

Debreceni Egyetem
Műszaki Kar
Villamosmérnöki és Mechatronikai Tanszék



DC SZERVOMOTOROS HAJTÁSRENDSZER KIÉPÍTÉSE

Szerző: **Kontor Cecília** BSc hallgató

Témavezető: Mikuska Róbert
Tanszékvezető: Prof. Dr. Husi Géza

Debrecen
2023.

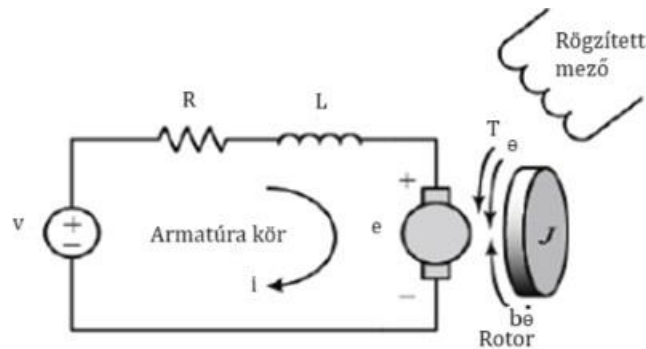
TARTALOMJEGYZÉK

Tartalomjegyzék	2
1. Előzmények	3
1.1 Napjainkban használt szervomotoros rendszerek	3
1.2. Szervomotoros rendszerek szerepe az oktatásban	10
2. A hajtásrendszer kiépítése, működése, mérési eredmények	14
2.1 A hajtásrendszert felépítő elemek, felhasznált eszközök	14
2.1.1 Egyenáramú motor	14
2.1.2 Hajtásvezérlő	15
2.1.3 Enkóder	15
2.1.4 Mérésadatgyűjtő modul	15
2.1.5 Tápegység	16
2.2. Szoftverek	16
2.3. Számítások	19
2.4. Elkészült rendszer ismertetése	22
2.5. A rendszert működtető programkód	23
2.6. Mérések.....	25
2.6.1. A szimuláció és a valós rendszer összehasonlítása	25
2.6.2. Pozíció szabályozás	27
3.Összefoglaló.....	34
3.1. Az elért eredmények	34
3.2 Továbbfejlesztési lehetőségek	35
4.Irodalomjegyzék	36

1.ELŐZMÉNYEK

1.1 NAPJAINKBAN HASZNÁLT SZERVOMOTOROS RENDSZEREK

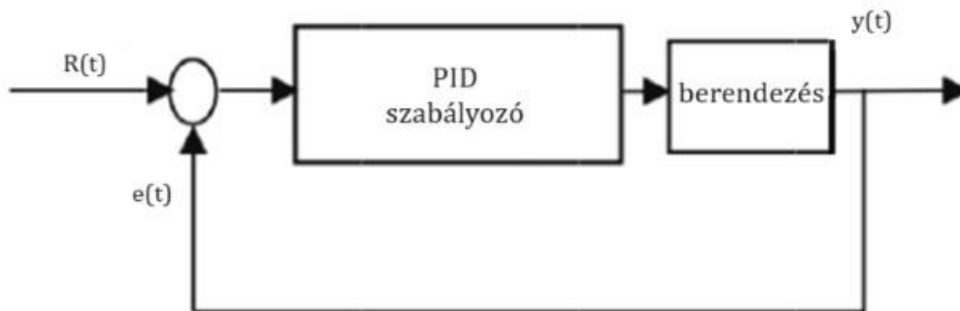
Az egyenáramú motorok egyedülálló örökséggel rendelkeznek az iparban. hiszen kezdetben az összes ipari szervóhajtás egyenáramú motorokat használt. [1] Az egyenáramú szervomotor az egyik legszélesebb körben használt hajtómotor az iparban, ezen kívül használják még robotmanipulátorokban és háztartási gépekben is, mert sokféle formában és méretben kapható, így az alkalmazása meglehetősen egyszerű, valamint rugalmas, ezen kívül magas a megbízhatósága és alacsony a költsége [1]. Az elektromos energiát mechanikai energiává alakítja át. A váltakozó áramú meghajtáshoz képest az egyenáramú motoros meghajtások egyszerűek és kevésbé költségesek [2]. Az egyenáramú motorok a legalkalmasabbak széles körű sebességszabályozásra, ezért számos szabályozható sebességű hajtásban használják őket.



1. Ábra: A DC motor modellje [2]

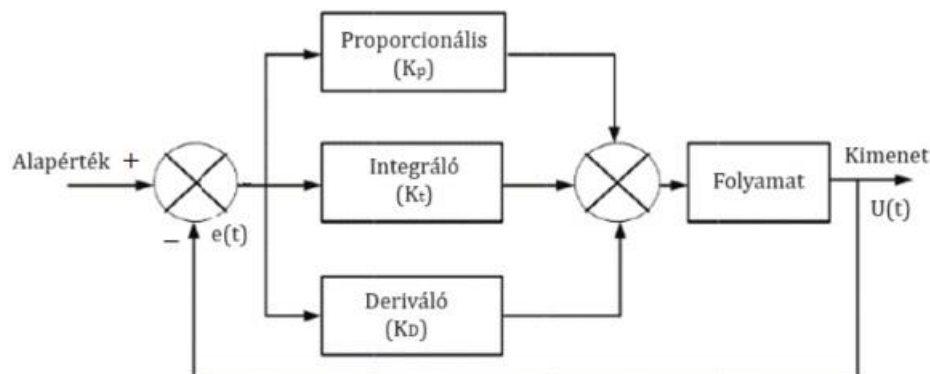
Az egyenáramú motorok fordulatszám-szabályozási képességgel rendelkeznek, ami azt jelenti, hogy a fordulatszám, a nyomaték és még a forgásirány is beállítható, bármikor megváltoztatható az új körülményeknek megfelelően [3]. Mivel a sebesség közvetlenül arányos az armatúrafeszültséggel és fordítottan arányos a pólusok által termelt mágneses fluxussal, és az armatúrafeszültség és a mezőáram beállítása megváltoztatja a rotor sebességét [2]. Általánosságban elmondható, hogy az egyenáramú szervomotoros rendszerek egyszerűek, alacsony fordulatszámú motoroknak tekinthetők. Valamint nincsenek különösebb tervezési vagy megvalósítási nehézségeik. A terhelési hatások azonban akadályozó hatással vannak a rendszer válaszára. Mivel, ha a terhelés változik, az eredeti szabályozó általában nem tudja fenntartani a tervezésseljesítményét, és ezért újra kell tervezni az új rendszerfeltételekhez. Sok szabályozási sémát, mint például PI,

PID, optimális, adaptív és robusztus szabályozó fejlesztettek ki a terhelési hatások csökkentésére a múltban, illetve mai napig aktív kutatási terület.



2. Ábra: Visszacsatolt rendszer [2]

Mindegyik megközelítésnek megvannak a maga előnyei és hátrányai a gyakorlati megvalósításban, a legtöbb szabályozót még mindig úgy kell megtervezni, hogy a paraméterek és az üzem részletes felépítése alapján kell megtervezni. Ennek hiányában a terheléshatások megjelenésével nem érhető el jobb szabályozási teljesítmény [4]. A pontos és hatékony behangolás miatt a PID szabályozó kiemelkedően fontos a feldolgozóipar számára, mivel egyszerű, jó stabilitás jellemzi és nagy a megbízhatósága. Ha a PID szabályozó paraméterei nincsenek megfelelően behangolva a szabályozó teljesítménye nem lesz megfelelő [5]. A PID-szabályozó három állandó paramétert tartalmaz, amelyeket arányos (P), integrál (I) és derivált (D) értékeknek nevezünk, ezek az értékek időben értelmezhetők. A P a jelenlegi hibától, az I a múltbeli hiba felhalmozódásától függ, a D pedig a jövőbeli hiba előrejelzésére mutat az aktuális változás mértéke alapján.



3. Ábra: A PID szabályozó block diagramja [2]

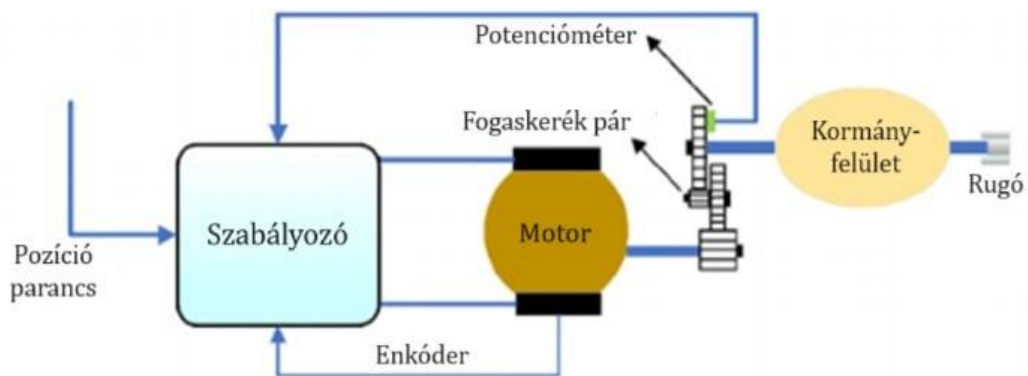
M. Ya. Alwardat, P. V. Balabanov kísérletei alapján megállapítható, hogy a PID-szabályozó nagyon hatékony és erős szabályozó, amely képes a DC-motor zárt hurkú

sebességszabályozásának szabályozására változó terhelés mellett. A cikkükben javasolt rendszer szimulációs eredményei bizonyították, hogy a PID-szabályozó jobb szabályozási megközelítéssel rendelkezik a motor sebességének szabályozására és fenntartására változó terhelési feltétel mellett [2]. A szabályozó paramétereinek megváltoztatása nehézségeket okozhat a további vizsgálatoknál, ezért PID paraméterek szokványos hangolása nem megfelelő egyes összetettebb számításoknál. Pneumatikus rendszerekben, a vezérlőrendszer működése instabil, így ennek javítása érdekében néhány esetben a szabályozó paramétereit úgy kell hangolni, hogy szinkronizálni kell a szabályozót a szabályozott változóval, ezáltal a folyamat megfelelő működési állapotot fog mutatni, megfelelő hangolási állandóval. Így szükség van az automatikus hangolásra és a szabályozó folyamatos frissítésére, valamint a paraméterek folyamatos frissítésére. Pozíciószabályozó egyenáramú szervomotorhoz BFA alkalmazásával a PID szabályozó vezérlésében tett javaslatot Manal H. Jasim egyik tanulmányban. A modell eredménye rámutat arra, hogy a BFA hatékonyan működik és kiváló kapcsolatot biztosít a PID szabályozó és a rendszer aktív reakciója között. Az eredmények azt mutatják, hogy a PID szabályozón alapuló BFA nagy teljesítményt nyújt a vizsgált rendszer esetében, és megmutatta a BFA előnyét, amely sikeresen biztosította az optimális szabályozó paramétereket [4] [6]. A mechatronikai tervezés hagyományos módszerei gyakran szekvenciális megközelítésen alapulnak, ahol először a mechanikus szerkezetet tervezik meg, majd felszerelik a készen kapható villanymotorokkal, meghajtóelektronikával, hajtóművekkel és érzékelőkkel. Végül egy vezérlőrendszert terveznek és optimalizálnak a már meglévő fizikai rendszerhez. Egy ilyen tervezési módszer, amely a fizikai rendszer tervezése során nem veszi figyelembe a vezérlési szempontokat, nem valószínű, hogy optimális vezérlési teljesítményű rendszert eredményez. Továbbá az egyes fizikai komponensek külön-külön történő tervezése és optimalizálása globális szempontból általában nem eredményez olyan rendszert, amely súly, méret vagy költség szempontjából optimális. Egy integrált mechatronikai rendszer optimális tervezéséhez a rendszert egészként kell kezelni, az összes érintett műszaki terület szempontjait egyidejűleg figyelembe véve. Roos Fredrik tanulmányában a mechatronikus szervorendszerek integrált tervezésének ilyen megközelítése került bemutatásra. Olyan tervezési módszertant dolgozott ki, amely figyelembe veszi a villamos gép, a hajtómű, a géphajtó és a vezérlőrendszer egyidejű tervezését, és ezáltal lehetővé teszi a globális optimalizálást. A tervezési módszertan célja a koncepcionális tervezés és értékelés. A módszertan ezután felhasználható a lehető legkönnyebb vagy legkisebb rendszer

levezetésére, amely képes a megadott terhelést meghajtani. Továbbá a vezérlési teljesítményt értékeli és optimalizálja, úgy, hogy a fizikai rendszertervezés és a vezérlőtervezés integrálódik. A módszertan modellezésen és szimuláción alapul. Kétféle komponensmodellt fejlesztettek ki, statikus és dinamikus modelleket. A statikus modellek a fizikai alkatrészek paraméterei közötti kapcsolatokat írják le, például egy alkatrész nyomatékhatását a méretének függvényében. A statikus modellek a hagyományos tervezési szabályokon alapulnak, és a rendszer fizikai részeinek optimalizálására szolgálnak. A dinamikus modellek az alkatrészek viselkedését írják le, és a vezérlőrendszer tervezéséhez és a teljesítmény optimalizálásához használják. Az elektromechanikus szervorendszerek tervezésekor és optimalizálásakor a fogaskerék áttétel a legközpontibb tervezési változó. A hajtómű áttétel közvetlenül befolyásolja a hajtóműfejt, az elektromos gép és a gépmeghajtó szükséges méretét. De nagy hatással van a rendszer vezérlési teljesítményére is. Arra a következtetésre jutottak, hogy a nagy áttételi arányok általában jobbák a szabályozás szempontjából, mint az alacsony áttételi arányok. Ennek következménye, hogy a nagy áttételszámú szervorendszerekben a vezérlési teljesítmény romlása nélkül lehet olcsóbb, bár kevésbé pontos érzékelőket és mikroprocesszorokat használni, míg az alacsony áttételszámú rendszerek drágább hardvert igényelnek. Arra a következtetésre is jutottak, hogy az ilyen típusú integrált elemzésbe feltétlenül be kell vonni az összes teljesítménykorlátozó jelenséget, a lineárisokat és a nem lineárisokat egyaránt. Ha például egy linearizált rendszerleírást használunk a szabályozó tervezéséhez, akkor a szabályozórendszer és a fizikai rendszer tervezése közötti legfontosabb kapcsolódási pontok közül sokat figyelmen kívül hagyunk. [7]. A szervó-vezérlés számos ipari termelésben nélkülözhetetlen például az összeszerelő sorok, valamint a mindennapi létesítmények körében. Ilyenek például a felvonók. A szervorendszerek tervezésénél a fő cél a pontos követés biztosítása a teljesítmény korlátozás, a különböző zavarok és bizonytalanságok ellenére a valós alkalmazási környezetben. Eddig ezt a témát széles körben tanulmányozták, és számos szabályozási sémát fejlesztettek ki [8]. A szervorendszereket széles körben használják az ipari automatizálásban és a robotikában. A szervorendszerek általában különböző mechanikus alkatrészekből, mint például motorokból, mozgatókból, fogaskerekekből, szíjakból és tengelykapcsolókból állnak, és általában olyan mechanikus szerkezetekben alkalmazzák őket, amelyek rugalmas üzemmóddal rendelkezhetnek. Ha a rugalmas üzemmódokat nagy szabályozói nyereséggel gerjesztik, számos rezonancia léphet fel, amelyek kárt okozhatnak a gépekben, és nagy pozicionálási hibákat idézhetnek elő. Az

utóbbi években a gyorsabb műveletek iránti növekvő igény azonban egyre nagyobb szabályozói nyereséget igényel. A rezonanciák gerjesztésének megelőzése érdekében rendkívül fontos a mechanikai rezonancia felismerése és szabályozása. A mechanikai rezonancia problémájának leküzdésére számos technikát fejlesztettek ki. A terhelés sebességének mérésével vagy a gyorsulás visszacsatolásával a torziós rezgések csökkenthetők. Ezek a módszerek azonban további érzékelőket igényelnek [9]. Az egyenáramú motoros szervorendszereket széles körben használják a járművekben is. Xiangyu Wang, Wei Wang, Liang Li, Jialei Shi, Bin Xie tanulmányában egy adaptív szabályozási rendszert javasoltak ismeretlen paraméterekkel és bizonytalan zavarokkal rendelkező egyenáramú motoros szervorendszerekhez. Egy univerzális egyenáramú motor modellt építettek, amely alapján a szabályozási törvényt az úgynevezett „backstepping” módszerrel vezetik le. A zárt hurkú rendszer stabilitása biztosított. A bemutatott szabályozási rendszer hatékonyságának ellenőrzésére szimulációs eredményeket is bemutattak. Ezen túlmenően a módszert egy intelligens jármű aktív kormányzásszabályozásában használták fel, amit hardver a hurokban próbapadon végzett kísérletekkel igazoltak [10]. Mint fentebb említettem szervó hajtásokat használnak a robotika területén is. A robotcsukló szervorendszer a robot kulcsfontosságú része. A közös szervorendszer meghibásodása befolyásolja a robot működési hatékonyságát vagy károsítja a robotot, helyrehozhatatlan károkat okozva. Ezért nagy jelentősége van a robotcsuklós szervorendszer hibadiagnózisának. Elemezni kell a szervomotor demagnetizációs hibáját, a fordulatközi rövidzárlat hibáját és a forgórész excentricitási hibáját, valamint a szervohajtómű-rendszer érzékelő hibáját és inverter hibáját [11]. A szervorendszer teljesítményének két fontos szempontja van, a követési hibák és a kontúrhibák. Hiszen ezek jelentősen befolyásolják az ipari robotok pontosságát nagy sebességű mozgás esetén. A szervorendszer vezérlési paramétereinek gondos hangolása elengedhetetlen, ha el akarjuk kerülni a súlyos szerkezeti rezgések és a nagy kontúrhiba kockázatát [12]. Az elektromos szervorendszer szabályozza a hatékonyságot, és közvetlenül befolyásolja az energiafogyasztást és a rendszer dinamikai jellemzőit. Az elektromos szervorendszer szabályozási teljesítményét azonban olyan bizonytalanságok befolyásolják, mint a súrlódás, a hézagok és az alkatrészek öregedése, kopása. Az elektromos szervorendszer szabályozási teljesítményének javítása érdekében az elektromos szervorendszer bevezették a részecske raj optimalizálását és a véges idejű szervorendszer-szabályozását alapuló kombináló szabályozási technológiát. Valójában nehéz megismerni a valós elektromos

szervorendszer bizonytalan fizikai paramétereit. Az elektromos szervorendszer egyfajta nagy pontosságú pozíciószabályozó rendszer, amelynek szabályozási teljesítménye közvetlenül befolyásolja a stabilitást és a gyors reagálást. A hidraulikus és pneumatikus kormányművekhez képest nagy megbízhatósága és alacsony energiafogyasztása miatt széles körben alkalmazzák a teljesen elektromos meghajtású repülőgépekben és űrhajókban. Az elektromos szervorendszer összetettsége miatt nehéz pontos paramétereket közvetlenül a tényleges rendszerből kinyerni, és a rendszer paramétereinek pontossága fontos alapja a szabályozó pontos tervezésének és hatékony alkalmazásának. Ezért a nagy teljesítményű vezérlő megtervezésének előfeltétele az elektromos szervorendszer pontos modellparamétereinek optimalizálási kritériumok révén történő megismerése [13].



4. Ábra: Az elektromos szervo rendszer block diagramja [13]

Hidraulikus szervorendszerek is nagymértékben elterjedtek az iparban. Amikor a zárt hurkú hidraulikus vezérlőrendszerek először kezdtek megjelenni az iparban, azok általában olyan alkalmazások voltak, ahol nagyon nagy teljesítményre volt szükség. Míg a hidraulikus szervorendszereket még mindig nagymértékben használják a nagy teljesítményű alkalmazásokban, mint például a szerszámgépiparban, de kezdenek széles körben elterjedni számos más területen is. iparágakban. Ilyenek például az anyagmozgatás, a mobil berendezések, a műanyagipar, az acélművek, bányászat, olajkutató és autóiipari tesztelés. A zárt hurkú szervohajtás-technológia egyre inkább a gépeknél válik általánossá, például az automatizálásban, ahol az üzemeltetők nagyobb pontosságot, gyorsabb működést és egyszerűbb beállítást várnak el. Elvárás az is, hogy az egyre magasabb szintű automatizálási növekedését elfogadható keretek között tartsák. A legegyszerűbb formájában a szervó vagy más szóval szervomechanizmus egy olyan vezérlőrendszer, amely méri a saját kimenetét, és arra kényszeríti a kimenetet,

hogy gyorsan és pontosan kövessen egy parancs jelet. Ilyen módon a vezérlőeszközben és a vezérlőberendezésben fellépő külső zavarok hatása is minimalizálható. A szervomechanizmus szinte bármilyen fizikai mennyiség szabályozására tervezhető, például mozgás, erő, nyomás, hőmérséklet, elektromos feszültség vagy áram. Ha nagy terhek gyors és pontos vezérlésére van szükség, az elektrohidraulikus szervó sok esetben a legjobb megoldás. Általánosságban elmondható, hogy a hidraulikus szervó gyors reakciót, nagy erőt és rövid lökethosszúságot biztosít. A fő előnyei a hidraulikus szervó hajtásoknak az, hogy az alkatrészek kopási aránya alacsony, nincs holtjáték, jók a merevségi jellemzői, valamint gyorsan reagálnak a sebesség vagy irányváltoztatásra. Bizonyos felhasználási területen a hidraulikus szervóhajtások előnyöket mutatnak az elektromos motoros hajtással szemben. A hidraulikus hajtások lényegesen nagyobb teljesítmény-tömeg aránnyal rendelkeznek, ami magasabb gépváz rezonanciafrekvenciát eredményez egy adott teljesítményszint mellett. A hidraulikus hajtások merevebbek, mint az elektromos hajtások, ami nagyobb hurokerősítést eredményez, ami nagyobb pontossághoz és jobb frekvenciaválaszhoz vezet. A hidraulikus szervók simább teljesítményt nyújtanak alacsony fordulatszámon. A hidraulikus rendszerek nagymértékben önhűtőek, és holtponton is működtethetők. Mind a hidraulikus, mind az elektromos hajtások nagyon megbízhatóak, feltéve, hogy a rendszeresen karban vannak tartva [14]. Az ipari vezérlés területén folyamatosan új technikákat és eljárásokat alkalmaznak. Ezeket a változásokat az ipar azon igénye indokolja, hogy termékeiket gyorsabban és nagyobb pontossággal állítsák elő. Ahhoz, hogy ezek a fejlesztések lehetővé váljanak, a mechanikus, elektromos, pneumatikus és hidraulikus berendezések gyártói folyamatosan új alkatrészeket és rendszereket fejlesztenek. Egyes alkatrészeket általános ipari igények alapján, másokat pedig speciális alkalmazásokhoz fejlesztenek ki. Az alkatrészek utóbbi csoportja, bár speciális alkalmazásokhoz tervezték őket, szabványos alkatrészekké válhatnak, amint a vezérlőrendszer-tervezők elkezdik elképzelni, hogyan lehet őket más vezérlési problémákra alkalmazni. Az elektrohidraulikus szervószelepek az átmeneti időszakot élik. A katonai és szerszámgépes alkalmazásokban elért sikerek azt jelzik, hogy az ipari vezérlési problémákban rejlő lehetőségek igen nagyok. A szervószelep alkalmazásához az ipari vezérlőrendszer tervezőjének meg kell ismernie a szelep funkcióit, képességeit, megbízhatóságát, gazdaságosságát és néhány speciális szempontot is. Ezek a tényezők meglehetősen szorosan összefüggenek egymással, és e tényezők átfogó értékelése határozza meg alkalmasságát. A cikk 1958-ban íródott. Az idő múlásával a hidraulikus

szervoszelepek alkalmazása elterjedté vált az iparban [15]. Az 1970-es évekig számos mechanikai rendszerben széles körben használták a hidraulikus működtetőket, a közelmúltban azonban az elektromos motorok jobb teljesítményüknek köszönhetően általánossá váltak, és a hidraulikus motorokat számos alkalmazásban nagyrészt felváltották az elektromos motorok. Bár ez a tendencia várhatóan a jövőben is folytatódni fog, a mechanikai rendszerek tervezésekor fontos átfogóan felmérni, hogy melyik motor a legmegfelelőbb. A hidraulikus rendszerek részleges vagy teljes villamosítását azonban egyre gyakrabban alkalmazzák - például repülőgépekben, terepjárókban, haszongépjárművekben és személygépkocsikban, hogy csökkentsék a környezetre gyakorolt hatásukat [16].

1.2. SZERVOMOTOROS RENDSZEREK SZEREPE AZ OKTATÁSBAN

A villanymotorok jelentősége mind a tudományos élet, mind az ipar számára nyilvánvaló. A szervovezérlelést széles körben használják számos területen, és számos mérnöki tudományágban is számos oktatási rendszerben nagy hangsúlyt fektetnek ennek megtanítására. Guo-qiang Chen és Jian-li Kang kutatási cikkének célja, hogy megvitassa, hogyan lehet bemutatni az alapokat és a részleteket a hallgató számára. A szervorendszer felépítésének bemutatása után a cikk elemezte a korrelatív tanterveket. A legfontosabb alrendszerekhez tartozó modellezési módszerek kerültek megvitatásra. Végül a szimuláció alkalmazási szintjét is bemutatták. A szervorendszerek közül az egyik legnépszerűbb PMSM-en (állandó mágneses szinkronmotor) alapuló rendszerek, mivel egyre szélesebb körben alkalmazzák őket számos előnyük miatt, mint például a nagy megbízhatóság, a kis tehetetlenségi nyomaték és a kis térfogat. A servo vezérlő rendszert számos mérnöki tudományágban tanítják a hallgatóknak. A technika fejlődésével számítógépes szimuláció hatékony eszköz mind az oktatók és a hallgatók számára, a tudás elsajátítása során. [17]. Jiping Wang, Lujiong Wang A laboratóriumok tervezése mechatronika és villamosmérnöki oktatásra a gyártás korszerűsítésével összefüggésben szóló cikkükben, a világ feldolgozóiparának korszerűsítésével összefüggésben a gyártó vállalatok az intelligens gyártás felé haladó fejlett automatikus termelési rendszereket fogadnak el, ami átfogó műszaki képességeket igényel a mechatronikai valamint a villamosmérnöki szakemberek számára. A cikk a mechatronika és elektrotechnika oktatására tervezett laboratóriumokat mutatja be a mérnöki szakképzésben, ahol a tanulók olyan, az ipar szempontjából releváns

készségeket fejleszthetnek ki, amelyek alkalmazkodnak a feldolgozóipar korszerűsítésének követelményeihez. A szakmai kompetenciák elemzését követően felvázolták a tanterv gyakorlati moduljait, valamint megtervezték és megvalósították a megfelelő laborokat. Az értékelési eredmények azt mutatják, hogy a laboratóriumokban végzett gyakorlatok segítik a hallgatók szükséges technikai képességeinek fejlesztését [18]. Eduard Brinfeldt és Aleksandr Grinko tanulmányt írta a szervohajtások használatáról a mechatronika és a gépészmérnöki területeken az Észti Köztársaság alap- és mesterképzési tanterveinek oktatásában a felsőoktatásban. A tanulmány a szervohajtások arányát vizsgálja a gyártásban és az ipari villamos hajtásokban, és összehasonlítja őket a tantervben lefedett témakörökben. Megvizsgálja, hogy milyen anyagokat és eszközöket használnak a szervohajtások és motorok oktatásában, és hogy ez megfelel-e az ipar és a gyártás igényeinek. A kutatás célja volt az új képzési módszerek elméleti és módszertani alapjainak és a szakmai mechatronikai oktatás gyakorlati útmutatásainak kidolgozása a mai észtországi felsőoktatási intézmények számára. Szükséges meghatározni a munkaerőpiac igényeit a szakiskolákban és egyetemeken a szakemberek felkészítésére, hogy azonosítani lehessen a szakemberek felkészítése során a minőség értékelésének fő módjait [19]. JeeMing Lee és Jung-Tang Huang egyik tanulmányában az ipari szintű, valós idejű motorvezérlést oktató eszközt tervezését mutatják be az irányításelmélet és a fizikai rendszer közötti kapcsolódó alapfogalom elmélyítésére. Az oktatási eszközkészlet egy szervomotoros rendszerben mutatják be az irányítási módszertant. Az egyenáramú motorrendszer-készletet fizikai kísérleti vezérlőrendszerként állítottak össze. A valós idejű vezérlőmodul pontosan elemzi a motor pozíciószabályozását. Egy kísérleti tananyagot terveztek egy alapvető automatikus vezérlési tanfolyam alkalmazásához. Egy ilyen oktatási eszköz célja, hogy nagyon hatékonyan kitöltse az elméleti tudást adó tankönyvek és a gyakorlati tudást igénylő fizikai rendszerek közötti űrt. Egy oktatási célú automatikus vezérlési program alapvető jellemzőit dolgozzák ki ebben a tanulmányban, és nagymértékben javítják egy alapfokú mérnöki kurzus kísérleti tartalmát a vezérlőrendszerek elemzésével és tervezésével kapcsolatban [20]. A fizikai rendszeren történő tanulás számos egyetem és oktató számára kulcsfontosságú, ezért világszerte különböző rendszereket fejlesztettek ki oktatási célra. A Gazi egyetemen egy szervomotorokból álló oktatókészletet terveztek, hogy segítsék a hallgatók fejlődését, különösen az ipari területen dolgozó villamosmérnöki, elektronikai és gépészmérnöki hallgatókét. Ehhez a képzési rendszerhez három AC szervomotort és egy DC szervomotort használnak és

négytengelyes vezérlési mechanizmust hoznak létre. A szervomotorok vezérlése érdekében egy speciális meghajtó áramkört fejlesztettek ki, amelyen keresztül a pozíció és a sebesség vezérlése történik. Ezeket a vezérléseket a felhasználó céljától függően kezelőpanelen vagy számítógépen keresztül lehet kezelni. Ezenkívül egy helyi hálózaton alapuló oktatószoftvert fejlesztettek ki, amely a szervomotorokra vonatkozó elméleti információkat tartalmazza és lehetővé teszi a tesztelési lehetőséget és az animációk megfigyelését. Így egy olyan gyakorlatias, funkcionális és egyben gazdaságos oktatócsomagot fejlesztettek ki, amely lehetővé teszi a hallgatók számára, hogy megtanuljanak és elvégezzenek számos olyan alkalmazást, amelyekkel ipari területen találkozhatnak [21]. A Southern Egyetemen is kifejlesztettek egy oktatási célra tervezett mérőrendszert, mely szerint az irányítás és optimalizálás területén néhány koncepciót és technológiát kell kidolgozni, hogy az irányítástechnikai rendszerekkel kapcsolatos tanórák és laboratóriumi gyakorlatok javítása megkezdődjön, amelyek a legtöbb szempontot is lefedik a klasszikus irányítás, a modern irányítás és az intelligens irányítás elméleteinek valamennyi területén. Az arányos szabályozó a legegyszerűbb és legintuitívabb struktúra a lineáris szabályozórendszerek megvalósítása. Ezért egy közvetlen módszert mutattak be a tanulmányban a stabilitási tartomány meghatározására, amely könnyen érthető, könnyen kiszámítható, és amely a hallgatóknak jobb megértést nyújt a szabályozáselméletben. A program MATLAB nyelven készült. Az online tananyagok hasznosak lesznek a hallgatók számára a tanuláshoz [22]. Az állapotter-rendszerek és a kísérleti rendszerazonosítás az irányítástechnikai oktatás lényeges elemei. Ezeknek az eszközöknek a korai bevezetése az irányítástechnikai laboratórium tantervébe, két szempontból is fontos. Először is, megkönnyíti a hallgatók számára az átmenetet a felsőbb és felsőfokú irányítási koncepciók felé. Emellett hatékony kapcsolatot biztosít az ipari alkalmazásokkal. Ahmad A. Masoud, Mohammad Abu-Ali, Ali Al-Shaikh tanulmányában két újszerű kísérleti eljárást mutat be egy egyenáramú motor állapottermodelljének közvetlen azonosítására egy egyetemi szintű irányítástechnikai laboratóriumban. Az eljárások nem igényelnek speciális hardvert, és szabványos laboratóriumi berendezésekkel végezhetők el. Az első eljárás az állapottermodell közvetlen pszeudoinverzióján alapul. Nem igényel haladó szintű ismereteket az állapotter-megközelítésről vagy a jelszűrésről. Könnyen érthető és megfelel egy első szabályozási laboratóriumnak. A második eljárás hatékonyabb. A Markov-megközelítésen alapul, amelyet általában egy állapottermodell becsült átviteli függvényből történő közvetett megvalósítására használnak. Bár az

eljárást alapképzésben részt vevő hallgatók számára tervezték, viszonylag fejlett állapottér-ismereteket igényel, ami alkalmassá teszi egy második alapképzésben részt vevő irányítási laboratórium számára. A kísérletek után az egyetem visszajelzést kért a hallgatóktól. A kísérletet a diákok általánosságban jól fogadták. Minden hallgató képes volt egy laboratóriumi foglalkozás alatt befejezni a kísérletet a kézikönyvek felhasználásával, minimális függőséggel a laboratóriumi felügyelőtől. A hallgatók többsége jó beszámolót írt. Jelentős részük túllépte az elvárhatót, és kiválóan alapos jelentéseket írt [23].

2.A HAJTÁSRENDSZER KIÉPÍTÉSE, MŰKÖDÉSE, MÉRÉSI EREDMÉNYEK

A munkám során egy egyenáramú motor meghajtására, szabályozására alkalmas mérőrendszert implementáltam. A motor egy állandó mágneses egyenáramú *maxon* típusú motor.

2.1 A hajtásrendszert felépítő elemek, felhasznált eszközök

A rendszert felépítő eszközöket a tanszék biztosította számomra. A kiválasztásnál szem előtt tartottam a tényt, hogy a hajtásrendszer később oktatási célra is használva lesz, ezért fontos volt, hogy az alkatrészek strapabíróak legyenek és az idő múlásával is megfelelően működjenek. Valamint később könnyen bővíthető, fejleszthető legyen a rendszer.

2.1.1 Egyenáramú motor

A motor egy *maxon* márkájú 110075 típusú, grafit kefések motor, az A sorozatból, amelynek tengelyátmérője 16 mm, teljesítménye 2 W, névleges tápfeszültsége 12 V. Az egyik legkisebb teljesítményű szériából került kiválasztásra motor. Ez ideális választásnak bizonyult szabályozás szempontjából. A motor kapcsai közötti ellenállás viszonylag magas ezáltal nem hibásodik meg rövidzárlat esetén sem. A motor lényegesebb adatai az alábbi táblázatban láthatóak.

1.táblázat [1 melléklet]

Névleges feszültség	12V
Terhelés nélküli sebesség	11500 rpm
Terhelés nélküli áram	41 mA
Névleges sebesség	5460 rpm
Névleges nyomaték	2.34 mNm
Névleges áram	0.293 A
Leállási nyomaték	4.78 mNm
Leállási áram	0.521 A
Max. hatékonyság	52%
Terminális ellenállás	23 ohm

Terminális induktivitás	0.83 mH
Nyomaték állandó	9.17 mNm/A
Sebesség állandó	1040 rpm/V
Sebesség/nyomaték gradiens	2620 rpm/mNm
Mechanikus időállandó	23.3 ms
Rotor inercia	0.849 <i>gcm²</i>

2.1.2 Hajtásvezérlő

Azokat az alkatrészeket, amik a motorhoz kapcsolódnak, így a motor meghajtót is a *maxon* online weboldalán található katalógusok segítségével kerültek kiválasztásra. A kis teljesítményű motorhoz egy kis teljesítményű meghajtó lett megvásárolva. A hajtásvezérlő egy kiegészítő áramkörbe van illesztve, amely segít meghatározni a forgásirányt, kapcsolatot létesít a tápegység, adatgyűjtő modul és a hajtásvezérlő közt. Ezt az áramkört egy korábbi fejlesztés során készítették el.

2.1.3 Enkóder

Az enkóder egy Encoder MR, M típusú, 512 CPT felbontású, 2 csatornás line driverrel ellátva. Az 512 CPT felbontás annyit jelent, hogy 512 impulzust ad le egy teljes fordulat megtételével.

2.1.4 Mérésadatgyűjtő modul

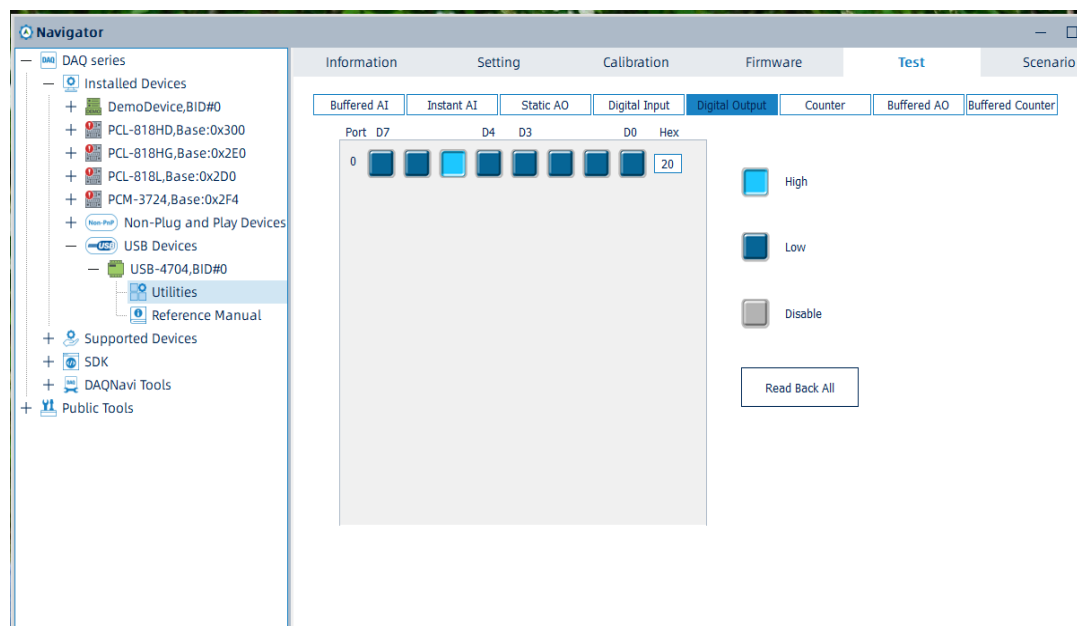
Jel kezelésére az *Advantech USB-4704* adatgyűjtő kártyát használtam. Ez egy könnyű és hatékony módja az adatgyűjtésnek. Az eszköz kellően robosztus ahhoz, hogy mérési és vezérlési információkat adjon bármely USB kompatibilis számítógéphez. Az összes szükséges tápellátást az USB portról kapja, így nincs szükség külső tápcsatlakozásra. Az eszköz analóg bemenete 8 csatornás. Az analóg kimenete 2 csatornás és a kimeneti tartománya 0-5 V. 8 digitális bemenettel és 8 digitális kimenettel rendelkezik. A digitális kimenetek relék formájában vannak megvalósítva, amelyek a számítógép vezérlése révén kapcsolhatók és szakíthatók.

2.1.5 Tápegység

A munkám során egy viszonylag nagy tápegységet használtam, a *AK-B1-420*-at. nem ez volt a legesztétikusabb megoldás, de jelen esetben ez volt a kézenfekvő. Ennek a tápegységnek a teljesítménye 420W, ami többszöröse, mint a motoré.

2.2. SZOFTVEREK

A rendszert működtető programkódot *CodeBlocks*ban írom C++ nyelven. A program több részből is áll. Tartalmazza a main-t, amiben a programtörzs van, valamint több H file-t is. Használtam még a DAQ Navigátort, amivel az *Advantech USB-4704* adatgyűjtő modult tudom elérni.



5. Ábra: DAQ Navigátor

Az elsődleges tesztelési fázisnál az 5. ábrán látható DAQ Navigátorból értem el az adatgyűjtő kártyát, mielőtt a C++ kódot megírtam volna. A számozás jobbról balra történik, hiszen a D0 van a jobb a D7 pedig a bal oldalon, valamint a számok hexadecimális számrendszerben vannak megadva.

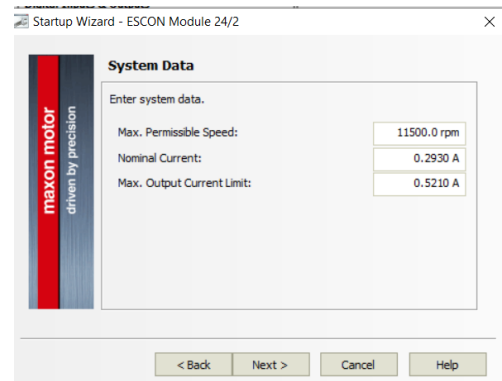
Matlab segítségével a bonyolult matematikai számítások sokkal rövidebb idő alatt megoldhatóvá válnak. A *Matlab* lehetőséget nyújt arra, hogy vizuálisan, ábrákkal is látni lehessen az eredményeket. Az excelben szereplő adataimat könnyedén tudtam *Matlab*ban használni.

A motor driver eléréséhez az *ESCON Studiot* használtam. A 6/a ábrán látható, hogy a szoftver megjeleníti a használt eszközt, majd a 6/b ábrán látható adatok

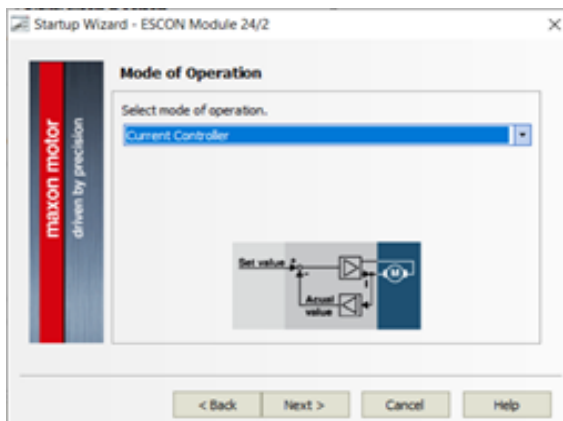
megadásával kezdtem a munkát az *Escon Studioban*. Ezután kiválasztottam az üzemmódot, amit a 6/c ábrán is megjelenő áramszabályozó módra állítottam be. Szükség van még egy enable jelre is, amit az adatgyűjtő kártyáról adunk ki.



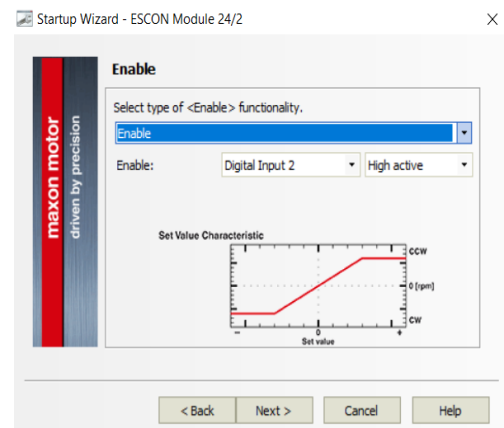
6/a. Ábra: Motor driver



6/b. Ábra: paraméterek megadás

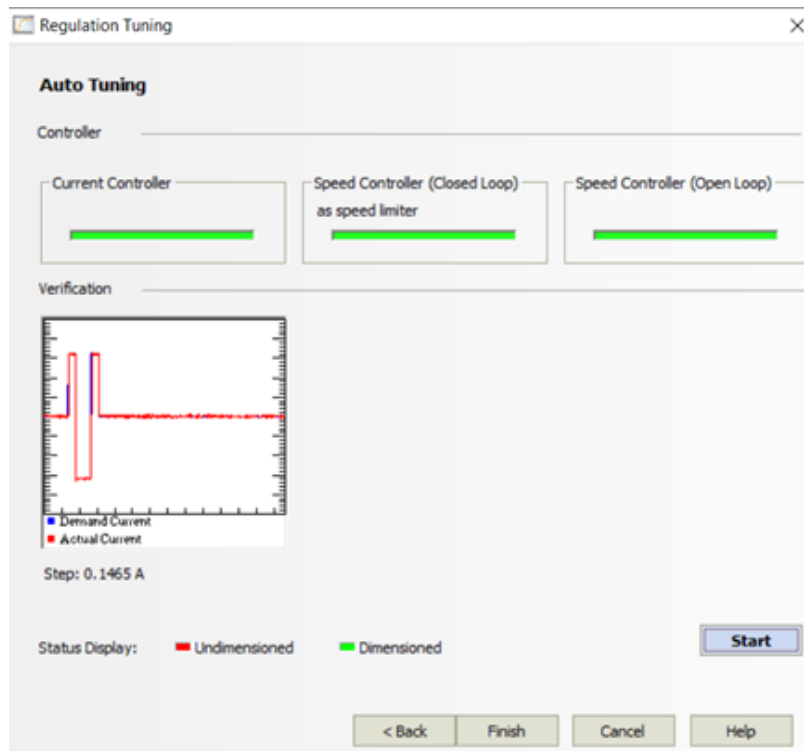


6/c. Ábra: Üzem mód

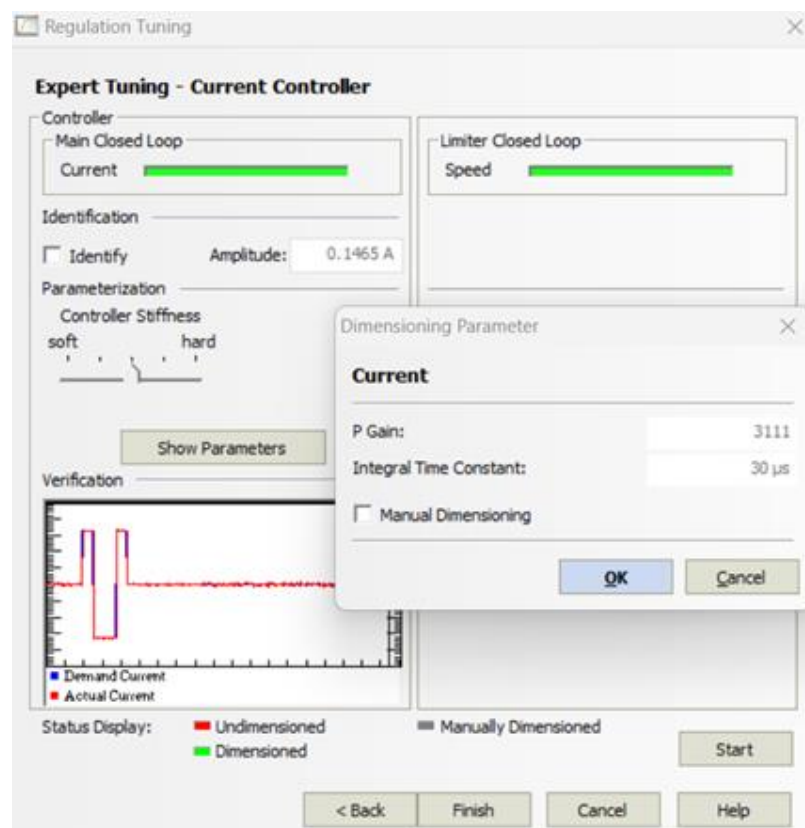


6/d. Ábra: Enable jel

A 7. számú ábrán látható az Auto Tuning utáni eredmény. Fontos megjegyezni, hogy a szoftver lehetőséget kínál arra, hogy automata behangolás nélkül állítsuk be az eszközt. Ezt a funkciót a jelenlegi munkában nem tettük, mivel a szakdolgozatnak nem célja az áramszabályozó hurok hangolása.



7. Ábra: ESCON Studio eredménye automata behangolás után



8.. Ábra: Automata behangolás után kapott értékek

2.3. SZÁMÍTÁSOK

Az ellenőrző számításaim a motor adatainak meghatározásával kezdtem. A motor paramétereit a gyártó által készített adatlapból nyertem ki, amelyekből a leglényegesebbek az 1 táblázatban láthatóak.

$$R_a = 23[\Omega] \quad (1.)$$

$$L_a = 0.343 \times 10^{-3}[H] \quad (2.)$$

$$J_m = 0.849 \times 10^{-7}[kgm^2] \quad (3.)$$

Ezeket az adatokat motor katalógusából olvastam ki. A következő lépésként meghatároztam a $k\phi$ nyomatékkonstans értékét.

$$K_m = 9.17 \frac{mNm}{A} = 11.2 \times 10^{-3} \frac{Nm}{A} = 9.17 \times 10^{-3} \frac{Ws}{radA} = 9.17 \times 10^{-3} \frac{VAs}{radA} = 9.17 \times 10^{-3} \frac{Vs}{rad} \quad (4.)$$

Ezután a sebességkonstanst számoltam ki.

$$K_v = 1040 \frac{rpm}{V} = 1040 \times \frac{\pi rad}{30 s} = 108.91 \frac{rad}{Vs} \rightarrow k_\phi = \frac{1}{K_v} = \frac{1}{108.91} = 9.18 \times 10^{-3} \frac{Vs}{rad} \quad (5.)$$

A B_m értékének meghatározásához először kiszámoltam az üresjárási áramot.

$$I_{anl} = \frac{B_m \times U_{an}}{(k\phi)^2 + B_m R_a} \times B_m \quad (6.)$$

EBBŐL ADÓDÓAN B_m értékét a következő egyenlettel kaptam meg.

$$B_m = \frac{(k\phi)^2 I_{anl}}{(U_{an} - R_a I_{anl})} = \frac{(9.17 \times 10^{-3})^2 \times 41 \times 10^{-3}}{10 - 23 \times 41 \times 10^{-3}} = 3.12 \times 10^{-7} Nms \quad (7.)$$

FIGYELEMBE KELL VENNI, HOGY A SÚRLÓDÁS NEM LINEÁRIS VALÓJÁBAN.

A fordulatszám/nyomaték gradiens:

$$\frac{R_a}{(k\phi)^2} = \frac{23}{(9.17 \times 10^{-3})^2} = 273520.05 \frac{rad}{sNm} \rightarrow \frac{273520.05 \times 30}{1000 \times \pi} = 2611 \frac{rpm}{mNm} \quad (8.)$$

$$K_v \frac{R_a}{K_m} = \frac{1040 \times 23}{9.17} = 2608.51 \frac{rpm}{mNm} \text{ (katalógusban: } 2620 \frac{rpm}{mNm} \text{)} \quad (9.)$$

Az üresjárási áramból kiszámoltam az üresjárási fordulatszámot:

$$\Omega_{nl} = K_v (U_{an} - R_a I_{anl}) = 1040 \times (12 - 23 \times 41 \times 10^{-3}) = 11499.28 \text{ rpm} \quad (10.)$$

(katalógusban: 11500 rpm)

A névleges áramból pedig a névleges fordulatszámot.

$$\Omega_n = K_v (U_{an} - R_a I_{anl}) = 1040 (12 - 23 \times 0.293) = 5471.44 \text{ rpm} \quad (11.)$$

A rövidzárási (tartó) áram, valamint tartó nyomaték

$$I_{rz} = \frac{U_{an}}{R_a} = \frac{12}{23} = 0.521 \text{ A} \text{ (katalógusban: } 0.521 \text{ A)} \quad (12.)$$

$$M_{rz} = K_m I_{rz} = 9.17 \times 0.521 = 4.78 \text{ mNm} \text{ (katalógusban: } 4.78 \text{ mNm)} \quad (13.)$$

A villamos és mechanikai időállandó:

$$T_e = \frac{L_a}{R_a} = \frac{0.83 \times 10^{-3}}{23} = 0,036 \text{ ms} \quad (14.)$$

$$T_m = \frac{J_m R_a}{(k\phi)^2} = \frac{0.849 \times 10^{-7} \times 23}{(9.17 \times 10^{-3})^2} = 23.2 \text{ ms} \quad (\text{katalógusban: } 23.2 \text{ ms})$$

(15.)

P_e elektromos és a tengelyen leadott P_m mechanikai teljesítmény névleges terhelésnél:

$$P_{en} = U_{an} I_n = 12 \times 0.293 = 3.516 \text{ W} \quad (16.)$$

$$P_{mn} = \Omega_n M_n = 5460 \times 4.78 \times 10^{-3} \times \frac{\pi}{30} = 2.73 \text{ W} \quad (17.)$$

A motor szögsebességének Laplace-transzformáltja abban az esetben, ha nincs külső terhelés:

$$\Omega_{z4}(s) = \frac{k\phi}{J_m L_a s^2 + (B_m L_a + J_m R_a) s + (k\phi)^2 B_m R_a} \frac{U_{an}}{s} \quad (18.)$$

behelyettesítve az adatokat:

$$\Omega_{z4}(s) = \frac{9.17 \times 10^{-3}}{7.05 \times 10^{-11} s^2 + 1.95 \times 10^{-6} s + 9.13 \times 10^{-5}} \frac{12}{s} \quad (19.)$$

A további számításokat MATLAB-ban végeztem:

```
syms s La Ra Jm Bm Kfi

Ra = 23
La = 0,83*10^-3
Jm = 0,849*10^-7
Bm = 3,12*10^-7
kfi = 9,17*10^-3
Us = 12

b= [9,17*10^-3*12*(30/pi)];
a=[7,04e-11 1,952e-6 9.13e-5 0];
[r,p,k]=residue(b,a);
Omega = 20/(s+27653)-11529/(s+47)+11509/s
pretty(Omega);
ilaplace(Omega);
```

A számláló és nevező polinom együtthatói:

$$[9,17 \times 10^{-3} \times 12 \times (30/\pi)]$$

$$[7,04 \times 10^{-11} \quad 1,952 \times 10^{-6} \quad 9.13 \times 10^{-5} \quad 0]$$

A residue parancs a törtet részlet törtre bontja a Matlabban.

$$\Omega_{z4}(s) = \frac{20}{s+27653} - \frac{11529}{s+47} + \frac{11509}{s} \quad (20.)$$

Inverz Laplace-transzformáció után:

$$\Omega_{z4}(s) = \varepsilon(t)(20e^{-27653t} - 11529e^{-47t} + 11509) \text{ rpm}$$

(21)

A definíció által meghatározott, valamint a valódi időállandókat összehasonlítva:

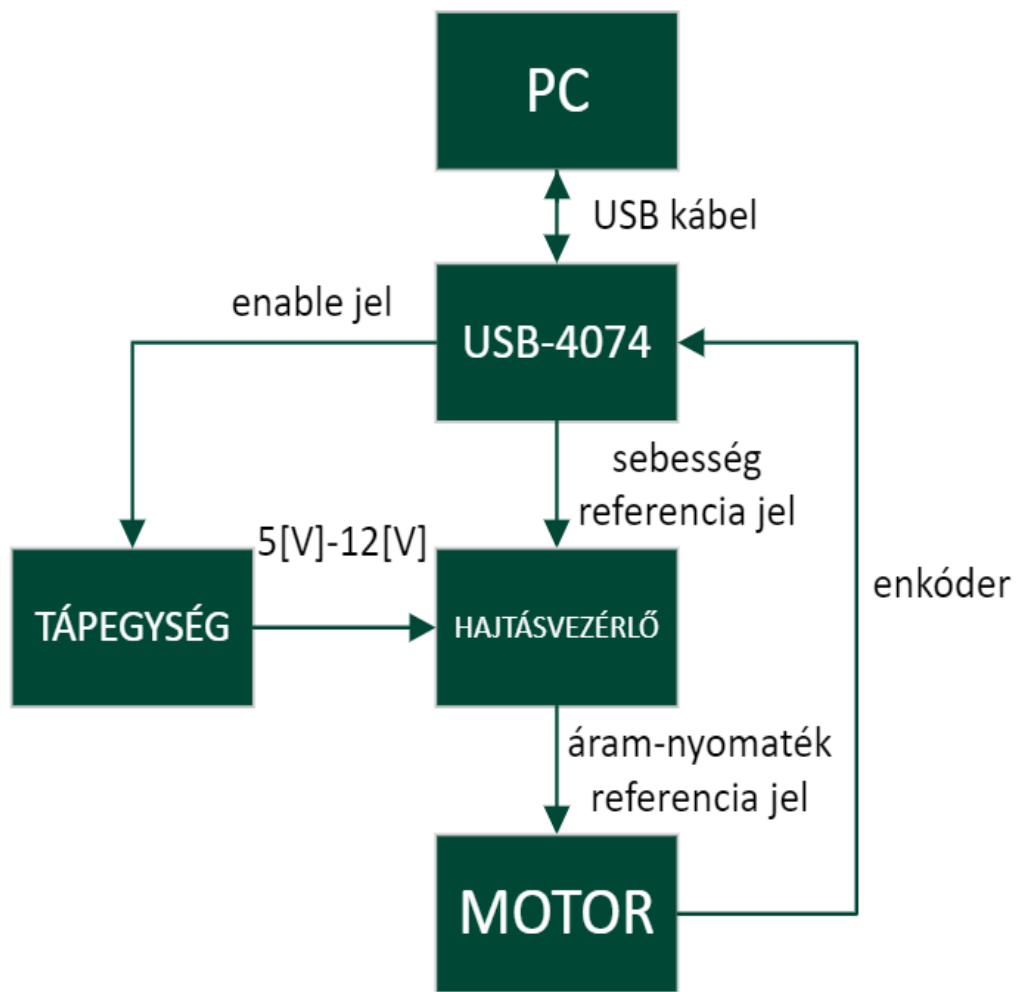
$$Te = \frac{R_e}{L_a} = 0.0361 \text{ ms} \quad (22.)$$

$$T1 = \frac{1}{27653} = 0.03616 \text{ ms} \quad (23.)$$

$$Tm = 23.3 \text{ ms} \quad (24.)$$

$$T2 = \frac{1}{47} = 21.28 \text{ ms} \quad (25.)$$

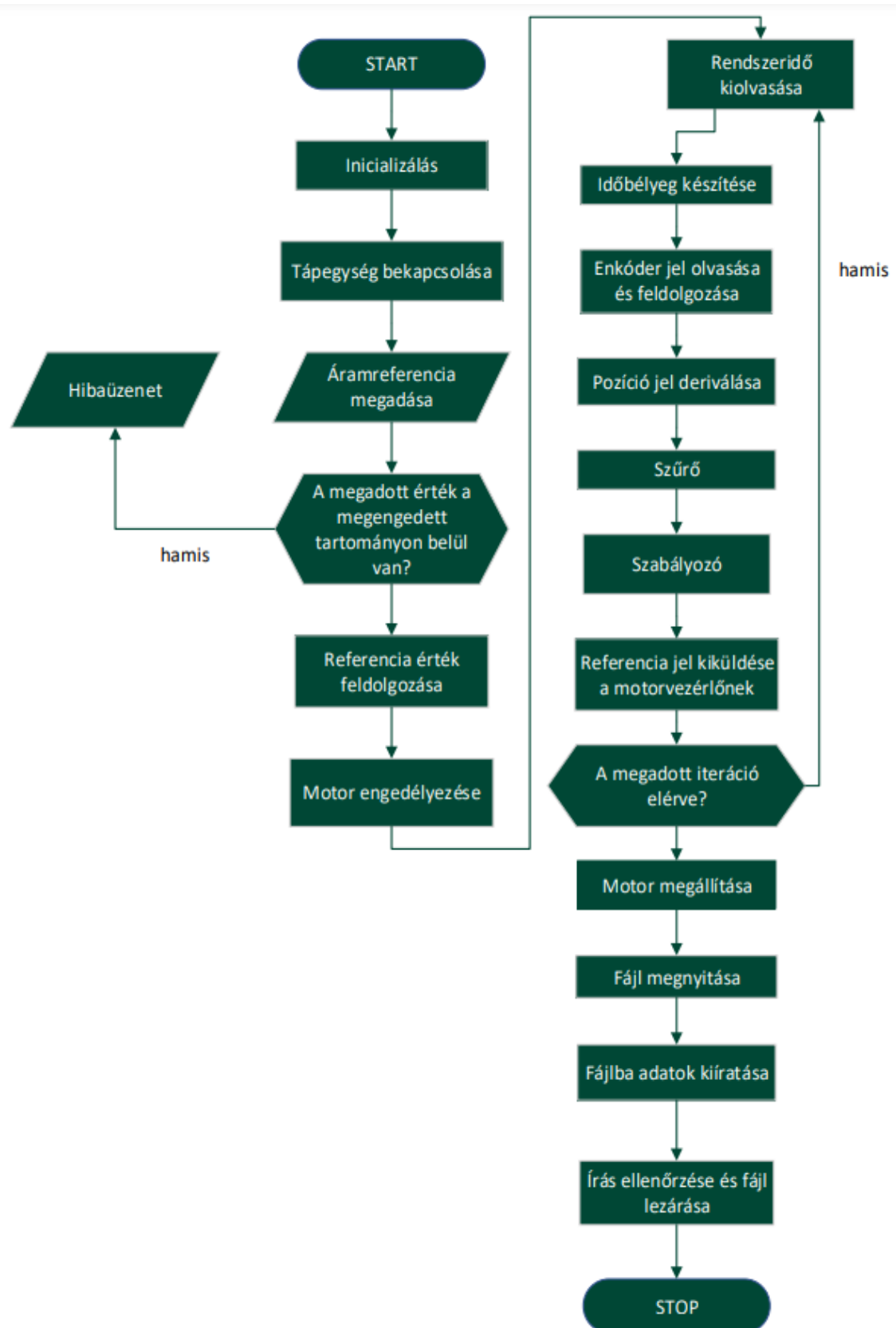
2.4. ELKÉSZÜLT RENDSZER ISMERTETÉSE



9. Ábra: Az elkészült rendszer block diagramja

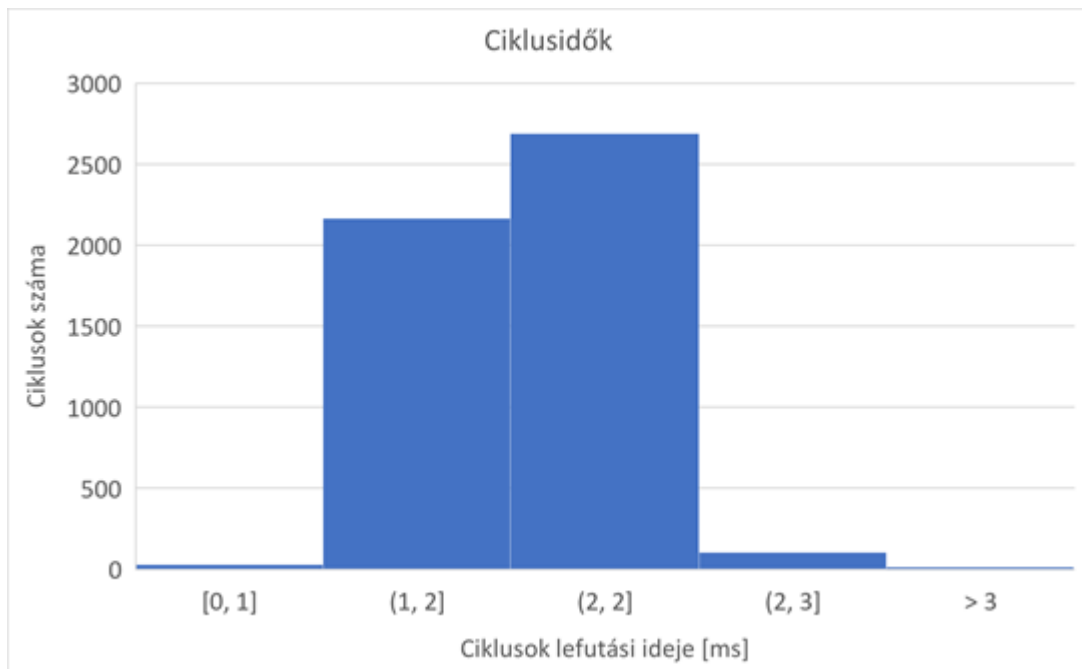
A rendszer működését a 9. ábrán látható folyamatábra illusztrálja. Ahogy az ábrán is látható a PC és az USB-4074 mérésadatgyűjtő modul kölcsönösen kommunikálnak egymással a C++ kódon keresztül. Jelenleg csak analóg és digitális ki, illetve bemeneteket használunk. A mérésadatgyűjtő modul kiadok a tápegységre egy igaz jelet, amit igaz értéken kell tartani. A mérésadatgyűjtő modulról analóg és digitális jeleket küldünk a hajtásvezérlőnek. Digitális jellel az "enable" lábra adunk igaz jelet, analóggal pedig a hajtásrendszerbe beállított áramszabályozónak adunk bemeneti értéket. A mérésadatgyűjtő modul a számítógépről kap tápfeszültséget, míg a hajtásvezérlő és a motor a tápegységről. Az egyiknek 5 V a másiknak (maximum) 12 V szükséges a működéshez. A motoron található encoder jele a mérésadatgyűjtő modulba fut vissza, így tudhatjuk a motor pozíció értékét, és ebből számíthatjuk ki a sebességének értékét.

2.5. A RENDSZERT MŰKÖDTETŐ PROGRAMKÓD



10. Ábra: A rendszert működtető programkód

A C++ kódomat az inicializálással kezdtem. Ezt követően leprogramoztam a tápegység bekapcsolására vonatkozó programrészletet. Ezután a program bekéri az referencia értékét. Megvizsgálja, hogy a megadott érték a megengedett tartományon belül van-e. Abban az esetben, ha a megadott érték magasabb, mint a megengedett a rendszer egy hibaüzenetet küld. Amennyiben benne van a megadott értéktartományban ez a referenciaérték feldolgozásra kerül. Ezt követően a program engedélyező jelet ad ki a hajtásvezérlőnek. A következő lépés a rendszeridő kiolvasása, amit időbélyeg készítésével kezdtem. Mivel *Windows* rendszeren futtatom a programot, ami nem valós idejű operációs rendszer, ezért megoldást kellett találnom arra a problémára, hogy a rendszer valós idejű eredményeket adjon vissza. Ezt a programkód optimalizálásával oldottam meg. A 11. Ábrán látható a ciklusok lefutásának ideje.



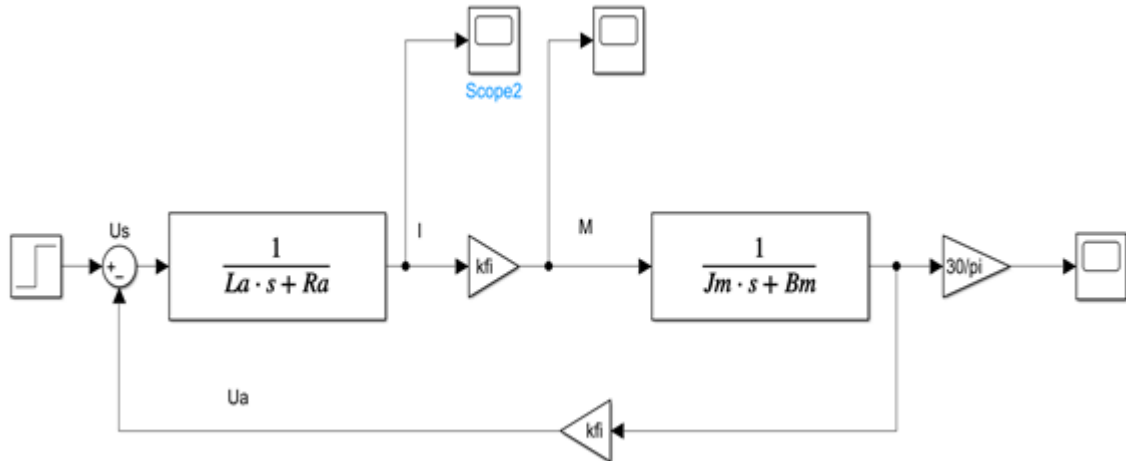
11. Ábra: Ciklusok lefutási ideje

Az időbélyeg készítése után az enkóder jel olvasása és feldolgozása jön. Ezután referencia jelet kiküldünk a motorvezérlőnek. A programot úgy írtam meg, hogy egy bizonyos iteráció szám után magától megálljon, ha elérte ezt az iterációt akkor a motor megáll. Szerettem volna, ha a kapott adataim egy Excel fájlba megjelennének, ezért írtam erre vonatkozóan egy kód részletet. A program megnyitja a fájlt, az adatokat kiírja a fájlba, ellenőríz és bezárja a fájlt.

2.6. MÉRÉSEK

2.6.1. A szimuláció és a valós rendszer összehasonlítása

A motormodellt szimuláltam *Matlab*-ban, hogy összevegyem a mért értékeim a szimulációval. Beavatkozó jelnek egységugrást adtam.

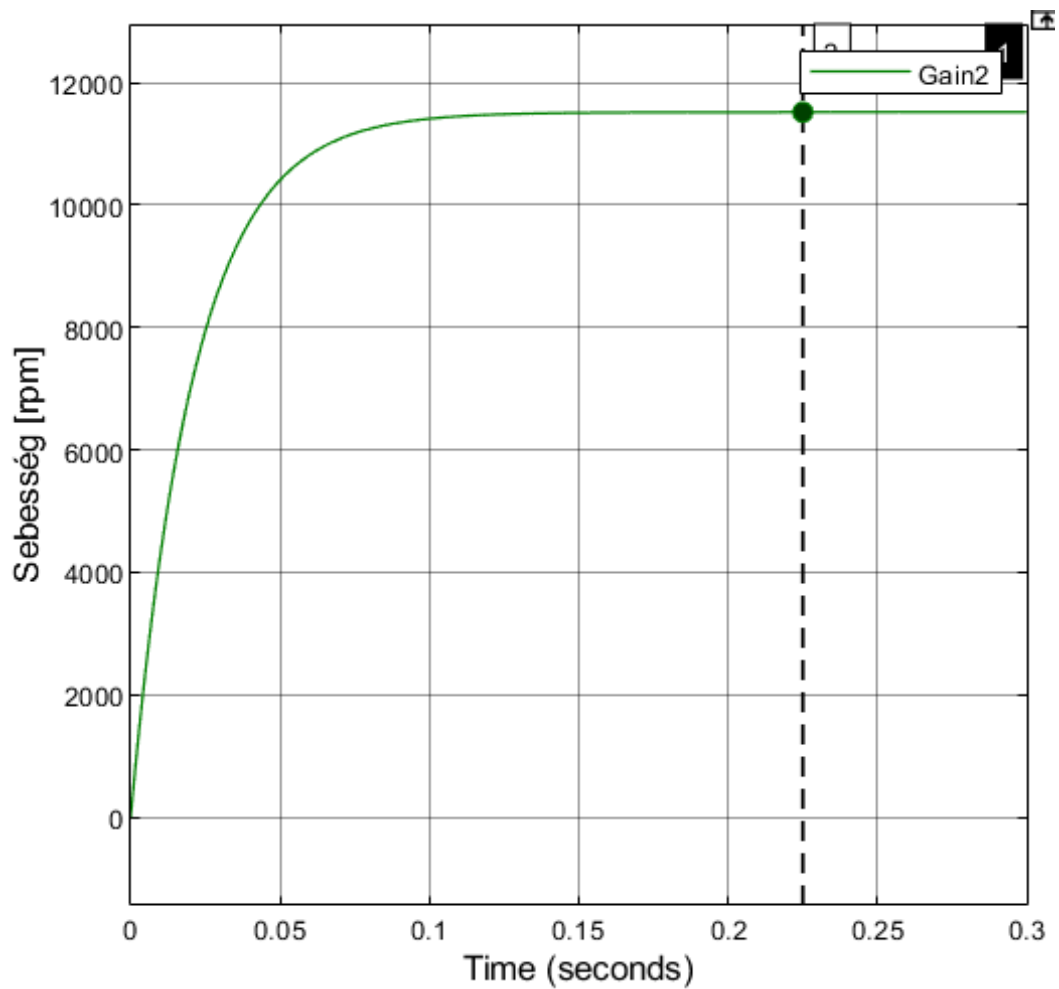


12. Ábra: A motor modell szimulációja

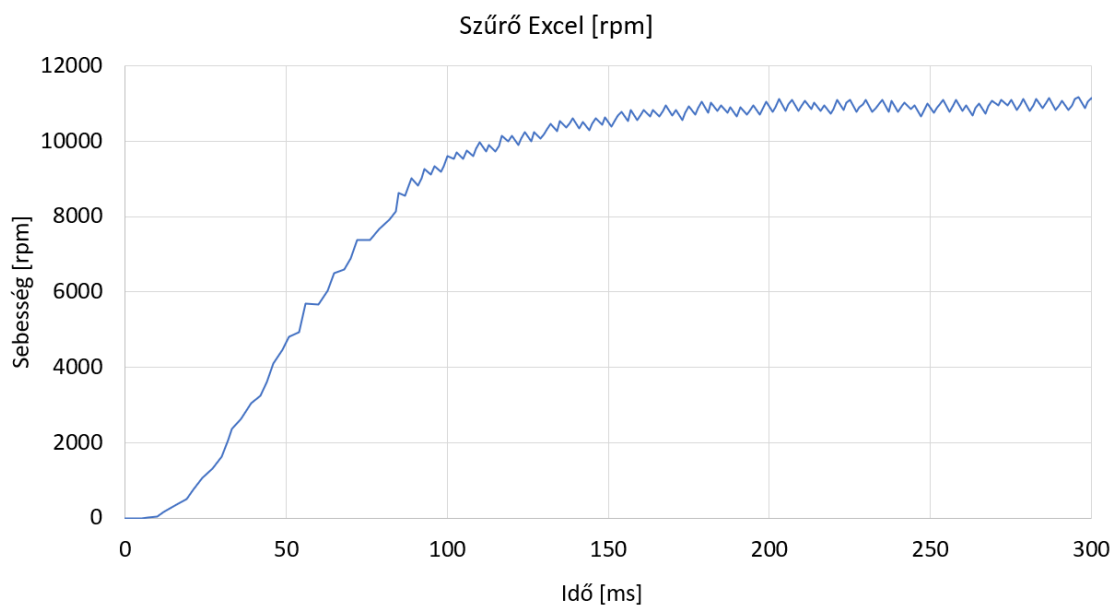
Először megnéztem, hogy a szimuláció milyen eredményt ad, ha az U_s értéket beállítom 12 [V]-ra.

A szimulációsorán használt MATLAB kód:

```
syms s La Ra Jm Bm Kfi  
  
Ra = 23  
La = 0.83*10^-3  
Jm = 0.849*10^-7  
Bm = 3.12*10^-7  
kfi = 9.17*10^-3  
Us = 12  
Tm = 23.3*10^-3  
Te = 0.0301*10^-3
```



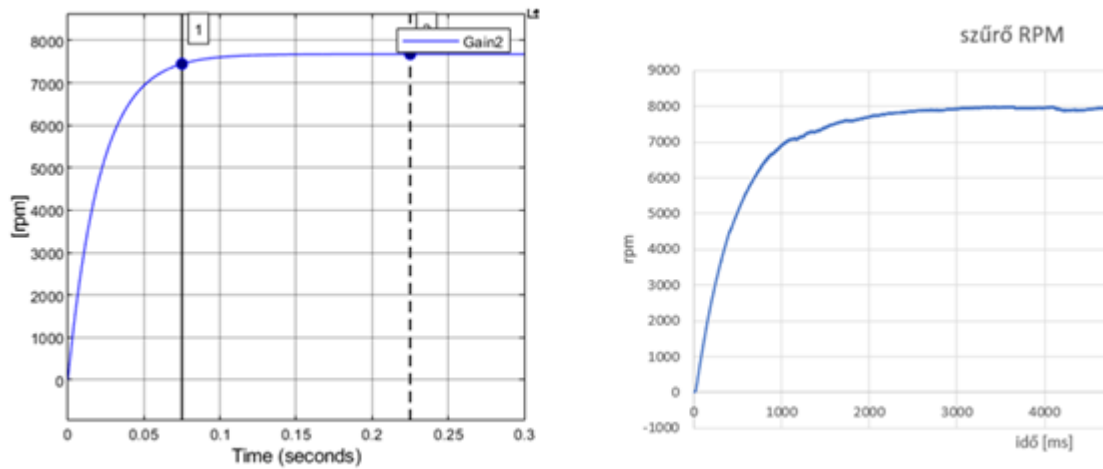
13. Ábra: A szimuláció eredménye $U_s = 12[V]$ esetén



14. Ábra: A valós rendszer eredménye $U_s = 12[v]$ esetén

A 13. és a 14. ábrát összevetve látszik, hogy a valós rendszer az elvárásoknak megfelelően működik és a szimulációval szinte megegyező értéket ad vissza,

figyelembe véve, hogy egy valós mérőrendszeren nem lehet biztosítani a szimulációs körülményeket. Ezt a folyamatot megismételtem $U_s = 8[V]$ -on is.



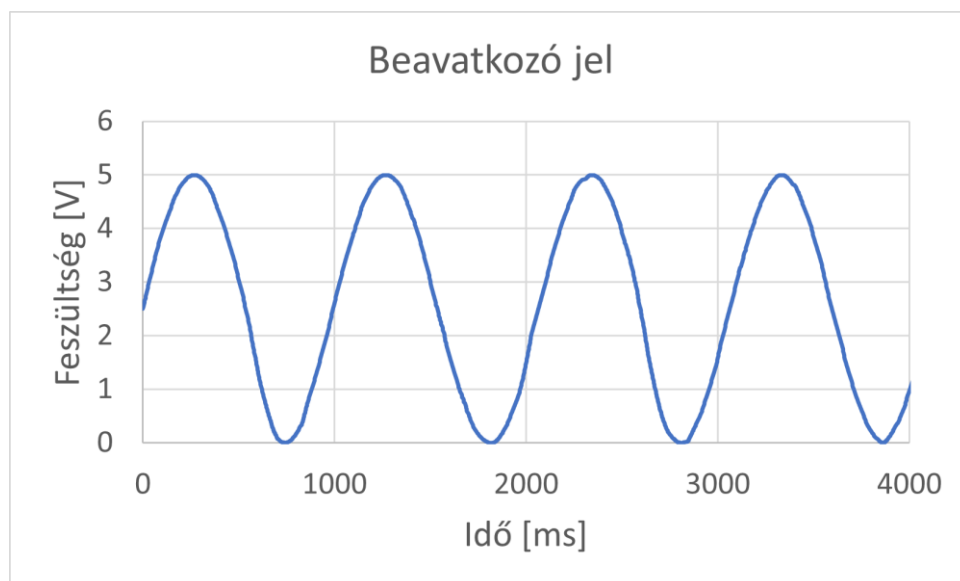
15.Ábra: A valós rendszer és a szimuláció eredménye $U_s = 8[V]$ -on

Ezen a feszültségértéken is a vártnak megfelelő eredményt kaptam, bár a szűrés okozta időkéésés is látható az ábrákon.

2.6.2. POZÍCIÓ SZABÁLYOZÁS

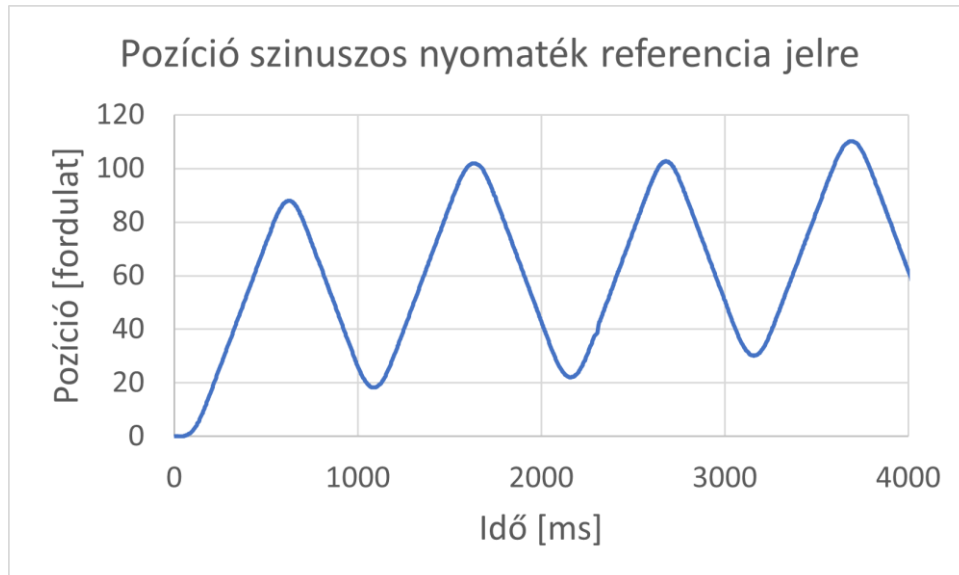
2.6.2.1. P szabályozó

Pozíció szabályozás esetén a rendszer pozícióját egy meghatározott értékre kell eljuttatni, illetve azon az értéken kell tartani. A mérést először a motor pozíciójának tesztelésével kezdtem.



16. Ábra: Beavatkozó jel

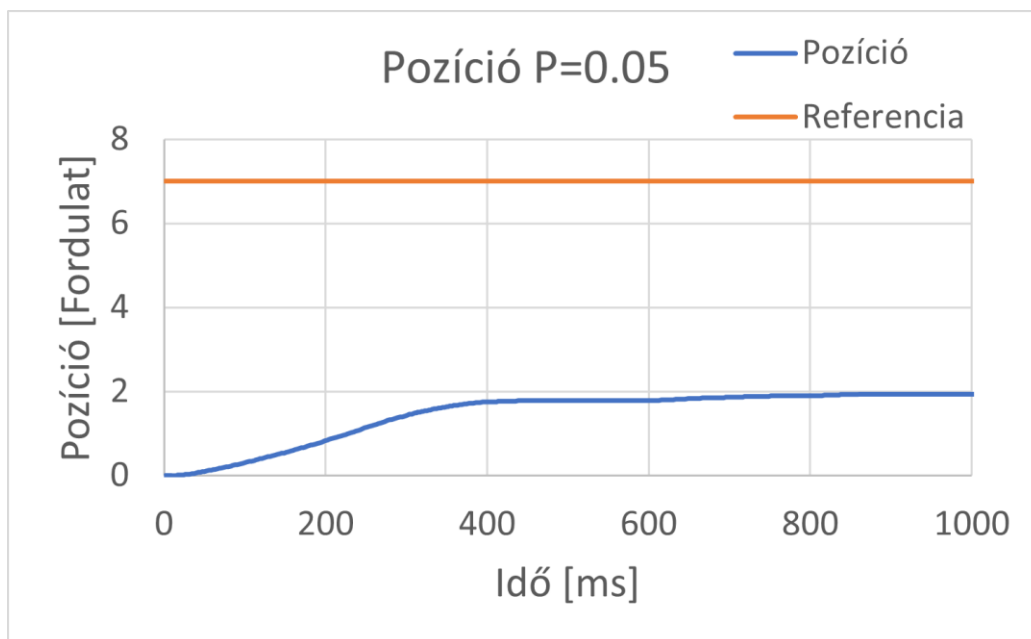
Abban az esetben amikor nem használtam szabályozót a kezdeti tesztelési fázisban a rendszerben, a szinuszos nyomaték referencia jel hatására a pozíciójel a súrlódás hatására kúszik. Ezt mutatja be a 17. ábra.



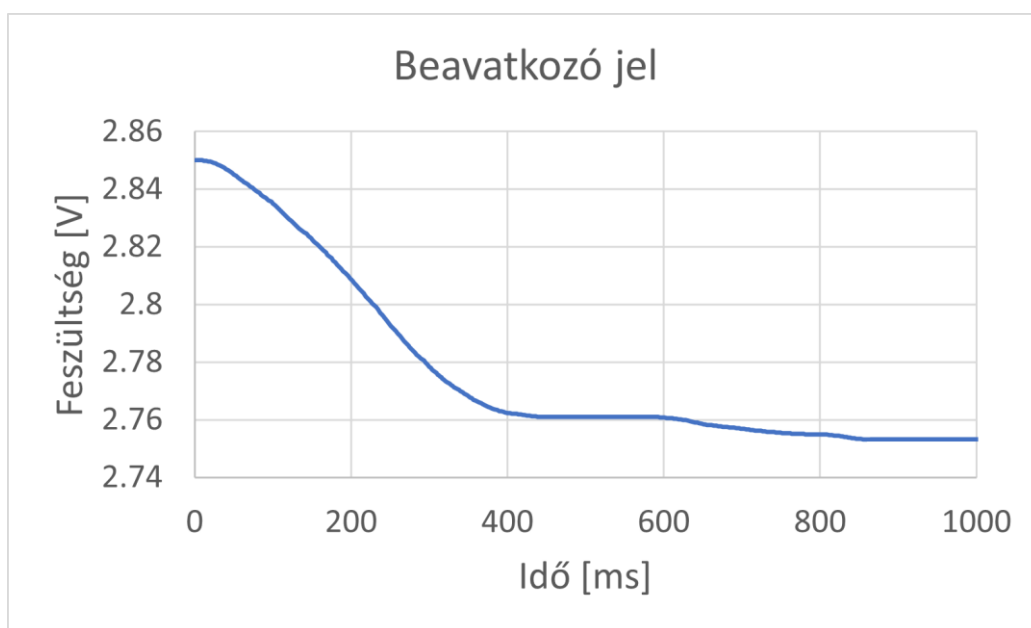
17. Ábra: Pozíció szinuszos nyomaték referencia jelre

Ezután következett a P szabályozás. A szabályozás során különböző P értékeket vizsgáltam és ezek közül párat ábrázoltam is. A méréseim során külön ábrázoltam a hibajelt és a beavatkozó jelet is minden esetben. A P értékek beállítását és meghatározását először alacsony P értékkel kezdtem, majd az értékeket folyamatosan növeltem. Azokon az ábrákon, ahol a pozíció látható ábrázoltam a referencia értéket is, hogy szemléletesebb legyen. Mivel a mérés és adatgyűjtő modul csak 0-5 V közti analóg jelet tud kiadni, így a motor akkor van nyugalmi állapotban amikor az analóg kimeneten 2.5 V mérhető. Ez megfigyelhető a lenti mérések beavatkozó jelénél.

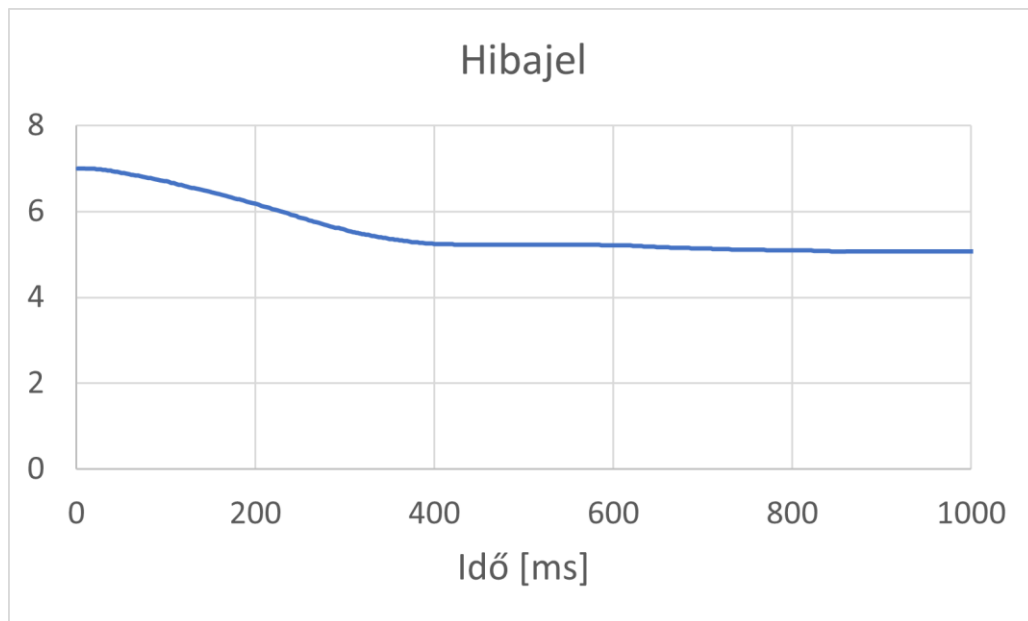
P=0.05



18. Ábra: Pozíció jel P=0.05



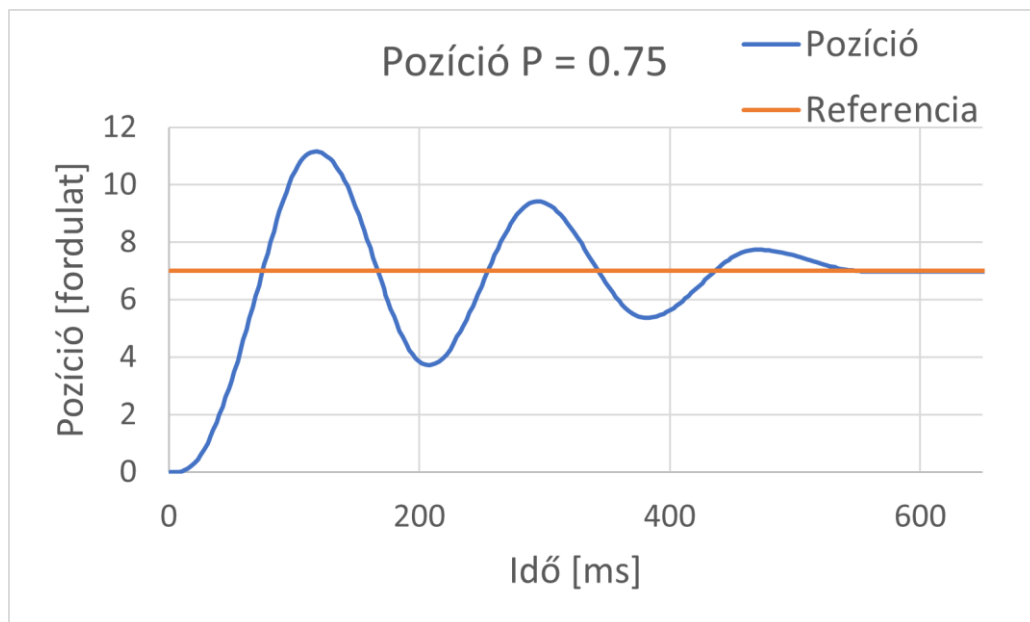
19. Ábra: A beavatkozó jel P=0.05 esetén



20. Ábra: Hibajel értéke $P=0.05$ esetén

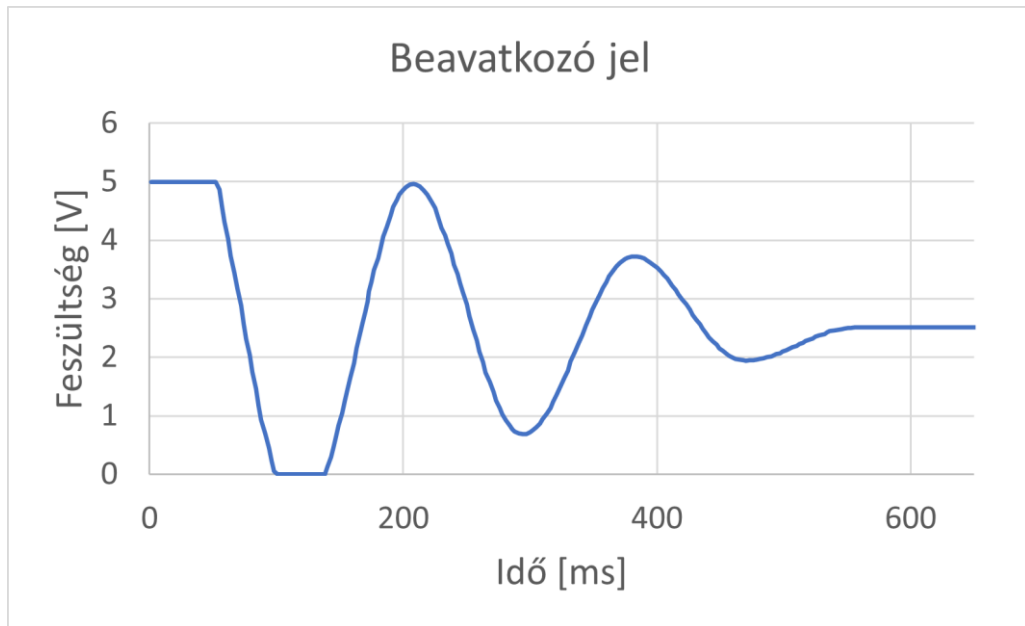
Mivel a fenti esetben meglehetősen kis P értékkel futtattuk a rendszert, így láthatóan nem tudja elérni a kívánt referencia jelet és nagy állandósult hibát kapunk. A hibajelen látható, hogy egy pont után nem csökken tovább. Ez a 20. ábrán figyelhető meg.

Ezután megismételtem a mérést $P = 0.75$ -nél

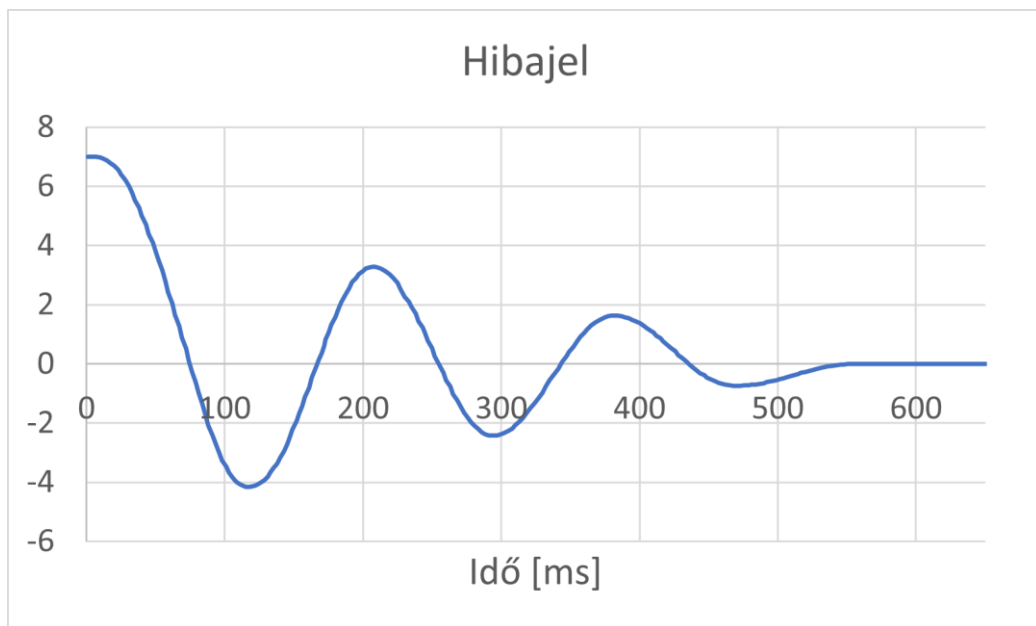


21. Ábra: Pozíció jel $P=0.75$

A 21. ábrán látszik, hogy ennél az értéknél az állandósult hiba minimális és a rendszer közel beáll a kívánt pozíció értékre.

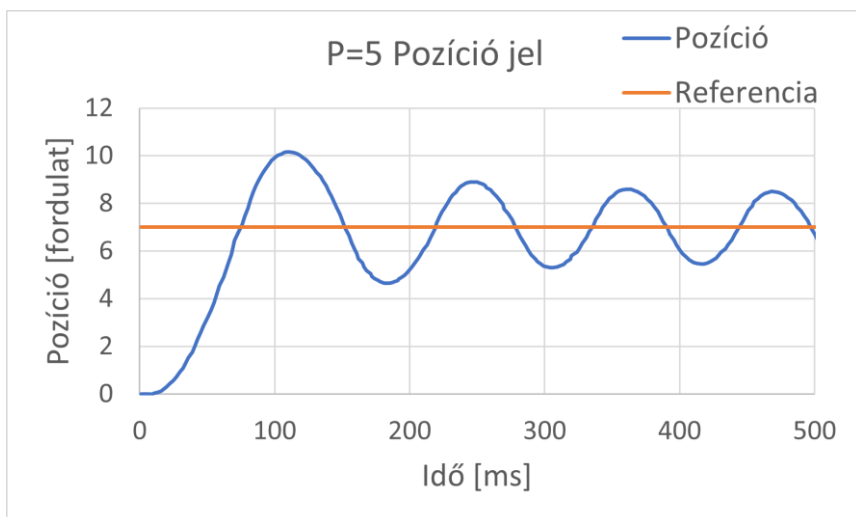


22. Ábra: Beavatkozó jel $P=0.75$ esetén



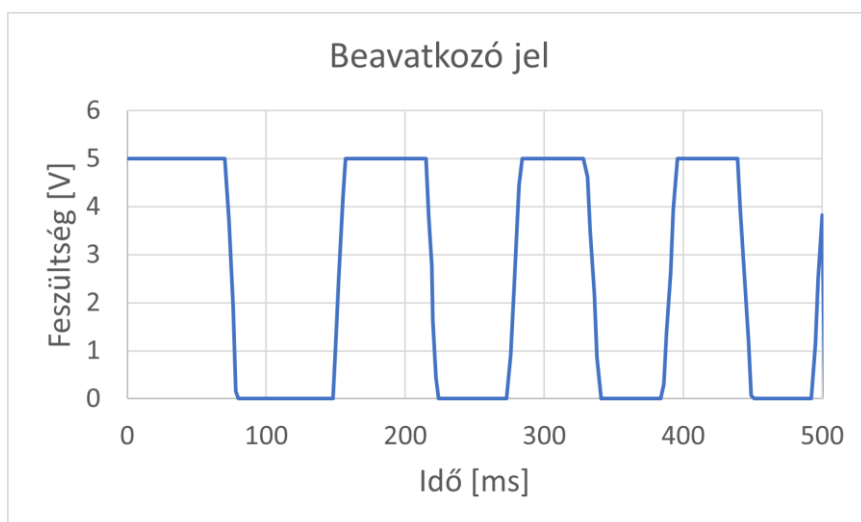
23. Ábra: Hibajel $P=0.75$ esetén

Megfelelő P érték esetén el tudja érni a rendszer a kívánt referencia jelet és minimális állandósult hibát kapunk. A hibajelen látható, hogy egy pont után nulla értéket vesz fel. Ezután egy nagy P értékkel teszteltem a rendszert, hogy megnézzem, hogy válaszol egy magasabb P értékre.

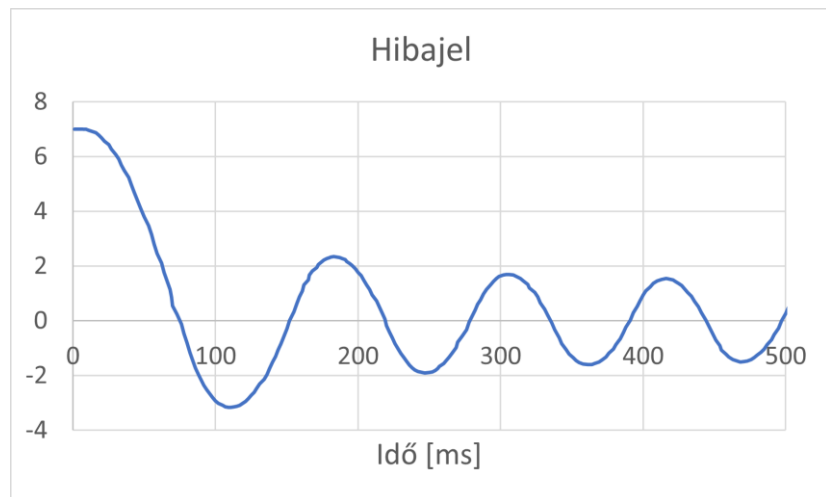


24. Ábra: Pozíció jel $P=5$

Ekkora P érték esetén a szabályozó tútelítődik és állandó amplitúdóval kezd lengeni. Ez látható a beavatkozó jel esetén is, ami a 25. ábrán szemléletesen ábrázolok.



25. Ábra: A beavatkozó jel $P=5$ esetén

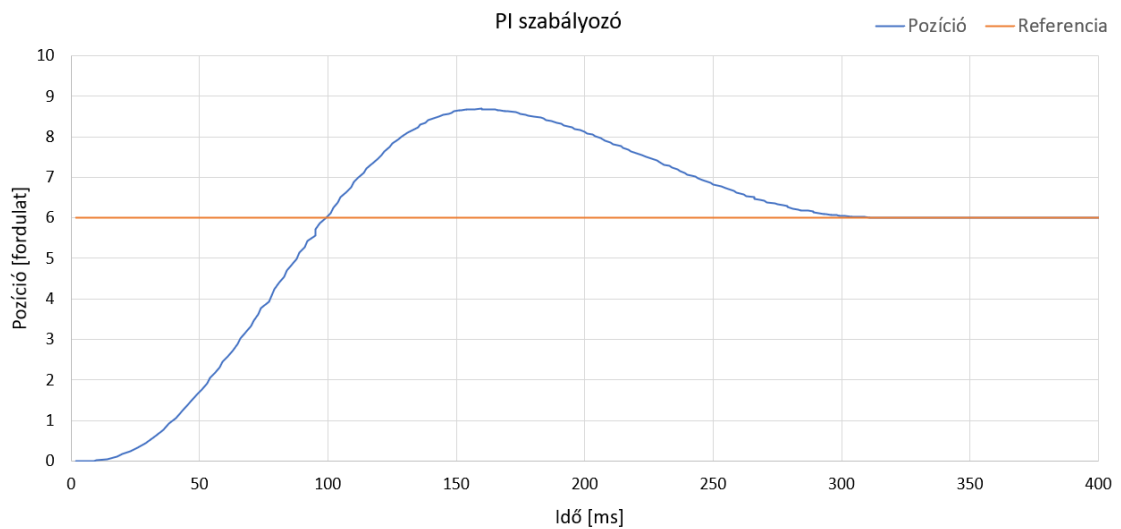


26. Ábra: Hibajel P=5 esetén

A 26. ábrán megfigyelhető, hogy a tútelitődés miatt a hibajel is állandó amplitúdóval leng.

2.6.4.2. PI szabályozó

A PI szabályozó integráló tagjának lényege, hogy eltüntesse az állandósult hibát. Ahogy az az alábbi ábrán látható, a mért eredményen az állandósult pozíció hiba elenyésző.



27. Ábra: PI pozíció szabályozó

3.ÖSSZEFOGLALÓ

3.1. AZ ELÉRT EREDMÉNYEK

Az elért munkám sikeresnek tekintem. A rendszer az előzetes elképzeléseknek megfelelően működik, a mérési feladatokat sikeresen elvégeztem rajta. A mechatronikai mérnöki képzés törzsanyagának tudását fel tudtam használni a dolgozat, illetve a hajtásrendszer készítése során. Sikertült átlátnom a tantárgyak közötti összefüggéseket, egy egész rendszerként tekintek a karon szerzett tudásanyagra.

A rendszert alkotó alkatrészek kiválasztása, megismerése és összeszerelése után, annak érdekében, hogy mélyebb tudásra tegyek szert a motor ellenőrző számításaival folytattam a munkát. Sikertült megismernem egy egyenáramú motor működését.

Ezt követően a rendszert felépítő programkód megírása következett. Ez volt a legfontosabb, hiszen ez adja a rendszer alapját. A kódot lépésről-lépésre írtam, így az folyamatosan bővült. A dolgozat készítése során minden változtatás a programban is változást okozott. A szabályozót is C++-ban programoztam. Az ide vonatkozó kódrészletben a szabályozó paraméterei változtathatóak annak érdekében, hogy egy kevésbé tapasztalt tanuló is lássa, hogy egy-egy paraméter változása milyen változást okoz a rendszerben. Jelenleg P és PI szabályozó szabályozza a pozíció jelet. Néhány mérést szimuláltam *Matlabban*, így össze tudtam hasonlítani a szimulált környezetet a valós rendszerrel. Ez az összehasonlítás közel azonos eredményhez vezetett a két rendszeren, ezzel visszaigazolvva számomra, hogy a valós hajtásrendszer az elvárásoknak megfelelően működik. A valós rendszeren való mérések és tesztelések során tapasztaltam azt, hogy miben más valós rendszeren mérni, mik a nehézségek. Tökéletes eredményt sosem sikerült elérnem, hiszen nem tudtam megteremteni egy olyan környezetet, mint ami egy szimuláció során adott a méréseknél. Ezáltal szembesültem a mérési hiba jelenségével. Annak érdekében, hogy megbizonyosodjak arról, hogy a rendszerem jól működik egy-egy mérést többször is megismételtem. A tervezés során mindvégig fontos szempont volt számomra, hogy az elkészült rendszer könnyen fejleszthető legyen. Ez azért is különösen fontos, hogy a technika rohamos fejlődésével a rendszer is tudjon fejlődni, tudja tartani a lépést a technikával. A hajtásrendszert később oktatási célra is használni fogják. Illetve egy ilyen hajtásrendszerben rengeteg a továbbfejlesztési lehetőség, számos kutatási témának az alapjává válhat a jövőben, mind nekem mind pedig a diáktársaim számára, ezzel

lehetőséget teremtve arra, hogy később a rendszer alapját adja tudományos cikkeknek, TDK dolgozatoknak, valamint szakdolgozatoknak.

3.2 TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

A hajtásrendszer tervezésének első szakasza sikeresnek tekinthető, hiszen elértem az általam kitűzött célokat. A jövőben szeretnék mélyebben foglalkozni a témával és a rendszert fejleszteni, új kutatási eredményeket elérni rajta a további tanulmányaim során. A dolgozatomban látható, hogy a rendszert *Windows* operációs rendszeren futtattam, ami egy nem valós idejű operációs rendszer, így az eredményeim sem valós időben vannak. Ennek a problémának a megoldására vagy egy úgynevezett real time kernel használatával lehetne segíteni, vagy pedig a kód optimalizálásával. Amikor ezek a fejlesztések elkészülnek a munkát tovább szeretném folytatni. A mérőrendszert tovább lehet fejleszteni pontosabb eszközök használatával, mint például a tanszéken megtalálható NI termékekkel. A távlati céljaim között szerepel egy állapotvisszacsatolásos szabályozó implementálása a rendszerbe. Az állapotvisszacsatolásos szabályozó rendkívül hatékony a DC motoroknál. Ez a szabályozási módszer figyelembe veszi a rendszer állapotait és ezek alapján működteti a szabályozót. Az állapot ebben az esetben, a rendszer pillanatnyi állapotát írják le, és ezek alapján lehet irányítani a rendszert. Ez a típusú szabályozó PID szabályozóknál fejlettebb teljesítményt nyújthat.

4. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] K. K. T. O. é. T. M. K. Saito, „A microprocessor-controlled speed regulator with instantaneous speed estimation for motor drives.,” pp. 95-99. , Feb 1988 .
- [2] P. V. B. M. Ya. Alwardat, „Speed control of DC motor using PID controller based on MATLAB,” *Department of Mechatronics and Technological Measurements*, pp. 195-202, 02. 2021.
- [3] U. N. A. V. Aditya Pratap Singh, „Speed Control of DC Motor using Pid Controller Based on Matlab,” *Selected from International Conference on Recent Trends in Applied Sciences with Engineering Applications*, pp. 22-28, 06. Nov. 2013..
- [4] M.-Y. S. a. T.-H. S. Li, „Design and implementation of integrated fuzzy,” *The Science of Intelligent Machines*, pp. 217-240, 10. Aug. 1996.
- [5] K. Li, „PID Tuning for Optimal Closed-Loop Performance With Specified Gain and Phase Margins,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, pp. 1024 - 1030, May 2013.
- [6] M. H. Jasim, „Tuning of a PID Controller by Bacterial Foraging Algorithm for Position,” *Engineering and Technology Journal*, pp. 287-294, 3. Nov. 2018..
- [7] R. Fredrik, „Towards a methodology for integrated design of mechatronic servo systems,” in *Doctoral thesis, comprehensive summary (Other scientific)*, Stockholm, 2007.
- [8] W. Y. J.-g. H. Guoyang Cheng, „Improving the Performance of Motor Drive,” *CES TRANSACTIONS ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS*, pp. 399-408, DECEMBER 2018.
- [9] T.-I. K. a. S.-H. L. b. D.-I. “. C. Wook Bahn a, „Resonant frequency estimation for adaptive notch filters in industrial servo systems,” *Mechatronics*, pp. 45-57, 31 May 2016.

- [10] W. W. L. L. J. S. B. X. Xiangyu Wang, „Adaptive Control of DC Motor Servo System With Application to Vehicle Active Steering,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, pp. 1054 - 1063, 19 March 2019.
- [11] H. Wu és J. Feng, „A Review of Fault Diagnosis Methods of Robot Joint Servo System,” in *2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Beijing, China, 13-16 October 2020.
- [12] A. N. a. I. A. B. Mohamed Slamani, „EFFECT OF SERVO SYSTEMS ON THE CONTOURING ERRORS IN INDUSTRIAL ROBOTS,” *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, March 2012.
- [13] R. Y. C. G. S. G. X. C. Zhihong Wu, „Analysis and Verification of Finite Time Servo System Control with PSO Identification for Electric Servo System,” in *Automatic Test Equipment and System Engineering Research Center of Shanxi Province, North University of China*, Taiyuan 030051, China, 23 July 2019.
- [14] K.-E. Rydberg, „Hydraulic servo systems,” */Fluid and Mechanical Engineering Systems*, 2008-10-15.
- [15] R. Spencer, „Applying the Electro-Hydraulic Servo Valve to Industry,” *IRE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 33 - 39, August 1958.
- [16] Y. T. A. K. Sayako Sakama, „Characteristics of Hydraulic and Electric Servo Motors,” *Actuators*, 19 November 2021.
- [17] J.-l. K. Guo-qiang Chen, „Development of AC Servo Control Simulation Model and Application in Undergraduates Education,” *Communications in Computer and Information Science*, p. 297–302, January 2011.
- [18] J. W. Lujiong Wang, „Design of laboratories for teaching mechatronics/electrical engineering in the context of manufacturing upgrades,” *International Journal of Electrical Engineering Education*, May 2019.
- [19] E. Brinfeldt és A. Grinko, „Servo drives — the use and importance in teaching mechatronics,” in *Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010*, Ohrid, Macedonia, 06-08 September 2010.

- [20] J.-T. H. JeeMing Lee, „Motor drive control system for education and research,” in *Proceedings of 1995 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS 95*, Singapore, 21-24 February 1995.
- [21] M. F. Işık, „Servo Control Education Tool for Industrial Applications,” *Education Tool for Industrial Applications. Elektronika Ir Elektrotehnika*, 106(10), 159-164., 2010-11-19.
- [22] H. P. M. Zhengmao Ye, „Comparisons of Two Feedback Servo Systems for Control Engineering,” in *Proceedings of the 2008 ASEE Gulf-Southwest Annual Conference*, Southern University, 2008.
- [23] M. A.-A. A. A.-S. Ahmad A. Masoud, „Experimental Determination of an Extended DC Servo-Motor State Space Model: An Undergraduate Experiment,” *IEEE*, pp. 4908 - 4923, 26 December 2019.
- [24] V. V. Patel, „Ziegler-Nichols Tuning Method,” *Reson* 25, p. 1385–1397, 29 October 2020.