

Érzékelők és működtetők II.

Előadásvázlat

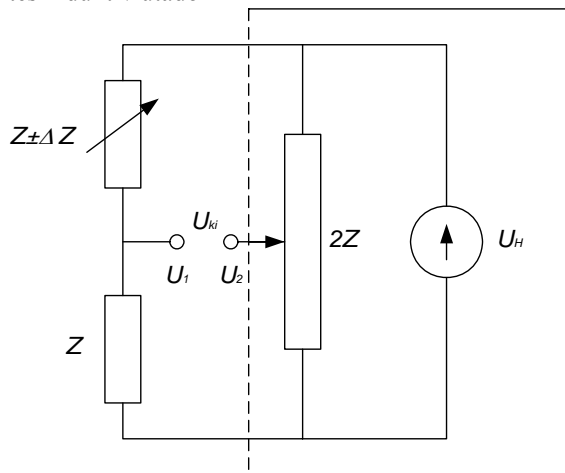
1. Az érzékelőknél alkalmazott legfontosabb illesztő áramkörök
2. Egyenáramú szervomotorok
3. Elektronikusan kommutált motorok
4. Aszinkron szervomotorok
5. Léptetőmotorok
6. Lineáris motorok
7. Piezo-elektromos aktuátorok
8. Magnetostrikiós aktuátorok
9. Emlékező fémes (SMA) aktuátorok
10. Elektrosztatikus aktuátorok
11. Vezérelhető folyadékok

1. Az érzékelőknél alkalmazott legfontosabb illesztő áramkörök

1.1. Hídkapcsolások

1.1.a. Negyed-híd

Pl.: érintésmentes induktív útadó



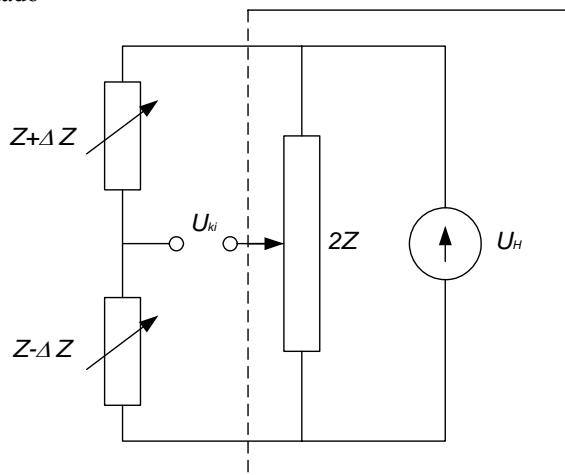
$$U_{ki} = U_1 - U_2 = U_H \left(\frac{Z + \Delta Z}{2Z + \Delta Z} - \frac{Z}{2Z} \right) =$$

$$= U_H \frac{2Z + 2\Delta Z - 2Z - 2\Delta Z}{4Z + 2\Delta Z} \cong \frac{U_H}{4} \frac{\Delta Z}{Z}$$

$$(\Delta Z \approx 0.01..0.03Z)$$

1.1.b. Félhíd

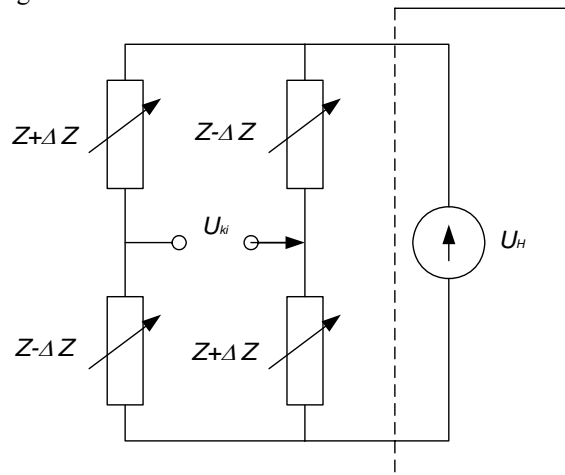
Pl.: induktív útadó



$$U_{ki} = U_H \left(\frac{Z + \Delta Z}{2} - \frac{Z}{2Z} \right) = \frac{U_H}{2} \frac{\Delta Z}{Z}$$

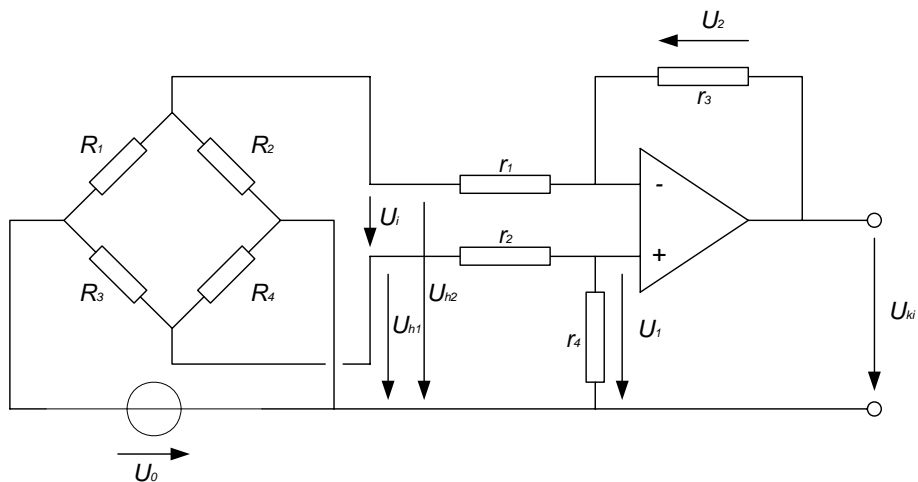
1.1.c. Teljes híd

Pl.: Nyúlásmérő-bélyeges mérések



$$U_{ki} = U_H \left(\frac{Z + \Delta Z}{Z + \Delta Z + Z - \Delta Z} - \frac{Z - \Delta Z}{Z + \Delta Z + Z - \Delta Z} \right) = U_H \frac{\Delta Z}{Z}$$

1.2. Egyenáramú mérőkör



$$U_1 = \frac{r_4}{r_3 + r_4} U_{h2}$$

$$U_2 = \frac{r_2}{r_1 + r_2} (U_{ki} - U_{h1})$$

Levezetés (szuperpozíció elve)

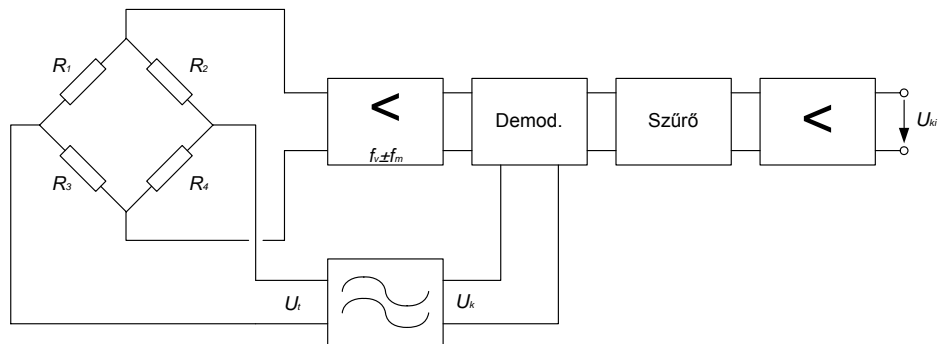
1. $U_{h1}=0 \Rightarrow U_{ki1}$
2. $U_{h2}=0 \Rightarrow U_{ki2}$
3. $U_k = U_{ki1} + U_{ki2}$,
végeredményül:

$$U_{ki} = -\frac{r_2}{r_1} U_{h1} + \frac{r_4(r_1 + r_2)}{r_1(r_3 + r_4)} U_{h2} \Rightarrow U_{ki} = -\frac{r_2}{r_1} U_i,$$

mert általában: $r_1=r_3$, $r_2=r_4$, és $U_i=U_{h1}-U_{h2}$

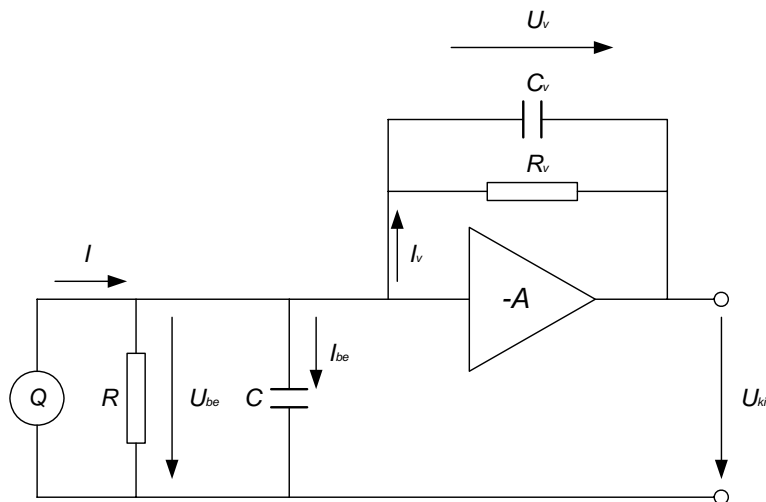
1.3. Vivőfrekvenciás erősítők

- A passzív átalakítók közül csak a rezisztív átalakítókhoz lehet egyenáramú mérőkört alkalmazni. Kapacitív és induktív átalakítókhoz vivőfrekvenciás üzemmódú mérőrendszert alkalmazunk.
- Vivőfrekvenciás üzemmód: a mérendő mennyiség egy váltakozó-áramú generátor jelét (vivőfrekvenciát) modulálja (amplitúdó, fázis, frekvencia). Minden művelet a modulált jelen van elvégezve, majd azt demodulálva kapjuk a mérendő jellel arányos villamos jelet.
- Előnyös tulajdonságaik:
 - Zavar egyenfeszültségeket és
 - a hálózati zavarokat nem viszik át
- Hátrányaik:
 - A híd stabil frekvenciájú és amplitúdójú váltakozó tápfeszültséget igényel
 - Ebből adódóan általában rosszabb az érzékenyséjük, stabilitásuk és linearitásuk, mint az egyenáramú rendszerek esetén.



1.4. Töltéserősítők

Piezoelektromos érzékelőkhöz.



- R és C a mérővezetékek ellenállása, ill. kapacitása
- Az erősítő egy kapacitíven visszacsatolt műveleti erősítő. C_v értékének változtatásával lehet változtatni a méréshatárt.
- Az erősítő kimeneti feszültsége arányos a töltéssel:

$$U_{ki} \cong -\frac{Q}{C_v}$$

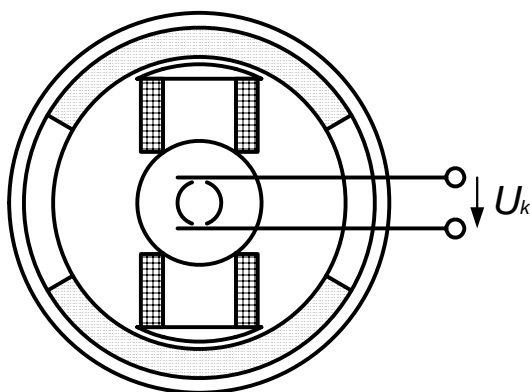
2. Egyenáramú szervomotorok

- A műszertechnikában legelterjedtebb motorok
- Kedvező tulajdonságaik:
 - analóg mozgás
 - jó szabályozhatóság
- Alapvetően két típusuk terjedt el:
 - a főáramkörű (soros)
 - és a külső gerjesztésű motor.

2.1. Az egyenáramú motorok működési elve

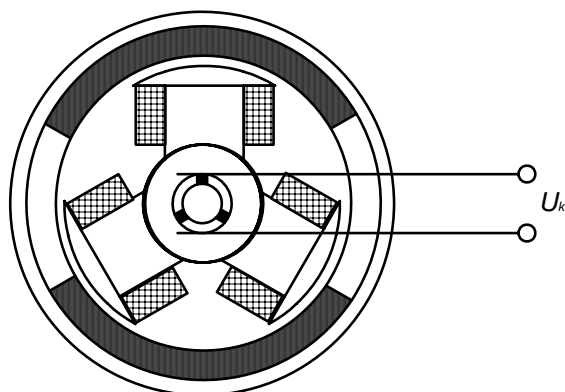
- Elektromágneses kölcsönhatáson alapuló motorok

Kétpólusú

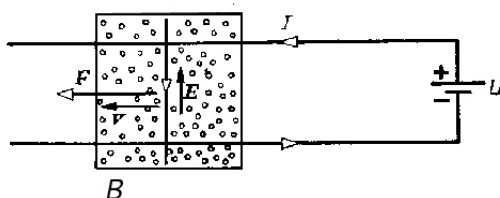


Probléma: Kommutáció, nem minden esetben képes a motor elindulni

Hárompólusú



- Lorentz-erőn alapuló motorok (elektrodinamikus aktuátorok)



Nyugvó állapotban a vezetőre ható erő (az áram hatása teljes egészében hővé alakul):

$$dF = I(d\vec{l} \times \vec{B}) \Rightarrow F = I l B,$$

Ha a vezető elmozdulásra képes, a fenti erő gyorsítani fogja a vezetődarabot. Azonban, ha a vezető mozog, benne feszültség fog indukálódni, a következő képlet szerint:

$$U_i = v l B$$

(A fenti képletek csak akkor érvényesek, ha: $B \perp l \perp D$)

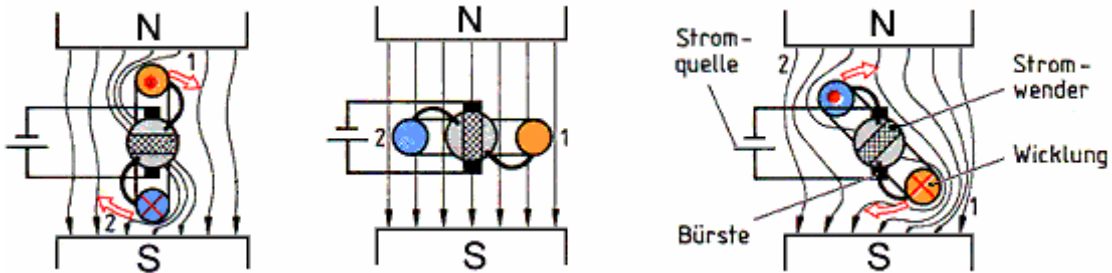
Az indukált feszültség hatására a vezetőben folyó áram lecsökken:

$$I = \frac{U - U_i}{R} = \frac{U - v l B}{R}$$

Ennek hatására természetesen csökken a vezetőre ható erő is. Az áramforrás által leadott energia (UI) egyrészt a vezetőben hővé alakuló munkára ($I^2 R$), másrészt a vezető gyorsítására ($U_i I$) fordítódik. Sűrűdásmentes esetben a vezető sebessége az indukcióval fordítottan arányos:

$$v = \frac{U}{lB}$$

- Mindig tartalmaznak keféket és kommutátort (egyenirányítót)



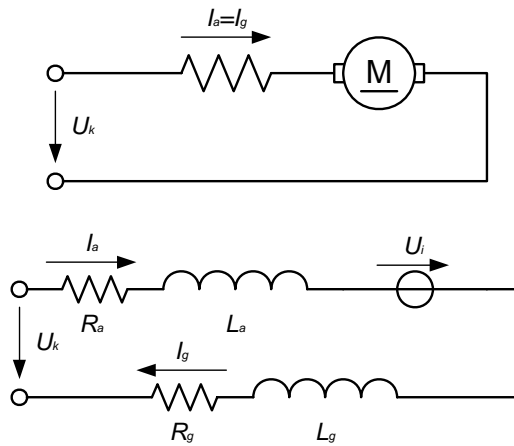
- Merevség (definíció)

$$m = \frac{\Delta M}{\Delta n}$$

- Vezérelhetőség (definíció)

$$v = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}$$

2.2. Soros gerjesztésű egyenáramú motorok



- Motor-egyenletek:
Kvázi-stacioner állapotot ($\omega = \text{konst.}; di/dt = 0$) feltételezve:

$$i_a = i_g = i$$

$$\Phi = C_2 i_g = C_2 i$$

$$U = i(R_a + R_g) + U_i$$

Az indukált feszültség:

$$U_i = C_1 \Phi \omega = C_1 C_2 i \omega$$

A motor nyomatéka:

$$M = C_1 \Phi i_a = C_1 C_2 i^2$$

Ezekből a motor karakterisztikus egyenlete:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{C_1 C_2 M}} - \frac{R_a + R_g}{C_1 C_2}$$

A motor (mechanikai) rövidzárási árama ($\omega=0$) és nyomatéka:

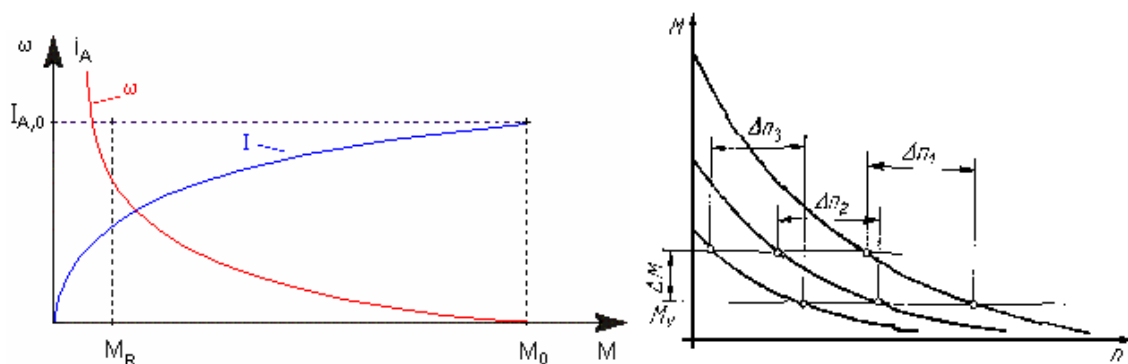
$$i_0 = \frac{U}{R_a + R_g}$$

$$M_0 = C_1 \Phi i_0 = C_1 C_2 i_0^2 = \frac{C_1 C_2 U^2}{(R_a + R_g)^2}$$

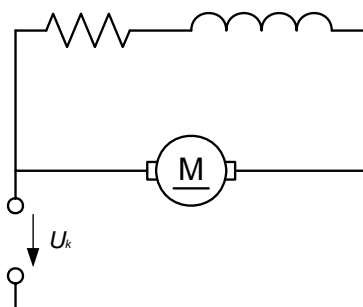
Ezekkel:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{C_1 C_2}} \left(\frac{1}{\sqrt{M}} - \frac{1}{\sqrt{M_0}} \right)$$

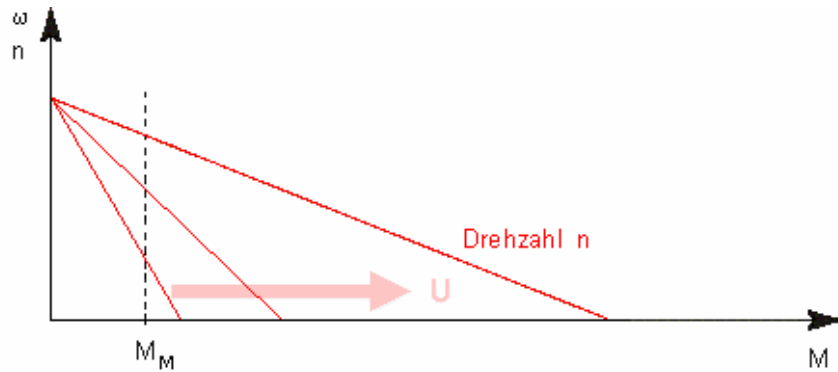
$$i = \sqrt{\frac{M}{C_1 C_2}}$$



2.3. Párhuzamos gerjesztésű (sönt) motorok

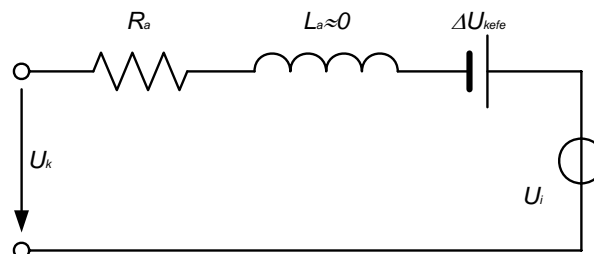
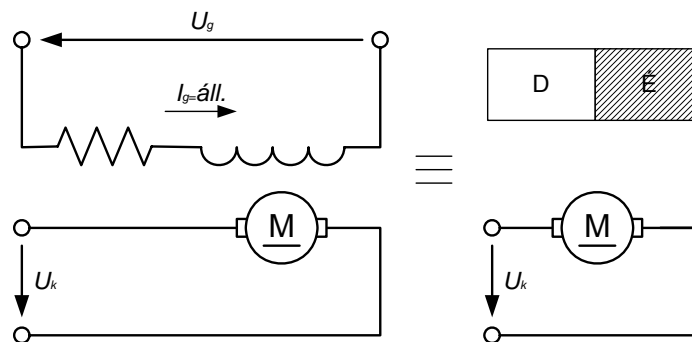


- Fordulatszám-nyomaték jelleggörbéje lineáris
- A kapocsfeszültség változtatásával változik a motor merevsége



- A korszerű, külső gerjesztésű motorok gyakorlatilag teljesen kiszorították ezeket a motorokat.

2.4. Külső gerjesztésű motorok



- A gerjesztés állandó
- Fordulatszám-tartó
- Gerjesztésként állandómágnes is alkalmazható, emiatt nagyobb a hatásfoka.
- A motoregyenletek:

$$M = C_1 \Phi i = k_M i$$

$$U_i = C_1 \Phi \omega = k_M \omega$$

$$U = R_a i + \Delta U_{kefe} + U_i \cong R_a i + U_i$$

$$\omega = \frac{U}{k_M} - \frac{M R_a}{k_M^2}$$

Indítási áram:

$$i_0 = \frac{U}{R_a}$$

Indítási (maximális) nyomaték:

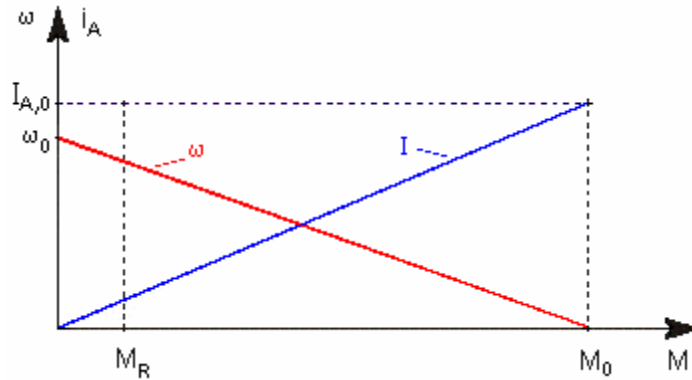
$$M_0 = \frac{k_M U}{R_a}$$

Üresjárási fordulatszám:

$$\omega_0 = \frac{U}{k_M}$$

A fentiekkel:

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{M}{M_0} \right) = \omega_0 \left(1 - \frac{M_T + M_S}{M_0} \right)$$



A motor teljesítményének maximuma:

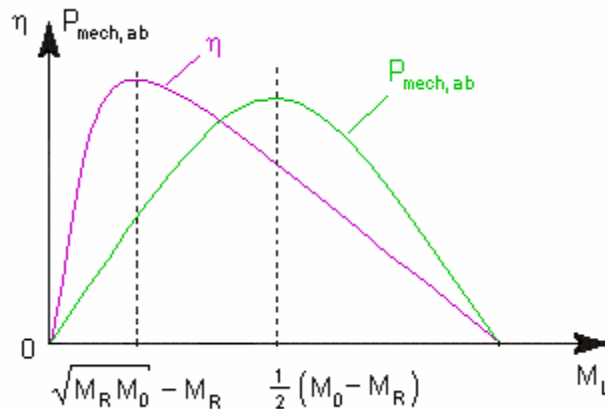
$$P = M\omega = M\omega_0 - \frac{M^2}{M_0}\omega_0$$

$$\frac{\partial P}{\partial M} = \omega_0 - 2\frac{M}{M_0}\omega_0 = 0$$

$$M(P_{\max}) = \frac{M_0}{2}$$

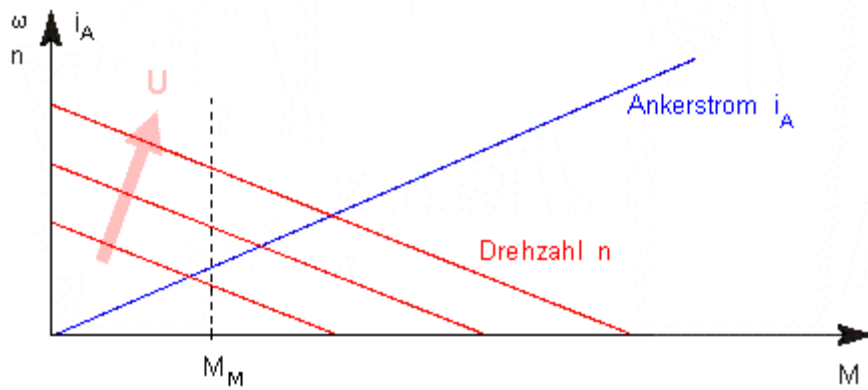
A motor hatásfokának maximuma:

$$M(\eta_{\max}) = \sqrt{M_S M_0} - M_S \cong \sqrt{M_S M_0}$$

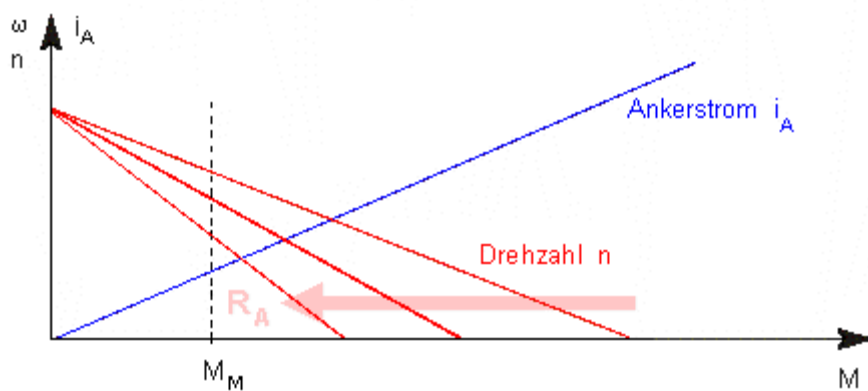


2.4.a. A külső gerjesztésű egyenáramú motor szabályozása

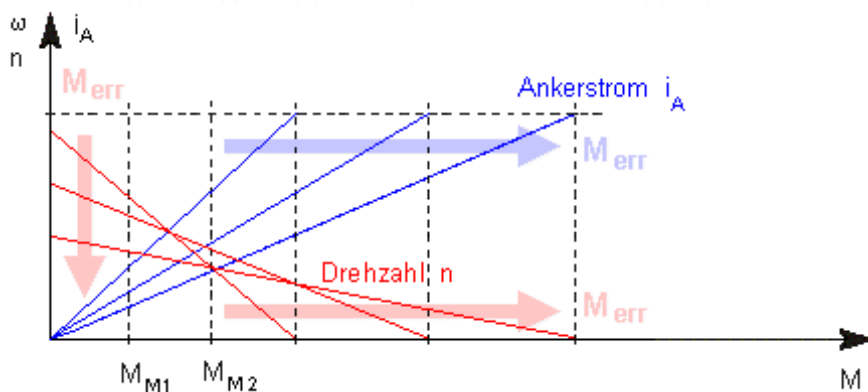
- A kapcsolófeszültség változtatása



- Előtét-ellenállás alkalmazása



- A gerjesztés változtatása



2.5. Univerzális motor

- A párhuzamos és soros gerjesztésű egyenáramú motorok forgásiránya a kapcsolás feszültség irányától független, mert az armatúraáram és a fluxus együtt váltanak előjelet. Felmerülhet a kérdés, hogy váltóáram esetében üzemképes-e a motor. Ennek vizsgálatához legyen az armatúraáram:

$$i_a = \sqrt{2} I_a \cos(\omega t)$$

A gerjesztőáram (ψ az armatúraáram és a gerjesztőáram közti fázistolás szöge):

$$i_g = \sqrt{2} I_g \cos(\omega t - \Psi)$$

Ekkor a nyomaték pillanatértéke:

$$M(t) = 2C_1 C_2 I_a \cos(\omega t) I_g \cos(\omega t - \Psi) = C_1 C_2 I_g I_a [\cos(\Psi) + \cos(2\omega t - \Psi)]$$

A $\cos(2\omega t - \psi)$ tag kétszeres frekvenciájú lüktetőnyomatékot eredményez. Ennek középértéke nulla, így a közepes nyomaték:

$$M = C_1 C_2 I_g I_a \cos(\Psi)$$

Párhuzamos gerjesztésű motor esetében

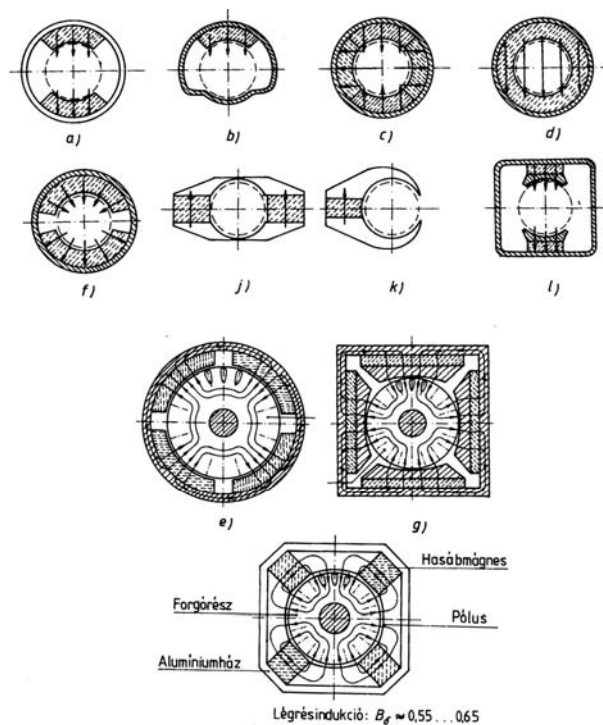
- nagy a gerjesztőköri induktivitás, így a gerjesztőáram közel 90° -kal késik az armatúraáramhoz képest.
- Ebből kifolyólag $\cos \psi \approx 0$, így a nyomaték is megközelítőleg nulla.

Soros motornál

- a gerjesztőáram megegyezik az armatúraárammal,
- így $\psi \approx 0$, $\cos \psi \approx 1$
- A motor nyomatéka közel ugyanakkora, mint egyenáramú táplálás esetében.
- A lemezelte állórészvasmaggal készített kisteljesítményű kétpólusú, egyen- és váltakozó árammal egyaránt működő motorok az ún. univerzális motorok.
- Jellegükből a soros gerjesztésű motorokéhoz hasonló, nagy az indítónyomatékuk, sokféle fordulatszámra készíthetők.
- Jellemző felhasználási területek: kéziszerszámok, háztartási eszközök.

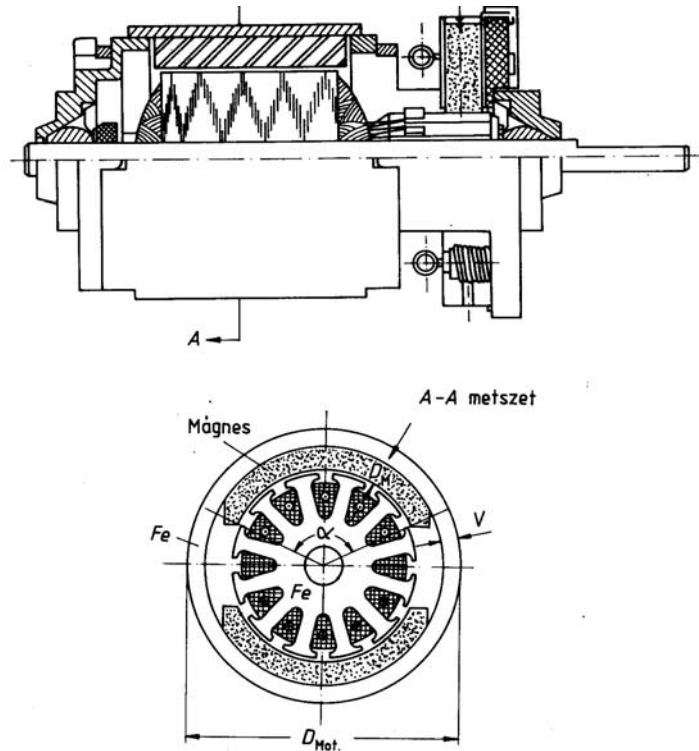
2.6. Egyenáramú szervomotorok konstrukciói

2.6.a. Mágnes-elrendezések



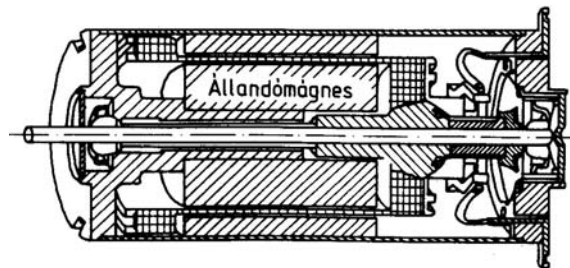
2.6.b. Vasvasos forgórészes konstrukció

- Legkevesebb három pólus, a kommutáció miatt
- Nagy tehetetlenségi nyomaték
- Vasvesztés



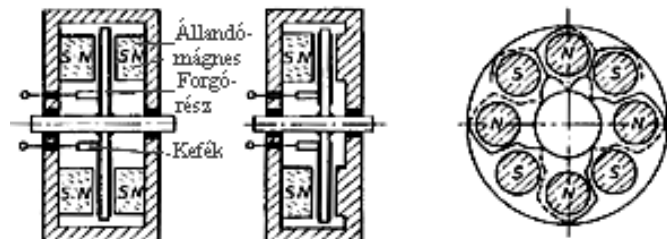
2.6.c. Légréstekerceses konstrukció

- Serleges, általában öntartó forgórész-tekerceselés
- Kis tehetlenségi nyomaték
- Nincs vasvesztés
- Radiális fluxus

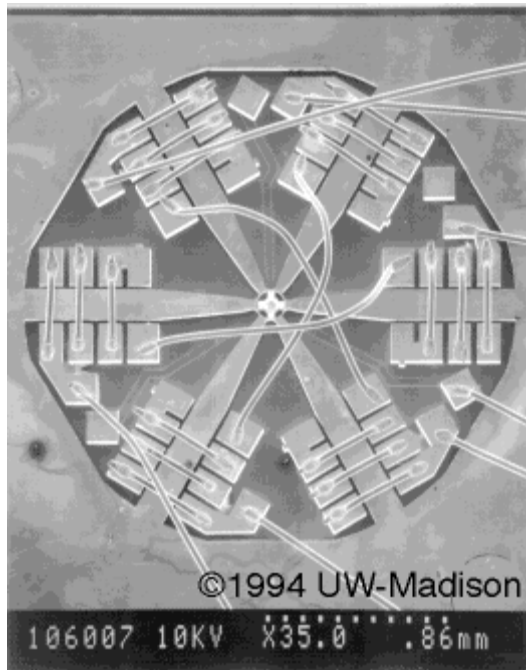


2.6.d. Tárcsaforgórészű konstrukció

- A légréstekerceses konstrukcióéval egyező nyomatékképzés
- Axiális fluxus
- A forgórész-tekerceselés készülhet nyomtatott áramköri technológiával is
- Viszonylag nagy a légrés
- Viszonylag nagy a forgórész tehetlenségi nyomatéka



2.6.e. Elektromágneses mikromotorok



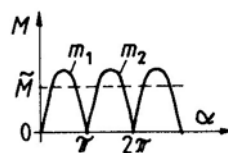
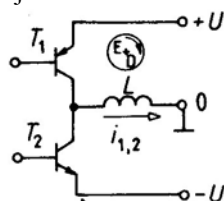
3. Elektronikusan kommutált motorok

- Az egyenáramú motoroknak a mechanikus kommutáció miatt a következő hátrányai vannak:
 - Érintkezési bizonytalanság
 - Korlátozott élettartam
 - Helyigény
 - Járulékos zajok
 - Súrlódási veszteségek
 - A kommutátor mechanikai szilárdsága korlátozott
- A mechanikus kommutáló berendezést elektronikusra cserélve megtarthatóak az egyenáramú gépek kedvező tulajdonságai, a fenti hátrányokat megszüntetve.
- Az elektronikus kommutátorú motorban az állórész és a forgórész szerepe felcserélődik. A forgórész tartalmazza az állandómágnest, az állórész pedig a tekercselést.
- Ahhoz, hogy az állórész tekercseit megfelelően kapcsolni tudjuk, a forgórész szög helyzetét ismerni kell. Ehhez különféle vezérléseket alkalmaznak:
 - Hall generátoros,
 - Optoelektronikai,
 - Csatolótranszformátoros,
 - Indukált feszültséges vezérléseket.

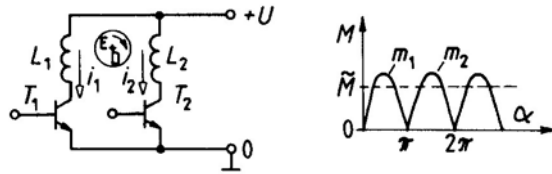
3.1. Az állórész tekercselése

3.1.a. Egyfázisú, kétütemű motorok

- Jó tekercskihasználás
- Egyszerű tekercselés
- Különleges tápegység
- A fordulatszám arányos jel előállítására nehezebb



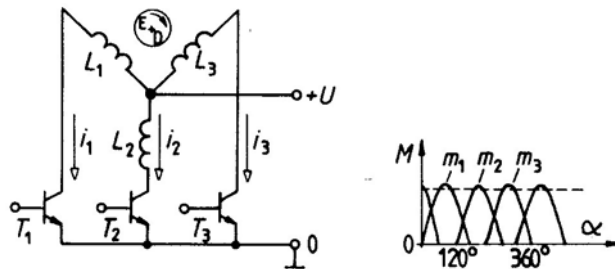
- Készülhet bifiláris tekercseléssel is, ekkor a fordulatszám arányos jelet a kikapcsolt tekercs adhatja.



- Hátrányai
 - Nő a tekercselés költsége
 - Rosszabb a tekercskihasználás
- Az egyfázisú tekercselés előnye:
 - Egyszerű kapcsoló elektronika
- Az egyfázisú tekercselés hátránya:
 - Nulla nyomatékú helyek vannak (ezt egyirányú forgás esetén légrés-aszimmetriával lehet kiküszöbölni)

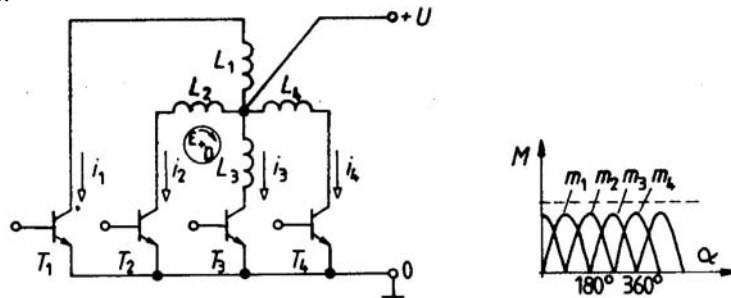
3.1.b. Háromfázisú, háromütemű motorok

- Ahhoz, hogy forgórész minden helyzetében nyomaték keletkezzen, minimum három tekercsre van szükség.
- A tekercskihasználás kedvezőtlen.



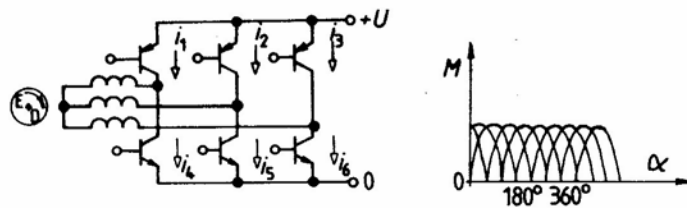
3.1.c. Négyfázisú, négyütemű motorok

- A nagyobb fázisszám miatt kisebb a nyomatéklüktetés és jobb a kihasználás
- Előnye, hogy az éppen nem gerjesztett tekercsekben keletkező indukált feszültség könnyen felhasználható a tekercsek vezérlésére.



3.1.d. Háromfázisú, hatütemű motorok

- A tekercselés klasszikus háromfázisú tekercselés, amelyet híd táplál
- Előnyök:
 - A nyomatéklüktetés minimális
 - A kihasználás a legkedvezőbb
- Hátránya:
 - Az indukált feszültséggel nem lehet a vezérlést megvalósítani
 - A vezérlés bonyolultabb



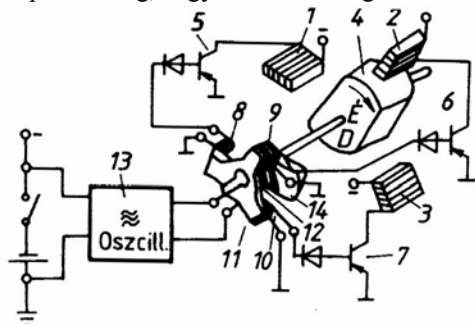
3.2. Az elektronikus kommutáció megvalósítása

3.2.a. A kapcsolóelemek vezérlése

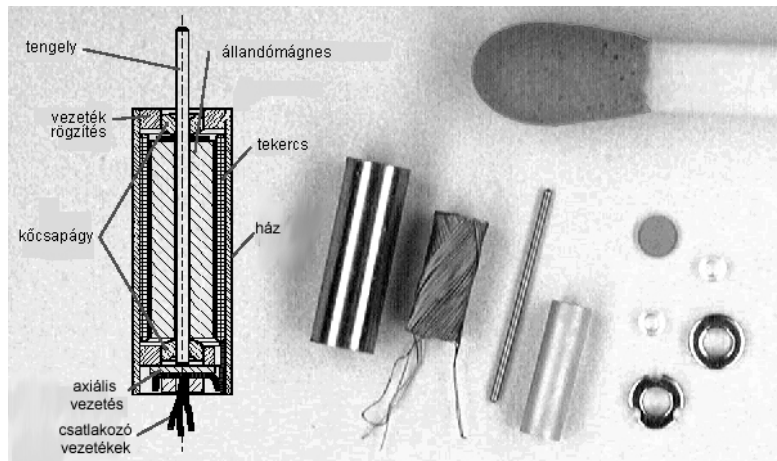
- A vezérlés jósága erősen befolyásolja a motor nyomatékát, kihasználtságát.
- Az érzékelőkkel, kapcsolásokkal szemben támasztott követelmények:
 - Ne tartalmazzon mozgó, csúszó érintkezőt.
 - Minimális helyzetérzékelési bizonytalanság.
 - Érzéketlenség a tápfeszültség- és a hőmérsékletváltozásra.
 - Minimális időállandó.
 - Az érzékelés irányhelyes legyen.
- A forgórész helyzetének érzékelésére a következő elvek alkalmasak:
 - Nagyfrekvenciás csatolású (induktív, kapacitív)
 - Optoelektronikus (IR, látható)
 - Magnetorezisztív
 - Reed-relés
 - Ferrerezonanciás
 - Hall generátoros
 - Érzékelő elem nélkül, használaton kívüli tekercsekben indukált feszültséggel működő vezérlések.
- A kapcsolóelemek vezérlésének kiválasztása függ attól, hogy milyen a hajtás jellege. A szabályozás készülhet állandó fordulatszámra, széles tartományban változtatható fordulatszámra és igen nagy fordulatszámra.

3.2.b. Vezérlés csatolótranszformátorról

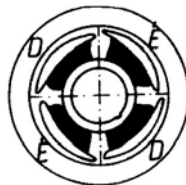
- A klasszikus egyenáramú motor álló- és forgórészének szerepe felcserélődik.
- Az állórész-tekercsek kapcsolását csatolótranszisztorokkal végzik.
- A csatolótranszisztorok kapcsolása vezérlőtekercsekkel (egyenirányítók közbeiktatásával) van megoldva. Ezek a vezérlőtekercsek egy különleges vasmagú transzformátor szekunder tekercsei, amelynek primer tekercsét egy oszcillátor kb. 100 Hz váltakozó feszültségről táplálja. A transzformátor mágneses köre a rotorral együtt forgó szabályozó szegmensekkel záródik.
- Az egymást követő tekercsek bekapcsolását átlapolással végzik, így megvalósítható a motor biztos indulása.
- A motor forgórésze addig gyorsul, amíg az állórész-tekercs bekapcsolt fázisában az indukált feszültség és a telepfeszültség különbsége éppen a feszültségeséssel tart egyensúlyt, amely a forgórész terhelésének hatására folyó áram hatására jön létre.
- A telepfeszültség, vagy a terhelés megváltoztatása esetén a fordulatszám is megváltozik.



5.8. ábra. Háromfázisú csillagpontos kapcsolású motor csatolótranszformátoros vezérléssel
 1, 2, 3 a fázistekercsek; 4 a rotor; 5, 6, 7 a csatolótranszisztorok; 8, 9, 10 a csatolótranszformátor szekunder tekercsei; 11 álló vasmag; 12 primer tekercs (táplálás a 13 oszcillátorral); 14 a rotorral együttforgó fegyverzet

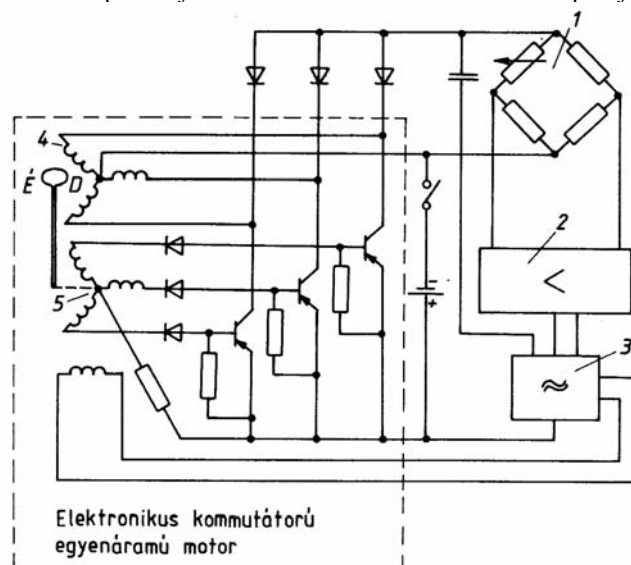


- Az elektronikus kommutáció előnyeinek megtartásával kifejezetten egy célra kifejlesztett (pl. ventilátormotorok) olcsó motorok általában egy forgásirányúak, egyfázisúak. A nulla nyomatékú helyek elkerülését, azaz az indítási nehézségeket mágneses aszimmetriával kerülik el. Ezeknek a motoroknak a működése hasonló reluktancia-motorokéhoz.



3.4. Az elektronikusan kommutált motorok fordulatszám-szabályozása

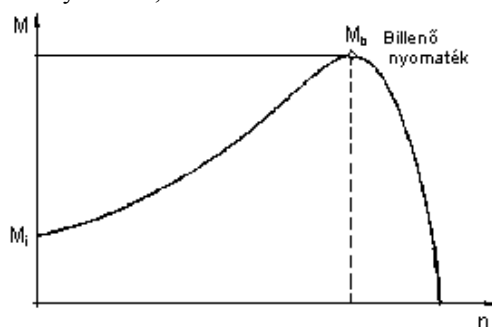
- A fordulatszám-szabályozáshoz, a hagyományos egyenáramú motortól eltérően, nem szükséges tachogenerátor.
- Egy armatúratekercs két egymást követő hálózatra kapcsolása között az indukált feszültség előjelet vált, így ebben az időszakban a forgás által előállított indukált feszültség nagysága egyenirányító segítségével fordulatszám-jeladóként felhasználható (a munkaáram hatása nagy koercitív erejű mágnesek esetében elhanyagolható).
- A fordulatszámmal arányos simított egyenfeszültséget hídra kapcsoljuk. Névleges fordulatszámnál a híd kiegyenlített állapotban van, ettől eltérő fordulatszám esetén a híd feszültség nem lesz nulla. Ezt felerősítve a jel alkalmas egy oszcillátor amplitúdójának és ezzel a tranzisztorok munkapontjának változtatására.



6.4. ábra. Elektronikus kommutátorú, egyenáramú motor visszacsatolt fordulatszám-szabályozással
 1 feszültségfüggő híd; 2 erősítő; 3 oszcillátor (a kimenő jel amplitúdóját a felerősített hibajel vezérli); 4 motor; 5 speciális pozícióadó transzformátor

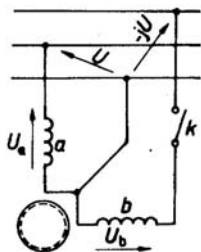
4. Aszinkron motorok

- A háromfázisú aszinkron gépek üzemtana nem képezi szerves részét a tárgynak, itt csak az egy-, illetve kétfázisú motorokról lesz szó. Ez természetesen a háromfázisú gépek ismeretére épül rá.
- Az aszinkron motor az egyik leggyakrabban előforduló motortípus. Ennek oka, hogy a kalickás forgórészű motorok a legegyszerűbb felépítésűek, és így a legolcsóbbak.
- Mint ismeretes, aszinkron gépek esetében nyomatékot forgó mágneses mezővel lehet létrehozni. Egyfázisú táplálás estében azonban lüktetőnyomaték alakul ki, ezért csak külön elemek közbeiktatásával lehetséges egyfázisú motorokat létrehozni. Egyfázisú motorok lehetnek:
 - Segédfázis nélküli,
 - Segédfázisos,
 - Kondenzátoros,
 - Árnycolt pólusú motorok.
- A motorra jellemző a kis indítónyomaték, emiatt számukra az indítás a legkényesebb üzemállapot.



4.1. Segédfázis nélküli, egyfázisú aszinkron motor

- Szimmetrikus táplálású forgó kétfázisú motor egyik fázisát megszakítva, a motor egyfázisú táplálás esetén is forgásban marad és terhelhető.

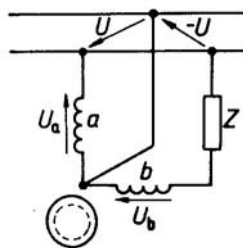


2.4. ábra. Egyfázisú üzem létrehozása (elfutás után a K kapcsolót nyitjuk)

- Önmagától elindulni nem képes, ezért az indításról gondoskodni kell.

4.2. Segédfázisos motor

- Olyan egyfázisú aszinkron motor, amelynek főfázis-tekeréséhez képest térben eltolt helyzetű, párhuzamosan kapcsolt tekeréselése van, és ebben a főfázis gerjesztéséhez képest időben (fázisban) különböző gerjesztést létesítenek.

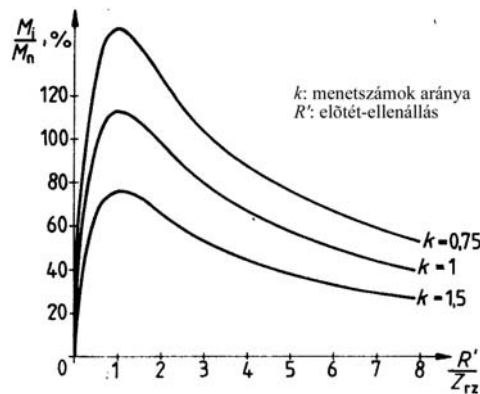


- Feloszthatóak:
 - Tartósan bekapcsolt segédfázisú gépekre, (gyakorlatilag kizárólag az üzemi kondenzátoros motorok)

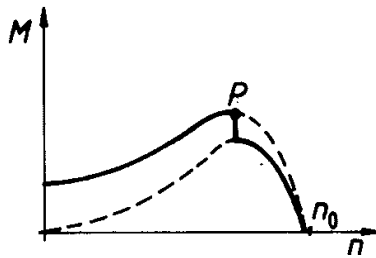
- o Indítás után kikapcsolt segédfázisú gépekre (ellenállásos és indítókapcsolós motorok). Ezeknél amikor a forgórész eléri a szinkron fordulatszám 75..80%-át, az indítókapcsoló (centrifugálkapcsoló, vagy áramrelé) megszakítja a segédfázist.
- A kikapcsolt segédfázisú motorok segédfázis-tekerces térfogata kb. a fele a főfázis térfogatának, rendszere szinuszos, koncentrikus tekerceselés. A kondenzátoros motorok tekerceselésének többsége kétfázisú, osztott, szinuszos koncentrikus tekerceselés, amelynek tekercesfeje a legkisebb és gerjesztési görbéje a lépésrövidítéses koszorútekerceselésnek felel meg.

4.2.a. Indítás ellenállással

- Legegyszerűbb, és a korábban legerjedtebb megoldás.
- A főfázis általában az állórészhornyok 2/3-át foglalja el. Kedvezőbbek az indítási tulajdonságok, ha szinuszos koncentrikus a tekerceselés.
- A segédfázis rezisztanciájának megnövelésével biztosítható, hogy az azonos fázisú táplálás ellenére a fázisáramok különböző fázisúak legyenek. A főfázis rövidzárási áramához képest ugyanis nagy, 50..60° körüli értékű, míg a segédfázisé, az ellenállás hatására lecsökken.
- Sorozatgyártásnál az előtét-ellenállást a költségek csökkentése érdekében kerülik, helyette a segédfázis tekerceseléséhez inkább nagyobb ellenállású anyagot, csökkentett keresztmetszettel alkalmaznak. Ezzel csökken a segédfázis hőkapacitása is, ezt elkerülve, a keresztmetszet kisebb mértékű csökkentése mellett, a kívánt rezisztanciát ellenmenetekkel érik el.

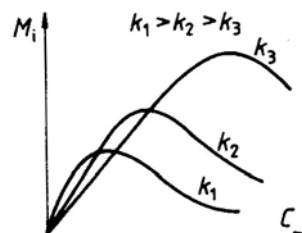


- Az indítás után a segédfázist mindig megszakítják.



4.2.b. Indítás kondenzátoros segédfázissal

- A megbízható, kisméretű kondenzátorok elterjedésével nőtt a jelentőségük.
- Az indítókapcsolós motoroknak jó indítási tulajdonságaik vannak (ha $M_i > 1,6M_n$, indítókapcsolót alkalmaznak), ezen felül gazdaságosak is.

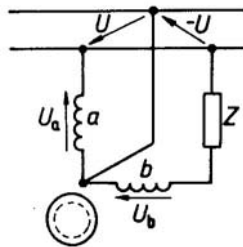


2.22. ábra. $M_i = f(C)$ karakterisztikák különböző k menetszámáttételek esetén

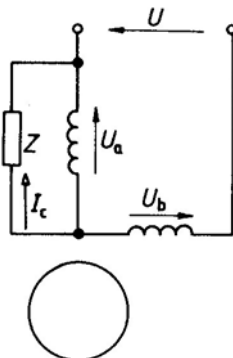
- Az indítókondenzátor több típusa bipoláris elektrolitkondenzátor, amelyeknek az alábbi korlátozásai vannak:
 - o Veszteségük nagy, ha a lekapcsolás késik, felrobbanhatnak.
 - o Egy indítás kb. 3s-ra, az óránkénti indítások száma 20-25-re van korlátozva.
 - o A kondenzátor hőmérsékletének emelkedésével többnyire a kapacitás is nő.
 - o A sorozatban gyártott kapacitások tűrése kb. $\pm 10\%$.

4.3. Üzemi kondenzátoros motorok

- Jó üzemi és elfogadható indítási tulajdonságok. Megfelelő paraméterekkel bármilyen üzemi viszonyokat ki tudnak elégíteni.
- Üzemi kondenzátorral a gép hatásfokát és leadott teljesítményét (azonos aktív térfogat mellett) jelentősen növelni lehet. A hatásfok elérheti a körforgó mezős gép 70..94%-át is, a kapcsolástól függően.
- Legjobban elterjedt kapcsolás kondenzátoros/főfázis tekercestérfogatának aránya 0,5..1,2 között változik. A segédfázis tekercestérfogatának csökkenésével csökken a motor aktív anyagainak kihasználtsága, azonban ez célmotorok esetében háttérbe szorulhat.
- Az üzemi kondenzátor kapacitása a legkedvezőbb üzemi tulajdonságok esetén lényegesen kisebb az indításra használt kondenzátorokénál (kb. 15..20%).
- A kondenzátoros motorok néhány sajátossága:
 - o Üresjárási állapotuk kedvezőtlenebb lehet, mint a névleges terhelésnél.
 - o A kondenzátoros fázis indítási árama alatta, üresjárási árama felette van a névleges terheléshez tartozó áramnak.
 - o Induláskor és üresjáráskor mindig elliptikus mező van.
- Optimális alapkapsolások (elvben lehetséges a szimmetrikus körforgó mező és a 100%-os (90..94%-os) kihasználás):
 - o Kétfázisú párhuzamos kapcsolás

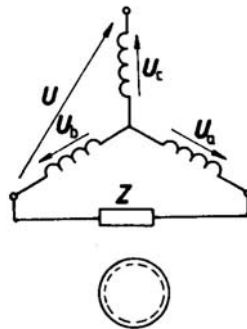


- Egyik leggyakoribb kapcsolás.
- A forgómező feltételei csak egy fordulatszámnál lehetséges, egyébként elliptikus.
- o Kétfázisú soros kapcsolás
 - Akkor célszerű alkalmazni, ha a hornyonkénti vezetősámozatot csökkenteni akarják
 - Nem elterjedt kapcsolás.



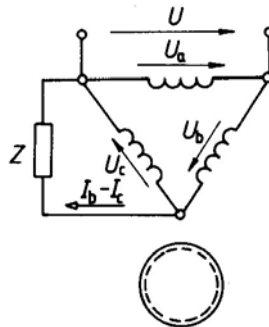
- o Csillagkapcsolás
 - Háromfázisú sztatortekercselés. Ekkor jobb a tekercselési tényező, kisebb a kondenzátorfeszültség, és kisebb a hornyonkénti vezetősámozat.
 - A kondenzátor kapacitása:

$$C = \frac{2P_n}{\sqrt{3}U^2\eta\omega_0}$$



o Deltakapcsolás

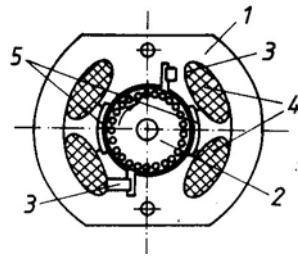
- 500W-nál nagyobb teljesítmények esetén alkalmazzák.
- A csillag- és deltakapcsolások között nincs elvi különbség, az egyes fázistekercseket kell kisebb, ill. nagyobb feszültségűre készíteni.
- A kapcsolások hibája, hogy csak $\cos\varphi=0,5$ fázisszögnél jön létre a körforgó mező.



- A motor segédfázisának és kondenzátorának paramétereit az üzemi jellemzők határozzák meg. Mivel a cél, hogy a névleges terhelésnél körforgó mező keletkezzen, a kapacitív reaktancia nagy, ezért a kondenzátoros fázis árama a névleges terheléshez tartozó segédfázis-áram 60..70%-a. A kondenzátort nem tartalmazó fázis árama indításkor a névleges terheléshez tartozó áramoknak 2.5-szöröse. Így indításkor mindig aszimmetrikus áramrendszerrel, ill. elliptikus mezővel kell számolni. Az üzemi kondenzátoros motorok indítónyomatéka ezért kicsi. Az indítónyomatékot legegyszerűbben a segédfázis áramával lehet növelni. Ennek két megoldása lehetséges:
 - o A kondenzátoros fázis szórési reaktanciájának növelésével.
 - o Az indítás idejére a kondenzátoros fázist pozisztorral söntölik.
- A megfelelő kapcsolás megválasztása:
 - o $P_n < 20W$ tengelyteljesítménynél az előtétellenállás költségei jelentéktelenek, a körforgó mező létrehozása egyszerűbb.
 - o $P_n < 50W$ tengelyteljesítménynél célszerű a háromfázisú csillagkapcsolás. Ezzel csökken a hornyonkénti vezetős szám, nő a kondenzátor kapacitása és teljesítménye. A soros kétfázisú kapcsolás is előnyös lenne, azonban kisfeszültségű motorkondenzátorokat ritkán gyártanak, ezért nem gazdaságos.
 - o $P_n > 100W$ tengelyteljesítménynél a kétfázisú párhuzamos kapcsolás az előnyösebb. A körforgó mező feltételeinek biztosítása egyszerűbb, és kb. 16%-kal kisebb kondenzátorteljesítménnyel megvalósítható.

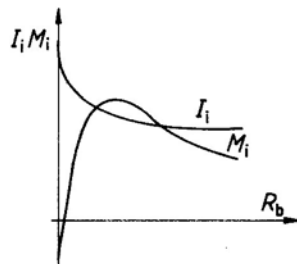
4.4. Árnyékolt (hasított) pólusú aszinkron motorok

- 5 W-nál kisebb teljesítmények esetében széles körben elterjedt.

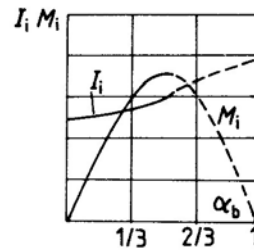


2.50. ábra. Árnycolt pólusú motor
 1 szátórvastest; 2 kalickás rotor; 3 árnyékolómenet; 4 gerjesztőtekercsek; 5 árnyékolólemezek

- A gerjesztőtekercset a hálózatra kapcsolva kialakul egy fluxus. Ez a pólusokon két részre oszlik. A fluxus azon része, amelyik az árnyékoló menetekkel is kapcsolódik, az árnyékoló menetekben indukált feszültség hatására folyó áram miatt, fázisban késni fog az árnyékolatlan pólusívén áthaladó fluxushoz képest. Így különböző fázisú, térben is eltolt helyzetű fluxus alakul ki a gépben, amelyek közelítőleg elliptikus forgómezőt hoznak létre.
- Az árnyékolott pólusú gép indítónyomatéka függ az árnyékoló-menet rezisztanciájától és az árnyékolott pólusív nagyságától.

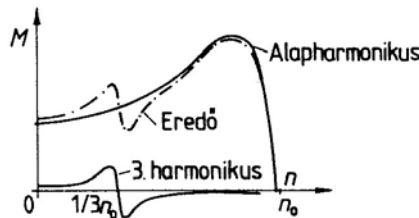


2.55. ábra. M_i és I_i függése az árnyékolómenet rezisztanciájától

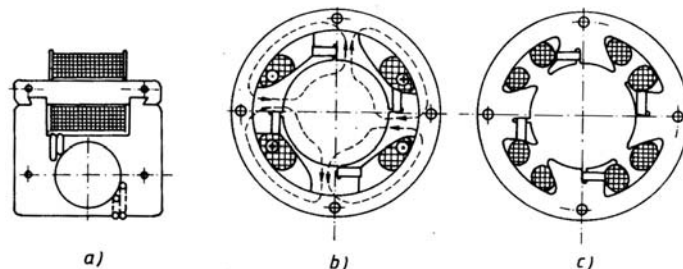


2.56. ábra. M_i és I_i függése az árnyékolott pólusív nagyságától

- Az árnyékolott pólusú motorok indítási viszonyainak javítása céljából a kalickás forgórész rendszerint nagy (egy horonyosztásnál nagyobb) horonyferdítéssel készítik.
- Mivel az árnyékolott pólusú motorok kiálló pólusúak, a gerjesztés eloszlása a légrésben nem szinuszos. Ezért páratlan rendszámú felharmonikusok lépnek fel, amelyek a többletvesztéseken kívül járulékos nyomatékokat is kifejtenek. Jelentősebb befolyása a harmadik harmonikus nyomatékának van. Ez az alapharmonikus szinkron fordulatszámának egyharmadánál nyeret idéz elő a nyomatéki jelleggörbén.



4.4.a. Az árnyékolott pólusú motorok konstrukciós kialakításai

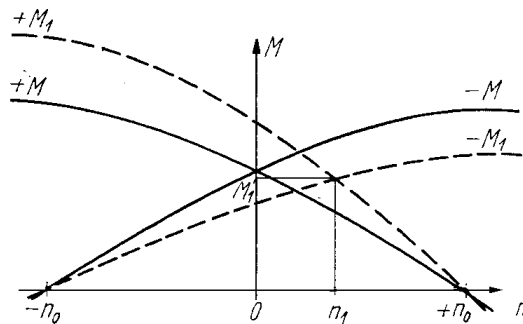


- Az *a)* ábrán látható kétpólusú szerkezetet a legkisebb teljesítményű motoroknál alkalmazzák. A megoldás egyszerű és olcsó.
- A *b)* ábrán egy négypólusú kivitel látható, amelynek két gerjesztőtekercse van. A tekercsüket a motortól függetlenül lehet elkészíteni. Az ábrán látható, hogy a két gerjesztőtekercs ellenére is négypólusú mágneses tér alakul ki. Hasonló konstrukció létezik kétpólusú kivitelben is.

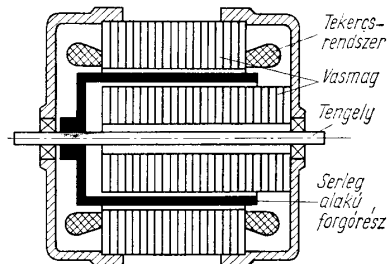
- A c) ábrán a közepes teljesítményű motorok szokásos kivitele látható. A tekercselést bepergetéssel kell elkészíteni.

4.5. Aszinkron szervomotorok

- Legjelentősebb képviselői az úgynevezett serleges motorok, de lehetnek kalickás forgórészűek is.
- Felépítésüket tekintve hasonlóak a segédfázisos motorokhoz, négyfázisú (kétfázisú) aszinkron motorok. Két tekercsrendszerük van, a gerjesztőtekercs és a vezérlőtekercs. Gerjesztése állandó amplitúdójú szinuszos, vezérlése a gerjesztőfeszültséghez képest $\pm 90^\circ$ -kal eltolt fázisú, változó amplitúdójú feszültséggel lehetséges.
- A forgórészt olyan nagy ellenállásra készítik, hogy a billenőnyomaték a negatív fordulatszámok tartományába, ($s > 2$) essen.
- A nagy forgórész-ellenállás miatt a hatásfokuk rossz.
- A vezérlőfeszültség fázisa a forgásirányt, amplitúdója pedig a fordulatszámot határozza meg.
- A motortípus nyomaték – fordulatszám jelleggörbéjén a folytonos görbék arra az esetre vonatkoznak, amikor a gerjesztőfeszültség értéke zérus. Ekkor ugyanis a motor két egymással szembe fordító mágneses mezőnek tekinthető, amelynek eredője zérus. A vezérlőfeszültség megjelentével a görbék eltorzulnak, az ábrán szaggatott vonallal jelölt görbékre, és a motor a jelölt nyomatékkal és fordulattal forgásba jön.



- Lényeges tulajdonsága a motornak, hogy álló helyzetben is van nyomatékuk, így külső terhelés hatására fékező hatást gyakorolnak. Ennek a nyomatéknak és a serleges kialakításnak köszönhetően meglehetősen széles körben alkalmazzák szabályozási körökben.



- Előnyeik:
 - o A fordulatszám széles körben változtatható
 - o Gyors indítás, fékezés

5. Léptetőmotorok

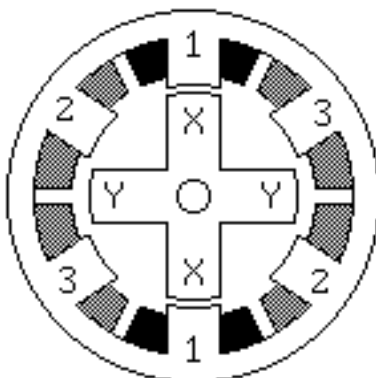
- Szakaszosan érkező jelekkel táplálva meghatározott nagyságú szögelfordulásokat – amelyek nem folytonosak – tesznek.
- Jellemzően az összes tekercselés a motor állórészén helyezkedik el és a rotor, konstrukciótól függően, állandó mágnes, vagy valamilyen mágnesesen lágy anyag.
- A mozgáshoz szükséges összes kommutációt a motor vezérlésének kell megoldania, ami nem szerves része a motornak. A motorokat és a vezérlő elektronikákat úgy tervezik, hogy képesek legyenek mindkét irányba forogni, illetve a motort képesek legyenek egy fix helyzetben tartani.
- A modern léptetőmotorok legtöbbje képes audio-frekvenciás tartományban lépni, ami meglehetősen gyors mozgatót tesz lehetővé.
- A léptetőmotoros hajtások alkalmasak a nyílt körű szabályozásokra, de sokszor, a sebesség növelése érdekében visszacsatolásos szabályozást alkalmaznak. Ezek a visszacsatolásos szabályozások általában mikroprocesszorral működnek. A mikroprocesszoros visszacsatolású léptetőmotorokat a szakirodalom gyakran elektronikus kommutátorú gépeknek tekinti.

5.1. A léptetőmotorok típusai

- A forgó mozgást végző léptetőmotoroknak három fő típusa ismert:
 - a változó reluktancia,
 - az állandómágneses és
 - a hibrid motor.

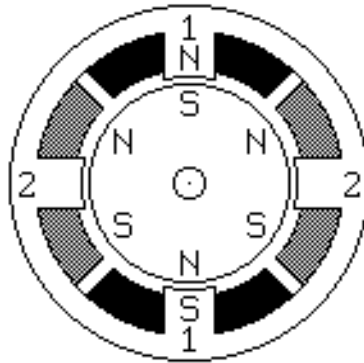
Léteznek más, nem elektrodinamikus elven működő motorok is (mint például a kilincskerekes léptetőmotor), de ezek mára már elavultnak tekinthetők..

5.1.a. A változó reluktancia motorok



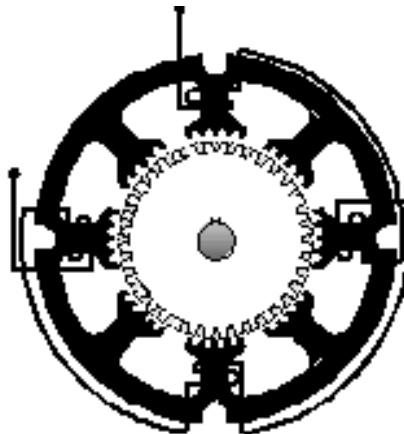
- Forgórésze fogazott, mágnesesen lágy anyag.
- Az állórész és a forgórész fogszáma különböző,
- Az állórész gerjesztésekor a mágneses erővonalak energiaminimumra törekszenek, amit a mágneses ellenállás minimumánál érnek el, tehát a forgórész fogát a legközelebbi helyzetbe húzza. A minimumra való törekvéskor fellépő nyomatékot nevezik reluktancia-nyomatéknak, innen ered a típus elnevezése.
- Mivel a rotor nem állandó mágnes, a motornak nincs tartónyomatéka a tekercsek gerjesztetlen állapotában.
- A változó reluktancia motorok nyomaték, tehetetlenségi nyomaték aránya jó, viszont a méret és a nyomaték aránya rossz, ezért ritkán alkalmazzák ipari környezetben.
- A fogak számának növelése érdekében a forgórészt több fogazott elemből építik fel, amelyek egymáshoz képest el vannak forgatva, illetve az állórészen többfázisú tekercselést hoznak létre.

5.1.b. Állandómágneses léptetőmotorok



- Forgórésze radiálisan mágne-sezett permanens mágnesből készül, állórésze pedig hasonló a változó reluktancia motoréhoz.
- Az állandómágnes miatt a tekercsek gerjesztetlen állapotában is van tartó nyomaték.
- A tekercsek gerjesztésekor a kialakult mágneskör energiaminimumra törekszik, amit a legrövidebb mágneses erővonalakkal ér el, ezért a tekercs a polaritásával ellentétes fogat vonzani fogja, létrehozva így a rotor elfordulását.
- Az állandómágneses léptetőmotorok előnye a változó reluktancia motorokhoz képest a nagyobb statikus nyomaték, hátránya viszont az alacsonyabb határfrekvencia (ennek oka az állandómágnes fluxusának csillapításában rejlik).
- További hátrány lehet, hogy a villamos gerjesztés az állandómágnes lemágneseződését okozza, így a lépések alatt a mágnesek munkapontja jelentősen változik.

5.1.c. Hibrid léptetőmotorok

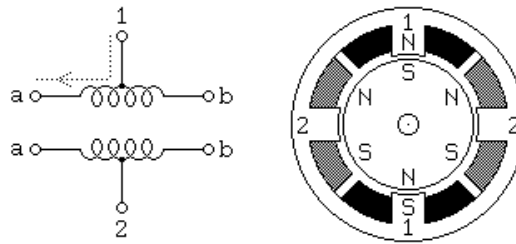


- A hibrid léptetőmotorok a legelterjedtebb típusú léptetőmotorok. Elterjedésüket kedvező paramétereik indokolják.
- A hibrid motorok ötvözik a változó reluktancia és az állandómágneses motorok előnyeit.
- Az állórész is és a forgórész is fogazott (az állórész fogainak száma meg is egyezhet, de különbözhet is a forgórész fogainak számával), mint a változó reluktancia motornál, azzal a különbséggel, hogy a forgórész állandómágnest tartalmaz.
- Egyesíteni tudja a változó reluktancia motorok nagy működési sebességét és kis lépésszögét az állandómágneses motorok nagyobb nyomatékával.

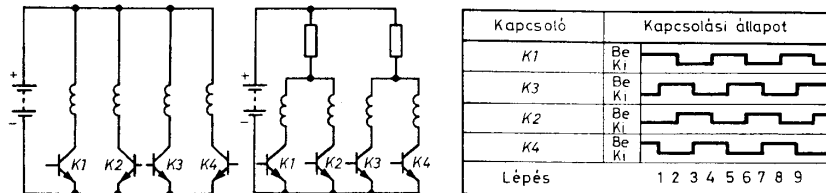
5.2. A léptetőmotorok vezérlése

- A léptetőmotorokat vezérlési szempontból két csoportra lehet osztani:
 - unipoláris és
 - bipoláris vezérlésűekre.

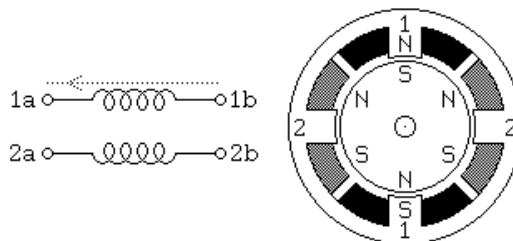
5.2.a. Unipoláris vezérlésű léptetőmotorok



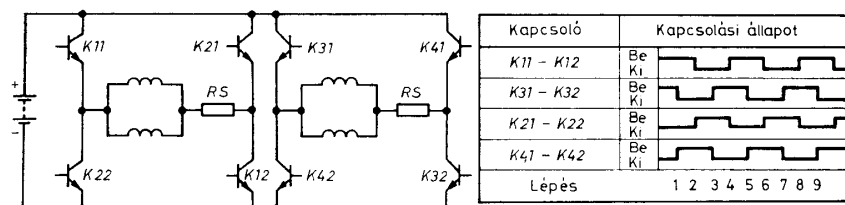
- mindkét tekercsen középleágazással vannak huzalozva.
- A tekercsek középleágazásai jellemzően a pozitív tápfeszültségre vannak kötve, és a tekercsek kivezetései vannak felváltva földre kapcsolva.
- A motorok állórészén lévő tekercsek megosztottak az egymással szemben álló pólusok között (jelen esetben az 1-es tekercs meg van osztva az alsó és a felső, a 2-es tekercs pedig a jobb és a bal pólus között).
- Az unipoláris vezérlés előnye, hogy a vezérlő áramkörnek összesen két tranzisztort kell tartalmaznia fázisonként.
- Hátránya viszont, hogy a beépített rézmennyiségnek csak a fele vesz részt a mágneses tér létrehozásában, ezért a teljesítménye kissé csökken.
- A léptetés sebessége növelhető a $T=L/R$ időállandó csökkentésével.



5.2.b. Bipoláris vezérlésű léptetőmotorok



- Tekercselésük egyszerűbb, minden motorfázis csak egy tekercselést tartalmaz, nem található rajtuk középleágazás.
- Így a motor egy-szerűbbé válik, viszont a motor vezérlőáram-köre lesz némileg bonyolultabb, mivel rá hárul a mágneses polaritások fordításának feladata.
- A bipoláris vezérlés létrehozásához motorfázisonként négy tranzisztorra van szükség, viszont a teljes beépített rézmennyiség részt vesz a mágneses tér felépítésében, ezért hatásfokuk nagyobb az unipoláris motorokénál.



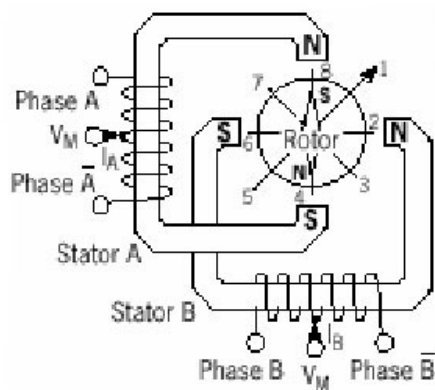
A léptetőmotorokat általában nyolc, vagy hat kivezetéssel lehet beszerezni. Ennek oka az, hogy a gyártás során nem tesznek különbséget az unipoláris és bipoláris motorok között, a vezérlési módok között a felhasználó tud választani.

5.3. Üzem módok

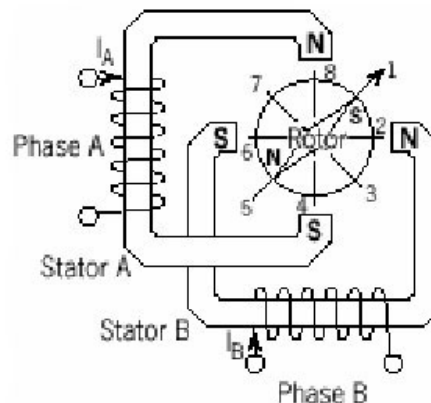
- Hullámhajtás
- Egészlépéses üzemmód
- Féllépéses üzemmód
- Mikrolépéses üzemmód

<p>5.4. Hullámhajtás</p> <p>- Egyszerre csak egy tekercs gerjesztett</p> <p>- A vezérlési szekvencia:</p> $A \rightarrow B \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{B}$ <p>ennek hatására a rotor a</p> $8 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 6$ <p>pozíciókba lép.</p> <p>- Hátránya a rossz tekercskihasználás (unipoláris motor esetében 25%, bipoláris motor esetében 50%), ezért kicsi a leadott teljesítmény</p>	<p>5.5. Egészlépéses üzemmód</p> <p>- Egyszerre két tekercs gerjesztett</p> <p>- A vezérlési szekvencia:</p> $AB \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow \bar{A}B \rightarrow A\bar{B}$ <p>ennek hatására a rotor a</p> $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 7$ <p>pozíciókba lép.</p> <p>- Az egészlépéses üzemmód ugyanazt a szögelfordulást hozza létre, mint a hullámhajtás, de közel kétszer akkora teljesítménnyel.</p>
<p>5.6. Féllépéses üzemmód</p> <p>- Az egészlépéses üzemmód és a hullámhajtás kombinációja. Az elérhető lépésszög a fenti két hajtással elérhetőnek a fele.</p> <p>- A vezérlési szekvencia:</p> $AB \rightarrow B \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow \bar{B} \rightarrow \bar{A}B \rightarrow A$ <p>ennek hatására a motor a</p> $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8$ <p>pozíciókba lép.</p> <p>- A féllépéses üzemmód alkalmazásával a motor dinamikai tulajdonságai is javulnak.</p>	<p>5.7. Mikrolépéses üzemmód</p> <p>- A mikrolépéses üzemmódban a lépéseket még jobban aláosztjuk.</p> <p>- Ez a vezérlő áram erősségének változtatásával érhető el.</p>

Unipoláris vezérlés

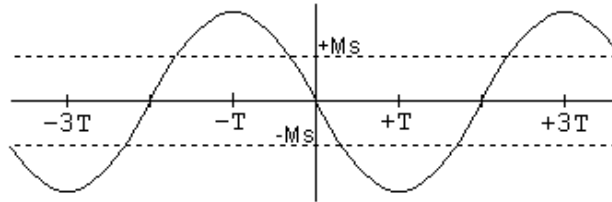


Bipoláris vezérlés

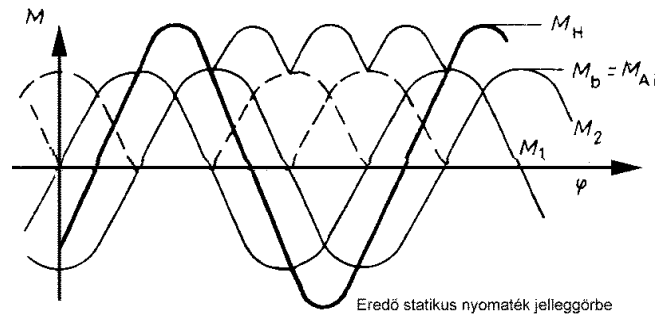


5.8. A léptetőmotorok statikus jellemzői

- A léptetőmotorok egyik leglényegesebb jellemzője a statikus jelleggörbéje. Ez a jelleggörbe általában szinuszos jellegű, de főleg a változó reluktancia motoroknál ettől meglehetősen eltérhet (nem ritka a fűrészfog jelleg sem). A görbe alakja függ az állórészen és a forgórészen kialakított pólusok geometriájától.



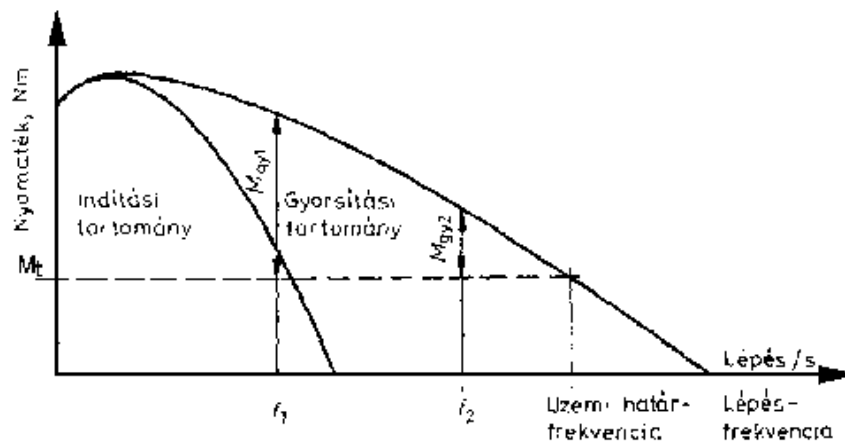
- A statikus jelleggörbéből meg lehet határozni a súrlódás hatását a beállási pontosságra.
- Ha két tekercs egyszerre van gerjesztve, akkor a nyomaték lépésszög görbe az egyes tekercsek hatására kialakult jelleggörbéknek az összege. Ennek következménye, permanens mágneses motor esetében, hogy a jelleggörbe csúcsa a lépésszög felével elmozdul, a csúcs értéke pedig $\sqrt{2}$ -szöröse lesz az egy tekercs esetében kialakult csúcserőértéknek. Ez az alapja a féllépéses üzemmódnak.



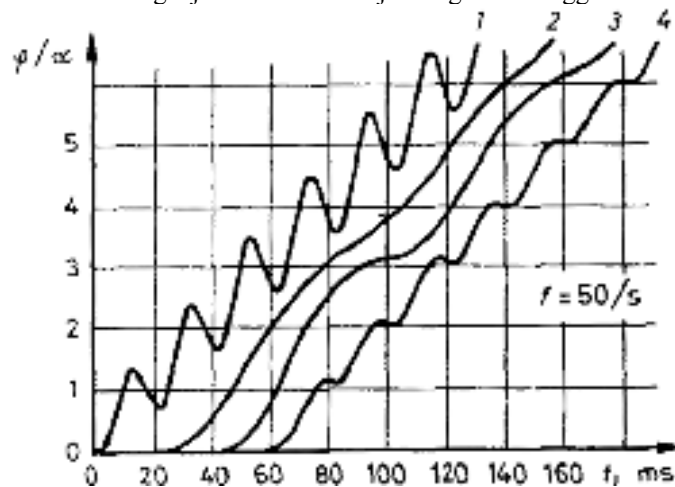
- Még kisebbeket lépni egy adott motorral az úgynevezett mikrolépéses üzemmódban lehet, amikor a két tekercsen átfolyó áram erősségét is változtatjuk.

5.9. A léptetőmotorok dinamikai viselkedése

- A motor tengelyéről maximálisan levehető nyomaték a motor tartónyomatéka. Ekkora nyomatékkal azonban nem lehet léptetés közben terhelni a motort.



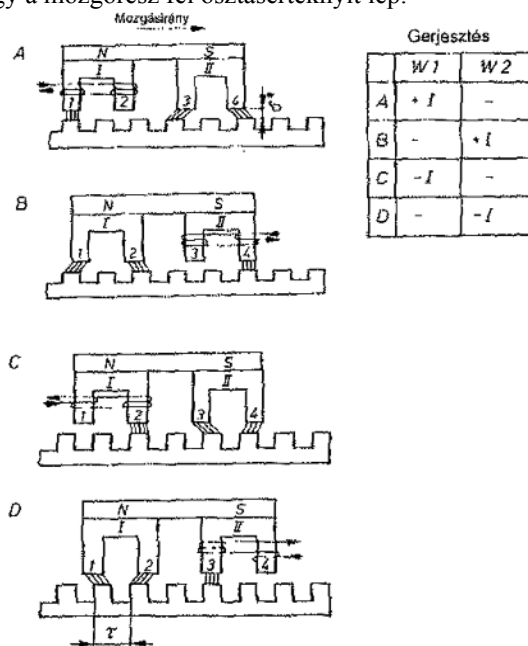
- Kis lépési frekvenciákon a motor nyomatékát az is csökkenti, hogy a forgatott tehetlenségekben tárolt energia nem elegendő a nyomatéki görbe mélypontján való átjutáshoz. (Ötfázisú motornál a nyomatékgörbe hullámossága jóval kisebb, ezért ott nem alakul ki ez a maximum.)
- A felső frekvenciatartományban kialakuló nyomaték csökkenése az áramváltás nem pillanatszerű változása (a vezérlőáramkör és a tekercselés időállandói miatt) és a forgórész által indukált feszültség együttes hatására következik be.
- Ha adott nyomaték mellett a motort nagyobb frekvenciával indítjuk, mint a hozzá tartozó határfrekvencia, akkor a motor lépést téveszt és leáll.
- A léptetőmotorok nyomaték – lépésfrekvencia diagramja két részből áll. Az első tartomány, amelyik az alacsonyabb frekvenciákhoz tartozik, az úgynevezett start – stop üzemmód tartománya.
- A második tartományban a léptetőmotort csak fokozatosan gyorsítva, majd a leállítás előtt lassítva lehet lépéstévesztés nélkül vezérelni.
- A léptetőmotorok dinamikai viselkedésében egy másik problémát a lépésekkor bekövetkező lengések jelentik. Ezek a lengések nemcsak a léptetőmotor tulajdonságaitól, hanem motort meghajtó áramkör tulajdonságaitól és a motorral meghajtott rendszer tulajdonságaitól is függenek.



6. Lineáris motorok

6.1. Lineáris hibrid léptetőmotorok

- A léptetőmotor mozgórésze egy állandómágnestől és két elektromágnestől áll.
- Gerjesztetlen állapotban a permanens mágneskör az elektromágnesek szárain, a légrésen és az állórészek szárain záródik.
- Az elektromágnes két résztekercse úgy van bekötve, hogy gerjesztéskor az állandómágnes fluxusát az egyik póluson erősítse, a másikon kompenzálja. Tangenciális mágneses erő csak a gerjesztett pólusnál ébred és így a mozgórész fél osztásértéknyit lép.

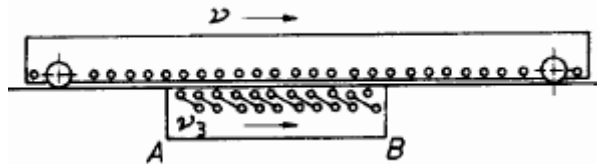


- Ezeknél a léptetőmotoroknál a teljesítményt a légrés nagysága befolyásolja a legjobban. A motor billentőereje annál nagyobb, minél kisebb légrést tudunk létrehozni. A legjobb eredmény légsapágyazáskor adódik, ekkor a légrés körülbelül 15-20 μm körüli nagyságú. A légsapágy további előnye, hogy gyakorlatilag nem lép fel súrlódás, illetve kopás.

6.2. Lineáris aszinkron motorok

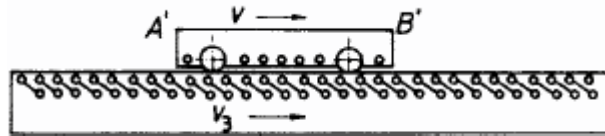
- Egyenes vonalú mozgás létrehozásához olyan mechanizmusokat kell használni, amelyek a forgómozgást átalakítják. Ezek a teljesítmény egy részét felemésztik, bonyolulttá teszik a gépet, és csökkentik a megbízhatóságot.
- Képzeljük el a tekercselést úgy, mintha a henger alakú motort valamelyik sugár síkjában metszenénk fel és terítenénk ki. Ha a síkba terítést mind a státoron, mind a rotoron elvégezzük, lineáris motorhoz jutunk. Ennek a motornak a működési elve azonos a forgó motoréval, azonban számos eltérő tulajdonsággal rendelkezik:
 - a motor primer része a mozgás irányában véges hosszúságú, ennek az a következménye, hogy a szekunder rész a primer részben történő be- és kilépéskor hosszirányú véghatás keletkezik. Ennek megnyilvánulása belépéskor, hogy a szekunder rész árama késve alakul ki, kilépéskor, hogy késve szűnik meg. Így a hasznos hossz lecsökken és jelentős járulékos veszteség keletkezik. A véghatás miatt a haladó mező mellett mindig keletkezik pulzáló mező is.
 - a gép légrése igen nagy, emiatt a légrésindukció lényegesen kisebb és csak háromdimenziós vizsgálatokkal számítható pontosan.
 - a primer és szekunder rész egyaránt véges szélességű – a szekunder rész tömör anyagból készült – tehát a szekunder áramok nemcsak a mozgás irányára merőlegesen, hanem a mozgás irányában is folynak, keresztirányú véghatást okozva.

- A lineáris motorok szekunder része lehet:
 - a. Lemezelt vasmagú, kalickás
 - b. Tömör ferromágneses anyagú
 - c. Alumínium vagy vörösréz sín
- Üzemelési problémáik:
 - a. Nagy légrés miatt rossz a hatásfokuk.
 - b. Melegedési problémák miatt az indítás lehetőleg gyors legyen. Az állórészt általában hűtőbordákkal látják el.
- Alkalmazásukat tekintve két osztályba sorolhatók:
 - a. Rövid primer részű motorok



- A hagyományos aszinkron motorhoz képest nagyobb veszteség jellemzi. Ennek okai:
 - A szekunder minden része tranzienst állapotban van
 - Ellenfutó komponensek hatására még szinkron fordulatszámon is van szekunder veszteség.
 - A vég hatás miatt a szekunder részen a gép hatásos részén kívül is keletkezik veszteség.
- A szekunder tekercsvesztést közvetlenül a primer rész szolgáltatja, míg a kilépő vég tekercsvesztéseinek legnagyobb részét a szekunder részre ható ellenérő adja. Ez a hatás arra vezet, hogy az asszimmetrikus táplálású aszinkron motorhoz hasonlóan a lineáris motor mozgó része a szinkron sebességet üresjáratban, elvben pedig sohasem érheti el.

b. Rövid szekunder részű motorok



- Erősen veszteséges, eltérően a rövid primer részű motoroktól, amelyeknek a teljes státor-rész hasznos teljesítményt ad. Hosszú primer részt kell gerjeszteni, hogy a szekunder részt, amely hosszának csak tört részét foglalja el, előre hajtja.
- A szakirodalomban újabban a nagy sebességű (400 km/h feletti) vontatáshoz rövid szekunder részű lineáris szinkron motort ajánlanak. A pálya ilyenkor szabályozóegységekkel egybeépített primer részek láncolata, amelyeket a fölé érő szekunder rész kapcsol be és ki. Alapvető előnye az áramszedők elmaradása.
- A rövid szekunder részű gépeket két csoportra bonthatjuk:
 - Olyan gépekre, amelyeknek *szekunder része hosszabb*, mint a primer rész pólusosztása. Ez esetben kicsi a különbség a rövid szekunder részű gép és a szokásos gépek között. Az ilyen gépek üzeme az asszimmetrikus forgórészű aszinkron motorok üzeméhez hasonlóan vizsgálható, és a szekunder rész asszimmetriája miatt ellenfutó gerjesztés is lesz.
 - Olyan gépekre, amelyeknek *szekunder része rövidebb*, mint a primer rész pólusosztása. E gépek szekunder részének primerre redukált hatásos ellenállása egyre nagyobb mértékben növekszik. Bár ez a hatás nagyon bonyolult, a motor viselkedését jórészt azzal lehet megközelíteni, hogy a forgórésznek nagyobb ellenállást tulajdonítunk, és ezután a szokásos elméletet lehet alkalmazni.
- A lineáris aszinkron motorok alkalmazása
 - Rövid primer részű kivételben
 - ajtómozgatók, féklázító motorjaiként.
 - daruk, hajógyárakban vontatótargoncák hajtómotorjaiként,
 - szállítóberendezések hajtásaiként, beleértve a folyékony fém továbbítást is,

- huzal- vagy szalaghúzó, ill. –feszítő motorként,
- felvonók hajtásánál,
- szegmens sztátoros kivitelben kiegyensúlyozó gépek háztartási és ipari forgódobos mosógépek hajtására,
- vontatási célra, egysínű vagy nyeregvasút kivitelben,
- lineáris léptető motorként.
- Rövid szekunder részű kivitelben
 - vetelő hajtásokra,
 - speciális esetekben fékezési és felgyorsítási célra.

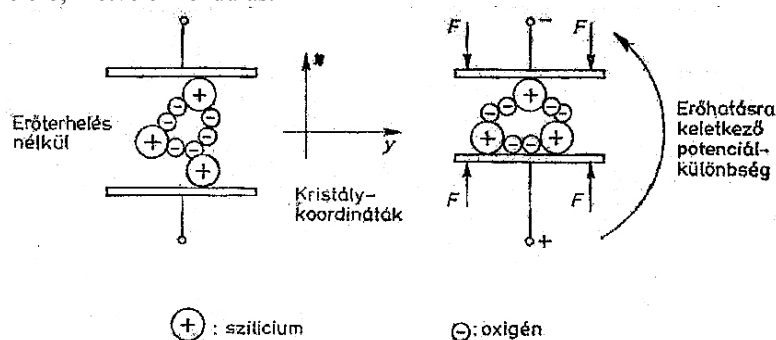
7. Piezoelektromos aktuátorok

- A piezokerámia feszültség hatására megváltoztatja alakját, illetve erő (alakváltozás) hatására villamos töltés (feszültség) keletkezik benne:

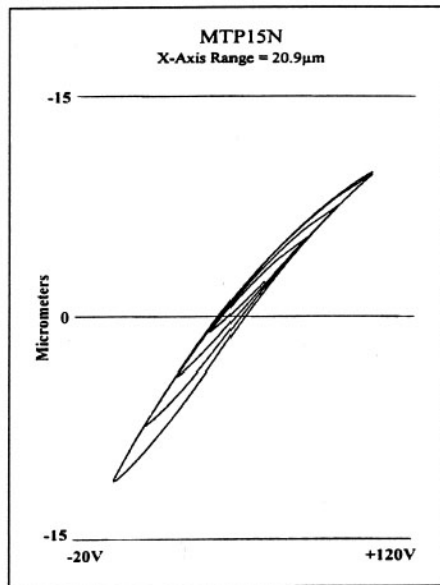
$$u_F \cong \frac{1}{e_p} \cdot \frac{l_p}{A_p} \cdot f_F$$

Ahol:

- e_p : kristályállandó
- l_p : a kristály hossza
- A_p : a kristály felülete
- f_F : a felületre ható terhelés
- A keletkező feszültség magyarázata, hogy a megfelelően kimetszett poláris kristálylapka felületein rácsdeformáció miatt szabad töltéshordozók jelennek meg. Elvileg ez az átalakító csak adott irányú erő, illetve elmozdulás érzékelésére alkalmas. Aktuátorként hasonlóan működik, ekkor a villamos feszültség hatására jön létre erő, illetve elmozdulás.



- A piezoelektromos mikroaktuátorokokat nagy sikerrel lehet, és alkalmazzák is nm-es feloldású pozicionálásokra. Jellemző rájuk a kb. 1 μm -es tartomány és az ezen belüli nagy, nm-es feloldás, a jó frekvenciakövetés és a viszonylag nagy kifejtett erő.
- Kedvező tulajdonságaik:
 - o Gyors működés
 - o Nagy merevség
 - o Alacsony energia-disszipáció
 - o Magas hatásfok
- A piezokerámia hátrányos tulajdonsága, hogy feszültség hatására bekövetkező alakváltozása meglehetősen kicsi (0,1%).
- A piezokerámiáknál egy másik általános probléma a hiszterézis.



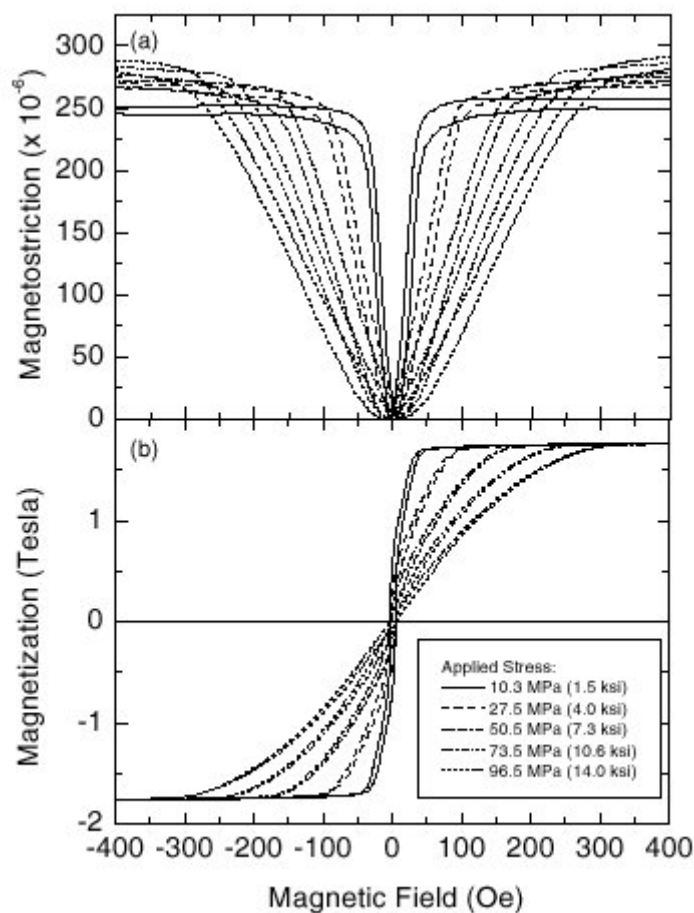
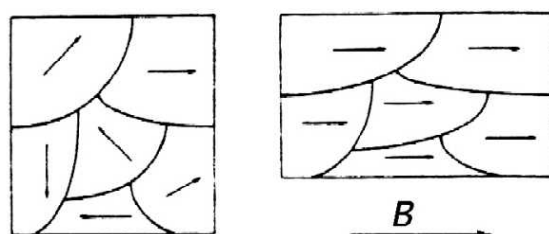
- A piezokerámia által kifejtett erő viszonylag nagy, ez lehetőséget ad arra, hogy mechanikai áttételekkel növeljük az elmozdulást.
- A piezokerámiás hajtás átmenetet képez az analóg és a diszkrét mozgás között, mivel mozgás közben „lépéseket” tesz, de ezen lépések nagysága változtatható a piezokerámiára kapcsolt feszültséggel.
- A piezokerámiákat általános alkalmazási területei:
 - Autofocus
 - CD-fej mechanika
 - Precíziós pásztázó mikroszkópia
 - Stb.

7.1. Optikai piezoelektromos aktuátorok

- Az optikai aktuátorok a fény energiáját használják fel működésük közben. Ennek igen nagy előnye, hogy teljes mértékben megszüntethető az indukció zaj. További előnyei, hogy nincs szükség szigetelésre, illetve, hogy az érintkezés nélküli kapcsolat könnyen létrehozható. A rendszernek viszont tartalmaznia kell optikai eszközöket is. Ezeket egybeintegrálják a rendszerrel.
- Az optikai piezoelem, bizonyítva a fotostrikciós jelenségét, számos kutatás alanya. Felhasználásával mozgó mikrorobotot, illetve mikrorelét fejlesztettek ki.
- Az optikai piezoelemet az UV fény hatására történő megnyúlása jellemzi. Ez a megnyúlás a következő három jelenség kombinációjából jön létre:
 - A fotostrikciós hatás feszültséget hoz létre a kristályban és a megnyúlás a piezoelektromos hatás miatt jön létre.
 - A piroelektromos hatás piroelektromos áramot hoz létre hőmérsékletkülönbség által és a megnyúlás szintén a piezoelektromos hatás következménye.
 - A hőmérsékleti sugárzás hődilatációt okoz.
- Ezek a kerámiák a bimorf típusú PLZT anyagok.

8. Magnetostríkiós aktuátorok

- Különböző ferromágneses anyagoknál, mint például a nikkél-vas ötvözeteknél, a mágneses tér hatására megváltozik az anyag mágneses permeabilitása. Ennek a változásnak hatására az anyagban feszültségek ébrednek, az anyag deformálódik. Erre a tulajdonságra már a 60-as években felfigyeltek, és kifejlesztették a Td-Dy-Fe ötvözetet, amelynél meglehetősen nagy magnetostríkiós hatás figyelhető meg.
- A magnetostríkió az anyag atomi mágnesezettségének átrendezéséből adódik. A ferromágneses anyagokat mágneses térbe helyezve az anyag domain-szerkezete a mágnesezettség irányának megfelelően átrendeződik (elfordulnak, illetve elmozdulnak a domain-falak). Amikor a rendezettség teljesen végbemegy, telítődéses jelenséget mutat.



- A magnetostríkió csak a Curie-hőmérséklet alatt jön létre.
- Jellemző maximális megnyúlás kb. 10^{-2} a hexagonális szerkezetű ritka földfémek (Tb, Dy) esetében. Az elérhető mozgástartományok 0,01 mm körüli tartományban vannak.
- A fenti megnyúlások az abszolút nulla fok hőmérsékleten érhetőek el, szobahőmérsékleten csak kb. $2 \cdot 10^{-3}$.
- A telítődéshez tartozó magnetostríkió jó jellemzője lehet az adott anyagnak.

Material	Saturation Strain ($\times 10^{-6}$)	Curie Temperature (K)
Ni	-50	630
Fe	-14	1040
SmFe ₂	-2340	690
Fe ₃ O ₄	60	860
DyFe ₂	650	630
TbFe ₂	2630	700
Tb _{0.3} Dy _{0.7} Fe _{1.9} (Terfenol-D)	1600-2400	650
Tb _{0.6} Dy _{0.4} @ 77 K	6300	210
Tb _{0.5} Zn _{0.5}	5500	180
Tb _{1-x} Dy _x Zn	5000	200

- A kristályok deformációja miatti hiszterézis igen nagy. Ebből a hiszterézisből következik, hogy a szerkezet működés közbeni jelentős melegedése, és a pozicionáló szerkezet hőmérsékletfüggése.
- A kristálynövesztési technikák fejlődésével egyre jobb tulajdonságú magnetostrikciós anyagokat fejlesztettek ki, ezek a mágneses tér kis megváltozására is nagy alakváltozásra képesek. Ezeket az anyagokat GMA-nak (Giant Magnetostrictive Alloy) nevezik.
- A GMA anyagok alakváltozása és a kifejített erő a piezokerámiáénak körülbelül kétszerese. Másik jelentős előny, hogy a létrejövő elmozdulás és a tömeg aránya kicsi.
- Mivel a magnetostrikciós aktuátorokat külső mágneses térrel lehet vezérelni, az aktuátor maga vezetékek nélkül képes elmozdulni, számos esetben ez további előnyt jelent.
- Finompozicionáló gyártó cég: Emergen Inc.

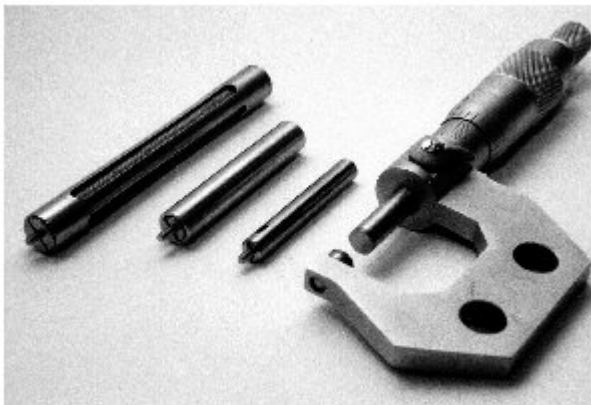


Figure 2 - Emergen's linear actuators

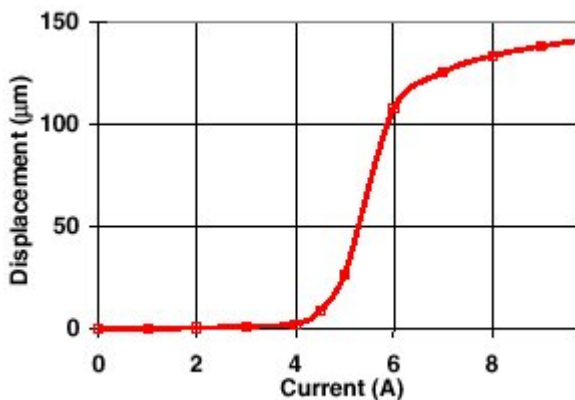


Figure 6 - Emergen, Inc. uses three linear actuators to create a linear stepper motor

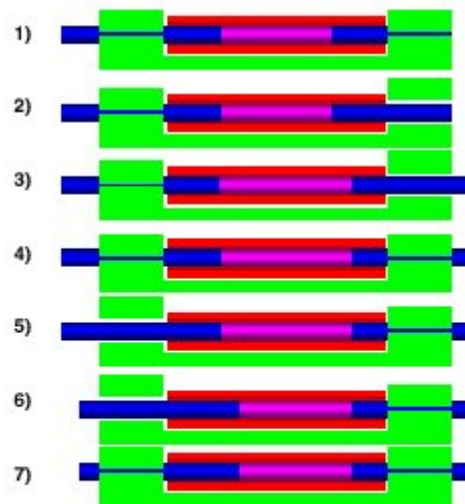


Figure 7 - Stepper motor operating sequence.

- Előnyök a Piezo-kerámiával szemben:
 - Nagyobb energiasűrűség
 - Nagyobb tartóerő

- Alacsonyabb vezérlőfeszültség
- Lehetőség előfeszítésre állandómágnesek alkalmazásával.
- Lehetőség távvezérlésre

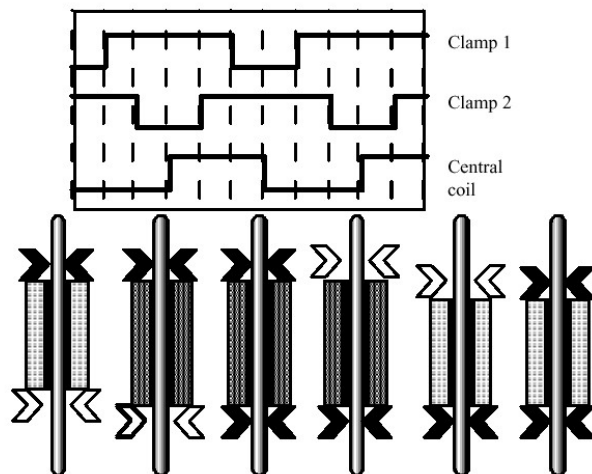
		Terfenol-D	Composite GMM	PZT-4	Soft PZT MLA
Max static strain	ppm	1800	1000	600	1250
Coupling coef.	%	70	35	67	65
Young's modulus	GPa	25	20	60	40
Max prestress	MPa	50	30	50	40
Max dyn. strain	ppm	4000	3000	1600	2000

Table 1 - Properties of GMM and piezo ceramics.

For comparison, all strains are given peak-to-peak

Given values have been experimented at Cedrat [9,16,17]

- Terfenol megnyúlása nagy (1000..2000 ppm), de a permeabilitása kicsi. A Fe-Co-Ni ötvözetek szaturációs megnyúlása kicsi (10..100), viszont nagy a permeabilitásuk (1000-100000).
- A polikristályos ritka földfémek meglehetősen törékenyek. Előfeszítéssel lehet a legjobb működést elérni. Ezek miatt mikro méretű aktuátorok esetén a Fe-Ni-Co ötvözetek az elterjedtebbek.
- Féregmozgást végző aktuátor



- LSWUM (Linear Standing Wave Ultrasonic Motor)

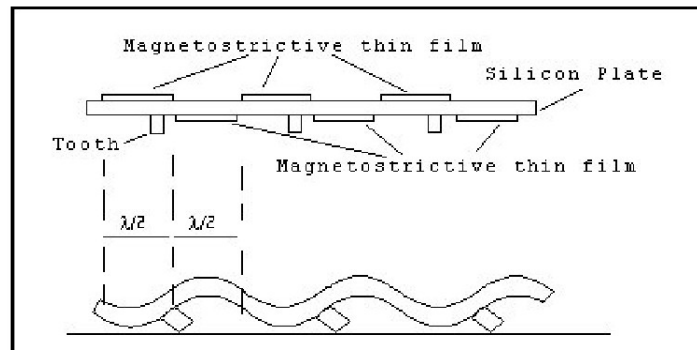


Fig. 1 :Sketch of the LSWUM.

- RSWUM (Rotating Standing Wave Ultrasonic Motor)

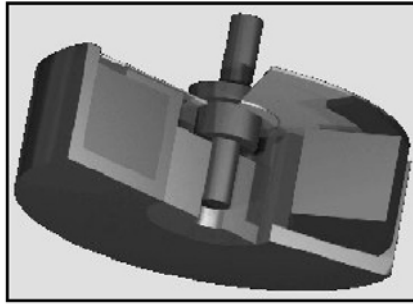


Fig. 5 : Cut-away view of the prototype RSWUM.

9. Emlékező-fémek (Shape Memory Alloys)

- Az emlékező-fémek (SMA) hőközlés hatására radikálisan megváltoztatják kristályszerkezetüket (martenzitesből ausztenitessé).
- Az átmeneti hőmérséklet alatti hőmérsékleten rugalmasan jól deformálhatók. Felhevítve az átmeneti hőmérséklet fölé, az ötvözet visszanyeri a deformáció előtti alakját.
- A hevítés történhet elektronikusan is, mivel a fajlagos ellenállásuk kb. $80 \mu\Omega/\text{cm}$.
- Az első SMA ötvözetek kb. 50 évvel ezelőtt jelentek meg. Ezek Ni-Ti ötvözetek voltak, NITINOL-nak nevezték el őket.
- Számos más ötvözeteket is kidolgoztak (pl. Au-Cd, InTi, ...), azonban a NiTi ötvözetek a legelterjedtebbek.
- Az egyes ötvözetek átmeneti hőmérséklete különböző. Az egyes ötvözőelemek aránya jelentősen befolyásolja az átmeneti hőmérsékletet, pl. Nitinol esetén 1%-os eltérés $\pm 100^\circ\text{C}$ -kal változtatja meg ezt.
- Előnyük a tömegükhöz képesti nagy munkavégző képességük (nagy erő és elmozdulás).
- A termodinamikus határfokuk azonban alacsony (kb. 95% hőveszteséggel lehet számolni).
- Azoknak az anyagoknak az átmeneti hőmérséklete, amelyeket szobahőmérsékletre terveztek, kb. 70°C .
- Az ismételt, dinamikus működést a hűlés befolyásolja, ezért minél magasabb az anyag átmeneti hőmérséklete, annál inkább dinamikusabb működés érhető el. Természetesen ez a bevitt teljesítményben és a határfokban is jelentkezik.
- A hevítés gyorsasága nem befolyásolja a kifejtett erőhatást.
- A hűlést befolyásolja még a felület/térfogat arány is, ez előnyt jelent kisebb méretekben.
- Léteznek olyan ötvözetek is, amelyek átmeneti hőmérséklete szobahőmérséklet körüli, ezeket hűteni kell, az aktuátor relaxációjához.
- Általánosan huzal formájában alkalmazzák.
- A rugalmas deformáció (megnyúlás) huzal esetén max. 8% lehet, hevítéskor a huzal összehúzódik.
- Működéskor az átmeneti hőmérséklet jelentős hiszterézisével kell számolni (az aktiválás magasabb hőmérsékleten történik, mint a relaxáció).
- Kezdő alakot adni a deformált Nitinol deformációjának megakadályozásával és 540°C -ra hevítéssel lehet adni az eszköznek.
- Tulajdonságaik:
 - A maximálisan kifejtett fajlagos erőhatás 600Mpa, az ajánlott: 200Mpa.
 - A deformációhoz kb. 30-60MPa engedhető meg.
 - Általában a deformáció (az élettartam és a működés biztonsága, ismételhetősége miatt) 3-5%.
 - Szakítószilárdság: kb. 1000MPa, Poisson-tényező: 0,33.
 - Az elektromos vezetőképessége alacsony hőmérsékleten: $70 \mu\Omega/\text{cm}$, magas hőmérsékleten kb. $90 \mu\Omega/\text{cm}$.
 - A vezérlőáramot megválasztásánál törekedni kell a lehető legkisebb áram használatára, megvédve az SMA-t a túlfűtéstől.
 - Hővezetési tényező: kb. martenzites fázis: $0,08 \text{ W}/\text{cm}^\circ\text{C}$, ausztenites fázis: $0,18 \text{ W}/\text{cm}^\circ\text{C}$.
 - Csatlakozások kialakításakor a megfelelő szilárdság és a jó elektromos csatlakozás kialakítása a cél. A Nitinol meglehetősen nehezen forrasztható, ezért a mechanikai csatlakozások az elterjedtek.
 - Élettartamuk függ a deformáció nagyságától. A maximális deformáció alkalmazása esetén (8%) az SMA anyag csak néhány tucat ciklust képes elviselni, azonban az ajánlott deformáció esetében ez a ciklusszám néhány millió is lehet, ha a túlfűtést és a nagy mechanikai feszültséget elkerüljük.
- Vezérlések:
 - Passzív áramszabályozás
 - Aktív áramszabályozás
 - PWM
 - Ezekben belül a működtetés lehet:
 - Lassú aktiválású – alacsony teljesítményszinttel kezdődik, amely lassan növekszik, de nem hevíti túl az SMA-t.
 - Gyors aktiválású – nagy, rövid idejű teljesítménnyel kezdődik, majd ez lecsökken az állandósult állapotban.

- Tartó aktiválású (általában pozíció-szenzorral) – mindig a megfelelő aktiválási szinten (pozícióban) tartja az SMA-t (aktuátort). Követi a környezeti változásokat (hűtési állapotok változása)
 - Lassú relaxációjú – fokozatosan csökkenti a vezérlő-áramot, a megfelelő relaxáció eléréséig.
 - Gyors relaxációjú – aktív hőelnyelőt igényel (emiat nagyobb az aktiválási energia is).
- Előfeszítések:
 - Súly
 - Rugó
 - Mágneses
 - Ellentétesen elhelyezett másik SMA huzal
 - Ellentétes irányú súly
 - Alkalmazási területeik:
 - Űrtechnika
 - Nitinol esetében orvostechika (biokompatibilis, nem dobja ki az élő szervezet).
 - Napenergiával működtetett generátor, motor.
 - Robotkarok.
 - Szelepvezérlés.
 - Braille-írás megjelenítő eszköz.
 - Járó robotok

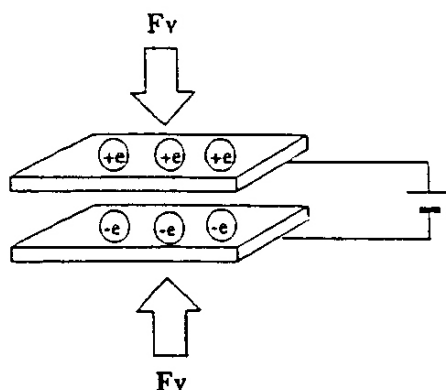
10. Elektrosztatikus mikromotorok

Az elektrosztatikus elven működő mikromotorok, a kisebb méretek körében számos előnyt mutat az elektromágneses elven működőkkel szemben, gyártási eljárásuk hasonló a mikroelektronika gyártási eljárásaihoz.

10.1. Az elektrosztatikus aktuátorok működési elve

Az elektrosztatikus motorok működési elve két egymással párhuzamos, elektrosztatikusan feltöltött lemez között fellépő erőből ered. Jól ismert az az összefüggés, amellyel az 1. Ábra szerinti elrendezésű, elektrosztatikusan feltöltött lemezek közötti erőt lehet meghatározni:

$$F_E = \frac{\epsilon S}{2} \left(\frac{V}{d} \right)^2$$

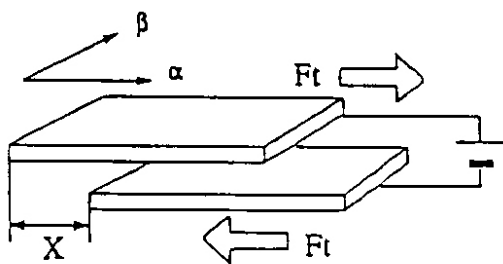


Ahol:

- F_E : elektrosztatikus erő
- ϵ : dielektromos állandó
- S : az elektródák felszíne
- V : alkalmazott feszültség
- d : az elektródák közötti távolság

Továbbá, ha a két lemezt axiálisan elmozdítjuk, a 2. Ábra szerint, akkor axiális irányú húzóerő ébred, mivel a lemezek energiaminimumra törekednek. Ennek az erőnek a nagyságát a potenciális energia integrálásával, majd x-szerinti differenciálásával lehet kiszámolni, ahol x a 2. Ábrán feltüntetett irány.

$$F_t = \epsilon_0 \epsilon \frac{WV^2}{2d}$$



Ahol:

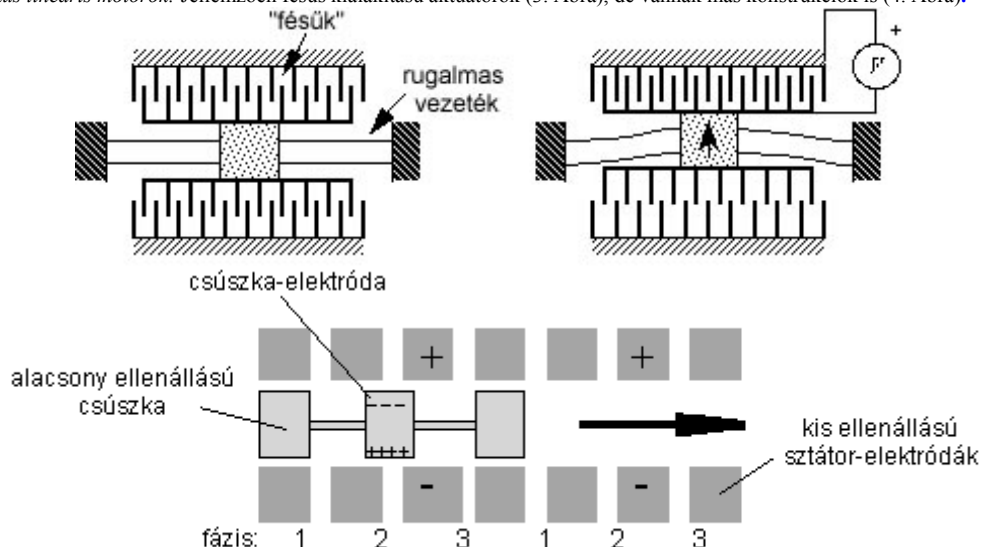
- W : az elektródák szélessége
- ϵ_0 : a vákuum dielektromos állandója

Az (1) képletből látható, hogy az elektrosztatikus tér ereje lineárisan függ össze az elektródák felszínével. Ezért a konstrukciók kialakításával mindig törekedni kell arra, hogy az elektródák felszíne a lehetőségekhez képest minél nagyobb legyen.

10.2. Az elektrosztatikus elvű aktuátorok típusai

Az elektrosztatikus motorok jellemzően forgó, vagy lineáris motorok lehetnek.

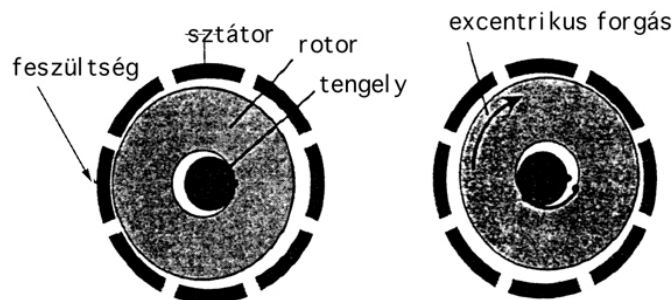
Elektrosztatikus lineáris motorok: Jellemzően fésűs kialakítású aktuátorok (3. Ábra), de vannak más konstrukciók is (4. Ábra).



A fésűs konstrukciójú aktuátorok különlegesen népszerűek a mikrotechnika gyártási módszereiben. Ezek egymásba kapcsolódó fogakból állnak, amelyek között jön létre a húzóerő. A létrejövő kapacitás, és így a húzóerő nagysága függ a fogak számától, ezért nagy erőt csak sok foggal lehet elérni. Meglehetősen nagy probléma ennél a konstrukciónál az oldalsó légrések egyező szélességének biztosítása. Ha nem egyenlő szélességűek a légrések, akkor előfordulhat, hogy a mozgó rész elfordul, és így a két rész összeragad. A súrlódás elkerülése érdekében legtöbbször rugalmas vezetést alkalmaznak.

Elektrosztatikus forgó motorok: Az 5. Ábrán egy mikromegmunkálási technológiával készített forgó mikromotor látható. Az ilyen konstrukciójú mikromotorok egy óriási előnye, hogy a hagyományos IC gyártási technológiákkal gyárthatóak.

A forgó mikromotoroknál is, mint más mikromotoroknál az egyik legjelentősebb probléma a súrlódás. A forgó mozgás következtében nem jöhet szóba a rugalmas vezetés, ezért gyakran a súrlódás csökkentését gördüléssel oldják meg, mint ahogy az 5. Ábrán látható.



Ennek következtében azonban a forgórész excentrikus forgómozgást végez.

Sokszor a sztátor elektrodáinak és a rotornak az érintkezését a gerjesztőelektrodára felvitt szigetelőréteggel akadályozzák meg. Ez azonban, ha forgás közben érintkezik a rotornal, hosszú távon problémát okozhat, mivel ha gyorsan kopik, rövidzárat okozhat.

Egy további probléma lehet, ha a rotor tengelye (vezetése) nem teljesen hengeres alakú. Ekkor a motor indulásakor a rotor megakadhat. Ez a probléma fennállhat, mivel a CAD rendszerek a kört poligonokkal közelítik.

Az elektrosztatikus tér által kifejtett erő növeléséhez növelni kell az energiaközlésben részt vevő felületeket. Ez a miniatürizálás következtében egyre nehezebbé válik, főképp azért, mert az IC gyártási technológiával csak lapos motorokat lehet gyártani. A felületek növelésére két megoldás kínálkozik. Az első az, hogy a konstrukciót úgy alakítjuk ki, hogy a légrésekben az erővonalak axiálisan helyezkedjenek el (6. Ábra), a másik pedig, hogy a mikromotort LIGA eljárással készítjük, mert ez az eljárás lehetővé teszi, hogy megnöveljük a motor axiális irányú méretét.

10.3. Az elektrosztatikus és az elektromágneses motorok szerepe a mikrotechnikában

Mivel a motorok által generált erő egyenlő a forgórész és a sztátor között tárolt energia térbeli deriváltjával ($F = -\nabla W$), ezért egy jó viszonyítási alap a motorok teljesítményére a légrésekben uralkodó télerősség sűrűsége. Elektromágneses motoroknál, a mágneses pólusok között kialakuló energiasűrűség az indukcióból és a vákuum permeabilitásából számolható:

$$w_m = \frac{1}{2} \frac{B_{\max}^2}{\mu_0}$$

A maximális indukciót akkor lehet elérni, ha a mágneses anyag telítésbe kerül ($B_{\max} = B_s$), így például ha B_{\max} -nak a vas telítési indukcióját vesszük (1,5 T), akkor az energiasűrűség 10^6 J/m^3 nagyságrendű.

Elektrosztatikus esetben a két elektróda között létrejövő energiasűrűséget, hasonlóképpen kapjuk:

$$w_E = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E_{\max}^2$$

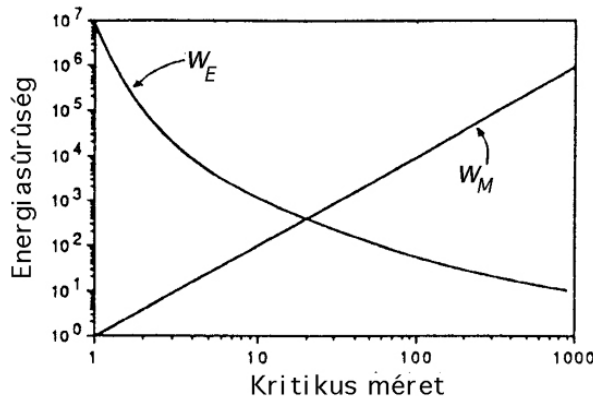
A maximális télerősség itt az a télerősség lesz, amelyet még épp fenn lehet tartani, úgy, hogy ne következzen be átütés. Például, ha a maximális télerősségnek a levegő átütési szilárdságát vesszük ($E_{\max}=1,5 \cdot 10^6$ V/m), akkor az elérhető maximális energiasűrűség 10 J/m³ nagyságrendbe esik.

Látható, hogy az elektromágneses elvű motorok lényegesen nagyobb energiasűrűséggel rendelkeznek, a makro-méretekben való alkalmazásuk éppen ezért indokolt. Azonban mikro-méretekben, mivel az indukciót tekercsen átfolyó áram segítségével állítjuk elő, és:

$$\int_L \frac{B}{\mu} dl = \int_A J dA$$

ezt az előzőekben számolt indukciót nem tudjuk elérni, mivel a méretek csökkentésével a felület nagysága négyzetesen csökken és a maximális áramsűrűséget a tekercsben maximálisan megengedhető áramsűrűség fogja meghatározni.

Elektrosztatikus esetben a maximális energiasűrűség a levegő átütési szilárdságával van összefüggésbe hozva. A levegő átütési szilárdsága azonban, mikro-méretekben a légrés csökkentésével növekszik, a Paschen-összefüggés szerint. Paschen felfedezte, hogy az elektródák közötti távolságot csökkentve, az átütési szilárdságnak minimumhelye van, ettől balra pedig rohamosan növekszik. Ennek az az oka, hogy kis légrés esetén túl kevés ütközés jön létre ahhoz, hogy kialakuljon egy lavinaszerű átütés (ezért mikro-méretekben lényegesen nagyobb energiasűrűség engedhető meg, mint makro-méretekben). Ez az elérhető energiasűrűség növekedését vonja maga után (ellentétben az elektromágneses esettel).



Az elektrosztatikus motorok előnyeit a legegyszerűbben dimenzióanalízis segítségével láthatjuk be. A dimenzióanalízis alatt a lineáris méretek csökkentésének az elektrosztatikus, illetve az elektromágneses tér erejére gyakorolt hatásának elemzését értem. Az elemzés során izometrikus méretcsökkentést feltételezve belátható, hogy a motor forgórészének V térfogata, így a tehetlenségi nyomatéka is a méretcsökkenés harmadik hatványával arányosan csökken. Bevezetve a méretcsökkenés mértékének az S dimenziótlan számot (a csökkentett és az eredeti méret hányadosát), a tehetlenségi nyomaték csökkenése S^3 -al arányos. Az elektromágneses tér által kifejtett erőt (1)-ből (4) szerint, illetve hasonlóan az elektrosztatikus tér erejét (2)-ből (5) szerint számolhatjuk.

$$F_m = V \frac{dw_m}{dl} = V \frac{d\left(\frac{B_{\max}^2}{2\mu}\right)}{dl}$$

$$F_E = V \frac{dw_E}{dl} = V \frac{d\left(\frac{\epsilon E_{\max}^2}{2}\right)}{dl}$$

Az erők kiszámításánál tehát figyelembe kell vennünk a légrésben lévő energiasűrűség vonalmenti parciális deriváltjait. Ez elektromágneses esetben, az 1. Ábra szerint, egy lineáris függvény négyzetének deriválása, tehát végeredményben elsőfokú, S -sel lineárisan függ össze.

Elektrosztatikus esetben azonban ezt az összefüggést a Paschen-összefüggés írja le, amely $w_E \cong \frac{1}{\sqrt{l}}$ függvénnyel közelíthető [1]. Így az

energiasűrűség négyzetének deriváltja a méretcsökkentéssel S^2 függvény szerint függ össze. Ha mindkét eredményt ezek után megszorozzuk a térfogatváltozás és a lineáris méretcsökkenés között fennálló S^3 -nal, akkor megkapjuk az adott tér erejének a méretcsökkenés által okozott csökkenésének mértékét. Ez elektrosztatikus esetben S^4 , míg elektromágneses esetben S^4 . Ebből az okból kifolyólag jobb a hatásfoka az elektrosztatikus mikromotoroknak, az elektromágnesesekkel szemben.

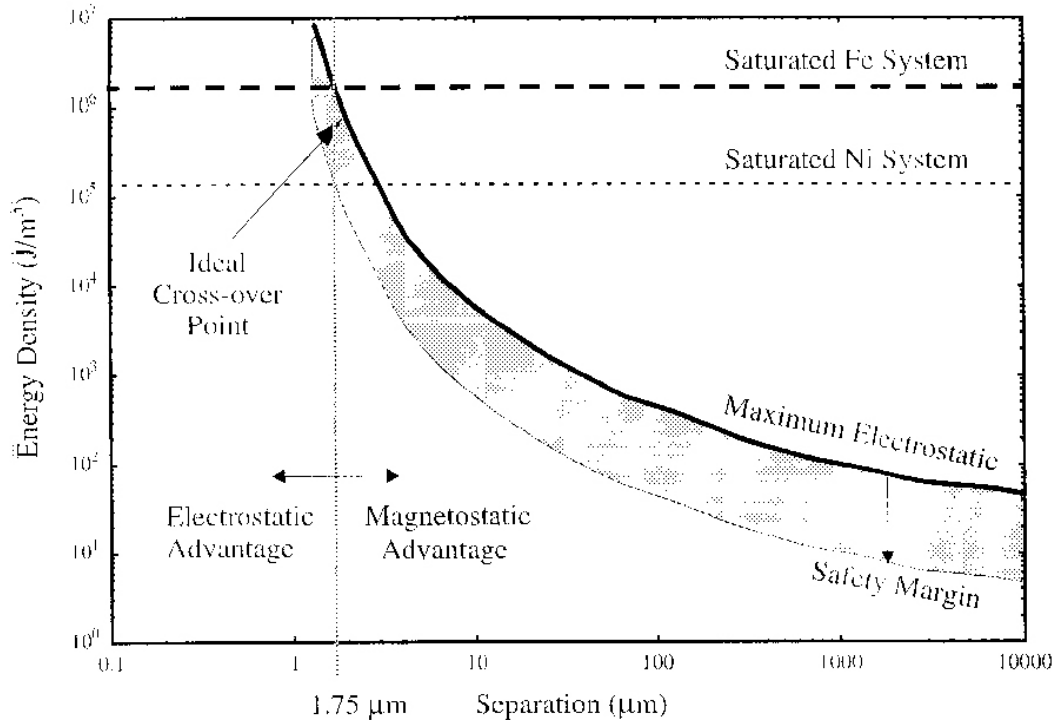
A továbbiakban, ha képezzük a maximálisan elérhető elektromágneses és elektrosztatikus energiasűrűségek hányadosát, és a fénysebességet $c=(\mu_0 \cdot \epsilon_0)^{-1/2}$ értékkel helyettesítjük, írhatjuk, hogy:

$$\frac{w_M}{w_E} = w_{\text{arány}} = \frac{c^2 B_s^2}{V_{\max}^2} d^2$$

Legyen az elérendő cél, hogy ugyanakkora elektrosztatikus energiasűrűséget érjünk el, mint amekkora elektromágneses energiasűrűséget tudunk. Ekkor $w_{\text{arány}}=1$, és a szükséges légrésszélességet (6) átrendezésével kapjuk:

$$d = \frac{V}{cB_s}$$

A következő ábra 5, 10, 25, 50 és 100 V feszültségekre adja meg a szükséges légrésszélességeket, ahhoz, hogy $w_{\text{áramy}}=1$ -et kapjunk. A korszerű IC gyártási technológiákkal ma már kb. 100 nm-es légrésszélességű elektrosztatikus mikromotorokat lehet gyártani, tehát ahhoz, hogy elérjük az elektromágneses energiasűrűséget, több mint 64 V-os feszültséget kellene alkalmazni.



Elektrosztatikus mikromotoroknál továbbá el kell kerülni azt, hogy a rotor és a státor egymással érintkezzen, mivel ez tönkretelheti a motort (például összeolvadás következik be). Elektromágneses esetben ennek semmi jelentősége nincs, az esetleges összeérések nem veszélyesek a motorra.

11. Vezérelhető folyadékok (MR, ER folyadékok)

- Az angol szakirodalomban Smart Materials
- Külső erőter hatására megváltozik az áramlástechnikai viselkedésük.
- A csúsztatófeszültségük a külső erőter függvényében általában monoton növekvő.
- Egyszerű, csendes, gyors aktuátorok hozhatók létre.
- A folyadékok szuszpendált részecskével nyerik el ezeket a tulajdonságaikat.
- A szuszpendált elemek dipólusokból állnak, ezek a külső erőter hatására oszlopszerűen rendeződnek. Ez akadályozza a folyadék áramlását, más szóval növeli a folyadék viszkozitását.
- Külső tér hiányában Newton modell szerint viselkedik. Működés közben, ha a τ csúsztatófeszültség nagyobb, mint a τ_y térfüggetlen csúsztatófeszültség (ha $\tau > \tau_y$), Bingham-modell szerinti modellezhető.

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma}$$

Viszont, ha $\tau < \tau_y$

$$\tau = G\gamma$$

- Léteznek ún. fixpólusú (nyomásvezérelt), mozgó pólusú (közvetlen nyíró) és kiszorítás elvén működő filmaktuátor típusok.
 - Fixpólusú aktuátorok:
 - Szelepek,
 - Csillapítók
 - Rezgéscsillapítók
 - Mozgó pólusú aktuátorok:
 - Fékek,
 - Reteszelő, záró eszközök