

## EGY EGYENÁRAMÚ HAJTÁS ANIMÁCIÓJA, SZIMULÁCIÓJA ÉS INTERNET ALAPÚ MÉRÉSE A TÁVOKTATÁSBAN

**Nagy Lóránt**  
BMF KVK AI  
1034 Budapest  
Bécsi út 94-96.  
nagy.lorant.@kvk.bmf.hu

**Korondi Péter, Széll Károly, Sziebig Gábor**  
BME AUT  
1111 Budapest, Goldmann Gy. tér 3.  
korondi@elektro.get.bme.hu  
szkaroly47@yahoo.com  
gabor.sziebig@gmail.com

---

*Absztrakt: A tanulmány egy DC szervorendszer távoktatásához kialakított komplett (animáció, szimuláció és internet alapú mérés) multimédiás oktatóprogramot mutat be. Az animációs program foglalkozik a DC-motor működésének alapjaival, levezeti a nyomaték-sebesség karakterisztikát és elmagyarázza a szabályozástervezés alapvető lépéseit. Az animációs program tartalmaz diákat mind az osztálytermi, mind az önálló tanulás számára. Ennek segítségével a hallgatók szimulálni tudják egy adott szervorendszer szabályozását. Az utolsó és egyben legfontosabb lépés bármely műszaki oktatás esetében a mérés. A távoktatás szempontjából ez a legnagyobb kihívás. A hallgatók egy weboldalon keresztül érhetik el a kísérleti összeállítást. Az adminisztrációt egy C# nyelven írt program végzi. A kísérleti összeállításban egy négysiknegyedes üzemi DC szervómotor található. A vezérlés interneten keresztül kapcsolható ki és be. A hallgatóknak lehetőségük van egy egyszerű PI-szabályozás vagy csúszómód-szabályozás megírására, amelyet egy kommunikációs keretprogramba illesztünk be, hogy utána azzal működtethessük a motort. A mérési eredményt olyan formában kapjuk meg, hogy az kompatibilis legyen a szimulációs eredményekkel, így a hallgatók összehasonlíthassák a szimulációs és mérési eredményeket.*

---

*Kulcsszavak: villamosmérnök távoktatás, e-oktatás, csúszómód-szabályozás.*

### 1. Bevezetés

A DC motoroknak különleges történelmi szerepük van az ipari elektronika világában. Az első mikroprocesszor által vezérelt hajtás és csaknem minden ipari szervóhajtás esetén DC motorokat használtak az elmúlt évtizedekben. A DC szervómotor legfőbb előnye, hogy szabályozási szempontból nagyon jól kezelhető. A mikrokontrollerek megjelenése előtt ez volt az egyetlen megoldás a szervorendszerek területén. Ennek köszönhető az is, hogy az újonnan megjelenő szabályozási eljárásokat először DC szervorendszereken alkalmazzák. A jelenlegi trend szerint ugyanakkor a nem DC (elektronikus kommutációjú, ill. mezőorientált indukciós) motorokkal készenülő szervóhajtásokat is szeretnék a DC szervóhajtásokhoz hasonlóan módszerekkel szabályozni. Az ipari megoldásokban továbbra is a PID szabályozási módszer a legelterjedtebb. A másik népszerű megoldás a csúszómód-szabályozás, amelyet az 1970-es évek végén mutattak be, és a nagyteljesítményű mozgásszabályozások esetén alkalmaznak. A mai alkalmazások a csúszómód-szabályozást különféle lágyszámítási módszerekkel kombinálják.

### 2. DC szervómotor és hajtás animációja

#### 2.1. Az animáció struktúrája és koncepciója

A hagyományos módszereket alkalmazva igazán nehéz a szervorendszerek bonyolult működésének és szabályozásának oktatása. Az álló képek (amelyeket a könyvekben, vagy a számítógépes powerpoint file-okban találhatunk) nem alkalmasak önálló tanulásra. Ugyanakkor a modern multimédia lehetőségeit jól lehet alkalmazni ezen a területen is. A technika adta lehetőségeket kihasználva egy

adott rendszer topológiája és tranziens folyamatai jól bemutathatóvá válnak animált ábrákon, amely az értelmezést is könnyebbé teszi. Az animált prezentációk előnyei nyilvánvalóak mind az egyszerűbb, mind a komplex rendszerek tanulmányozásának esetében. Az Európai Unió Leonardo da Vinci programjának keretében az INETELE című projekt nyolc egyetemmel közreműködve célozta meg multimédiás software-ek fejlesztését a villamosmérnöki oktatás területén [1], [2]. Ezen tanulmány a programnak mindösszesen egy töredékével foglalkozik, melyet a Budapesti Műszaki Egyetem csapata fejlesztett.

Alapjában véve két típusú diák létezik: elsődleges diák és magyarázó diák. Az elsődleges diák az osztálytermi oktatást szolgálják, ahol ki lehet őket vetíteni. Ezen tanulmányban csak elsődleges diák található. Ezekon nagy betűket, ábrákat, táblázatokat használunk. Az információk korlátoltak, azokat az oktató adja elő. A magyarázó diák ezzel szemben több szöveget tartalmaznak az otthoni önálló tanulás elősegítése érdekében. Itt kisebbek a betűk, az ábrák és a táblázatok, és a lényeges információk is megtalálhatók, lehetővé téve ezzel az távoktatást, melyben az oktató nem nyújt segítséget. Az animált diák kinézete ugyanolyan (lásd az ábrákon). Minden dia alján egy menü található.

## 2.2. Az animáció tartalma

- Physical modell of DC motor (1. ábra):* bemutatja a DC motor fizikai modelljét felépítésével és helyettesítő kapcsolásával. Ez a dia két alfejezetből áll. Mindkettő animált.
- Time-domain equations (2. ábra):* ez a rész a DC motor helyettesítő kapcsolására, valamint az időtartománybeli egyenletekre összpontosít. Az animáció 9 azonos jellegű ábrát tartalmaz.

**1. PHYSICAL MODEL OF DC MOTOR**  
1.1. CONSTRUCTION (1/2)

Construction of a separately excited DC motor

Main elements

- Stator
- Armature
- Excitation winding
- Armature winding
- Commutator

All:  
Here all main elements can be seen together.

**2. MATHEMATICAL MODEL**  
2.1. TIME-DOMAIN EQUATIONS (1/4)

The equivalent circuit and the equations of the DC motor

$V_a = V_{R_a} + V_{L_a} + V_i$  (1) Electrical

$V_{R_a} = R_a i_a$  (2)

$V_{L_a} = L_a \frac{di_a}{dt}$  (3)

$V_i = (k\phi)\Omega$  (4) Coupling

$i_a = (k\phi)^{-1}T_E$  (5)

$J \frac{d\Omega}{dt} = T_E - T_L$  (6) Mechanical

$J = J_M + J_L$  (7)

To switch to frequency domain click next!

1. ábra A DC motor felépítése

2. ábra Időtartománybeli egyenletek

- Transfer functions of a DC motor (3. ábra):* ez a dia a DC motor átviteli függvényének levezetését magyarázza el részletesen lépésről lépésre. Az animáció 13 önálló (és a „beuszó egyenletek” megjelenítésére 132 köztes) ábrát tartalmaz. Ez az animáció egy egyedi módszert alkalmaz a magyarázathoz. Az első oldalon a kiindulási egyenleteket találhatjuk meg. Ezután további kiindulási egyenletek jelennek meg, majd továbbúsznak az ezek alapján megkapott újabb egyenletekbe. Ez a rendszer addig ismétli az egyenletek átalakítását, míg lépésről lépésre el nem jutunk a kívánt eredményhez. A két PLAY gomb (jobbra és balra) használatával az animációval haladhatunk előre és hátra is. Az irányok különböznek abban, hogy a visszafele haladás esetén nincs animáció. Az ábra melletti csúszka mutatja, hogy a levezetés mely fázisánál tartunk. Ilyen módon a hallgató követni tudja, hogy hol tart, valamint az oktató is tudja változtatni az előadás sebességét a csúszka visszajelzésének megfelelően.

**2. MATHEMATICAL MODEL**  
 2.3. TRANSFER FUNCTIONS OF THE DC MOTOR (3/4)

Derivation of transfer functions

$$\frac{\Omega}{v_a} = \frac{1}{(k\phi) \left( 1 + \frac{R_a J}{(k\phi)^2} s + \frac{L_a J}{(k\phi)^2} s^2 \right)}$$

Def:  $T_m = \frac{R_a J}{(k\phi)^2}$   
 $T_e = \frac{L_a}{R_a}$

$$\frac{\Omega}{v_a} = \frac{1}{(k\phi) \left( 1 + T_m s + T_e T_m s^2 \right)}$$

3. ábra Átviteli függvény

**2. MATHEMATICAL MODEL**  
 2.4. TRANSFER FUNCTIONS OF THE DC MOTOR (4/4)

The transfer function of the motor

4. ábra Blokkdiagram

- d) *Block diagram of a DC motor (4. ábra):* az átviteli függvény blokk diagramját mutatja be. Az animáció 4 önálló (és 127 közttes) ábrát tartalmaz, amelyek lépésről lépésre követik egymást. Az előzőhöz hasonlóan itt is találhatunk egy csúszkát az ábra mellett, amely megmutatja, hol tart a levezetés.
- e) *Static characteristic, working point:* a statikus nyomaték-sebesség jelleggörbét és a munkapontot vezeti le. Az animáció hat önálló (és 42 közttes) ábrát tartalmaz. A közttes ábrák teszik lehetővé, hogy az egyes egyenletek átcsúszhassanak új helyre vagy egy másik egyenletbe. Ezt a „beúszó egyenlet” technikát sok helyen alkalmazzuk az animációk során. A karakterisztikák esetében négy paramétert lehet változtatni, a új karakterisztikát az aktuális értékeknek megfelelően azonnal kiszámítja a program.
- f) *Classical PID controller (5. ábra):* a PID szabályozást mutatja be egy feladaton keresztül. A különböző színek segítik a hallgatót abban, hogy megkülönböztethesse a motorra vonatkozó részt a két szabályzási körtől. A szabályozási kör megtervezésének lépései részletesen el vannak magyarázva. Itt mindössze két dia látható. A 6. ábrán látható dia foglalkozik a fázisstartalék fogalmával. Az animáció bemutatja, hogyan lehet  $A_p$ -t meghatározni hogyha a stabil és egyenletes működés érdekében 30...60 fok közötti fázisstartalékot szeretnénk kapni. Hét önálló ábrából áll. A hallgató az  $A_p$  értékét 0,5 és 3,5 között változtathatja, és megvizsgálhatja a különböző erősítések hatását. Az animáció az előzetes szimulációk eredményeit használja fel. Az  $A_p$  hét lépésben változtatható az adott intervallumon belül (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5), így a flash file megfelelően kicsi, de a diák száma már elegendő a különbség megvizsgálására.

**5. DC SERVO DESIGN**  
 5.1. SOLVED PROBLEM (1/12)

Task -  
 Design a speed and a current controller to a DC-servo motor.

5. ábra Szabályozási hurkok

**4. TRADITIONAL CONTROL METHODS**  
 4.4. CLASSICAL PID CONTROLLER (4/8)

**Application**

This figure shows how to determine  $A_p$  if 30...60° of remaining phase margin (for stable and smooth working) is suggested.

$A_p = 1.5 \frac{Vs}{rad}$

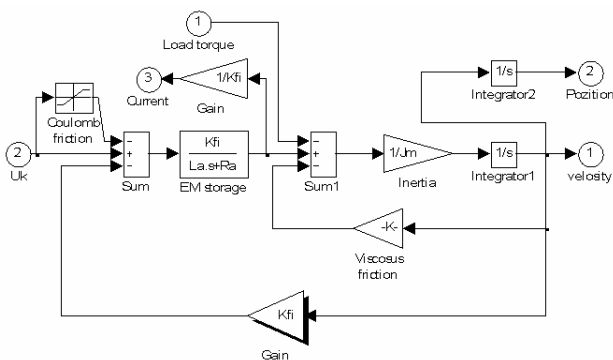
Note the reversed non-analytic way of design.

6. ábra A fázisstartalék kiszámítása

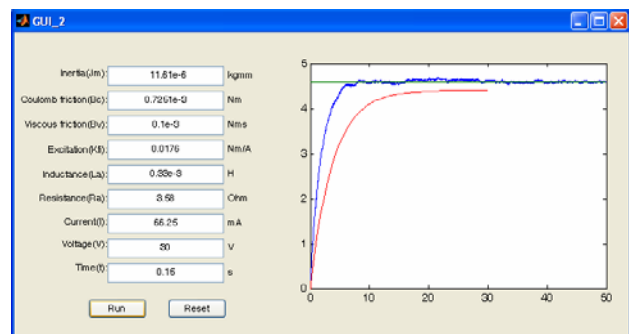
g) *Sliding Mode Control*: ez a dia a csúszómód-szabályozással foglalkozik. A szabályozási körben található egy DC motor, az aktuátor, egy DC-DC konverter, a szabályozási módszer pedig bang-bang típusú. Tehát a DC motort egy kétállású relével szabályozzuk, amivel gyorsítani és lassítani lehet a motort. A hiba egyszerűsített egyenleteinek levezetése után egy másodfokú differenciális egyenletet kapunk nulla csillapítással, így a hibatrajektória egy körön mozog. Ennek középpontja attól függően változik, hogy a DC-DC chopper kapcsolója milyen állásban van. Feltéve, hogy a rendszer nyugalmi állapotból indul és az  $\omega_r$  referenciajel konstans és az üresjárat sebesség  $\omega_{n1}$  fele, akkor  $\omega_e = \omega_r$  és  $\dot{\omega}_e = 0$  a  $t = 0$  időpillanatban. A kapcsolási vonalat  $\omega_e + \lambda \cdot \dot{\omega}_e = \sigma = 0$  szerint meghatározva, a DC-DC chopper bekapcsol, ha a rendszer trajektóriája a kapcsolási vonal felett van ( $\sigma > 0$ ). Ekkor a trajektória egy olyan körön halad, amelynek középpontja  $\omega_e = \omega_r - \omega_{n1}$  és  $\dot{\omega}_e = 0$ . A DC-DC chopper kikapcsol, ha a rendszer trajektóriája a kapcsolási vonal alatt van ( $\sigma < 0$ ), ami azt jelenti, hogy a trajektória egy olyan körön halad, amelynek középpontja  $\omega_e = \omega_r$  és  $\dot{\omega}_e = 0$ . Amikor a hibatrajektória átlépi a kapcsolási vonalat, akkor az mindig egy kapcsolást jelent. Mivel a hibatrajektóriának folytonosnak kell lennie, ezért ugyanabból a pontból fog folytatódni, ahol a kapcsolás megtörtént és egy olyan körön fog haladni, amelynek egy újabb középpontja van. Érdekes jelenség tapasztalható a második kapcsolás után, amikor a hibatrajektória a kapcsolási vonal fölé megy. Ekkor egy kis késleltetést láthatunk az animált ábrán. Ha ezt a késleltetést eltüntetnénk, akkor a hibatrajektória azonnal visszatérne a kapcsolási vonal alá, amely egy újabb kapcsolást eredményezne. Ez a jelenség megismételné magát az ellenkező irányba, és végül a hibatrajektória a kapcsolási vonalon maradna, míg a kapcsolás frekvenciája végtelen nagy lenne. Ezt nevezzük csúszómódnak. Animációval könnyen bemutatható a csúszómód robusztussága. Ha a DC-DC chopper egyenfeszültsége egy kicsit változik, akkor a trajektória középpontja is változik egy kicsit. Ha az armatúra ellenállását nem hagyjuk figyelmen kívül, akkor a hibatrajektória egy csökkenő sugarú spirálon mozog. Ha ezek a módosítások bizonyos korlátok között történnek, akkor nincsenek hatással a csúszómódra, azaz a hibatrajektória mindig azonnal visszatér a kapcsolási vonal azon oldalára, amelyen a legutóbbi kapcsolás előtt volt.

### 3. Szimuláció

Az elmélettől az alkalmazásig az első lépés a szimuláció. A hallgatók ehhez Matlab-Simulink software-t használnak. A DC motor és hajtás szimulációs modellje a 7. ábrán látható. A hallgatók a szimuláció segítségével megvizsgálhatják a nyomaték-sebesség karakterisztikát, a kaszkád sebességszabályozó teljesítményét (túllendülés, beállási idő, oszcilláció, robusztusság) különféle paraméterek és fázistartalékok esetén.



7. ábra A DC motor modellje



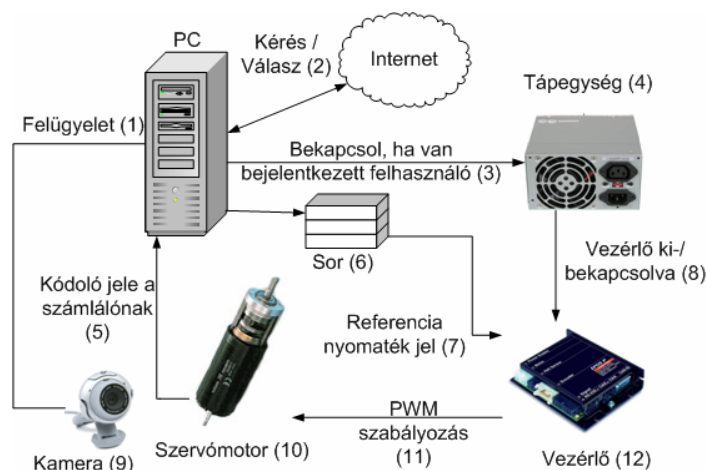
8. ábra A motor identifikációja

Egy jól működő szabályozás kialakítása érdekében érdekes lehet magának a motornak az identifikációja is. Ezzel lehetővé válna újabb szabályozási módszerek tesztelése már a szimuláció szintjén. Az identifikáció megkönnyítése és meggyorsítása érdekében egy felhasználóbarát környezetet alakítottunk ki (8. ábra), amely a mérési és szimulációs adatokat jeleníti meg együtt, hogy azok összehasonlíthatóvá váljanak. A szimulációs modell paraméterei módosíthatóak, valamint maga a szimuláció is azonnal futtatható. A program az így nyert adatok szerint azonnal frissíti a diagramot, így téve lehetővé, hogy a mérési eredményt egyre jobban megközelíthessük. Ilyen módon az egyenáramú hajtás identifikációja sokkal pontosabbá, egyszerűbbé és gyorsabbá válhat.

#### 4. Gazdaságos távirányított tápegység

A korábban már bemutatott Európai Unió INETELE című projekt egy másik kutatási iránya az internet alapú hallgatói mérések kialakítása. Célja, hogy a meglévő erőforrásokat szélesebb körben lehessen igénybe venni. Ezzel a megoldással lehetővé válhat, hogy a tanulók bárholonnan bármikor elérjék az adott mérési összeállítást, amennyiben rendelkeznek megfelelő internetes hozzáféréssel. Ehhez kellett a megfelelő összeállítást kialakítanunk.

Már megszokott dolog, hogy a személyi számítógépek napi 24 órában be vannak kapcsolva. Ám egy kísérleti elektromos eszköz biztonsági okokból nem lehet feszültség alatt egész nap. Így merült fel ötletként, hogy a PC-t lehetne használni távolról irányítható kapcsolóként. A számítógépeknél megszokott, hogy távolról irányítva is be tudják magukat kapcsolni (Wake On LAN). Ezt a funkciót a tápegység teszi lehetővé, amely még kikapcsolt állapotban is ad egy bizonyos készenléti feszültséget (+5 V, max. 0,5 mA). Egy átlagos tápegység még egy kísérleti szervómotornak és a szabályozójának is tud megfelelő feszültséget biztosítani. Ezt a lehetőséget használtuk fel arra, hogy a mérés tápegységét távolról kapcsoljunk be egy feszültségjel segítségével. A rendszer felépítése a 9. ábrán látható. A PC a tápegység ki- és bekapcsolásával ad feszültséget a DC szervómotorra egy D/A kártya segítségével.



9. ábra A mérési összeállítás felépítése

#### 5. Távlaboratórium távoli asztal elérésével

A távoli asztal elérése (Remote Desktop Connection - RDC) biztonságos, és minden egyes Windows alapú PC beépített funkciója. Egy átlagos laboratóriumi gyakorlaton 20...30 hallgatóval foglalkoznak. A hallgatók távoli eléréssel kapcsolódnak a szerverhez. Ezzel a rendszerrel a hallgatók egyenlő esélyekkel rendelkeznek a szakiránytól függetlenül. Nem minden szakirányon tanítanak ugyanis C++ nyelvet. Ezt a problémát úgy hidaltuk át, hogy egy keretprogramban található egy interfész, amelyben minden paraméter állítható. A hallgató feladata, hogy előzetes

tanulmányai alapján írjon egy szabályozót a DC motorhoz. A pontos mérésekhez, pontos mintavételezés szükséges. Egy átlagos Windows nem tudja biztosítani a pontos időzítést, sőt még azt sem, hogy egyáltalán elküldi az adott jelet. Ám létezik a Windows-nak egy olyan bővítménye, amely ezt a problémát megoldja.

A valós idejű ütemezés mindig is nehéz volt Windows környezetben. Emiatt sok projekt esetében választottak Linuxot Windows helyett. Az Ardence a probléma megoldását az alapoknál kezdte. Egy teljesen különálló program adja az alapot a rendszer működéséhez. Még a „kékhalál” jelensége is elkerülhető a valós idejű alkalmazások teljesítményének romlása nélkül. Az „Ardence Real-time Extension for Control of Windows” használatával lehetőségünk van 100  $\mu$ s-os intervallumok használatára maximálisan 0,001 ns-os hibával. Mindez egy C++ fordítóba is integrálható, így nem szükséges az adott program módosítása a valós idejű környezetnek megfelelően. Így sokkal felhasználóbarátabb valós idejű programozás érhető el. Ezen bővítmény már számtalan ipari alkalmazásban bizonyította hasznosságát.

A keretprogram elválasztja egymástól a DC szervóprogram szabályozó és kommunikációs részét. Ez teszi lehetővé, hogy bármely hallgató megírhatta saját szabályozóját. Mindösszesen egy header file-t kell írni, amely magában foglalja a szabályozási függvényt. A header file tartalmazza a számításokhoz szükséges paramétereket is.

A hibaellenőrzést követően a DC szervóprogram lefordítja és futtatja a mérést. A mérési eredményeket a változóknak megfelelően külön file-okba menti el a program könyvtárába. Ezeket a file-okat a mérést követően meg lehet nyitni Matlabbal vagy bármely más szimulációs programmal. A keretprogram C++ nyelven készült, amelyhez Microsoft Visual Studio 2005 software-t használtunk.

## Összefoglalás

Egy komplett távoktatási programot mutattunk be az animációtól kezdődően a internet alapú mérésig. A különálló kommunikációs és szabályozó programnak köszönhetően még azon diákok is elvégezhetik ezt az egyszerű mérést, akik nem jártasak a programozásban. Mivel a mérés egy hallgató számára csak pár másodpercet vesz igénybe, azért számos hallgató képes tulajdonképpen egy időben méréseket végezni ugyanazon a motoron. Ehhez hasonló oktatói programok fejlesztéséhez egészen új szemléletmód szükséges, amelynek csak néhány elemét mutatta be a tanulmány.

Az animációs program a <http://152.66.22.161/animation/> oldalról letölthető.

## Köszönetnyilvánítás

A cikkben bemutatott módszerek és eljárások, az ezen tanulmány szerzői által folytatott és jelenleg is folyó kutatások eredményei, amelyet a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Automatizálási és Alkalmazott Informatikai Tanszéke az Európai Unió Leonardo da Vinci programjának INETELE című projektjének keretében végzett, és amely támogatást ezúton is szeretnénk megköszönni.

## Irodalomjegyzék

- [1] Hamar J., Járdán R. K., Korondi P., Nagy I., Sepa Z., Sütő Z., Zabán K., Weiss H. (2005). “Teaching and learning nonlinear dynamics by multimedia,” in *Proc. Electrimacs 2005*, Hammamet, Tunisia, Apr. 2005
- [2] Bartal P., Hamar J., Járdán R. K., Korondi P., Nagy I., Sepa Z., Sütő Z., Zabán K., Funato, H., Masada, E., Ogasawara, S. (2005). “Learning multimedia software for teaching nonlinear dynamics,” in *Proc. Control in Power Electronics and Motion Control (IPEC'05)*, Niigata, Japan, Apr. 2005