

Bálint Roland, villamosmérnöki BSc hallgató, 4. évfolyam

MŰSZERFALI LÉPTETŐMOTOR FORGATÓNYOMATÉKÁNAK MÉRÉSE

Témavezető: Fodor Attila, egyetemi tanársegéd

Műszaki Informatikai Kar, Villamosmérnöki és Információs Rendszerek
Tanszék

Pannon Egyetem

Intézményi Tudományos Diákköri Konferencia

2012



Tartalom

1. Bevezetés.....	5
2. Forgatónyomaték mérés	7
2.1. Mechanikus forgatónyomaték mérés	7
2.1.1. Nyomatékmérés rugóval	7
2.1.2. Nyomatékmérés fékkel (Prony-fék)	8
2.1.3. Légörvény / Légsavar fék	9
2.1.4. Hidraulikus fék	10
2.2. Elektronikus forgatónyomaték mérés	10
2.2.1. Nyomatékmérés torzulásméréssel	10
2.2.2. Nyomatékmérés villamos forgógéppel.....	15
2.2.3. Örvényáramú nyomatékmérés.....	16
2.3. Jelenleg kapható nyomatékmérők, és korlátaik	17
3. Léptetőmotorok	19
3.1. Léptetőmotor fajtái	19
3.2. Léptetőmotor vezérlése (általános).....	20
3.2.1. Fullstep (teljes léptetési) mód	20
3.2.2. Halfstep (fél léptetési) mód.....	21
3.2.3. Microstep (mikro léptetési) mód.....	22
4. Használt léptetőmotor	23
4.1. Léptetőmotor vezérlése.....	26
5. Felhasznált eszközök.....	28
5.1. Kódtárcsa és optikai enkóder.....	28
5.2. Méréshez használt örvényáramú fék	30
5.2.1. A mérőberendezés részei.....	30
5.2.2. Tehetetlenségek számolása	31
6. Vezérlőáramkör	36
6.1. Vezérlőáramkör részei.....	37

6.1.1. Vezérlő IC-k tápellátása (5V előállítás)	37
6.1.2. Léptetőmotor állítható feszültségű tápellátása	38
6.1.3. Léptetőmotor vezérlő IC	39
6.1.4. DC motor vezérlése	40
6.1.5. DC motor fordulatszám jelének formázása	41
6.1.6. Mikrokontroller	42
7. Mikrokontroller és vezérlő program.....	42
7.1. A program folyamatábrája	43
7.2. Vezérlőjel előállítása	44
7.3. Program működése	48
8. Mért adatok és mérési módszer értékelése	49
9. Összefoglalás.....	51
10. Felhasznált irodalom, és források.....	52

1. Bevezetés

Napjainkban a digitális eszközök térhódítása elérte az autóipart is. Az ipari kommunikációs buszok megjelenésével több szenzor is tud ugyanazon buszrendszeren kommunikálni a központi számítógéppel, ezzel lecsökkentve a vezetékek számát. Ezek a rendszerek kiszorították a különböző mechanikus megoldásokat is. Ilyen buszrendszereken keresztül vezérlik már az elektromos ablakemelőt, az elektromos gázpedált, elektromos kormányzást, valamint a műszerfalak visszajelző fényeit és mutatóit.

Azonban mégse lehet mindent teljes mértékben elektronikára cserélni. Mindenhol meg lehet találni még a mechanikát villamos forgógépek formájában. Például az ablakok mozgatását, üzemanyag pumpálását a mai napig ilyen motorok végzik, csak a vezérlésükben van az elektronikának szerepe. Az egyik legfontosabb ilyen „elektro-mechanikus” szerkezettel viszont a gépkocsivezetők minden alkalommal találkozhatnak, amikor volán mögé ülnek, és ez a szerkezet nem más, mint a műszerfalon megtalálható visszajelző mutató. A mutatókat régen spirállal és mágnessel (sebesség és fordulatszám), elektromágnessel (üzemanyagszint) valamint bimetallal (hűtővíz hőmérséklet) mozgatták. Ma már az egyszerűség és kevesebb jelvezeték miatt mindet léptetőmotorokkal mozgatják (kivéve az LCD kijelzős műszerfalakban).

A léptetőmotoros mozgatás előnye, hogy csak a vezérlőjelének követésével a motor állása nyomon követhető minden szenzor nélkül. Ez az előny azonban hátrány is. A pontos nyomon követéshez ismernünk kell a kiindulási helyzetet. A dolgozat témája is ennek a problémának az egyik megoldásához kapcsolódik.

Ezeket a motorokat az elektronika indításkor lenullázza, visszafelé forgat rajta 10° -ot (nekihajtja a végállás ütközőnek), de ez csak akkor megoldás, ha az előző maradék hiba a lépésvesztések miatt kisebb volt, mint ez a 10° . Az elektronika felé semmilyen visszajelzés nincs a mutató aktuális helyzetéről, csak a vezérlőjel lépéseinek a követése. Ha működés közben egy ilyen motor lépést veszít, akkor a sofőrt félretájékoztatja, ami az autó meghibásodásával járhat (túlmelegszik a hűtővíz), autóleállással (kifogy az üzemanyag), vagy esetleg akaratlan sebességtúllépéssel. Tehát, ha ki tudnánk szűrni az olyan léptetőmotorokat, amik hibát okozhatnak, azaz lépést veszíthetnek, elkerülhető az ilyen típusú hiba. Ennek ellenőrzésére le kell mérni a léptetőmotorok forgatónyomatékát.

Mivel műszerfalba szerelt motorról van szó, ami csak könnyű műanyag mutatót mozgat, így mind a mérete, mind az ereje kicsi. A gyártó által kiadott adatlap szerint a mérni kívánt paramétereknél ($200^\circ/\text{másodperces}$ tengelysebességnél) ez a forgatónyomaték $1,6\text{mNm}$, aminek a méréséhez a jelenlegi kereskedelemben kapható nyomatékmérő berendezések nem

felelnek meg. Ezért ki kellett fejlesztenünk egy mérési módszert, amely megfelelő pontosságú eredményt szolgáltat. Megvizsgáltunk több lehetséges mérési elvet és ezek közül az örvényáramú fékre esett a választásunk a léptetőmotor teszteléséhez.

A léptetőmotor nyomatékának a mérését a gyártó specifikációja alapján kell elvégezni. A mérés során a legnagyobb probléma az, hogy rendkívül kicsi (1,6 mNm) nyomatékkal rendelkezik a léptetőmotor. A specifikációban szereplő feltételek mellett ilyen kicsi nyomatékot nem lehet megmérni a piacon kapható eszközökkel, ezért saját tesztelő berendezést kellett tervezni és építeni. A motortesztelő berendezéshez meg kellett terveznünk és építenünk az örvényáramú féket és az elektronikát és implementálni kellett a vezérlőszoftvert is.

Dolgozatom témája ezen probléma megoldásának a bemutatása, melyben szó lesz a különböző nyomatékmérési módszerekről és azok korlátairól, a léptetőmotorok tulajdonságairól és vezérlésükről, a mérni kívánt léptetőmotor sajátosságairól, a felhasznált eszközökről és a kidolgozott mérési eljárásról, valamint zárásként a kész berendezéssel történt mérési adatok kiértékeléséről.

2. Forgatónyomaték mérés

A meghajtásokhoz használt motoroknak a hatásfokon, a fordulatszámon, vagy a gép típusán kívül az egyik legfontosabb paramétere a forgatónyomaték, ami a hasznos munkát végzi. A forgatónyomaték számolható a motor tengelyteljesítményéből is, de műszerekkel is mérhető. A teljesítmény és forgatónyomaték mérésére szolgáló gépeket összefoglaló néven fékpadoknak nevezzük. Erre a célra kapható mechanikus és elektronikus nyomatékmérő is.

2.1. Mechanikus forgatónyomaték mérés

Mechanikusan lehet nyomatékot mérni rugóval, fékkel, és közegellenállással [1].

2.1.1. Nyomatékmérés rugóval

A rugós erőmérőket inkább kisebb erők mérésére használják, de nagyobb rugók használatával nagy erőket is lehet mérni. Az erő és az erőkar ismeretében a nyomaték már számolható is.

Az erőhöz ismerni kell a használt rugó direkciós állandóját:

$$[D] = \frac{N}{m}.$$

Ezzel a megnyúlás ismeretében számolható az erő:

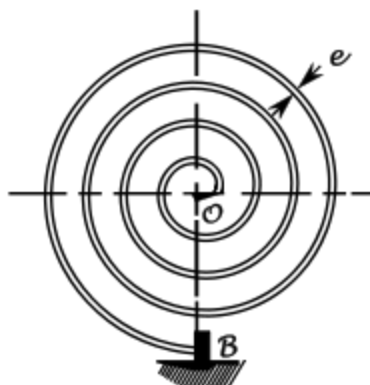
$$F = -D \cdot \Delta l_r ,$$

ahol Δl_r a rugó megnyúlása méterben. Ebből az adatból számolható a forgatónyomaték az erőkar ismeretében:

$$M = F \cdot l ,$$

ahol F az előzőekben megkapott erő nagysága, és l az erőkar hossza. Összeírva egy képletbe:

$$M = -D \cdot \Delta l_r \cdot l$$



1. ábra
Spirál rugó

Az első ábrán egy ilyen célra használható spirálrugó látható, melynek közepére lenne rögzítve a léptetőmotor tengelye, és úgy tekerné fel a rugót. Ennek a nyomatékmérési módszernek a hátránya, hogy a rugó nem nyújtható tartós alakvesztés nélkül a végtelenségig, tehát a műszer csak kis tartományok között képes mérni, és nagy teljesítményeknél a nagy rugóállandójú rugók miatt gyorsan változik a tengelyre eső ellenirányú nyomaték, tehát elég pontatlan. Esetünkben ez a mérési módszer azért nem járható út, mivel a léptetőmotor nem tud körbefordulni, tehát mielőtt behelyezzük a motort a helyére manuálisan kéne visszatekerni a kezdeti ütközőhöz, ami sok felesleges időt venne el, ha kellően sok mérést akarunk elvégezni.

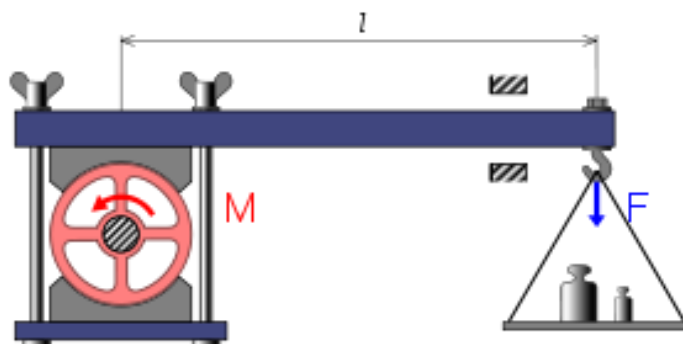
2.1.2. Nyomatékmérés fékkel (Prony-fék)

Nevét feltalálójáról Gaspard de Prony (1755-1839) francia matematikusról és mérnökről kapta, aki a kezdetben használt nyomatékmérőt fejlesztette tovább. Addig úgy mérték az erőt, hogy a gép tengelyére egy tárcsát erősítettek, azon átvettek egy kötelet. A kötel egyik végét befogták, a másik végére pedig súlyokat helyeztek. A gép húzni kezdte a súlyokat, melyek súrlódásából adódó erő fékezőnyomatékot fejtett ki. Folyamatosan növelték a súlyokat addig, míg a gép fordulatszáma nem kezdett csökkenni. Ekkor elérte a gép nyomatékát a súrlódási erőből származó fékezőnyomaték, és leolvasták a súly értékét, amiből számolták a nyomatékot:

$$M = F \cdot r ,$$

ahol M a nyomaték, F a súlyokból származó erő és r a tárcsa sugara.

Prony ezt a módszert fejlesztette tovább oly módon, hogy a tengelyt fékezte fékpofákkal, melyre egy erőkar és súlyok segítségével ellentétes irányú nyomatékot fejt ki (2. ábra).



2. ábra
Prony-fék

Ez a módszer úgy működik, mint egy átlagos mérleg. A súlyokat úgy kell megválasztani, hogy az erőkar a meghatározott helyzetben legyen. A fékpofákat az egyenletes fékerő elérése miatt kenni kell. Ennél a mérésnél az alábbi képlettel számolható a nyomaték értéke:

$$M = F \cdot l ,$$

ahol M a nyomaték, F a súlyokból származó erő és l az erőkar hossza.

Esetünkben ez az út sem járható szintén a léptetőmotor korlátai miatt (310°-os maximális elfordulás), mivel nincs elég idő a súlyt, és azzal a forgatónyomatékot változtatni.

2.1.3. Légörvény / Légsavar fék

Ez a fajta mérés inkább a kisteljesítményű és nagy fordulatszámú motoroknál elterjedt. A motort lerögzítik és a tengelyére egy állítható lapátszögű légsavart helyeznek, melynek állításával változik a légellenállás és ezzel a motorra kifejtett lassító nyomaték ereje is.

Jelen esetben ez a mérési módszer kivitelezhetetlen, mert a sem a fordulatszámunk (200°/sec=33,333 RPM) sem a motor mechanikája nem teszi lehetővé (maximum 310°-os elfordulás) az e módon való mérést.

2.1.4. Hidraulikus fék

Ez hasonló elven működik, mint az előbb leírt légörvény vagy légesavar fék, annyi különbséggel, hogy itt folyadékot áramoltat (pumpál) a motor, és nem a levegőt. Ezzel a változtatással már kisebb fordulatszámot és nagyobb nyomatékot (teljesítményt) is lehet mérni. Több fajtája is létezik (hidrodinamikus és hidrosztatikus, nyílt és zárt), de mivel a működési elvük hasonló, és a hidrodinamikus kamrás megoldás terjedt el, így a következőkben csak ez kerül bemutatásra.

A hidraulikus fékpadok egyik fontos feltétele, hogy ne legyen gőzképződés és lerakódás. Tehát ha folyadéknak vizet használunk, akkor ügyelni kell arra, hogy a kilépő folyadék hőmérséklete ne legyen 50-60°C-nál nagyobb.

Az ilyen vízfékpadokkal létrehozott nyomaték az alábbi képlettel számolható:

$$M = k \cdot \rho \cdot D^5 \cdot n^2 ,$$

ahol M a nyomaték értéke, k a fékpad (műszer) állandó, D a forgórész külső átmérője, n a fordulatszám, ρ a folyadék sűrűsége.

A léptetőmotor méréséhez ez a megoldás ugyan azon okok miatt nem használható, mint az előző módszernél.

2.2. Elektronikus forgatónyomaték mérés

A megfelelően paraméterezett és megvalósított elektronikus nyomaték (teljesítmény) mérés pontosabb eredményt ad, mint a mechanikai, a számítógépes és mikrokontrolleres vezérlések és mintavételezések miatt pedig egyszerűen naplózható, és a legkisebb ingadozások is jól megfigyelhetők a nagy mintavételezési sebesség miatt. A mai elektronikus eszközök sebessége és érzékenysége lehetővé teszi az egyes eseményekre való gyors reakciót (jelen esetben a lépésvesztés detektálását), és a paraméterek finom állítását, amikkel még jobban pontosítható a mérési eredmény.

2.2.1. Nyomatékmérés torzulásméréssel

Torzulásmérésnél vagy a tengely csavarodásának mértékét mérjük, vagy a tengelyt valamilyen módon (pl. rugóval) összekötjük egy adott paraméterekkel rendelkező testtel, és annak a deformálódását mérjük. Mindkét esetben a torzulás mértéke szemmel alig észrevehető, mivel mind a tengely mind a test általában fémből készül, tehát ebből kifolyólag egy bizonyos erőhatás felett rugalmatlan deformálódás megy végbe rajtuk, ami nagyban befolyásolja a mérést. Egy ilyen deformálódás után vagy

újralibrálhatjuk a műszert, vagy rosszabb esetben ki is lehet dobni. Ezeknek a torzulásoknak a mérésére nyúlásmérő bélyeget vagy más néven mérőcellát használnak [2].

Leggyakrabban ez a bélyeg egy rugalmas szigetelőre felvitt vékony vezetőrétegből áll, melyet a speciálisan erre célra használt ragasztóval a vizsgálandó testre ragasztanak. Ha a test deformálódik, akkor vele együtt a bélyeg is, és ezzel nyúlik a vezetőréteg, tehát változik az ellenállása is. Ezt az ellenállás megváltozást általában Wheatstone-híddal mérik, ami kezdeti állapotban egy kiegyenlített híd. Az ellenállás változás a bélyeg deformálódásával, nyúlásával arányos. Az ellenállás változásával a híd kiegyenlítetlenné válik, ezzel feszültség különbség jelenik meg a kimenetek között.

A nyúlásmérő bélyegeket a széles skálán mozgó méréshatáruknál fogva előszeretettel használják. Megtalálhatóak a digitális konyhai mérlegektől kezdve (pár száz grammos mérőhatárral és tized grammos pontossággal) a teherautók tengelyterhelését mérő cellákig bárhol (tonna nagyságrendű súlyok mérésére). Az érzékenységét és méréshatárát a test paramétereivel lehet befolyásolni, amire ráragasztják. Ragasztásnál nagyon oda kell figyelni, mert a legkisebb ragasztási hiba is meghamisíthatja a méréseket.

Ellenállásának számolása:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A},$$

ahol R az ellenállás, ρ a fajlagos ellenállás, l a vezető hossza és A a vezető keresztmetszete.

A megnyúlás alatt a relatív ellenállás megváltozás a hosszváltozással leírva:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A}, \text{ ebből levezethető: } \frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta l}{l},$$

ahol Δl a hossz, a $\Delta \rho$ a sűrűség, a ΔA a keresztmetszet és ΔR az ellenállás megnyúlás után, valamint k a bélyegre jellemző bélyegállandó.

Az $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ tagot nevezik fajlagos nyúlásnak.

A keresztmetszet változását kifejezhetjük a fajlagos nyúlással:

$$\frac{\Delta A}{A} = -2\mu\varepsilon,$$

ahol μ a Poisson tényező.

Ezt behelyettesítve a következőt kapjuk:

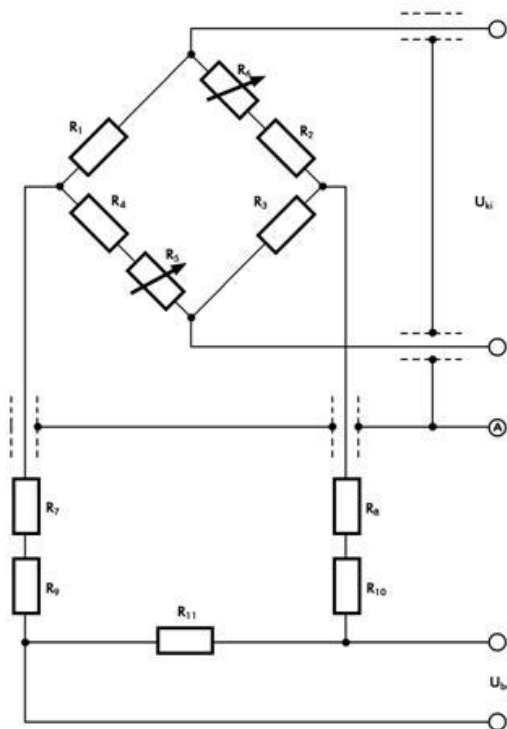
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \varepsilon(1 + 2\mu)$$

Ezekből az egyenletekből már kifejezhető a nyúlásmérő bélyeg fontos paramétere, a bélyegállandó:

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\varepsilon} + 1 + 2\mu$$

Ez a bélyegállandó általában 2 és 2,7 közötti érték, de ez nagyban függ a használt fém (ötvözet) tulajdonságaitól.

A hőmérséklet, mint minden elektronikai berendezésnél, befolyásolja a mérést. Ez a hiba két részből tevődik össze. Az egyik a vezetőréteg ellenállása a hőmérséklet változásával változik, a másik pedig, hogy a test, amire felragasztottuk szintén a hőmérsékletváltozás hatására megnyúlik, illetve összemegy, ezzel deformálva a bélyegünket, és hamisítva a mérési eredményt. Ezt a hatást a megfelelő bélyeg kiválasztásával kompenzálhatjuk. A bélyeg hőmérséklet okozta ellenállás változását több konstantán és karma ötvözetből készült bélyeg automatikusan kiegyenlíti. A másik megoldás e problémák kiküszöbölésére az, hogy négy azonos bélyeget kötünk Wheatstone-hídba oly módon, hogy kettő felragasztott és kettő nem felragasztott bélyegből alakítjuk ki. Ebben az esetben arra kell odafigyelni, hogy a négy bélyeg hőmérséklete megegyezzen. A következő, 3. ábrán egy Wheatstone-hídba kapcsolt mérőcella látható, ami húzásra és nyomásra is érzékeny, valamint alul a hőmérsékletkompenzáláshoz, és beállításhoz szükséges ellenállások.

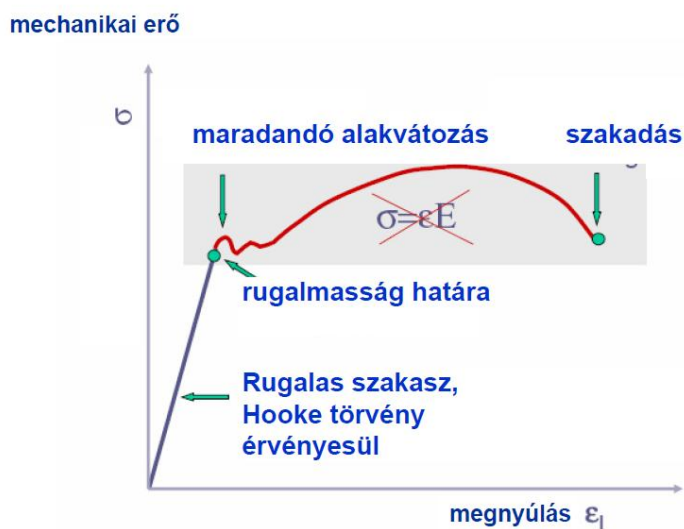


3. ábra

Hőmérsékletkompenzált, Wheatstone-hídba kötött mérőcella

A nem hozzáértő ragasztás, a deformálódó test és a hozzá hő tágulásban megegyező bélyeg kiválasztása nagyban befolyásolhatja a mérést.

A Hook-törvény szerint: „egy rugalmas test alakváltozása arányos azzal az erővel, mely az alakváltozást okozza”. A 4. ábrán látható a Hook-törvény alkalmazása a mérőcellára.



4. ábra

Hook-törvény

A nyúlásmérő bélyegeknek több fajtája is van. Létezik olyan, amelyik csak egy tengelyen észleli a torzulást, de van kéttengelyes, sőt van, ami három irányban is észleli a torzulást. A bélyegek különböző elrendezései az 5. ábrán látható.



5. ábra

Nyúlásmérő bélyegek kialakításai

Ez a megoldás megvalósítható lenne a léptetőmotor nyomatékának a mérésére, ha egy kellő paraméterekkel rendelkező mérőcellát használnánk. A tanszéken található mérőcellával és mérő erősítővel elvégzett kísérletek miatt mégsem ezt a megoldás választottuk, mivel a cellán keresztülhajtott áram melegítette azt, és így a bekapcsoláskor nullára beállított erősítő terhelés nélkül az üzemi hőmérsékletre beállítás után nem nulla értéket mutatott. Beállítás utáni újra beállítás után már nem változott az érték, de a legkisebb hőmérsékletváltozásnál (pl. ráfújással hűtés) ismét eltérés mutatkozott. Összefoglalva ez a mérési módszer bekapcsolás után 20-30 perc múlva éri el az üzemi állapotát, addig mérési hibákkal lenne terhelve az amúgy is precizitást megkívánó mérés, valamint csak olyan helyen használható pontosan, ahol beállítás és nullázás után nincs hőmérsékletváltozás és légmozgás sem.

A tengely torzulásmérésére van egy másik mérési módszer is. Ilyenkor a tengelyre erősítenek egy rezgőkört tartalmazó közbenső betétet, aminek a másik felét egy fékezhető tengelyre fogatnak fel. Amikor fékezik a tengelyt a közbenső betét torzul, aminek a hatására a rezgőkör elhangolódik. Ezt a frekvenciaelhangolódást mérve és a betét paramétereit ismerve számolható a nyomaték. Ezt a megoldást nagyobb teljesítményeknél használják.

2.2.2. Nyomatékmérés villamos forgógéppel

A villamos forgógépek használhatóak fékezésre. Ennek három módja van [9]:

- áram-visszatáplálással (generátoros fékezés)
- ellenállással való fékezés
- ellenáramú fékezés (ellentétes irányú gerjesztő áram)

Áram-visszatáplálásnál a generátor kapcsaira fogyasztót kapcsolunk, ami miatt a generátor teljesítményt vesz fel a tengelyén, így fékezi a mérni kívánt motor tengelyét. Itt a lassító nyomaték egyenesen arányos a fordulatszámmal és $n=0$ fordulatszámnál a fékezőnyomaték $M=0$.

Másik esete az áram-visszatáplálásnak, amikor a mérendő motor tengelyére nem generátort, hanem motort kötünk, amit szintén meghajtunk. Ebben az esetben csak akkor fékeződik a mérni kívánt motor tengelye, ha az a másik motort annak üresjárási fordulatszámánál (n_0) nagyobb fordulatszámmal forgatja meg. Ebben az esetben is lineárisan változik a nyomaték a fordulatszám függvényében, de itt nem $n=0$ fordulatszámnál lesz $M=0$, hanem $n = n_0$ -nál.

Ellenállással való fékezésnél az ellennyomatékot kifejtő gép kapcsain csak ellenállások találhatók, tehát nincs rákapcsolva semmilyen hálózatra. Ilyenkor a keletkező teljesítményt teljes mértékben elfűtjük az ellenállásokon. Ez a módszer nem gazdaságos. Itt $n=0$ -nál $M=0$, és a fékezőnyomaték egyenesen arányos a fordulatszámmal. Azonos fordulatszámnál a fékezőnyomatékot az ellenállás csökkentésével lehet növelni, mivel kisebb ellenálláson nagyobb áram folyhat, ami következtében a gerjesztő áram is nagyobb lesz, ami növeli a nyomatékot. A legnagyobb fékezőnyomatékot akkor érhetjük el, ha a motor kapcsait rövidre zárjuk, de ekkor ügyelni kell, hogy a motor gerjesztésén ne folyjon a maximális áramnál nagyobb, tehát ezt a módszert csak egy bizonyos fordulatszám alatt szabad használni.

Ellenáramú fékezésnél a fékező motor ellenkező irányban van bekötve, tehát igyekezne megfordítani a mérendő motor forgásirányát. Ez a leggazdaságtalanabb megoldás, de cserébe kis fordulatszámon is nagy fékezőnyomaték érhető el, valamint csak ennél a megoldásnál lehet megállásig fékezni a mérendő motort. Ebből következik, hogy $n=0$ -nál $M \neq 0$.

2.2.3. Örvényáramú nyomatékmérés

Ennél a fékezési, nyomatékmérési módszernél a fékezőerőt az álló- és forgórész között létrejövő mágneses erők hozzák létre [15, 16].

A leggyakrabban használt módszer, hogy az állórészen található tekercsekkel elektromágneses teret hozunk létre, melynek nagyságát a tekercseken átfolyt áram nagyságával lehet szabályozni. Ebben a mágneses térben forog a fékezendő fogazott tárcsa, ami a mérendő motor tengelyére van felszerelve. Ez a tárcsa fluxusingadozást okoz, melynek hatására mind az állórészben, mind a forgórészben örvényáramokat hoz létre, melyek kioltani próbálják az őket létrehozó erőket, és mivel az állórész nem mozog, így a forgórészt fogja lassítani ez az erő. A nevében is benne van, hogy örvényáramokkal fékezünk, de azt tudjuk, hogy ahol áram folyik ott általában teljesítményveszteség is van, ami hővé alakul az ellenállásokon, jelen esetben a forgó- és állórészen, tehát nagy teljesítmények mérésénél gondoskodni kell a megfelelő hűtésről is.

Ez a mérési módszer a viszonylag egyszerű digitalizálás, fékerő szabályozás és gyorsaság miatt már megfelelne a léptetőmotor forgatónyomatékának méréséhez, de mivel alacsony fordulatszámon forog csak a léptetőmotor, így viszonylag nagy gerjesztő tekercsre lenne szükség, amit nagy árammal kellene gerjeszteni.

A mérési elvet átgondolva, és némi utánajárás után arra a következtetésre jutottunk, hogy az álló elektromágneseket lecseréljük forgó állandó mágnesekre, és a fogazott tárcsát egy alumínium perselyre. Ha a mágnes kellően erős, és elég gyorsan forgatjuk az alumínium perselyben, akkor el lehet érni vele a kellő fékezőnyomatékot. Ez a megoldás annyiból előnyösebb, hogy a mágnest forgathatjuk DC motorral, aminek a hatásfoka jobb, mint az egyen árammal gerjesztett elektromágnes [7], mivel a hővé alakuló teljesítmény rajta:

$$P = I^2 \cdot R ,$$

tehát az áram négyzetével arányos, ami a gerjesztés növelésével nagyon megugorhat, valamint bizonyos teljesítmény felett gondoskodni kell az elektromágnesek hűtéséről is. Ezzel szemben a DC motornál a teljesítmény nagy része mozgási energiává alakul, így azt nem kell hűtenünk. Másik előnye az állandó mágneses megoldásnak, hogy míg az elektromágnesnél a gerjesztő áram nagyságát kell szabályozni és mérni, ami tekercsekről lévén szó nem változhat ugrásszerűen, addig a DC motor fordulatszámát

lehet PWM jellel szabályozni [11], és a fordulatszámának mérése is megvalósítható egyszerű eszközökkel, például infravörös LED és foto tranzisztor párosításával.

A mérés során az előbb említett állandó mágneses és alumínium hüvelyes megoldást használjuk, aminek a paraméterei és számolásai a „*Méréshez használt örvényáramú fék*” című részben kerülnek ismertetésre.

Néhány, eddig említett nyomatékmérő berendezés fékezőnyomaték és fordulatszám összefüggéseit az alábbi, 1. táblázat foglalja össze.

Rendszer	Állítási lehetőség	Erő-fordulatszám összefüggés
mechanikus	fékerő (fékpofák szorítása)	$M \approx \text{állandó}$
pneumatikus	fojtásállítás, lapátszög állítás	$M = k \cdot n^2$
hidrodinamikus	fojtásállítás, lapátszög állítás	$M = k \cdot n^2$
örvényáramú	gerjesztő áram, DC motor fordulatszám	$M = k \cdot (1 - e^{-n})$

1. táblázat

Nyomatékmérő módszerek összehasonlítása

2.3. Jelenleg kapható nyomatékmérők, és korlátaik

Hogy miért is van szükség egy új nyomatékmérő berendezésre, ha a kereskedelmi forgalomban is kapható nem egy ilyen nyomatékmérő műszer?

A probléma a legtöbbel az, hogy mechanikusak, mivel az a legtöbb esetben elég is, de esetünkben, mint azt látni fogjuk a léptetőmotor mechanikai korlátai nem engedi meg, hogy ilyen műszert használjunk. Az emberi reakció idő miatt nem lehet pontosan leolvasni, hogy mikor is vesztett lépést a motor, és elektromos jelekké alakítani is elég nehéz.

A 6. ábra egy ilyen mechanikus nyomatékmérő család adatait tartalmazza. Habár a léptetőmotor forgatónyomatéka a mérési tartományon belül van, és a felbontása is elfogadható, mégsem szerencsés használni, mivel ideális esetben a mérni kívánt erő a mérési tartomány 50 és 75%-a közé esik, esetünkben pedig 35%-nál van.

Accuracy ±2%

S.I. MODEL		CAPACITY [cN·m]		METRIC MODEL		CAPACITY [gf·cm / kgf·cm]		MEMORY POINTER		DIMENSION [mm]					WEIGHT [kg]	American MODEL	CAPACITY [ozf·in] [lbf·in]	
										CHUCK GRIP		BODY					MIN~MAX	
WITH MEMORY POINTER		MIN~MAX GRAD.		MIN~MAX GRAD.		MIN~MAX GRAD.		FRONT	SIDE	L*	D	d	D ₁	L ₁	MIN~MAX	GRAD.		
ATG045CN	—	0.05~0.45	0.01	—	5~45	gf·cm 1	—	—	—	—	—	—	—	—	0.06~0.6	ATG06Z-S		
ATG09CN	ATG09CN-S	0.1~0.9	0.02	90ATG-S	10~90	10~90	2	—	—	—	—	—	—	—	0.2~1.5	ATG1.5Z-S		
ATG1.5CN	ATG1.5CN-S	0.2~1.5	0.02	150ATG-S	20~150	20~150	2	—	—	—	—	—	—	—	0.3~2.4	ATG2.4Z-S		
ATG3CN	ATG3CN-S	0.3~3	0.05	300ATG-S	30~300	30~300	5	—	—	90	43.5	φ1~φ6.5	35	51	0.18	ATG4.5Z-S		
ATG6CN	ATG6CN-S	0.6~6	0.1	600ATG-S	60~600	60~600	10	—	—	—	—	—	—	—	—	ATG9Z-S		
ATG12CN	ATG12CN-S	1~12	0.2	1200ATG-S	100~1200	100~1200	20	—	—	—	—	—	—	—	—	ATG18Z-S		
ATG24CN	ATG24CN-S	3~24	0.5	2400ATG-S	300~2400	300~2400	50	—	—	—	—	—	—	—	—	ATG36Z-S		
BTG15CN	BTG15CN-S	2~15	0.2	1.5BTG-S	0.2~1.5	kgf·cm 0.02	0.02	OPTION	STANDARD	—	—	—	—	—	—	1.5BTG-A-S		
BTG24CN	BTG24CN-S	3~24	0.5	2.4BTG-S	0.3~2.4	kgf·cm 0.05	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	2.4BTG-A-S		
BTG36CN	BTG36CN-S	4~36	0.5	3.6BTG-S	0.4~3.6	kgf·cm 0.1	0.1	—	—	118	64.2	φ1~φ8.5	52	66	0.52	3.6BTG-A-S		
BTG60CN	BTG60CN-S	6~60	0.1	6BTG-S	0.6~6	kgf·cm 0.1	0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
BTG90CN	BTG90CN-S	10~90	0.1	9BTG-S	1~9	kgf·cm 0.1	0.1	—	—	—	—	—	—	—	—	9BTG-A-S		
BTG150CN	BTG150CN-S	20~150	2	—	—	—	0.2	—	—	—	—	—	—	—	—	15BTG-A-S		

Chuck for ATG

CATALOG No.

322 (PLASTIC)

321 (STEEL)

CAPACITY

[cN·m]

MIN~MAX GRAD.

0.05~0.45 0.01



Plastic chuck

6. ábra
Mechanikus nyomaték-mérők

Elektronikus nyomaték-mérőt, aminek a paramétereit megfelelnek a mérés elvégzéséhez nem sikerült találni, pedig a digitalizáláshoz és a pontos, gyors mérés elvégzéséhez ez lenne az ideális választás, tehát még egy ok, hogy miért kell egy ilyen kis mérési határokkal rendelkező mérőt tervezni és kivitelezni.

3. Léptetőmotorok

Ezeknek a motoroknak a hatalmas előnye, hogy akkora terhelésnél, amit még a motor elbír, és megfelelő vezérlés hatására a tengely egy meghatározott pozícióba fordul át, tehát a tengely helyzete nyomon követhető szenzorok nélkül is, ha ismerjük a kiinduló helyzetet. Ezeket a motorokat olyan helyen használják elsősorban, ahol előállítható a megfelelő digitális vezérlés és ahol fontos a pontos elfordulás vagy helyzetváltoztatás. Léptetőmotorokat használnak a számítógépekben (nyomtató, scanner, floppy, optikai meghajtók [CD, DVD, Blu-Ray], winchester), ipari termelésben (kvarcórák mutatója, autó műszerfalakban) és a modellezésben is. Több előnye is van a léptetőmotoroknak a többi motorhoz képest:

- A lépések utáni beállási hibák (általában 1-5% a maximális nyomatékuk alatt) nem adódnak össze, így minden lépés után tartja ezt a pontosságot, és ehhez **nem kell szenzorokat** használni.
- Körülbelül **300W-os teljesítményig olcsóbbak**, mint a többi, erre a célra megfelelő szenzoros megoldások
- **Nincs benne kommutátor**, tehát a szénkefe kopása nem csökkenti az élettartamát. **Ezáltal megbízható, és a hatásfoka is jobb.** Megfelelő csapágyazással élettartama jól megnövelhető.

Alkalmazás előnyei:

- Kommutátor nélküli, így tartósabb (a csapágy minősége határozza meg az élettartamát)
- Pontos pozícióba álláshoz nem kell szenzorokat használni (megfelelő vezérlés esetén, és a maximális terhelés alatt)

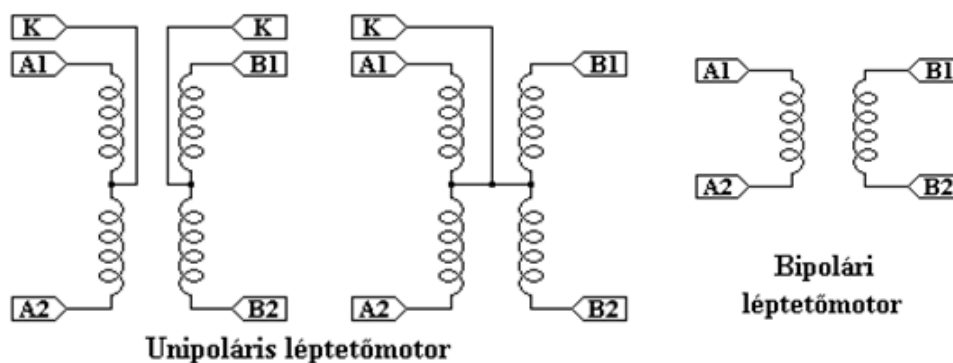
Alkalmazás hátrányai:

- Alacsony fordulatszám
- Nagyobb méret és tömeg azonos teljesítményű társaihoz képest
- Digitális (számítógépes) vezérlés szükséges
- Nagy teljesítménynél drága

3.1. Léptetőmotor fajtái

A léptetőmotoroknak 2 fajtája van (7. ábra):

- Unipoláris (5 vagy 6 kivezetés)
- Bipoláris (4 kivezetés)



7. ábra

Léptetőmotorok fajtái

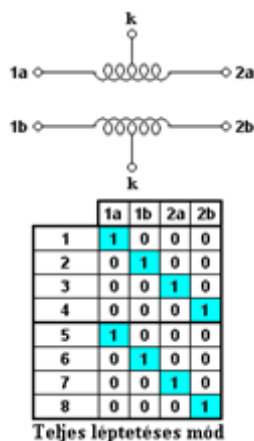
A léptetőmotorok egyik fontos paramétere, hogy 360° elforduláshoz hány fullstep (teljes lépés vagy periódus) szükséges. Ha ezt fokban adják meg, akkor a lépésenkénti szögelfordulást, ha lépésszámban, akkor a teljes körhöz szükséges lépések számát jelenti. Ezen kívül fontos paraméter a motor terhelhetősége, teljesítménye és nyomatéka is. A teljesítmény növeléséhez lehet növelni a tekercsek számát, de ezzel nő a kivezetések száma, a motor mérete és természetesen az ára is.

3.2. Léptetőmotor vezérlése (általános)

Alapvetően három féle vezérlést különböztetünk meg [3]:

3.2.1. Fullstep (teljes léptetéses) mód

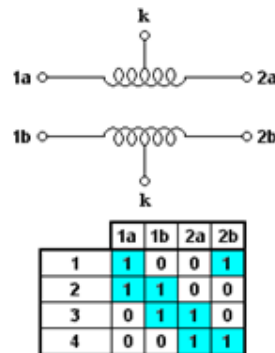
Ebben a módban a tekercsekre egymás után adunk feszültséget, egyszerre mindig csak egyre (8. ábra). Ilyenkor a legnagyobb a lépésenkénti szögelfordulás, tehát itt a legkisebb az elfordulás felbontása, és itt veszít legkönnyebben lépést a motor.



8. ábra

Fullstep vezérlés

A fullstep vezérlésnél, ha kicsit nagyobb forgatónyomatékra van szükségünk használhatunk kététekereses módot is, ilyenkor a két, egymás után következő vezérlést egyszerre adjuk rá (9. ábra). Ebben az esetben a nyomaték a két, egymásra merőleges „egységvektor” összege, azaz az eredeti nyomaték $\sqrt{2}$ szerese. Ebben az üzemben azonban kétszer akkora áramot vesz fel, tehát a motoron hővé alakuló teljesítmény a $P = I^2 \cdot R$ képletből adódóan négyszeres lesz, így előfordulhat, hogy a motor hűtéséről is gondoskodni kell.

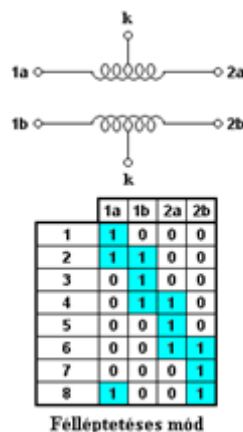


9. ábra

Fullstep, kététekereses vezérlés

3.2.2. Halfstep (fél léptetéses) mód

Ebben a módban nem egyből ugrik a vezérlés a következő tekercsre, hanem a kettő között van egy átmenet, aminél a két szomszédos tekercset egyszerre vezéreljük (10. ábra). Ilyenkor egy lépés a teljes lépéses mód elfordulásának felével egyenlő, tehát a lépés pontossága megduplázódik. Ennél a vezérlésnél már nehezebben veszt lépést a motor, mivel csak fele annyit kell egy lépéssel elfordulnia a tengelynek.

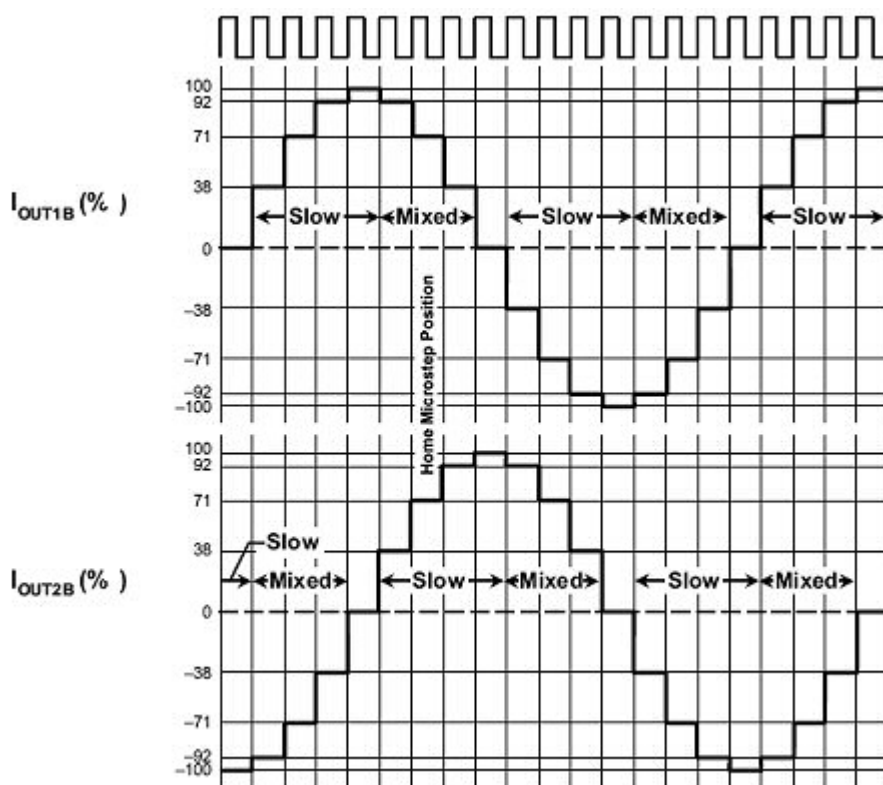


10. ábra

Halfstep vezérlés

3.2.3. Microstep (mikro léptetéses) mód

Ebben az esetben a motor tekercseit nem digitális jelekkel, hanem feszültségszintekkel vezéreljük. A felbontás függvényében finomítható a szögelfordulás mértéke. Ilyenkor a tekercsekre egymáshoz képest eltolt, szinusz befoglaló függvényű (diszkretizált szinusz), kívánt felbontású jelalak kerül. Digitálisan ezt a vezérlőjelet PWM jellel szokták előállítani. Ennél a lehetőségnél megadják vagy a teljes periódushoz szükséges lépésszámot (microstep) vagy a jel felbontását bit-ben. Egy lehetséges vezérlés látható a 11. ábrán, ami 16 microstep felbontású.



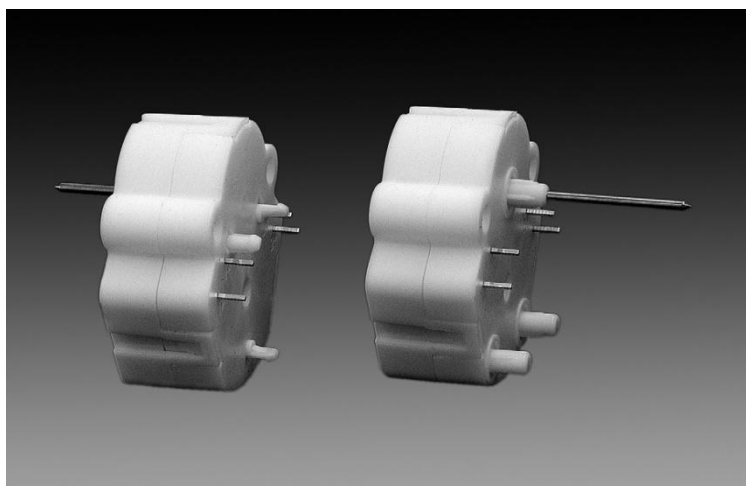
11. ábra

Microstep vezérlés

Az ilyen módon vezérelt léptetőmotornak több előnye is van. Az egyik az előbb említett finomítható elfordulás a felbontás változtatásával, a másik, hogy mivel egyszerre vezéreljük a két egymás mellett lévő tekercset, így mindkettő mágneses mezeje közbejáródik a forgatónyomaték kifejtésénél. Mivel a két tekercs egymással merőleges, így a két mágneses erőter vektort összeadva, melyet a tekercseken folyó áram hoz létre konstans egy egység hosszú vektort kapunk. Ebből következik, hogy a forgatónyomaték állandó.

4. Használt léptetőmotor

A mérni kívánt léptetőmotor egy, a Visteon által műszerfalakban használt, Sonceboz által gyártott 6405R40X típusszámú motor [4], aminek a cég a motor adatlapján megadott értékeit kívánja ellenőrizni. Ez a motor egy bipoláris, négy kivezetéses léptetőmotor (12. ábra).



12. ábra

Sonceboz 6405R40X léptetőmotor

A fent említett léptetőmotor fontosabb paramétereit a 2. táblázatban láthatóak:

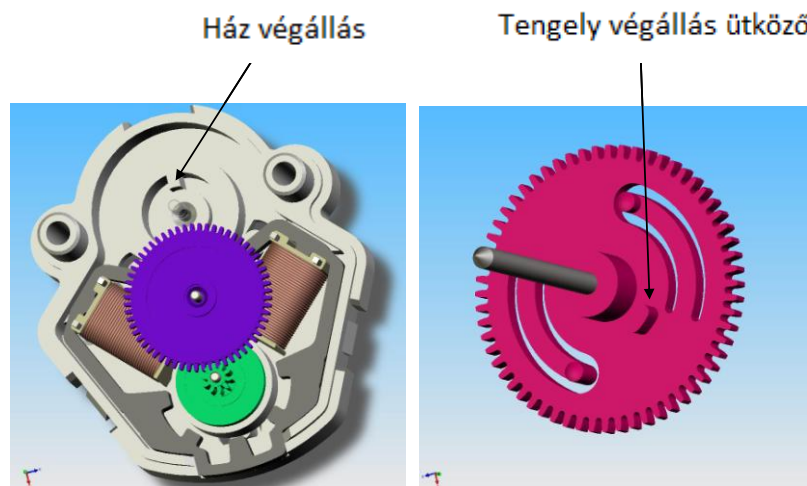
Paraméter	minimum	tipikus	maximum	mértékegység
Tengely lépésszög		18		°
Áttétel		1:36		
Elfordulás teljes léptetőmotor módban		0,5		°
Elfordulás 24 mikrolépéses módban		0,083		°
Működési hőmérséklet	-40		105	°C
Tárolási hőmérséklet	-50		105	°C
Működési feszültség		5	7,5	V
Működési áram 22°C-on		22		mA
Tekercs ellenállás 22°C-on	214	227	240	Ω
Tekercs induktivitás 22°C-on	45	55	65	mH
Tekercs telítési feszültség		12		V
Dinamikus nyomaték 22°C-on				
200°/s-nál	1,2	1,6		mNm
400°/s-nál	0,8	1,3		mNm
Maximum sebesség 22°C-on	800			°/s
Statikus forgatónyomaték 22°C-on		3,6		mNm

2. táblázat

Léptetőmotor gyártó által megadott adatai

Mivel a motor a műszerfalon lévő mutatókat mozgatja, így elég kicsi (26,65x29,5x10 mm), és mint ahogy az az előző táblázatból látszik kicsi a forgatónyomatéka. Ezen felül a két végállás között a léptetőmotor mindössze 310° -ot tud elfordulni.

A forgatónyomaték megmérésének nehézségeit pont ezek a tulajdonságok adják. Kis mérete miatt nehéz felfogadni és bármit rátenni a tengelyre. Ehhez a forgatónyomaték értékhez nem lehet megfelelő mérőműszert találni vagy ha mégis, akkor az folyamatos forgómozgásnál tudja lemérni azt, és nem 310° elfordulás alatt. A nyomatékot $200^\circ/\text{s}$ -os tengelysebességnél kell mérnünk, ami azt jelenti, hogy a mérésre mindössze 1,55 másodperc áll rendelkezésre. Mivel az emberi reakció idő átlagosan 0,6-0,7 másodperc, ami a mérésnél rendelkezésre álló idő majdnem fele, így ezt a mérést mindenképp célszerű elektronikusan elvégezni.



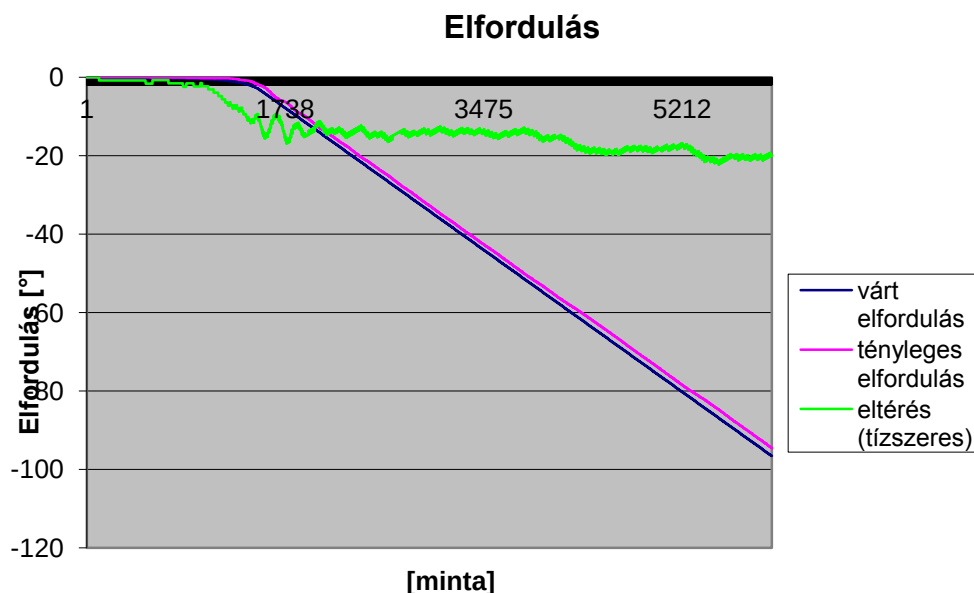
13. ábra

Léptetőmotor belső felépítése

Léptetőmotor felépítése (13. ábra):

- állórész tekercsei/elektromágnes (barna, 2db)
- lemezelt vasmag (szürke)
- motor forgórésze (zöld)
- közbenső áttétel, 1:6-os arányú (lila)
- végső áttétel (1:6-os) a tengellyel és a végállás ütközővel (rózsaszín)
- motorház (fehér)

Szakmai gyakorlat keretein belül lehetőségem volt jobban megismerni a mérni kívánt léptetőmotor áttételeiből adódó kis hibákat a linearitásában. (Akkor lineáris egy léptetőmotor microstep-es vezérlésnél, ha minden léptetés hatására a tengely ugyanakkora szögben fordul el.) Mivel az ipari sorozatgyártásban a minimális előállítási költségekre törekednek, így ezek a motorok is a legkevesebb és legolcsóbb anyagokból van előállítva. A vasra, a tekercseken, és a kimeneti tengelyen kívül mindent fröccsöntéssel készítenek műanyagból, még a forgórészt is. Ebből adódóan az előállítási költség minimális, de az áttételek szemmel nem látható (még működés közben sem) aszimmetriája miatt a motor tengelye nem teljesen lineárisan, hanem az ideális elfordulás körül kis mértékben oszcillálva mozog. A másik, áttételekből adódó hiba a fogaskerek holtjátékából adódik. E miatt a holtjáték miatt számolni kell induláskor egy lengésre, ami a tehetetlenségből is adódik, valamint egy maradó hibára, ami irányváltáskor tűnik el. A következő diagramrészleten (14. ábra) ezeket a jelenségeket lehet megfigyelni.



14. ábra

Áttételekből adódó nem-linearitás

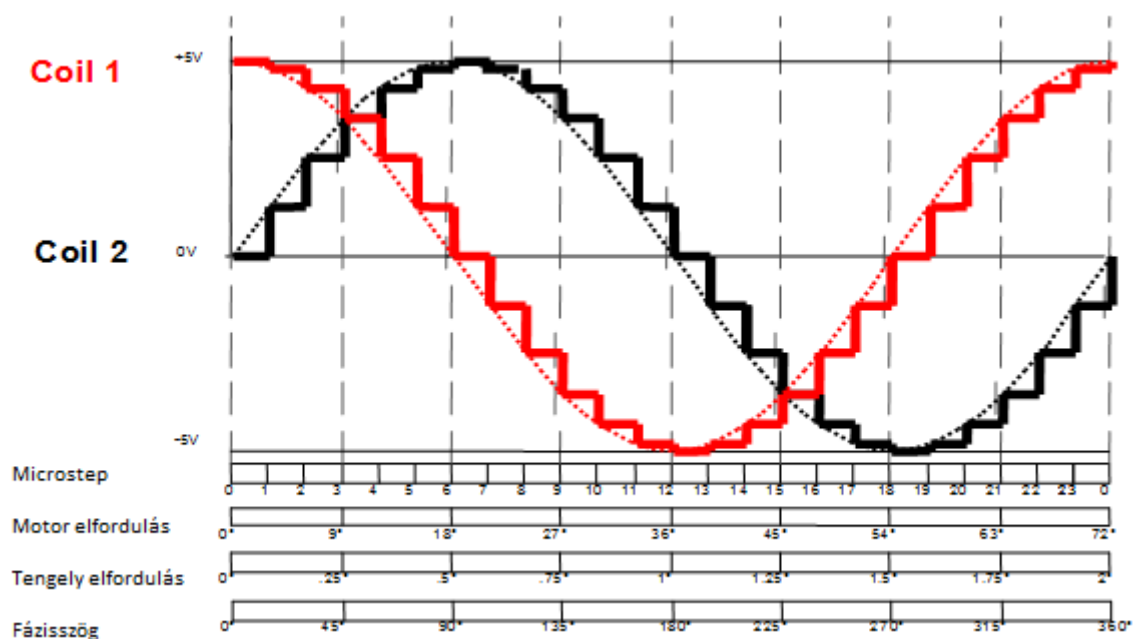
Az ábrán kék vonal jelzi a vezérlésből számolt elfordulás mértékét, rózsaszín a tengelyen mért elfordulást és zöld a kettő közötti eltérés tízszerezését.

Itt megfigyelhető, hogy a holtjáték miatt körülbelül az 1700-as mintáig a kimeneti tengely nem mozog, majd utána lengéssel indul el, ami az 1800-1900-as mintáig lecseng, majd onnantól az áttételek aszimmetriájából adódó lengés figyelhető csak meg. Ezeket a lengéseket figyelembe kell venni a vezérlő program megírásánál, hiszen itt nem megáll a motor és elkezd visszafelé forogni, hanem csak egy jellemző tranziens jelenség lép fel. Ezt kezelni kell a

programmal, hogy ebben az esetben ne álljon le, és adjon téves nyomatékértéket, hanem mérjen tovább a valós nyomaték értékig.

4.1. Léptetőmotor vezérlése

A következő problémát a motor vezérlése adja. A műszerfal elektronikája a léptetőmotort két darab, egymástól 90° -kal eltolt, 24 microstep-ből álló jellel vezérli (tehát egy szinuszos és egy koszinuszos jellegű jelről van szó). A vezérlőjelek a 15. ábrán láthatóak.



15. ábra

24 lépéses vezérlő jelek

A diagram jól szemlélteti, hogy egy teljes periódus (24 microstep) hatására a motor 72° -ot fordul el, míg ez az elfordulás az 1:36-os áttétel miatt a kimeneti tengelyen 2° -os elfordulásként jelentkezik. Leolvasható még, hogy a tengely 3 lépés hatására $0,25^\circ$ -ot fordul, amiből kiszámolható az egy lépésnél bekövetkező elfordulás. Ez az elfordulás mindössze $0,083^\circ$. Az egyik legfontosabb része a mérésnek, hogy ezt az elfordulást detektálni tudjuk, és így időben érzékeljük a lépésvesztést a motornál.

A 3. táblázatban az előbb látott vezérlésekhez szükséges egyenfeszültségű jelszintek láthatóak és az előállításához szükséges PWM jel kitöltési tényezője.

Motor State	Electrical Angle	Cosine Coil		Sine Coil	
		Avg Voltage	% PWM	Avg Voltage	% PWM
0	0	5.000	100.000%	0.000	0.000%
1	15	4.830	96.593%	1.294	25.882%
2	30	4.330	86.603%	2.500	50.000%
3	45	3.536	70.711%	3.536	70.711%
4	60	2.500	50.000%	4.330	86.603%
5	75	1.294	25.882%	4.830	96.593%
6	90	0.000	0.000%	5.000	100.000%
7	105	-1.294	-25.882%	4.830	96.593%
8	120	-2.500	-50.000%	4.330	86.603%
9	135	-3.536	-70.711%	3.536	70.711%
10	150	-4.330	-86.603%	2.500	50.000%
11	165	-4.830	-96.593%	1.294	25.882%
12	180	-5.000	-100.000%	0.000	0.000%
13	195	-4.830	-96.593%	-1.294	-25.882%
14	210	-4.330	-86.603%	-2.500	-50.000%
15	225	-3.536	-70.711%	-3.536	-70.711%
16	240	-2.500	-50.000%	-4.330	-86.603%
17	255	-1.294	-25.882%	-4.830	-96.593%
18	270	0.000	0.000%	-5.000	-100.000%
19	285	1.294	25.882%	-4.830	-96.593%
20	300	2.500	50.000%	-4.330	-86.603%
21	315	3.536	70.711%	-3.536	-70.711%
22	330	4.330	86.603%	-2.500	-50.000%
23	345	4.830	96.593%	-1.294	-25.882%

3. táblázat

Vezérlő jel előállításához szükséges PWM kitöltési tényezők

A piacon is kaphatók olyan vezérlő IC-k, melyek kifejezetten léptetőmotorokat vezérelnek microstep-es módban, de a bináris adattárolás miatt ezek 8, 16, 32 vagy 64 lépésben tudnak csak vezérelni, tehát erre a feladatra nem megfelelőek. A vezérlés megoldására egy mikrovezérlőt kell használni, ami rendelkezik megfelelő felbontású PWM kimenettel [10]. A feladat megkötése szerint a PWM jel 15,6 kHz-es, 5V-os amplitúdóval, és az előző ábra szerinti kitöltésekkel. A 200°/s-os tengely sebességhez a 24 lépéses vezérlőjelet 100 Hz-en kell a léptetőmotor tekercseire adni.

5. Felhasznált eszközök

A léptetőmotor tengelye, mint arról a vezérlésnél már szó esett, egy microstep hatására mindössze $0,25/3$ fokot fordul el, ami $0,083^\circ$. A motor maximális forgatónyomatékán az adott paramétereknél azt a nyomatékot értjük, amikor a motor már nem képes a vezérléssel lépést tartani és lépést veszít, vagyis lemarad a vezérlőjelhez képest és megáll. Ezt a lépésvesztést kell detektálni, amihez nagyon pontos mérésre van szükségünk. Ennek a detektálására egy optikai enkóder választottam a hozzá tartozó kellően pontos kódtárcsával.

5.1. Kódtárcsa és optikai enkóder

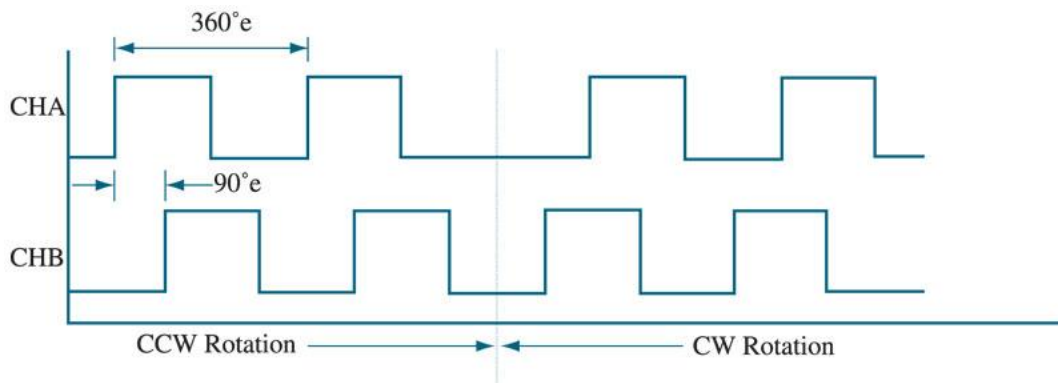


16. ábra

Kódtárcsa és optikai enkóder

A detektálás megoldására megfelel a HEDS-9040-es optikai enkóder [5] és HEDS-6140-es kódtárcsa [6] (16. ábra). Ezek egy inkrementális érzékelő párost alkotnak, azaz a kapott jelből nem lehet az eszköz pontos állását megmondani, csak az elfordulás mértékét. Az említett érzékelők 3 csatornásak, amiből egy a fordulatonkénti 0° -ot jelzi, és kettő az elfordulás függvényében két darab, egymással 90° -os fázistolásban lévő négyszögjelet ad (17. ábra). A legtöbb optikai enkóder kimenete nem teljesen négyszögjel, azt még áramkörrel formázni kell, de ennél a típusnál ez a formázó áramkör megtalálható az enkóder tokozásában.

Nekünk csak az A és B csatornákra van szükségünk, mert az I csatorna jelez fordulatonként. Mivel a motor maximum csak 310° -ot tud csak elfordulni, így fordulatszámot felesleges lenne mérnünk. Az A és B csatornák által kapott jel a 17. ábrán látható.



17. ábra

A kapott jel a két csatornától

A két csatornával detektálható nemcsak az elfordulás mértéke, hanem a forgásirány is (melyik csatorna késik a másikhoz képest), tehát megállapítható, hogy a motor lépett-e, vagy éppen a maximális nyomatéknál „remeg”, vagy esetleg az előzőekben bemutatott kezdeti lengésről van csak szó. A kódtárcsa a 360° alatt 1024 élváltozást generál mind az A mind a B csatornán. A 90° -os fázistolás miatt egy periódus felbontható 4 darab egységre: 00,10,11,01. Ezekből az adatokból számolható, hogy egy fordulatot 4096 egységre tudunk felbontani, tehát a szenzorok $\frac{360^\circ}{4096}$, azaz $0,088^\circ$ -os elfordulást tudnak detektálni.

Ha a motor nem tudja követni a vezérlést és megcsúszik nem egy lépést fog veszíteni, hanem többet. Mivel a mérni kívánt szögsebességgel a léptetőmotor nem képes elindulni, így a lépésvesztés megállással fog járni. Az elfordulás és lépésvesztés detektáláshoz ez a páros tökéletesen megfelel, mivel 2-3 microstep vezérlés után, ha nem fordult el a motor tengelye, akkor lépést veszített a motor. A tényleges lépésvesztés és a detektálása között eltelt idő könnyen kiszámítható. A vezérlőjelünk 100Hz-en lépteti a motort. Egy periódus 24 microstep-ből áll, tehát másodpercenként 2400 microstep-et lép a motor. Ebből kiindulva a 3 microstep alatt eltelt idő:

$$\frac{3 \text{ microstep}}{2400 \frac{\text{microstep}}{\text{s}}} = 0,00125 \text{ s} = 1,25 \text{ ms}$$

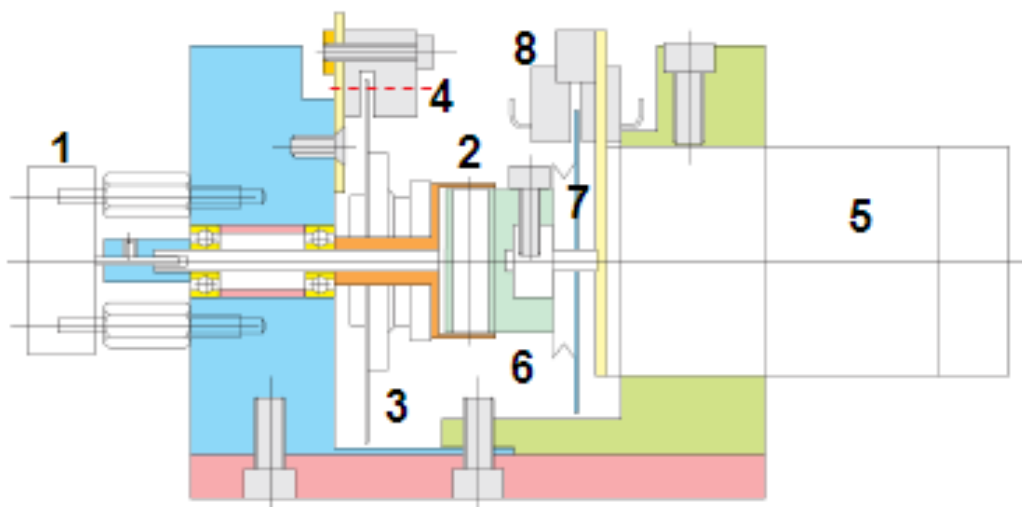
Ezalatt az idő alatt a DC motor fordulatszáma, amivel a fékezőnyomatékokat hozzuk létre elhanyagolható mértékben tud csak megváltozni.

A kódtárcsa további előnye, hogy átmérője 50,6 mm, tehát kis mérete miatt könnyen illeszthető a léptetőmotor tengelyére. A méréshez fontos tárcsa része vékony acéllemez, ami rugalmassága miatt a kisebb esetleges erőhatásokat rugalmassága miatt elviseli.

Mind a pontossága mind a kis mérete miatt a méréshez tökéletesen megfelel ez a páros.

5.2. Méréshez használt örvényáramú fék

A fékberendezés felépítése a18. ábrán látható:



18. ábra

Örvényáramú fékberendezés

5.2.1. A mérőberendezés részei

- 1) léptetőmotor
- 2) alumíniumkupak (narancssárga)
- 3) érzékelő kódtárcsa
- 4) optikai enkóder, piros szaggatott vonallal az optikai középpontja
- 5) DC motor
- 6) állandó mágnes (türkiz zöld)
- 7) DC motor fordulatszám érzékeléséhez kifestésű kódtárcsa (sötétkék)
- 8) DC motor fordulatszám érzékeléséhez infravörös és fototranszisztor

5.2.2. Tehetetlenségek számolása

A berendezésen látható, hogy a mérésnél a léptetőmotor oldalán a tengely, a csapágyak, az alumíniumkupak és a kód tárcsa tehetetlensége is közbejátszik. A következő részben ezeknek a tehetetlenségeknek a számolása kerül bemutatásra.

Először nézzük azt az alkatrészt, amibe a léptetőmotor tengelyét fogatjuk. Ez egy tömör alumínium hengerrel modellezhető, és idevesszük a csapágyak forgórészét is.

Henger tehetetlenségét az alábbi képlettel lehet számolni:

$$\theta = \frac{m \cdot r^2}{2} = \frac{\pi}{2} \cdot l \cdot \rho \cdot r^4,$$

ahol θ a tehetetlenség, l a henger hossza, ρ a sűrűsége és r a sugara.

Ebbe a képletbe behelyettesítve a tengely adatait kapjuk, hogy:

$$\theta_{tengely} = \frac{\pi}{2} \cdot 0,043m \cdot 2702 \frac{kg}{m^3} \cdot (0,0029m)^4 = 1,2908 \cdot 10^{-8} kg \cdot m^2$$

Következőnek a perselyrész tehetetlenségét számoljuk ki. Ez szétbontható egy tömör alumínium hengerre (fenék rész) és egy vékony falú csőre. A fenékrész számolható az előző képlet alapján:

$$\theta_{perselyfenék} = \frac{\pi}{2} \cdot 0,002m \cdot 2702 \frac{kg}{m^3} \cdot (0,021m)^4 = 1,6509 \cdot 10^{-6} kg \cdot m^2$$

A henger tehetetlenségének számolásához az alábbi képlet használható:

$$\theta = \frac{m}{2} \cdot (r_1^2 + r_2^2) = \frac{\pi \cdot l \cdot \rho \cdot (r_2^2 - r_1^2)}{2} \cdot (r_1^2 + r_2^2) = \frac{\pi}{2} \cdot l \cdot \rho \cdot (r_2^4 - r_1^4),$$

ahol r_1 a henger belső és r_2 a henger külső sugara. Ezt a képletet használva a perselyfal tehetetlensége:

$$\begin{aligned} \theta_{perselyfal} &= \frac{\pi}{2} \cdot 0,0096m \cdot 2702 \frac{kg}{m^3} \cdot ((0,01m)^4 - (0,009m)^4) = \\ &= 1,4012 \cdot 10^{-7} kg \cdot m^2 \end{aligned}$$

A kódtárcsa tehetetlensége is két részre bontható. Az egyik a felfogatást segítő alumínium henger, a másik az elfordulás mérésre szolgáló lyukas, vékony acéllemez. mindkettőhöz használható a henger tehetetlenségének a képlete.

$$\begin{aligned}\theta_{kódtárcsaház} &= \frac{\pi}{2} \cdot 0,0105m \cdot 2702 \frac{kg}{m^2} \cdot ((0,0133m)^4 - (0,0029m)^4) = \\ &= 1,3913 \cdot 10^{-6} kg \cdot m^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\theta_{kódtárcsalemez} &= \frac{\pi}{2} \cdot 0,0005m \cdot 7860 \frac{kg}{m^2} \cdot ((0,0253m)^4 - (0,0029m)^4) = \\ &= 2,5288 \cdot 10^{-6} kg \cdot m^2\end{aligned}$$

A léptetőmotor tengelyére helyezett eszközök teljes tehetetlensége az alkatrészek tehetetlenségeinek az összege.

$$\theta = \theta_{tengely} + \theta_{perselyfenék} + \theta_{perselyfal} + \theta_{kódtárcsaház} + \theta_{kódtárcsalemez}$$

$$\begin{aligned}\theta &= (1,2908 \cdot 10^{-8} + 1,6509 \cdot 10^{-6} + 1,4012 \cdot 10^{-7} + 1,3913 \cdot 10^{-6} + \\ &+ 2,5288 \cdot 10^{-6}) kg \cdot m^2 \approx 5,7240 \cdot 10^{-6} kg \cdot m^2\end{aligned}$$

Mivel ez a tehetetlenség a mérés során, amikor a motor már nem tud akkora nyomatékot kifejteni, hogy tovább forogjon, lendületként jelentkezik, így ki kell számolni, hogy ez a lendület mennyire befolyásolja a mérést. Tehát meg kell határozni, hogy a léptetőmotor egy microstep-hez mekkora energiát használ.

A kódtárcsa bemutatásánál már kiszámoltuk, hogy az érzékenysége

$$\frac{360^\circ}{1024 \cdot 4} = 0,088^\circ$$

Ez radiánba átszámolva:

$$\frac{2\pi}{1024 \cdot 4} = 1,534 \cdot 10^{-3}$$

Az eredő nyomatékot felírva:

$$\sum M = M_{gy} - M_l - M_t ,$$

ahol $\sum M$ az eredő nyomaték, M_{gy} a gyorsító, M_l a lassító és M_t a tehetetlenségi nyomaték. Mivel lépésvesztéskor a léptetőmotor megáll, így $\sum M = 0$. Ha

megvizsgáljuk a gyorsító, lassító és tehetetlenségi nyomatékok arányát, és azt kapjuk, hogy a tehetetlenségi nyomaték a másik két nyomatékhoz képest nagyságrendekkel kisebb, akkor elhanyagolható, tehát a mérési eredményt észrevehetően nem befolyásolja.

Azt tudjuk az adatlapból, hogy a léptetőmotor nyomatéka, azaz a gyorsító nyomaték $200^\circ/\text{s}$ -os tengelysebességnél $1,6\text{mNm}$. Ezzel az értékkel kell összehasonlítani a tehetetlenségi nyomaték értékét az adott szögsebességnél. A tehetetlenségi nyomaték a következő képlettel számolható:

$$M_t = \theta \cdot \beta ,$$

ahol θ a tengelyen lévő alkatrészek tehetetlensége és β a tengely szöggyorsulása. Ha ez az érték nagyságrendekkel kisebb, mint az $1,6\text{ mNm}$, akkor a hiba elhanyagolható. Ennek kiszámolásához ismernünk kell a β értékét, melyet az alábbi képlettel számolhatunk ki:

$$\beta = \frac{\omega}{t} ,$$

ahol ω a léptetőmotor szögsebessége, és t a lassítás (megállás) ideje.

Az ω szögsebesség számolható a fordulatszámából az alábbi összefüggéssel:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n ,$$

ahol n a motor fordulatszáma. Behelyettesítve a képletbe:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{200^\circ/\text{s}}{360^\circ} = \frac{10}{9} \frac{1}{\text{s}}$$

A t lassítási idő egyenlő azzal az idővel, amikor a motor kiesik a szinkronból (lemarad a vezérlőjeltől). A léptetőmotor tulajdonságai ebből a szempontból nézve nagyon hasonlítanak a szinkrongépekhez. Mindkét esetben a forgórész követi az állórész forgó mágneses mezejét (vezérlés), de amint nagy terhelés hatására a forgórész lemarad a mágneses mezőhöz képest 90° -kal, átesik a „holtpontra” (stabil állapot határa), kiesik a szinkronból és megáll. Ebben az esetben, ha a forgó mágneses mező forgási sebessége túl gyors, akkor addig nem indul el a forgórész, amíg az egy bizonyos forgási sebességhatár alá nem lassul, vagy a forgórészt meg nem forgatják (újra fel tudja venni a forgó mágneses mező forgási sebességét). A forgó mágneses mező sebességét (vezérlő jel frekvenciája) a mérés indításakor mi sem növelhetjük rögtön a

maximum sebességre, mivel akkor nem indulna el a léptetőmotor. Az indításhoz egy folyamatos gyorsítás, más néven frekvenciafelfuttatás szükséges.

A léptetőmotor vezérlőjelének egy periódusa (360°) 24 microstep-ből áll. Az előbb említettekből kiindulva a léptetőmotornak mindaddig van megfelelően nagy gyorsító nyomatéka (M_{gy}), amíg a vezérléshez képest a 90° -os lemaradást el nem éri. Ez esetünkben 6 microstep. Ezalatt az idő alatt is már lassul a léptetőmotor fokozatosan a növekvő fékezőnyomaték miatt. Ez a 6 microstep $200^\circ/s$ -os tengelysebességnél $\frac{6 \text{ microstep}}{2400 \frac{\text{microstep}}{s}} = 2,5ms$ időt jelent. A következő 90° lemaradás közben (90° és 180° elcsúszás között) a léptetőmotorra ható gyorsító nyomaték folyamatosan csökken. Ez szintén 6 microstep. Ebben a 2,5ms-ban a motor tengelye gyorsuló ütemben lassul a rohamosan csökkenő gyorsító nyomaték miatt.

A legrosszabb esetet akkor feltételezzük, ha ezalatt a 12 microstep alatt áll meg a motor. Ebben az esetben a tehetetlenségi nyomaték értéke a következőképpen alakul:

$$\beta = \frac{\omega}{t} = \frac{\frac{10}{9} \frac{1}{s}}{2 \cdot 2,5ms} = 222,22 \frac{1}{s^2}$$

Ezt behelyettesítve a tehetetlenségi nyomaték képletébe:

$$\begin{aligned} M_t &= \beta \cdot \theta = 222,22 \frac{1}{s^2} \cdot 5,724 \cdot 10^{-6} kg \cdot m^2 = 1,272 \cdot 10^{-3} \frac{kg \cdot m^2}{s^2} = \\ &= 1,272 \text{ mNm} \end{aligned}$$

A kapott 1,272 mNm-es tehetetlenségi nyomaték a mérendő 1,6 mNm-hez képest nem elhanyagolható. Esetünkben viszont, mivel lassulás közben a vezérlés is halad tovább, ezzel megnövelve az időt, tovább tart ez a lassulás, valamint még egy tényezőt bele kell számolnunk. Ha a forgórész a vezérléshez képest több mint 180° -kal, azaz 12 microstep-pel lemarad, akkor a mágneses mező az ellenkező irányba igyekszik forgatni a forgórészt mindaddig, amíg a vezérlés el nem éri, és újra le nem hagyja a forgórész helyzetét. Tehát ebben, a közel 12 microstep-ben a motor gyorsító nyomatéka irányt (előjelet) vált, és szintén lassítja a tehetetlenségből adódó forgást. Ez az ellentétes irányú nyomaték azonos nagyságú, mint a mérni kívánt nyomaték, azaz 1,6 mNm.

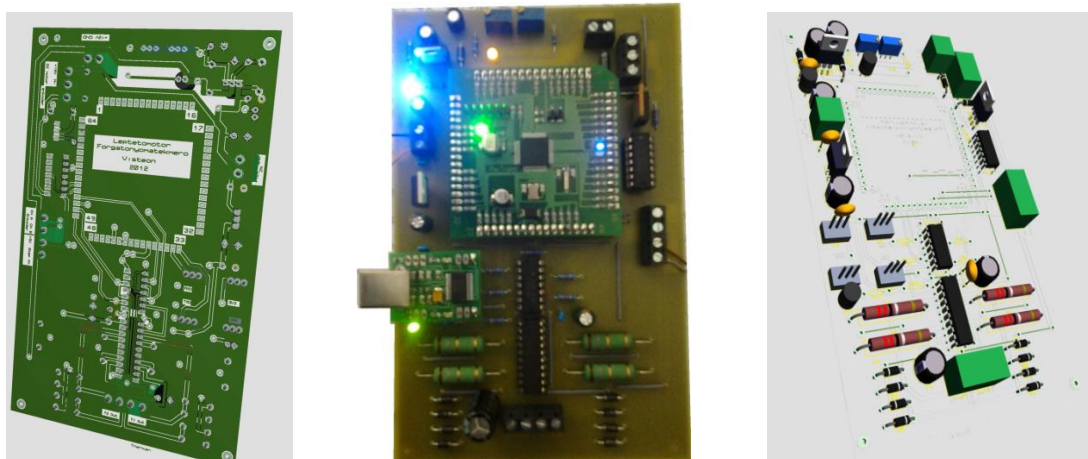
A mérésre nézve a legrosszabb esetből kiindulva ki lett számolva a tengelyre ható tehetetlenségi nyomaték. Mivel valójában a motor tengelyének megállása közben több

idő telik el, mint a számolt esetben, így a tehetetlenségi nyomaték kisebb lesz (a több idő miatt a β értéke csökken).

Az előbb leírtakat figyelembe véve vegyük a megállási időt egy periódusnak (24 microstep). Ebben az esetben egyenletes lassulást feltételezve a tehetetlenségi nyomaték a legrosszabb esetből (12 microstep) kapott értéknek a fele, azaz 0,636 mNm. Mivel 180° és 360° közötti vezérléscsúszás esetén kialakul az ellentétes irányú forgatónyomaték, így ebben a tartományban gyorsabban lassul a forgás. Ez a lassító nyomaték eléri az 1,6mNm-es nyomatékot is, ami az előbb számolt tehetetlenségi nyomatéknak több mint a kétszerese. Ezzel belátható, hogy a motor tengelye egy perióduson, azaz 24 microstep-en belül biztosan meg fog állni. Mivel megállás után a forgórész nem tudja felvenni a mágneses mező forgásának sebességét, így a léptetőmotor tengelye nem indul el újra.

Ezalatt a 24 microstep alatt azonban a DC motor PWM jelének kitöltési tényezőjét folyamatosan növeljük (bővebben a *Program működése* című részben). A PWM jel egy periódusa 320 részre van felbontva (pl.: 10%-os kitöltési tényezőnél 32 rész magas, 288 rész alacsony jelszint van). A program elfordulás hatására, azaz microstep lépésként növel egy változót, melynek értéke 0 és 3200 között változhat. Ennek a változónak a tízzel való osztása adja meg az aktuális magas jelszintű részek számát (kitöltési tényezőt). A 24 microstep alatt ennek a változónak az értéke 24-gyel nő. Ennek hatására $\frac{24}{10}$ résszel nő a DC motor PWM jelének kitöltési tényezője. Ebből számolható, hogy a kitöltési tényező $\frac{2,4}{320} = 0,0075$, azaz 0,75%-kal nő. Mivel DC motornál a fordulatszám egyenes arányos a feszültséggel, és PWM jelnél az átlag feszültség egyenesen arányos a kitöltési tényezővel, így a fordulatszám a maximális fordulatszám 0,75%-ával nő meg. Mivel ez az érték kisebb, mint 1%, így a hiba elhanyagolható. Valamint, mivel a léptetőmotor tengelysebessége a mérések folyamán állandó, így a tehetetlenségből adódó hiba a mérések folyamán állandó hibaként jelentkezik. Ezt a hibát a mérésbe bele lehet számolni, de mivel 1% alatti értékről beszélünk, ezért nem változtatja meg a mérés eredményét nagymértékben.

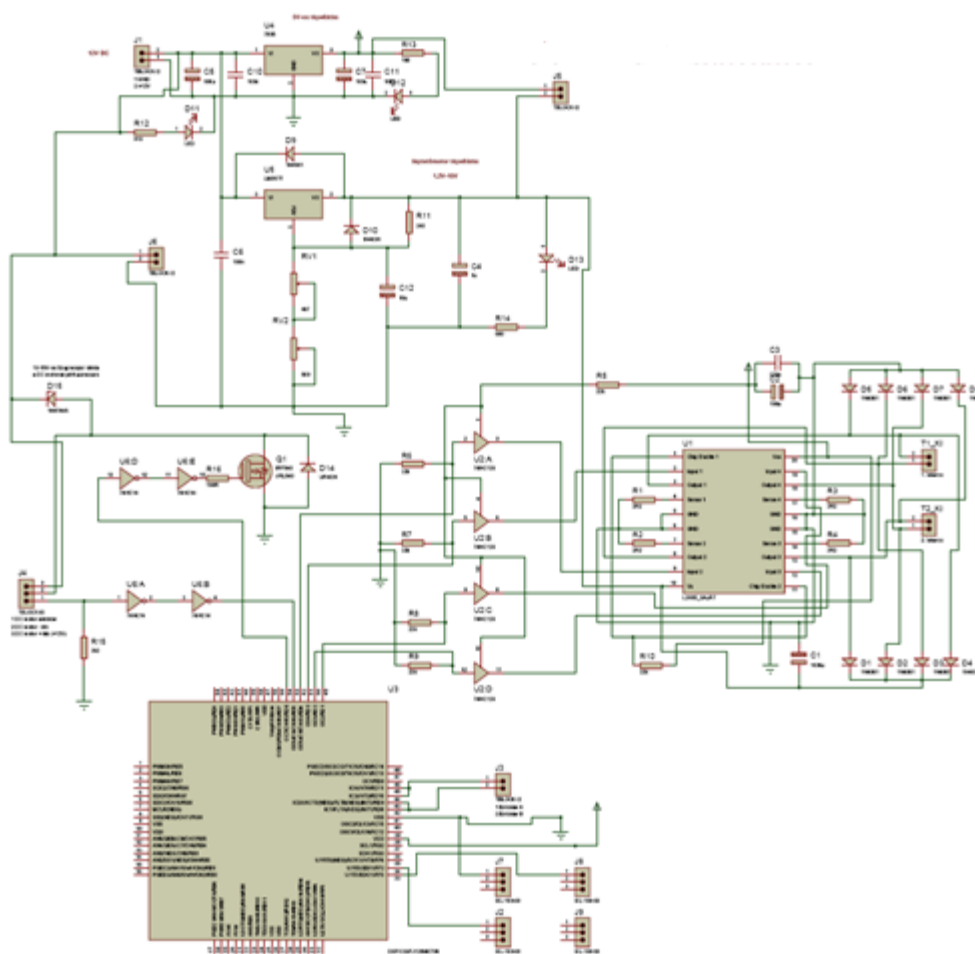
6. Vezérlőáramkör



19. ábra

Vezérlőáramkör

A vezérlőáramkör (19. ábra) tervezésénél egyik fő szempont volt, hogy nagyobb teljesítményű és típusú léptetőmotor nyomatékmérésére is megfelelő legyen [12, 13]. Az áramkör kapcsolási rajza a 20. ábrán látható:



20. ábra

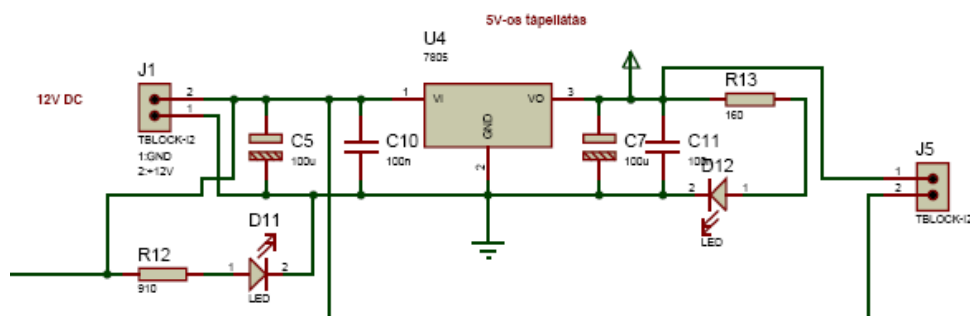
Vezérlőáramkör kapcsolási rajz

6.1. Vezérlőáramkör részei

1. Vezérlő IC-k tápellátása (5V előállítás)
2. Léptetőmotor állítható feszültségű tápellátása
3. Léptetőmotort vezérlő IC
4. DC motor vezérlése
5. DC motor fordulatszám jelének formázása
6. Mikrokontroller

6.1.1. Vezérlő IC-k tápellátása (5V előállítás)

A vezérlőpanel 12V-os feszültségű DC feszültséggel működik. A vezérlő IC-k és a mikrokontroller tápellátásához 5V szükséges. Ezt állítja elő az áramkör első része egy 7805 típusú feszültség stabilizátor IC-vel (21. ábra).



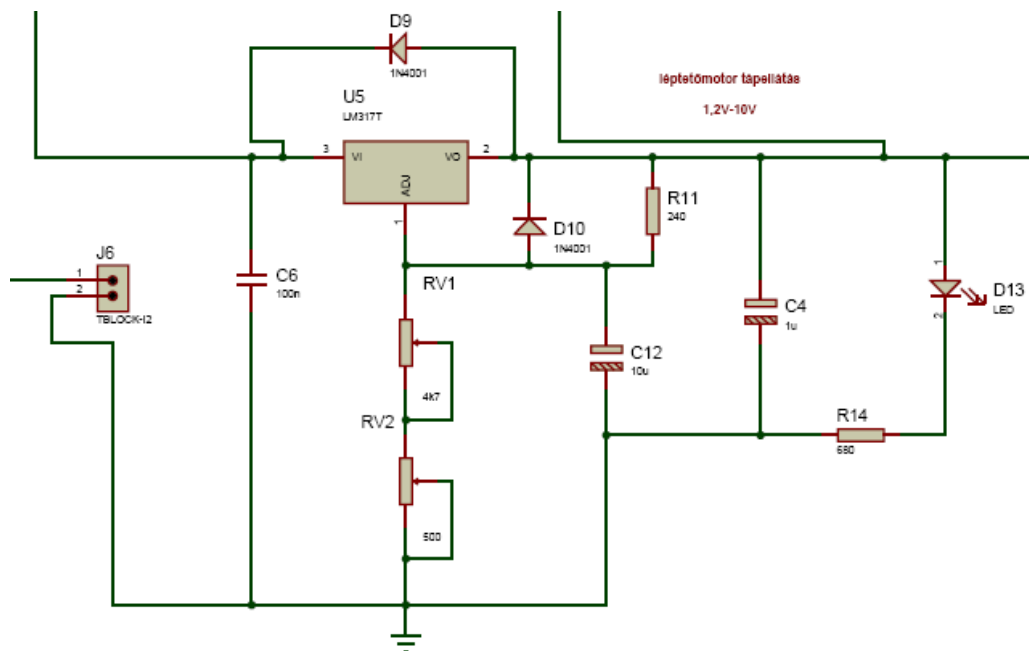
21. ábra

5V-os feszültség előállítás

Az IC bemenetére a kondenzátorokkal stabilizált 12V-os feszültség kerül, és a kimenetén 5V-os feszültség jön ki, ami szintén kondenzátorokkal van stabilizálva. Itt még látható, hogy az 5V ki van vezetve egy sorkapocsra, hogy méréshez, referenciához vagy egyéb áramkör tápellátásához (pl.: optikai enkóder tápellátás) rá lehessen még csatlakozni. A 12V-os feszültség meglétét a D11-es (kék színű) LED-del nyomon lehet követni, azaz ha nem világít, akkor nincs 12V-os tápellátás a panelon. A D12-es (zöld színű) LED ugyan ezt szolgálja, csak az 5V-os tápellátást mutatja.

6.1.2. Léptetőmotor állítható feszültségű tápellátása

A következő rész a léptetőmotor állítható feszültségű tápellátásáról gondoskodik. Erre a célra egy LM317-es IC-t használtam (22. ábra).



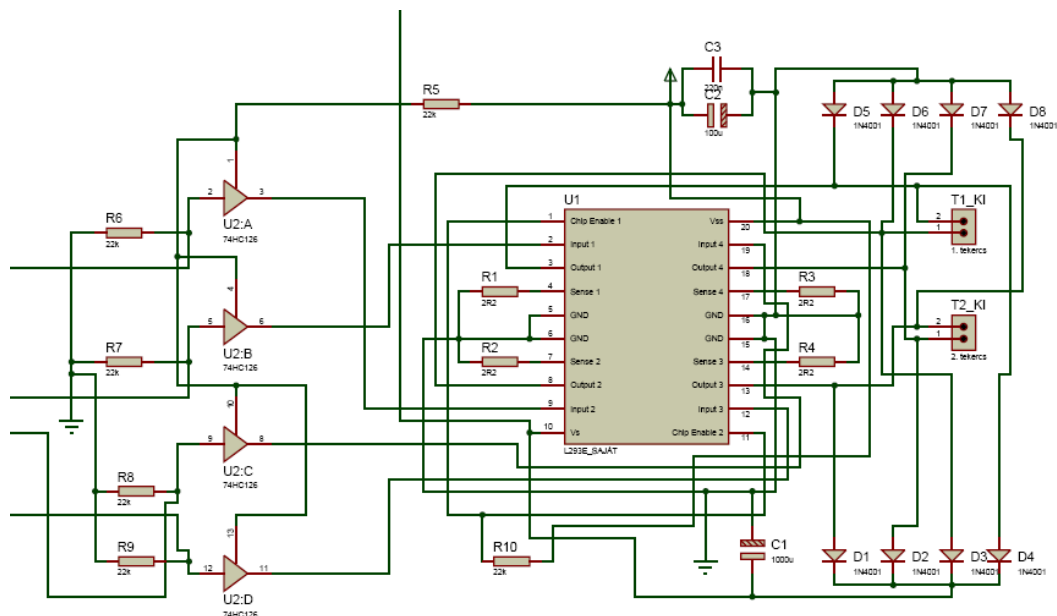
22. ábra

Léptetőmotor állítható tápellátása

Ez az IC hasonló módon működik, mint az előbb használt 7805-ös, csak itt nem állandó feszültségű a kimenet, hanem egy ellenállásokból épített feszültségosztóval lehet a kimeneti feszültséget beállítani. Ha az egyik ellenállás helyett potenciométert használunk, akkor ennek a feszültségosztásnak állítható az aránya, tehát a kimenet is változni fog. Jelen esetben két darab potenciométer van sorba kötve azért, hogy egyikkel a durvább, nagyobb feszültségállítást lehessen elvégezni, a másikkal pedig a finomabb, tizedvoltos állítást. Ezzel a kapcsolással a kimeneti feszültség, és ezzel a léptetőmotor vezérlő IC-jének feszültsége 1,2V és 10V között állítható. A mérni kívánt léptetőmotor nyomatéka 4,5V és 5V között mérendő, de a kisebb feszültségre állítással megfigyelhető, hogy a hőmérsékletingadozással, és ezzel a feszültség szint változással mennyire változik a motor nyomatéka. Magasabb feszültség szint pedig más típusú léptetőmotorok mérésére teszi alkalmassá a berendezésünket. Ennek a feszültségnek a meglétét, és az IC működését a D13-as számú (sárga színű) LED működése mutatja.

6.1.3. Léptetőmotor vezérlő IC

Mivel a mikrokontroller nem tud nagy áramokat a kimenetein, így a léptetőmotor vezérlését egy külön IC végzi. Ez az IC egy L293E típusú teljesítmény motorvezérlő. Két darab full H-híd található benne, ami a két tekercs külön-külön történő vezérléséhez fejlesztettek ki, ezért számunkra ez nagyon jól alkalmazható. A motorvezérlő bekötése a 23. ábrán látható.



23. ábra

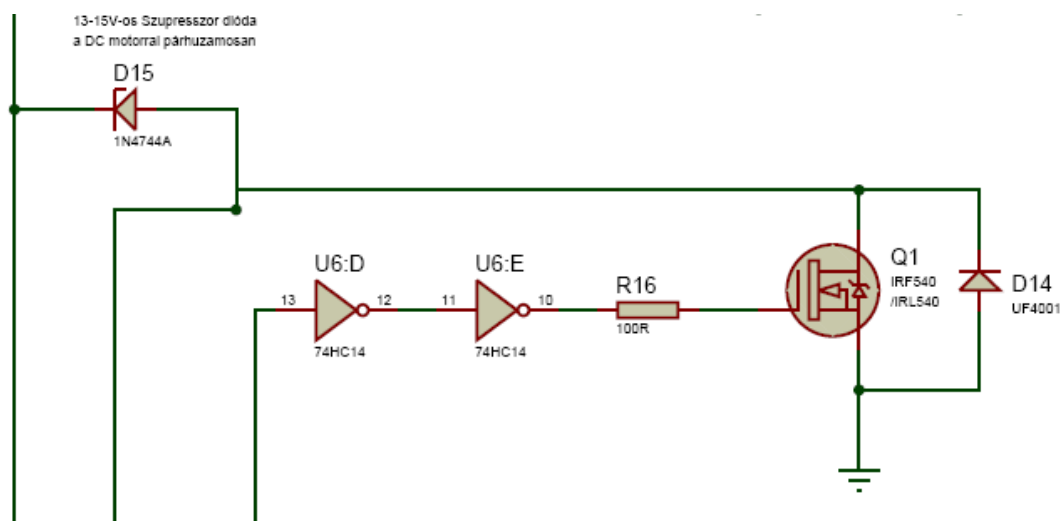
Motorvezérlő IC kapcsolása

Az IC csatornánként 2A-es áramot tud leadni, valamint rendelkezik állítható áramkorláttal. Esetünkben az IC teljesítménye nincs kihasználva, mivel a léptetőmotor tekercsenként csak 22mA-es fogyasztással rendelkezik az adatlapja szerint. Azért van így túlméretezve a vezérlés, hogy ha későbbiekben nagyobb teljesítményű léptetőmotort kell mérni, akkor a vezérlőáramkörön ne kelljen módosítani. A D1-D8 diódák a motor tekercsein keletkező feszültségtüskéket nem engedi vissza a vezérlő IC-re, így azok nem tehetnek kárt a vezérlésben. Ennek az IC-nek két külön tápellátásra van szüksége. Az egyik a működéséhez és a logikai szintekhez kellő 5V-os feszültség. A másik a meghajtandó motor tápfeszültsége, ami akár 36V is lehet. Arra viszont figyelniük kell, hogy mint minden motorvezérlő IC-n ezen is van feszültségesés. A motor tápellátását a 1,2V-tal a kívánt érték felé kell állítani. Mivel az LM317 alsó feszültségküszöbe amúgy is 1,2V, így a léptetőmotor feszültségét 0V és 8,8V között lehet állítani. Ez a tápellátás elegendő a kisebb léptetőmotorok méréséhez.

A mikrokontroller kimenetein csak 3,3V-os logikai szint jelenik meg, a motorvezérlő viszont 5V-os logikával működik, tehát szükség van egy szintillesztő áramkörre. Jelen esetben ezt a szintillesztést egy 74HC126 típusszámú buszmeghajtó (line driver) IC végzi. 3,3V-os, maximum 4mA-es jel hatására a kimenetén 5V-os, maximum 20mA-es jelet ad ki. Ez a kimenet már megfelel a motorvezérlő megfelelő vezérléséhez.

6.1.4. DC motor vezérlése

A fékező nyomaték előállításához használt DC motor szintén PWM jellel van vezérelve. Mivel a mikrokontroller nem tud 12V-os jelet kiadni, és azzal forgatni egy DC motort, így ehhez is kell egy szintillesztés. A 24. ábrán ez az áramköri rész látható.



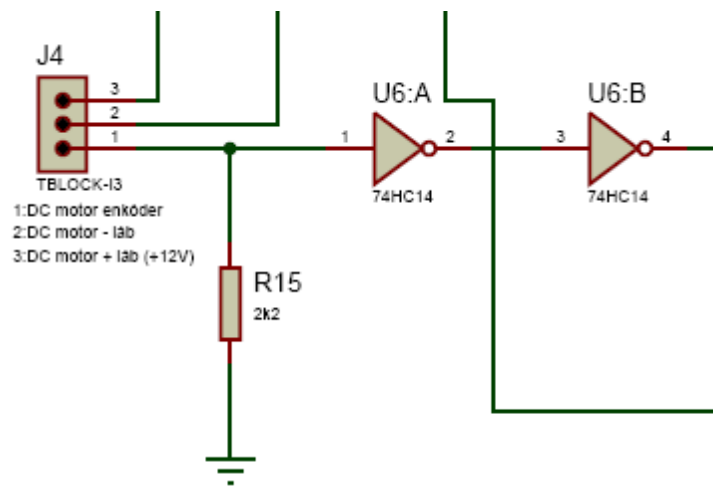
24. ábra
DC motor meghajtó

Mivel csak egy irányba kell forgatni a DC motort, így ide elég egy FET-es teljesítményillesztés. Ehhez egy logikai IRL540-es FET lett kiválasztva, ami szintén 5V-os logikával működik. Ide nem az előbb látott buszmeghajtó kerül szintillesztőnek, hanem elég egy 74HC14-es típusú Schmitt trigger-es logikai inverter. Ebből két inverter lett sorba kötve, mivel így a FET meghajtásához nem kell a programon belül invertálni a jelet. Látható még két védődióda is, ami a tekercseken árammegszakításkor keletkező feszültségtüskéket fogja meg, és vezeti el.

Ez a FET-es teljesítményillesztés is túl van méretezve, tehát egy nagyobb teljesítményű és fordulatszámú DC motort is rá lehet kötni a nagyobb fékezőnyomaték elérése végett.

6.1.5. DC motor fordulatszám jelének formázása

A DC motor fordulatszám érzékeléséhez hasonló módszert alkalmazunk, mint a léptetőmotor elfordulás érzékeléséhez. Itt is kódtárcsa van a tengelyre erősítve, csak mivel nagy fordulatszámról van szó, így ide elég egy 24 bevágásos tárcsa is, és mivel nem kell forgásirányt detektálni, így elég egy infra LED és hozzá egy fototranzisztor. A fototranzisztor kimente nem négyszögjel, így ezt a jelet formáznunk kell. Erre a célra az előbb használt 74HC14-es IC két másik inverterét használjuk fel. Azért megint kettőt, mert így szintén nem invertált jelet kapunk, és az így kapott jel is szebb négyszögjel mint csak egy invertálás után. A DC motor kapcsait és a fordulatszám jelét egy sorkapocsra kell bekötni a panelen. A jelformáló kapcsolás és a DC motorhoz csatlakozó sorkapocs a 25. ábrán látható.

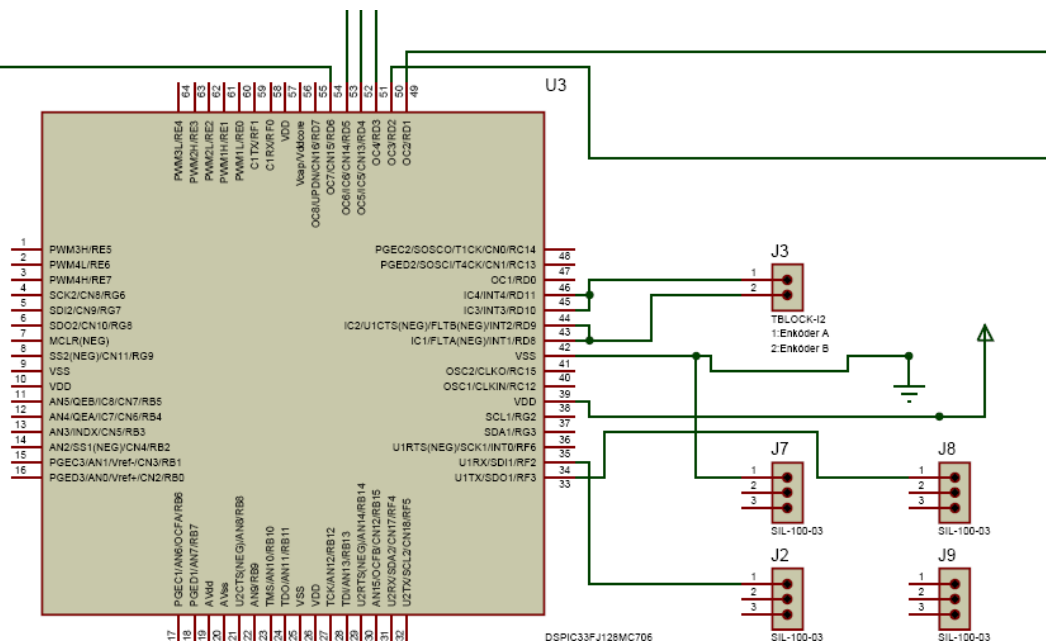


25. ábra

DC motor fordulatszám jel formázása

6.1.6. Mikrokontroller

A vezérlőáramkör utolsó és egyben legfontosabb eleme a mikrokontroller. Ennek bekötése a 26. ábrán figyelhető meg.



26. ábra

Mikrokontroller bekötése

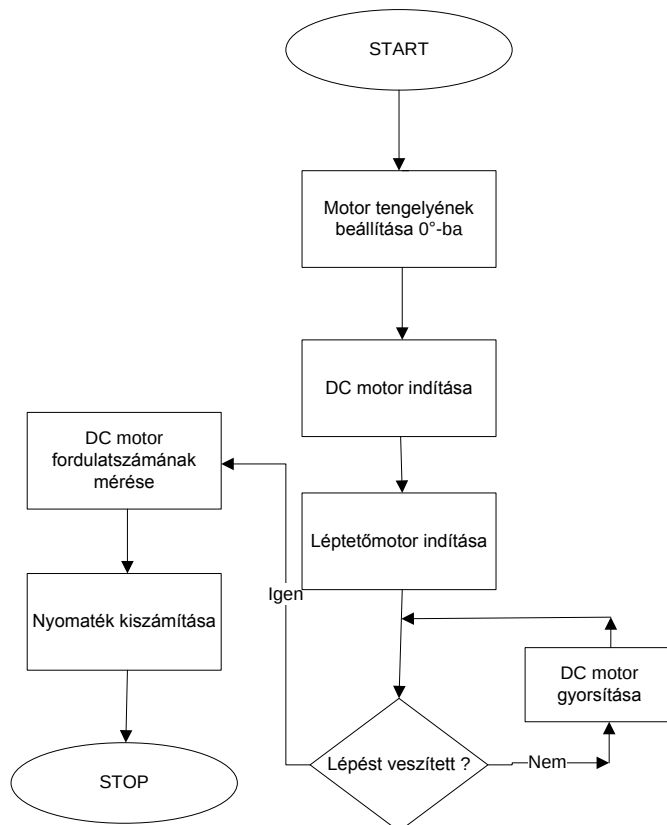
A kontroller lábaira kerülnek a léptetőmotor lépésvesztés detektálásához használt optikai enkóder A és B csatornájának értékei. A számítógépes kommunikációhoz szükséges soros porti kommunikáció lábai túsorosra vannak kivezetve. Erre a túsorosra egy már meglévő USB-sorosport átalakító panel került.

7. Mikrokontroller és vezérlő program

A mérés vezérlésére egy DSPIC33FJ128MC706A típusú 32 bites mikrokontrollert választottam. A választás azért erre a kontrollerre esett, mert rendelkezik a kellő ki és bemenetekkel, valamint megfelelő számítási kapacitással, és a témát kiíró cég már használja ezt a típust, így nekik is könnyebb beszerezni, illetve programozni. Mivel a kisebb tudású (gyorsaság, lábszám, stb) mikrokontrollerek, DSP-k is hasonló árban vannak, mint az általunk felhasznált DSPIC33-as családba tartozó vezérlő, ezért nem érdemes kisebb tudással rendelkezőt választani. Ez a választás akkor lesz nagyon hasznos, ha a jövőben esetlegesen

újabb (elsődlegesen számítási kapacitást igénylő) funkciókkal kell majd bővíteni a berendezést. Ekkor az újabb funkciók implementálása nem igényli majd a vezérlő kontroller kicserélését, így nem lesz szükség az elektronika további fejlesztésére.

7.1. A program folyamatábrája



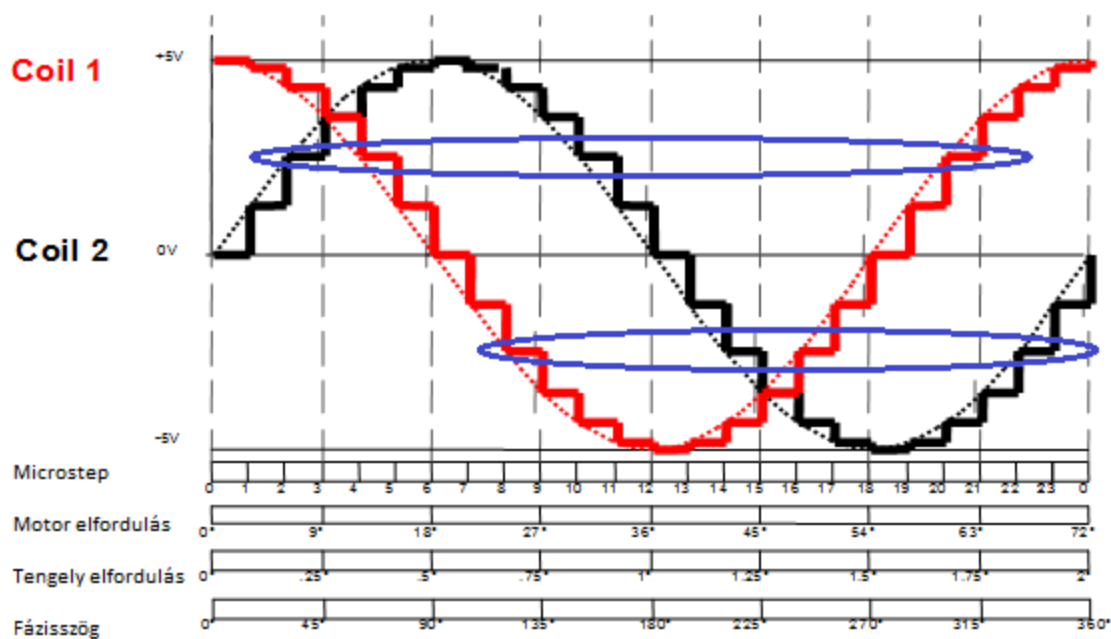
27. ábra

Egyszerűsített folyamatábra

A program felépítése látszólag egyszerű (27. ábra), de a sok párhuzamos mérés és vezérlés, valamint hibakezelés miatt mégsem az. A vezérlésnél a lépésvesztés detektálásnak figyelembe kell vennie az indulásból adódó lengéseket, és ezeket az irányváltásokat nem lépésvesztésnek tekinteni. Az ilyen indulásnál fellépő lengések kiszűrésére bele kellett építeni egy szűrőt, ami addig nem engedi lépésvesztésnek detektálni a lengést, amíg a felgyorsítás folyamatánál tart a vezérlés. Mivel a DC motor nem a tényleges nyomatékot kifejtő fordulatszámról indul, hanem annál kisebbről, így a léptetőmotor felgyorsításánál a DC motor is még csak gyorsulni fog, tehát ebben a tartományban nem is lehet tényleges lépésvesztés.

7.2. Vezérlőjel előállítása

A mikrokontroller induláskor letárolja egy 24 elemű tömbbe a léptetőmotor PWM jelének előállításához szükséges kitöltési tényezőket. Az áramkörünk egyoldalas, 12V-os tápegységről működik. Ebből még elő lehetne állítani a $\pm 5V$ -os feszültséget, de ennél nagyobb feszültséget nem lehetne a léptetőmotor tekercseire adni. A motorvezérlő IC-nek négy darab kimenete van, amiket ha kettesével párosítunk, és felváltva adjuk rá a vezérlést, akkor elérhetjük a $\pm V_{CC}$ feszültséget (a V_{CC} jelen esetben az LM317-es IC-ről lekövető állítható feszültség). Tehát a léptetőmotor tekercseinek végpontjait a megfelelő kimenetekre kötjük a motorvezérlőn (azonos tekercs végpontjait ugyan arra a full hídra kötjük). Ehhez a vezérléshez viszont tekercsenként két külön vezérlőjelre van szükség. Az eredeti vezérlőjelet szét kell szedni pozitív és negatív félperiódusra. Mivel szimmetrikus mind a szinusz, mind a koszinusz jelünk, és a négyfelosztható lépésszám miatt a jelszintek is megegyeznek így elég volt egy darab 24 elemű tömb használata, melynek a második fele (utolsó 12 elem) nullákkal lett feltöltve. Ennek megértéséhez nézzük meg újra a használni kívánt jel feszültség-idő függvényét (28. ábra):



28. ábra

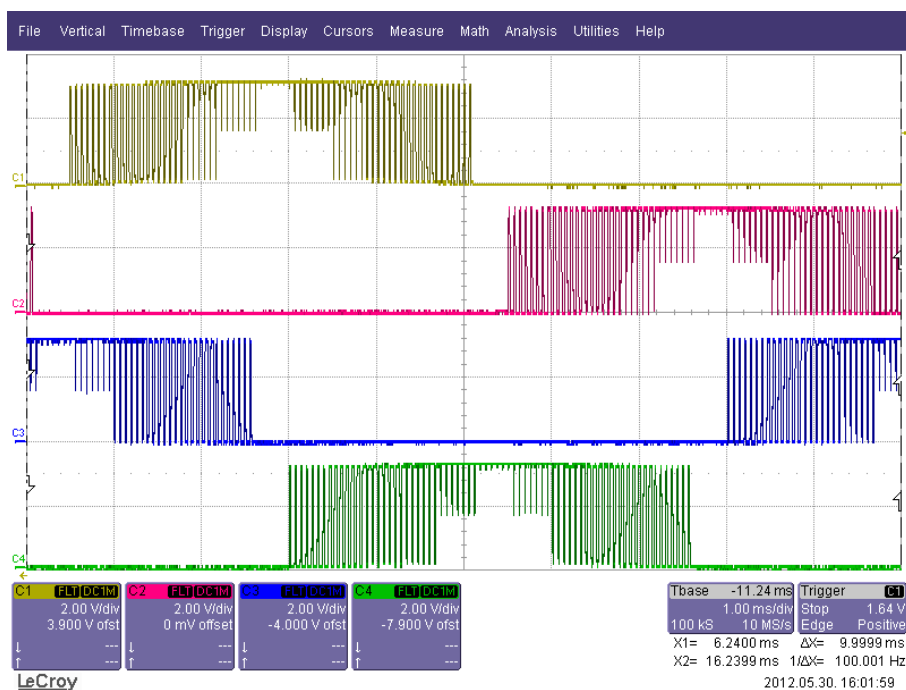
Jelszintek

Példának vegyük a képen kékkel bekarikázott jelszintet. Mivel szinuszból és koszinuszból előállított jelekről beszélünk, így a két jel csak a 90° -os fáziseltolásban tér el. Tehát, ha a szinusz jelet letároljuk, akkor a koszinuszt megkapjuk, ha a letárolt tömbből az első jelhez képest 6 lépéssel későbbi ($24 \text{ microstep} \cdot \frac{90^\circ}{360^\circ}$) jelet vesszük. Ezzel máris csak az egyik

vezérlőjelet kell letárolnunk, amivel kevesebb memóriát használunk. A következő egyszerűsítés (utolsó 12 elem 0) azzal magyarázható, hogy ha megfigyeljük a bekarikázott jelszintet, akkor azt látjuk, hogy ugyan azok a PWM kitöltések szükségesek az előállításához, csak az alsó részen ellentétes referenciával. Esetünkben, mivel amúgy is csak egyoldalas tápellátás van, és két külön vezérlőjel szükséges tekercsenként, így ez csak plusz elágazást eredményezne. Vegyük a legegyszerűbb példát. Ha a tömb eleme pozitív, akkor az 1-es kimenetre, ha negatív, akkor a 2-es kimenetre (ráadásul ellentétes előjellel, tehát az előjelet így is meg kéne fordítani) kell adni. Ezt leegyszerűsítve a negatív részt el is hagyhatjuk, mivel ugyan azon értékek vannak benne, mint a pozitívnál, csak negálva. Így az alábbi tömböt kapjuk:

```
PWM[0]=0;
PWM[1]=PR2*0.2588;
PWM[2]=PR2*0.5;
PWM[3]=PR2*0.7071;
PWM[4]=PR2*0.866;
PWM[5]=PR2*0.9659;
PWM[6]=PR2;
PWM[7]=PR2*0.9659;
PWM[8]=PR2*0.866;
PWM[9]=PR2*0.7071;
PWM[10]=PR2*0.5;
PWM[11]=PR2*0.2588;
```

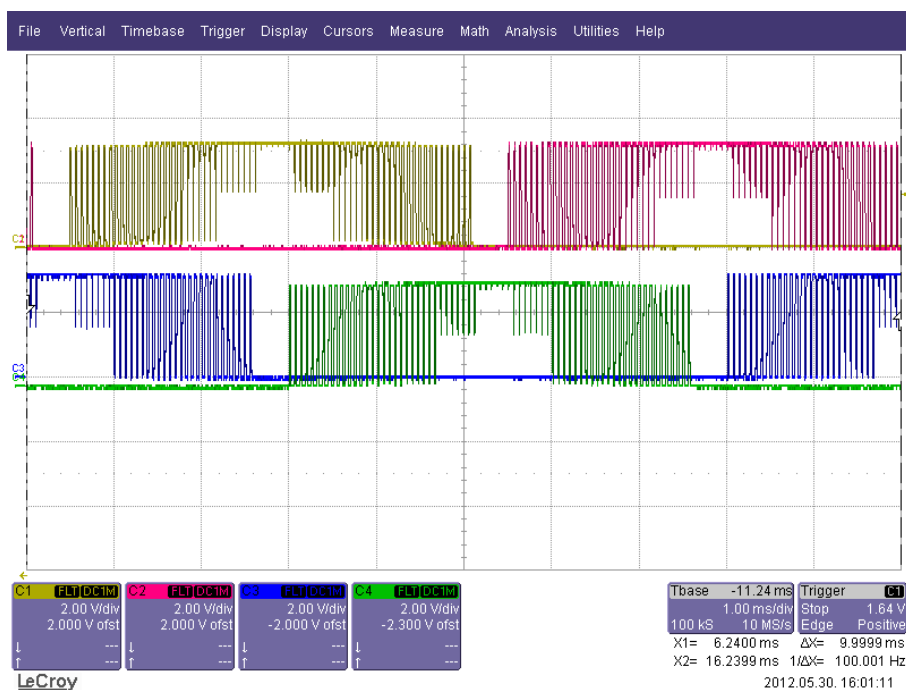
A tömb értéke a PWM[12]-es elemtől a PWM[23]-as elemig 0. A számolásnál a PR2-es változó a PWM jel előállításakor szükséges felbontás mértéke, tehát ennyi órajel ciklusig tart egy PWM jel hossza. Ennél a megoldásnál az egy tekercsre kötött vezérlések 12 lépés késést mutatnak, tehát, amíg az egyik kimeneten van jel, addig a másikon nulla a kimenet, majd fordítva, ezzel megfordítva a feszültség referenciáját. Ezzel el lehet végezni egy egyszerű „for” ciklussal a teljes vezérlést. Ha a futó változó i , akkor az egyik tekercsre az i -edik és $i+12$ -edik tömbelem értékű kitöltési tényező kerül, míg a másikra az $i+6$ és $i+18$ (90° -os fázistolás). Az ily módon előállított vezérlőjelek láthatóak a 29. ábrán.



29. ábra

PWM vezérlés

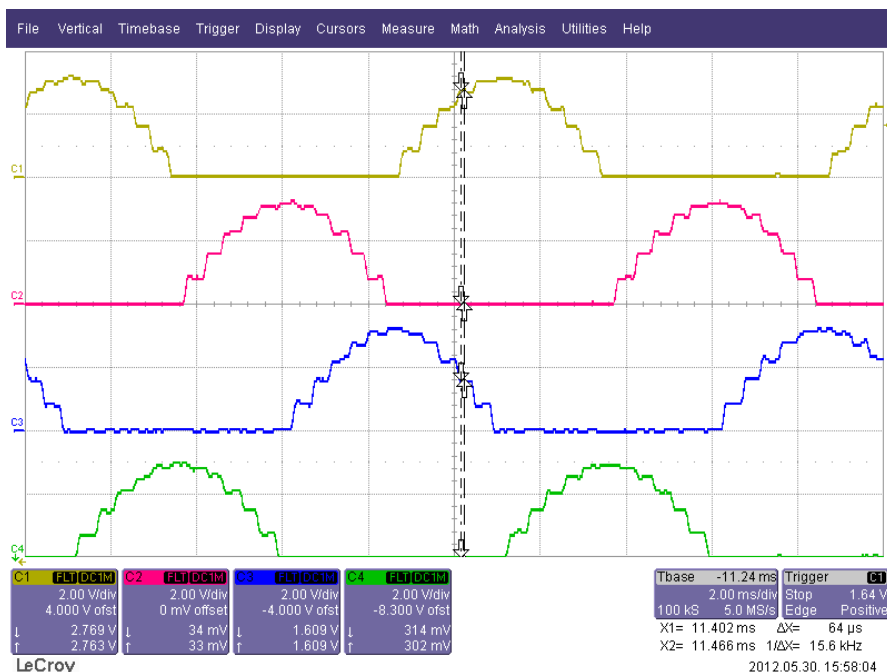
Jól látható, hogy az előállított jelek megfelelnek a kívánt vezérlésnek, vagyis amíg az egyik kimeneten van feszültség, addig a másik kimeneten nincs, és fordítva, valamint hogy párosával kiegészítik egymást. Ennek jobb áttekinthetőségéhez tekintsük a 30. ábrát



30. ábra

PWM vezérlés párosítva

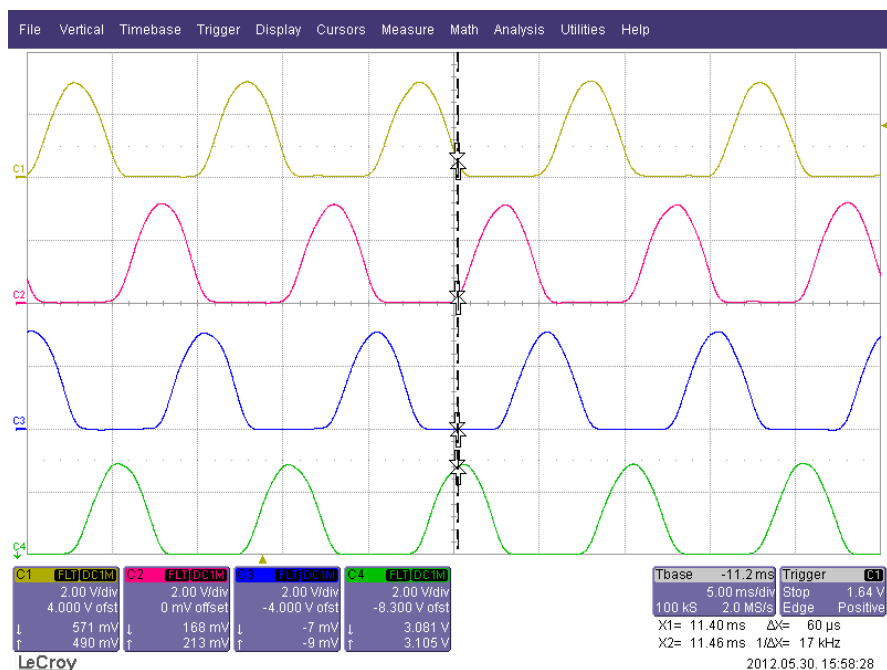
Az utóbbi két képen látható a PWM vezérlés, melynek hatására a jel tüskékből áll össze. Tekintsük meg a jelet kiintegrált formában (31. ábra):



31. ábra

Vezérlő PWM jel integrálva

Itt megfigyelhető az előállítani kívánt 24 microstep-es vezérlésnek a lépcsős jellege, valamint, ha a rózsaszín és a zöld jeleket negáljuk és összevonjuk a megfelelő másik jelekkel, akkor teljesen visszacapjuk azokat. Nagyobb integrálási időt használva megkapjuk a befoglalt szinusz és koszinusz függvények fél periódusait (32. ábra).



32. ábra

Kiintegrált vezérlőjelek

7.3. Program működése

A program a tömb letárolása után beállítja az időzítőket és a megszakításokat, amik a pontos mérésekhez szükségesek. Ezt követően indul a tényleges program. A mikrokontroller addig nem csinál semmit, amíg a soros portján be nem jön egy 0-tól különböző érték, ez az indító jel.

Mivel a mérésre álló időnk amúgy is kevés (alig több mint 1,5 másodperc), így nem engedhetjük meg, hogy ne 0°-tól (végállásból) induljon a léptetőmotor. Ezért a vezérlő először 20°-ot előrefele forgat a léptetőmotoron, majd ezután addig forgatja hátrafelé, amíg azt nem érzékeli, hogy megállt, tehát elérte a végállást. Az előreforgatásra azért van szükség, hogyha esetleg végállásban volt a motor, akkor is lehessen hátrafelé forgatni, mert különben nem lehetne megkülönböztetni azt, hogy a motor a végállásban van, vagy esetleg el sem indult.

Ezek után a motor elő van készítve a mérésre. Elindítja a kontroller mind a DC motort [14], mind a léptetőmotort. Mivel a DC motor is PWM jellel van vezérelve, így annak kitöltési tényezőjével lehet állítani a fordulatszámát. Kezdetben ez a kitöltési tényező kicsi, tehát a DC motor lassú fordulatszámon forog csak. Amikor a mikrokontroller a léptetőmotort figyelő optikai enkóder jeléből érzékeli, hogy a motor el tudott fordulni a DC motor aktuális fordulatszámánál, megnöveli annak kitöltési tényezőjét, és ezzel a fordulatszámát is. Így a DC motor feszültségének kitöltési tényezője közel microstep-enként fog nőni, és ezzel nő a fékező nyomaték is. Ha a kontroller 3-nál több microstepet léptetett úgy, hogy a léptetőmotorra szerelt kódtárcsa nem fordult el, tehát nem változott az enkóderrel bejövő jel, akkor a léptetőmotor lépést veszített és megállt. A 3-nál több feltételre azért van szükség, mivel a motor tengelye microstep-enként 0,083°-ot fordul el, míg az enkóderrel csak 0,088°-os elfordulást tudunk detektálni. Legrosszabb esetben ez az elfordulás 3 három microstep-ig is elhúzódhat, így téves lépésvesztést detektálnánk. Mivel a DC motor kitöltési tényezőjét csak kis mértékben növeljük egy microstep lépés hatására, így ez nem okoz mérési hibát számunkra.

Amint a kontroller érzékelt a lépésvesztést elküldi a DC motor fordulatszámát soros porton keresztül a számítógépnek kiértékelésre. Ezt a fordulatszámot a DC motor tengelyére szerelt 24 osztásos kódtárcsával, és a hozzá tartozó résoptoval számolja ki. A meghatározáshoz folyamatosan figyeli a foto tranzisztorról bejövő formázott jeleket, és a két egymást követő jel között eltelt időből számolja ki a fordulatszámot.

8. Mért adatok és mérési módszer értékelése

A mérési elrendezés pontosságának megállapításához több léptetőmotort is lemértünk, melyek közül egyet három különböző feszültség szinten is. A 4. táblázaton az utóbb említett motornak a mért eredményei láthatóak. A léptetőmotor tápellátása 5V-ra, 5,7V-ra majd 6,5V-ra lett állítva. Mivel a motorvezérlő IC-n 1,2V-os feszültségesés van, így a tekercsekre 3,8V, 4,5V és 5,3V feszültségű jel került.

Motor 1 (tekercsen 3,8V)			Motor 1 (tekercsen 4,5V)			Motor 1 (tekercsen 5,3V)		
Fordulatszám	Átlagtól való eltérés	Átlagtól való eltérés %-ban	Fordulatszám	Átlagtól való eltérés	Átlagtól való eltérés %-ban	Fordulatszám	Átlagtól való eltérés	Átlagtól való eltérés %-ban
2050	147,35	7,19%	2782	47,59	1,71%	3508	65,65	1,87%
2290	92,65	4,05%	2603	131,41	5,05%	3550	107,65	3,03%
2298	100,65	4,38%	2596	138,41	5,33%	3740	297,65	7,96%
2234	36,65	1,64%	2996	261,59	8,73%	3540	97,65	2,76%
2254	56,65	2,51%	2599	135,41	5,21%	3430	12,35	0,36%
2049	148,35	7,24%	2572	162,41	6,31%	3582	139,65	3,90%
2045	152,35	7,45%	2994	259,59	8,67%	3245	197,35	6,08%
2049	148,35	7,24%	2789	54,59	1,96%	3537	94,65	2,68%
2019	178,35	8,83%	2777	42,59	1,53%	3245	197,35	6,08%
2163	34,35	1,59%	2764	29,59	1,07%	3244	198,35	6,11%
2291	93,65	4,09%	2681	53,41	1,99%	3541	98,65	2,79%
2396	198,65	8,29%	2734	0,41	0,02%	3245	197,35	6,08%
2185	12,35	0,57%	2683	51,41	1,92%	3540	97,65	2,76%
2296	98,65	4,30%	2734	0,41	0,02%	3543	100,65	2,84%
2254	56,65	2,51%	2845	110,59	3,89%	3228	214,35	6,64%
2174	23,35	1,07%	2724	10,41	0,38%	3319	123,35	3,72%
2308	110,65	4,79%	2612	122,41	4,69%	3483	40,65	1,17%
átlag:	2197,35		átlag:	2734,41		átlag:	3442,35	
átlagos eltérés:	99,39		átlagos eltérés:	94,84		átlagos eltérés:	134,17	
szórás:	117,08		szórás:	126,91		szórás:	156,33	
szórás (%):	2,70%		szórás (%):	2,81%		szórás (%):	2,16%	

4. táblázat

DC motor fordulatszáma három különböző vezérlőfeszültségnél

A fordulatszám a DC motor aktuális fordulatszáma mikor a léptetőmotor lépést veszített és megállt. Az utolsó három sorban az adatok értékeléséhez szolgáló átlag fordulatszám, az átlag fordulatszámától való átlagos eltérés és a fordulatszámok szórása látható. Az *Átlagtól való eltérés %-ban* című oszlopban látható, hogy 10%-nál nagyobb eltérés nincs az átlagtól, vagyis kiugróan magas vagy alacsony adat nincs.

Az átlag fordulatszámokat megfigyelve látható, hogy a vezérlőjel feszültségének növelésével milyen mértékben nőtt meg, tehát milyen mértékben nőtt a forgatónyomaték.

Ha az eltéréseket nézzük %-ban észrevehető, hogy a feszültség növelésével ez az eltérés csökkent. Ennek az oka, hogy első prototípusról lévén szó van némi mechanikai korlátja, de ezeket megfigyeléssel és egy új felfogató berendezés tervezésével lehet csökkenteni.

Az 5. táblázatban a három különböző motor mért eredményei láthatóak 6,5V-ra állított tápellátással, azaz a tekercseken 5,3V-os vezérlőjellel.

Motor 1 (tekercsen 5,3V)			Motor 2 (tekercsen 5,3V)			Motor 3 (tekercsen 5,3V)		
Fordulatszám	Átlagtól való eltérés	Átlagtól való eltérés %-ban	Fordulatszám	Átlagtól való eltérés	Átlagtól való eltérés %-ban	Fordulatszám	Átlagtól való eltérés	Átlagtól való eltérés %-ban
3508	65,65	1,87%	3243	61,12	1,88%	3245	92,65	2,86%
3550	107,65	3,03%	3544	239,88	6,77%	3267	70,65	2,16%
3740	297,65	7,96%	3322	17,88	0,54%	3459	121,35	3,51%
3540	97,65	2,76%	3245	59,12	1,82%	3245	92,65	2,86%
3430	12,35	0,36%	3310	5,88	0,18%	3244	93,65	2,89%
3582	139,65	3,90%	3247	57,12	1,76%	3406	68,35	2,01%
3245	197,35	6,08%	3175	129,12	4,07%	3245	92,65	2,86%
3537	94,65	2,68%	3541	236,88	6,69%	3297	40,65	1,23%
3245	197,35	6,08%	3245	59,12	1,82%	3254	83,65	2,57%
3244	198,35	6,11%	3540	235,88	6,66%	3468	130,35	3,76%
3541	98,65	2,79%	3244	60,12	1,85%	3425	87,35	2,55%
3245	197,35	6,08%	3245	59,12	1,82%	3234	103,65	3,20%
3540	97,65	2,76%	3313	8,88	0,27%	3595	257,35	7,16%
3543	100,65	2,84%	3245	59,12	1,82%	3305	32,65	0,99%
3228	214,35	6,64%	3241	63,12	1,95%	3264	73,65	2,26%
3319	123,35	3,72%	3243	61,12	1,88%	3543	205,35	5,80%
3483	40,65	1,17%	3227	77,12	2,39%	3244	93,65	2,89%
átlag:	3442,35		átlag:	3304,12		átlag:	3337,65	
átlagos eltérés:	134,17		átlagos eltérés:	87,68		átlagos eltérés:	102,37	
szórás:	156,33		szórás:	118,50		szórás:	119,00	
szórás (%):	2,16%		szórás (%):	2,14%		szórás (%):	1,50%	

5. táblázat

Fordulatszámértékek 5,3V-os vezérlőfeszültségnél

Ha az átlag fordulatszám értékeket összehasonlítjuk látható, hogy mindhárom léptetőmotor közel azonos fordulatszámnál veszített lépést, tehát a forgatónyomatékuk is közel azonos. 10%-nál nagyobb eltérés az átlagtól itt sem található, így kiugróan magas adatot itt sem mértünk.

Az előző két táblázat adatait figyelembe véve belátható, hogy a megtervezett és megvalósított mérési módszer megfelel a léptetőmotor kismértékű nyomatékának a mérésére, és a mérés reprodukálható. A megbízó cég kiírásában az szerepelt, hogy a mérések kalibrálásához ők biztosítanak egy 1,6 mNm nyomatékkal rendelkező motort. A laboratóriumi tesztek során pedig ehhez a motorhoz képest fognak végrehajtani "go" / "no go" teszteket.

A pontos nyomaték érték megállapításához felmerült probléma, hogy nehezen lehet kellő pontosságú műszert találni a fordulatszám-nyomaték görbe leméréséhez (kalibrálásához). A kalibráláshoz szükséges műszer beszerzése után a kapott fordulatszám értéket át lehet majd váltani nyomaték értéké. Amíg ez a kalibrálás nincs meg a berendezés használható, hiszen ha lemérjük egy kellő nyomatékkal rendelkező motornál ezt a fordulatszámot, akkor azt referencia értéként használva kiszűrhetők az annál kisebb nyomatékkal rendelkező motorok, mivel azoknál ez a mért fordulatszám kisebb lesz.

9. Összefoglalás

A munka során az örvényáramú fékezés működési elvét felhasználva sikerült egy olyan tesztberendezést készítenünk, amelynek a segítségével meg lehet mérni kisméretű motorok nyomatékát. A mérések során pedig sikerült a mérési módszert verifikálni és validálni.

A tervezés és az építés során sok szakmai tapasztalatot szereztem. A villamosmérnöki feladat az örvényáramú fék megtervezése, az elektronika megtervezése és megépítése volt. A mérési folyamat és szoftver megtervezése és implementálása a munka során informatikai feladat volt. A fejlesztés következő lépése a mérőberendezés kalibrálása lesz, amely rendkívül nehéz feladat, mert a mérendő motor nyomatéka összemérhető a mechanikai részek tehetetlenségi nyomatékával. Mivel a feladat egy referencia motorral való összehasonlítás volt, ezért ez a fejlesztés már nem volt része a munkának. Kalibrálni először az örvényáramú féket kell, melyet egy kis nyomatékú nyomaték-csavarhúzóval fogunk. Így pontos nyomatékot kapunk a nyers mérési eredményhez (fékező DC motor fordulatszáma). Ezek után tudjuk a nyers adatot megfelelően korrigálni egy korrekciós tényezővel és így megkapjuk a léptetőmotor valós nyomatékát.

Megvizsgálva a mérési adatokból a kiugró eltéréseket arra jutottunk, hogy azok a mechanika kismértékű megszorulásából következnek, így a mechanika további fejlesztésének a lehetőségét is érdemes lenne megvizsgálni.

A mérések alapján a berendezésünkkel 5% alatti szórást tudtunk elérni, amely a specifikációban meghatározott értéken belül van. A Visteon csoport már próbálkozott ennek a feladatnak a megoldásával, ott 10% és 20% közötti szórással tudták csak meghatározni a nyomaték értékét. A dolgozatban leírtak alapján elmondható, hogy a kidolgozott mérési módszerrel kapott eredmények mindenben megfelelnek a mérésekkel szembeni követelményeknek.

10. Felhasznált irodalom, és források

- [1]<http://www.auto.bme.hu/sites/default/files/1motorlaboratoriumi20meresek.pdf>
- [2]http://e-oktat.pmmf.hu/webgui/www/uploads/images/1786/Mrs_nylsmr_blyegekkel_adatgyjts_Spider_8_.pdf
- [3]http://qtp.hu/elektro/leptetomotor_mukodese.php
- [4] <http://www.sonceboz.com/medias/produits/fiches-techniques/6405-bd.pdf>
- [5] <http://www.farnell.com/datasheets/79124.pdf>
- [6] <http://www.farnell.com/datasheets/79130.pdf>
- [7] Dr. Halász Sándor: Villamos hajtások, Egyetemi tankönyv , ISBN 9634505171, Rotel Kft. Budapest, 1993.
- [8] Dr. Halász Sándor: Automatizált villamos hajtások I. II., Tankönyvkiadó, 1989. 1998.
- [9] Dr. Jamniczky Árpád: Villamos gépek üzemtana, Veszprémi Vegyipari Egyetem, 1984
- [10] Dr. Schmidt István, Dr. Vencze Gyuláné, Dr. Veszprémi Károly: Villamos szervo- és Robothajtások, Műegyetemi Kiadó, 2000
- [11] Dr. Hunyár Mátyás, Dr. Kovács Károly, Mémeth Károly, Dr. Schmidt István, Dr. Veszprémi Károly: Energiatakarékos és hálózatbarát villamos hajtások, Műegyetemi Kiadó, 1998
- [12] Monan N., Underland T.M., W. P. Robbins: Power Electronics. Converters, Applications and Design, Wiley 1995.
- [13] Muhammad H. Rashid: Power Electronics, Circuits, Devices and Applications Prentice-Hall 1993.
- [14] W. Böhm: Villamos hajtások, Műszaki Könyvkiadó 1982
- [15] JW Logan: US Patent 2,058,024, 1936
- [16] A Zuckerniann: US Patent 2,774,895, 1956