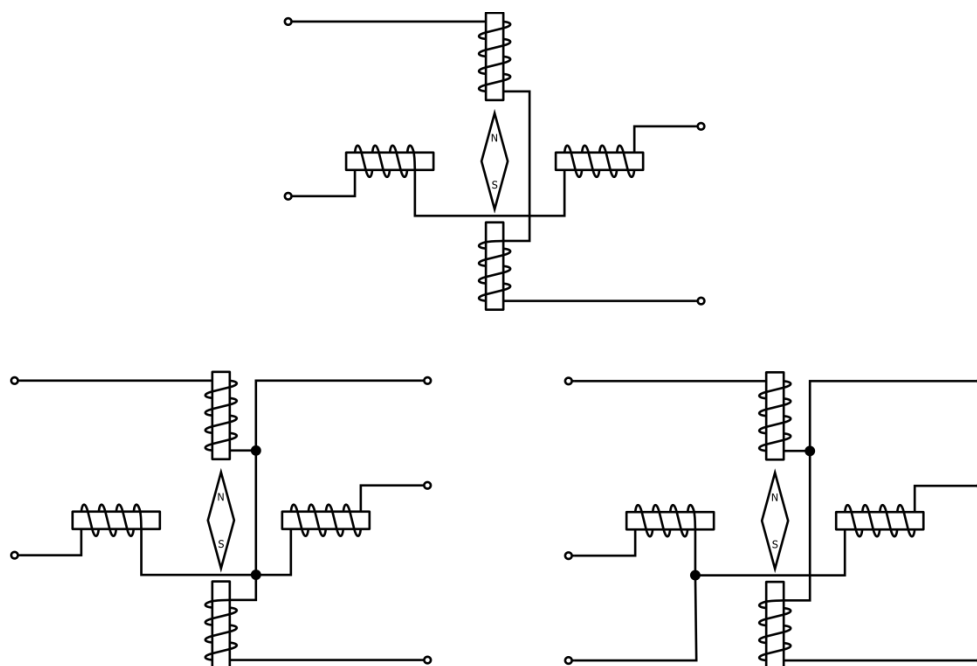
A léptetőmotorokban a forgó részre rögzített állandó mágnesekre lehet több elektromágnes segítségével megfelelő irányú erőt kifejteni. Az egyes tekercsekre megfelelő sorrendben feszültséget kapcsolva a forgó rész adott szögű lépésekben mozgatható. A motor tehát egy teljes körülfordulást adott számú lépésben tesz meg. Ezzel pontos pozicionálás végezhető a pozíció mérése nélkül is.



5.4. ábra: A léptetőmotor felépítése. A déli pólust késsel, az északi pólust pirossal jelöltük

A négy mozgatótekercsre többféle módon kapcsolhatunk feszültséget.

Egyrészt az elektromágneseket vezérelhetjük csak egyféle vagy kétféle polaritású feszültséggel, azaz unipoláris vagy bipoláris módban. Vezetékeztéstől függően a léptetőmotorok csak az egyik vagy akár mindkét módban használhatók.



5.5. ábra: A léptetőmotor vezetékezési módszerek 4, 5 és 6 vezeték felhasználásával

Az úgynevezett teljes lépéses üzemmód esetén egymás után sorrendben kapcsolunk feszültséget az elektromágnesekre, így a forgórész mindig úgy áll be, hogy az állandó mágnes a bekapcsolt elektromágnesnek megfelelő. Bipoláris vezérlés esetén két szemben levő tekercs is áramot kap, így nagyobb nyomaték érhető el.

lépés		1	2	3	4
unipoláris	A	1			
	B		1		
	C			1	
	D				1
bipoláris	A	P		N	
	B		P		N

A nyomaték unipoláris módban is növelhető, ha két szomszédos tekercsre kapcsolunk feszültséget. Ekkor az állandó mágnes a két szomszédos tekercs által külön-külön megadott pozíciók közé áll be, azaz egy féllépésnyivel eltolódik az eredeti pozícióhoz képest.

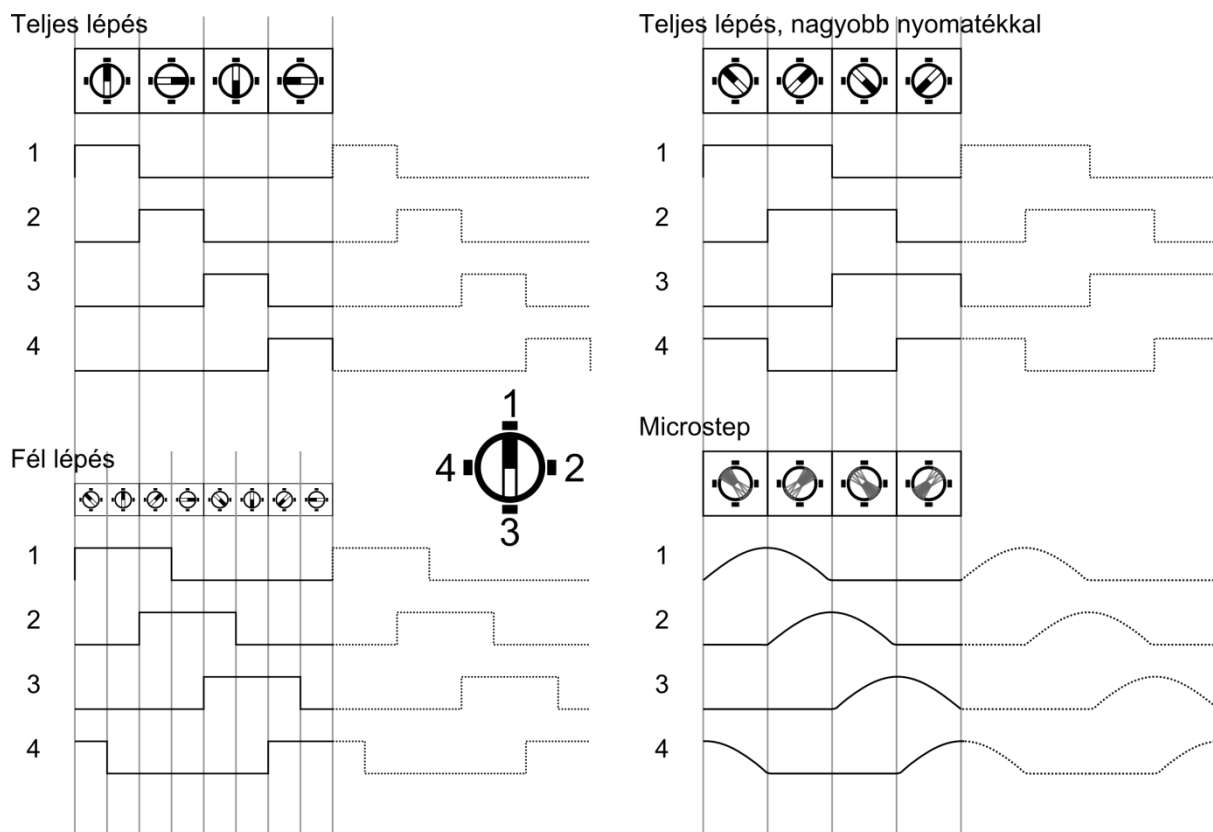
lépés		1	2	3	4
unipoláris	A	X			X

	B	X	X		
	C		X	X	
	D			X	X

A két mód kombinálásával féllépéses üzemmódot kapunk, azaz felezhetjük a lépésszöget. Ekkor tehát minden egész lépés közé a szomszédos tekercsek egyszerre gerjesztésével pozícionálhatunk.

lépés		1	2	3	4	5	6	7	8
unipoláris	A	X	X						X
	B		X	X	X				
	C				X	X	X		
	D						X	X	X
bipoláris	A	P	P		N	N	N		P
	B		P	P	P		N	N	N

Létezik úgynevezett microstep üzemmód is. Ekkor a tekercsek feszültségét nem egy lépésben változtatjuk meg, hanem folyamatosan csökkentjük illetve növeljük. Így egyrészt elérhető, hogy a motor futása sokkal simább legyen, a rázkódás csökkenjen. Másrészt jóval finomabb pozícionálást érhetünk el.

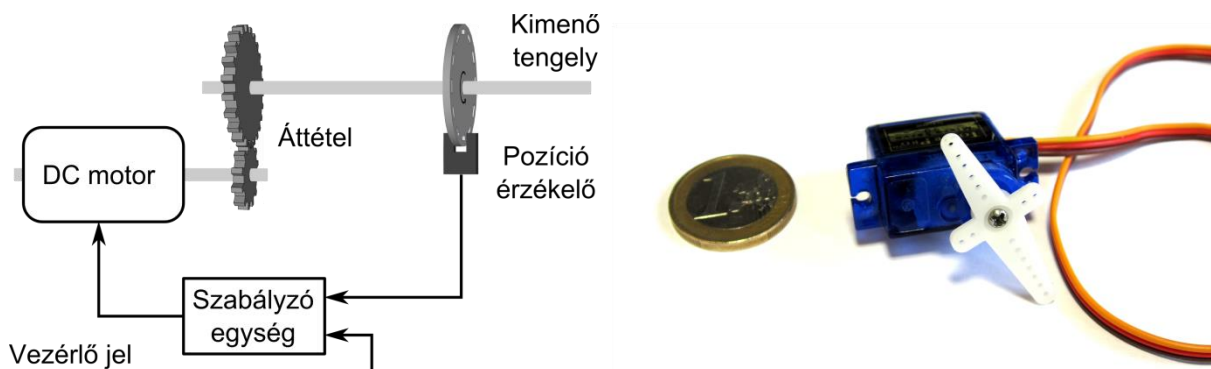


5.6. ábra: A léptetőmotor működésének szemléltetése különböző meghajtások esetén

Megjegyezzük, hogy a pozicionálást pontossága erősen függ a terheléstől, így a microstep mód visszacsatolás nélkül nem minden esetben biztosít megfelelő pontosságot. A mechanikai rendszerekben fellépő súrlódás és holtjáték miatt a pozicionálás pontosságát segítheti az is, ha egy adott állapotba mindig azonos irányból mozgatjuk a motort. Ha például M lépést balra forgatva kell megtenni, akkor léptethetünk balra $M+N$ lépést, majd jobbra N lépést. A végeredmény ugyanaz, mintha balra M léptetést tettünk volna meg, de csökkentjük a súrlódás és holtjáték hatását.

5.1.4 Szervomotorok

A szervomotorok egyfajta alternatívái a léptetőmotoroknak. A léptetőmotorok visszacsatolás nélkül (nyíltthurkú üzemmódban) alkalmasak elég pontos pozicionálásra, a szervomotoroknál a beépített elektronika a pozíciót érzékeli és ennek megfelelően a léptetőmotorokénál jóval nagyobb pontossággal lehet az elfordulási szöget beállítani.



5.7. ábra: Egyszerű, repülőgép-modellezésben is használt szervómotorok felépítése

A szervomotorok lehetnek DC vagy AC táplálásúak is, sokféle teljesítményben és méretben kaphatók.

5.1.5 Motorok összehasonlítása

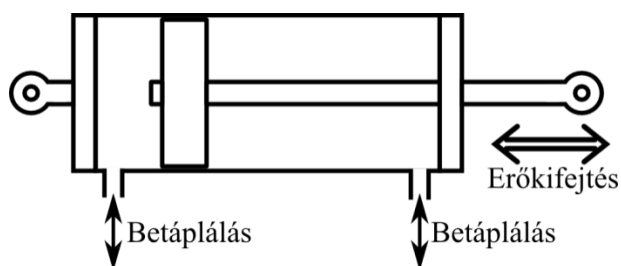
A következő táblázat foglalja össze a különböző motortípusok tulajdonságait:

Típus	Előnyök	Hátrányok	Alkalmazások
Szénkefés motorok	Egyszerű felépítés Egyszerű sebességszabályozás Nagy sebesség	Kopó szénkefék	Kisméretű motorok Egyszerű aktuátorok
Univerzális motorok	Nagy nyomaték Nagy sebesség	Kopó szénkefék Zajos	Háztartási eszközök Kéziszerszámok
Kefe nélküli motorok	Nagy hatásfok Hosszú élettartam Alacsony karbantartási igény	Vezérlőelektronika szükséges	Merevlemezek Ventillátorok Elektromos járművek RC járművek
Három fázisú aszinkron motorok	Alacsony ár Megbízható, robusztus	Nagy indítási áram Alacsony hatásfok	Ipari alkalmazások Ventillátorok Szivattyúk
Egyfázisú aszinkron motor	Alacsony ár Hosszú élettartam	Alacsony hatásfok	Közepes teljesítményű ipari és háztartási motorok
Szinkron motorok	Nagy hatásfok	Magasabb ár	Ipari motorok
Léptető motorok	Pontos pozicionálás Magas tartónyomaték	Költséges Vezérlőelektronika szükséges Lépést téveszthet nagy nyomatékok esetén	Pozicionálás Ipari megmunkáló eszközök
Servo motor	Pontos pozicionálás Nagy nyomaték	Költséges Vezérlőelektronika szükséges (Beépített) pozíciószenzor szükséges	Pozicionálás Ipari megmunkáló eszközök

5.2 Pneumatikus és hidraulikus aktuátorok

Mechanikai aktuátorok számára a teljesítményforrás nem feltétlen elektronikus. Nagyobb elmozdulások, nagyobb erő kifejtésére kiválóan alkalmasak a pneumatikus és hidraulikus munkahengerek, melyeknél nagy nyomású levegő vagy folyadék szabályozott ráengedésével lehet a henger felületére nyomást gyakorolni. A felülettől függően kis nyomás is nagy erő kifejtését teszi lehetővé.

A munkahenger olyan aktuátortípus, ami lineáris mozgássá alakítja a rákapcsolt közeg nyomását. Két fő változata létezik, melyeket az erőátvivő közeg alapján különböztethetünk meg: pneumatikus vagy hidraulikus munkahenger.



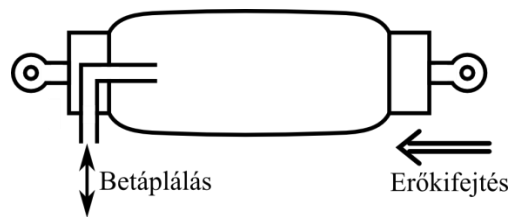
5.8. ábra: Munkahenger felépítése

A pneumatikus munkahenger működését általában sűrített levegő biztosítja, ritkább esetben más gáznemű anyag. A levegő összenyomhatósága, és gyorsabb áramlási sebessége miatt egyszerűen, ezért olcsón lehet gyártani. Dinamikus mozgásra képes, nagyságrendben 400 W/kg az egységnyi tömegre eső teljesítménye, míg az alkalmazott sűrített levegő nyomása jellemzően 10 bar körüli. A munkahengert két végén táplálva húzó és nyomóerő kifejtésére is alkalmas. Külső erőhatásokat képes tolerálni a sűrített levegő rugalmassága miatt. Alkalmazási területek: járművek fékberendezése és lengéscsillapítása, gyártósoron kisebb erőknél, pl. csomagolásnál, vonat ütközőjében.

A hidraulikus munkahenger működtetéséhez hidraulika folyadék, általában olaj pumpálása szükséges. Ellentétben a pneumatikus munkahengerekkel, a közeg áramlásának pillanatában megkezdődik a henger mozgása is, mivel a folyadékok összenyomhatósága elhanyagolható mértékű, így a henger nagyobb távolságról is megbízhatóan, pontosan üzemeltethető. Hátránya viszont, hogy a közeg jóval sűrűbb, így annak a tömegével és szinte teljes rugalmatlanságával is számolni kell felhasználáskor. Nagy a leadott teljesítménye, ami jól skálázható, jellemzően 2 kW/kg az egységnyi aktuátor tömeggel kifejtendő teljesítménye. A hidraulikus folyadék nyomása elérheti a több 100 bárt is, így nagy erőket igénylő alkalmazásoknál is használható, mint pl. fékek, emelők, prés gép, vagy földmunkagép. A keringetett folyadék nagy nyomását a csatlakozásoknak, csöveknek is el kell viselniük, így viszonylag drágának számítanak.

Mindkét munkahenger mozgásához szükség van a keringetett közeg magas nyomásának előállítására. Hidraulikus közeg szállítását szivattyúval, míg gáznemű közegek sűrítését kompresszorral végzik. A kompresszor alkalmazásakor ügyelni kell arra, hogy az összepréselt közeg hőmérséklete is jelentősen megnőhet, így szükség lehet utóhűtésre, továbbá a pneumatikus munkahengerek belső kenése miatt szükség lehet porlasztott olaj hozzáadására is.

A pneumatikus mesterséges izom alapvetően egy felfújható rugalmas csőből áll, ami felfúvódása során nagy erővel megrövidül.



5.9. ábra: Munkahenger felépítése

Felépítéséből adódóan csak összehúzódás során képes erőt kifejteni, így a szabadsági fokonként két aktuátorra van szükség, hasonlóan a biológiai izmokhoz. Teljesítmény-tömeg aránya eléri az 1 kW/kg értéket, így a munkahengerek valódi alternatívája lehet. Jellemzően 25%-os maximális összehúzódásra képes, de a nyugalmi állapotát követően az összehúzódás során folyamatosan gyengül.

Előnyös tulajdonságai:

- nagy erő/térfogat arány
- nagy erő/tömeg arány
- betáplált levegővel folytonosan szabályozható, ezért nincs belső súrlódás okozta "ugrás" mozgás közben
- érzéketlen a környezet szennyezésére, akár víz alatt is működtethető
- olcsón gyártható és üzemeltethető

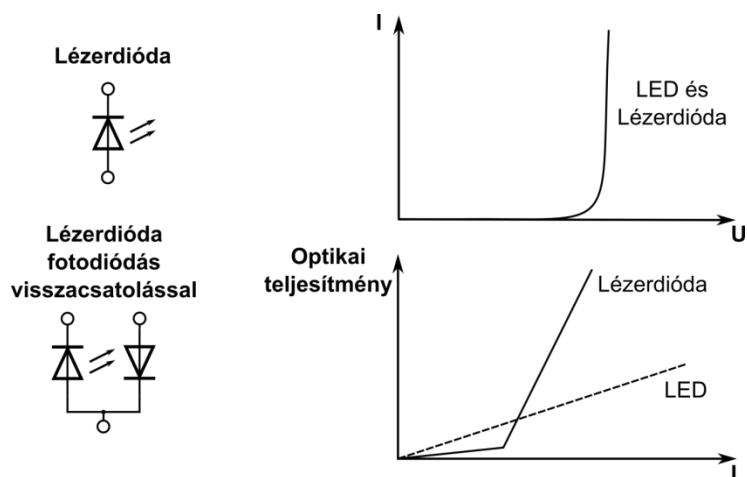
Hátrányos tulajdonságuk:

- Erősen nemlineáris viselkedés
- Histerézis jelensége az összehúzódás ütemében, valamint a tömlő öregedése miatt

Gyakori alkalmazási területe a robotikai kutatások, és számos ipari alkalmazásban is megállja a helyét, mint pl.: fékek működtetése, huzal csévézés, víz alatti rosta működtetése.

5.3 LED-ek, lézerdiódák

A mechatronikában gyakran alkalmaznak optikai aktuátorokat is, bár ezek funkciója inkább közvetett. LED-ek és lézerdiódák a rajtuk átfolyó elektromos áram hatására fényt bocsátanak ki. A keletkező fény intenzitása jó közelítéssel arányos az árammal. Lézerdiódák esetén a lézerfény egy küszöbáram felett keletkezik, alatta a dióda LED-ként viselkedik. Különböző hullámhosszú és intenzitású fény előállítására alkalmas diódák léteznek.



5.10. ábra: LED és lézerdióda áramköri jele, karakterisztikájuk

A LED-ek gyakran információt adnak a felhasználónak, a kezelőfelület részei. Használhatók optikai adatátvitelre is. A távirányítókban leggyakrabban infravörös LED-eket használnak.

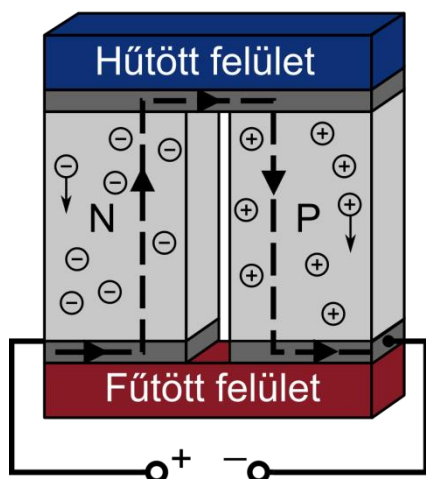
Ezek az aktuátorok részei lehetnek szenzormoduloknak, távolságérzékelőknek, fotokapuknak, fényzorompóknak is, ahol a visszavert vagy átjutó fény detektálása, intenzitásának mérése szolgáltatja az információt. A lézerfény alkalmas nagyfelbontású pozíciódetektálásra is, CD és DVD lemezekben levő rendkívül kisméretű elemek olvasását is lézerfény segíti.

5.4 Fűtőelemek, Peltier elemek

A hőmérséklet szabályozás gyakori feladat mechatronikai rendszerek esetén. Szükség lehet folyadékok hőmérsékletének növelésére, eszközök üzemi hőmérsékletének szabályozására is. Léteznek olyan mechanikai aktuátorok is, melyek a hőtágulás segítségével mozgatnak szelepeket.

A fűtés egyszerűen megoldható, mivel egy adott R ellenállású fűtőszálon átfolyó I áram $I^2 \cdot R$ hőteljesítményt hoz létre. A fűtőszál ellenállásának hőmérsékletfüggését ismerve ráadásul egyszerűen meghatározhatóvá is válik a szál hőmérséklete. A hűtést általában az alacsonyabb környezeti hőmérséklet biztosítja, amit ventilátorok segíthetnek. Hűtést folyadékok áramoltatásával és néhány komplexebb módszerrel is lehet végezni.

A Peltier-elem olyan termikus aktuátor, mellyel közvetlenül lehet elektromos áram hatására fűteni és hűteni is. A Peltier-elem lényegében egy speciálisan kiképzett termoelem, melyben nagy Seebeck-együtthatójú félvezetőt használnak. A Peltier-elem két oldalán a rajta átfolyó áram irányától függő előjelű hőmérsékletkülönbség alakul ki, tulajdonképpen árammal vezérelhető irányú és teljesítményű hőszivattyúként működik.



5.11. ábra: Peltier-elem működési elve és fényképe

Mivel a Peltier-elemnek van Ohmikus ellenállása is, ezért az önfűtését is figyelembe kell venni. A Peltier-elemek általában kisebb komponensek hőmérsékletének szabályozására, a környezeti hőmérséklet alá hűtésére használhatók.

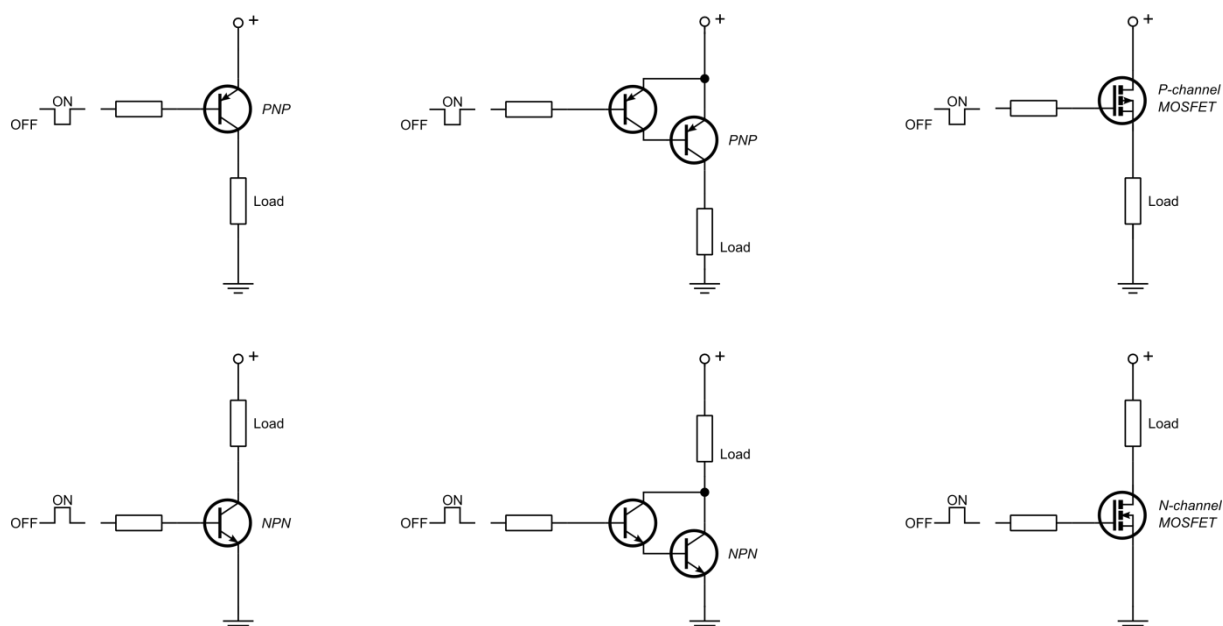
5.5 Az aktuátorok vezérlőjeleinek elektronikai kezelése

Az eszközöket vezérlő, szoftvert futtató egység természetesen nem képes komolyabb teljesítmény leadására, a legtöbb esetben nem tudja közvetlenül meghajtani az aktuátorokat. Egy mikrovezérlő kisebb teljesítményű LED meghajtására alkalmas, de még egy kis teljesítményű relé áramfelvétele is meghaladja a logikai kimeneten elérhető pár mA értéket. Komplettebb vezérlő egységek, például a PLC-k kimenete már nagyobb teljesítmény leadására is alkalmas, a pár száz mA áram meghajthat mágnesszelepeket, reléket, kisebb teljesítményű DC motorokat, léptetőmotorokat is.

Nagyobb teljesítményigényű aktuátorok csak meghajtóáramkörök közbeiktatásával kezelhetők. Az aktuátorok jelentős része kétállapotú jelekkel vezérelhető, azaz be vagy kikapcsolni lehet ezeket. Logikai kimenetekre tranzisztorokat kötve megfelelő nagyságú áram biztosítható.

5.5.1 Egyirányú áram kapcsolása

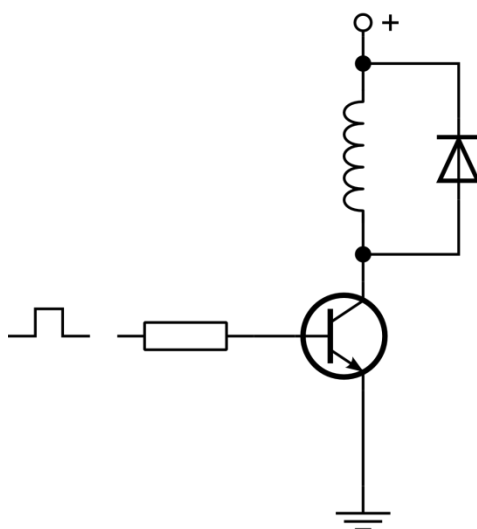
Ha az aktuátor csak egyirányú áramot igényel, akkor az ábrán látható kapcsolást használhatjuk.



5.12. ábra: Bipoláris, Darlington és MOSFET kapcsolók használata

Bipoláris tranzisztorok esetén tekintettel kell lenni az áramerősítési tényezőre, hiszen a logikai jel által kiadott árammal arányos a kapcsolt áram. Teljesítménytranzisztoroknál az arány 100 alatt van, ami a kapcsolt áramot pár száz mA érték alá korlátozza. Ezt a probléma Darlington kapcsolással oldható meg. Teljesítmény MOSFET-ek feszültséggel vezérelhetők, így a bemenetük meghajtása nem igényel jelentős áramot. Ugyanakkor gyors kapcsolások során a nagy bemeneti kapacitásuk feltöltése lassú lehet, ezért szoktak MOSFET meghajtó áramköröket is alkalmazni gyorsabb kapcsolások esetén. A meghajtók szükségesek lehetnek azért is, mert a MOSFET-ek megbízható kapcsolási küszöbfeszültsége meghaladhatja a vezérlő logikai jelszintet. Léteznek úgynevezett logikai bemenetű teljesítmény MOSFET-ek is, melyek már 3 V alatti vezérlőfeszültségnél is megfelelően nyitnak.

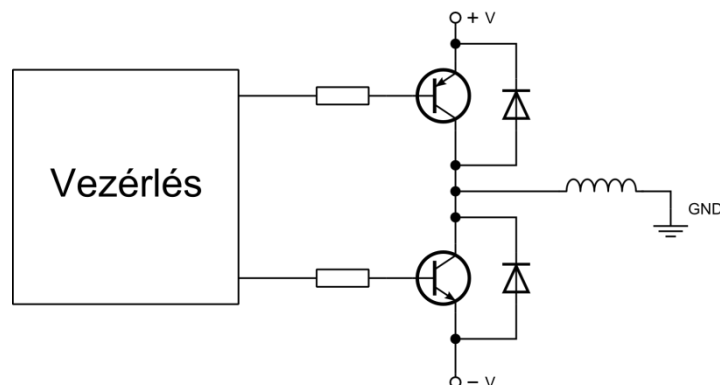
Induktív terhelés – például motorok, relék, szelepek – esetén a kapcsoló tranzisztorokat diódával kell megvédeni az áram kapcsolásakor fellépő nagy feszültséglökések ellen. A diódának elég gyorsnak kell lennie, el kell viselnie a tranziens áramot és feszültséget is.



5.13. ábra: Diódás védelem induktív terhesénél

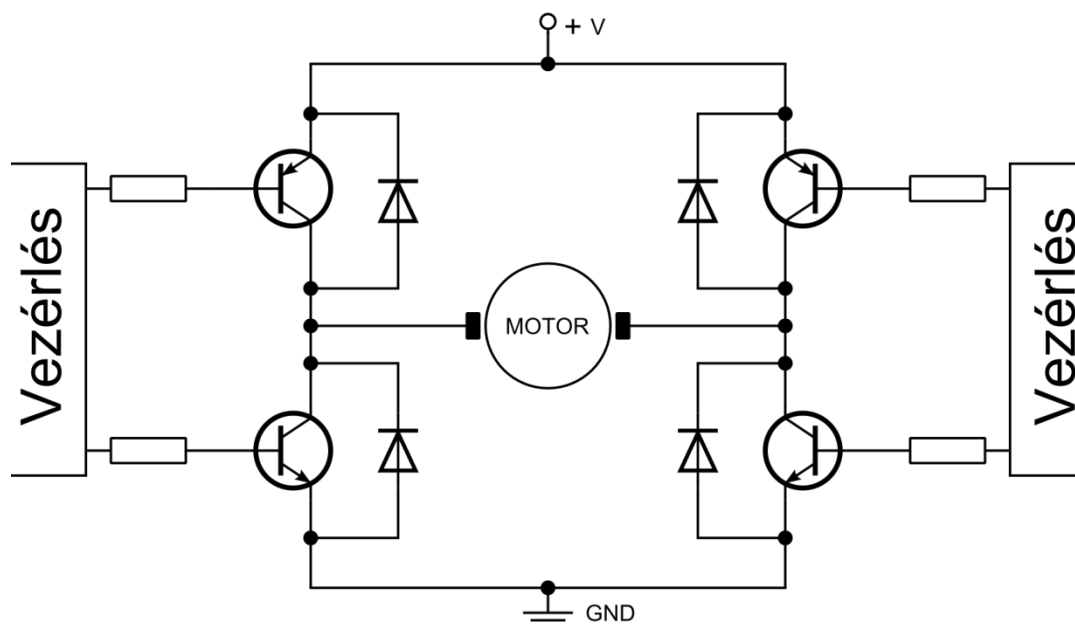
5.5.2 Kétirányú áram kapcsolása

Vannak olyan aktuátorok is, melyeknél mindkét áramirány szükséges. Ilyenek például a bipoláris léptetőmotorok és a Peltier-elem is. Ha pozitív és negatív tápfeszültség vagy a tápfeszültség középértéke rendelkezésre áll, akkor az úgynevezett félhíd kapcsolás használható.



5.14. ábra: Félhíd kapcsolás használata induktív terhelés esetén

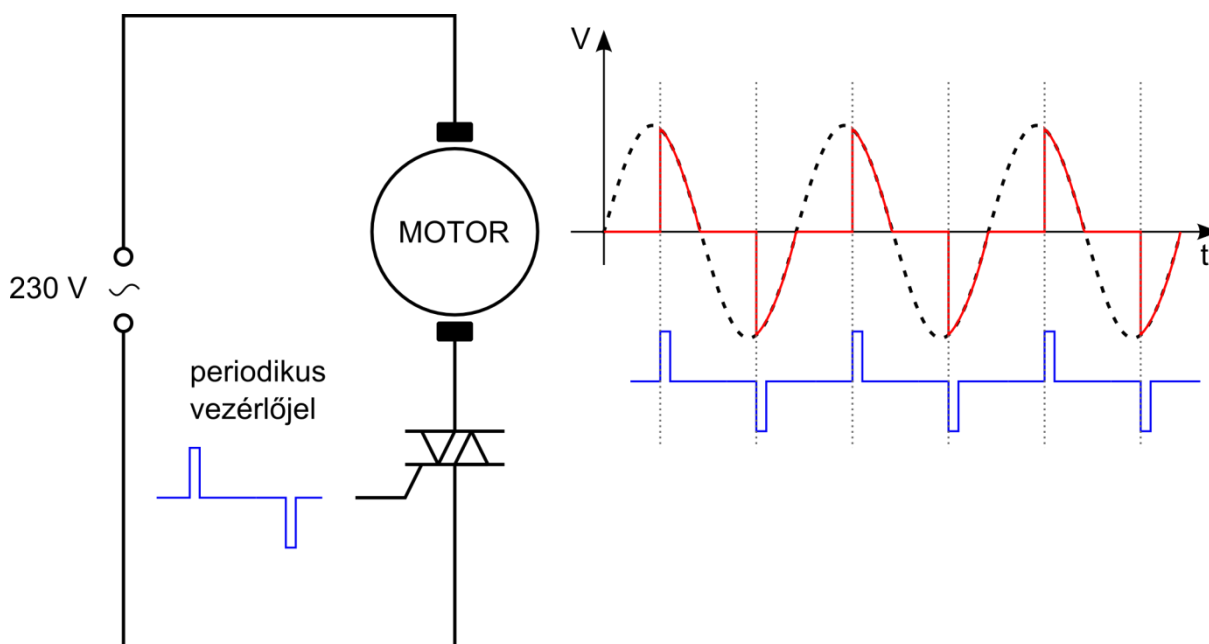
Gyakori azonban, hogy a rendszerben csak egy tápfeszültség van. Ekkor egy teljes híd kapcsolás segít az aktuátor megfelelő meghajtásában. A tranzisztorok megfelelő kapcsolásával mindkét áramirány biztosítható.



5.15. ábra: Motor kétirányú vezérlése teljes hídkapcsolással

5.5.3 Váltófeszültség kapcsolása

A hálózati 230V feszültség közvetlenül hajthat motorokat, eszközöket. Ennek a kapcsolását tipikusan triakkal szokás megoldani, ami a hálózati feszültség minden periódusában kapcsolva effektív teljesítményszabályozást tesz lehetővé.



5.16. ábra: Triakkal szabályozott teljesítmény és a hozzá tartozó jelalak

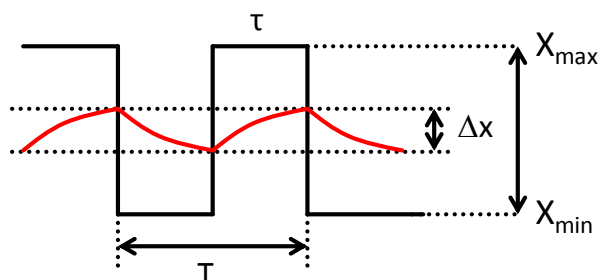
A kapcsolgatással megvalósítható teljesítményszabályozást a következő fejezet részletezi.

5.5.4 Áram és feszültség folyamatos vezérlése

Az aktuátorok egy része esetén nem elegendő két állapot. Feszültséget és áramot erősítővel lehet finoman is szabályozni, például egy D/A konverter kimenő feszültségét teljesítményerősítővel kiegészítve lehet aktuátort vezérelni. Ekkor azonban az erősítő komoly teljesítményt vehet fel, hűtést igényelhet, ráadásul D/A konverterre is szükség van ahhoz, hogy a digitális rendszer megfelelő analóg jelet állíthasson elő.

A mechanikai és termikus rendszerek reagálási sebessége messze lassabb az elektronikai rendszerekénél, így ezt ki lehet használni arra, hogy egy gyorsan váltakozó elektronikus gerjesztés egy átlagos gerjesztésnek feleljen meg a valós rendszer esetén. Így annak ellenére, hogy csak kétállapotú gerjesztéseket adhatunk, az effektív gerjesztés értéke a két szélső érték között szinte bárhol lehet. A váltófeszültség kacsolásánál is hasonló történik, ahogy az előző fejezetben ezt említettük.

A pulzusszélesség-moduláció (PWM) esetén egy periodikus kétállapotú jelet generálunk, melynek periódusideje állandó, viszont a kitöltési tényezője változtatható.



5.17. ábra: A PWM jel (fekete) és a PWM szűrése utáni jel (piros)

A PWM jel átlagértéke:

$$x \approx (x_{\max} - x_{\min}) \frac{\tau}{T} + x_{\min}$$

A periódusidőnek olyan rövidnek kell lennie, hogy ez alatt a gerjesztett rendszer állapota ne változhasson számottevően. Ha egy egypólusú átviteli függvénnyel leírható lineáris rendszert feltételezünk, akkor:

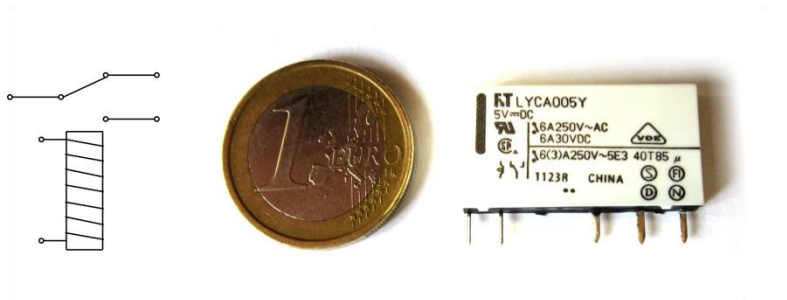
$$T < 4 \cdot \tau \cdot \frac{\Delta x}{x_{\max} - x_{\min}}$$

ahol Δx a megengedhető ingadozás mértéke, τ a rendszer időállandója, $x_{\min}$ és $x_{\max}$ a minimális és maximális gerjesztéshez tartozó értékek.

PWM gerjesztést használhatunk például motorok vezérlésénél, Peltier-elem meghajtásánál, LED-ek fényerejének változtatásánál, fűtőszál vezérlésénél is.

5.5.5 Relé, mágneskapcsoló

A relék (más néven jelfogók) és mágneskapcsolók nagyobb feszültségek és áramok kapcsolását végzik. A bemeneti a beépített elektromágnesű tekercsükre feszültséget kapcsolva viszonylag kis teljesítménnyel vezérelhetjük két vagy több kontaktus összekapcsolását vagy bontását. Léteznek gerjesztés nélkül nyitott (NO, normally open) vagy zárt (NC, normally closed) kapcsolók, melyek állapotát változtatja meg a gerjesztés alkalmazása. Olyan relék is léteznek, melyek billenő tulajdonságúak, azaz a gerjesztés átbillenti őket az egyik vagy másik állapotba, de gerjesztés nélkül megőrzik állapotukat.



5.18. ábra: Relé áramköri rajza és fényképe

A bemeneti tekercs vezérlőfeszültsége sokféle lehet, 5V, 12V, 24V vagy akár ezektől különböző is. Kisteljesítményű elektronikával közvetlenül általában nem vezérelhetők, mert a teljesítményfelvételük meghaladja például a mikrovezérlők vagy logikai áramkörök által leadható értéket. Ennek megfelelően logikai jelekkel egy relét tranzisztor közbeiktatásával vezérelhetünk. PLC-k viszont vezérelhetek közvetlenül is relét és mágneskapcsolókat, amennyiben ezek tekercse 24V feszültséggel működik.

A tranzisztorokhoz hasonlóan relét is használhatunk nagyobb áramok kapcsolására. Ebben az esetben hátrány a mechanikus kivitelből adódó rövidebb élettartam és megbízhatóság, nagyobb méret és költség, lassabb (ms-nál hosszabb) kapcsolási idő és az is, hogy a bemeneti tekercs

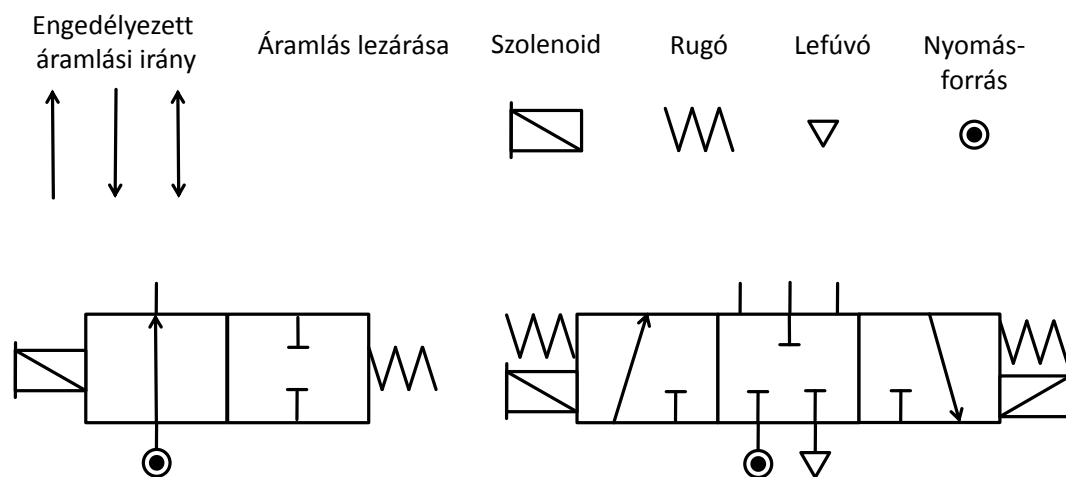
meghajtása sem végezhető közvetlenül. A relék mechanikai tulajdonságaik és kapcsolási idejük alapján sem alkalmasak PWM jelek előállítására.

Nagyobb feszültségek kapcsolásánál figyelni kell a kapcsolat pillanatában fellépő szikrák keletkezésére, ami a kontaktusokat károsíthatja. Ezt megfelelő kondenzátoros szűréssel védhetjük ki. Előny ugyanakkor a galvanikusan független üzemmód, nagyobb kapcsolási feszültségtartomány.

5.5.6 Mágnesszelepek, mágneses reteszek

A mágneskapcsolókhoz hasonló elven készíthetők mágnesszelepek is. Ebben az esetben az elektromágnes gáz vagy folyadék útját képes kinyitni vagy elzárni, így ezek áramlása vezérelhető. Az elektromágnes a szelepet mozgathatja közvetlenül vagy akár egy motor segítségével is, attól függően, mekkora elmozdulás szükséges. Folyadékok vagy nagyobb nyomású gázok esetén a mágnes gyakran a közeg nyomásának felhasználásával mozgat egy membránt, ami megnyitja az áramlást. Az elektromágnes csak annyit vezérel, hogy a közeg a membrán mindkét vagy csak egyik oldalára jusson, így a lényegében a nyomáskülönbség mozgatja a membránt. Ebben az esetben az áramlás iránya gyakran csak egyféle lehet, illetve csak adott minimális folyadéknomás megléte esetén nyit ki a szelep.

Vannak összetett szelepek, melyek több be- és kimenettel, valamint állapottal rendelkezhetnek. A szelepek estén a csatlakozások N számát és állapotok M számát szokás megadni N/M formában. A szelep működését szabványos jelöléssel szokták szemléltetni, ahol minden lehetséges állapothoz tartozik egy ábra, ami a járatok összekötését adja meg. A következő ábrán egy 2/2-es és egy 5/3-as szelep működésének leírása látható.



5.19. ábra: Mágnesszelepek leírására használt szimbólumok, és két szelep működési ábrája

A mágnesreteszek egy lemez, rúd mozgását végzik, ahol szintén két állapot létezik, zárt és nyitott. Elsősorban különböző zárok működtetésére használják.

5.6 Felhasznált irodalom

[5.1] Hevesi Imre: „Elektromosság”, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1998.

[5.2] Robert H. Bishop: “The Mechatronics Handbook Mechatronic systems, sensors, and actuators Fundamentals and Modeling”, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008.

[5.3] Forgó Zoltán: Bevezetés a mechatronikába, Erdelyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2009, ISBN 978-973-8231-80-1 elérhető: <http://mek.niif.hu/07300/07377/>

[5.4] U. Tietze, Ch Schenk: „Analóg és digitális áramkörök”, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1990.

[5.5] Walt Kester, “Practical Design Techniques For Sensor Signal Conditioning”, Analog Devices, Inc., 1999, elérhető: <http://www.analog.com/en/training-tutorials-seminars/resources/analog-to-digital-converters/ad-converters/index.html>

[5.6] Wikipedia: Actuator, elérhető: <http://en.wikipedia.org/wiki/Actuator>

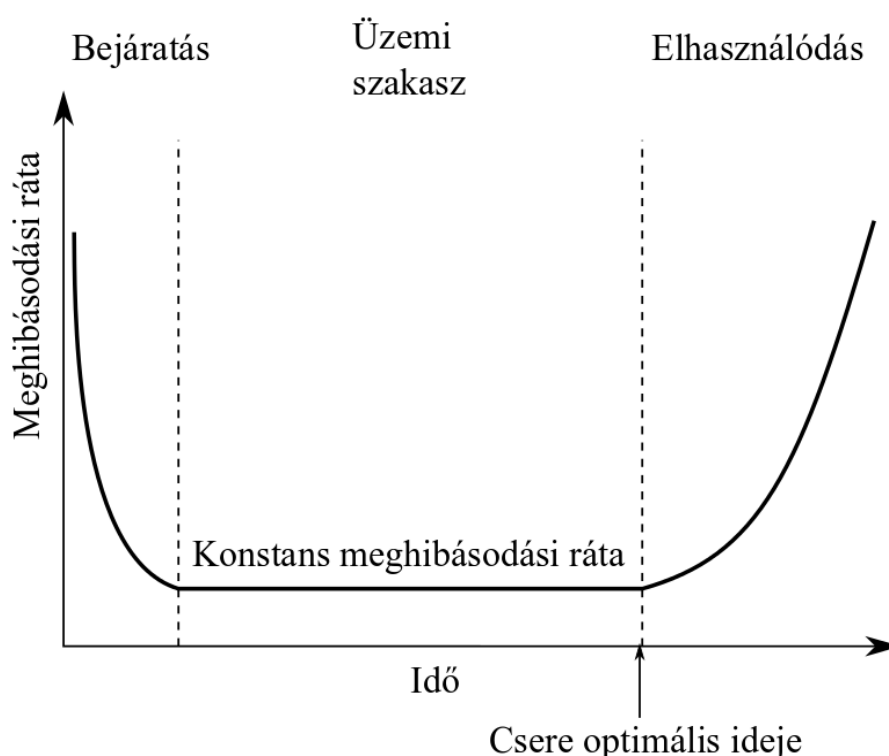
[5.7] Microchip: “Stepping Motor Fundamentals”, elérhető:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00907a.pdf>

[5.8] Hahn Emil, Harsányi Gábor, Lepsényi Imre, Mizsei János, „Érzékelők és beavatkozók”, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1999.

Új mechatronikai termék fejlesztésekor a megbízhatóságra különösen nagy hangsúlyt kell fektetni, ugyanis e termékek alkatrészeinek többsége kritikus funkcióval bír az egész termék működésében. A piaci igények ritkán engednek meg olyan redundancia betervezését, amivel a részben hibás termék az eredeti funkcióját azonos feltételek mellett hibásan is képes ellátni. Ez alól kivételt képeznek az olyan berendezések, melyek hibája közvetlen életveszélyt okozhat, mint pl. a repülőgép, vagy egy atomerőmű. Még ha nem is ennyire kritikus a tervezett rendszer, akkor is fontos kérdés, hogy az üzemi körülmények mellett várhatóan mennyi ideig fog működni. Egyszerűsített modellekkel a várható élettartammal kapcsolatos kérdésekre a megbízhatóság elmélet keresi a válaszokat.

6.1 Életciklus görbe

Az életciklus görbe egy rendszer meghibásodási rátájának változását mutatja az idő függvényében. Több hasznos paraméter is leolvasható róla, ami segíthet a termék felhasználásának és várható cseréjének ütemezésében is. A görbe meghatározását lehetséges a rendszerek üzemi körülményeikben, valódi élettartamuk során megfigyelve, vagy az úgynevezett gyorsított öregedés módszerével jóval rövidebb idő alatt elvégezni. Egy ilyen rendszerre jellemző karakterisztikájú életciklus görbét a 6.1.1. ábrán látható úgynevezett fürdőkad görbével lehet jellemezni.



6.1.1. ábra: Életciklus görbe

A görbe általában három, jól elkülöníthető tartományra osztható fel, melyek a bejárati, üzemi, és elhasználódási szakaszok. A legfontosabb a középső tartomány, amire jó közelítéssel konstans meghibásodási ráta jellemző. Amikor egy termék belép az elhasználódási fázisába, akkor célszerű lehet tervezetten kicserélni, mintsem megvárni, hogy egyre nagyobb valószínűséggel váratlanul tönkremenjen.

A bejáratás fázisában a termék gyártási hibáiból, pontatlanságából adódó hibák miatt a termék teljesítőképessége gyakran korlátozott. Egy új személyautó motorja ha nincs fokozatos terheléssel bejáratva, akkor előfordulhat, hogy a túl szorosra gyártott hengerben a dugattyú megszorul, de néhány ezer kilométer megtétele után az alkatrészek üzemi szintre kopnak, amitől a jármű megbízhatóbbá válik.

Ha lehetséges, akkor még a gyártási folyamat részeként bejáratott terméket veheti meg a felhasználó, így közel konstans megbízhatóságú termékhez jut. Különösen elektronikai termékek esetében azok tervezett élettartama végéig a meghibásodási ráta közel konstans marad. Amikor a meghibásodási ráta emelkedni kezd, akkor a célszerű lecserélni a terméket, ugyanis a termék ekkor eléri a hasznos élettartama végét. Sajnos az üzemi körülmények befolyásolhatják a konstans meghibásodási ráta időtartamát, egyúttal a csere optimális időzítését is.

Az életciklus utolsó fázisában az alkatrészek elhasználódása miatt a termék meghibásodási rátája folyamatosan növekedő tendenciát mutat. Ebben a fázisban a termék már túl van hasznos élettartamán, ezért hiába próbálják az előírt üzemi körülményeket fenntartani, a termék akkor is egyre nagyobb valószínűséggel fog elromlani.

Rendeltetésének megfelelően használt termék meghibásodása többnyire véletlen eseményként írható le. A meghibásodások valószínűségére a tesztek során talált hibák időbeli eloszlásának vizsgálatával következtethetünk. Bonyolultabb szerkezetek esetében a meghibásodási valószínűségek exponenciális eloszlást mutatnak.

A következő szekció azokat a fogalmakat, kifejezéseket és modelleket írja le, amelyekkel a megbízhatóság előrejelezhető vagy becsülhető. A témával kapcsolatos elnevezések és definíciók megtalálhatóak az MSZ IEC 50(191):1992 szabványban.

6.2 Definíciók és jelölések

Egy termék minősége alatt időfüggetlen tulajdonságot értünk, míg egy termék megbízhatósága az idő függvényében fejezhető ki. Minőségre vonatkozó kérdés úgy szól, hogy adott elemszámú termék között mennyi hibásat találunk, míg a megbízhatóságnál feltesszük, hogy adott üzemidő után végezzük el a vizsgálatot.

A megbízhatóság legáltalánosabban elfogadott definíciója: egy elem (termék, eszköz vagy rendszer stb.) képessége arra, hogy adott működési feltételek mellett adott (t) ideig rendeltetésszerűen működjön. Ezt a képességet valószínűséggel adhatjuk meg, jele: $R(t)$.

A meghibásodás valószínűségét, más néven a megbízhatatlanságot az $R(t)$ analógiájára definiálhatjuk: A megbízhatatlanság annak a valószínűségét adja meg, hogy egy eszköz adott (t) idő alatt mekkora eséllyel hibázik. Ezt $F(t)$ -vel jelöljük, és a következő egyenlőség teljesül rá:

$$R(t) + F(t) = 1$$

Egy új termék meghibásodási rátáját tapasztalati úton határozzák meg a következő közelítő képlet segítségével:

$$R'(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}$$

ahol N_0 az összes megfigyelt termék száma, $n(t)$ pedig a (t) idő alatt meghibásodott termékek száma.

Ez alapján a meghibásodás empirikus időfüggvénye a következőre egyszerűsíthető:

$$F'(t) = \frac{n(t)}{N_0}$$

Mechatronikai rendszereknek gyakran több éves, vagy évtizedes működési időt kell kibírniuk, viszont a tesztelésükre ennek az időnek csak a töredékét fordíthatják. Ilyen esetekben a gyorsított öregedés eljárását alkalmazzák, amikor a vizsgált terméket megnövelt hőmérséklet, oxigén, fény, és egyéb várható mechanikai vagy kémiai behatásoknak teszik ki. A fenti képleteket ez alapján gyorsított eljárással is alkalmazhatják, így az időtényezőt visszakorrigálva üzemi körülményekre is megbecsülhető a meghibásodási ráta.

Adott termék élettartamával kapcsolatos gyakori elnevezések és jelölések a termék javíthatósága szerint csoportosítható. Ez alapján megkülönböztetünk javítható, és nem javítható, avagy cserélhető termékeket.

Nem javítható rendszerek élettartamának vizsgálatakor a meghibásodott példányokat el kell távolítani, így a vizsgált rendszerek elemszáma idővel folyamatosan csökken. Ilyen rendszerek esetében beszélhetünk átlagos meghibásodási időről (MTTF – Mean Time To Fail), valamint átlagos meghibásodási rátáról (MFR – Mean Failure Rate).

Az átlagos meghibásodási idő megadja hogy mennyi a várható idő az eszköz meghibásodásig. Legyen T_i az i -edik hibáig tartó túlélési, vagy működési idő, N_f pedig az összes meghibásodott elemek száma a vizsgált T időtartam alatt, ekkor felírható:

$$MTTF = \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} T_i = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

Az előzőekben bevezetett jelöléseket felhasználva megadható az átlagos meghibásodási ráta, ami az átlagos meghibásodási idő reciprokaként számolható:

$$MFR = \frac{N_f}{\sum_{i=1}^{N_f} T_i}$$

Javítható rendszerek esetében feltételezzük, hogy hiba esetén a rendszer megjavítható, vagy kicserélhető. Ebben az esetben a meghibásodások közötti átlagos működési időnek (MTBF – Mean Time Between Failures) nevezzük az átlagos folyamatos üzemidőt, hasonlóan a nem javítható rendszerek MTTF értékéhez. Javítható rendszerek esetében a hiba bekövetkezésétől számított átlagos javítási idő (MDT – Mean Down Time) elteltével a rendszer újra üzemképessé válik.

Tapasztalati úton, egyszerre több rendszert vizsgálva állapíthatóak meg a minőséget leíró paraméterek. Ha N_0 javítható rendszert T ideig tesztelünk, és a j -edik hiba javításával töltött időt TD_j -vel jelöljük, és összesen N_f hiba fordult elő, akkor az átlagos javítási időt (MDT), a teljes üzemben töltött időt (TUT - Total Up Time) definiálva, az MTBF, és az MFR a következő formában fejezhető ki:

$$MDT = \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} TD_i$$

$$TUT = N_0 T - \sum_{i=1}^{N_f} TD_i$$

$$MTBF = \frac{N_0 T - N_f MDT}{N_f}$$

$$MFR = \frac{N_f}{N_0 T - N_f MDT} = \lambda$$

Egy eszköz hozzáférhetősége (A - availability) a vizsgált intervallum azon része, amelyben üzemi körülmények között rendeltetésének megfelelően működik. Ez alapján egy rendszer elérhetetlensége (U - unavailability) a vizsgált intervallum azon része, amelyben az eszköz javítás miatt nem üzemképes. A definíciók és összefüggésük a következőképpen adhatók meg.

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MDT}$$

$$U = \frac{MDT}{MTBF + MDT}$$

$$A + U = \frac{MTBF}{MTBF + MDT} + \frac{MDT}{MTBF + MDT} = 1$$

6.3 Konstans meghibásodási ráta modell

Számos nem javítható termék, mint amilyen az elektronikai komponensek életciklusát leíró kádgörbe modelljéből elegendő annak az első két szakasza a meghibásodási ráta időbeli változásának leírására. Ez azt jelenti, hogy ezen eszközök esetében a hibaarány a bejáratás során folyamatosan csökken egy konstans szintig, és sosem jelentkezik az elhasználódási szakaszra jellemző növekedés a hiba bekövetkezésének valószínűségében. A bejáratási szakasz hatékony minőség ellenőrzéssel, és teszteléssel gyakorlatilag kiküszöbölhető, így az eszköz hasznos élettartamára a konstans meghibásodási ráta lesz jellemző, aminek a jele: λ . Ha a meghibásodás valószínűségét exponenciális eloszlásfüggvénnyel modellezzük, akkor a megbízhatóság $R(t)$, a meghibásodás $F(t)$ valószínűségeket a következő módon írhatjuk fel:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

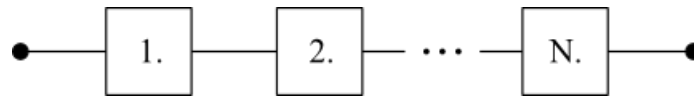
Az MTTF meghatározása így a következőre egyszerűsíthető:

$$MTTF = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

6.4 Összetett rendszerek megbízhatósága

A megbízhatóság elméletét a 19. században kezdték kidolgozni. Kezdetben életbiztosítások díjának megállapítására használták, ahol összetett rendszereket modelleztek segítségével. Az összetett rendszerek modelljei soros és párhuzamos alrendszerek kombinációira bonthatók fel, így a komplex rendszerek megbízhatósága is számszerűsíthetővé válik.

Összetett rendszerek olyan csoportját nevezzük **soros rendszernek**, ahol az elvégzendő feladat bizonyos részeit az alrendszerek egymás után végzik kötött sorrendben. Ily módon az i -edik alrendszer kimenete lesz az $(i+1)$ -edik alrendszer bemenete, ahogyan a 6.4.1. ábrán látható.



6.4.1. ábra: Soros rendszer

Minél több az összetevő, annál kevésbé lesz megbízható a teljes rendszer működése, ugyanis elég egyetlen komponens hibája ahhoz, hogy a lánc megszakadjon. Ezek alapján N összetevőjű soros rendszerek megbízhatóságát a következő képlettel fejezhetjük ki:

$$R_S(t) = \prod_{i=1}^N R_i(t)$$

Az R_i komponensek konstans meghibásodási rátáját feltételezve a teljes rendszer R_S meghibásodási rátája a következő módon vezethető le:

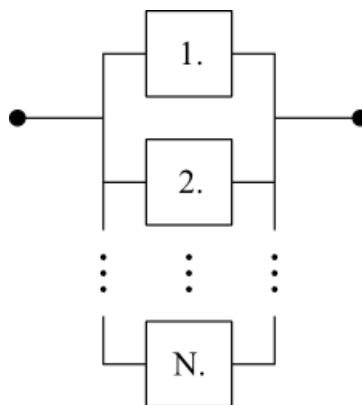
$$R_i(t) = e^{-\lambda_i t}$$

$$R_S(t) = \prod_{i=1}^N e^{-\lambda_i t} = e^{-(\lambda_1 t + \lambda_2 t + \dots + \lambda_N t)}$$

A teljes rendszer λ_S meghibásodási rátája ez alapján az összetevők rátáinak összegeként számolható:

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^N \lambda_i$$

Párhuzamos rendszerek nyújtotta redundanciával a megbízhatóságot javíthatjuk. A legegyszerűbb esetben elégséges egyetlen redundáns alrendszernek megfelelően működni ahhoz hogy a rendszer számára kitűzött feladatot ellássa, azaz a bemenetet az N darab komponens valamelyike a kimenetre továbbítsa, ahogyan a 7.4.2. ábrán látható.



6.4.2. ábra: Párhuzamos rendszer

Párhuzamos rendszereknél annak a valószínűsége, hogy az egész rendszer meghibásodik megegyezik az összes komponensének az együttes meghibásodásának valószínűségével, feltéve hogy a komponensek hibái egymástól független események. A következő formulával számítható egy N komponensből álló párhuzamos rendszer megbízhatósága:

$$R_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - R_i(t)]$$

6.5 Felhasznált irodalom

- [7.1.] Godfrey C. Onwubolu: „Mechatronics: Principles and Applications”, Elsevier Butterworth-Heinemann, Amsterdam, Boston, 2005
- [7.2.] Fazekas András István: „VILLAMOSENERGIA-RENDSZEREK RENDSZERSZINTŰ TERVEZÉSE – MEGBÍZHATÓSÁGELMÉLET”, Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2003, elérhető: http://www.fazekas-andras-istvan.hu/megbizhatosagelmeleti_alapismeretek_bme.php
- [7.3.] Békési Bertold: „A KATONAI REPÜLŐGÉPEK ÜZEMELTETÉSÉNEK, A KISZOLGÁLÁS KORSZERŰSÍTÉSÉNEK KÉRDÉSEI”, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, 2006

7 Ipari megmunkálók

Egyedi, kissorozatú, vagy bonyolult alkatrészek gyártását alapvetően kétféle megközelítéssel végezhetjük. Az első és egyben több évtizedes múlttal rendelkező módszer a forgácsolástechnika, amikor egy nagyobb alapanyag darabából addig távolítunk el részeket, amíg meg nem kapjuk a kívánt alkatrészt. Ezzel szemben létezik egy másik megközelítés is, ami az alapanyagból additív technikával közvetlenül formálja ki a kívánt formát, amit 3D nyomtatási technológiaként ismerünk, és elsősorban gyors prototípus készítéshez alkalmazzák.

7.1 Ipari megmunkálók fajtái, felépítésük

A leggyakrabban alkalmazott megmunkáló berendezések az eszterga, a marógép, és a megmunkálóközpont mellett újabban a 3D nyomtatási technológiák is egyre népszerűbbek. Ezek fontosabb tulajdonságaik következnek.

7.1.1 Eszterga

Az eszterga olyan forgácsoló gép, amivel forgástesteket lehet megmunkálni. Leggyakrabban megmunkált formák a tengely, persely, vagy tárcsa, illetve ezek fogazott, vagy menettel ellátott változatai. Esztergáláskor a munkadarab végzi a forgácsoló mozgást, az egyélű szerszám előtolásával pedig a leválasztott forgács keresztmetszetét lehet beállítani. A munkadarab forgatásával a főhajtómű, míg a szerszám által végzett előtolással a mellékajtómű együttes működése teszi lehetővé az összetett megmunkálást.

7.1.2 Marógép

A marógép olyan gép, amely képes egy, vagy többélű forgácsolás végzésére is. Minden esetben a szerszám végzi a forgácsoló mozgást, az előtolást pedig vagy a síkban mozgatott munkadarab, vagy azt is a szerszám végzi. Alapvetően kétféle eljárása van: a palástmarás és a homlokmarás. Palástmarás esetében a marótengely párhuzamos a megmunkálandó felületre, így ezzel sík felületeket, hornyokat lehet készíteni. Homlokmarás esetében a marótengely merőleges a megmunkáló felületére, így gömbvégű szerszám segítségével akár íves felszínt is lehet készíteni.

7.1.3 Megmunkálóközpont

Mind esztergáláshoz, mind pedig maráshoz léteznek ún. megmunkálóközpontok, amik képesek egy munkadarab egyetlen befogásával több különböző megmunkálást is elvégezni.

Egyetlen esztergaközpont képes elvégezni az esztergálást, fúrást, horonymarást, és menetmarást is anélkül hogy közben a munkadarabot újra kellene rögzíteni. A különböző forgácsolási műveletekhez a szerszámcsere automatikusan végzik, így a megmunkálás pontossága és a megmunkálási idő is nagymértékben javítható.

7.1.4 3D nyomtató

A 3D nyomtatás olyan berendezés, amivel ún. additív gyártástechnológia végezhető. A lényege, hogy képes 3D modellből szilárd objektumot létrehozni. Az additív eljárás lényege, hogy az alapanyagot több egymásra helyezett rétegben viszi fel különböző formában, így kis szeletek összeolvasztásával

jutunk a kívánt objektumhoz.

Az első működő 3D nyomtatót 1984-ben készítették, de igazán nagy érdeklődést a 21. században kapott a termék. Napjainkban már létezik olyan nyomtató is, ami képes közel 2 köbméteres tárgyakat is nyomtatni, de használnak olyan gépet is, ami nem polimer anyagot, hanem fémeket is képes nyomtatni rétegelt eljárással.

7.2 CNC gépek

A CNC (Computer Numerical Control) olyan szerszámgép, amely vezérlését programozható számítógép végzi, míg közvetlen elődjét az NC (Numerical Control) gépet rögzített logikájú elektronika hajtotta meg.

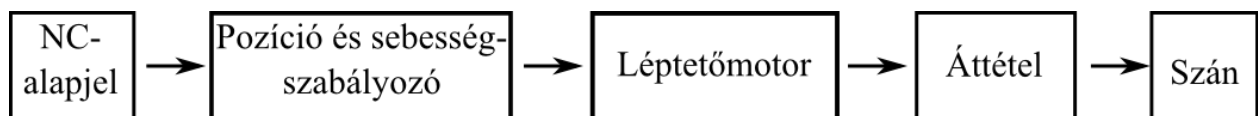
A kézzel működtetett marógépek használatakor az egyes műveletek között jelentős időt kellett tölteni az előkészületekkel, mint pl: berajzolás, szerszámváltás, vagy az előtolás beállítása. A számítógépes vezérléssel jelentősen le lehetett csökkenteni a megmunkáláshoz szükséges időt, miközben a munkadarabok megmunkálási pontossága is megnő. Mivel a tengelyeket számítógép vezérli, így a CNC gépeken olyan megmunkálási műveletek is elvégezhetők, amik nem egyenes menti mozgásból, hanem tetszőleges görbéből is állhatnak.

A gépekbe épített programozási felületet a CNC gyártója fejleszti, ami figyelembe véve a megmunkálók egyedi képességeit, legfeljebb adott gyártón belül mutat kompatibilitást. A kezelőfelület így gépről gépre változik, vele együtt a megmunkáló berendezés belső funkciói is eltérhetnek, mint amilyenek a belső kompenzációs műveletek (pl: holtjáték és hődeformációs kompenzációk), vagy biztonsági és állapotjelző funkciók.

Felépítésük a kézi működtetésű gépekhez hasonló, de a nagyobb termelékenység miatt jellemzően burkolattal látják el a gépet, ami véd a nagyobb sebességű forgácsleválasztás és a nagyobb mennyiségben használt hűtőanyag kicsapódásától is.

7.2.1 CNC gépek szerkezete, alapfogalmak

Egy tipikus gépi megmunkáló elvi felépítése a 7.2.1.1. ábrán látható. A konkrét megvalósítás során bizonyos funkciókat ugyanaz a hardver is képes ellátni, így nem biztos hogy minden részegység külön hardveres implementációt is takar.



7.2.1.1. ábra CNC elvi vázlata

Az olcsóbb, kis sorozatszámú gyártásra tervezett CNC gépek nem rendelkeznek visszacsatolással, mindaddig pontosan működnek, amíg valamilyen zavar nem keletkezik a villamos hálózatban, vagy a megmunkálás során nem lépik túl a maximális nyomatékot. Nagyobb teljesítményű professzionális gépeknél azonban visszacsatolást is alkalmaznak, amit vagy a léptetőmotorról, vagy közvetlenül a szánról útdő segítségével állítanak elő, így a felmerülő pontatlanságot a pozíció és sebességszabályozó egység azonnal korrigálja. Egy korszerű CNC gép működési menete és a fontosabb komponensei következnek.

A CNC működését alapvetően meghatározó program a g-kód, mely kétféle forrásból származhat. Az egyik esetben a vezérlő számítógéphez csatlakoztatott valamilyen adathordozón, kezdetleges NC

gépeknél lyukszalagokon, de manapság inkább pendrive-on tárolódnak a kódok. Lehetőség van hálózatba kötött gépeknél külső számítógépről futás közben betölteni a szükséges kódokat is, ilyenkor akár hatalmas programszekvenciákat is le tud futtatni a megmunkáló. Külső tárból futás közben betöltött programot végrehajtó megmunkálókat DNC (Distributed Numerical Control) rendszereknek nevezzük. A központosítás előnye azon túl, hogy jóval hosszabb kódok is futtathatóak az, hogy a futás során diagnosztikai információt lehet gyűjteni az összekapcsolt gépekről, illetve a folyamatok összehangolásával termelésirányítási műveletek is megvalósíthatóak.

A betöltött g-kódot az NC interpreter, avagy mondatelőkészítő egység dolgozza fel, aminek feladata a G programkód szintaxisának ellenőrzése, és az esetleges makró függvények kifejtése. A feldolgozás eredménye először átmeneti puffer-tárolóba, onnan pedig a PLC vezérlő és az interpolátor bemenetére kerül.

A PLC vezérlő feladata az adott gépre írt program kompenzációs utasításai, a kezelőfelület bemenetei, szenzorok és jeladók jelei és az NC interpreter által küldött információk alapján az aktuátorok vezérlése. Segítségével lehetséges szerszámcsere, vagy a munkadarab cseréjét is elvégezni, de a biztonsági funkciókért is felelős, pl: leállítja a program végrehajtását, ha kinyílik a munkaterület vagy a vezérlőszekrény ajtaja.

A szerszámgép hardverén valós időben fut az interpolátor, aminek feladata a tengelyek vezérléséhez szükséges pozíció értékek folyamatos generálása a kívánt gyorsítások és lassítások és az elérendő végpontok alapján. Képes az alapvető lineáris, kör-menti, valamint spline interpolációra is. A gép paramétereinek alapján megszabott sebességgel a kimenetein előállnak az aktuálisan követendő pozíciók minden vezérelt tengelyre.

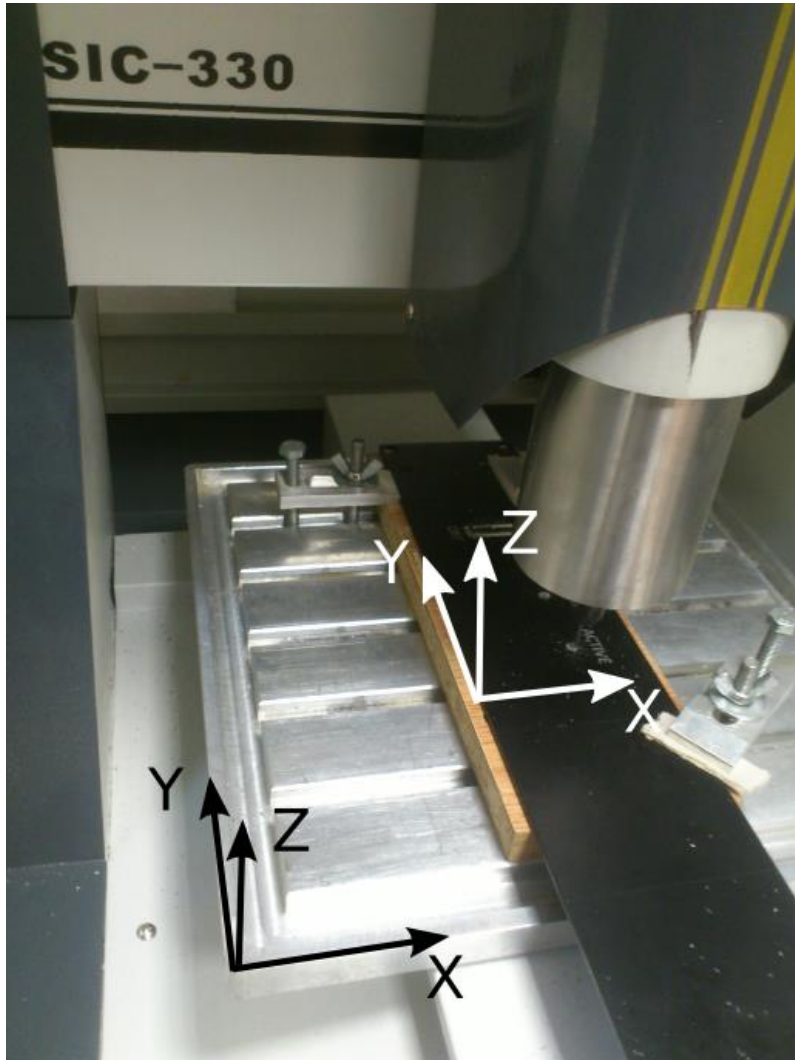
A kiszámított, vagy az enkóderekből mért aktuális pozíció, valamint az interpolátor által tervezett pozíció jele alapján digitális vagy analóg beavatkozó jel előállítását a sebességszabályozó végzi a meghajtás számára. A meghajtóelektronika ez alapján módosítja a szánt mozgató motorok lépésszekvenciáit.

A szánok által megtett elmozdulást közvetlenül útmérővel, vagy közvetve a golyósorsón enkóder segítségével mérve a sebességszabályozóba visszacsatolva megbízható pozicionálást kapunk. Általában relatív elmozdulást mérnek, abszolút pozícióhoz a gép inicializálása során referenciapontot kell felvenni. A referenciapontot az origóba helyezett kapcsolók szolgáltatják, amiket bekapcsoláskor az alapállapotba irányított szánok aktiválódnak, majd kis sebességgel deaktiválódnak, így jut a gép pontos abszolút kezdőkoordinátákhoz.

A megmunkálás módja szerint megkülönböztethetünk 2D, 3D és 2,5D típusú megmunkálásokat. Ha a maráshoz három tengely egyidejű mozgására van szükség, akkor tiszta 3D, míg ha egyszerre két tengelyt kell csak mozgatni, akkor 2D megmunkálást végzünk. Speciális eset, amikor egyszerre csak két tengely mozog, de munkafázisok közötti átmenet miatt a művelethez szükséges a harmadik tengely önálló működtetése is, akkor 2.5D avagy teraszos megmunkálást végez a gép. Léteznek olyan megmunkálók is, melyeknek több mint három szabadsági fokuk van, így összetett munkadarabok belső megmunkálást is képesek végezni. Gyakori, hogy a negyedik tengely a munkadarabot forgatja, így lehetséges forgástesteken homlokmarást végezni, egyúttal lyukakat vagy hornyokat marni bele egyetlen befogási lépésben.

Az egyes tengelyek betűjele szabványokban rögzített (MSZ 7789, ISO/R 841, DIN 66217). Az elsődleges és leggyakrabban használt mozgásokat az X, Y, Z a másodlagosakat U, V, W és a

harmadlagosakat a P, Q, R betűkkel jelöljük. Forgásokat az X tengely körül A, Y körül B, Z körül C betűvel jelöljük. Pozitív X, Y, Z irányokból az origó felé nézve a forgások iránya az óramutató járásával ellentétes irányban nőnek. A szerszámtengely a Z tengelyen van, értéke a munkalaptól távolodva nő. A legfontosabb koordinátarendszerek a gépi (fekete) és a munka (fehér) referenciákhoz tartoznak, melyek a 7.2.1.2 ábrán láthatók.



7.2.1.2. ábra CNC gépi és munka referencia koordinátarendszere

A CNC gépbe befogható maró szerszámok széles választéka érhető el aszerint, hogy milyen anyagot és milyen technikával kell forgácsolni. Keményebb alapanyagok, mint fémek megmunkálásához általában kevesebb (1-3) élszámú szerszámot használnak. Üvegszálak anyagok esetében, mint amilyen a nyomtatott áramkörök hordozó anyaga a többélű szerszámokat alkalmazzák. Forgácsolás közben jelentős mennyiségű hő keletkezhet, ami a munkadarab vagy a szerszám deformációjához vezethet, így megfelelő hűtésről is gondoskodni kell. Fa, néhány műanyag valamint kis előtolás mellett alumínium esetén alkalmazható a sűrített levegős hűtés, de acél forgácsolásakor inkább folyadék-hűtést alkalmaznak. A hűtőfolyadék nem oxidálhatja el a munkadarabot, így csapvíz helyett inkább olajat, hőre lágyuló műanyagok esetében pedig alkoholt használnak hűtőközegnek, ami a párolgásával is hőt von el. Nagy mennyiségű hűtőfolyadékot a munkalapról tárolóba gyűjtik, majd szűrés után újrafelhasználják.

7.2.2 G-kód alapjai

Az NC és CNC gépek programozásához használt nyelvre általánosan elterjedt elnevezés a G-kód, avagy G programozási nyelv. Ennek segítségével lehet megadni egy gépi megmunkálónak, hogy milyen munkafázist és hogyan végezzen el a munkadarabon. A munka specifikációjához hozzá tartoznak olyan paraméterek, mint hova mozogjon a szerszám, milyen gyorsan mozogjon, és milyen útvonalon végezze a mozgást. A kódot egyszerűbb formáknál kézzel is meg lehet írni, de ha összetett 3D formákat kell előállítani, akkor az úgynevezett Computer Aided Manufacturing (CAM) szoftverek segítségével a tervezett geometriából le is lehet generálni azt. A kód alapján a gép általában valamilyen forgácsoló szerszámmal végzi el a kívánt megmunkálást, amely forgása közben kialakítja a munkadarab felületének egy részét. A szerszám ezen kívül lehet gravírtű is, amivel feliratot lehet karcolni a munkadarabra, de lehetséges mérőfejet is rögzíteni, aminek a jelzésével a munkadarab pozíciója, mérete is meghatározható.

A G programnyelvre vonatkozó szabványt az ISO-6983 [7.4.] rögzíti, bár a gyártók eltérhetnek bizonyos egyedi parancsokkal, vagy a szabvány nem teljes implementációjával attól. A program szintaxisa azonban egységes. Minden kódsor egyetlen mondatot tartalmaz, mely alfanumerikus karaktereket tartalmaz. A mondatok utasításokból, másnéven szavakból állnak. A szavak két részből: címből és adatból állnak. A cím általában egy karakter, míg az adat numerikus érték, melynek lehet egész, és tizedes értéke, vagy előjele is. A G-kód egy tipikus mondatának lehetséges összetevői az alábbi táblázatban látható.

Kód	N1	G90	G00	X40	Y50	S100	M03
Jelentés	Mondat-szám	Abszolút koordinátás pozícionálás	Gyorsmenetes pozícionálás	X legyen 40	Y legyen 50	Főorsó sebessége 100	Főorsó be

A mondat mindig a mondat számmal kezdődik, ezt követő a szavak sorrendjében először az előkészítő funkciók, mint pl koordináta megadási módszer, vagy mozgás típusát befolyásoló szavak, majd a mozgási paraméterek, mint amilyen az érintendő koordináták következnek. A mondat végén vannak a technológiai paraméterek, mint amilyen a főorsó sebességét beállító paraméter, illetve a főorsó motorjának bekapcsolását vezérlő gépi kód.

A kézzel írt kódban gyakran használt címek és jelentésük a következő táblázatban olvasható:

Program cím	Jelentés
N	Mondatszám
G	Előkészítő funkciók (lásd függelék)
X,Y,Z	Koordináta változók (gép kiépítésétől és a kiadott parancstól függően használhatók az X, Y és Z paramétereken felül az U,V,W,P,Q,R,A,B,C,D,E is)

I,J,K	Interpolációs adatok (például kör középpont megadása)
F	Előtolás szabályozása
S	Fordulatszám megadása
T	Szerszámszám automata szerszámcserekor
M	Kiegészítő funkciók (lásd függelék)
O	Programszám

Más programnyelvekhez hasonlóan a kézzel írt G-kódban is hasznos a kód sorait kommentekkel ellátni. Ilyen kommentekben megadható az aktuális mondat funkciója, de megadható vele a programozó neve, vagy a készítés ideje. A kommentezés az értelmező implementációjától függően egy “;” után, vagy “(” és “)” jelek közé lehet írni a kódlapkezelés problémáját elkerülve lehetőleg angol nyelven.

Mind kézzel írt, mind pedig a generált g-kódot érdemes szimulátorral lefuttatni, mielőtt a megmunkálóra kerül a kód. Ingyenesen letölthető A LinuxCNC [8.5.] szimulátora, amit valós idejű kernellel készült Ubuntu operációs rendszerrel együtt lehet letölteni boot-olható CD képként [7.9], így telepíteni sem kell. A szimulátor akár valódi megmunkáló vezérlését is el tudja látni.

Egy 20x20mm négyzet kimarására írt példa következik soronként kommentezett magyarázattal és fényképes illusztrálással. Ilyen megmunkálásra gyakran van szükség egyedi műszerek csatlakozóinak elkészítésénél, mint például egy USB bemenet kimarása a dobozolás hátlapján.

%

```

N1  G0 G90                (Rapid positioning in absolute mode)
N2  X10 Y10 S100 M3       (Move to X=10, Y=10, spindle 100)
N3  Z0                    (Move to Z=0)
N4  G1 Z-10 F100          (Linear interpolation to Z=-10, Feedrate=100)
N5  X-10                  (Move to X=-10)
N6  Y-10                  (Move to Y=-10)
N7  X10                   (Move to X=10)
N8  Y10                   (Move to Y=10)
N9  G0 Z40                (Rapid positioning to Z=40)
N10 M30                   (Turn off spindle and program end)

```

%

A kód % jellel kezdődik és azzal is ér véget az utolsó mondat után. Az első mondat első szava rögzíti az

abszolút pozícionálást, a második beállítja a gyors mozgatót, de a gép mozdulatlan marad, ahogyan a 7.2.2.1. ábra mutatja.



7.2.2.1. ábra: Szerszám a munkadarab origójában

A második mondat az X és Y tengelyek mentén megadott pozícionálással kezdődik, majd a főorsó forgási sebességének beállításával, és a főorsó motorjának bekapcsolásával záródik.

A harmadik mondat hatására még mindig gyors mozgatóval a Z tengelyen a szerszám megközelíti a munkadarabot. A 7.2.2.2. ábrán látható a gép állapota, miután lefuttatta a harmadik mondatot.



7.2.2.2. ábra: Bekapcsolt főorsóval megközelített munkadarab

Negyedik mondat lineáris interpolációs módban, megadott előtolás mellett a forgó szerszámot az anyagba engedi a Z tengely mentén, ahogyan a 7.2.2.3. ábrán látható.



7.2.2.3. ábra: A szerszám eléri a marási mélységet

Az ötödiktől a nyolcadik mondatok a marás útvonalát definiálják a kiindulási $X=10$, $Y=10$ pozícióból először az X majd az Y tengelyen haladva a negatív irányban, ezt követően a újra az X, végül pedig az Y tengelyek mentén pozitív irányba zárva a négyzetes útvonalat. A 7.2.2.4. ábrán látható az 5., 6., 7., és 8. mondatok hatása.



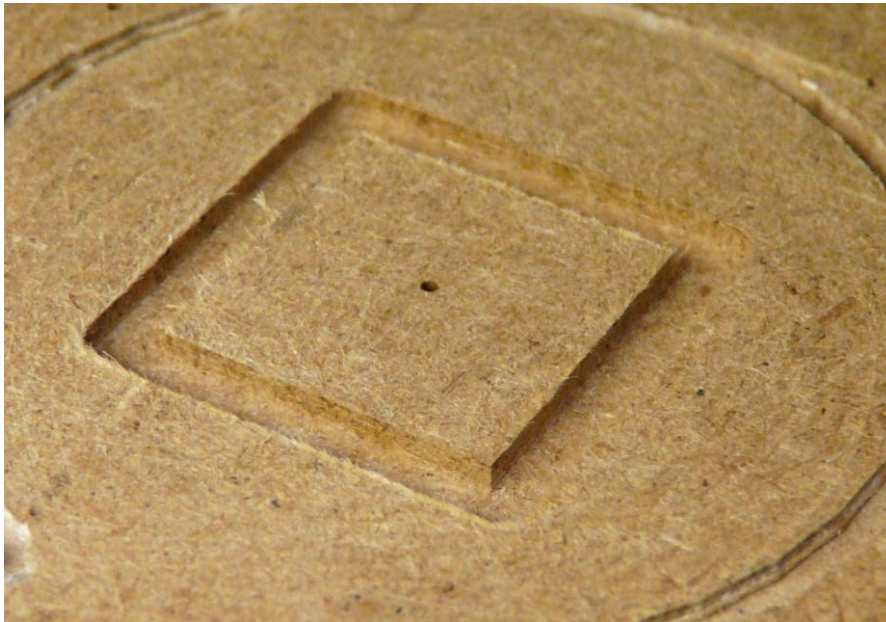
7.2.2.4. ábra: Szerszám mozgatása a munkadarabban

A kilencedik mondat gyors pozícionálással kiemeli a szerszámot a munkadarabból, ahogyan a 7.2.2.5. ábrán látható.



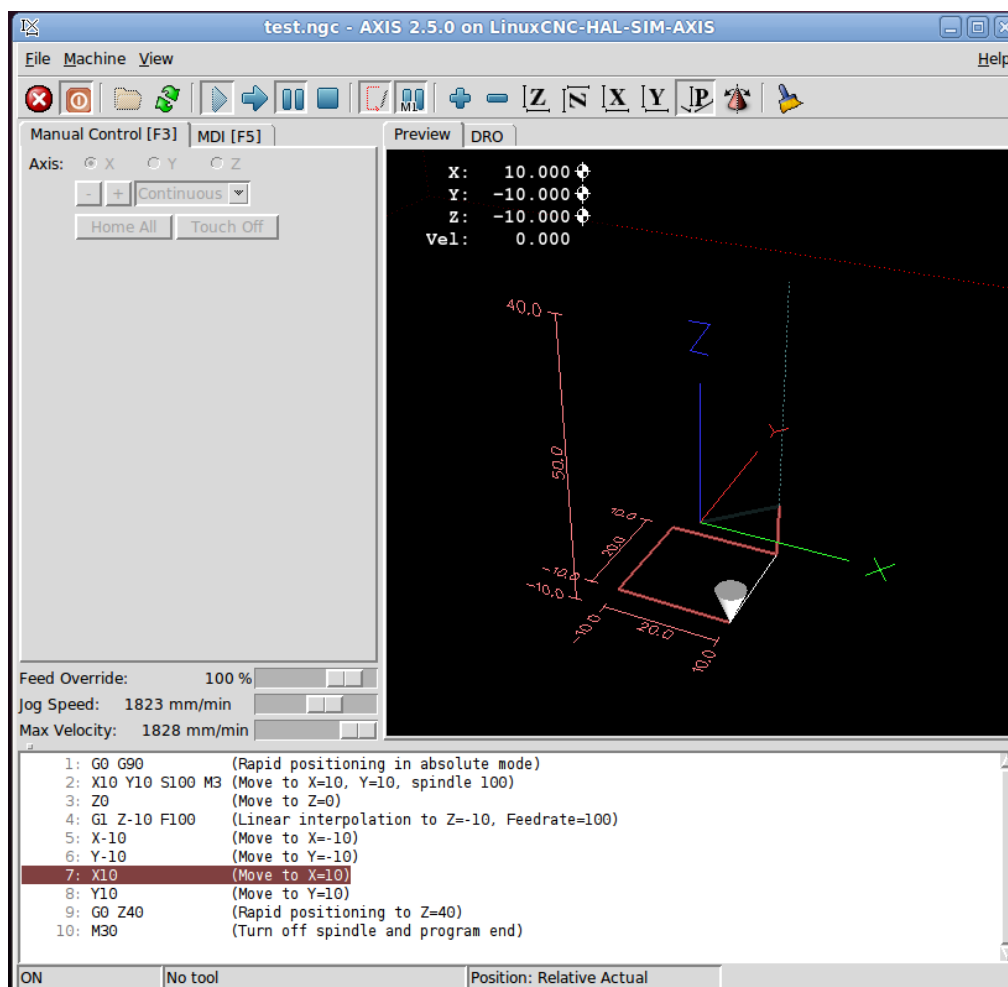
7.2.2.5. ábra: Szerszám kiemelése a marás végeztével

A tizedik mondat egyetlen szava megállítja a főorsó motorját, és jelzi az értelmezőnek a program végét. A forgács eltávolítása utáni állapotot mutatja a 7.2.2.6. ábra.



7.2.2.6. ábra: Az elkészült munkadarab a forgács eltávolítása után

Az előző példa a LinuxCNC szimulátorában futtatva a 7.2.2.7. ábrán látható, ahol egyszerre jelenik meg a futtatott kód és annak hatására a szerszám szimulált mozgása is.



7.2.2.7. ábra: LinuxCNC szimulátorban futtatott g-kód

A kézzel írt G-kód leggyakrabban használt szavai következnek példával.

Elmozdulások programozására a G90 és G91 szavakat lehet használni. A G90 abszolút koordináta értékek megadásával dolgozik a munkadarab koordináta rendszerében, míg a G91 szó relatív, más néven növekményes koordináta megadást tesz lehetővé. Ilyenkor az utolsó pozíció lesz a referencia, és ahhoz képest kell előjelesen megadni a kívánt elmozdulást. **Példa kód:** G90 X10 Y20 (Move to X=10, Y=20 in reference with part zero)

A G0 segítségével gyorsmenetben lehet pozícionálni. A szót követően megadott koordinátaértékek az elérni kívánt végpont koordinátái lesznek. Ebben a módban a mozgás egyenes vonalú, amit a lehető leggyorsabban hajt végre a gép. Tipikusan akkor használják, amikor szabad mozgással kell a szerszámnak közlekednie fogások között. **Példa kód:** G0 X50 Y100 (Quickly move to X=50, Y=100)

A G01 lineáris interpolációt eredményez. Ezt a szót követően szintén koordinátákat kell megadni, amivel a cél pozícióját adhatjuk meg. A szerszám mozgási sebességét az érvényes előtolási (F-kóddal megadott) sebesség korlátozza. Ezzel a móddal egyenes vonalú forgácsoló mozgást lehet végezni a munkadarabban, ha a főorsó be van kapcsolva. **Példa kód:** G01 X50 Y50 (Move slowly to X=50, Y=50)

A G02 és G03 szavak segítségével körinterpoláció végezhető. Hasonlóan a G01-hez, itt is célkoordinátákat kell megadni, majd egy kör sugarat, vagy egy újabb vektort, ami az ív középpontjába mutat az aktuális pozícióból. Hatására a szerszám az aktuális pontból a célpontba megy a megadott sugár vagy középpont által meghatározott íven G02 esetében az óramutató járásának megfelelő, G03 esetében pedig ellenkező irányban. **Példa kód:** G02 X10 Y10 Z0 L10 J0 K0 (Move on an arc to X=10, Y=10, Z=0, with center of L=10, J=0, K=0, direction is clockwise)

A G40, G41, G42 szavak segítségével a szerszám pályáját közvetlenül (G40 szóval), míg sugárkorrekcióval (G41 és G42 szavakkal) adhatjuk meg. Korrekcióra azért van szükség, mert az alkalmazott szerszámnak mindig van valamekkora átmérője, de még lézeres vágáskor is kell számolni a vágási vastagsággal. Ha G40-el adjuk meg a pályát, akkor amennyiben változik a szerszám sugara, úgy újra kell írni a végpontokat, ellenben ha a beépített sugárkorrekciót használjuk, akkor a szerszám kopását könnyen lehet a kódhoz igazítani a méretpontos megmunkálás érdekében. Ez utóbbi esetben elég a munkadarab kontúrját megadni, a vezérlő elektronika kiszámolja a beállított szerszámsugárból a tényleges útvonalat jobb (G42) és baloldali bejárással (G41).

Néhány cím kivételével a mondatokban nem megadott értékek az előző mondatból öröklődnek. Az öröklődés csak azonos kódcsoporthoz tartozó kódok között érvényes, mint amilyen a G01, G02, G03; vagy G40, G41, G42; vagy a G90, G91 csoportok. A következő példa kódok hatására a gép ugyanazt a műveletsort hajtja végre.

Példa kód 1:

N1 G01 X10 Y20 Z30 (Move slowly to X=10, Y=20, Z=30)

N2 G01 X10 Y20 Z50 (Move slowly to X=10, Y=20, Z=50)

Példa kód 2:

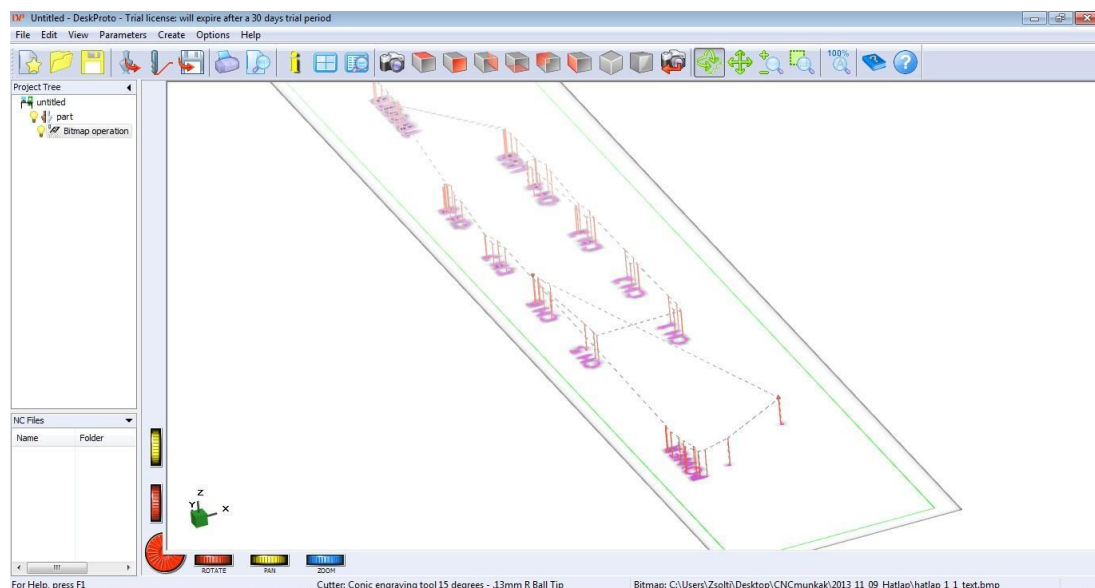
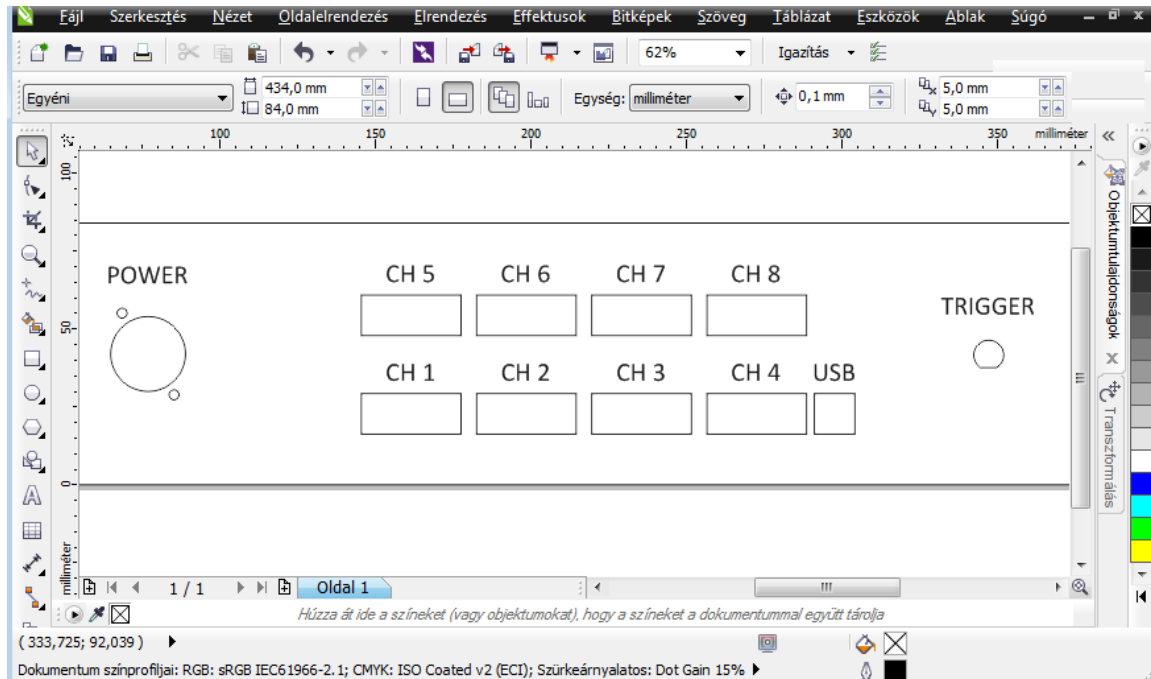
N1 G01 X10 Y20 Z30 (Move slowly to X=10, Y=20, Z=30)

N2 Z50 (Move slowly to Z=50)

Összefoglaló táblázat a fontosabb kódokról és jelentésükről a függelékben olvasható.

Bonyolult formák marására, vagy szöveg gravírozására alkalmas g-kódot nem kézzel programozva

állítanak elő, hanem grafikus felületű kódgeneráló szoftverek segítségével. Ilyen funkcionalitásra képesek a CAM szoftverek, mint amilyen a PyCam, vagy a DeskProto [7.6.]. A fejlesztés menete ilyenkor egy vektorgrafikus terv készítésével kezdődik. 3D megmunkáláshoz ez lehet AutoCAD-ben [7.7.] előállított stl, vagy dwg állomány, egyeneses 2D megmunkáláshoz, mint amilyen a gravírozás, elegendő lehet az Inkscape [7.8.] vagy CorelDraw [7.9.] programok használata is. A 7.2.2.1. ábrán látható képernyőképek fentről lefelé haladva a tervezés fázisairól CorelDraw és DeskProto programokkal, illetve legalul az elkészült munkadarabról összeszerelt állapotban.





7.2.2.1. ábra Generált G-kód tervezési fázisai és elkészült munkadarab

7.3 Felhasznált irodalom

[7.1.] Dr Köves Gyula: „Forgácsoló megmunkálás CNC vezérlésű szerszámgépen - MKC 500 megmunkálóközpont és Mitsubishi Meldas Mo CNC vezérlés”, Miskolci Egyetem Gépész kar 2004, elérhető: <http://mek.niif.hu/04700/04766/04766.pdf>

[7.2.] NCT Ipari Elektronikai kft.: NCT 99M NCT2000M Marógép és megmunkáló központ vezérlő programozási leírás, elérhető: http://www.nct.hu/pdf/NC_Documents/Magyar/Maro/magprm.pdf

[7.3.] Czéh Mihály, Hervay Péter dr., Dr. Nagy P. Sándor: „CNC-programozás alapjai”, Műszaki Könyvkiadó, Budapest 2004, elérhető: <http://ebookbrowse.net/cnc-programozas-alapjai-pdf-d53183150>

[7.4.] ISO 6983-1:2009 szabvány, elérhető: http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=34608

[7.5.] LinuxCNC, elérhető: <http://www.linuxcnc.org/>

[7.6.] DeskProto, elérhető: <http://www.deskproto.com/>

[7.7.] AutoCAD, elérhető: <http://www.autodesk.com/products/all-autocad>

[7.8.] Inkscape, elérhető: <http://inkscape.org/>

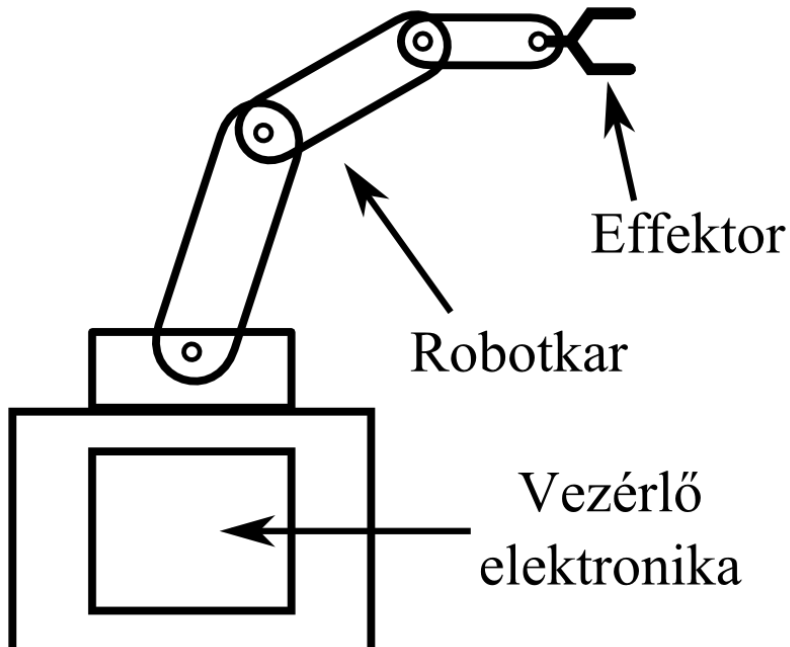
[7.9.] CorelDraw, elérhető: <http://www.corel.com/corel/>

Napjainkra jellemző tömegtermeléssel szemben támasztott elvárások megkövetelik a nagy pontossággal, és nagy megbízhatósággal végzett gyártási folyamatokat nem csupán a megmunkálás, de az alkatrészek összeszerelését illetően is. Az ipari robotok kezdetben azokon a területeken nyertek teret, ahol a munkavégzés jellege miatt már eleve gépek igénybevételével kellett dolgozni, mint például nagyobb tömegű munkadarabok mozgatása, szerelése. Ezeket a gépeket később úgy automatizálták, hogy ne legyen szükség emberi munkaerőre az egyes művelet sor elvégzéséhez. Az automatizálás egyre bonyolultabb feladatok elvégzésre tette alkalmassá a gépeket, melyek napjainkra a mind inkább kifinomult szenzoraik segítségével akár folyton változó körülmények között is képesek a feladataik precíz elvégzésére. Egy tipikus gyártósoron egyszerre több robot is dolgozik ugyanazon a félkész terméken, amin munkafázisonként robotok külön csoportja dolgozik együtt, így képesek alkatrészek helyükre mozgatásán, hegesztéssel vagy ragasztással történő rögzítésén keresztül egészen a festésig, csomagolásig autonóm módon működni. A robotok széles választéka érhető el az ipari gyártástechnológiában, így alkalmazási körülményeikkel együtt a robotok felépítésében is nagy változatosságot mutatnak.

Az ipari robotok összetett, precíz szerkezetek. Legfontosabb komponensei a következők:

- A gépet vezérlő elektronika
- Szegmensek sorozatából álló robotkar
- Műveletvégző effektor, ami lehet megfogó, vagy valamilyen szerszám

Egy robotmanipulátor főbb összetevői a 8.1. ábrán láthatók.

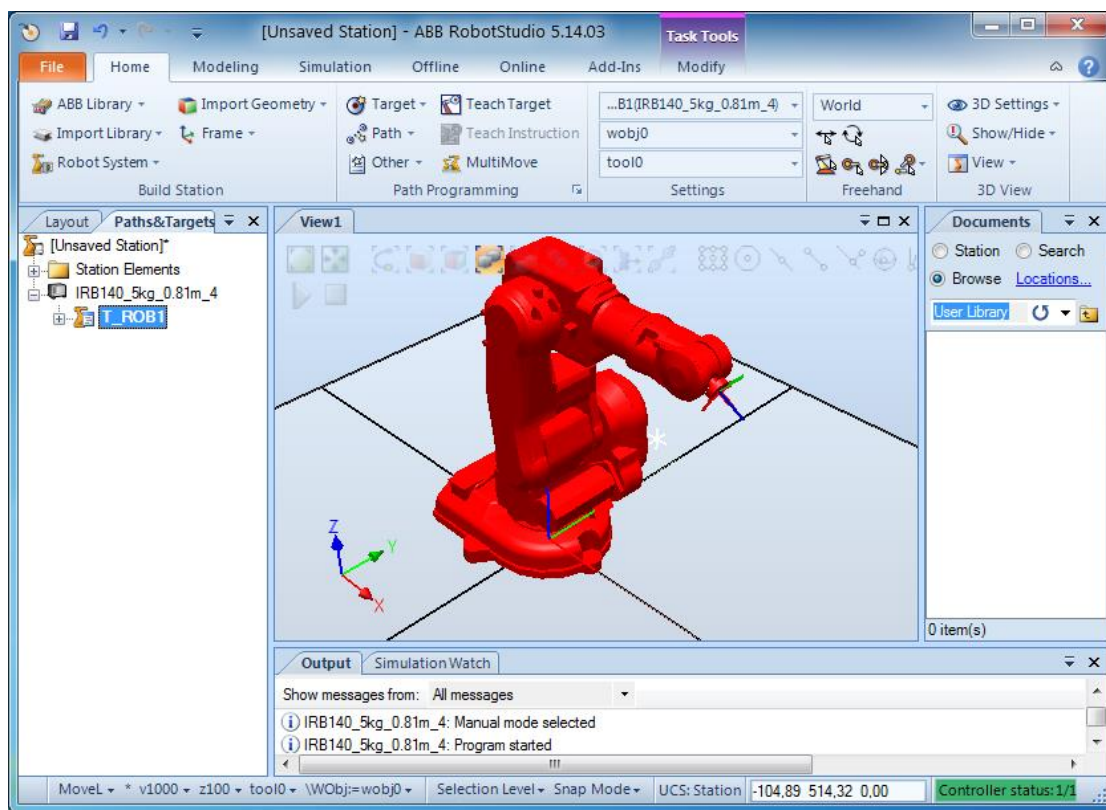


8.1. ábra: Robotmanipulátor főbb komponensei

8.1 Robotok programozása

A robotokon futó program olyan utasításkódok összessége, amivel egy robot működését lehet időtől vagy más szenzorok függvényében megadni. Ez leggyakrabban mozgási utasítások sorozatát jelenti,

amit a robot képes automatikusan kivitelezni. Még az egyszerűnek látszó mozgásminták programozása sem triviális feladat, ezért összetett fejlesztőkörnyezetek állnak a programozók rendelkezésére, melyekkel szenzorok és kiegészítő aktuátorok egyaránt kezelhetők. Az ABB robotok programozásához használt IDE felülete az ABB IRB 140-es robottal a 8.1.1. ábrán látható.



8.1.1. ábra: ABB IRB 140-es robot a RobotStudio IDE környezetben

Robotok programozására jellemző technika az adatfolyam programozás, aminek a lényege az, hogy ha egy változó értéke megváltozik, akkor a függő változók értékei is mind frissülnek. A táblázatkezelő alkalmazásokból ismert technikát követve, ha bizonyos cellákba szenzorértékek kerülnek, más cellákba pedig beavatkozó jelek íródnak további segédcellák felhasználásával, akkor kapunk egy reaktív rendszert, ami képes robotok viselkedésének leírására. Ilyen elven működő programnyelveket adatfolyam programozási nyelveknek nevezzük. A numerikus számítások mellett függvényhívások is támogatottak, sőt az egész adatfolyam programozás modellezhető függvények adott sorrendben történő meghívásaként is.

Ahogy a legtöbb programnyelvben, úgy az adatfolyam programozásnál is fontos a program állapotát nyomon követni. Egy programot meghatározó állapot magában foglalja az összes benne definiált változó aktuális értékét is, ami jelentős memóriaigényt jelenthet. A kód futása során az éppen végrehajtás alatt álló kódrész szintén a kód állapotát meghatározó tényező. A kódban előforduló szemantikai hibák is futásidőben jelennek meg. Ilyen hiba lehet pl. ha egy robot motorja úgy van programozva, hogy óra járásával megegyező irányba forogjon, viszont ha mégis ezzel ellentétes irányban forog, akkor az futási hibának minősül.

8.2 Ipari robotok programozása

Az ipari robot definícióját az ISO szabvány adja meg, mely szerint az automatikusan szabályozóval ellátott, újraprogramozható, többcélú manipulátor mely legalább három aktuált szabadsági fokkal

rendelkezik, ipari robotnak nevezzük. A beállítások és a mozdulatsorok programozása közvetlenül vagy valamilyen hálózaton keresztül külső számítógépre csatlakoztatva valósul meg. A robotcellának a robot, egyéb gépekkel vagy perifériákkal alkotva egységet tekintik. Egy általános robotcellában lehet például egy alkatrész adagoló, egy fröccsöntő gép és maga a robot. A különböző gépek egy egységben működnek és számítógéppel vagy PLC-vel szabályozhatóak. Az egy cellába összekapcsolt gépeket szinkronizálni kell, a munkafolyamat sikeres leprogramozásához. Az alkalmazott architektúrától függően a kód futtat közvetlenül a robot vezérlőjén, vagy külső számítógépen, esetleg mindkettőn egyszerre.

Ipari robotok programozása általában két fő komponens definiálását jelenti: a robot pozícióinak és az elvégzendő műveletek rögzítése. Például alkatrész beszerelések az adagoló és a szerelés pozícióit kell rögzíteni, és az erre alkalmas interfészen keresztül a műveleteket megadni. Ebben az esetben az adagoló készenléti jelét meg kell várnia a robotnak, ezután a robot megfoghatja az alkatrészt és átmozgathatja a szerelési pozícióba, ahol a szerelés végeztével el kell engednie azt, és jeleznie kell a következő munkafázis kezdéséhez. A vezérlőprogramnak képesnek kell lennie a fentiek összehangolt kezelésére, így a robot mozgását a ki és bemenetek jeleit felhasználva hatékonyan kialakítani.

Pozíciók felvétele többféle technikával is kivitelezhető, melyek a következők:

- Pozícionáló parancsokkal
- "Teach pendant" segítségével
- Manuális pozícionálás és logolás
- Offline programozási technika külső számítógépen

Pozícionáló parancs:

Az operátor a robotot úgy tudja a megfelelő pozícióba irányítani, hogy GUI vagy szöveges parancsok segítségével kívánt koordinátaértékekre állítja a manipulátort.

"Teach pendant":

A robot pozíciója a "teach pendant" segítségével is megadható. Ez egy kézben tartható, szabályozásra és programozásra is használható egység. Legfőbb jellemzője, hogy az eszköz segítségével a robotot kézi vezérlés mellett lehet adott pozícióba küldeni, vagy a robot csuklókoordinátáin állítani. Ez az eszköz a sebesség módosítására is alkalmas, mivel a kisebb sebesség általában csak az óvatos pozícionáláshoz szükséges, vagy amikor egy új, vagy módosított munkamenetet kell tesztelni. Tipikusan egy nagy piros vészleállító gomb is található a kezelőpanelen. A „teach pendantra” általában csak a robot programozásakor van szükség, ezt követően lecsatolják a robotról, amire előzőleg rátöltötték az elkészült programkódot.

Manuális pozícionálás és logolás:

Pozíciók és útvonalak rögzítésének talán a leghatékonyabban végezhető technikája. A módszer lényege, hogy a manipulátort olyan állapotba lehet kapcsolni, amiben kézzel odébb lehet igazítani a kívánt pozícióra. A mozgató útvonalát a robot rögzíti, így azt fel lehet használni a programozás során. Olyan feladatok programozásánál előnyös, ahol nem csak pozíciókat, hanem teljes mozgásmintákat kell ismételni, mint pl: festéksórás.

Offline programozási technika külső számítógépen:

A művelet során grafikus szimulátorban rögzítik az egész cellát, a robotot és minden egyéb gépet vagy eszközt a munkaterületen belül. Ezt követően a robot a képernyőn mozgatható, a teljes

folyamat pedig szimulálható példa kódokkal. Ez a módszer azonban csak korlátozottan használható, mert minden egyes járulékos eszköz pontos pozíciójára szüksége van, így amikor a valós cellában elhelyezett robotra kerül a kód, a pontosságot valószínűleg utólag fel kell javítani.

További kezelőszervként a robotprogramozó operátorok gyakran használnak érintőképernyős felhasználói interfészt. Segítségével kiválasztható a futtatni kívánt program, vagy működtethetőek a csatlakoztatott perifériák, mint pl: adagoló, futószalag, vészleállító és egyéb biztonsági rendszerek, stb.

8.3 Biztonsági megfontolások

Az ipari tömegtermelés bővülésével a hatékony és folyamatos gyártás érdekében fokozatosan terjednek az ipari robotok. Sokféle ágazatban megtalálhatóak, mint pl. autógyártás, alkatrész gyártás és összeszerelés, élelmiszeripar, vegyipar, stb. Ugyanakkor a háztartásokban is egyre szélesebb körben alkalmaznak robotokat, mint pl. robotfűnyírót vagy a robotporszívót. Mivel a különböző feladatokat ellátó robot berendezések gépként működnek, ezért azok a biztonsági és egészségvédelmi követelmények vonatkoznak ezekre, amelyeket az Európai Unió által kiadott irányelvek szerint határoztak meg, és a felhasználó vagy egy gyárban dolgozó személyzet fizikai védelmét biztosítják a robot működése közben. Természetesen ezek a biztonsági szempontok igen eltérőek egy robotporszívó vagy egy autógyárban működő hegesztő robot esetében. Az előbbinél nem szükséges előre meghatározott biztonsági protokoll betartása vagy különösebb személyi védelem, mivel a robot működésével nem veszélyeztetni sem környezete sem a felhasználók biztonságát. Ennél jóval bonyolultabb biztonsági megfontolásokat és sokféle szempontot kell figyelembe venni egy ipari robot esetében. Például a programozás során vagy a robot helytelen használata miatt fellépő hibák komoly biztonsági kockázatot jelenthetnek a nagy, ipari robotok esetében, mivel ezek méretükből és erejükből adódóan súlyos személyi sérüléseket is okozhatnak. Azon ipari robotok esetében, melyek hibátlanul működnek ugyan, de nagy tömegűek és nagy sebességgel mozognak, sosem biztonságos a személyzetnek a robot működése közben azzal egy munkaterületen belül tartózkodni, mivel az ember reakcióideje nem összemérhető a robot sebességével még akkor sem, ha az adott személy felkészült.

Az ipari robotok gyakran szenzorai segítségével környezetük változásaira reagálva működnek, így még a programozási hibától mentes szoftverek esetében is különös figyelmet kell fordítani arra, hogy a kiszolgáló személyzet munkája mint pl. egy robot feltöltése, egyes alkatrészek tisztítása, cseréje vagy egyéb karbantartási munkák biztonságosan kivitelezhetőek legyenek az ember-robot interakció során. Az ipari robotok biztonságos üzemeltetése érdekében a munkafolyamatok lebonyolításához fizikai térelválasztót, ún. robotcellát létesítenek. Az ipari robotcella egy vagy több robot és/vagy robotrendszer egysége, a hozzá kapcsolódó gépi kiegészítőkel együtt. A robotcellát biztonságos használatához járulékos védőeszközökkel kell ellátni mint pl. védőburkolat, fényfüggöny, védőeszközök vagy fizikai sorompók. A cellán belül a gépek összehangolt munkát végeznek egy anyag vagy termék feldolgozása, kezelése, mozgatása, csomagolása céljából egy fizikailag körülhatárolt területen belül.

A robotok használatának biztonsági követelményeit a legáltalánosabban elfogadott szabályrendszer, az ANSI/RIA R15.06-1999 [8.2] c. könyv taglalja részletesen. Ez a szabvány az ipari robotmanipulátorok környezetében alkalmazott biztonsági megfontolásokat és szabályokat tartalmazza. A robot bármely pontjának maximális sebességét 250mm/s-ban határozza meg programozói módban, így lehetőséget ad arra, hogy a programozó kikerülje, vagy megállítsa a

veszélyes mozdulatot. A szabvány ajánlásokat tesz a robotot határoló fizikai vagy elektromos védőberendezésről, amely megakadályozza illetéktelenek számára hogy működő robot hatósugarába kerüljenek. Más, az egész világon elterjedt szabványok: az EN 775 európai szabvány [8.3], ill. nemzetközi megfelelője, az ISO 10218 I., II. [8.4, 8.5].

A biztonsági szempontok figyelembe vételével lehetővé válik az együttműködés robot és ember között, az előírt sebesség- és erőhatárok betartásával. A leghatékonyabb biztonsági megoldás általában a robotszerkezet újratervezését jelenti, míg szélesebb körben az ember és a robot fizikai elkülönítését használják. Egyik megoldás sem költséghatékony az ipari robotok esetében, továbbá egy gyárban problematikus a már létező robotizált rendszer áttervezése ill. számos olyan munkafolyamat van, ahol szükséges a robot és ember együttes, összehangolt munkavégzése is.

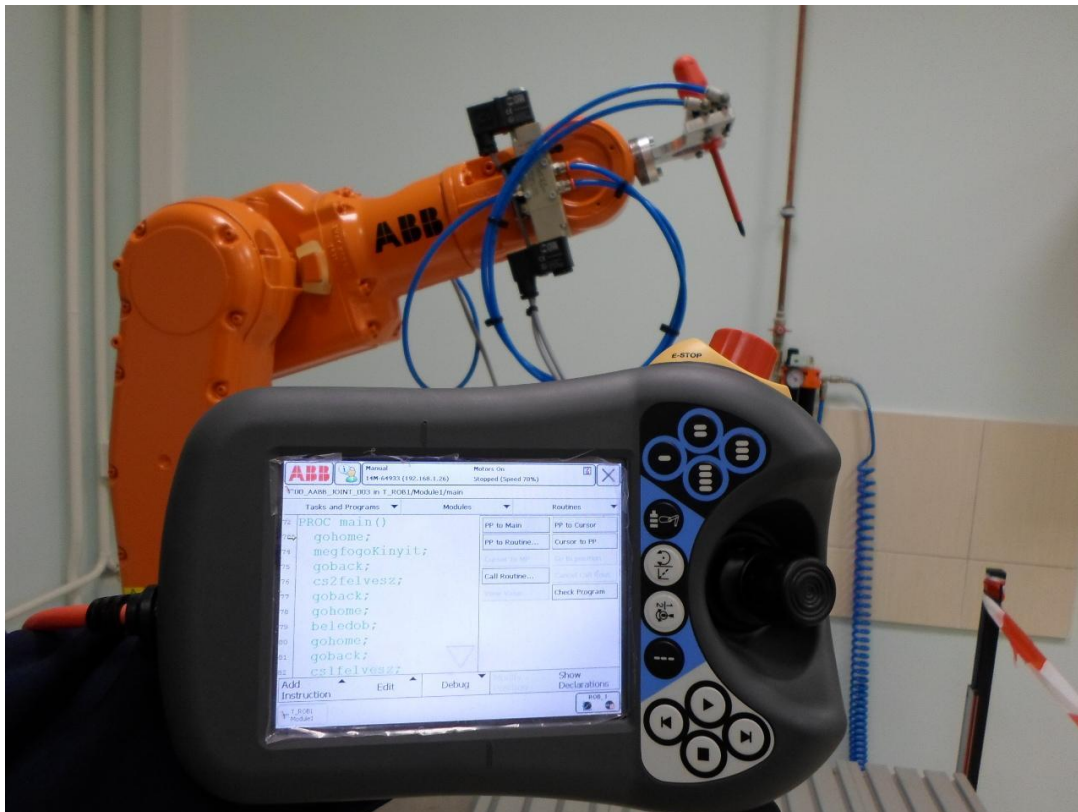
Az elmúlt évek fejlesztéseinek köszönhetően olyan új robottervezési irányelvek jelentek meg, amelyek a fenti problémákat igyekeznek megoldani. Ennek jó példája a Baxter robot, melyet a Rethink Robotics fejlesztett ki. Baxter egy termelési folyamatot képes ismételtén végrehajtani, valamint képes biztonságosan és intelligens módon, közvetlenül a futószalag mellett dolgozó emberekkel együtt dolgozni, robotcellák használata nélkül. Ezt passzív és aktív biztonsági megoldások összességével éri el. Minden csuklója rugalmas, amiket akár a programozott forgásiránnyal ellentétesen is lehet mozgatni működés közben. A karjait sima felületű műanyag burok veszi körül, hogy tompítsa az esetleges ütközést. Szenzoraival érzékeli, ha a közelében ember tartózkodik, ilyenkor automatikusan lelassít. Ha hirtelen áramszünet történik, akkor lassan csuklik össze, időt adva a közelben dolgozóknak hogy elkerüljék a balesetet.

8.4 Szingularitás

Az Amerikai Nemzeti Szabványügyi Intézet ANSI/RIA R15.06-1999 c. kiadványa a következőképpen definiálja a szingularitást: "olyan állapot, amiben legalább két csukló tengelye egy egyenesbe esik, így a robot mozgásiránya és sebessége kiszámíthatatlanná válik". Amikor mozgássorozat részeként jön létre ilyen együttállás, gyakori jelenség, hogy a robot egyik csuklója egyetlen szabályozási periódus alatt közel 360 fokot próbál elfordulni, ami fizikailag nem kivitelezhető, viszont a mozgás egy ránduláson megy keresztül, ami erős igénybevételnek teszi ki a robotot. A gyakorlatban ennek kivédésére két módszer terjedt el. Az egyik esetben a mozgássorozaton korrigálnak kis mértékben oly módon, hogy az együttállás ne történjen meg. Másik esetben a várható együttállás előtt lelassítják a robotot, hogy az együttállás alatt fellépő anomáliák sebessége ne tegyene kárt a robotban. A probléma megelőzésére az ANSI/RIA R15.06-1999 dokumentumban tesznek ajánlást, miszerint ha a mozgást a "teach pendant" segítségével rögzítik, akkor a szingularitás elérésekor a robotnak meg kell állnia, és figyelmeztetőüzenetet kell adnia a veszélyes állapotról. Ily módon más útvonalat fog a gép üzemeltetője rögzíteni, ezért üzem közben nem fog előállni a szingularitás.

8.5 Példa program

Az ABB ipari robotcsalád egyik legkisebb változatára, az IRB 140-es típusra írt példa programon megfigyelhetőek a robotmanipulátor programozásának sajátosságai. Az ABB robotokait a gyártó által fejlesztett RAPID nyelven lehet programozni, ami az egyszerű procedurális nyelvek közé tartozik. A példakód futása során a robotkar egy szerszámtartóról egymás után négy csavarhúzózt vesz fel a ráerősített pneumatikus megfogójával, majd egy szerszámos ládába ejti azokat. A robothoz csatlakoztatott "teach pendant" és a kódot végrehajtó robot a 8.5.1. ábrán látható.



8.5.1. ábra: Teach pendant, és kódot végrehajtó robot

A fejlesztés első lépése a mozgási sorozatok során érintett pozíciók rögzítése konstansok formájában, amit manuális vezérléssel lehet a legkönnyebben kivitelezni. Ez a definíciós rész a példakódban a program modul első részén található "CONST jointtarget" kulcsszavakkal jelölve. A programot érdemes részfeladatok szerint függvényekbe strukturálni, ami megkönnyíti a továbbfejlesztést, és az esetleges hibák javítását is. A "PROC" és "END PROC" kulcsszavak közé írt utasításokkal lehet a függvényeket definiálni. A main() függvény így csak a megírt metódusok megfelelő sorrendben történő hívásából áll. A RAPID program nyelvének teljes specifikációját az ABB cég tartja karban [8.8].

```
MODULE Module1
```

```
    CONST jointtarget alap:=[[0, 0, 0, 0, 0, 0], [9E9, 9E9, 9E9,
9E9, 9E9, 9E9]];
```

```
    CONST                robtarget                dobozbadob:=[[749.54,-
298.71,322.46],[0.0170299,0.0186299,-0.71984,-0.693681],[-1,-1,-
1,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
```

```
    CONST jointtarget  hatso:=[[0,12.0881,-205.203,0.000180067,-
0.000569217,0.000893618],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
```

```
    CONST robtarget  cs2elott:=[[-311.97,121.47,605.3],[0.63161,-
0.00438493,-0.77527,0.00234605],[-1,-
1,0,6],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
```

```
    CONST robtarget  cs2megfog:=[[-393.55,123.85,531.56],[0.861895,-
0.00179432,-0.50702,0.00806547],[-1,-
1,0,6],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
```

```
    CONST robtarget  cs2felett:=[[-393.55,123.86,646.98],[0.86189,-
```



```

0.00179507,-0.507027,0.00806461],[-1,-
1,0,6],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

CONST robtarget cs1elott:=[[-415.36,269.41,644.34],[0.62861,-
0.00605025,-0.777668,-0.00668234],[-1,-
2,1,6],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

CONST robtarget cs1megfog:=[[-492.58,269.31,620.49],[0.725517,-
0.00297049,-0.688182,-0.00455213],[-1,-
1,0,6],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

CONST robtarget cs1felett:=[[-492.4,269.31,793.11],[0.725506,-
0.00297828,-0.688194,-0.00454401],[-1,-
2,1,6],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

CONST robtarget ejtes:=[800.84,-
254.41,341.47],[0.515019,0.133077,0.843226,-0.0775658],[-
1,0,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

CONST robtarget cs3elott:=[[-286.4,-
129.42,549.03],[0.858798,0.0172594,-0.511985,0.00625938],[0,-
2,1,7],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

CONST robtarget cs3megfog:=[[-386.64,-
129.3,546.47],[0.845461,0.0169367,-0.53374,0.00553167],[0,-
2,1,7],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

CONST robtarget cs3felett:=[[-386.63,-
129.30,733.56],[0.845439,0.0169585,-0.533775,0.00551687],[0,-
2,1,7],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

CONST robtarget cs4elott:=[[-380.75,-
282.3,622.25],[0.708943,0.0124108,-0.705156,-0.000143916],[0,-
2,1,7],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

CONST robtarget cs4megfog:=[[-490.95,-
282.3,622.24],[0.708937,0.0124195,-0.705162,-0.000146365],[0,-
2,1,7],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

CONST robtarget cs4felett:=[[-490.96,-
282.3,769.53],[0.70893,0.0124241,-0.70517,-0.000153824],[0,-
1,0,7],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

CONST robtarget cs4felett2:=[[-358.26,-
281.7,769.48],[0.70891,0.0124443,-0.705189,-0.000212208],[0,-
1,0,7],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

PROC gohome()

MoveAbsJ alap, v500, fine, tool0;

ENDPROC

PROC goback()

```

```

        MoveAbsJ hatso, v500, fine, tool0;
ENDPROC

PROC megfogoKinyit()
    PulseDO DO10_1;
    WaitTime 1;
ENDPROC

PROC megfogoBecsuk()
    PulseDO DO10_2;
    WaitTime 1;
ENDPROC

PROC cs1felvesz()
    MoveJ cs1elott, v300, fine, tool0;
    MoveL cs1megfog, v200, fine, tool0;
    megfogoBecsuk;
    MoveL cs1felett, v200, fine, tool0;
ENDPROC

PROC cs2felvesz()
    MoveJ cs2elott, v300, fine, tool0;
    MoveL cs2megfog, v200, fine, tool0;
    megfogoBecsuk;
    MoveL cs2felett, v200, fine, tool0;
ENDPROC

PROC cs3felvesz()
    MoveJ cs3elott, v300, fine, tool0;
    MoveL cs3megfog, v200, fine, tool0;
    megfogoBecsuk;
    MoveL cs3felett, v200, fine, tool0;
ENDPROC

```

```
PROC cs4felvesz()  
    MoveJ cs4elott, v300, fine, tool0;  
    MoveL cs4megfog, v200, fine, tool0;  
    megfogoBecsuk;  
    MoveL cs4felett, v200, fine, tool0;  
    MoveL cs4felett2, v200, fine, tool0;  
ENDPROC
```

```
PROC beledob()  
    MoveJ ejtes, v400, fine, tool0;  
    megfogoKinyit;  
ENDPROC
```

```
PROC main()  
    gohome;  
    megfogoKinyit;  
    goback;  
    cs2felvesz;  
    goback;  
    gohome;  
    beledob;  
    gohome;  
    goback;  
    cs1felvesz;  
    goback;  
    gohome;  
    beledob;  
    gohome;  
    goback;  
    cs3felvesz;  
    goback;  
    gohome;  
    beledob;  
    gohome;
```

```
goback;  
cs4felvesz;  
goback;  
gohome;  
beledob;  
gohome;  
  
ENDPROC
```

ENDMODULE

8.6 Felhasznált irodalom:

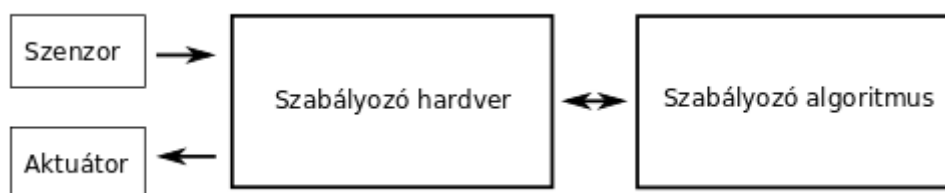
- [8.1] SAASCO Tanácsadó és Mérnöki Iroda Kft.: Robot Cella, elérhető: http://shp.hu/hpc/web.php?azonosito=robotcella&oldalkod=robotcella_Xp1N
- [8.2] ANSI/RIA R15.06. 1999., Risk Assessment and Risk Reduction: A Guide to Estimate, Evaluate and Reduce Risks Associated with Machine Tools, American National Standards Institute., American National Standards Institute, Inc.
- [8.3] DIN EN 775-1992, Manipulating Industrial Robots, Safety, European Standard, Germany.
- [8.4] ISO/DIS 10218-1:2007, Robots for industrial Environment-Safety Requirements, International Organization for Standardization.
- [8.5] ISO/DIS 10218-2. 2009, Robots and robotic devices-Safety Requirements. Part 2: Industrial robot system and integration, Draft International Organization for Standardization.
- [8.6] ISO 8373:1994 Manipulating industrial robots – Vocabulary, elérhető: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=15532
- [8.7.] Karl Lunt: „Build Your Own Robot!”, A K Peters/CRC Press, 2000
- [8.8.] ABB Flexible Automation: RAPID Reference Manual, elérhető: <http://www.abb.com/>
- [8.9] Wikipedia: Industrial robot, elérhető: http://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_robots

9 Szabályozások, hardverek és algoritmusok

A szabályozó olyan digitális, analóg elektronikai, vagy mechanikus eszköz, amely képes megfigyelni és befolyásolni egy időben változó (dinamikus) rendszer működési feltételeit. Digitális szabályozók tipikusan hardver és szoftveres komponensekből állnak. A következő fejezetekben áttekintjük a fontosabb szabályozáshoz használt hardvereket, valamint a rajtuk futó leggyakoribb algoritmusokat.

9.1 Szabályozó hardverek digitális szabályozáshoz

Mechatronikai rendszerek tervezése során alkalmas szabályozó hardvert kell választani. Nagyon sokféle hardver érhető el a piacon, így a rendszer számára optimális hardver kiválasztása a tervezés egyik legkritikusabb lépése. A vezérlő hardver kiválasztása során mérlegelni kell a hardver által biztosított számítási bonyolultságot, a tipikus válaszidőt, ami általában a feldolgozás sebességével fordítottan arányos, és ha szükséges, akkor a bemeneten érkező jelre adott válasz maximális idejének garanciáját, vagy más néven a valós idejű működés képességét. Szabályozó rendszer felépítése a 9.1.1. ábrán látható.



9.1.1. ábra Szabályozó rendszer felépítése

9.1.1 PLC

A programozható logikai vezérlő (PLC - Programmable Logical Controller) olyan digitális vezérlőegység, amivel elektromechanikus folyamatokat lehet nagy megbízhatósággal irányítani. Az ipari szabályozóhardverek egyik legnépszerűbb fajtája, mely sok be és kimenettel rendelkezik, és képes valós idejű szabályozásra. A működési tartományokat szélsőséges körülményekre is kiterjeszti a környezeti hőmérséklettel szembeni ellenállása, vibráció és elektromos zaj elleni nagyfokú toleranciája. A PLC kifejlesztésekor a korábban használt mechanikus, vagy relés időzítők kiváltását tűzték ki célul, de a legfontosabb feltétel az egyszerű újraprogramozhatóság volt. A korábbi technikákat szemléltető, úgynevezett létradiagram megadásával lehet programozni a PLC hardvereit, így a mérnököknek nem szükséges bonyolult programozási nyelvet megtanulni a kezeléshez. Leggyakrabban automatizálási feladatokhoz használják, mint pl. gyártósorok üzemeltetése.

9.1.2 Mikrovezérlő

A mikrovezérlő egy egyetlen lapkára integrált célszámítógép, melyet széleskörűen alkalmaznak szabályozási és vezérlési célokra. Előnye az alacsony ár, kis méret, alacsony fogyasztás (tipikusan 1-50 mA), valamint a számos beépített periféria (órjelgenerátor, valós idejű óra, memória, digitális perifériák, A/D és D/A átalakítók). Egy mikrovezérlő tipikusan 8, 16 vagy 32 bit-es műveleteket tud elvégezni, belső RAM memóriája néhány kilobájt, programmemóriája pedig néhányszor 10 kB-ot. Órajel-frekvenciájuk tipikusan 10MHz-100 MHz tartományba esik. Legtöbbször nem operációs rendszer fut rajta, hanem az adott célra optimalizált egyszerű szoftver, általában lebegőpontos műveletek hardveres támogatása nélkül. A mikrovezérlők előnye, hogy a külvilág eseményeire,

melyek megszakítást generálnak, akár μ s-os időskálán tudnak reagálni. Mivel a reagálási idő jól kiszámítható, így alkalmas valós idejű szabályozások és vezérlések implementálására is. A mikrovezérlők hátránya, hogy kevés hardveres erőforrás áll a fejlesztő rendelkezésére, így komolyabb számítási feladatok nem bízhatók rá. Széleskörű felhasználását annak köszönhetik a mikrovezérlők, hogy beágyazott rendszereket lehet velük fejleszteni, így kis helyigény és alacsony fogyasztás mellett is működhetnek, így pl személyautókban részfunkciók ellátását biztosítják, mint az ablakmozgatás vagy ülésbeállítás.

A mikrovezérlőkhöz hasonló felépítésű a digitális jelprocesszor (DSP - Digital Signal Processor), melyet elsősorban nagysebességű jelfeldolgozásra optimalizáltak. Ennek megfelelően órajelük elérheti az 1 GHz-et is. Teljesítményüket tovább növeli, hogy képesek egyszerre több adaton is műveletet végezni, így jellemzően olyan adatfolyamok feldolgozására használják, amit alacsony késleltetéssel kell feldolgozni, mint pl. videójel elemzése valós időben.

9.1.3 FPGA

A programozható logikai kapumátrix (FPGA - field-programmable gate array) olyan chip, amelyben logikai blokkok és összeköttetések programozhatóak. A logikai cella tartalmazhat egyszerű memóriaelemet is a bonyolult függvények megvalósításához. Az FPGA chip-ek általában kisebb teljesítményűek, mint az alkalmazás-specifikus integrált áramkörök (ASIC - application-specific integrated circuit), viszont a fejlesztési és karbantartási költségek a programozhatóság miatt jóval kedvezőbbek. Egy korszerű FPGA több millió programozható cellából áll, és képes másodpercenként néhány terabit adatot feldolgozni. Megfelelően felprogramozva képesek teljesértékű processzorként működni, de ezek teljesítményben elmaradnak a hardveresen kialakított változattól. Tipikus alkalmazási területük a párhuzamos adatfeldolgozási képességüket kihasználva olyan komplex jelfeldolgozás, mint ami a gépi látáshoz, kriptográfiai műveletekhez, képalkotáshoz, vagy hálózati adatfeldolgozáshoz szükséges.

9.1.4 Beágyazható és személyi számítógépek

Néhány esetben megengedhető, hogy asztali PC, vagy a hasonló képességű mobil változata, a hordozható számítógép legyen a szabályozást futtató hardver alapja. Ezt a megoldást akkor érdemes választani, ha már eleve más funkció miatt is rendelkezésre áll a PC, vagy teljesértékű felhasználói felületre van szükség a szabályozás kezelése során. Gyakran fordul elő, ha a PC-k által nyújtott nagyobb számítási kapacitásra van szükség, hogy egykártyás PC-t alkalmaznak olyan hardverrel, ahol a teljes rendszer egyetlen chip-be van tokozva (SOC - system on a chip). Ilyen hardverek gyakran megtalálhatóak beágyazott rendszerekben.

Közös tulajdonságuk a PC-t használó rendszereknek, hogy magas órajellel (min 1GHz), esetleg több maggal rendelkeznek, és magas szintű programnyelven kényelmesen programozhatóak, a programok egyszerűen hordozhatóak más PC-s környezetre. Ennek megfelelően jellemző példa használatukra olyan számításintenzív feladatok elvégzése, mint pl. intelligens szabályozás, arcfelismerés, vagy összetett grafikus felhasználói felülettel rendelkező folyamatirányítás. A nyers erő azonban általában nem jár garantált válaszidővel, mivel a PC-n összetett operációs rendszer fut, ami speciális esetben lehet valós idejű is. Valós idejű operációs rendszer esetében is csak arra lehet garanciát adni, hogy nem lesz végtelen hosszú várakozási ideje egyetlen megszakítási kérelemnek sem.

Ipari alkalmazásoknál használt PC, avagy ipari számítógép az asztali számítógéptől elsősorban a

megbízhatóságot növelő tulajdonságokban tér el. Lehetőleg mozgó alkatrész nélkül készítik, így gyakran passzív hűtésük van. A főleg hőt erős alumínium burkolatukon keresztül tudják leadni környezetük felé. Számításgépes feladatokra alkalmazzák, de bonyolultságuk miatt kevésbé tekinthetők megbízhatónak, mint más szabályozó célhardver, így elsősorban a kevésbé kritikus funkciókat látják el, mint amilyen a termelés vagy folyamatirányítás vagy monitorozási funkciók.

Amennyiben magas megbízhatóság mellett szükség van komolyabb számítási teljesítményre, akkor jöhetnek szóba az ipari vezérlő számítógépek (PAC - Programmable Automation Controller). Ezek órajele megközelíti a hagyományos számítógépekét, gyakran valós idejű operációs rendszer fut rajtuk (LinuxRT, VxWorks). E mellett sokszor beépített FPGA biztosítja a nagysebességű reagálás képességét.

9.1.5 HIL

Szabályozó rendszerek fejlesztését könnyítik meg a hardveres szimulátorok (HIL – Hardware In the Loop) alkalmazása. Segítségével a szabályozni kívánt rendszer kimeneteit a bemenetei függvényében valós időben vizsgálhatjuk, így a fejlesztés alatt álló szabályozó úgy fog viselkedni, mintha a valódi rendszert szabályozná. Ilyen megoldásokkal fel lehet gyorsítani a szabályozók fejlesztési idejét, a valódi rendszer üzemelési költsége megtakarítható, és nem kell számolni a hibás szabályozás következményeivel sem. Gyakran alkalmazzák gyártási folyamat részeként minőségellenőrzésre, amikor a drága rendszert működtető szabályozó képességeit tesztelik anélkül, hogy az igazi rendszert szélsőséges körülményeknek kelljen kitenni. A HIL eszközök gyakran újraprogramozhatóak, így többféle rendszert is képesek szimulálni.

9.2 Szabályozó algoritmusok

A fejlesztés során alapvető fontosságú, hogy a mechatronikai rendszer tervezését befolyásoló összes tényezőt figyelembe vegyünk, melyek a következők:

- rendelkezésre álló hely
- szükséges számítási kapacitás
- környezeti hatások
- végtermék tervezett ára
- felhasznált programozói nyelv
- rendszerrel szemben támasztott biztonságosság fontossága
- a termék kifejlesztéséhez szükséges idő
- megbízhatóság
- gyártandó termék száma

Másik kritikus döntés, amit a tervezőnek kell meghoznia, hogy milyen algoritmus végezze el a szabályozást. Számos lehetőség közül három leggyakrabban használt algoritmus sajátosságait vesszük alapul, melyek a következők:

- On-Off szabályozás
- PID szabályozás
- Intelligens szabályozás

Szabályozás minőségére vonatkozóan alapvető követelmény, hogy a szabályozás stabil legyen, azaz korlátos bemenetre korlátos kimenettel reagáljon. Feladattól függő egyedi követelmények mellett

általában a következő, egymással konfliktusban lévő feltételek egyidejű teljesítése a cél:

- Legyen rövid a tranziens
- Legyen nagyon stabil a rendszer

9.2.1 On-Off szabályozás

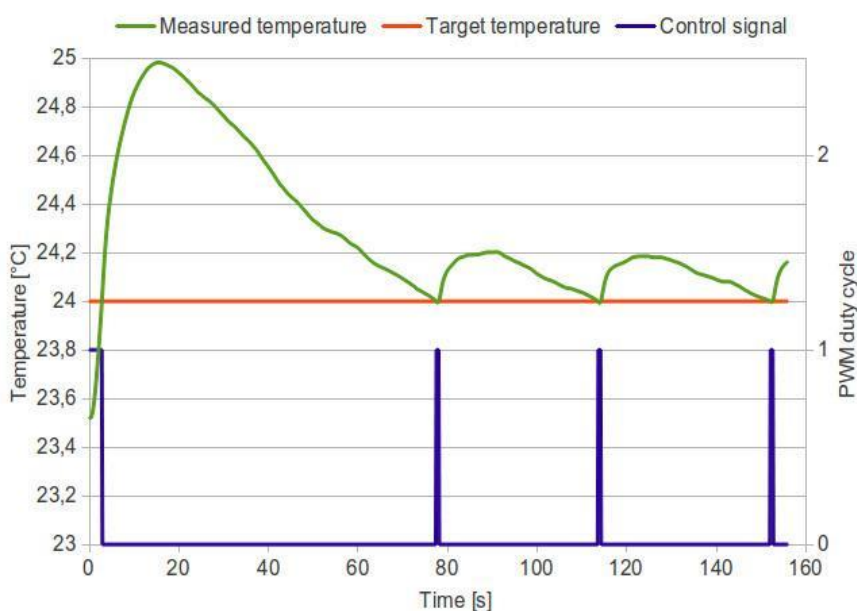
Szabályozásméletben az on-off szabályozás (bang-bang control) olyan visszacsatolt szabályozási mód, amikor a szabályozó kétértékű kimenettel rendelkezik. Tipikusan olyan rendszereket lehet ily módon szabályozni, amik bináris bemenettel rendelkeznek, mint pl az olvasztó kályhák, amik vagy teljesen be vannak kapcsolva, vagy ki vannak kapcsolva. A legtöbb háztartásban a fűtést vezérlő termosztátoknak ilyen a működési elvük.

Az on-off szabályozás gyakori a minimális idejű problémák megvalósításánál. Ha például egy járművet kell adott távolságra megállítani az aktuális helyzetétől a leggyorsabban, akkor arra optimális megoldás ha először maximális gyorsulást alkalmazunk, majd egy ponton túl maximális fékezéssel megállítjuk a kívánt pozícióban.

Másik hétköznapi példa a víz felmelegítése a legrövidebb idő alatt. Ilyenkor maximális melegítést alkalmazunk a kívánt hőmérsékletig, majd kikapcsoljuk a fűtést.

Az on-off szabályozás néha optimális szabályozás is egyben, bár leggyakrabban egyszerűsége, ezáltal könnyű implementációja miatt alkalmazzák.

Az 9.2.1.1. ábrán egy tipikus fűtési szabályozás látható, ahol szobahőmérsékletről kell 24C-ra emelni a hőmérsékletet bináris bemenetű fűtőtest segítségével. A mért hőmérséklet kezdetben erősen, később gyengébben ugyan, de túllépi a kívánt hőmérsékletet, míg a beavatkozájel meg nem jelenik.



9.2.1.1. ábra Hőmérséklet szabályozása On-Off szabályozóval

9.2.2 PID szabályozás

A PID szabályozást leggyakrabban lineáris rendszereknél használják. Egyszerű megvalósíthatósága, és széleskörű alkalmazhatósága miatt az ipari folyamatok egyik legelterjedtebb szabályozó algoritmus.

Nevét a beavatkozó jel összetevőinek rövidítéséből kapta:

- Kp: Arányos tag (Proportional)
- Ki: Integráló tag (Integral)
- Kd: Derivatív tag (Derivative)

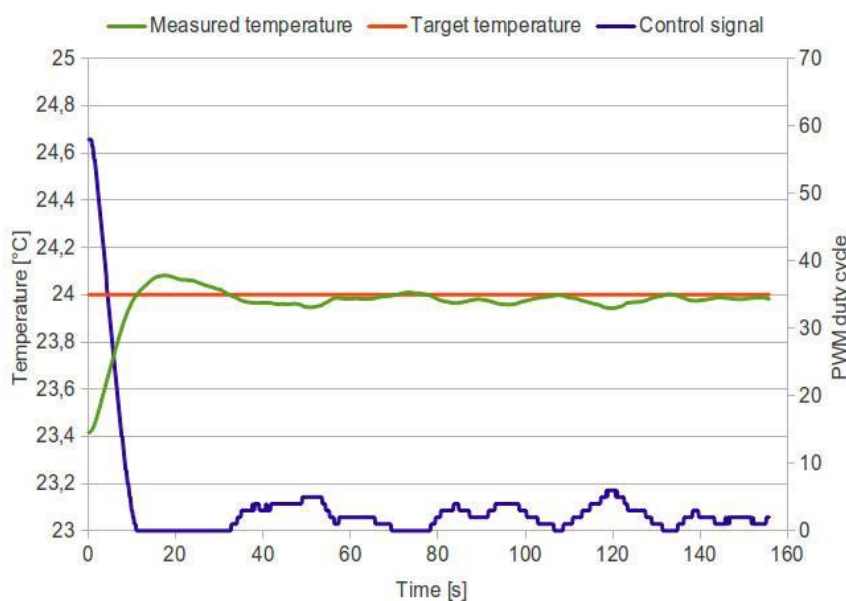
Ezen tagok összege a végrehajtójel, azaz a jelenlegi hiba, a múltbeli hiba, és a várható hiba valamilyen arányban befolyásolja a kimenetet. Megvalósítás során lehetséges hogy nem mindet használják fel, így P, PI, vagy PD szabályozókat kaphatunk.

A PID szabályozó egyetlen bemenete a hibajel ($e(t)$), kimenete pedig:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{d}{dt} e(t).$$

Ahol Kp az arányos tag, Ki az integráló tag, Kd pedig a derivatív tag súlya, melyek valós számok.

Az On-Off szabályozásnál bemutatott hőmérséklet szabályozási feladatot manuálisan hangolt PID-del is megvalósíthatjuk amennyiben van lehetőség arányos beavatkozásra. A fűtőellenállást PWM jellel lehetséges adott teljesítményen működtetni, ezért korrekten összehasonlítható a szabályozás minőség a PID esetében, ami 9.2.2.1. ábrán látható.



9.2.2.1. ábra Hőmérséklet szabályozása PID szabályozóval

PID szabályozó fejlesztésekor a három paraméterének értékét kell helyesen megválasztani. Egy általános rendszerhez, és a gyakran egymásnak ellentmondó célokat legjobban kielégítő PID szabályozóhoz annak paramétereit optimálisan megadó eljárás nem létezik. A paraméterek meghatározására hangoló (tuningoló) eljárások léteznek, amik általános esetben elfogadható szabályozásokat eredményeznek, úgymint:

- Manuális hangolás
- Ziegler-Nichols hangolás

A manuális hangolás eljárása jó kezdeti paramétereket tud adni amivel akár üzemi szabályozókat is fel lehet paraméterezni. Elsősorban olyan szabályozásoknál használható, ahol nem szempont a precíz

szabályozás, mint tipikusan a lassan befolyásolható hőmérsékletszabályozási feladatok. Az eljárás során kezdetben mindhárom paraméter értékét nullára állítjuk, majd a K_p értékét addig kell növelni, míg oszcilláció lép fel. Ezt követően az oszcillációhoz tartozó K_u értékének a felére állítjuk K_p paramétert, majd a K_i értékét addig kell növelni, hogy elfogadható idő alatt nullára csökkenjen a hiba. Utolsó lépésnek a K_d értékét kell addig növelni, míg elfogadható időre gyorsul a szabályozás beállása.

Ziegler-Nichols hangolási eljárását John G. Ziegler és Nathaniel B. Nichols ismertette az 1940-es években először. Ez az eljárás hasonlóan a manuális hangoláshoz az oszcillációt eredményező K_u paramétere meghatározásával kezdődik. Ebben az állapotban az oszcilláció periódusideje P_u , amivel a többi paraméter értéke meghatározható. Az eljárást megadták csak proporcionális, PI, és PID szabályozó típusokra is, melyekre összefoglaló paramétertáblázat a következő:

- P szabályozó esetén: $K_p = 0,5 * K_u$; $K_i = 0$; $K_d = 0$;
- PI szabályozó esetén: $K_p = 0,45 * K_u$; $K_i = 1,2 * K_p / P_u$; $K_d = 0$;
- PID szabályozó esetén: $K_p = 0,6 * K_u$; $K_i = 2 * K_p / P_u$; $K_d = K_p * P_u / 8$;

Utólagosan kézzel történő hangolásra gyakran van szükség a szabályozás kritériumai miatt. Az előzőekben leírt hangolási eljárások viszonylag kis túllövésű szabályozókhoz vezetnek, azonban speciális esetekben semekkora túllövés nem engedhető meg. Egy megmunkálógép esetében az előírt pontig szabad csak a forgácsolásnak elmennie, azon túl a munkadarab tönkremegy, így ilyen esetekben inkább kevésbé dinamikus, viszont túllövésmentes szabályozót kell alkalmazni. Az utólagos állítások során adott paraméter értékének növelésével a szabályozásra gyakorolt hatásait a következő táblázat foglalja össze:

Paraméter	Felfutási idő	Túllövés	Beállási idő	Állandó hiba	Stabilitás
K_p	csökken	növekszik	nem változik	csökken	csökken
K_i	csökken	növekszik	növekszik	csökken	csökken
K_d	nem változik	csökken	csökken	nem változik	növekszik

A fenti táblázatot úgy kell értelmezni, hogy a paramétereket a kezdeti nulla értékekről növelve vizsgáljuk a szabályozásra gyakorolt hatásuk szerint. A táblázat alapján a K_d paraméter növelésével egyre jobb szabályozót kapunk, a gyakorlatban ez csak egy korlátig lesz érvényes. A K_d növelésével a hiba változására fog hamarabb reagálni a szabályozó, azonban ez igaz lesz a mérési zajra is, így ha túl nagyra állítjuk, akkor a mérési zaj hatása erősebb lesz a szabályozó kimenetén is.

9.2.3 *Intelligens szabályozás*

Ha a PID szabályozó képességeit meghaladó szabályozóra van szükség egy feladat elvégzésére, akkor az összetettebb, nemlineáris kimenetű, úgynevezett intelligens szabályozókból érdemes választani. Segítségükkel komplex feladatok is automatizálhatóak, azonosítási, osztályozási problémák is elvégezhetőek valós időben.

Az intelligens szabályozók az alábbi főbb csoportokba sorolhatók:

- Szabályozás neurális hálózatokkal
- Fuzzy szabályozás
- Szakértői rendszerek
- Intelligens ágensek

A listában felsorolt módszerek egymástól nagyon eltérnek céljuk, és alkalmazási módjukat tekintve.

A mesterséges neurális hálózatok működését a biológiai neurális hálózatok mintájára fejlesztették ki. Építőkövei a mesterséges neuronok, melyek a bemeneteik súlyozott összegét egy aktivációs függvényen értékelik ki, és ezt az értéket továbbítják a külvilág, vagy más hasonló neuron bemenetére. Ezek a hálózatok képesek a bemeneti adatsorokat csökkentett dimenziószámú kimenetre transzformálni, így jól alkalmazhatóak osztályozásra. A hálózat tanítása során a neuronok bemeneteihez rendelt súlyértékeket állítják be. Tipikus alkalmazása, amikor zajos képeket kell kiválogatni aszerint, hogy látható-e rajta egy keresett mintázat.

A fuzzy szabályozás alapját a benne definiált szabályok képezik, melyek "Ha ___ feltétel teljesül, akkor kimenet legyen ___" formájúak, így egyszerűen megérthető, gyorsan és intuitíven bővíthető rendszert alkotnak. További előnye, hogy már két szabály felvitelével a teljes működési tartományt lehet befolyásolni, így nagyon gyors fejlesztést tesz lehetővé. Több változata létezik, melyek közül az utolsó, defuzzifikáló lépés megvalósítása tesz különbséget, elsősorban a számítási igény, valamint a folytonos bemenetre adott folytonos válasz kritériuma közötti választásban. Létezik azonban egy újabb irányzat is, ami mindkét kritériumban kedvező megítélésű, azaz integrálás művelete nélkül is képes garantálni a folytonos válasz kritériumát.

A szakértői rendszerek az emberi következtetési mechanizmust utánozzák. Általában valamilyen nyelvfeldolgozási modult is beépítenek, így képesek értelmezni a "Ha ___, akkor ___" típusú mondatokat, melyek a tudásbázisának az alapja. A következtető modullal a szakértői rendszer képes az eltárolt tudásbázist felhasználva diagnózist felállítani, így gyakran használják a szakértői rendszereket valamely szakterületen hiba detektálására és kiértékelésére a megfigyelhető tünetegyüttesből komplex rendszerek esetében.

Az intelligens ágensek olyan algoritmusok és hardverelemek összessége, mely képes saját céljainak elérése érdekében egy adott közeget érzékelni, és abba beavatkozni. A legegyszerűbb változata egyetlen mérhető fizikai paramétert érzékel és beavatkozással adott szinten tartja, míg összetettebb változata képes a külvilágot modellezni, tudásbázist felépíteni és használni, majd segítségével egyre hatékonyabban beavatkozni célja elérése érdekében.

9.3 Felhasznált irodalom:

[9.1.] Araki M.: „CONTROL SYSTEMS, ROBOTICS, AND AUTOMATION – Vol. II - PID Control”, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), 2002, elérhető: <http://www.eolss.net/ebooks/Sample%20Chapters/C18/E6-43-03-03.pdf>

[9.2.] W. Bolton: „Programmable Logic Controllers, Fifth Edition”, Newnes, 2009

[9.3.] Odd Jostein Svendsli: „Atmel's Self-Programming Flash Microcontrollers”, Atmel Corporation, 2003, elérhető: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2464.pdf

[9.4.] David Pellerin, Scott Thibault: „Practical FPGA programming in C”, Prentice Hall, 2005

[9.5.] IQ JAR: An overview and comparison of today's single-board micro computers, elérhető:

<http://iqjar.com/jar/an-overview-and-comparison-of-todays-single-board-micro-computers/>

[9.6.] National Instruments: HIL, elérhető: <http://www.ni.com/hil/>

[9.7.] Wikipedia: PID controller, elérhető: http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller

[9.8.] Jinghua Zhong: „PID Controller Tuning: A Short Tutorial”, Purdue University, 2006, elérhető:

<http://saba.kntu.ac.ir/eecd/pcl/download/PIDtutorial.pdf>

[9.9.] Ziegler, J.G and Nichols, N. B.: „Optimum settings for automatic controllers”, Transactions of the ASME, 1942

[9.10.] Wikipedia: Intelligent control, elérhető: http://en.wikipedia.org/wiki/Intelligent_control

[9.11.] P.J.Antsaklis, K.M.Passino, S.J.Wang, "An Introduction to Autonomous Control Systems," Proc of the 5 th IEEE International Symposium on Intelligent Control, pp.21-26, Philadelphia, Pennsylvania, Sept. 5-7, 1990, elérhető: <http://www3.nd.edu/~pantsakl/Publications/87-SIC90.pdf>

10 Függelék

A függelék a következő források felhasználásával készült [10.1., 10.2., 10.3.]

10.1 G programozási nyelv betűkódjai

Betűkód	Leírás
A	Abszolút vagy inkrementális pozíció beállítása az A tengelyen (az X tengely körüli forgatás)
B	Abszolút vagy inkrementális pozíció beállítása a B tengelyen (az Y tengely körüli forgatás)
C	Abszolút vagy inkrementális pozíció beállítása a C tengelyen (a Z tengely körüli forgatás)
D	Átmérő vagy sugár megadása a vágáskompenzációhoz. Esztergákon a vágásmélységének megadása.
E	Precíziós előtolás esztergákon menetvágáshoz.
F	Előtolás beállítása
G	Előkészítő betűkódok
H	Szerszámhossz eltolási értékének megadása; Inkrementális pozicionálás a C tengelyen esztergáknál
I	Körív középpontjának megadása az X tengelyen G02 és G03 parancsoknál.
J	Körív középpontjának megadása az Y tengelyen G02 és G03 parancsoknál.
K	Körív középpontjának megadása a Z tengelyen G02 és G03 parancsoknál.
L	Ciklusszám megadása; A G10 parancs által módosított regiszter megadása
M	Vegyes/kiegészítő funkciók
N	Mondat (sor) számláló;

	A G10 parancs által módosított rendszer paraméter megadása
O	Programnév
P	Paramétercímként szolgál néhány G és M kódhoz
Q	Lépcső megadása ciklikus megmunkálásnál
R	Sugár megadása íves mozgásoknál; Visszahúzás mértékének megadása ciklikus megmunkálásnál
S	Sebesség megadása, ami lehet az orsó forgási, vagy felületi sebesség
T	Szerszám kiválasztása
U	Az X tengelyhez tartozó inkrementális tengely pozícionálása esztergáknál
V	Az Y tengelyhez tartozó inkrementális tengely pozícionálása esztergáknál
W	A Z tengelyhez tartozó inkrementális tengely pozícionálása esztergáknál
X	Abszolút vagy inkrementális pozícionálás az X tengelyen
Y	Abszolút vagy inkrementális pozícionálás az Y tengelyen
Z	Abszolút vagy inkrementális pozícionálás a Z tengelyen

10.2 G-kódok és jelentésük

G-kód	Leírás	Marás (M)	Esztergálás (E)	Kiegészítő információ
G00	Pozícionálás gyorsmenttel	M	E	Ezzel a kóddal a szerszám munkadarabhoz történő pozícionálása adható meg egy egyenes mentén maximális sebességgel. A G00 öröklődő kód, addig érvényes, amíg egy másik, interpolációs parancs át nem írja.

G01	Egyenes interpoláció	M	E	A kód előtolással végrehajtott mozgások megadására szolgál, az elmozdulás szintén egyenes mentén történik, mint G00-nál. Az adatok lehetnek abszolút illetve inkrementális értékek. A mozgás sebességét, az előtolást, F kóddal lehet beállítani.
G02	Körinterpoláció óramutató járásának megfelelően	M	E	Mind a G02 és G03 kódok körinterpolációt hajtanak végre. A körinterpoláció a G17, G18, G19 parancs által kiválasztott síkban megy végbe, G02 esetén az óramutató járásával megegyező, G03 esetén az óramutató járásával ellentétes irányban.
G03	Körinterpoláció óramutató járásával ellentétesen	M	E	A G02 alapján.
G04	Várakozás adott időtartamig	M	E	Várakozási idő programozható be, általában milliszekundumban adják meg.
G05	Nagy pontosságú kontúr marása	M		A kontúr marásakor nagyobb puffert használ a vezérlő a jobb gyorsítás és lassítás eléréséhez.
G06.1	B-spline görbék (NURBS) megmunkálása	M		A kód komplex görbék és hullámok gépi kialakításához a "NURBS" (nonuniform rational B-spline) görbéket használja.
G07	Simítás kezelése	M		
G09	Pontos megállás ellenőrzése	M	E	
G10	Programozott adatbetöltés	M	E	
G11	Programozott adatbetöltés tiltása	M	E	
G12	Korong kimarása óramutató járásának	M		

	megfelelően			
G13	Korong kimarása óramutató járásával ellentétes irányban	M		
G17	XY sík választása megmunkáláshoz	M		
G18	ZX sík választása megmunkáláshoz	M	E	
G19	YZ sík választása megmunkáláshoz	M		
G20	Adatmegadás inchekben	M	E	
G21	Metrikus adatmegadás	M	E	.
G28	Programozott referenciapont felvétele	M	E	A referenciapont a szerszámgép kitüntetett pontja, amire a vezérlés könnyen rá tud állni. Helyzete a gép koordináta rendszerében paraméterekkel megadható. Ezután lehet felvenni a munkadarab koordinátáit és abszolút pozícióra állni, illetve ezt követően válnak hatássá a paraméteres végállások és a programozott munkatérbehatárolás.
G30	Másodlagos gépi referenciapontra állás	M	E	A P címen meghatározott referenciapontra küldi a szerszámgépet. A P1-4-ig a szerszámgép koordináta rendszerében paramétereken referenciapontok határozhatók meg, amelyek különböző (pl. szerszámcserehely, palettacserehely) helyzetének megadására szolgálnak. X Y Z paraméterekkel közbenső pontot lehet megadni, amin keresztül fog futni a szerszám a referenciapontra állás során.
G31	Mérés a maradék út törlésével	M		
G32	Menetvágás egy pontból kiindulva		E	Hasonlóan a G01 kódhoz azzal a különbséggel, hogy a főorsó forgása szinkronizált a menetvágásnak megfelelően.

G33	Egyenletes emelkedésű menet vágása	M		Az utasítás egyenletes emelkedésű hengeres, vagy kúpos menet vágását teszi lehetővé.
G33	Menetvágás egy pontból kiindulva		E	Hasonló a funkciója mint a G32.
G34	Változó emelkedésű menet vágása	M		
G40	Szerszámsugár-korrekció számítás kikapcsolása	M	E	G40-42: A kódokkal síkbeli alakzatok körbemarása valósítható meg. Ehhez és az alakzat pontjainak programban való megadásához, a vezérlésnek a szerszám középpontját a programozott kontúrral párhuzamosan, attól szerszámsugárnyi távolságra kell vezetnie (függetlenül az alkalmazott szerszám méretétől).
G41	Szerszámsugár-korrekció számítás balról	M	E	A G41-G42 parancsok a korrekciószámítást bekapcsolják. A korrekció mértéke: a szerszámközepppont pályája milyen távolságra haladjon a programozott kontúrtól. Számítása: a korrekciós vektorral, amely síkbeli vektor, amit a vezérlő minden mondatban újraszámol, és a programozott elmozdulásokat a mondat eleji és végi korrekciós vektorokkal módosítja. A G41, vagy G42 parancs a korrekciószámítást bekapcsolja. G41 állapotban a programozott kontúrt a menetirány szerint balról, G42 állapotban pedig jobbról követi. Az alkalmazott szerszámsugár korrekciós értéket D címen kell megadni. G-kód generáló szoftverek képesek elvégezni ezeket a korrekciókat automatikusan.
G42	Szerszámsugár-korrekció számítás jobbról	M	E	Hasonlóan mint G41.
G43	Szerszámhossz-korrekció negatív előjellel	M		G43 utasítás a végrehajtás során akár abszolút, akár inkrementálisan megadva, a kiadódó végponti koordinátához hozzáadja a H címen adott korrekciós értéket.
G44	Szerszámhossz-korrekció pozitív	M		G44 utasítás hasonlóan működik mint a G43, viszont itt a végponti koordinátából levonja a H

	előjellel			címen megadott korrekciós értéket.
G45	Szerszámeltolás növelése	M		A korrekciós értékkel növeli az elmozdulást. A G45...G48 parancsok a D kóddal kiválasztott korrekcióval hatásosak, mindaddig amíg más értéket nem állítunk be G45...G48 parancs kíséretében.
G46	Szerszámeltolás csökkentése	M		A korrekciós értékkel csökkenti az elmozdulást.
G47	Kétszeres szerszámeltolás növelése	M		A korrekciós érték kétszeresével növeli az elmozdulást.
G48	Kétszeres szerszámeltolás csökkentése	M		A korrekciós érték kétszeresével csökkenti az elmozdulást.
G49	Szerszámhossz- korrekció kikapcsolása	M		Kikapcsolja a G43 és G44 hatását.
G50	Maximális orsó sebesség megadása		E	Az S címen megadott egész értéket állítja be forgási sebességben, amit percenkénti fordulatban értelmez.
G50	Léptékezés kikapcsolása	M		
G52	Koordinátaeltolás koordinátarendszer hez	M		A kód használatával un. lokális koordináta rendszer hozható létre, mely az alkatrészprogram írását megkönnyíti bizonyos esetekben, ugyanis ekkor a paramétereket nem a munkadarab koordinátarendszerében kell megadni.
G53	Gépi koordinátarendszer kiválasztása	M	E	A gép nullpontja, azaz a gépi koordinátarendszer nullpontja, egy olyan pont az adott szer- számgépen, amit általában a gép építője határoz meg. A gépi koordinátarendszert a vezérlés a referenciapont felvétel alkalmával határozza meg. G53 hatására a szerszám abszolút koordinátákkal a gépi referenciapontot használja a program referenciapontja helyett. Szerszámcseréhez jól használható.

G54 G59	- Különböző munkadarab koordinátarendszer kiválasztása	M	E	Azt a koordinátarendszert, amelyet a munkadarab forgácsolásakor használunk munkadarab koordinátarendszernek nevezzük. Alapvetően 6 különböző munkadarab koordinátarendszert lehet definiálni a vezérlőben, de ez kiterjeszthető a G54.1 kóddal.
G54.1 P1 - P48	Munkadarab koordinátarendszer ek beállítása	M	E	További 48 koordinátarendszer definiálható a 6 alaphoz képest.
G61	Pontos megállás ellenőrzése	M	E	G64 kóddal kikapcsolható.
G62	Előtolás csökkentés sarkoknál	M	E	
G64	Folyamatos forgácsolás üzemmód	M	E	Kiiktatja a G61 kód hatását.
G70	Símitási ciklus kontúrokhoz is		E	
G71	Kontúrnagyoló ciklus		E	A G71-es ciklus Δd nagyságú fogásokkal kinagyolja a nyers darabot, $\Delta u/2$ és Δw nagyságú simítási ráhagyással.
G72	Homloknagyoló ciklus		E	A G72-es ciklus Δd nagyságú fogásokkal kinagyolja a nyers darabot, $\Delta u/2$ és Δw nagyságú simítási ráhagyással. Ez a ciklus abban különbözik a G71-es megmunkálástól, hogy a fogásvétel a Z tengely irányába esik, és a forgácsolás iránya az X tengellyel párhuzamos. Δd = fogásmélység tengelyirányban; Δu = a simítási ráhagyás nagysága X tengely irányában; Δw = a simítási ráhagyás nagysága a Z tengely irányában.
G73	Mintaismétlése nagyoló ciklus		E	
G73	Nagysebességű mélyfúróciklus	M		Csak annyira húzza vissza a szerszámot a ciklusok során, amennyire a tisztítási mérték rendszerparaméter meghatározza. Olyankor használható, amikor forgácsletörésre van szükség, de eltömődés veszélye nem áll fenn.
G74	Mélyfúróciklus		E	

	esztergáláshoz			
G74	Balmenetfúró ciklus	M		Balos menet fúrható segítségével.
G75	Horonyvágó ciklus esztergálásra		E	
G76	Finom/precíziós furatmegmunkálás maráshoz	M		A főorsó megállási pozíciója is beállítható segítségével precíziós furatmegmunkáláskor.
G76	Kiesztergálás automatikus szerszámelhúzással		E	
G80	Ciklusállapot kikapcsolása Cancel canned cycle	M	E	Minden ciklusműveletet megszakít. Marásnál a szerszám visszatér a Z szerinti kezdeti pozícióba, vagy az R szintjére G98 és G99 szerint, míg esztergálásnál általában nincs szükség erre, ugyanis G00 - G03 megszakítja a ciklusokat.
G81	Fúróciklus, kiemelés gyorsmenettel	M		Nincs beépített várakozás.
G82	Fúróciklus várakozással, kiemelés gyorsmenettel	M		A lyuk alján milliszekundumban megadott értéket várakozik a kiemelés előtt. Segítségével a furat alja szépen eldolgozottá válik.
G83	Mélyfúróciklus teljes kiemeléssel	M		Minden ciklus után kiemelkedik R szintre. Forgácseltávolításra lehet használni.
G84	Menetfúróciklus	M		A G84 a jobbmenetfúró ciklus vezérlésére szolgál.
G84.2	Jobbmenetfúróciklus kiegyenlítőbetét nélkül	M		
G84.3	Balmenetfúróciklus kiegyenlítőbetét nélkül	M		
G85	Fúróciklus, kiemelés előtolással	M		

G86	Fúróciklus, gyorsmeneti kiemelés főorsónál	M		
G87	Kiesztérgálás visszafelé, automatikus/kézi szerszámmel húzással	M		
G88	Fúróciklus, kézi működtetés talpponton	M		
G89	Fúróciklus, talpponton várakozás, kiemelés előtolással	M		Hasonló, mint G85, csak várakozás van a furat alján a visszahúzás előtt.
G90	Programozás abszolút pozícionálással	M	E	Abszolút pozíciómegadás a munkadarab koordinátarendszerében.
G91	Programozás Inkrementális pozícionálással	M	E	Pozícionálás az utoljára megadott pozíciót felhasználva referenciaként.
G92	Koordinátarendszer beállítása	M	E	
G92	Menetvágó ciklus		E	
G94	Percenkénti előtolás	M	E	A percenkénti előtolás mértéke adható meg segítségével.
G95	Fordulatonkénti előtolás	M	E	Fordulatonkénti előtolás mértékének megadása.
G96	Konstans vágósebesség- számítás bekapcsolása		E	Változó forgási sebesség számítása a konstans felületi sebesség elérése érdekében. A sebességet az S címen tárolt egész szám adja meg, jelentése láb/perc G20 esetében, vagy méter/perc G21 esetében.
G97	Konstans vágósebesség- számítás	M	E	Az S címről vett egész szám értékét, mint fordulat/perc értéket állít be a főorsó forgási sebességének.

	kikapcsolása			
G98	Visszatérés ciklusból kiindulási pontra	M		
G98	Percenkénti előtolás megadása		E	
G99	Visszatérés ciklusból R szintre	M		
G99	Fordulatonkénti előtolás megadása		E	

10.3 M kódok és jelentésük

M-kód	Leírás	Marás (M)	Esztergálás (E)	Kiegészítő információ
M00	Kötelező megállás	M	E	Nem opcionális, azaz a gép mindig megáll ha eléri ezt a kódot.
M01	Opcionális megállás	M	E	A gép csak akkor fog megállni ebben a módban, ha a gépkezelő megnyomta az opcionális megállás gombot.
M02	Program vége	M	E	A program végét jelzi. Végrehajtása implementációfüggő: lehetséges, hogy a kód elejétől fogja folytatni a futtatást. Modern vezérlők hasonlóan kezelik, mint az M30-at.
M03	Főorsó bekapcsolása óramutató járásának megfelelően	M	E	A sebességet az S címen tárolt érték határozza meg, ami lehet fordulat/perc vagy felületi sebesség és lehet metrikus vagy nem a használt G-kódok alapján.
M04	Főorsó bekapcsolása óramutató járásával ellentétes irányban	M	E	Hasonlóan M03 kódhoz, csak itt a forgási irány lesz más.
M05	Főorsó megállítása	M	E	

M06	Automatikus szerszámcsere	M	E	Sok esztergánál nincs szükség erre a kódra, mert a T címen tárolható a szerszám kódja. A működés nagymértékben függ a használt gép típusától.
M07	Ködhűtés bekapcsolása	M	E	
M08	Folyadékűtés bekapcsolása	M	E	
M09	Hűtés kikapcsolása	M	E	
M10	Osztóasztal felemelése	M		
M11	Osztóasztal leültetése	M		
M13	Főorsó bekapcsolása óramutató járásának megfelelően hűtőfolyadék bekácsolásával	M		Az M03 és M08 kódok összevonása azért, hogy kompaktabb kódot lehessen írni.
M19	Főorsó megállítása adott orientációval	M	E	Általában ciklusvezérlésekben vagy a beállítási szekcióban használják a precíz megmunkálásokhoz.
M21	X tengely tükrözése	M		
M21	Szegnyereg mozgatása előre		E	Esztergánál a forgócsúccsal történő rögzítésre használható. Hatására a szegnyereg a munkadarab felé mozdul, és folyamatos erőt fejt ki rá érintkezéskor.
M22	Y tengely tükrözése	M		
M22	Szegnyereg mozgatása hátrafelé		E	Esztergánál a forgócsúccsal történő rögzítésre használható. Hatására a szegnyereg a munkadarabtól elfelé mozdul, rögzítése megszűnik.
M23	Tükrözés	M		

	kikapcsolása			
M23	Menetletörés bekapcsolása		E	A menetkészítési ciklus végén az eszterga kése adott szögben fog eltávolodni a munkadarabtól.
M24	Menetletörés kikapcsolása		E	Az eszterga a menetkészítési ciklus végeztével derékszögben távolodik el a munkadarabtól.
M30	Program vége, M visszatérés a program elejére	M	E	Az M30 lett az általánosan elterjedt programvége kód, néhány gépen nincs is különbség az M02 és M30 között.
M41	Sebességváltás alacsony, 1-es fokozatba		E	
M42	Sebességváltás közepes 2-es fokozatba		E	
M43	Sebességváltás közepes 3-as fokozatba		E	
M44	Sebességváltás magas 4-es fokozatba		E	
M48	Főorsó túlvezérlésének engedélyezése	M	E	Az üzemeltető a kezelőfelületről átállíthatja az előtolás mértékét.
M49	Főorsó túlvezérlésének tiltása	M	E	Automatikusan meghívódik bizonyos ciklusvezérlések esetén, amikor az előtolás mértékét pontosan kell szabályozni, pl menet készítésekor.
M98	Alprogram kezdete	M	E	A P címen tárolt számú alprogramot hívja meg. PI: "M98 P0002" hatására meghívódik az O0002 program.
M99	Alprogram vége	M	E	Hatására a vezérlés visszatér arra a mondatra ahonnan meghívódott, de a P címen tárolható másik mondat címe is, így kódrészek átugorhatóak a hívó kódból, és végtelen ciklus is készíthető.

10.4 Felhasznált irodalom

[10.1.] Dr Köves Gyula: „Forgácsoló megmunkálás CNC vezérlésű szerszámgépen - MKC 500 megmunkálóközpont és Mitsubishi Meldas Mo CNC vezérlés”, Miskolci Egyetem, 2004, elérhető: <http://mek.niif.hu/04700/04766/04766.pdf>

[10.2.] NCT Ipari Elektronikai kft.: „NCT 99M NCT2000M Marógép és megmunkáló központ vezérlő programozási leírás”, 2002, elérhető: http://www.nct.hu/pdf/NC_Documents/Magyar/Maro/magprm.pdf

[10.3.] Wikipedia: G-code, elérhető: <http://en.wikipedia.org/wiki/G-code>