

# Az állandómágneses hibrid léptetőmotor vezérlése csúszómódban működő szabályozóval

**Dr. Szász Csaba**

Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamosmérnöki Kar

## Abstract

*This paper presents a robust control strategy for the two-phase PM-hybrid stepper motor. In order to eliminate the parameter and load variation influence, a position controller based on the sliding mode structure is investigated for high performance positioning applications. The field-oriented control is also applied to the hybrid stepper motor, with the purpose to improve the dynamic performance of the system drive. Detailed simulation and experimental results are presented to illustrate the good dynamic response of the motor.*

A dolgozat az állandómágneses hibrid léptetőmotor robusztus vezérlési stratégiáját mutatja be. Annak érdekében, hogy a motor paramétereinek, valamint a terhelőnyomaték változásának a hatása kiküszöbölhető legyen a zárt hurokban történő igényes meghajtások esetében, egy csúszómódban működő vezérlési struktúrát fejlesztettünk ki és mutattunk be. A léptetőmotor dinamikai jellemzőinek javítására az előbb említett stratégia mellett, a vektoriális vezérlési módszert is alkalmaztuk. A dolgozatban bemutatjuk a megépített digitális vezérlőrendszer laboratóriumi prototípusát, valamint számos mérési és számítógépes szimulálás során kapott eredményt.

## 1. Bevezetés

A kétfázisú állandómágneses hibrid léptetőmotor egy igen gyakran használt vezérlőeszköz a nagyponosságú villamos meghajtások esetében. Leggyakrabban a robotikában, a számvezerlések gépeknél, valamint a számítógépes rendszerekben alkalmazzák. A hagyományos léptetőmotoros meghajtások esetében nyílt hurokban impulzusokkal tápláljuk a motor fázisait. Ezek a szervóhajtások viszonylag olcsóak, és kielégítő teljesítményt nyújtanak kis forgási sebességek esetében, vagy ha a terhelőnyomaték értéke kevésbé változik a motor tengelyén. A vektoriális vezérlési módszert alkalmazva, nagymértékben lehet javítani a léptetőmotor dinamikai jellemzőin. Ebben az esetben a léptetőmotor úgy viselkedik, mint egy kiváló dinamikai jellemzőkkel bíró váltakozó áramú vezérlőeszköz [1].

A váltakozó-struktúrákon alapuló vezérlési stratégiák biztosítani tudják a motor dinamikai jellemzőinek további javítását, valamint kiküszöbölhetik a terhelőnyomaték erős változásainak a nemkívánt hatását. A dolgozat egy csúszómódban működő szabályzó alkalmazásának a lehetőségét tanulmányozza a vektoriálisan vezérelt léptetőmotor esetében. Részletes számítógépes szimulációs eredmények mutatják a motor jó dinamikai jellemzőit az említett robusztus szabályzó használata esetében. A digitális vezérlőrendszer laboratóriumi változatát, valamint a mérési eredményeket is részletesen bemutatom a dolgozatban.

## 2. Az állandómágneses hibrid léptetőmotor matematikai modellje

Ha a kétfázisú állandómágneses hibrid léptetőmotor tekercseit nem impulzusokkal, hanem szinuszos áramokkal tápláljuk, akkor a motor tulajdonképpen úgy viselkedik, mint egy állandó légréssel rendelkező szinkronmotor [2]. Ebben az esetben, a motor állapotegyenletei forgórész-orientált dq rendszerben a következően írhatóak le [3]:

$$\begin{aligned}
\frac{d\theta_m}{dt} &= \omega_m \\
\frac{d\omega_m}{dt} &= \frac{1}{J_m} (k_m (\Psi_m i_{sq\theta} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd\theta} i_{sq\theta}) - B_m \omega_m - m_r) \\
\frac{di_{sd\theta}}{dt} &= \frac{1}{L_{sd}} (u_{sd\theta} - R i_{sd\theta} + \omega L_{sq} i_{sq\theta}) \\
\frac{di_{sq\theta}}{dt} &= \frac{1}{L_{sq}} (u_{sq\theta} - R i_{sq\theta} - \omega L_{sd} i_{sd\theta} + \omega \Psi_M);
\end{aligned} \tag{1}$$

ahol  $\omega = z_r \omega_m$ . Ez a modell a két feszültség-egyenletből (mindegyik tekercsnek egy egyenlet), valamint a dinamikai egyenletből áll. A tanulmányozott léptetőmotor esetében  $L_{sd}=L_{sq}=L$  az állórész tekercseinek az induktivitásai,  $i_{sd\theta}$  és  $i_{sq\theta}$  az állórész áramai a dθ-qθ koordinátarendszerben,  $\Psi_M$  az állandómágnes fluxusa,  $\theta_m$  a forgórész helyzete,  $\omega_m$  a forgórész sebessége,  $z_r$  a forgórész fogainak a száma,  $R$  a tekercs ohmikus ellenállása,  $J_m$  a forgórész tehetetlenségi nyomatéka,  $B_m$  a súrlódási állandó,  $m_r$  pedig a terhelőnyomaték.

A hibrid léptetőmotor dinamikai jellemzőinek javítására a vektoriális vezérlési elméletet alkalmazzuk. Ez azt jelenti, hogy a dθ tengely  $i_{sd\theta}$  áramát mindig zéró értéken kell tartani, elkerülve a mágneses fluxusok kölcsönhatását a dq modellben. Ennek következtében a kifejtett elektromágneses nyomaték egyenlete a következőképpen írható:

$$m_e = k_m \cdot i_{sq\theta}, \tag{2}$$

ahol  $k_m = z_r \Psi_M$  a motor állandója.

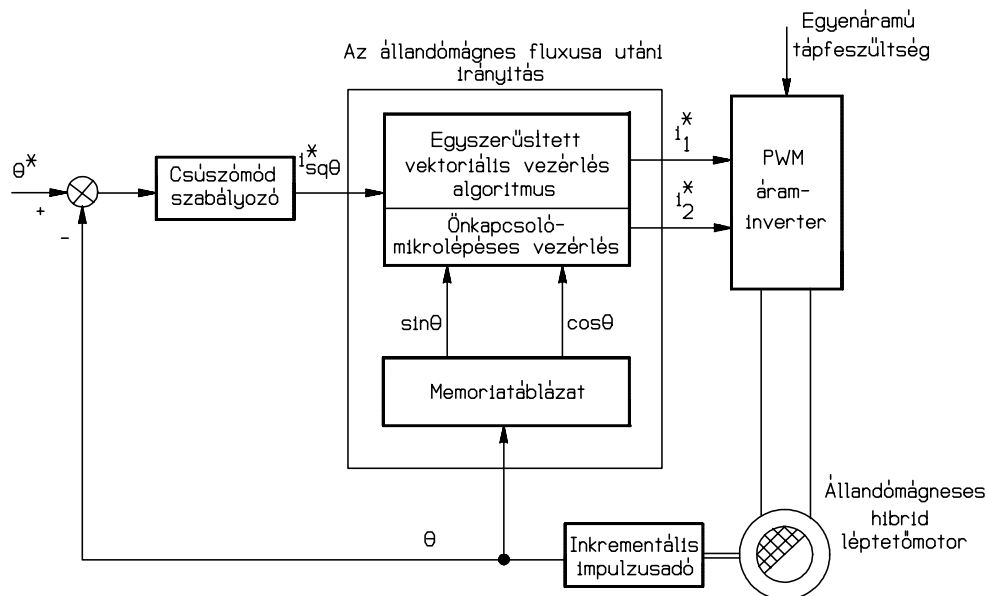
A leírt modell egyenleteinek foka csökkenthető, ha a dq áramokat bemeneti referencia-áramoknak tekintjük a rendszerben. Így, a vektoriálisan vezérelt, és PWM áraminverter segítségével meghajtott állandómágneses hibrid léptetőmotor állapotegyenletei a következően alakulnak: [4]:

$$\begin{aligned}
i_{sd\theta}^* &= 0 \\
\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{B_m}{J_m} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{k_m}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot i_{sq\theta}^* + \begin{bmatrix} -\frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot m_r,
\end{aligned} \tag{3}$$

ahol  $i_{sd\theta}^*$  és  $i_{sq\theta}^*$  az előírt referenciaáramok, és az új állapotvektor  $x = [x_1(t) \ x_2(t)]^T = [\omega_m \ \theta_m]^T$ .

### 3. Az állandómágneses hibrid léptetőmotor egyszerűsített vektoriális vezérlési stratégiája csúszómódban működő szabályozóval

A vektoriális vezérlés lényege az, hogy az  $i_{sq\theta}^*$  úgynevezett „aktív áramot” a vezérelt folyamatnak megfelelően kell generálni, ugyanakkor pedig az úgynevezett  $i_{sd\theta}^*$  „reaktív áramot” zéró értéken kell tartani, elkerülve így a mágneses fluxus nemkívánt változását a légrésben. Ez a stratégia jó dinamikai jellemzőket eredményez a motor számára, de ugyanakkor néhány alapvető nehézség is felmerül. Mivel a vezérlő algoritmus viszonylag bonyolult, ezért elsősorban komoly hardware és software forrásokat igényel, ami kevésbé indokolt e kis telyesítményű léptetőmotornál. Ebből kifolyólag, elkerülve az előbb említett nehézségeket, egy új, „egyszerűsített vektoriális vezérlési módszer”, fejlesztettünk ki. [5]. E módszer lényege az 1-es ábrán látható. Az új vezérlési stratégia tulajdonképpen két jól ismert hagyományos módszer, a mikrolépéses és az elektronikusan önszabályzott vezérlési módszer ötvözése [4] [6]. Az egyszerűsített vektoriális vezérlés esetében az állórészben folyó áram vektorának irányítása a forgórész helyzetéhez nemcsak minden mechanikai lépés esetében történik, hanem minden mikrolépés után is, olyan pontossággal ami csak az inkrementális impulzusadó felbontásától függ. Nagyszámú mikrolépés esetében, az áram irányításában a mikrolépés alatt bekövetkezett hiba elhanyagolható.



1. ábra

*Az állandómágneses hibrid léptetőmotor egyszerűsített vektoriális vezérlési stratégiája csúszómódban működő szabályozóval.*

Az 1-es ábrán az  $i_{sq\theta}^*$  aktív áramot egy változó-struktúrájú csúszómódban működő szabályozó generálja, a vezérlési folyamatnak megfelelően. A robusztus szabályozó biztosíthatja azt, hogy a rendszer paramétereinek a változása, valamint a terhelőnyomaték ingadozása ne befolyásolja a motor dinamikai jellemzőit. A hagyományos csúszómódban történő vezérlés esetében a vezérlőjel az  $u = u_{eq} + \beta \text{sat}(s/\Phi)$  formában van kifejezve, ahol  $\Phi$  a vezérlési sáv vastagsága,  $s$  pedig az előírt csúszó felület. Ha a rendszer állapotváltozóinak értékei a vezérlési sávon kívülre kerülnek, akkor a vezérlőjelet az  $u = u_{eq} + \beta \text{sgn}(s)$ , formában adhatjuk meg, mely forma biztosítja a csúszási feltételeket a megadott felületen. A léptetőmotor dinamikáján javítani lehet, ha a vezérlőjel formáját az  $u = u_{eq} + \alpha s + \beta \text{sgn}(s)$  általánosabb formára módosítjuk, ahol  $\alpha$  egy pozitív állandót jelent [4], [7].

A szabályozás dinamikai jellemzőinek az értékelésére bevezethetjük a következő állapotvektorokat:

$$E = [\theta_{\text{ref}} - \theta_m \quad \omega_{\text{ref}} - \omega_m]^T = [e \quad \dot{e}]^T, \quad (4)$$

ahol  $\theta_{\text{ref}}$  az előírt referencia-pozíciót jelenti. A csúszófelületet a forgórész helyzetének és sebességének függvényében határozhatjuk meg:

$$S = \ddot{e} - \lambda_1 \dot{e} - \lambda_2 e, \text{ ahol } \lambda_1, \lambda_2 > 0. \quad (5)$$

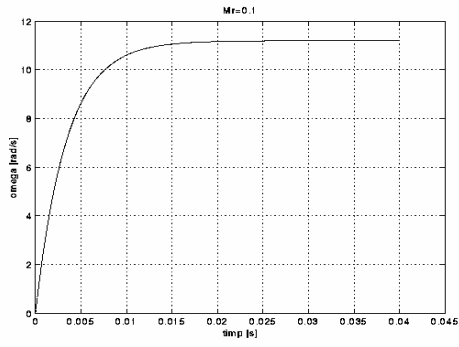
A csúszófelület előbbi meghatározásával, az előírt  $\theta_{\text{ref}}$  pozíciót akkor érhetjük el, ha a rendszer állapotváltozói teljesítik az  $S(t)=0$  egyenletből következő feltételeket. A Wang and Lee [7] által javasolt stratégiára alapozva, a csúszómódban működő szabályozó vezérlőjelét a következő formában írhatjuk:

$$i_{sq\theta}^* = i_{sq\theta-eq} + k \cdot s(t), \quad (6)$$

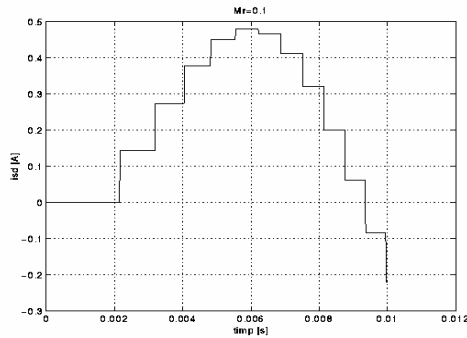
ahol  $i_{sq\theta-eq}$  egy ekvivalens vezérlőjel,  $s(t)$  az előírt csúszófelület, és  $k$  egy pozitív állandó. A javasolt vezérlési stratégia egy könnyű és folytonos csúszást biztosít az előírt felületen, a  $ks(t)$  kapcsolójelnek pedig mindig ugyanaz az előjele, mint a  $\text{sat}(s/\Phi)$  függvénynek [8].

#### 4. Számítógépes szimulációs és mérési eredmények

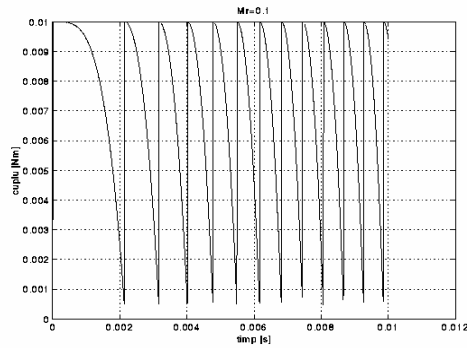
Az állandómágneses hibrid léptetőmotor dinamikai jellemzőinek tanulmányozása kezdetben számítógépes szimuláció segítségével történt, Matlab környezetben. A motor főbb paraméterei a következők: két fázis, 8 állórész pólus, 5 fog pólusonként, 50 fog a forgórészen, 200 lépés/fordulat, nominális forgatónyomaték  $M_n=0,2\text{Nm}$ , nominális áram  $I_n=1\text{A/fázis}$ , állandómágnes fluxus  $\Psi_M=0,0044\text{Wb}$ . A motor tengelyére 1000 impulzus/fordulat felbontású inkrementális impulzusadó van rögzítve, így a motor 5 mikrolépést végezhet egy mechanikai lépés alatt. A számítógépes szimuláció eredményei azt mutatják, hogy az egyszerűsített vektoriális vezérlés módszerével meghajtott léptetőmotornak az egyenáramú motorhoz hasonló dinamikai jellemzői vannak.



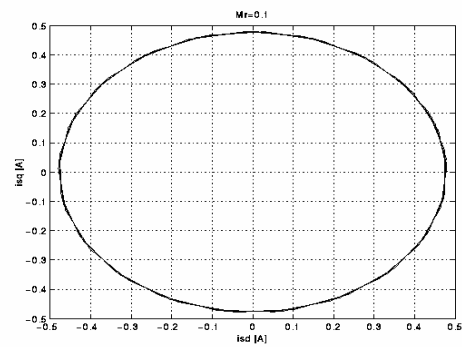
2. ábra  
A léptetőmotor szögsebessége



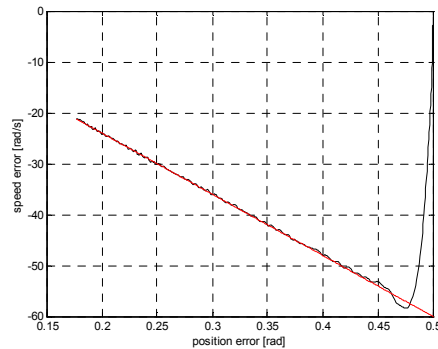
3. ábra  
Az  $i_{sq}$  fázisáram változása



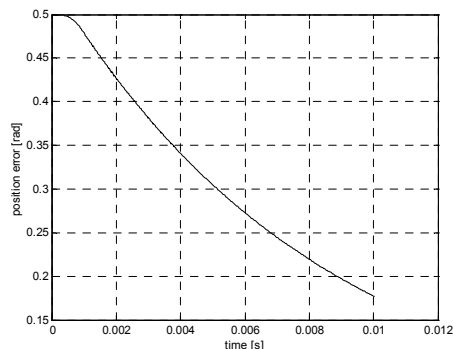
4. ábra  
Az elektromágneses nyomaték



5. ábra  
Az állórészben folyó áram fazora



6. ábra  
Az  $x_1$  és  $x_2$  állapotváltozók



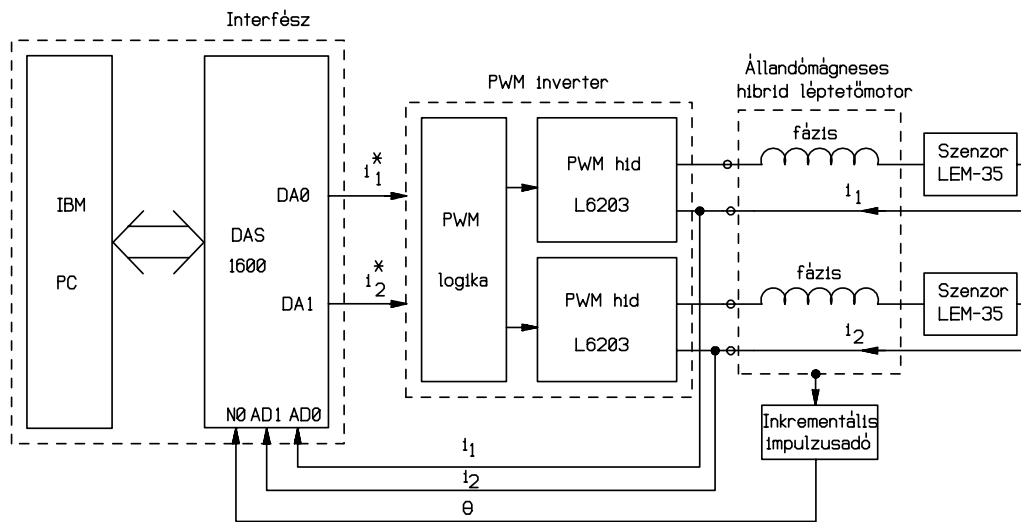
7. ábra  
Az  $x_1$  pozicionálási hiba

Ahogy a 2-es ábra is szemlélteti, a léptetőmotor szögsebességének nincsenek rezgései, és a motor dinamikája induláskor ugyanolyan jó, mint az egyenáramú motorok esetében. A 3-as ábrán a fázisáramok változása látható, együtt a motor mikrolépéseivel. Minden mikrolépés esetében az állórészben folyó áram  $i_s$  vektora irányítva van a forgórész helyzetéhez viszonyítva, és minden mikrolépés esetében ez a fázor merőleges az állandómágnes fluxusának fázorára. Így a két fázor vektoriális szorzata minden mikrolépés esetében maximális elektromágneses forgatónyomatékok eredményez.

Észrevehető, hogy a léptetőmotor által kifejtett elektromágneses nyomaték állandó, ugyanúgy mint az egyenáramú motorok esetében. Nagyon kis léptéken (4-es ábra) látható az elektromágneses nyomaték változása, és éppen ez mutatja azt ahogyan az állórészben folyó áram  $i_s$  vektora irányítva van minden mikrolépés esetében, úgy, hogy a kifejtett elektromágneses nyomaték maximális legyen, hasonlóan a kompenzáló tekercsel rendelkező egyenáramú motorok esetéhez. Az 5-ös ábra az állórészben folyó áram  $i_s$  fázora által leírt kört szemlélteti.

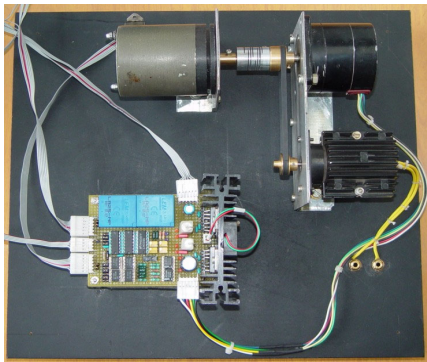
A 6-os ábrán az  $x_1$  pozicionálási hiba és az  $x_2$  sebesség hiba változásait követhetjük, az előírt csúszófelületen. Miután ezek a változók elérték a csúszófelületet, a motor forgórésze lassan és igen kis rezgésekkel közeledik az előírt 0,5 rad referencia helyzetéhez. A pozicionálási hiba a 7-es ábrán látható.

A 8-as ábra a laboratóriumban megépített kísérleti vezérlőrendszer elvi rajzát mutatja be. Az állandómágneses hibrid léptetőmotor vektoriális vezérlőrendszere alapján véve az IBM-PC személyiszámítógépbe beillesztett, Keithley Metrabyte DAS-1600-as típusú vezérlőkártyára épül [9]. A léptetőmotort egy aszinkron, áramforrás típusú PWM inverter táplálja, mely úgy van megtervezve, hogy a két L6203-as típusú híd segítségével lehetővé teszi bármely áramforma létrehozását a motor tekercseiben. Az inverter magas PWM frekvencián működik, a tápfeszültségét pedig 24–48V között lehet változtatni, a követelményeknek megfelelően. A teljesítmény elektronika rész magába foglal még két LEM-35 típusú áramszenzort, és a megfelelő interfész áramköröket is. A számítógép beolvassa a forgórész helyzetére vonatkozó információt, majd az önszabályozó-mikrolépéses algoritmus alapján, a két referencia áramot ( $i_1^*$ ,  $i_2^*$ ) fogja generálni az inverter bemeneteire.



8. ábra

*A kísérleti digitális vezérlőrendszer elvi rajza*



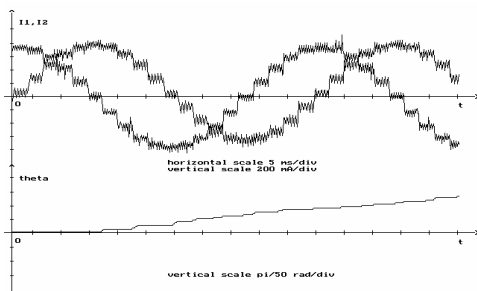
9. ábra

*A PWM inverter és a léptetőmotor, a terhelés szerepét betöltő egyenáramú motorral*



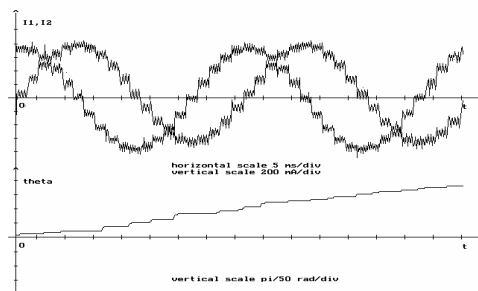
10. ábra

*A digitális vezérlőrendszer laboratóriumi prototípusa*



11. ábra

*A fázisáramok és a forgórész helyzetének a változása ( $M_n = 0.1Nm$ )*



12. ábra

*A fázisáramok és a forgórész helyzetének a változása, ( $M_n = 0.08Nm$ )*

A 11-es ábra az  $i_1^*$  és  $i_2^*$  fázisáramok, valamint a forgórész helyzetének a változását mutatja be. Az ábrán jól észrevehetőek a léptetőmotor mikrolépései (egy lépés megfelel 5 mikrolépésnek). Minden mikrolépés után az  $i_1^*$  és  $i_2^*$  fázisáramok úgy vannak generálva, hogy az állórészben levő aktív-áram vektora merőleges legyen az állandómágnes fluxusának vektorára. A 11-es ábrán látható diagramról leolvasható az, hogy abban az esetben ha a generált referenciáram amplitúdója 0,75A (a terhelőnyomaték értéke  $M_n=0,1Nm$ ), akkor a motor sebessége 75 lépés/s, ami pontosan 375 mikrolépés/s-nak felel meg.

Abban az esetben, ha a terhelőnyomaték értéke 0,1Nm-ről 0,08Nm-re csökken (12-es ábra), a motor sebessége 100 lépés/s, ami 500 mikrolépés/s-nak felel meg. Ahogyan az várható volt, a terhelőnyomaték csökkenésével a motor sebessége nőtt. A 11-es és 12-es ábrán bemutatott mérési eredményeket össze lehet hasonlítani a 3-as ábrán bemutatott, számítógépes szimuláció segítségével kapott eredményekkel. Mindkét esetben jól kivehetőek a léptetőmotor mikrolépései az egyszerűsített vektoriális vezérlési módszert alkalmazva.

## 5. Következtetések

Ismert, hogy a vektoriális vezérlési módszert alkalmazva, az állandómágneses hibrid léptetőmotor dinamikája jelentősen javul. Annak érdekében hogy a motor jellemzői érzéketlenek legyenek a különböző paraméterek változásaira, valamint a terhelőnyomaték ingadozása esetében, a motor meghajtására egy változó-struktúrájú, csúszómódban működő vezérlőrendszert javasolunk. Egy csúszómódban működő robusztus szabályozó segítségével a motor dinamikáját tovább lehetne javítani, elérve azt, hogy ugyanolyan jó jellemzői legyenek mint egy egyenáramú motor esetében.

A kísérletek első lépéseként, a léptetőmotor egyszerűsített vektoriális vezérlését tanulmányoztuk, számítógépes szimuláció segítségével. A kapott eredmények (2-5. ábra) azt bizonyítják, hogy ennek a típusú léptetőmotorok az egyenáramú motorokhoz hasonló jó dinamikai jellemzői lehetnek. A motor sebessége gyorsan nő, rezgések nélkül, a kifejtett elektromágneses nyomaték közel állandó értékű. A nagyon kis léptéken észrevehető elektromágneses nyomatékváltozás éppen azt mutatja, ahogyan az állórészben folyó áram vektorát irányítjuk, azért, hogy a kifejtett elektromágneses nyomaték minden mikrolépés esetében maximális legyen. A 6-os és 7-es ábrákon a pozicionáló rendszer dinamikai jellemzői láthatóak, csúszómódban működő szabályozó használata esetében.

A kísérleti eredményekből le lehet vonni azt a következtetést, hogy a bemutatott – nem költséges és viszonylag egyszerű – robusztus vektoriális vezérlési módszer jó stratégia lehet a jövőben a hibrid léptetőmotorok vezérlésére, és egy új alternatíva a hagyományos meghajtási módszerekre.

## 6. Szakirodalom

- [1] Szász Cs. - PhD dissertation, Technical University of Cluj, Romania, 1999.
- [2] [2] Kelemen A., Maria Imecs - Vector Control of AC Drives, Volume 2, Ecrisure Publisher, Budapest, Hungary, 1993.
- [3] Kellermann H. at all - Field oriented position control of a hybrid stepper motor, Proceedings of European Power Electronics-EPE'95, vol 3, Sevilla, 908-913 (1995).
- [4] Rusu C. - Sliding mode control for hybrid stepper motor drive, Proceedings of CNAE'2000 Conference, Iasi, 137-144 (2000).
- [5] Marschalko R., Szász Cs., Trifa V., Székely A. - Implementing of a vector controlled PM-hybrid stepping motor servodrives, PEMC'98 International Conference, Prague, 1998 (CD-ROM registration).
- [6] Szász Cs., Marschalko R., Trifa V., Székely A. - Experimenting of a simplified vector control system with PM-hybrid stepping motor, PCIM International Conference, Nuremberg, 1999.
- [7] Wang W.J., Lee J.L., - Hitting time reduction and chattering attenuation in multi-input VSS. Control Theory Adv. Tech., vol 9, 491-499 (1993).
- [8] Slotine J.J.E., Sliding controller design for non-linear systems. Int. J. Control, 40, 421-434 (1984).
- [9] \*\*\* - Data acquisition & control for IBM PC/XT/AT, PS2, Micro Channel & Apple MacIntosh computers. MetraByte Corp. vol. 18, 1989.