

ÉRZÉKELŐK ÉS BEAVATKOZÓK II.

9. LÉPTETŐMOTOROK



Dr. Soumelidis Alexandros

2020.04.15.



BME KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI ÉS JÁRMŰMÉRNÖKI KAR
32708-2/2017/INTFIN SZÁMÚ EMMI ÁLTAL TÁMOGATOTT TANANYAG

Léptetőmotorok

A léptetőmotorok alapvető tulajdonságai:

- A forgórész diszkrét szöghelyzetekbe állítható be.
- Az adott szögpozícióban tartó nyomatékot fejt ki.
- Alapvető működtetési elv: léptetés - valamennyi lépés megtétele valamilyen forgásirányban.

A léptetőmotorok alkalmazási köre (példák):

- Vezérlések, szabályozások beavatkozó elemeiként.
- Ipari, orvostechnikai rendszerek, járművek nem hajtás jellegű rendszerei.
- Számítástechnikai rendszerek: diszkek, CD-DVD tárolók, nyomtatók.
- Háztartási gépek vezérlése: mosógép, mosogatógép.



Léptetőmotorok

A léptetőmotorok előnyei:

- Egyszerűen átlátható módon kezelhető eszközök.
- Beállítás / tartás az alapvető pontosságig (1 - ½ lépés) és nyomatékig nem igényel szabályozást.
- Kissé bonyolultabb vezérléssel illetve visszacsatolt szabályozással a pontosság fokozható.
- A diszkrét digitális irányításoknak jól megfelelő működési elv.
- Egyszerűen, robusztusan - jó paraméter-tartással - nagy tömegben gyártható termékek.
- Megbízható, jó környezetállósággal bíró termékek.
- Gazdaságosan alkalmazható alternatíva a vezérlések megvalósításában.



Léptetőmotorok

A léptetőmotorok előnyei - további szempontok:

- Nincsenek kontaktusok, kefék - nagy megbízhatóság és kis karbantartásigény.
- Nincsenek kontaktusok, kefék - alacsony elektromágneses emisszió, jó EMC tulajdonságok.
- Az egyes szöghelyzetek azonos hibával (tipikusan 3-5 %) mindig beállíthatók, nincs kumulatív hiba.
- A működési sebesség a léptetés gyakoriságának (frekvenciájának) függvénye, egészen kis fordulatszámok is elérhetők.



Léptetőmotorok

A léptetőmotorok hátrányai:

- Diszkrét idejű működés.
- A lépések között egyenetlenségek a fordulatszámban és a nyomatékban.
- Korlátozott sebesség - a maximális lépésfrekvencia katalógusadat.



Léptetőmotor típusok

Az alapvető léptetőmotor családok:

- Reluktancia típusú (Variable Reluctance - VR),
- Állandó mágneses (Permanent Magnet - PM),
- Hibrid (Hybrid) léptetőmotorok.

Az állórész-tekercecsek kialakítása szerint:

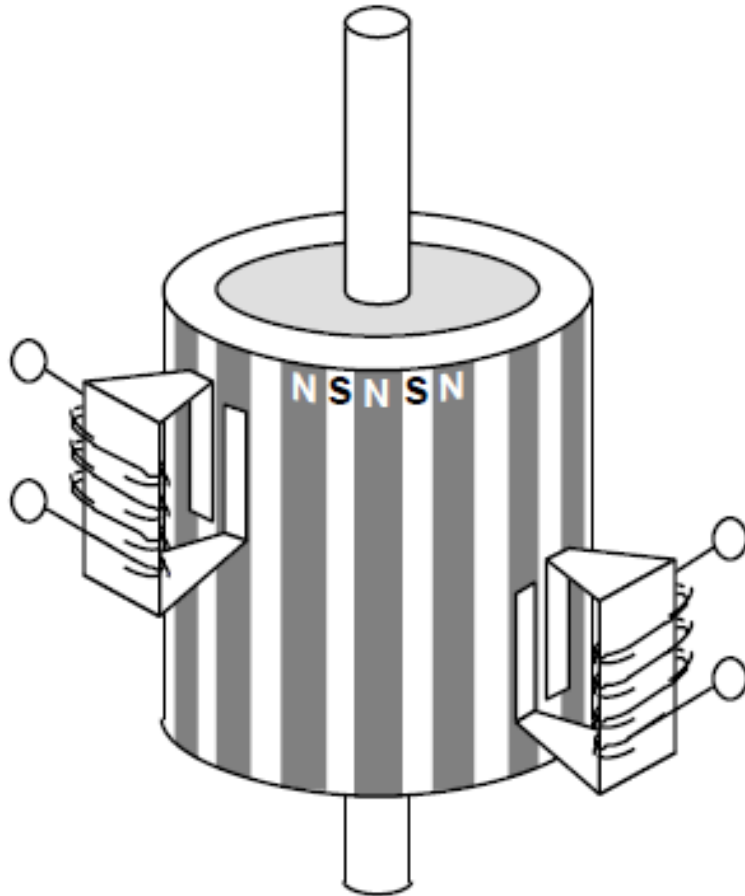
- Unipoláris,
- Bipoláris,
- Bifiláris léptetőmotorok.

A fázisok száma szerint:

- Kétfázisú,
- 3-5-fázisú léptetőmotorok.



Állandó mágneses léptetőmotorok



- Sávosan felmágnesezett forgórész.
- 2 elektromágnes egy-egy póluspárral szemben.
- Az áramiránytól függően taszítás vagy vonzás az álló- és forgórész mágneses pólusai között.
- Tiszta vonzás esetén beállítás (stabil egyensúlyi helyzet).
- Megfelelő sorrendű vezérlés mellett léptetés és forgás idézhető elő.



Állandó mágneses léptetőmotorok

- Általában kis felbontás érhető el (7.5° - 15° / 48 - 24 lépés fordulatonként).
- Olcsó, kis igényű léptetőmotorok.
- Előnyeik: kis tehetetlenségű forgórész, egyenletes mágneses fluxuselozlás érhető el.



Reluktancia típusú léptetőmotorok

Mágneses reluktancia - más néven mágneses ellenállás:

Mágneses pólusok között fellépő erő és a mágneses fluxus közti arány - egyszerűsítéssel lineáris összefüggést feltételezve } $F = R \cdot \Phi$
Ohm törvényre emlékeztető forma.

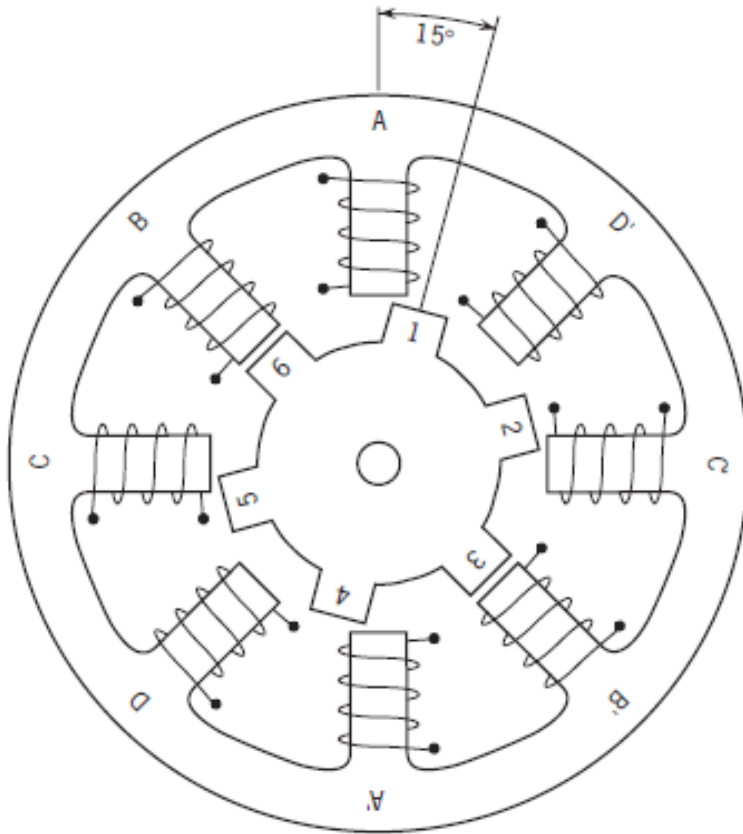
- Nagyobb reluktancia azonos fluxus mellett nagyobb erőt eredményez.
- Az erőeloszlás - azonos gerjesztés mellett - a reluktancia függvényében változik.
- Nem egyenletes reluktancia inhomogén erőeloszlást eredményez.

Mikor kapunk nagyobb reluktanciát egy mágneses körben?

- Sűrűsödő mágneses erővonalak egy adott térrészben - a pólusok alakjának kellő megválasztásával érhető el.
- Kisebb légrés a pólusok között nagyobb reluktanciát eredményez.



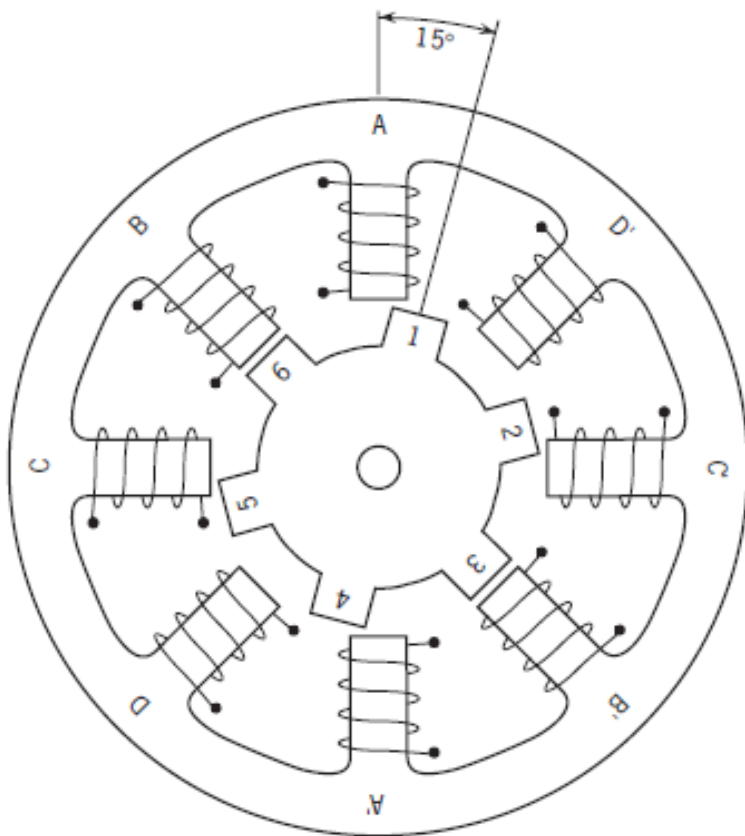
Reluktancia típusú léptetőmotorok



- Lágú ferromágneses anyagú hornyolt forgórész.
 - Az állórész pólusainak és a forgórész hornyainak száma eltérő.
 - A mágneses kör reluktanciája a kerület mentén változik.
 - A maximális reluktanciájú helyek - ha gerjesztés alatt állnak - stabil egyensúlyi helyzetet képviselnek.
- A gerjesztés továbblépésével a stabil helyzet is tovább lép.



Reluktancia típusú léptetőmotorok



- Allórész pólusainak száma: 8, 45°-os eloszlásban.
- Forgórész hornyainak száma: 6, 60°-os eloszlásban.
- A szögeltérés 15°.

Gerjesztési sorozat:
A - A', B - B', C - C', D - D'
- 4-fázisú gerjesztés

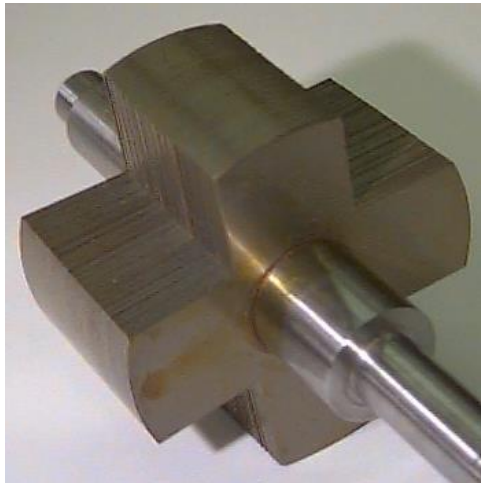
Minden lépésben a forgórész 15°-ot lép előre az óramutató járásával azonos irányban.

Lépéshossz: 15° Lépésszám: 24



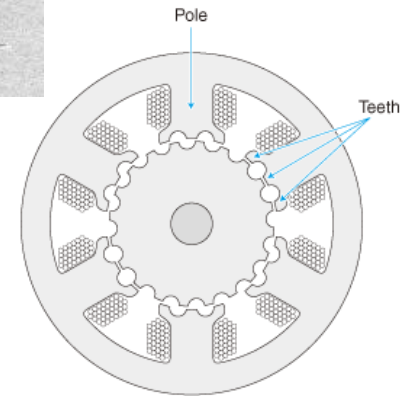
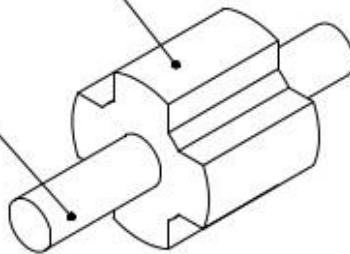
Reluktancia típusú léptetőmotorok

Forgórész megvalósítások:



Pole (not magnetized)

Shaft



Fogazott forgórész: a lépésszám növelhető.



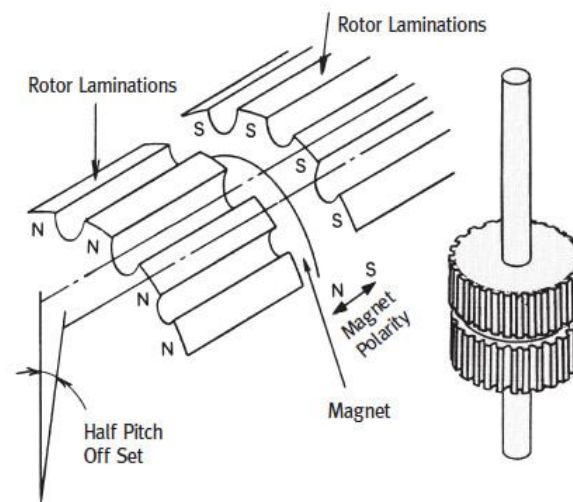
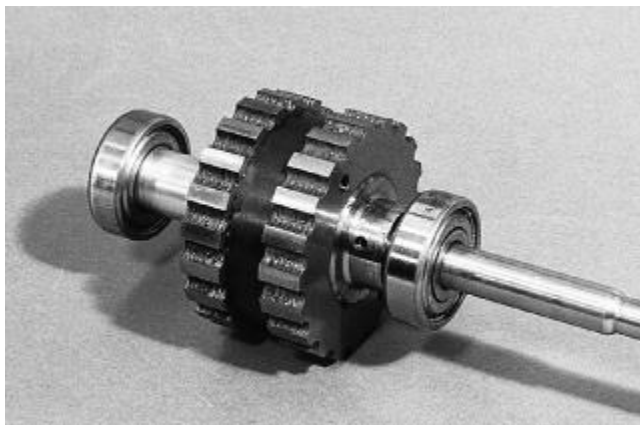
Hibrid léptetőmotorok

Változó reluktancia és állandó mágnes kombinációja.

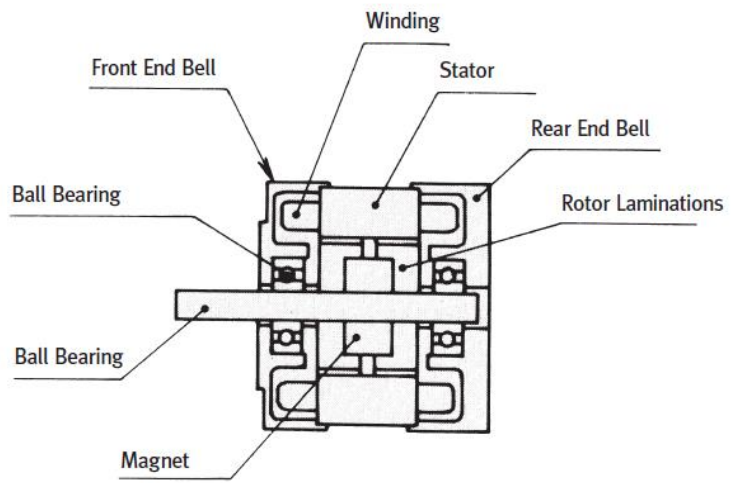
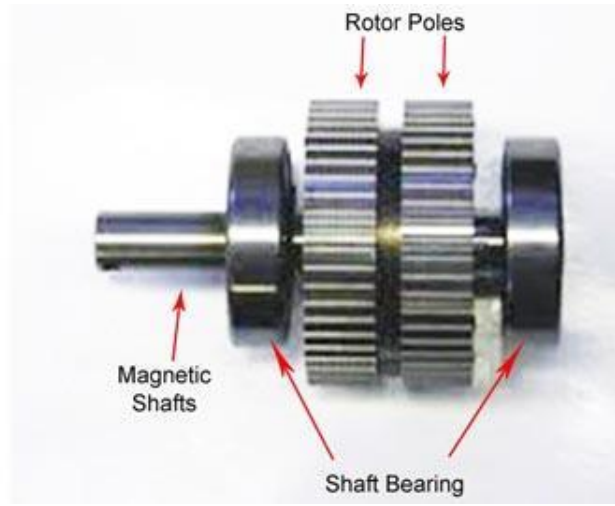
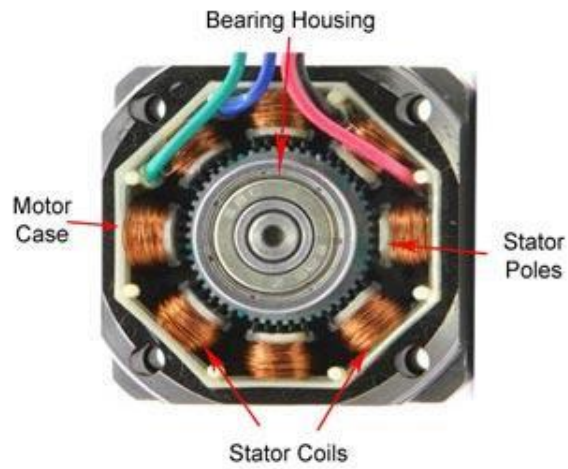
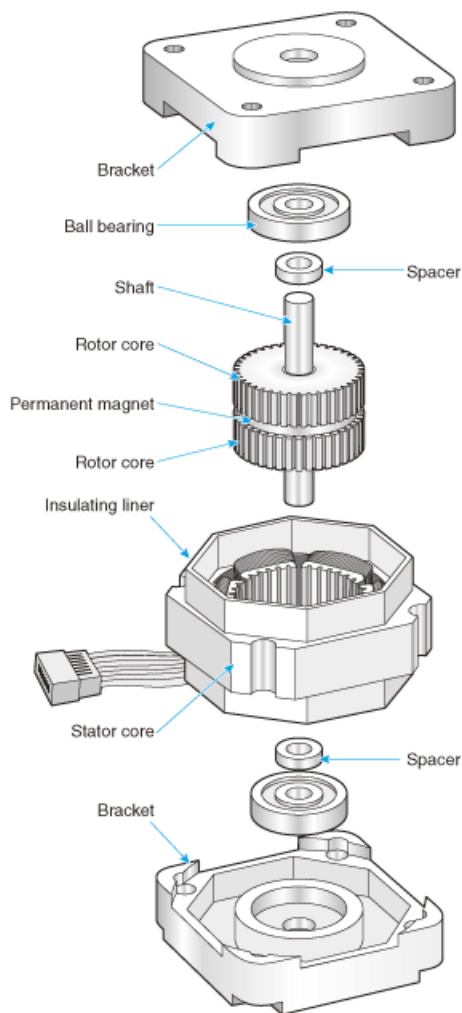
A forgórész tipikus elrendezése:

Reluktancia típusú lágy ferromágneses forgórész szegmensek fél fázis eltolással, közöttük állandó mágnes axiális mágnesezéssel.

A forgórész szegmensek ellentétes mágneses pólust képviselnek.

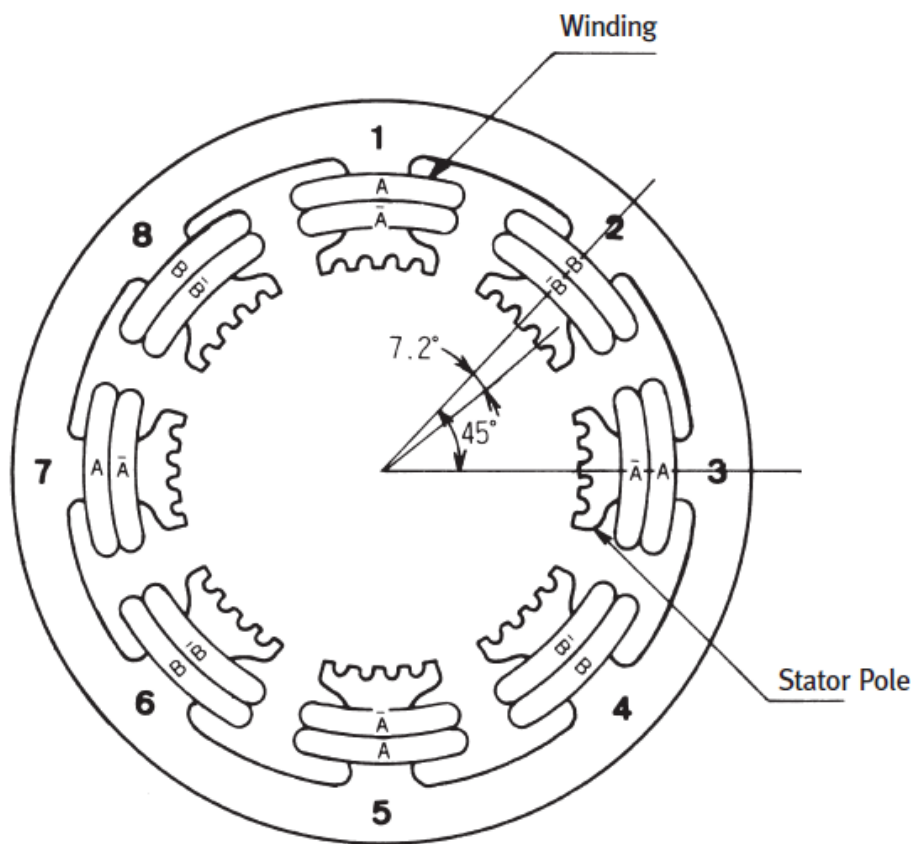


Hibrid léptetőmotorok



Hibrid léptetőmotorok

Az állórész tipikus elrendezése: hornyolt vasmag



A hornyok ugyanolyan szöggel követik egymást, mint az forgórészen.

Példa:

Forgórészen 50 fog / 360°

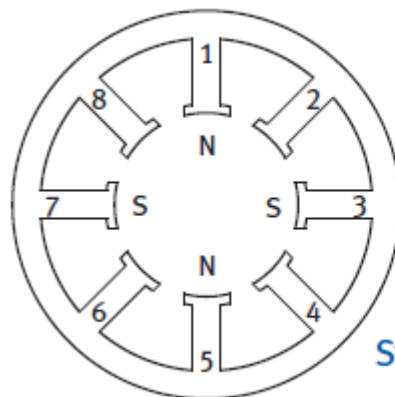
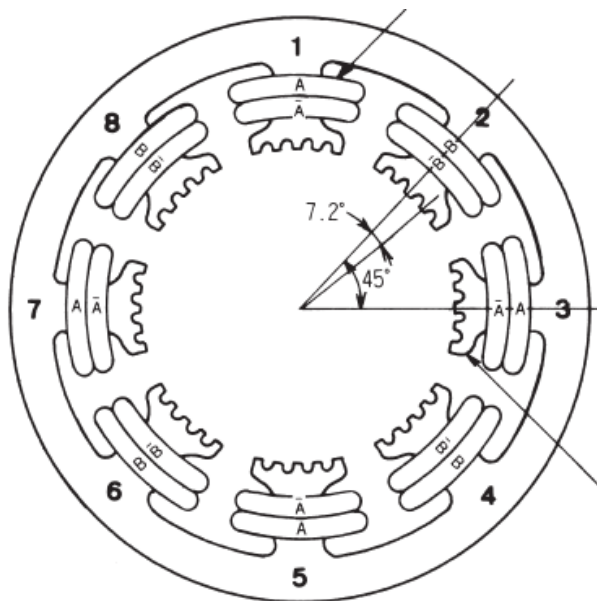
Fogosztás: 7.2 °

A két hornyolt tárcsán
ellenütemű fogazás:
fogak horonnyal
találkoznak

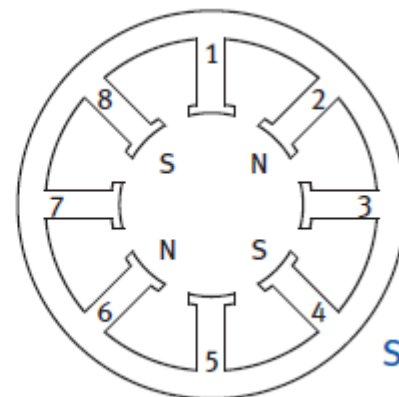


Hibrid léptetőmotorok

Vezérlési példa: 4-fázisú
(4 lépéses periódus)

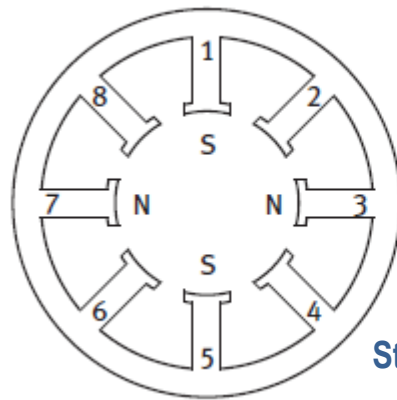


Step 1

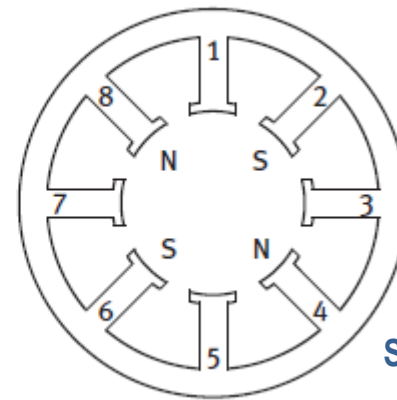


Step 2

Drive Pulse	
Phase A	Step 1 ON OFF
Phase B	Step 2
Phase \bar{A}	Step 3
Phase \bar{B}	Step 4



Step 3

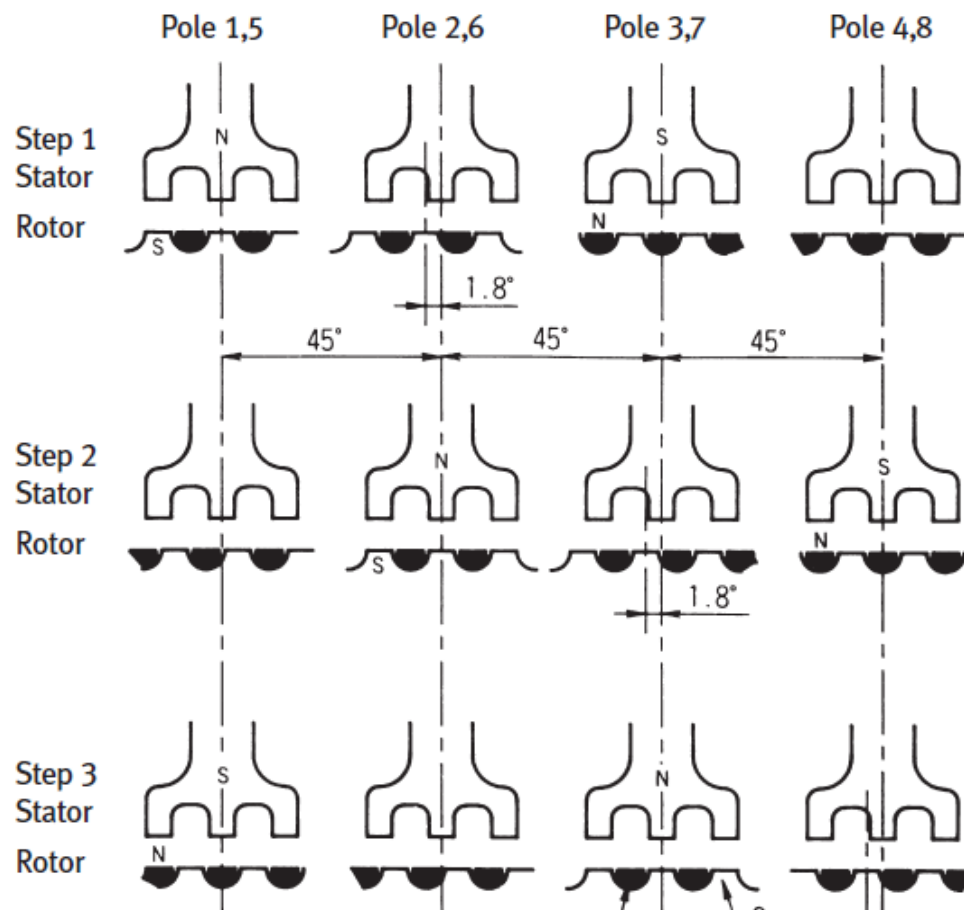
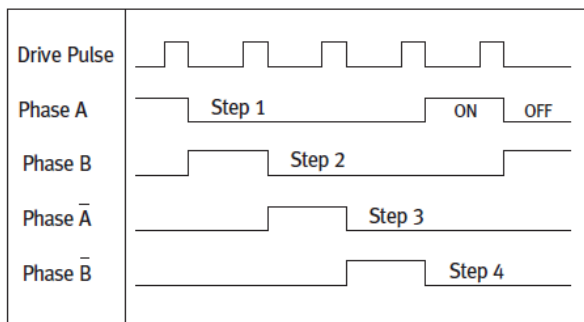
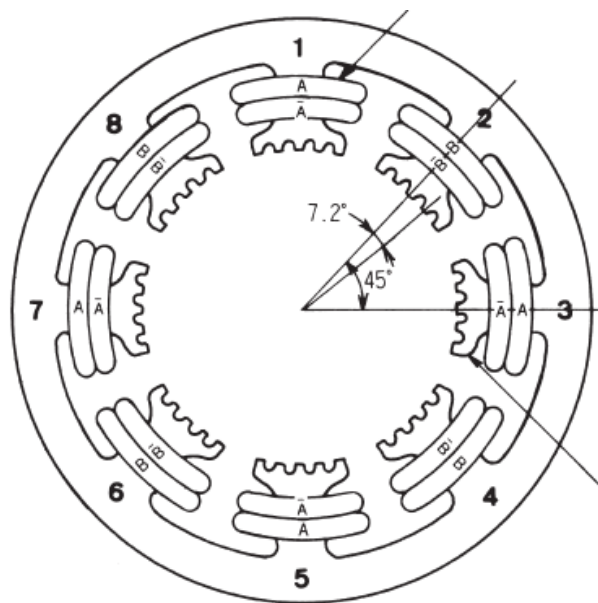


Step 4



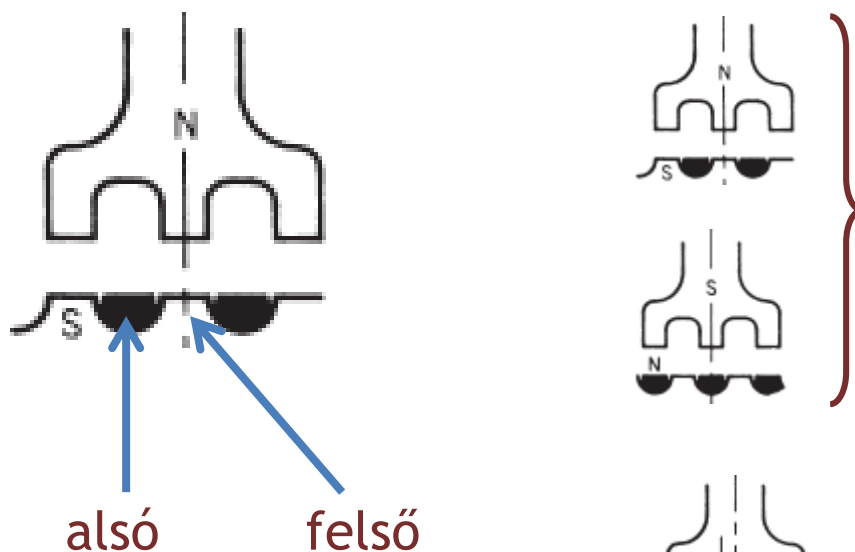
Hibrid léptetőmotorok

Állórész / forgórész viszonya az egyes lépésekben:



Hibrid léptetőmotorok

Állórész / forgórész viszonya az egyes lépésekben:



hornyolt tárcsa fog
mechanikailag

180° fáziseltolással

Egyensúlyi helyzet:
a forgórész álló helyzetben marad

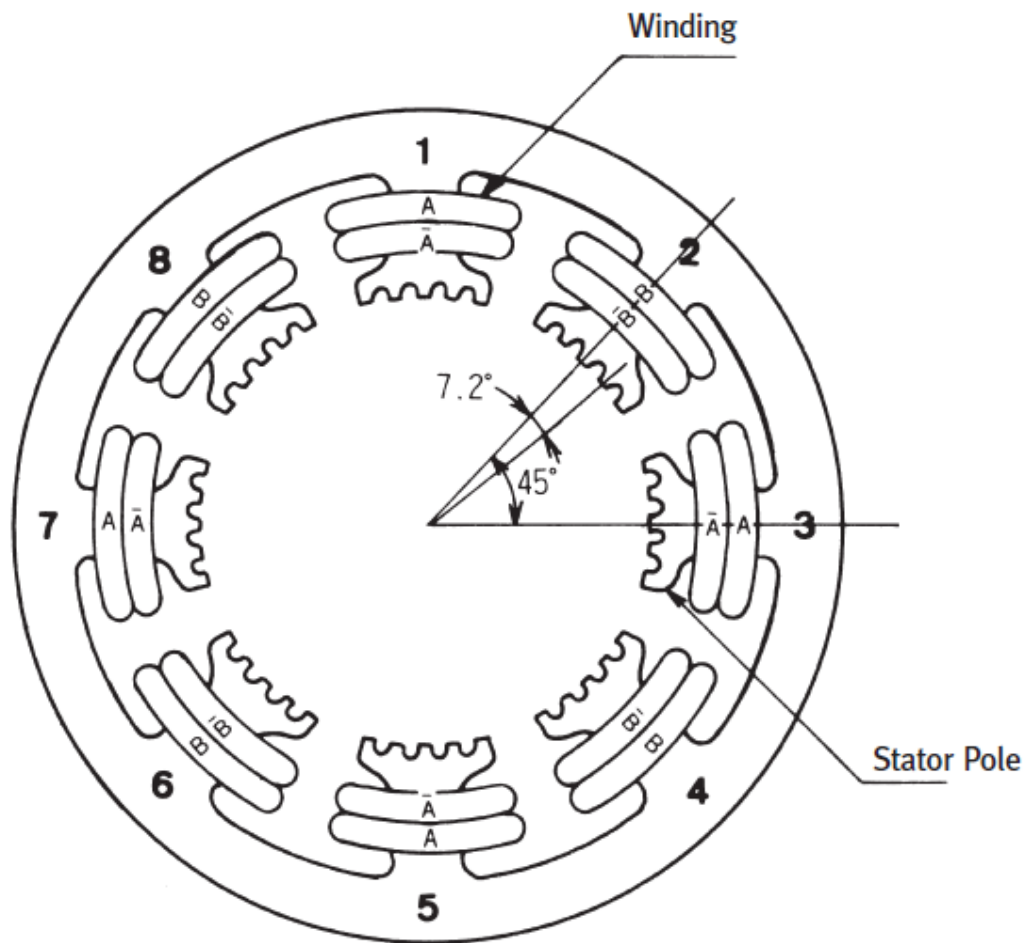
90° fáziseltérés (1.8 ° fizikailag):

- a forgórészre nyomaték hat,
- a forgórész új egyensúlyi helyzetbe fordul.

Forgó mágneses tér lép fel, amely a forgórészre nyomatékkal hat.



Hibrid léptetőmotorok



A forgórész elfordulása két lépés között:

$$\text{fogak közti szög} / 4 = 7.2^\circ / 4 = 1.8^\circ$$

Szögfelbontás: 1.8°

Teljes fordulatonkénti lépésszám: $50 * 4 = 200$

(a példa szerinti léptetőmotorra)



Hibrid léptetőmotorok

Léptetőmotor adatok:

3.6° ... 0.9° tipikus ←
(100 ... 400 lépésszám)

ITEM	規 格 SPECIFICATIONS
RATED VOLTAGE	3.3 V
RATED CURRENT	1.0 A/PHASE
MAX. INPUT	6.6 W
STEP ANGLE	1.8 °
STEP ACCURACY (POSITIONAL)	±5 %
MAX. HOLDING TORQUE	△ 0.377(3850) Nm(g-cm)REF.
PULL OUT TORQUE	△ 0.1550 Nm(g-cm)MIN. AT 6000 pps
PULL OUT TORQUE	— Nm(g-cm)MIN. AT — pps
PULL OUT TORQUE	— Nm(g-cm)MIN. AT — pps
PULL OUT TORQUE	— Nm(g-cm)MIN. AT — pps
MAX. NO LOAD RESPONSE	— pps MIN.
MAX. SLEW SPEED	— pps MIN.
WINDING RESISTANCE	3.3 Ω ±10%
WINDING INDUCTANCE	4.6 mH REF
INSULATION RESISTANCE	100 MΩ MIN.
DIELECTRIC STRENGTH	500 V AC
TEMPERATURE RISE	80 °C MAX.
CLASS OF INSULATION	B
RADIAL PLAY	0.02 mmMAX. (4.41(450) N(g) LOAD)
END PLAY	0.08 mmMAX. (4.41(450) N(g) LOAD)
ROTOR INERTIA	80 g-cm ² REF.
DETENT TORQUE	— Nm(g-cm) REF.
WEIGHT	350 g REF.



Hibrid léptetőmotorok

Adatlap
1. oldal

STEP	COLOR			
	赤 RED	青 BLU	黄 YEL	橙 ORG
1	+	0	-	0
2	+	+	-	-
3	0	+	0	-
4	-	+	+	-
5	-	0	+	0
6	-	-	+	+
7	0	-	0	+
8	+	-	-	+

FIG. 2

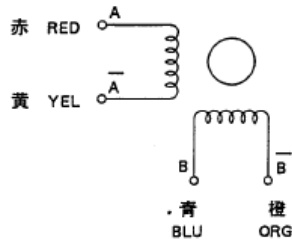
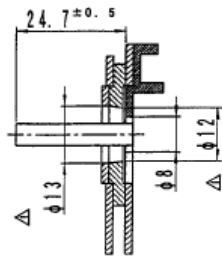
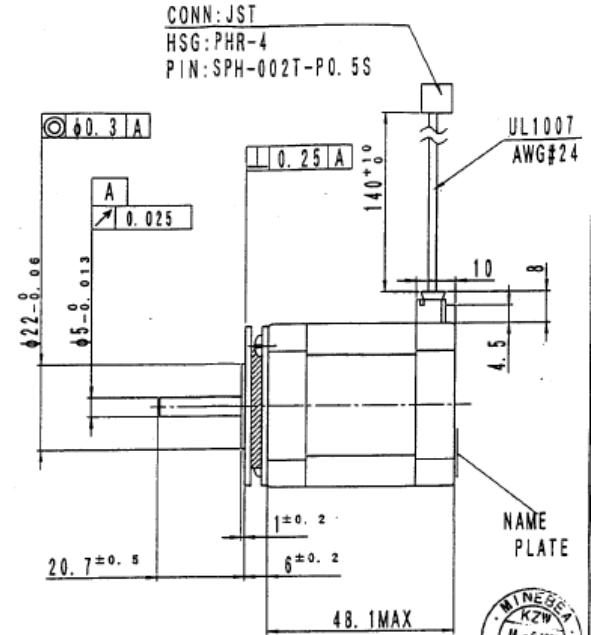
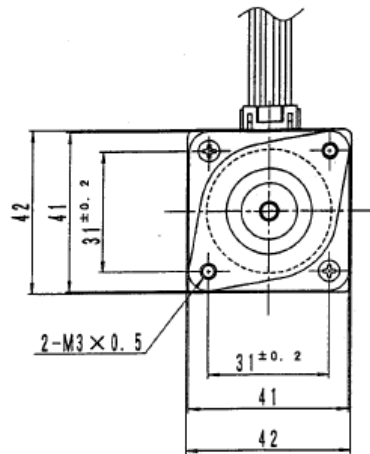


FIG. 1



DETAIL DAMPER

STEP MOTOR
JL-1999
ORIGINAL



PIN NO.	L/W COLOR
1	ORG
2	BLU
3	△ YEL
4	△ RED

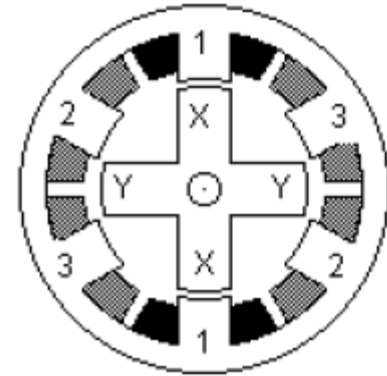
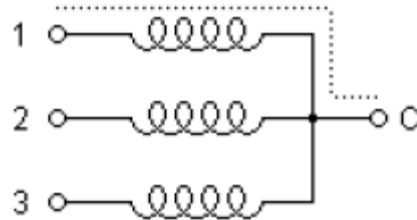
				ミネベア株式会社 MINEBEA CO.,LTD.		寸法 UNIT mm 尺度 SCALE mm 表面粗さ SURF. FINISH		作成日 DATE JUN./14/99 品名 DESCRIPTION MINIANGLE STEPPER	
				APPROVED	CHECKED	DRAWN		寸法公差 L 56 ±0.3 φ 56 ±0.3 30 CL S10 ±0.1 100 CL S10 ±0.1 100 CL S100 ±0.3 角面粗さ ±0.3	
符号 MARK	日付 DATE	変更理由 REASON	ECH NO.	担当 ENGINEER	承認 APPROVED	KNZW	HSD	OMURA	品番 PART NO. (MODEL NO.) 17500.15.8.98 図番 DRAWING NO. 17PM-K403-02VS



Állórész tekercsek bekötése/vezérlése

VR léptetőmotorok

3-fázisú példa



3-4-5-fázisú motorok: tekercsek csillagkapcsolásban

Vezérlési szekvencia:

1. tekercs	1	0	0	1	0	0	1	0	0
2. tekercs	0	1	0	0	1	0	0	1	0
3. tekercs	0	0	1	0	0	1	0	0	1

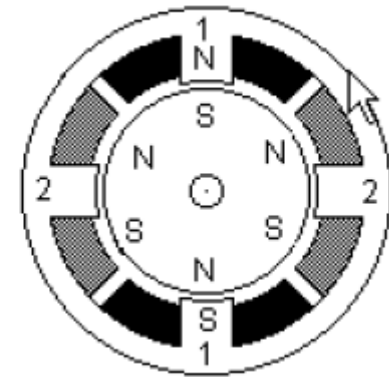
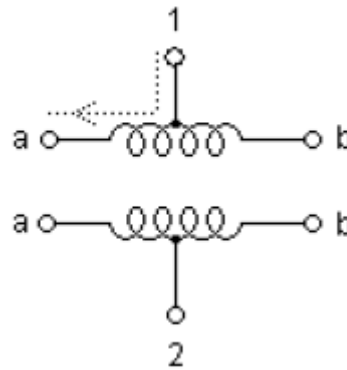


Állórész tekercsek bekötése/vezérlése

PM és hibrid léptetőmotorok (a PM példáján bemutatva):

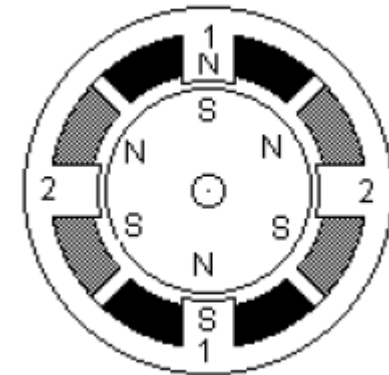
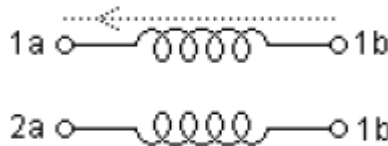
Unipoláris léptetőmotorok:

A földhöz képest pozitív feszültségekkel vezéreljük az egyes tekercs-ágakat.



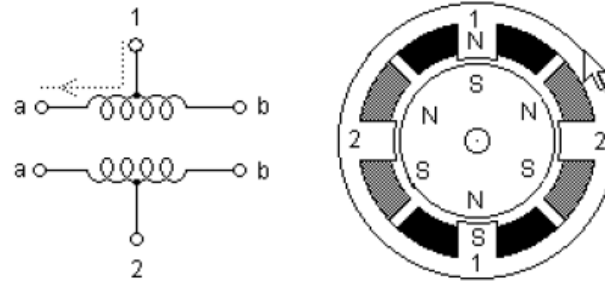
Bipoláris léptetőmotorok:

Két különböző polaritással vezéreljük az egyes tekercs-eket.



Állórész tekercsek bekötése/vezérlése

Unipoláris vezérlés:



1. vezérlési szekvencia: egy időben csak egy fél-tekercset vezérelünk - kisebb nyomaték/fogyasztás

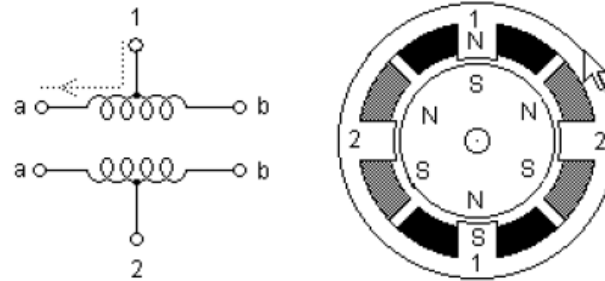
1a. tekercs	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
1b. tekercs	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
2a. tekercs	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
2b. tekercs	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1

12 lépés / fordulat



Állórész tekercsek bekötése/vezérlése

Unipoláris vezérlés:



2. vezérlési szekvencia: egy időben két fél-tekercset vezérelünk - nagyobb nyomaték/fogyasztás

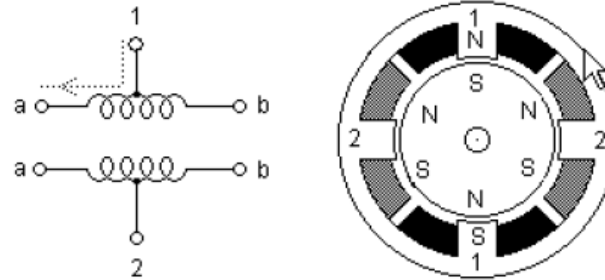
1a. tekercs	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
1b. tekercs	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
2a. tekercs	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
2b. tekercs	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1

12 lépés / fordulat



Állórész tekercsek bekötése/vezérlése

Unipoláris vezérlés:



3. vezérlési szekvencia: $\frac{1}{2}$ -lépéses vezérlés

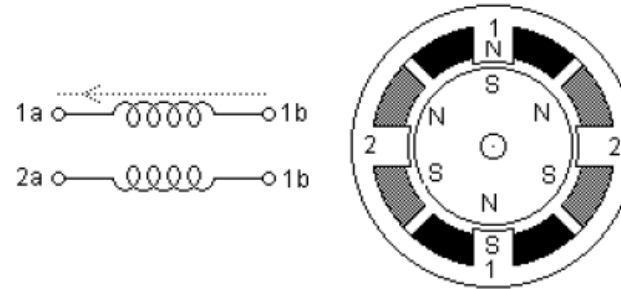
1a. tekercs	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	
1b. tekercs	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
2a. tekercs	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	
2b. tekercs	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1

24 lépés / fordulat: kétszeres felbontás



Állórész tekercsek bekötése/vezérlése

Bipoláris vezérlés:



1. vezérlési szekvencia: teljes lépéses vezérlés - egyszerre csak egy tekercset vezérlünk - kisebb nyomaték/fogyasztás

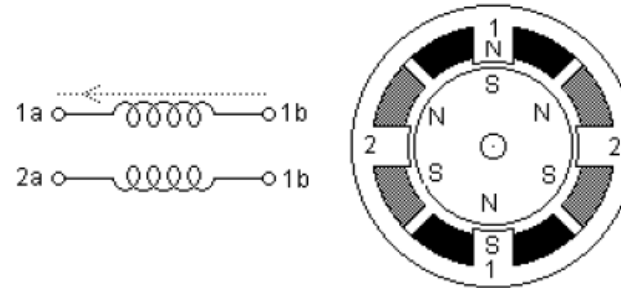
1a. tekercs	+	0	-	0	+	0	-	0	+	0	-	0
1b. tekercs	-	0	+	0	-	0	+	0	-	0	+	0
2a. tekercs	0	+	0	-	0	+	0	-	0	+	0	-
2b. tekercs	0	-	0	+	0	-	0	+	0	-	0	+

12 lépés / fordulat



Állórész tekercsek bekötése/vezérlése

Bipoláris vezérlés:



2. vezérlési szekvencia: teljes lépéses vezérlés - egyszerre két tekercset vezérlünk - nagyobb nyomaték / fogyasztás

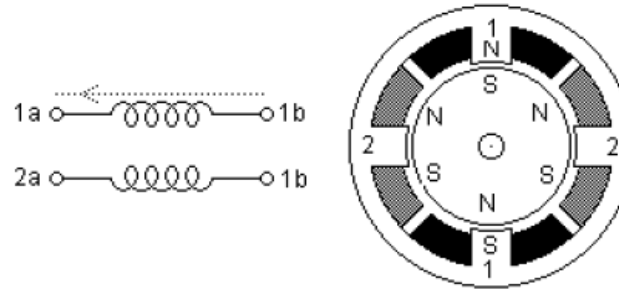
1a. tekercs	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-
1b. tekercs	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+
2a. tekercs	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-
2b. tekercs	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+

12 lépés / fordulat



Állórész tekercsek bekötése/vezérlése

Bipoláris vezérlés:



2. vezérlési szekvencia: $\frac{1}{2}$ -lépéses vezérlés - vegyesen 1 ill. 2 tekercs egyidejű vezérlése

1a. tekercs	+	+	0	-	-	-	0	+	+	+	0	-	-	-	0	+	+	+	0	-	-	-	0	+
1b. tekercs	-	-	0	+	+	+	0	-	-	-	0	+	+	+	0	-	-	-	0	+	+	+	0	-
2a. tekercs	0	+	+	+	0	-	-	-	0	+	+	+	0	-	-	-	0	+	+	+	0	-	-	-
2b. tekercs	0	-	-	-	0	+	+	+	0	-	-	-	0	+	+	+	0	-	-	-	0	+	+	+

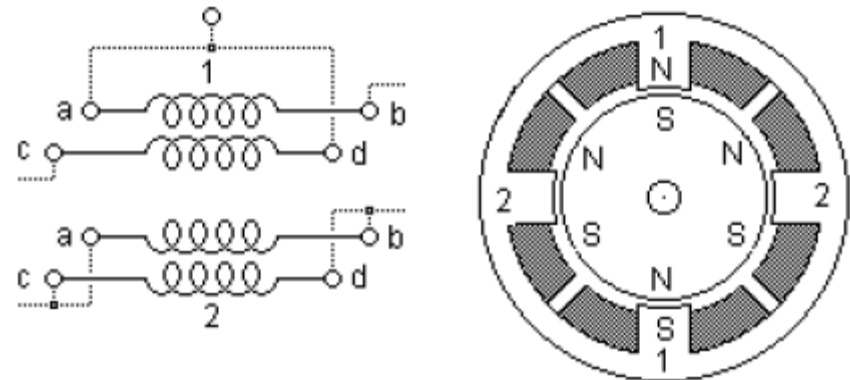
24 lépés / fordulat: kétszeres felbontás



Állórész tekercsek bekötése/vezérlése

Bifiláris tekercselés: párhuzamosan haladó két egymástól elszigetelt vezetékkel készül.

Bifiláris léptetőmotorok:



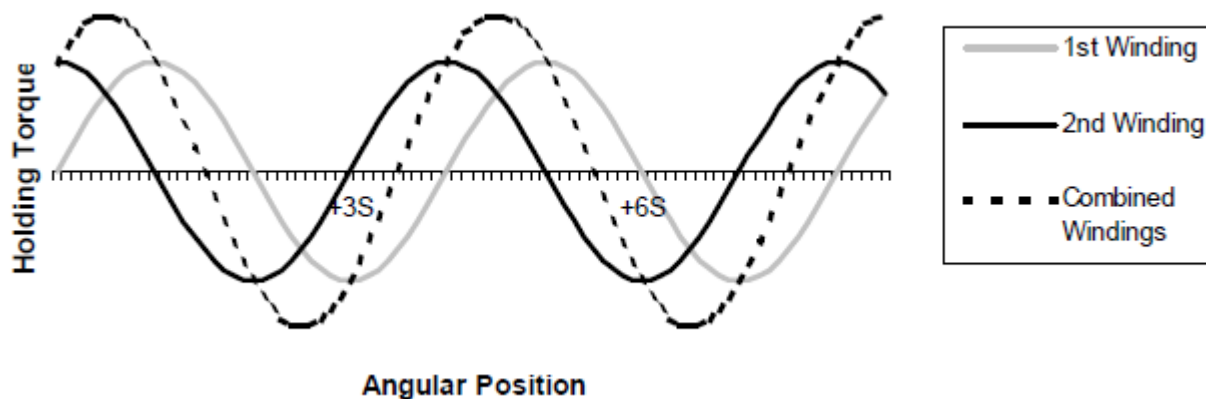
Előnyeik:

- Akár unipoláris, akár bipoláris módban üzemeltethetők.
- Soros és párhuzamos kapcsolásokkal különböző feszültség-, áram-, és ezzel együtt teljesítmény- és nyomatékviszonyok állíthatók be.



Mikrolépéses vezérlés

A léptetések közti átmenet finomítása:
a tekercsek vezérlésében fokozatos átmenetek biztosítása.



Módszer: a tekercsáramok folytonos változtatása
- ma PWM technikával.

Egy stratégia hibrid léptetőmotorra:

$$I_1 = I_{MAX} \cos\left(\frac{\pi}{2\sigma} \theta\right) \quad I_2 = I_{MAX} \sin\left(\frac{\pi}{2\sigma} \theta\right)$$

σ - lépésszög (rad)

θ - kívánt szög (rad)



Mikrolépéses vezérlés

Előnyök:

- Tetszőleges mértékben finomítható a lépésszög (gyakorlati korlátok - tipikusan max. $1/32$).
- Az alternatív mechanikus áttételhez képest nincs játék és járulékos súrlódás.
- Egyenletes fordulatszám- és nyomatékprofil.

Korlátok:

- Nemlinearitások: holtsáv és súrlódás.
- Bizonytalanságok a tekercsek kialakításában rontják a pontosságot.

Hátrányok:

- Bonyolultabb vezérlő hardver és szoftver.



Vezérlő hálózatok

Léptetőmotorok vezérlése: kapcsolóhálózatokkal.

Kapcsolók realizálása: tranzisztorok, MOSFET-ek.

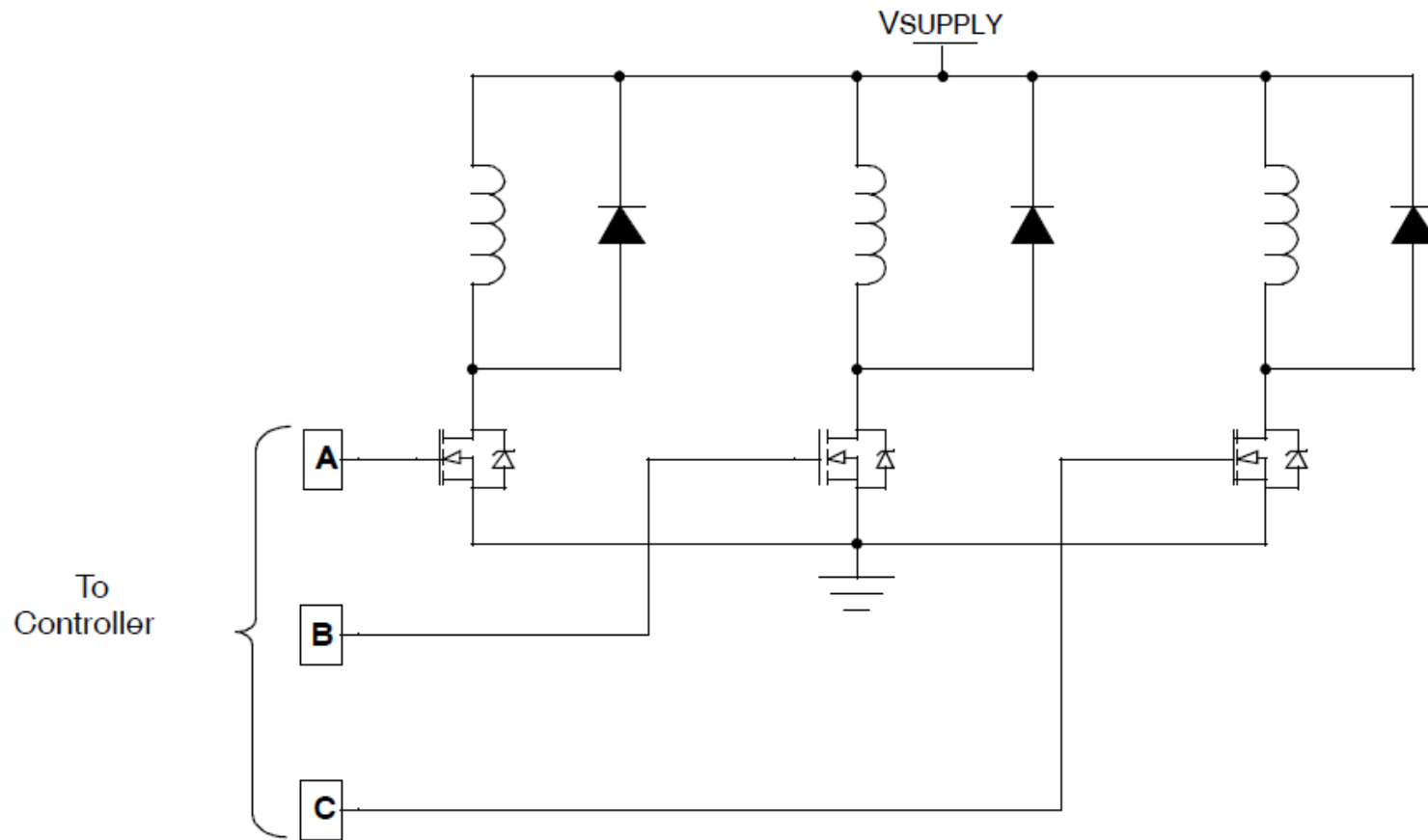
Kapcsolási szekvenciák előállítása:

- Logikai áramkörökkel,
- Mikrovezérlőkkel,
- Speciálisan erre a célra tervezett integrált léptetőmotor vezérlőkkel.



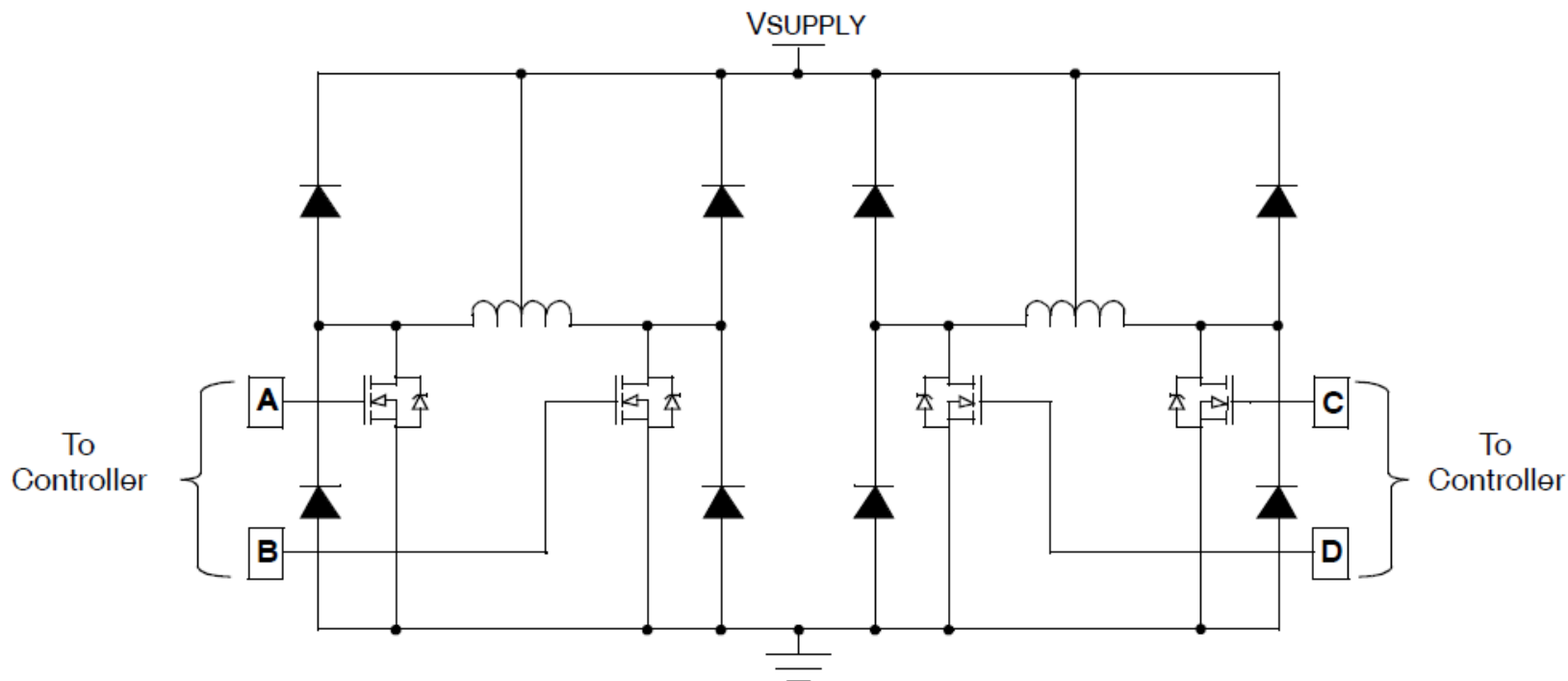
Vezérlő hálózatok

VR vezérlőhálózat:



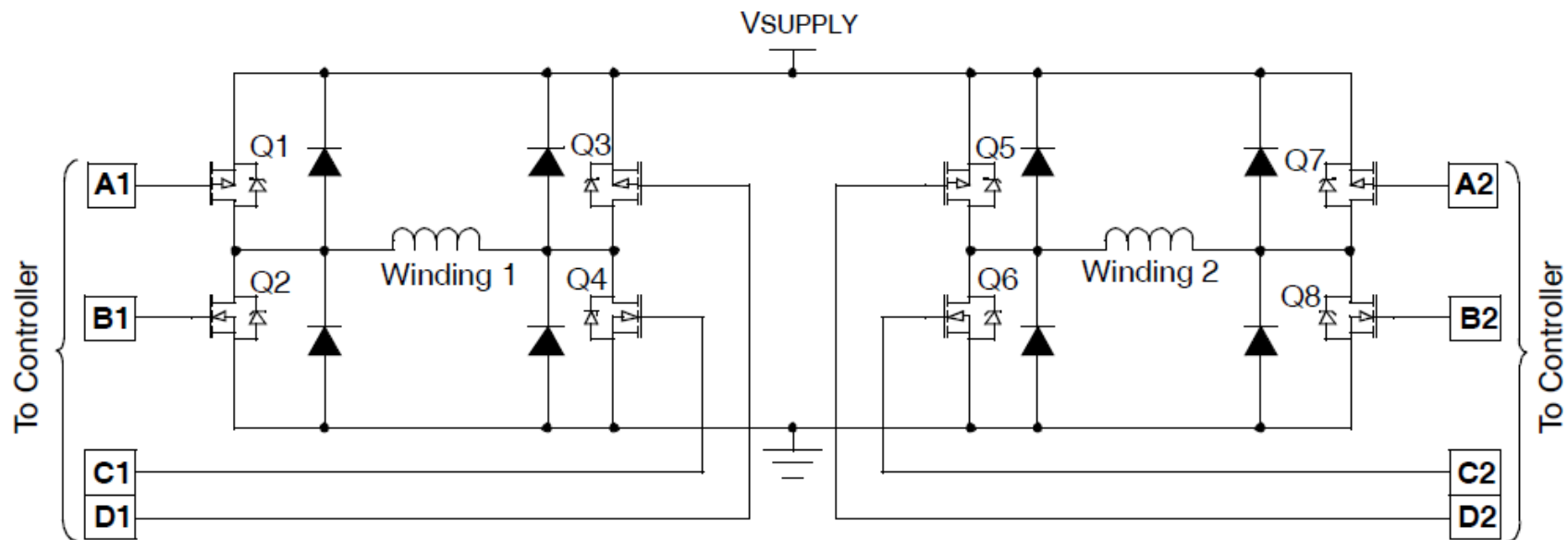
Vezérlő hálózatok

Unipoláris vezérlő hálózat:

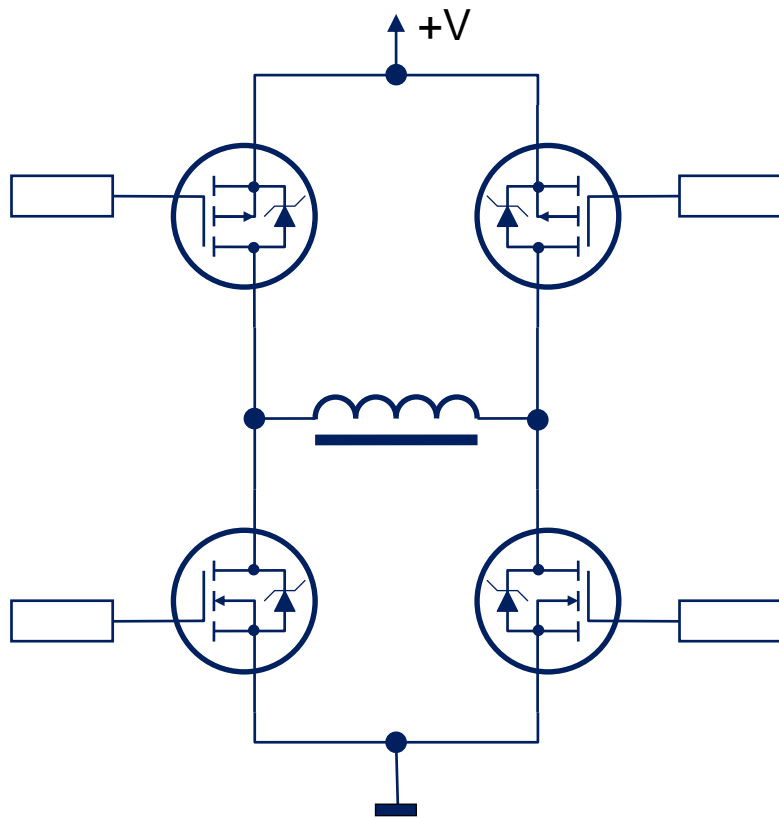


Vezérlő hálózatok

Bipoláris vezérlő hálózat:



Induktív terhelésből eredő problémák



A gerjesztő feszültség kikapcsolásakor (a PWM impulzusok közötti szünetekben) a tekercs inuktivitásán nagy ellentétes irányú feszültség indukálódik -

ellentétes polaritású diódák a MOSFET-ekben

+V + 0.6 V (dióda nyitófeszültsége) meghaladása, vagy ellentétes irányban GND - 0.6 V túllépése esetén

a megfelelő diódák kinyitnak - korlátozzák a feszültséget levezetik az keletkező áramot



Induktív terhelésből eredő problémák

Problémák:

- Nem minden kapcsolótípusban vannak ilyen diódák, ezek hiányában a kapcsolók, a meghajtó áramkörök meghibásodhatnak.
- A diódák nyitása nagy áram-tranzienseket idéz elő, amely elektromágneses zavarjeleket kelt (EMC követelmények sérülnek).
- A tápegységek nem feltétlenül tudják elnyelni ezeket az áramokat.
- A diódák nyitása hosszú idejű tranzienseket hoz létre, ez alatt a motor lépéseket veszíthet.

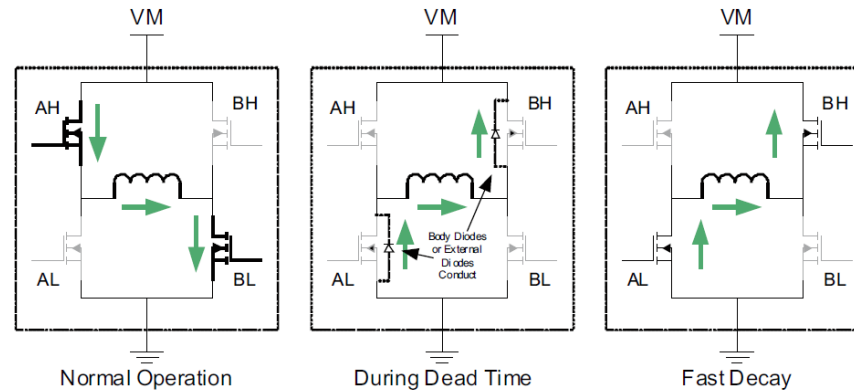
Megoldás:

- Az áram-visszavezetés kezelése
 - Gyors áram-visszavezetés (fast decay)
 - Lassú áram-visszavezetés (slow decay)
 - Vegyes áram-visszavezetés (mixed decay)



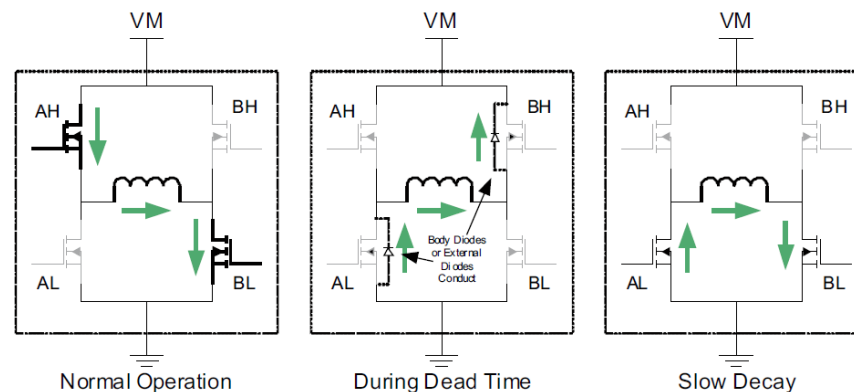
Induktív terhelésből eredő problémák

Gyors áram-visszavezetés (fast decay mode):



ellentétes irányba
kapcsolás

Lassú áram-visszavezetés (slow decay mode):



fék üzemmódba
kapcsolás

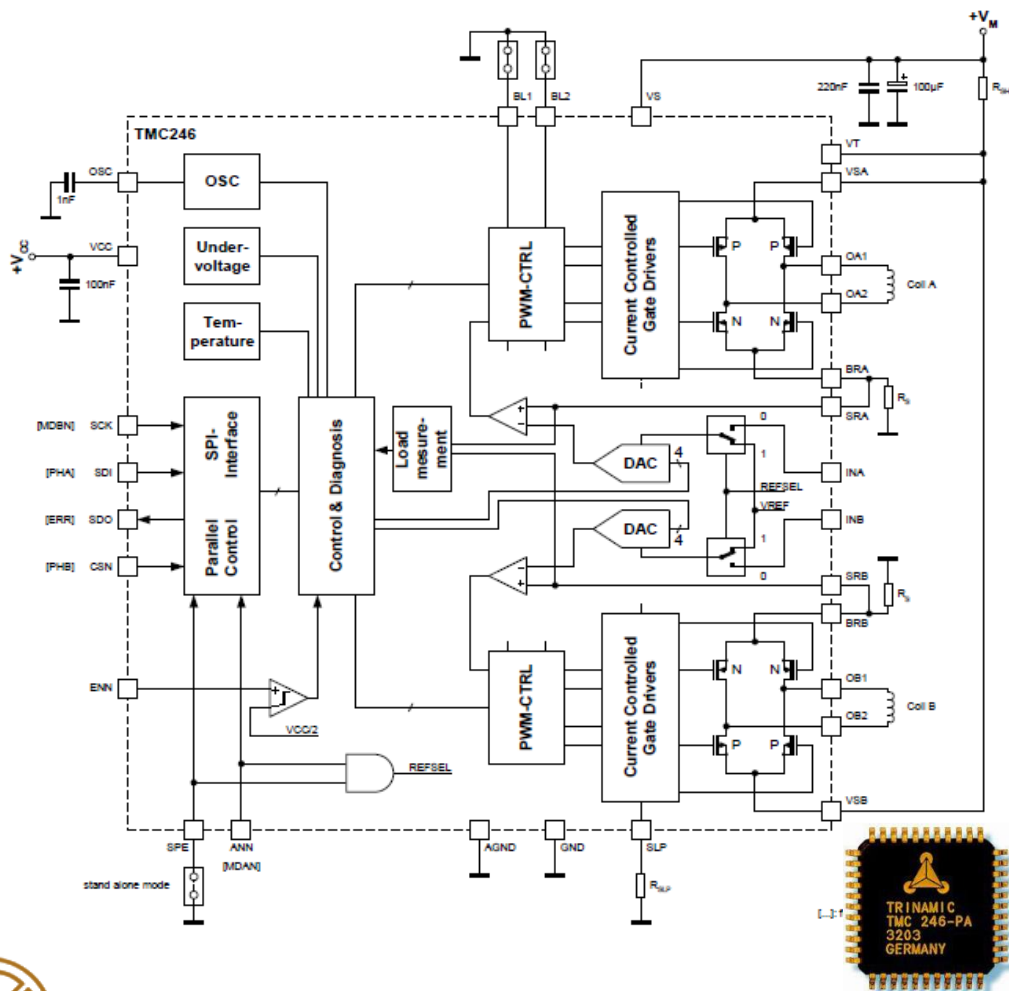
Vegyes áram-visszavezetés (mixed decay mode):

a kettő kombinációja
időben elosztva



Vezérlő áramkörök

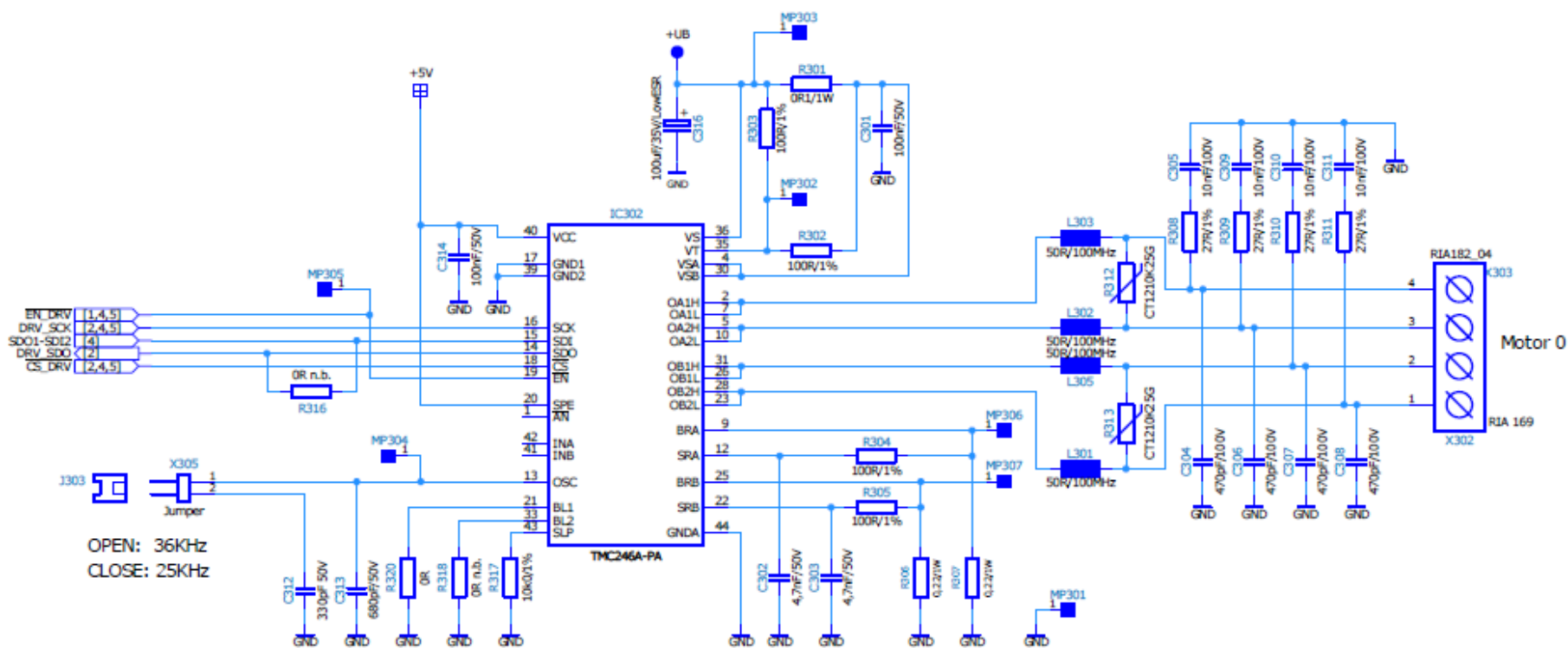
Trinamic TMC246 léptetőmotor vezérlő áramkör:



- Bipoláris léptetőmotorokhoz
- Beépített MOSFET kapcsolók 1.5 A áramig
- SPI programozható
- Áramszabályozás, áram-visszavezetés vezérlés
- Rövidzár-, túláram-, termikus védelem
- Jelváltozás-korlátozás jobb EMC viselkedéshez
- „Lágy” indítás / működés támogatása
- Mikrolépéses vezérlés megvalósítása 1/16 lépésig

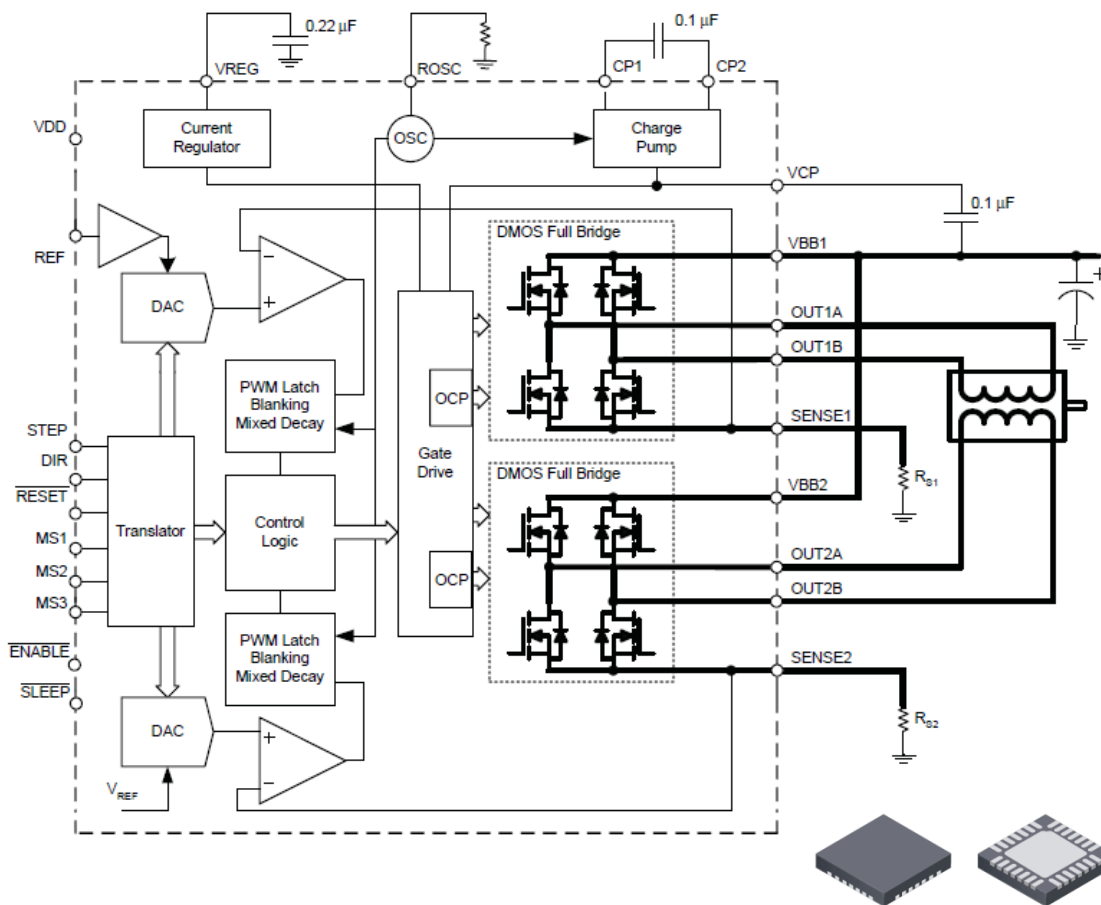
Vezérlő áramkörök

Trinamic TMC246 alapú léptetőmotor vezérlő áramkör védelmi elemekkel:



Vezérlő áramkörök

Allegro A4988 léptetőmotor vezérlő áramkör:

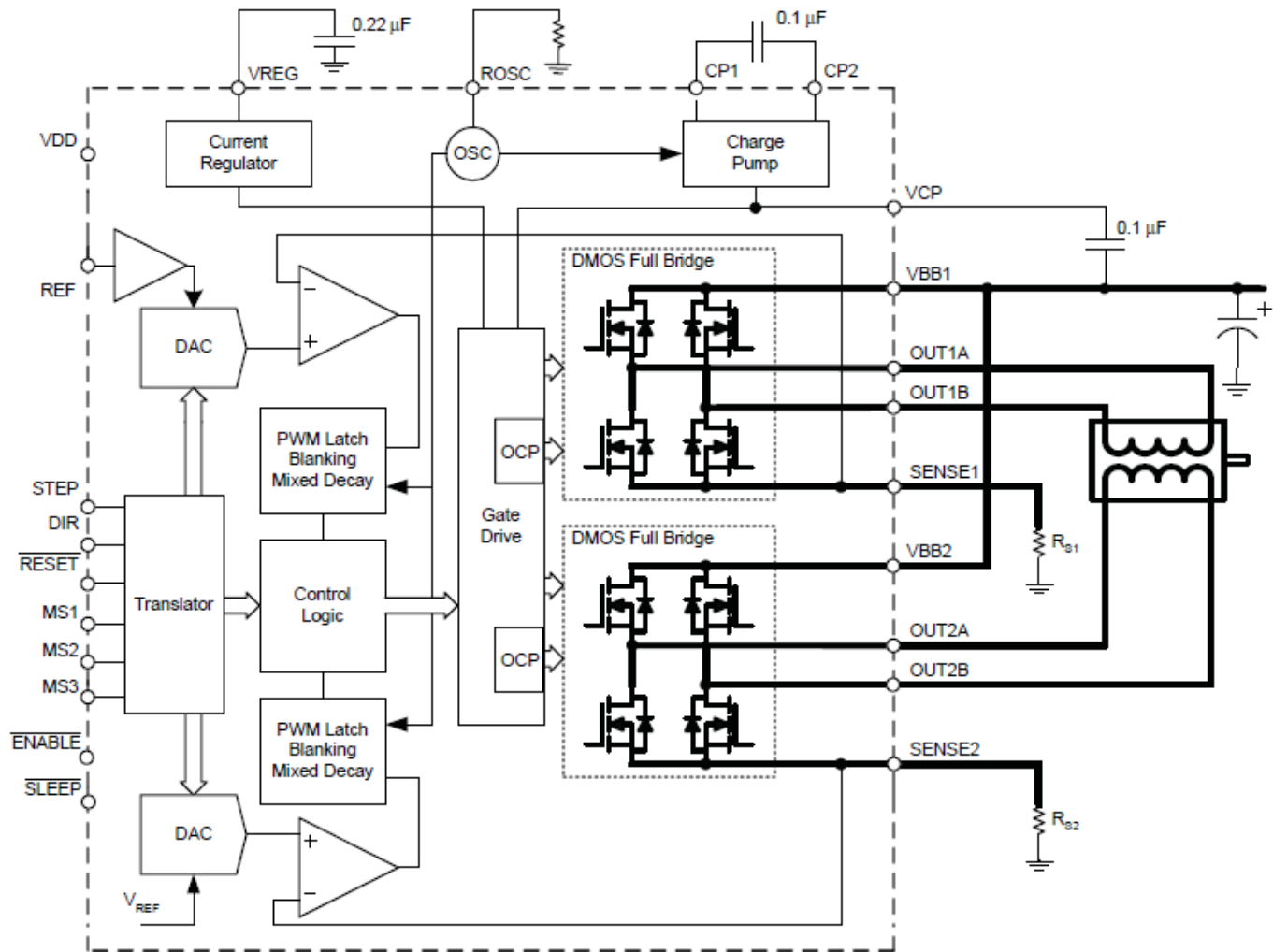


- Bipoláris léptetőmotorokhoz
- STEP-DIR jellegű interfész
- Áramszabályozás
- Automatikusan áramvisszavezetés vezérlés
- Rövidzár-, túláram-, túlfeszültség-védelem, termikus védelem
- Jelváltozás-korlátozás jobb EMC viselkedéshez
- Teljes, 1/2, 1/4, 1/8, és 1/16 lépéses vezérlés



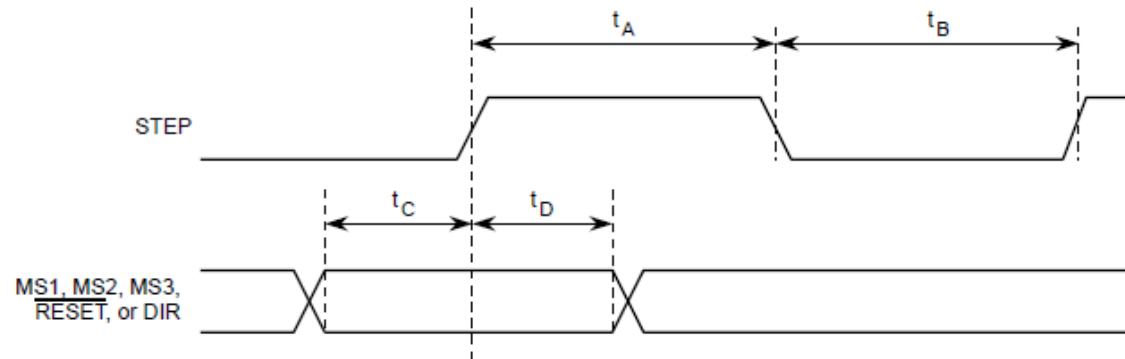
Bipoláris léptetőmotor vezérlő

A4988



Bipoláris léptetőmotor vezérlő

A4988



Time Duration	Symbol	Typ.	Unit
STEP minimum, HIGH pulse width	t_A	1	μs
STEP minimum, LOW pulse width	t_B	1	μs
Setup time, input change to STEP	t_C	200	ns
Hold time, input change to STEP	t_D	200	ns

MS1	MS2	MS3	Microstep Resolution	Excitation Mode
L	L	L	Full Step	2 Phase
H	L	L	Half Step	1-2 Phase
L	H	L	Quarter Step	W1-2 Phase
H	H	L	Eighth Step	2W1-2 Phase
H	H	H	Sixteenth Step	4W1-2 Phase



Bipoláris léptetőmotor vezérlő

Pololu A4988 kísérleti panel

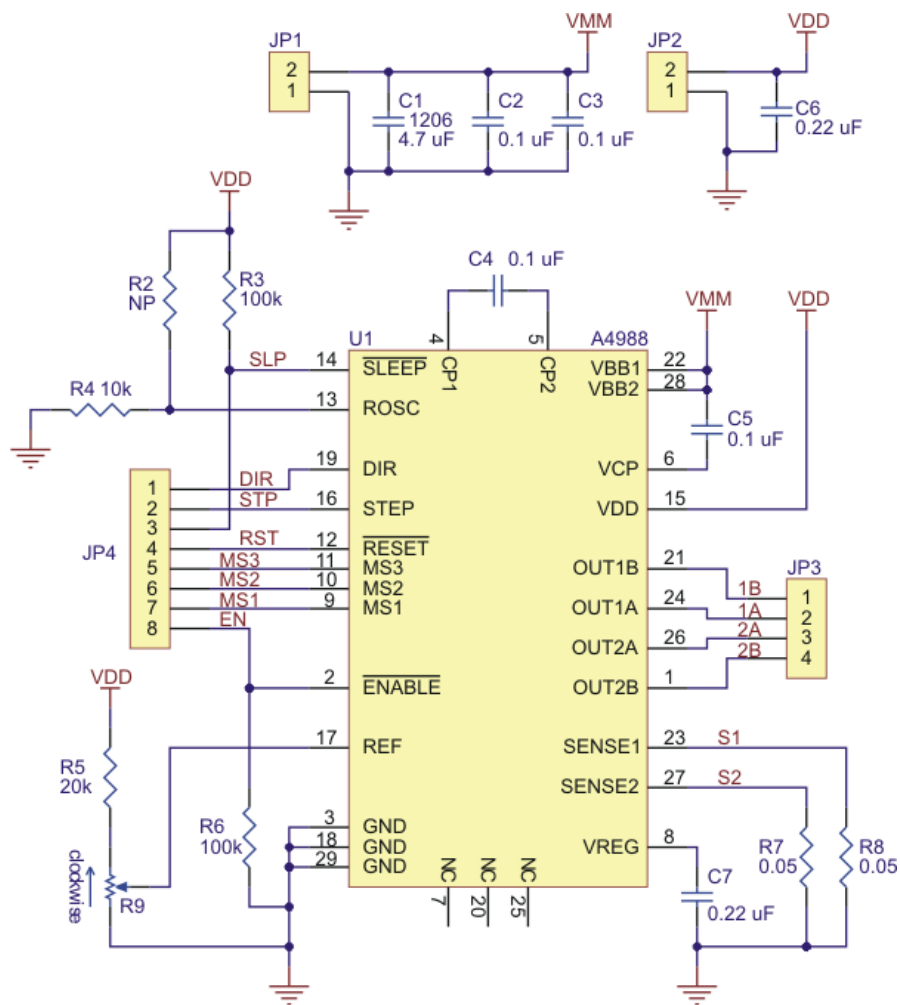
~ENABLE
 MS1
 MS2
 MS3
 ~RESET
 ~SLEEP
 STEP
 DIR



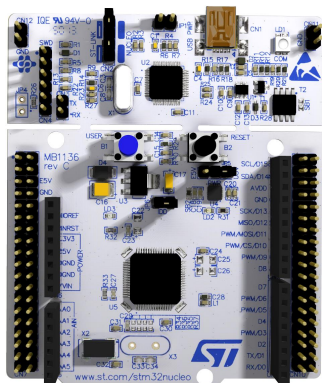
VMOT
 GND
 2B
 2A
 1A
 1B
 VDD
 GND



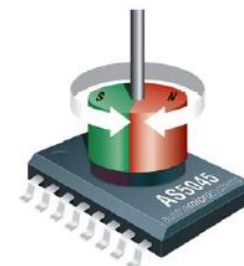
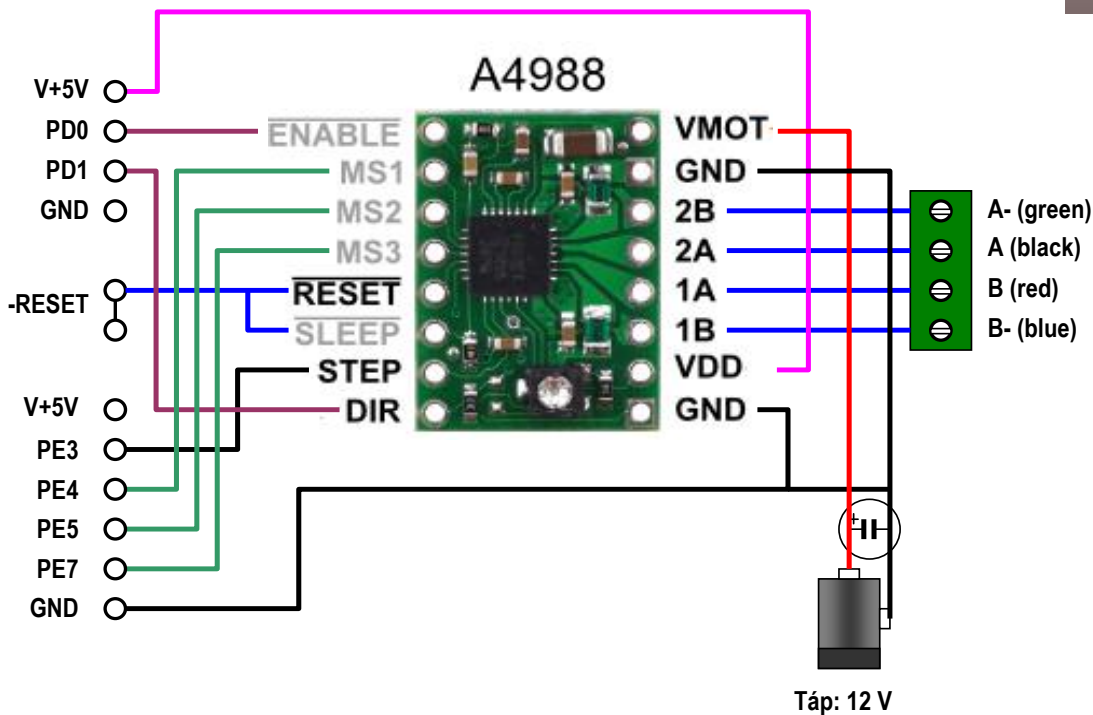
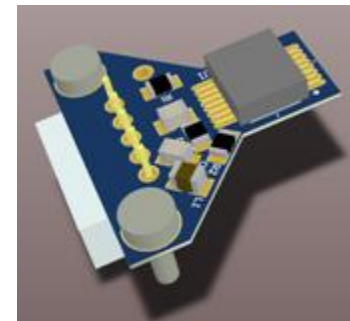
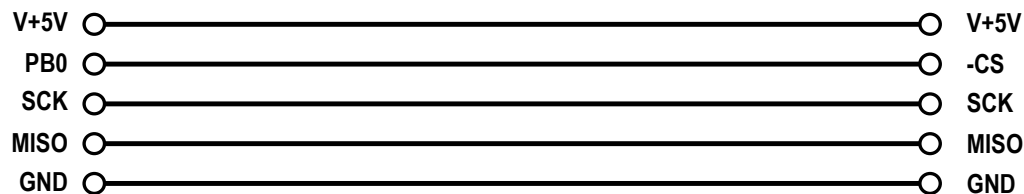
<https://www.pololu.com/product/1182>



Bipoláris léptetőmotor vezérlő



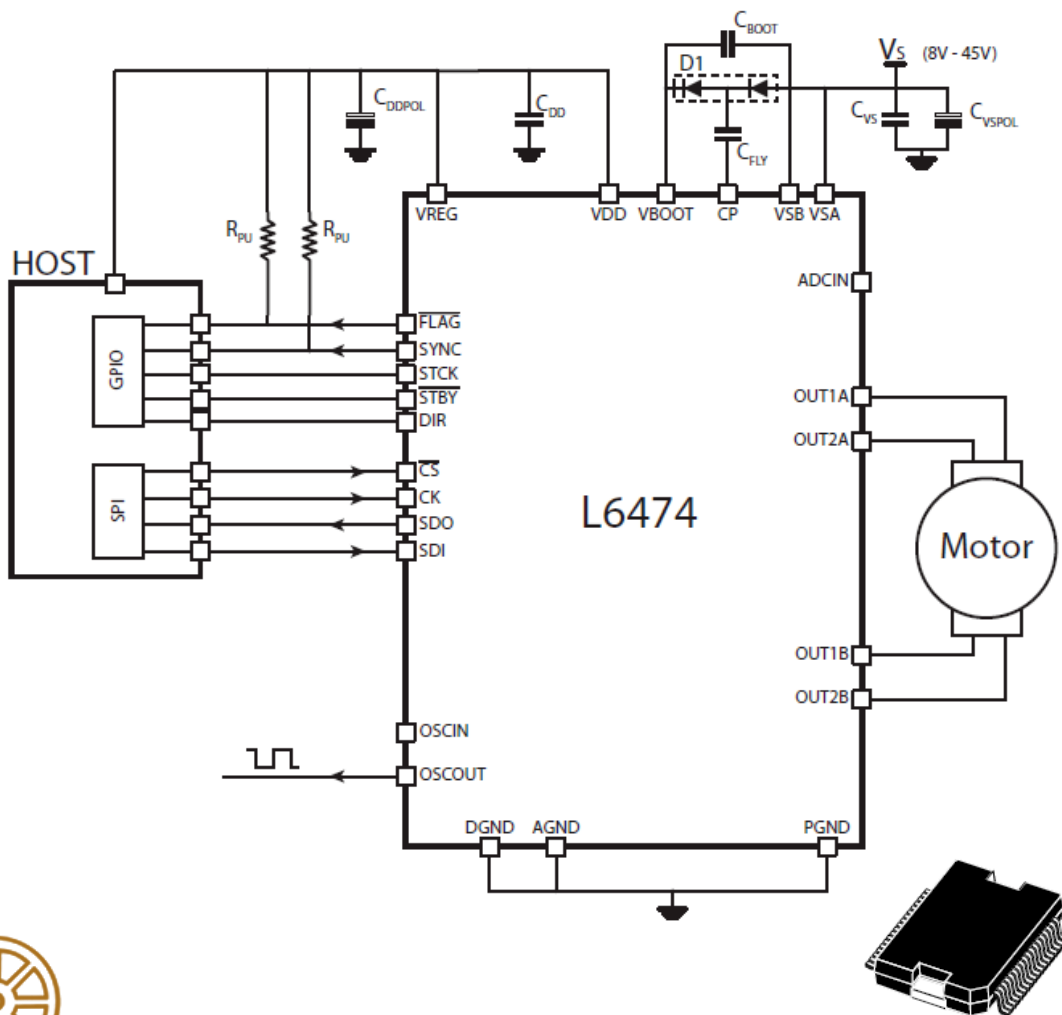
Egy kísérleti
elrendezés
STM32F401RE
mikrovezérlővel



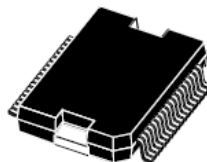
Vezérlő áramkörök



ST L6474 léptetőmotor vezérlő áramkör:

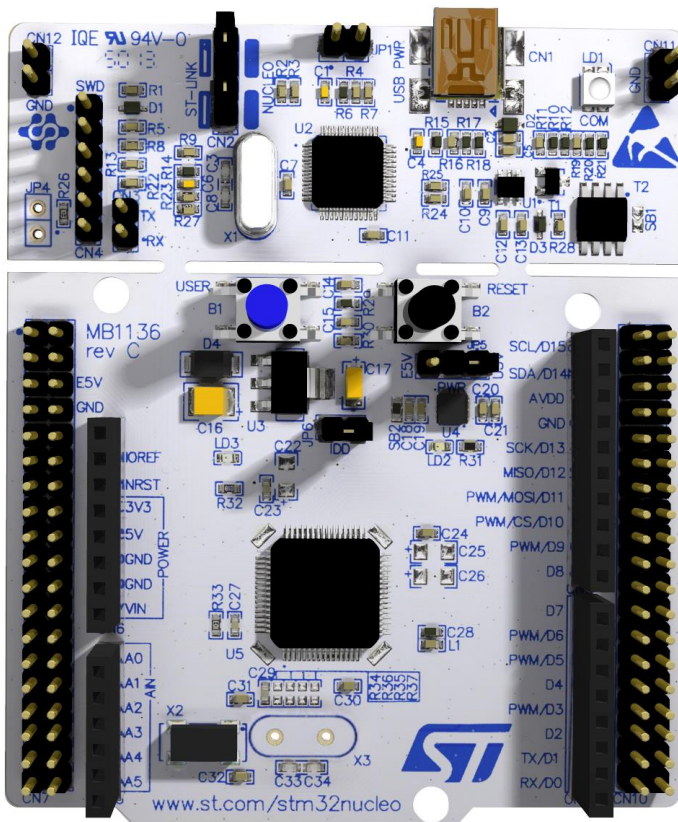


- Bipoláris léptetőmotorokhoz
- Mikrolépéses vezérlés 1/16 lépésig
- SPI és STEP-DIR jellegű interfész
- Áramszabályozás adaptív áram-visszavezetéssel
- Disszipációmentes áramérzékelés
- Túláram-, és termikus védelem
- Programozható jelváltozási sebesség



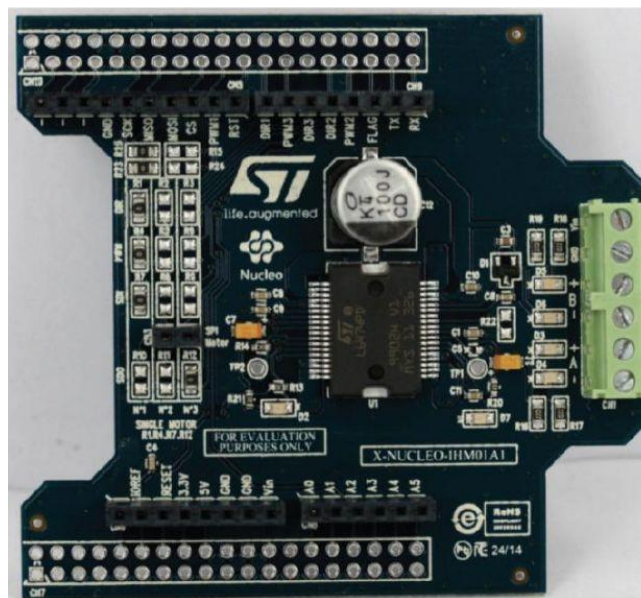
Bipoláris léptetőmotor vezérlő

ST kísérleti összeállítás:



Nucleo-64 panel
STM32F401RE
mikrovezérlővel

X-NUCLEO-IHM01A1 bipoláris léptetőmotor vezérlő ST L6474 áramkörrel



Bipoláris
léptetőmotor



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

Dr. Soumelidis Alexandros



email: soumelidis@mail.bme.hu



BME KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI ÉS JÁRMŰMÉRNÖKI KAR
32708-2/2017/INTFIN SZÁMÚ EMMI ÁLTAL TÁMOGATOTT TANANYAG