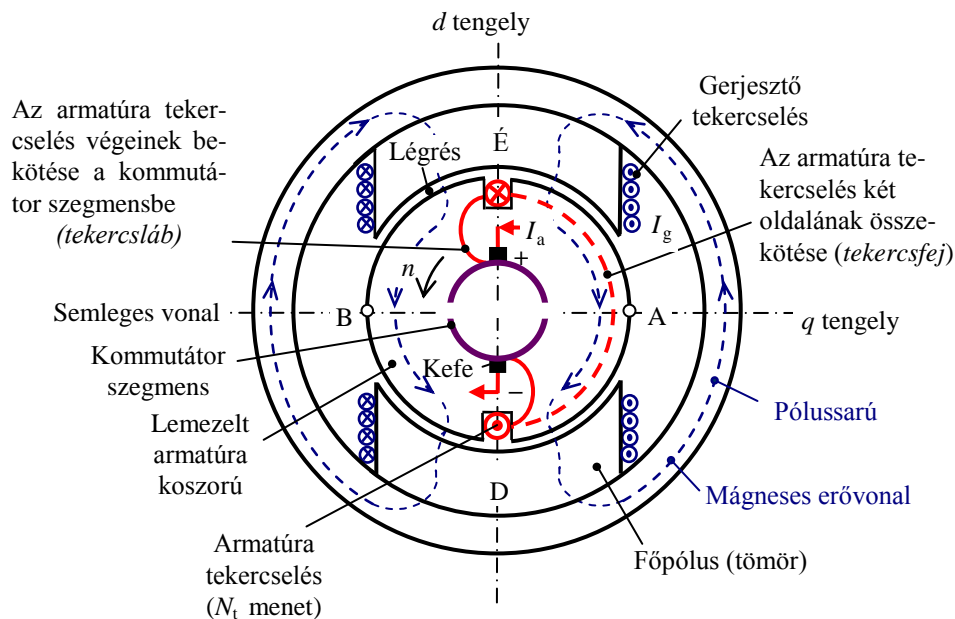


## 5. EGYENÁRAMÚ GÉPEK

### 5.1 AZ EGYENÁRAMÚ GÉP MŰKÖDÉSI ELVE ÉS ELVI SZERKEZETI FELÉPÍTÉSE

Egy kétpólusú (a póluspárok száma:  $p = 1$ ) egyenáramú gép elvi szerkezeti felépítése az 5.1. ábrán látható. A gép állórésze kiálló pólusú, a forgórész hengeres kialakítású. Az  $I_g$  egyenárammal gerjesztett gerjesztő tekercselések az állórész kiálló pólusain találhatók, a tekercsek kötése olyan, hogy egy északi és egy déli főpólus alakuljon ki, vagyis a gép *heteropoláris*. A mágneses ellenállás a gerjesztőtekercs tengelyének irányában a legkisebb, ez a gép *d-tengelye*, az erre merőleges, legnagyobb mágneses ellenállású irány pedig a *q-tengely*. A főpólusok által létrehozott mágneses erővonalak a *póluskoszorún*, a *főpólusokon*, a *légréseken*, az *armatúrafogakon*, az *armatúrakoszorún* és a *póluskoszorún* keresztül záródnak. Az egyenárammal történő gerjesztés miatt a főpólusok és a póluskoszorúk fluxusa időben állandó, így tömör anyagból is készülhetnek.

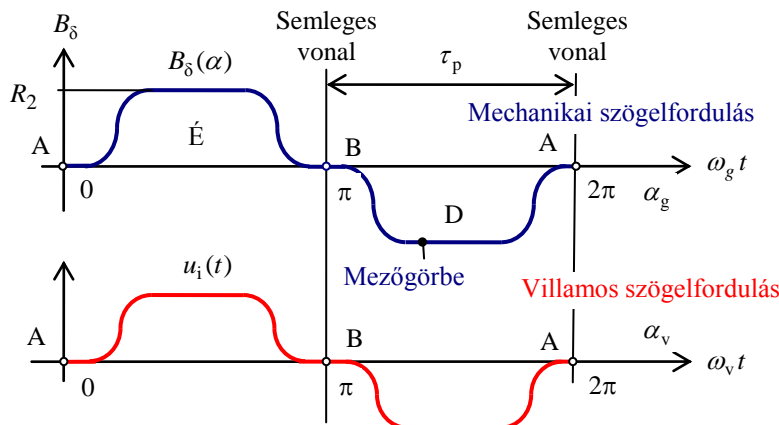


5.1. ábra Az egyenáramú gép elvi felépítése

A gép tekercselése (általánosan *armatúratekercselésnek* nevezik egy villamos forgógépnek azt a tekercselését, amelyben a felhasználás számára hasznos  $u_i$  indukált feszültség keletkezik) a forgórészen helyezkedik el, az áram bevezetése az armatúrába a *kommutátor* és a kommutátor felületén csúszó (szén)kefék segítségével történik. A kommutátor hengeres formára összerakott vörösréz szegmensekből áll, amelyek általában mikával vagy kisebb gépeknél műanyaggal szigetelve egymástól és a hordozó agytól.

A nagyon leegyszerűsített felépítésű generátor működésének bemutatására tételezzük fel, hogy az armatúratekercselés egyetlen  $N_t$ -menetű tekercsből áll, melynek  $a+$ -al és  $a-$ -al jelölt tekercsoldalai kétpólusú gép esetén a forgórész átellenes pontjain helyezkednek el, a tekercsoldalak párhuzamosak a gép tengelyével. Az armatúratekercselés két oldalát a *tekercsfejek* (mivel ez a gép másik oldalán található, szaggatott vonallal jelöltük) kötik össze egymással, a tekercs két végét pedig a *kommutátor szegmensei*hez kötjük. Tételezzük fel továbbá, hogy csak a főpólusokat gerjesztjük (az armatúratekercselés árammentes) és a forgórészt állandó sebességgel forgatjuk. Ha a kerület mentén az indukcióeloszlást ( $B_\delta$ ) megvizsgáljuk, a főpólusok alatt az indukció maximális ( $B_{\delta m}$ ) és állandó (a gép légrése a főpólusok alatt állandó). A főpólusok alól kikerülve a mezőgörbe trapéz alakú (lásd az 5.17. ábrát). A gép kitüntetett vonala a két szomszédos, de ellentétes mágneses polaritású főpólust elválasztó középvonal, az ún. *semleges vonal* (5.1. ábra) amely egybeesik a gép  $q$ -tengelyével.

Természetesen az ellentétes mágneses polaritású főpólusok alatt az indukció is ellentétes polaritású lesz. Ha az indukcióeloszlást a szögelfordulás függvényében kiterítve (az armatúra palástját az A-jelű pontban axiálisan felmetszve a hengeres felületet a síkban



5.2. ábra A mezőgörbe térbeli eloszlása és az indukált feszültség időfüggvénye kétpólusú gép esetén

kiterítjük) ábrázoljuk, az ún. *mezőgörbét* kapjuk (5.2a ábra). Az 5.2 ábrába berajzoltuk a semleges vonalakat. A semleges vonalak távolsága definiíciószerűen a gép  $\tau_p$  pólusosztása:

$$\tau_p = \frac{D_a \cdot \pi}{2p} \quad (5.1)$$

ahol  $D_a$  az armatúra külső átmérője,  $p$  a póluspárok száma. A pólusosztás minden

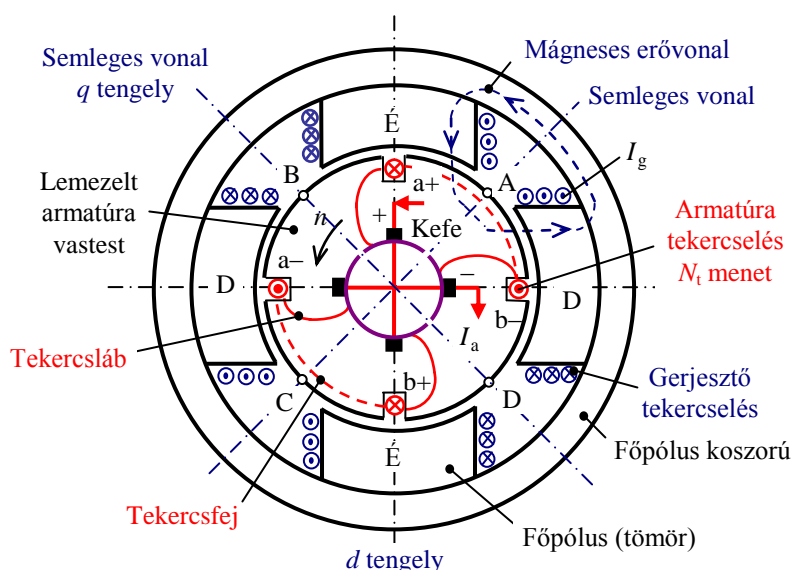
forgógép fontos jellemzője. Az 5.1. és 5.2. ábrák alapján pl. könnyen belátható, hogy  $\tau_p \cdot l_i$  (ahol  $l_i$  az armatúra vastest ideális hosszúsága) felületen halad át gép teljes pólusfluxusa, ami a pólusszórási fluxusokkal nagyobb a gép hasznos fluxusánál.

Az armatúratekercset forgatva a vizsgált vezetőkben feszültség indukálódik, amely az időben ugyanolyan alakú, mint a légrésindukció kerületmenti eloszlása (5.2b ábra). Figyeljük meg, hogy kétpólusú gépnél egy körülfordulás alatt ( $\alpha_g = 360^\circ$  geometriai szögelfordulás) a vezetők egyszer haladnak el egy északi és egy déli főpólus alatt aminek megfelelően az indukált feszültségben egy teljes periódus játszódik le, vagyis a villamos szögelfordulás is  $\alpha_v = 360^\circ$ .

Az ábrák alapján megállapíthatjuk, hogy az armatúrában forgó átmágneseződés történik, és az armatúratekercselésben váltakozófeszültség keletkezik. Az átmágneseződés miatt a vasvesztések csökkentésére az armatúra vastestet, vagyis a forgórészt egymástól

elszigetelten lemezelní kell. Egy transzformátor vasmagjától eltérően azonban a forgórész mechanikailag is igénybevett, ezért kevésbé rideg, és minden irányban azonos mágneses tulajdonságú ún. *dinamólemez*t használunk a lemezeléshez, amelynek szilícium-ötvöző tartalma csak mintegy 0,5 %.

Vizsgáljunk meg most egy négypólusú ( $p=2$ ) gépet, amelynek keresztmetszete az 5.3. ábrán látható. Az északi és a déli főpólusok most  $90^\circ$  geometriai szöggel követik egymást és az armatúratekercsek két oldala ( $a+$  és  $a-$ , ill.  $b+$  és  $b-$ ), valamint a semleges vonalak is  $90^\circ$  geometriai szögre vannak egymástól. A gép mezőgörbáját ebben az esetben az 5.4a ábra mutatja.



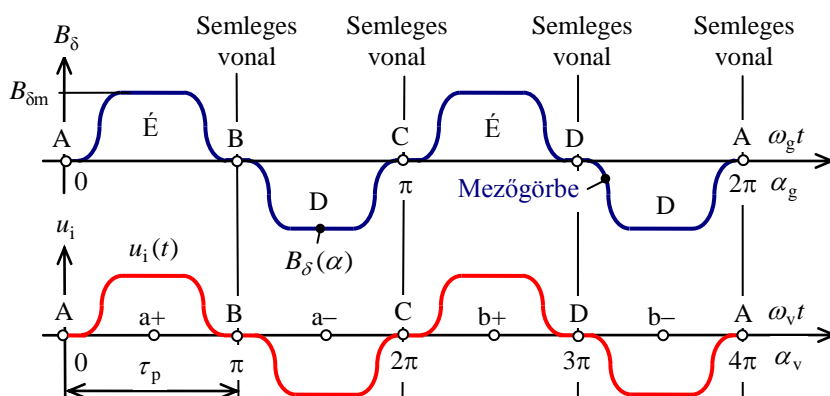
### 5.3. ábra Négypólusú egyenáramú gép elvi felépítése

Az armatúratekeresztet forgatva a vizsgált vezetőkben feszültség indukálódik, amely az időben most is ugyanolyan alakú, mint a légrésindukció kerületmenti eloszlása (5.4b ábra). Figyeljük meg, hogy a négypólusú gépnél egy körülfordulás alatt ( $\alpha_g=360^\circ$  geometriai szögelfordulás) a vezetők kétszer haladnak el egy-egy északi és egy-egy déli főpólus alatt. Ennek megfelelően az indukált feszültségben két teljes periódus játszódik le, vagyis a villamos szögelfordulás  $\alpha_v=720^\circ$ . Ez a geometriai szögelfordulás kétszerese.

Eddig szerzett tapasztalatainkat már az 1. fejezetben megfogalmaztuk {lásd az (1.7) összefüggést}: egy villamos gépben különbséget kell tennünk a *villamos- és geometriai szögek* (szögelfordulások) között. A villamos- és a geometriai szögek közötti általános érvényű összefüggés:

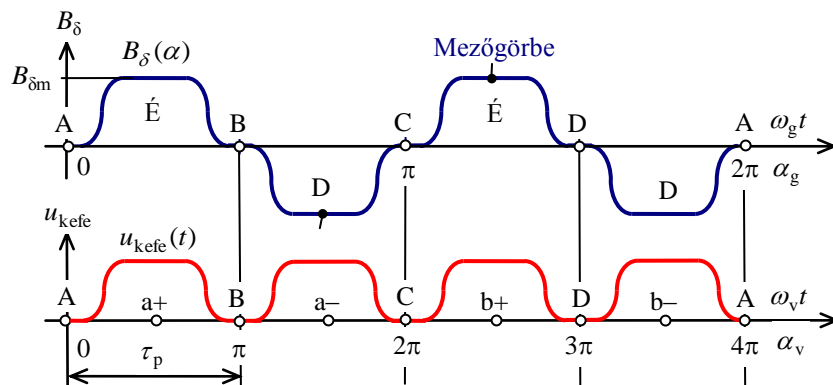
$$\alpha_v = p \cdot \alpha_g, \quad (5.2)$$

vagyis a villamos szögelfordulás a geometriai szögelfordulás *póluspár*-szorosa. A gép pólusosztása (két semleges vonal



**5.4. ábra** A mezőgörbe térbeli eloszlása és az indukált feszültség időfüggvénye négypólusú gép esetén

távolsága) villamosan mindig  $180^\circ$ -nak felel meg, ezért is szokták azt villamos átmérőnek is nevezni.



5.5. ábra A kommutátor-kefe együttes egyenirányítja az armatúrában indukálódó feszültséget

Az 5.2. és 5.4. ábrák további elemzésével még egy nagyon fontos szabályt állapíthatunk meg. Látható, hogy a gép egy körülfordulása alatt  $p$ -számú teljes villamos periódus játszódik le, vagyis az indukálódó feszültség frekvenciája:  $f = p$ .

Amennyiben a gép másodpercenkénti fordulatszáma  $n$ , az armatúratekercselésben indukálódó feszültség frekvenciája általánosan:

$$f = p \cdot n. \quad (5.3)$$

A villamos gépek gyakorlatban megszokott, hogy a másodpercenkénti fordulatszám helyett a percenkéntit használjuk. Az (5.3) összefüggés ebben az esetben a következőképpen módosul:

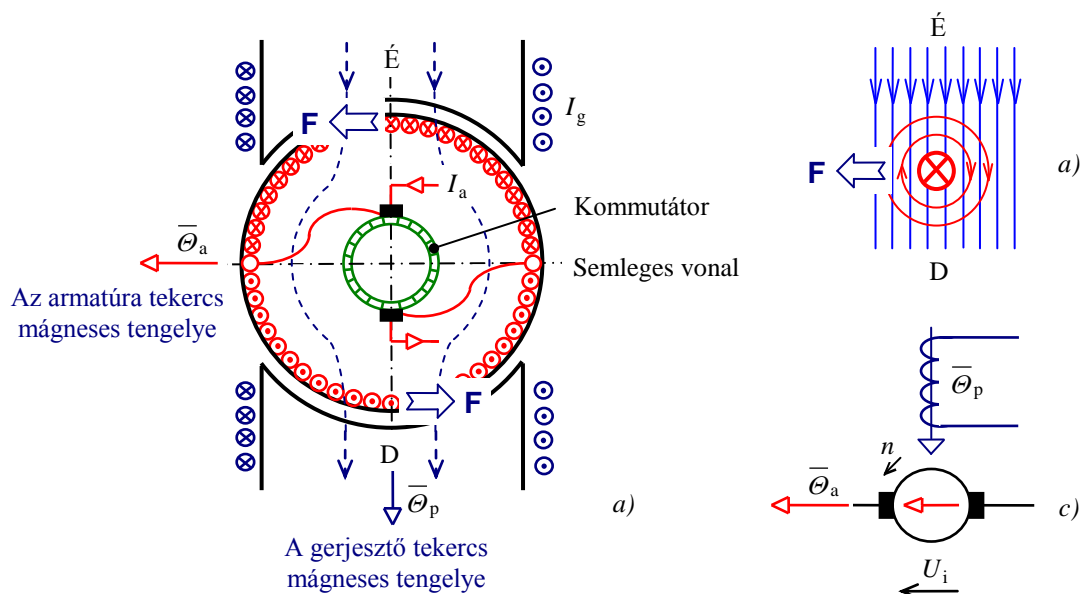
$$f, \text{ Hz} = p \cdot \frac{n, 1/\text{min}}{60}. \quad (5.4)$$

Vizsgáljuk meg a továbbiakban a gép armatúrakörét egy kicsit részletesebben! Mint az az 5.1. és 5.2. ábrákon látható, az armatúraáram be- és kivezetése az armatúratekercselésbe a *kommutátoron* és a kommutátor felületén csúszó *keféken*, vagyis egy csúszó kontaktuson keresztül történik. Mint a későbbiekben látni fogjuk, ez a csúszó kontaktus a gép üzemének egyik fő problémája. Az 5.1. és 5.3. ábrákat összehasonlítva figyeljük meg, hogy egy két-pólusú gépnél egy kefepárt, míg egy négypólusú gépnél két (vagyis általánosan  $p$ -számú) kefepárt alkalmaznak.

Mivel az azonos villamos fázishelyzetben elhelyezkedő vezetőkben (az 5.3 ábrában ilyenek az  $a+$  és a  $b+$  ill. az  $a-$  és a  $b-$  jelölésű vezetők) elméletileg azonos nagyságú feszültségek indukálódnak, így ezek a vezetők párhuzamosan kapcsolhatók. Figyeljük meg továbbá, hogy a gép forgórészének elfordulásától függetlenül pl. a pozitív polaritású kefék mindig olyan vezetőkhez kapcsolódnak, amelyek az északi főpólusok alatt helyezkednek el, ezért az álló kefékről már egyenfeszültség vehető le. Ez azt jelenti, hogy a kommutátor-kefe együttes frekvencia-átalakítóként (jelen esetben egyenirányítóként) viselkedik, mert az  $f$ -frekvenciájú armatúrafeszültséget az 5.5b ábrából láthatóan egyenfeszültséggé alakítja át. Ezen tulajdonsága miatt a kommutátor-kefe együttest *mechanikus egyenirányító*nak is szokták nevezni.

Amennyiben egy egyenáramú gép motorként üzemel, az armatúraáramot a tápláló hálózat hajtja át az armatúratekercselésen. Most az armatúra tekercsoldalokban a kommutátor az áramirányt akkor cseréli meg, amikor a tekercsoldalak áthaladnak a semleges

vonalon. Az áramirány-váltást *kommutációnak* nevezzük és ezzel az 5.6. pontban foglalkozunk részletesebben. A kommutálás alatt a kommutáló menetek rövidrezártak, ezért feszültségmentesnek kellene lenniük. A kommutációval a kommutátor a *terheléstől függetlenül*, a térben a gerjesztő tekercs gerjesztésének tengelyére *merőlegesen* rögzíti az armatúragerjesztés helyzetét úgy, ahogy azt egy kétpólusú gép esetén az 5.6a ábrán láthatjuk. Ilyen árameloszlás esetén úgy is felfoghatjuk, mintha az armatúratekercselés egy szolenoid tekercselés lenne, amelynek mágneses tengelye a semleges vonal.

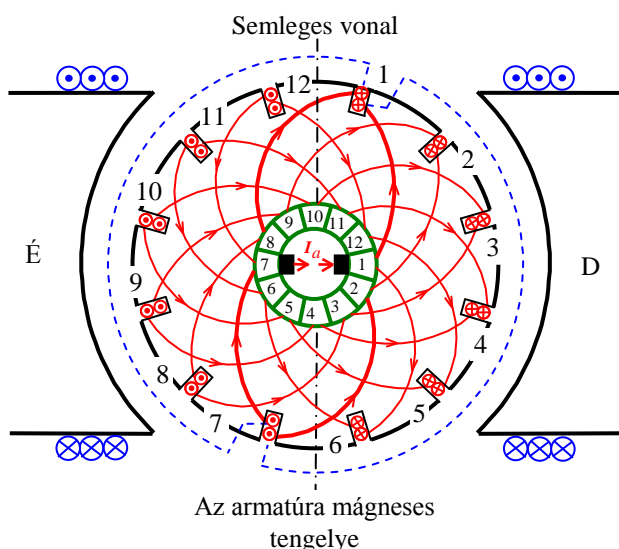


**5.6. ábra** Az árameloszlás, a nyomaték képződése és a jelképi jelölés egy kétpólusú gép esetén  
 a) az armatúraáram-eloszlás; b) az armatúravezetőre ható erő; c) az armatúra és a gerjesztőtekercs jelképi jelölése a gerjesztési irányokkal motoros üzemben

A főpólusok által létrehozott mágneses térben a semleges vonal feletti armatúraáramtól átjárt vezetőkre egy balra mutató  $B_\delta \cdot I_a \cdot l_i$  nagyságú erő hat, ahol  $l_i$  a vezető axiális hossza (5.18b ábra). Mivel a főpólusok által létrehozott mágneses erővonalak iránya a semleges vonal alatt is ugyanilyen, ha a semleges vonal alatt a kommutátor nem fordította volna meg az armatúraáram irányát, a semleges vonal alatti és feletti vezetőkre ható nyomaték-komponensek kiegyenlítenék egymást, így a gépnek nem lenne nyomatéka. Az összes nyomaték-komponens összegezéséhez tehát elengedhetetlenül szükséges az áramirány megfordítása (vagyis a kommutáció) amikor a vezető áthalad a semleges vonalon. Az erőhatások motoros üzemben egyben meghatározzák a forgásirányt is, amely ebben az esetben az óramutató járásával ellentétes.

Az 5.6c ábrán egy motorként üzemelő gép jelképi jelölését láthatjuk. A jelképi jelölés megmutatja, hogy a gerjesztő- és az armatúratekercselés mágneses tengelye egymásra merőleges, az armatúratekercselésben  $u_i$  indukált feszültség keletkezik és motoros üzemben (ekkor a gép egy villamos fogyasztó) az indukált feszültség és az armatúraáram iránya megegyezik.

Az 5.7. ábra az 5.1. ábrához képest egy gyakorlati megvalósításhoz közelebb álló két-pólusú, 12 hornyú egyenáramú gépet mutat. Az egyenáramú gép tekercselése mindig ún.



5.7. ábra 12 hornyú gép hurkos armatúratekercselése

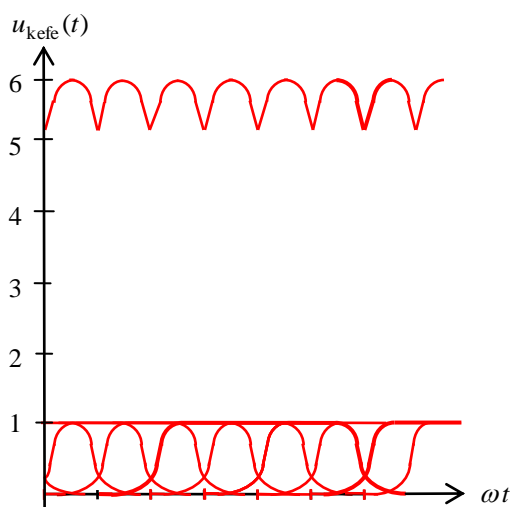
szédos kommutátor szegmens közé van kötve, így a kommutátor szegmenseinek száma is 12. A kefék az 1-es és a 7-es kommutátor szegmenshez kapcsolódnak. A jobboldali keféen keresztül belépő áram szimmetrikus tekercselést feltételezve két egyenlő részre oszlik, két *tekercselési ágon* halad sorosan mindaddig, amíg a kilépő keféig eljut. Ha a két áramutat végigkövetjük a belépő és a kilépő kefék között látszik, hogy a kétpólusú gépnél a 12 tekercselem közül 6-ot (vagyis a tekercselés felét) kötöttük sorosan.

Az egyes tekercselemekben a hornyok  $30^\circ$ -os geometriai szögeltolása miatt  $30^\circ$ -os villamos eltolódással indukálódnak a feszültségek, amelyek közül 6-ot sorosan összegzünk úgy, ahogy azt az 5.8. ábrán láthatjuk. Az ábra alapján megállapíthatjuk, hogy egy egyenáramú gép indukált feszültsége annál simább, minél nagyobb a kefék között sorbakötött, térben eltolt tekercsek száma.

Hangsúlyozzuk, hogy egy valóságos egyenáramú gép ennél bonyolultabb felépítésű, mivel az armatúratekercselésben folyó áram káros hatásainak kiküszöbölésére további tekercseket (*segédpólus-* és *kompenzáló* tekercselés) alkalmazunk, amelyek szerepét és a részletesebb felépítését az 5.5. és 5.6. pontokban adjuk meg.

*kétréteges tekercselés*, azaz a horony egy alsó- és egy felső rétegre bontott (lásd később az 5.12. ábrát). A felső réteg a légréshez közelebb álló réteg. Minden tekercs egyik oldala a felső-, másik oldala pedig az alsó rétegben helyezkedik el. A vezetők (a tekercs oldalainak) bekötése a kommutátorba körívvel ábrázolt. A metszettel ellentétes oldalon elhelyezkedő tekercsfejeket (az áttekinthetőség érdekében csak az 1-es és 7-es hornyokhoz tartozókat rajzoltuk meg) szaggatott vonallal jelöltük.

Az armatúratekercselés összesen 12 tekercsből áll, egy-egy tekercs két szomszédos

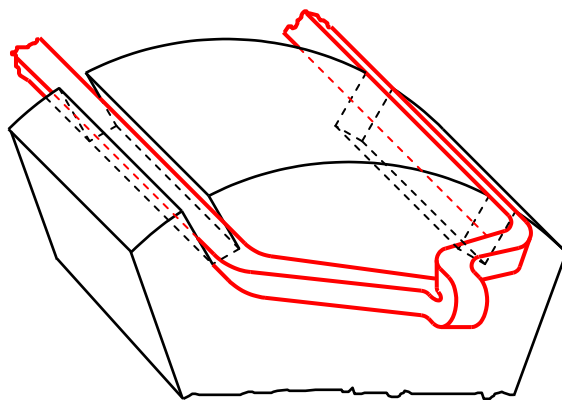


5.8 ábra Az villamosan eltolt vezetőkben indukálódó feszültségek összegzése

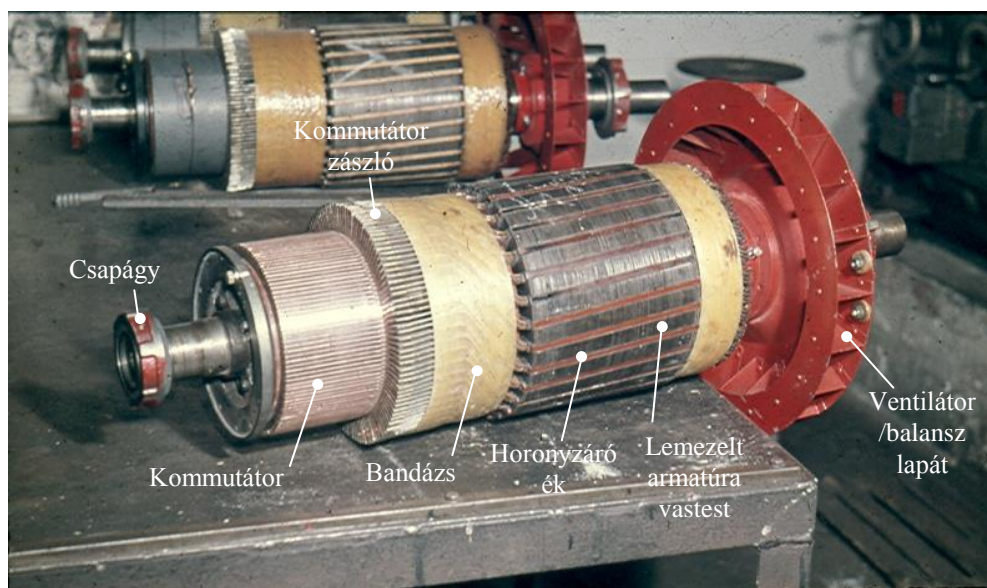


## 5.2. KOMMUTÁTOROS TEKERCSELÉSEK ALAPFOGALMAI

Amennyiben egy egyenáramú gép több mint kétpólusú, armatúratekercselése (amely a hengeres forgórész palástján elhelyezkedő ún. *dobtekercselés*, lásd az 5.9. ábrát) *kétféle*, – elkötésben és a sorbakötött tekercsek számban különböző: – ún. *hurkos*- ill. *hullámos* tekercselrendezéssel készülhet. Az 5.13. és 5.16. ábrákon a tekercselrendezések egy jellemző részletét, az ún. *tekercselési vázlatot* egy négypólusú gép esetére mutatjuk be. A tekercsek végei kommutátor szeletekhez csatlakoznak. A kommutátor, mint mechanikus áramirányító biztosítja, hogy a tekercs pólusához viszonyított helyzetétől függően, megfelelő irányú áram folyjon a tekercsben, illetve generátoros üzemben az adott tekercsoldal a megfelelő polaritású keféhez csatlakozzon.

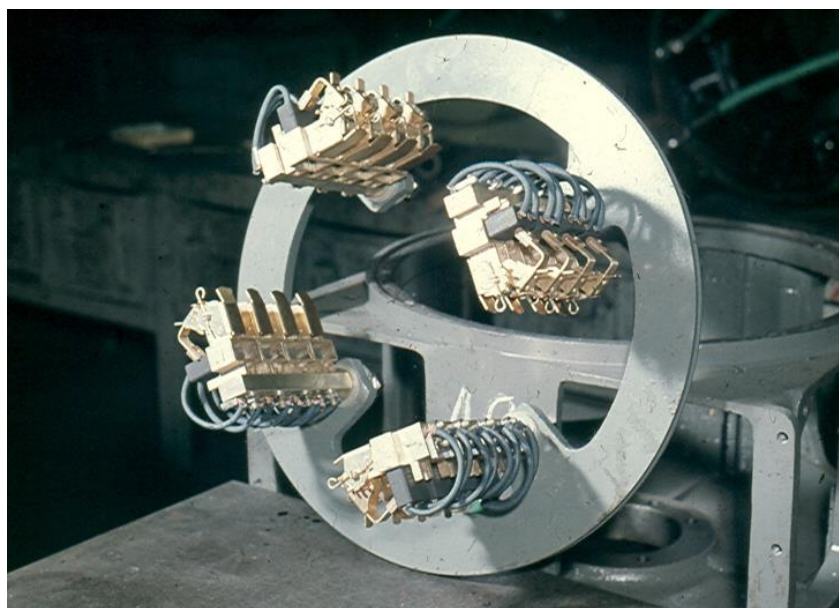


5.9. ábra Armatúra dobtekercselés

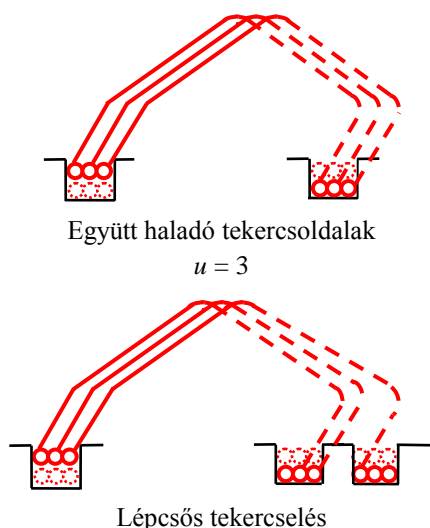


5.1. fénykép Egyenáramú gép armatúrája

Az armatúratekercselés hornyainak számát  $Z$ -vel, a kommutátor szeletek (szegmensek) számát  $K$ -val jelöljük. Mint azt az 5.8 ábra kapcsán már láttuk, a kefékről levett feszültség simaságát és a kommutációt is finomíthatjuk, ha a forgórész egy-egy rétegében elhelyezett tekercset  $u$  részre megosztjuk, és a megosztott tekercs végeit külön-külön kommutátor szelethez vezetjük ki. (A horonyszám növelésének azonban technológiai határt szab a minimális *horonyosztás*, a hornyok és fogak legkisebb használható mérete, ezért a közepes teljesítményű gépek esetén a pólusonkénti horonyszám szokásos értéke: 8...13.) Ekkor a hornyokba rétegenként  $u$  számú tekercsoldal kerül, így a kommutátor szeletszáma a horonyszám  $u$ -szorosa lesz:



5.2. fénykép Négypólusú egyenáramú gép kefetartó szerkezete



5.10. ábra A lépcsős tekercselés értelmezése

$$K = u \cdot Z. \quad (5.5)$$

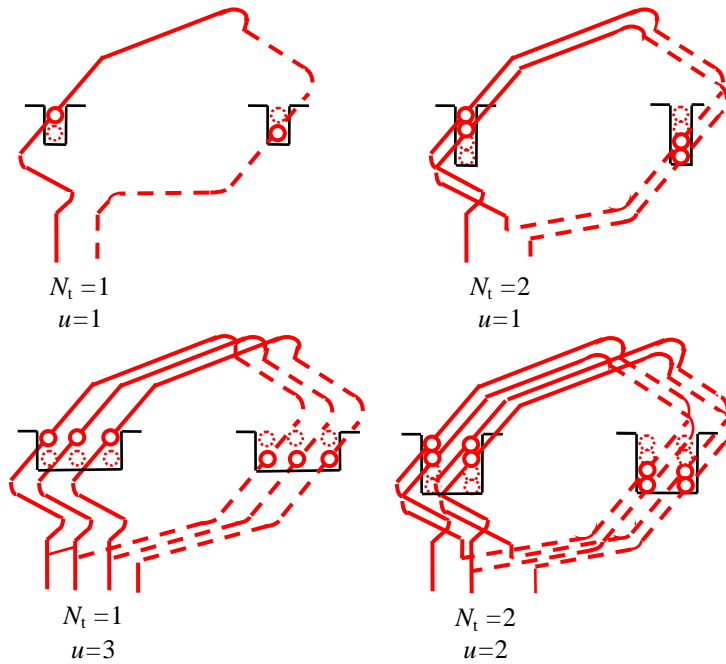
A tekercsoldalszám növelésének kedvező hatását mutatja, hogy pl.: az armatúrán változatlan vezetősámozat feltételezve,  $u = 2$  esetén, a kétszeres szeletszám miatt a szomszédos kommutátorszeletek közötti *szeletfeszültség* a felére, a kommutációs problémákat okozó, és részletebben az 5.6.1. pontban tárgyalt ún. *reaktanciafeszültség* pedig a negyedére csökken:

$$U_{\text{szk}} = \frac{2p \cdot U}{K} \quad \text{és} \quad u_{\text{re}}(t) = L \cdot \frac{di}{dt} = N_t^2 \cdot \Lambda \cdot \frac{di}{dt}$$

Az egyes tekercseket tekercsoldalszámban, vagy horonyosztásban írhatjuk le. A tekercsoldalszámban kifejezett *tekercsszélességet*  $y_1$ -el; az első tekercs lezáró oldalának és a második tekercs kiinduló oldalának távolságát: az ún. *kapcsolási lépést*  $y_2$ -vel; az első és második tekercs kiinduló oldalának távolságát: az *eredő tekercselési lépést* pedig  $y$ -al jelöljük. A *kommutátorlépés* az eredő tekercselési lépés kommutátor szeletosztásban mérve. Egy tekercs szélességét horonyosztásban mérve a *horonylépést* kapjuk:  $y_h = \frac{y_1}{u}$ .

Ha az  $y_h$  horonylépés egész, akkor a kiinduláskor a felső rétegben egy horonyban lévő tekercsoldalak lezáró tekercsoldalai is azonos horonyban lesznek, ellenkező esetben a tekercselés ún. *lépcsős tekercselés* (5.10. ábra).



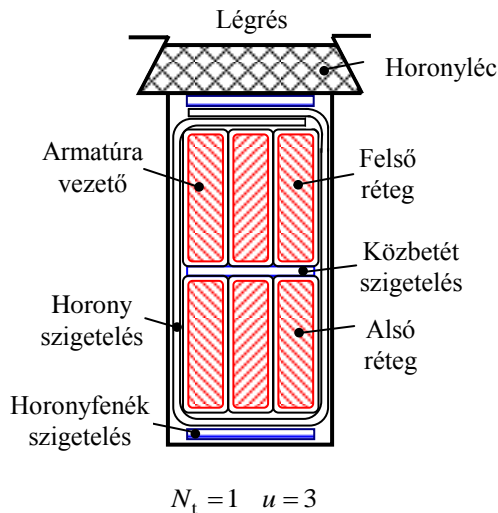


5.11. ábra Az  $N_t$  tekercsmenetszám és az  $u$  tekercsoldalszám értelmezése

A szomszédos szeletek közötti tekercsek menetszámát  $N_t$ -vel jelöljük. Ha egy tekercs csak egyetlen vezetőkeretből áll, akkor rúttekercselésről beszélünk. Az  $u$  tekercsoldalszám valamint az  $N_t$  tekercsmenetszám értelmezése az 5.11. ábra alapján történhet.

Ha az  $y_h = Z/2p$  értékű horonylépés egész szám – vagyis a horonyosztásban mért tekercsszélesség a pólusosztással egyenlő – a tekercselés átmérős. Kommutációs szempontból előnyösebb a lépcsős és a lépésrövidített (a pólusosztásnál kisebb szélességű) tekercselés

alkalmazása. A lépésrövidítés horonyosztásban kifejezve:



5.12. ábra. Az armatúrahorony metszete

$$\varepsilon_h = \frac{Z}{2p} - \frac{y_1}{u} = \frac{Z}{2p} - y_h \quad (5.6)$$

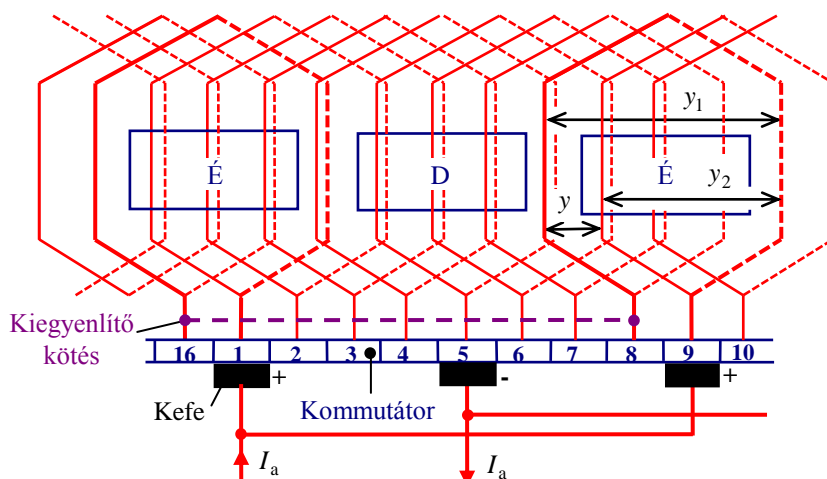
értékű. Negatív érték esetén lépéshosszabbításról beszélünk, ilyenkor azonban a tekercsfejek hosszabbak lesznek.

Az 5.12. ábra egy egyenáramú gép párhuzamos falú armatúrahornyának metszetét mutatja. Mint már említettük, az armatúratekercselés mindig kétréteges.  $Z$  számú hornyot,  $u$  tekercsoldalt és  $N_t$  menetszámú tekercselemet feltételezve az armatúra kerületén elhelyezett, ún. *hatásos vezetők* száma:

$$z = 2 \cdot u \cdot N_t \cdot Z. \quad (5.7)$$

### 5.2.1. Egyenáramú gépek hurkos armatúratekercselése

A hurkos tekercselés jellegzetessége (5.13. ábra), hogy először egy azonos mágneses polaritású főpólus alatti összes vezetőt kötik sorba úgy, hogy a tekercsek végei a szomszédos szeleteken keresztül sorbakapcsolódnak egymással (pl. az 5.13. ábrán felrajzolt hurkos tekercselésnél az 1-es szelethez csatlakozik az első tekercs vége és a második kezdete és így tovább). Az eredő tekercselési és kommutátor lépés hurkos tekercselésnél:

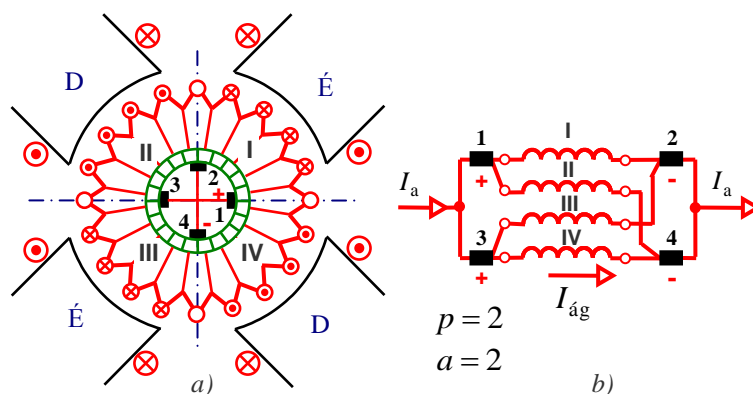


5.13. ábra Egyenáramú gép hurkos armatúratekercselése

$$y = y_k = y_1 - y_2 = 1. \quad (5.8)$$

Az 5.13. ábrán kiemelt vezetőkeretek vasba ágyazott tekercsoldalai azonos villamos fázishelyzetűek, ezért a bennük indukálódó feszültségek elvileg azonosak. Gyártási, vagy egyéb mágneses aszimmetriák miatt a gyakorlatban előfordulhat, hogy a feszültségek eltérnek egymástól. Mivel az azonos polaritású keféket az ábrán látható módon párhuzamosítják egymással, kiegyenlítő áram folyhatna a csúszó kontaktuson, a keféken és a külső összekötésen keresztül. Ennek elkerülésére az ekvipotenciális pontokat még a kommutátor előtt összekötik egymással, ez az 5.13. ábrán is bejelölt ún. *kiegyenlítő kötés*. Kiegyenlítő kötések csak akkor készíthetők, ha  $K/p$  egész szám.

Az egyenáramú gépek kommutátoros armatúratekercselése ún. *önmagában záródó tekercselés*, amelyet egy négy-pólusú gépre egy kicsit a szokásostól eltérő alakban az 5.14a ábrán rajzoltunk fel (a kommutátorszeletek között sorbakötött aktív tekercsoldalakat egy-egy kis kör jelöli).



5.14. ábra A hurkos tekercselés párhuzamos ágainak magyarázata  
a) térbeli elrendezés; b) a tekercselés másképpen rajzolt vázlata

$$a = p, \quad (5.9)$$

vagyis az ágpárok száma megegyezik a póluspárok számával. Azonos hatásos vezetősá-  
mot feltételezve tehát a póluspárok számának növekedésével együtt növekszik a párhuza-  
mosan kötött ágak-, csökken viszont a kefék között sorosan kötött vezetőkeretek száma.  
Ebből következik, hogy a hurkos armatúratekercselést nagyáramú, kisértékű gépek ké-  
szítésénél alkalmazzák. A tekercselemekben folyó *ágáram* és az armatúraáram közötti  
összefüggés:

$$I_{\text{ág}} = \frac{I_{\text{a}}}{2a}. \quad (5.10)$$

A hullámos tekercselés először sorbaköt a kerület mentén minden pólus alatt kb. egy-egy pólusosztásra fekvő vezetőt, és így ér vissza egyjáratú tekercselésnél a kiindulási szelet mellé (5.15. ábra). Körbe haladva tehát az  $y_k$  kommutátorlépést tehát annyszor tesszük meg, amennyi a póluspárok száma, így írhatjuk:  $p \cdot y_k \pm 1 = K$ , amiből:

$$y_k = \frac{K \mp 1}{p}. \quad (5.11)$$

### 5.15. ábra Négypólusú egyenáramú gép hullámos armatúratekerceslése

$$y = y_k = y_1 + y_2.$$

Hullámos tekercselés esetén valamelyik kommutátor szeletből kiindulva az egyik irányban az összes hornyot végigjárjuk amíg az ellenkező polaritású keféhez érünk (lásd majd 5.16. ábrát). A másik irányban indulva, a tekercsoldalak másik felét érintjük. Ezért hullámos tekercselésnél a póluspárok számától függetlenül alakul a párhuzamos ág párok száma:

A hurkos tekercselésre kapott összefüggéssel összehasonlítva nagyobb póluspárszámok esetén kevesebb hatásos vezetőt kötünk párhuzamosan és többet sorosan. Ebből következik, hogy a hullámos armatúratekercselést inkább nagyobb feszültségű-, kisáramú gépek készítésénél alkalmazzák.

### 5.16. ábra Egyenáramú gép hullámos armatúratekercselése

Hullámos tekercselésnél az egyik kettőtől elindulva a másikig mindkét irányban mindegyik hornyon végighaladunk. A két párhuzamos ágban egyenlő nagyságú feszültség indukálódik, vagyis hullámos tekercselésnél nincs szükség kiegyenlítő kötésekre. Annak

ellenére, hogy a hullámos tekercselésnél elegendő egyetlen kefépár alkalmazása, a keféáram csökkentése érdekében a hurkos tekercseléshez hasonlóan  $p$ -számú kefépárt alkalmazhatnak.

Az egyenáramú gép armatúratekercselése egy-, vagy többjártú lehet, a járatszám jelölésére az  $m$  betűt használják.  $m$  járatú tekercselés esetén az armatúra hornyaiban  $m$  számú, azonos, és egymástól teljesen független tekercselést helyezünk el (a horonyszámnak  $m$ -el oszthatónak kell lennie), amelyeket széles kefék alkalmazásával egymással párhuzamosan kötünk.

A párhuzamos kapcsolás miatt megnövekszik az ágpárok száma:

$$\text{Hurkos tekercselés esetén:} \quad a = m \cdot p, \quad (5.13)$$

$$\text{Hullámos tekercselés esetén:} \quad a = m. \quad (5.14)$$

A járatok növelésével tehát  $m$ -szeresére növelhető a gép áramterhelhetősége. A gyakorlatban kettőnél nagyobb járatszámú tekercselést nem készítenek.

### 5.3. AZ EGYENÁRAMÚ GÉP INDUKÁLT FESZÜLTSEGE ÉS NYOMATÉKA

Mielőtt az egyenáramú gép indukált feszültségét és nyomatékát meghatároznánk, az 5.17. ábra alapján vizsgáljuk meg egy kissé részletesebben az egyenáramú gép légrésindukció eloszlását, azaz mezőgörbét!

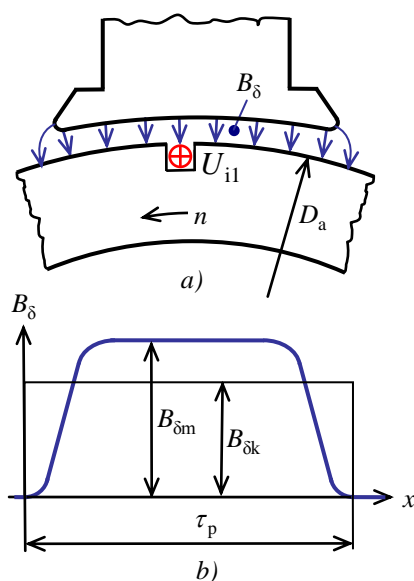
A gép fluxusát az 5.17b ábrán vastagon kihúzott, mezőgörbe alatti terület határozza meg, amelynek alakja alapvetően a főpólussarú alakjától függ. Valamilyen módszerrel (pl. planimetrálással) meghatározva és a teljes pólusosztásnyi hosszra átlagolva ezt a területet a vonalkázott téglalap magasságaként az ún.

*közepes légrésindukciót* kapjuk, amelyet a továbbiakban  $B_{\delta k}$ -val fogunk jelölni.

A közepes légrésindukció úgy helyettesíti a valóságos eloszlást, mintha az indukció a légrésben mindenhol állandó lenne (megkönnyítve ezzel további számításainkat). Más megközelítésben a mezőgörbe alatti területet a fellépő  $B_{\delta m}$  maximális indukció magasságú téglalappal helyettesítve a téglalap szélessége  $b_i$  lesz, amit *ideális pólusív-szélességnek* neveznek. Az elmondottakból következik, hogy:

$$\alpha_i = \frac{b_i}{\tau_p} = \frac{B_{\delta k}}{B_{\delta m}}. \quad (5.15)$$

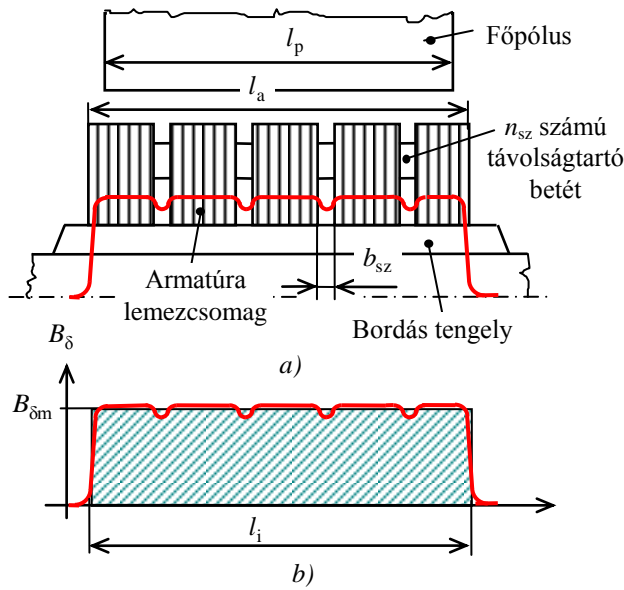
5.17. ábra Az egyenáramú gép pólusfluxusa és mezőgörbéje  
a) fluxus erővonalak; b) mezőgörbe



A főpólussarú alakjától függő pólusív-szélesség szokásos értéke  $\alpha_i = 0,63 \dots 0,67$ .



A gép fluxusának meghatározásához ismernünk kell az armatúrának azt a tengelyirányú méretét, amellyel számolhatunk. Az 5.18a ábra nagyon leegyszerűsítve az armatúra



5.18. ábra Az armatúra vastest hosszirányban

vastestet mutatja hosszirányban. Az  $l_a$  hosszúságú armatúrát a gép hűtésének elősegítésére távolságtartó betétekkel csomagokra, ún. *pakett*-ekre bontják. Az 5.18a ábrába vastagabb vonallal berajzoltuk a légrésindukció hosszirányú eloszlását, amelyet 5.18b ábrában külön is megismételtünk.  $B_{\delta m}$  maximális indukcióval számolva a görbe alatti terület  $l_i$  szélességű téglalapot ad.  $n_{sz}$  számú,  $b_{sz}$  szélességű szellőző betétet feltételezve az ún. *ideális armatúrahossz*:

$$l_i = \frac{l_a + l_p}{2} - \frac{n_{sz} \cdot b_{sz}}{2}. \quad (5.16)$$

(5.16)-ban  $l_i$  az a hossz, amelyet a vezetőkben indukálódó feszültség számításánál figyelembe kell vennünk. Az eddig megismert jellemzőkkel az egyenáramú gép légrésfluxusa:

$$\Phi = B_{\delta k} \cdot \tau_p \cdot l_i = B_{\delta m} \cdot b_i \cdot l_i. \quad (5.17)$$

### 5.3.1. Az egyenáramú gépek indukált feszültsége

A forgórészt  $v_a$  kerületi sebességgel forgatva az egyetlen armatúravezetőben indukálódó feszültség:

$$U_{i1} = B_{\delta k} \cdot l_i \cdot v_a = B_{\delta k} \cdot l_i \cdot D_a \cdot \pi \cdot n.$$

$z$ -számú hatásos armatúravezetőt és  $a$  ágpárt feltételezve a kefék között sorbakötött vezetők száma  $z/2a$ , így az ellentétes polaritású kefék között mérhető indukált feszültség (figyelembe véve még, hogy az armatúra kerülete  $D_a \cdot \pi = 2p \cdot \tau_p$ ):

$$U_i = \frac{z}{2 \cdot a} \cdot B_{\delta k} \cdot l_i \cdot 2p \cdot \tau_p \cdot n = \frac{z \cdot p}{a} \cdot \Phi \cdot n = k_U \cdot \Phi \cdot n, \quad (5.18)$$

azaz az egyenáramú gép indukált feszültsége az (5.18) összefüggés alapján a gép fluxusával, fordulatszámaival és egy a gép tekercselésétől függő  $k_U$  feszültség-állandóval arányos.

Az 5.2. pontban tárgyaltuk, hogy egyjáratú hurkos tekercselés esetén az ágpárok száma  $a = p$ , hullámos tekercselésnél pedig csak  $a = 1$ . Ezért a hullámos tekercseléssel nagyobb feszültségű, de kisebb áramú gép készíthető. Felhasználva, hogy a mechanikai szögsebesség  $n = \frac{\omega}{2\pi}$ , az (5.18) összefüggés a következő alakban is megadható:

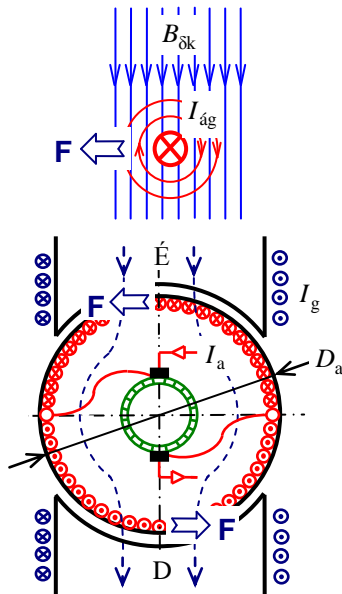
$$U_i = k_U \cdot \Phi \cdot \frac{\omega}{2\pi} = \frac{z \cdot p}{a} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \Phi \cdot \omega = c \cdot \Phi \cdot \omega, \quad (5.19)$$

vagyis az indukált feszültség a fluxussal és a mechanikai szögsebességgel arányos.

### 5.3.2. Az egyenáramú gépek nyomatéka

Az indukált feszültségnél alkalmazotthoz hasonló okoskodással könnyen megkaphatjuk az egyenáramú gép armatúra nyomatékát (5.19. ábra) is. A  $z$ -számú vezetőre ható nyomaték:

$$M_a = \frac{z}{2} \cdot B_{\delta k} \cdot l_i \cdot I_{\text{ág}} \cdot D_a = \frac{z}{2} \cdot B_{\delta k} \cdot l_i \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot \frac{2p \cdot \tau_p}{\pi} = \frac{z \cdot p}{a} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot B_{\delta k} \cdot l_i \cdot \tau_p \cdot I_a = \frac{z \cdot p}{a} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \Phi \cdot I_a, \quad (5.20)$$



5.19. ábra Az egyenáramú gép nyomatékának számítása

vagyis az egyenáramú gép nyomatéka az

$$M_a = k_M \cdot \Phi \cdot I_a = c \cdot \Phi \cdot I_a \quad (5.21)$$

összefüggés szerint a gép fluxusával, armatúraáramával és egy a gép tekercselésétől függő nyomaték-állandóval arányos.

(5.18) és (5.20) továbbá megmutatja, hogy a  $k_M$  nyomatékkonstans a  $k_U$  feszültség-konstans  $2\pi$ -ed része. Továbbá az (5.20) és (5.21) összefüggések alapján látszik, hogy a  $k_M$  nyomaték-konstans és az (5.19)-ben bevezetett  $c$  gépkonstans megegyeznek egymással.

A gép nyomatékát más módszerrel is megkaphatjuk. Ideálisnak tekintett motor esetén (elhanyagolva a vas- és súrlódási veszteségeket) az armatúrába bevezetett ún.  $P_b$  villamos *belső teljesítmény* a  $P_a$  mechanikai teljesítménnyé alakul át:

$$P_b = U_i \cdot I_a = P_a = M_a \cdot \omega. \quad (5.22)$$

Az (5.22) összefüggésből a nyomatékot kifejezve:

$$M_a = \frac{U_i \cdot I_a}{\omega} = \frac{z \cdot p}{a} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \Phi \cdot \omega \cdot \frac{I_a}{\omega} = c \cdot \Phi \cdot I_a$$

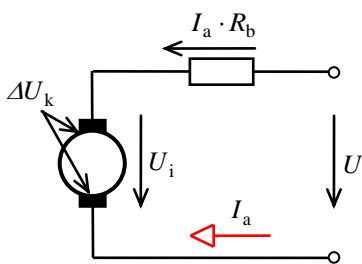
Nem ideális esetben a vas- és súrlódási veszteségek a tengelyen leadott nyomatékot csökkentik:

$$M = M_a - M_{\text{vas}} - M_{\text{s+v}}. \quad (5.23)$$

## 5.4. AZ EGYENÁRAMÚ GÉP HELYETTESÍTŐ KAPCSOLÁSI VÁZLATA ÁLLANDÓSULT ÜZEMBEN

Az állandósult állapotban üzemelő egyenáramú gép helyettesítő kapcsolási vázlatai az 5.20. és 5.21. ábrákon láthatók.

Generátoros üzemben az armatúrát egy meghajtó géppel forgatjuk. A gép a bevitt mechanikai teljesítményt az armatúrában villamos teljesítménnyé alakítja át. Ebből adódnak az 5.20. ábrában felrajzolt feszültség- és áramirányok: az armatúrában indukálódó



5.20. ábra Az egyenáramú gép helyettesítő kapcsolási vázlata generátoros üzemben

feszültség és az armatúratekerceselésben folyó áram a termelő jellegből adódóan ellentétes irányúak. Az armatúrakör feszültségeit az indukált feszültség biztosítja, így az armatúrakör feszültségegyenlete:

$$U = U_i - I_a \cdot R_b - \Delta U_k, \quad (5.24)$$

ahol  $U$  a kapocsfeszültség,  $R_b$  az armatúrakör *belső ellenállása*,  $\Delta U_k$  pedig a kefeátmeneteken fellépő soros feszültségeések összege, ún. *kefeátmeneti*

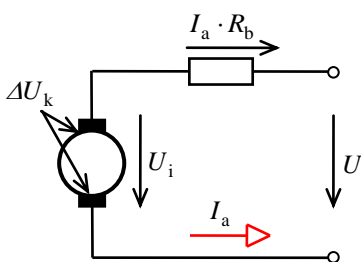
*feszültségeések*.  $\Delta U_k$  függ az alkalmazott kefék anyagától, értékét (ha egyéb adat nem áll rendelkezésünkre) 2 V-nak vehetjük, vagy sok esetben elhanyagolhatjuk. A gép  $R_b$  belső ellenállása a következő, kapocstáblán belüli ellenállásokból tevődhet össze:

$$R_b = R_a + R_{sp} + R_{ko} + R_{sg}, \quad (5.25)$$

ahol  $R_a$  az armatúra-,  $R_{sp}$  a segédpólus-,  $R_{ko}$  a kompenzáló-,  $R_{sg}$  a soros gerjesztő tekercselés ellenállása (az egyes tekercsek szerepét a későbbiekben részletesen tárgyalni fogjuk).

A generátor feszültségegyenletéből következik, hogy generátoros üzemben a gép indukált feszültsége nagyobb a kapocsfeszültségnél:  $U_i \geq U$

Motoros üzemben ezzel szemben a hálózat hajtja át az armatúrakörben az áramot, a



5.21. ábra Az egyenáramú gép helyettesítő kapcsolási vázlata motoros üzemben

motor a bevitt villamos teljesítményt alakítja át mechanikai teljesítménnyé. Az armatúra most egy villamos fogyasztó, az armatúrában indukálódó feszültség és az armatúratekerceselésben folyó áram azonos irányúak (5.21. ábra). A feszültségeéseket a hálózat fedezi, így írható:

$$U = U_i + I_a \cdot R_b + \Delta U_k. \quad (5.26)$$

(5.26)-ból látható, hogy motoros üzemben a ka-

pacsfeszültség nagyobb az indukált feszültségnél:  $U \geq U_i$ .

(5.26)-ba beírva az indukált feszültség értékét és elhanyagolva a kefeátmeneti feszültségeések értékét a következő egyenletet kapjuk:

$$U = k_U \cdot \Phi \cdot n + I_a \cdot R_b. \quad (5.27)$$

A gép indulásának pillanatában a fordulatszám nulla – ezért a gépnek nincs indukált feszültsége – így a teljes tápfeszültség az armatúrakör ellenállására esik. Mivel az egyenáramú gép belső ellenállása kicsi, névleges feszültségről táplálás esetén rendkívül nagy indítási áramok alakulhatnak ki, amit a gép nem visel el. Az áramok korlátozására az armatúrakör ellenállását külső, *indító ellenállással* kell megnövelnünk. Ekkor az armatúrakör összes ellenállása (amit a továbbiakban  $R$ -el fogunk jelölni):

$$R = R_b + R_k. \quad (5.28)$$

A fordulatszámot az alkalmazás szempontjából fontosabb motoros üzemre (5.27)-ből kifejezve az általánosan érvényes fordulatszám-egyenletet kapjuk:

$$n = \frac{U - I_a \cdot R}{k_U \cdot \Phi} = \frac{U}{k_U \cdot \Phi} - \frac{R}{k_U \cdot \Phi} \cdot I_a. \quad (5.29)$$

A fordulatszám-egyenlet megmutatja, hogy a motor fordulatszáma az  $U$  kapocsfeszültségtől, az armatúrakör  $R$  összellenállásától, a gép  $\Phi$  fluxusától és terhelésének mértékétől (az  $I_a$  armatúraáramtól) függ. A gép fluxusát a mágneses kör gerjesztésével a gerjesztőtekercsben folyó  $I_g$  áram hozza létre (lásd bővebben az 5.7.2. pontban). Mivel a gép fluxusa a nevezőben szerepel, a gép indításakor – és üzemelése közben is – ügyelnünk kell a gerjesztőáram meglétére. A gerjesztőáram lecsökkenése vagy megszűnése a fordulatszám növekedését, súlyosabb esetben a gép *megszaladását* okozhatja.

Villamos hajtások vizsgálatakor a fordulatszám helyett inkább a mechanikai szögsebességet használjuk:

$$\omega = \frac{U - I_a \cdot R}{c \cdot \Phi} = \frac{U}{c \cdot \Phi} - \frac{R}{c \cdot \Phi} \cdot I_a, \quad (5.30)$$

ahol  $c$  az (5.19)-ből ismert, armatúratekercseléstől függő gépállandó.

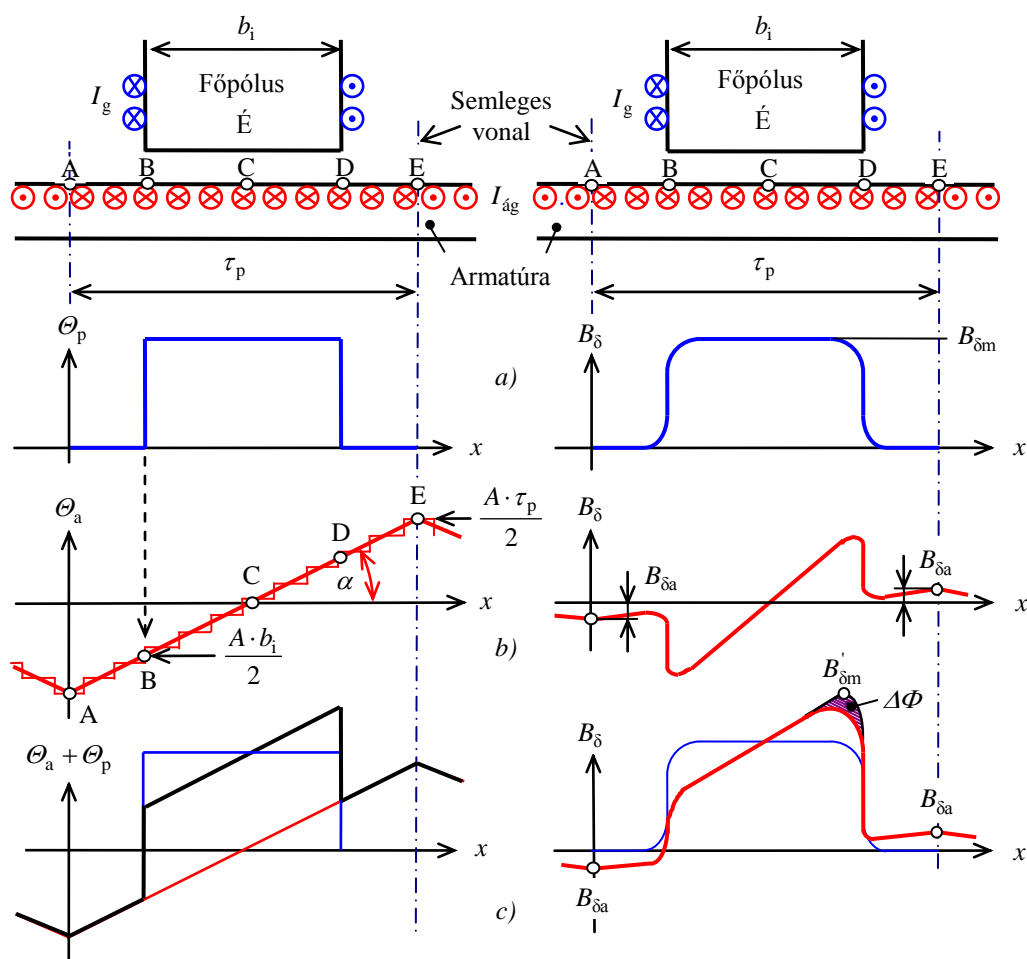
## 5.5. AZ ARMATÚRAVISSZAHATÁS, A SZELETFESZÜLTSG ÉS A KOMPENZÁLÁS

### 5.5.1. Az armatúravisszahatás

Az egyenáramú gépet terhelve, az armatúratekercselésben áram indul meg, az áramtól átjárt vezetők mágneses tere befolyásolja a főpólusok által létrehozott mágneses teret és a gép üzemét. Az armatúraáramnak ezt a mágneses teret módosító (torzító) hatását nevezzük *armatúravisszahatásnak*, vagy *armatúrareakciónak*.

Az 5.22. ábrán a két semleges vonal közötti részt kiterítve ábrázoltuk úgy, hogy az ábrák bal oldali részén a gerjesztéseket, a jobboldali részén pedig a gerjesztések által okozott légrésindukció-eloszlásokat rajzoltuk fel.

Az 5.22a ábrán csak a főpólusok gerjesztettek (a főpólus gerjesztését vonalszerűnek tekintettük), így a már megismert mezőgörbe alakul ki. Ebben az esetben egy valóságos, kis gép esetén kialakuló erővonalképet az 5.23a ábrán mutatjuk be. A szemléletesség kedvéért a keféket átrajzoltuk azokhoz a tekercsoldalakhoz (lásd 5.23a ábrán a vízszintes helyzetet), amelyekben a kommutáció történik.



5.22. ábra A gerjesztések és mezőgörbék térbeli eloszlása

a) csak a főpólus gerjesztett; b) csak az armatúratekercselés gerjesztett; c) a főpólus és az armátúra együtt gerjesztett

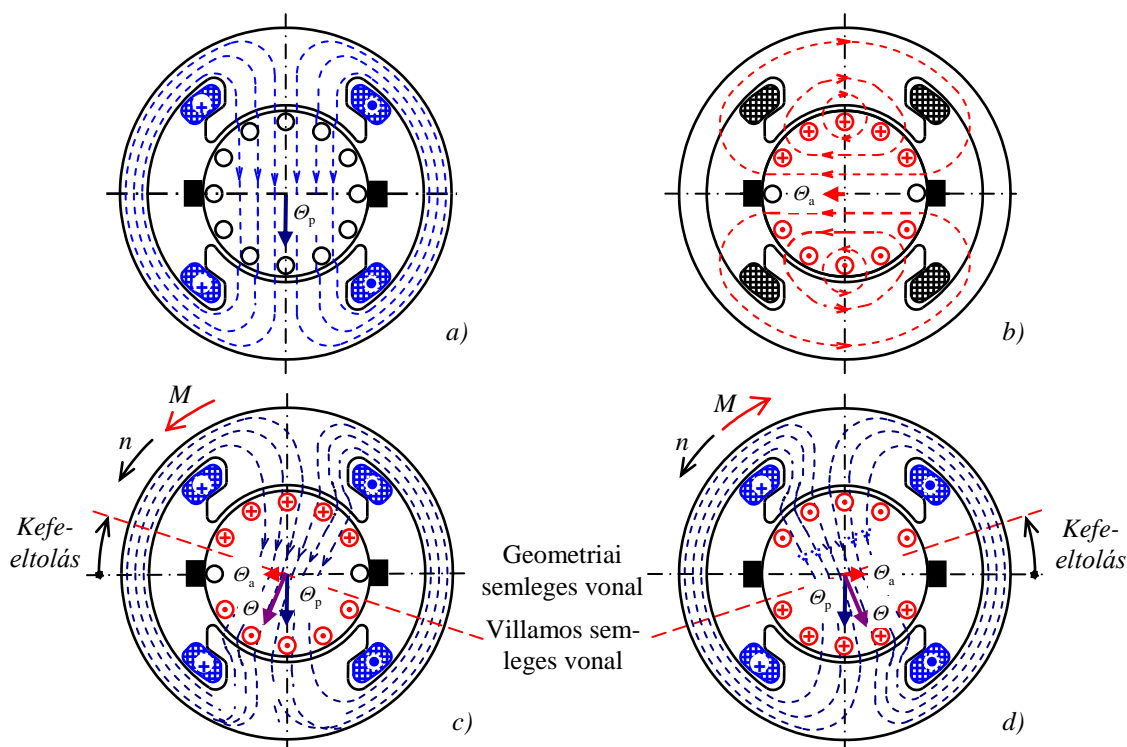
Az 5.22b ábrán külső forrás segítségével csak az armatúratekercselésen kényszerítünk át áramot, a főpólusok gerjesztetlenek. Két szomszédos semleges vonal között az armatúratekercselésben folyó  $I_{ág}$  áramok azonos irányúak, a semleges vonalat átlépve az áramok irányát a kommutátor megfordítja. A semleges vonalban lévő A pontból kiindulva minden egyes horonyban az elhelyezett vezetők gerjesztése egy-egy gerjesztéslépcsővel növeli az előző gerjesztést egészen a következő semleges vonal eléréséig (E pont). Könnyen belátható, hogy a hornyok számát növelve a gerjesztési görbe az 5.22b ábrán vastagon kihúzott  $\alpha$  hajlásszögű egyenesbe megy át. Ennek az egyenesnek a meredeksége: az ún. *kerületi áram* azt mutatja meg, hogy armatúra kerületén mekkora az egységnyi hossza eső gerjesztésváltozás:

$$A = \frac{I_{ág} \cdot z}{D_a \cdot \pi}. \quad (5.31)$$

A kerületi áram értéke a gép tekercselése kihasználtságának fontos jellemzője, amely természetesen arányos a gép armatúraáramával.

A kerületi áram segítségével könnyen meghatározható a fellépő armatúragerjesztés nagysága a főpólus szélén (5.22b ábra):





**5.23. ábra** Kisteljesítményű egyenáramú gépben kialakuló erővonalképek

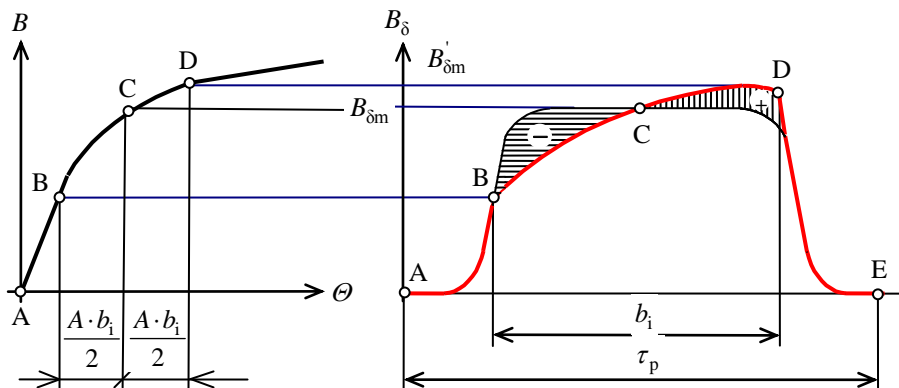
a) csak a főpólus gerjesztett; b) csak az armatúra gerjesztett; c) motoros üzemmód: a főpólus és az armatúra is gerjesztett; d) generátoros üzemmód: a főpólus és az armatúra is gerjesztett

$$\Theta_{ai} = A \cdot \frac{b_i}{2}, \text{ illetve a semleges vonalban: } \Theta_a = A \cdot \frac{\tau_p}{2}.$$

Az armatúrágerjesztés hatására keletkező indukcióeloszlást az ábra jobboldali része mutatja. A főpólussarú alól kikerülve a légrés jelentősen megnő, az indukció pedig lecsökken. Lényeges, hogy a semleges vonalban a légrésindukció nem nulla, hanem a  $\Theta_a$  nagyságú armatúra-reakció  $B_{\delta a}$  nagyságú légrésindukciót okoz. Az 5.23a ábra gerjesztetlen armatúra, az 5.23b ábra pedig gerjesztetlen főpólus esetén mutatja a kialakuló erővonalképet.

Az 5.22c ábrán a főpólusokat és az armatúrát együtt gerjesztjük, a mezőgörbe a pólus- és armatúrágerjesztés összegének hatására jön létre. A geometriai semleges vonalban az armatúra-reakció miatt a légrésindukció és egyben a kommutáló vezetőkben indukálódó feszültség sem lesz zérus, a villamos semleges vonal eltolódik úgy, ahogy azt egy motor esetében a 5.23c ábrán láthatjuk. Mivel a kefék a kommutáló vezetőkereteket rövidre zárják, a kommutáló menetben a keféken keresztül járulékos áram indul, ami rontja a gép következő pontban tárgyalt kommutációját. A probléma megszüntethető, ha a keféket a villamos semleges vonalba toljuk el. Ennek a villamos semleges vonalnak a helyzete azonban a terhelés nagyságától, a forgásiránytól és a gép üzemmódjától (motor ill. generátor) is függ. A 5.23c ábra alapján belátható, hogy motor esetén a keféket a forgásiránnyal szemben kell eltolnunk. A 5.23d ábrán a generátort a meghajtó gép a megadott irányban forgatja, a generátoros üzemmódból adódóan azonban az armatúraáram (és ezzel együtt a nyomaték) iránya is ellentétes mint a 5.23c ábrán ábrázolt motor esetében. Látható hogy generátor esetén a ke-

féket a forgásirányba kell eltolni. A kefeeltolás – mint módszer – tehát csak egy konkrét üzemállapotban képes megoldani az armatúreakció által okozott problémát, változó terhelésnél, forgásiránynál ill. üzemmódnál nem használható. A probléma megoldására a gépekben egy a semleges vonalba helyezett újabb pólust, a *segédpólust* használjuk. A segédpólus feladatait a következő, 5.6. pontban tárgyaljuk részletesen.



5.24. ábra Az armatúreakció fluxuscsökkentő hatása

Az 5.23c ábra alapján látható továbbá, hogy a pólusgerjesztés és az armatúragerjesztés a főpólus baloldali részén egymás ellen hatnak, a jobboldali részen pedig erősítik egymást. A gép mágneses körét a jó kihasználtság érdekében úgy méretezik, hogy a főpólusgerjesztés névleges értékénél fellépő  $B_{\delta m}$  maximális indukció (C-jelű pont az 5.24. ábrában) a mágnesezési görbe könyökpontjának környékére essék. Ezért a főpólussarú jobb szélén az armatúreakció által okozott többletgerjesztés a mágneses kört betelíti (D-pont), míg a bal széli csökkenés a mágnesezési jelleggörbe kevésbé telített szakaszára esik (B-pont). Az 5.24. ábra jobboldali részén kiszínezettük a mezőgörbe armatúreakció hatására történő megváltozását. Vízszintes vonalkázással jelöltük az eredeti mezőgörbéhez képesti csökkenést, függőlegessel pedig a növekedést. Az említett telítésből következik, hogy a +al jelölt növekedés kisebb, mint a –al jelölt csökkenés, vagyis fluxuscsökkenés lép fel. Az 5.22c ábrában vonalkázással jelöltük be a fluxuscsökkenéssel arányos mezőgörbe területet.

### 5.5.2. A szeletfeszültség

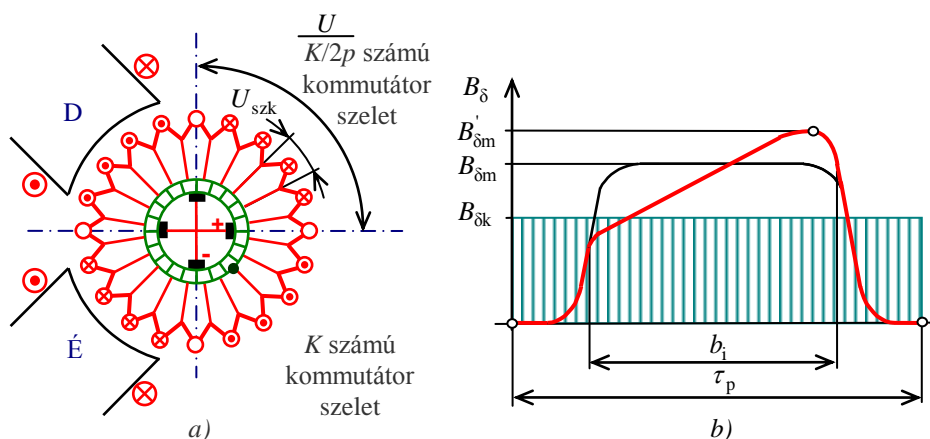
Az  $u_{sz}$  szeletfeszültség a kommutátor két szomszédos szelete között fellépő feszültség. Állandó fordulatszámot feltételezve az  $-u_i = B_{\delta} \cdot l_i \cdot v_a$  összefüggésnek megfelelően – az adott helyen fellépő légrésindukcióval arányos:  $u_{sz} = C \cdot B_{\delta}$  (a  $C$  állandó a géptől függő arányossági tényező). Ezért a szeletfeszültség középértéke üresjárásban (amikor nincs armatúravisszahatás) a közepes légrésindukcióval, maximális értéke a mindenkoros indukció maximális értékével arányos:

$$u_{szk} = C \cdot B_{\delta k}, \text{ és } u_{szm} = C \cdot B_{\delta m}. \quad (5.32)$$

Az (5.15) és az (5.32) összefüggések alapján írható:

$$\frac{U_{szm}}{U_{szk}} = \frac{B_{\delta m}}{B_{\delta k}} = \frac{1}{\alpha_i} \approx \frac{1}{0,65}. \quad (5.33)$$

A szeletfeszültség megengedhető maximális értéke egy már begyújtott villamos ív (a rossz kommutáció okozta szikrázás) fennmaradási/égési feszültségével függ össze, amelynek értéke kb. 35 V. Ekkor ugyanis a keletkező szikra tartósan fennmaradhat, és fokozatosan körbeveheti a kommutátor kerületét, vagyis *körtűzzé* fajulhat. A körtűz kialakulása természetesen nem engedhető meg, mert nagyon rövid idő alatt tönkretelheti a kommutátor felületét és a keféket.



**5.25. ábra** A szeletfeszültség értelmezése

a) az  $U$  kapcsolófeszültség  $K/2p$  számú szeletre jut; b) a mezőgörbe torzulása terheléskor

Ha üresjárást feltételezünk, a két ellentétes polaritású kefe között  $K/2p$  számú kommutátorszelet helyezkedik el és a fellépő feszültség középértéke a kapcsolófeszültséggel egyezik meg (lásd az 5.25a ábrát). A szeletfeszültség középértékének megengedhető értéke  $\alpha_i$ -től függően:

$$U_{szk} = U / (K / 2p) = \alpha_i \cdot U_{szm} = \alpha_i \cdot 35 = 21 \dots 24 \text{ V}. \quad (5.34)$$

Terhelt (és a következőkben tárgyalt kompenzálatlan) gép esetén a mezőgörbe az 5.25b ábrának megfelelően torzul, a maximális indukció  $B_{\delta m}$ -ról  $B'_{\delta m}$ -ra nő meg, ezért a szeletfeszültség megengedhető középértéke még tovább csökken. A mágneses kör méretezésével elérhető, hogy a terhelt esetben fellépő  $B'_{\delta m}$  maximális indukció ne haladja meg a közepes érték kétszeresét. Ehhez az szükséges, hogy a légrés és az armatúrafog gerjesztésszükségletének összege nagyobb legyen, mint az armatúrareakció a főpólussarú szélén:

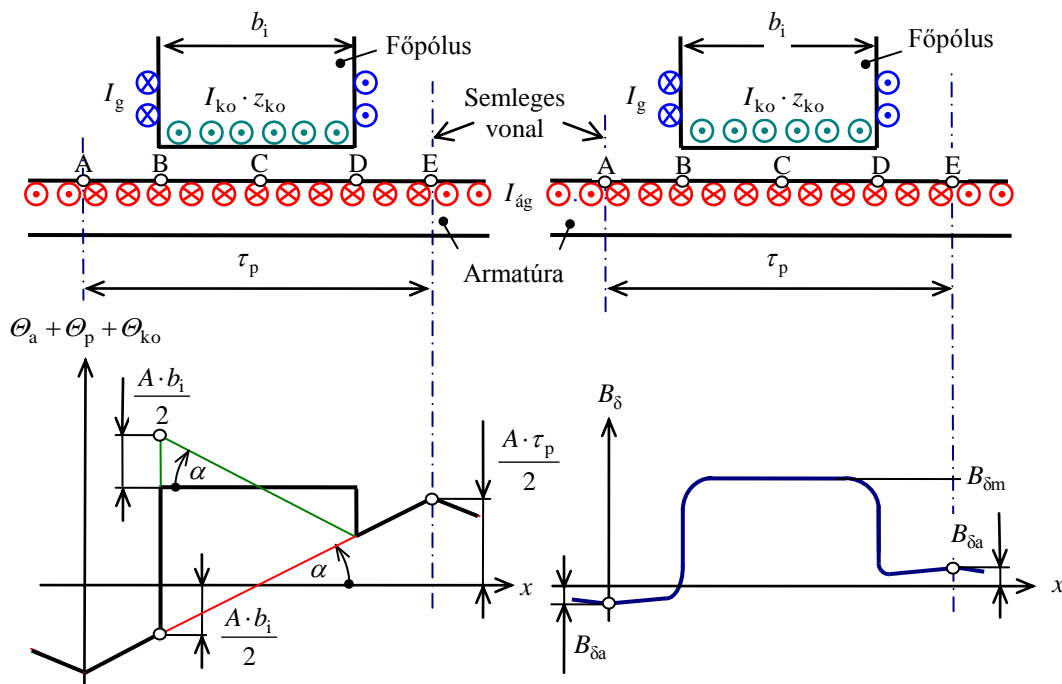
$$\frac{U_{m\delta} + U_{mf}}{A \cdot b_i} \geq 1.$$

Ezt teljesítve terhelt, kompenzálatlan gép esetén a szeletfeszültség középértékének megengedhető értéke maximálisan:

$$U_{szk} = \frac{U}{\frac{K}{2p}} = \frac{U_{szm}}{2} \approx \frac{35}{2} = 17,5 \text{ V lehet.}$$

### 5.5.3. A kompenzálás

Ahogy azt az előző pontban láttuk, a fluxus csökkenése és a mezőgörbe torzulása a főpólusok alatt az armatúravisszahatás káros következménye. Motorok esetén a fluxus-csökkenés labilissá teheti a fordulatszám-nyomaték karakterisztikát és csökkenti a gép terhelhetőségi határait. Ezért nagyobb (kb. 10 kW feletti), vagy jelentősen változó terheléssel dolgozó gépek főpólussarú-hornyaiba helyezett ún. *kompenzáló tekercseléssel* törekednek a mezőgörbe torzulásának megszüntetésére, vagy mérséklésére úgy, ahogy azt 5.26. ábra mutatja.



5.26. ábra A gerjesztések és mezőgörbe térbeli eloszlása a főpólus, az armatúra- és a kompenzáló tekercselés gerjesztésekor

Mivel a mezőtorzulás a terheléssel arányos armatúraáram hatására jön létre az automatikus kiegyenlítés érdekében kompenzáló tekercselésen is az armatúraárammal arányos áramnak kel átfolytynia.  $z_{ko}$ -val jelölve a kompenzáló tekercselés egy főpólusban elhelyezett vezetőinek számát  $I_{ko}$ -val pedig a vezetőkben folyó áramot az 5.26. ábrán felrajzolt 100 %-os (a főpólusok alatt az eredeti mezőgörbét gyakorlatilag visszaállító) kompenzáció esetén a szükséges vezetőszám:

$$z_{ko} = \frac{A \cdot b_i}{I_{ko}}, \quad (5.35)$$

ahol  $I_{ko} = c \cdot I_a$  ( $c_k$  a kompenzáló tekercsek kapcsolásától függő konstans). A gyakorlatban nem mindig szoktak 100 %-os kompenzációt alkalmazni.  $z'_{ko}$ -ra csökkentve a kompenzáló vezetők számát a kompenzációs fok százalékos értéke:

$$k, \% = \frac{I_{ko} \cdot z'_{ko}}{A \cdot b_1} \cdot 100. \quad (5.36)$$

Fontos megjegyeznünk, hogy a kompenzáló tekercselés csak a főpólusok alatt szünteti meg az armatúreakció mezőtörzítő hatását, így önmagában a segédpólust nem helyettesítheti.

## 5.6. A KOMMUTÁCIÓ ÉS A SEGÉDPÓLUS SZEREPEI

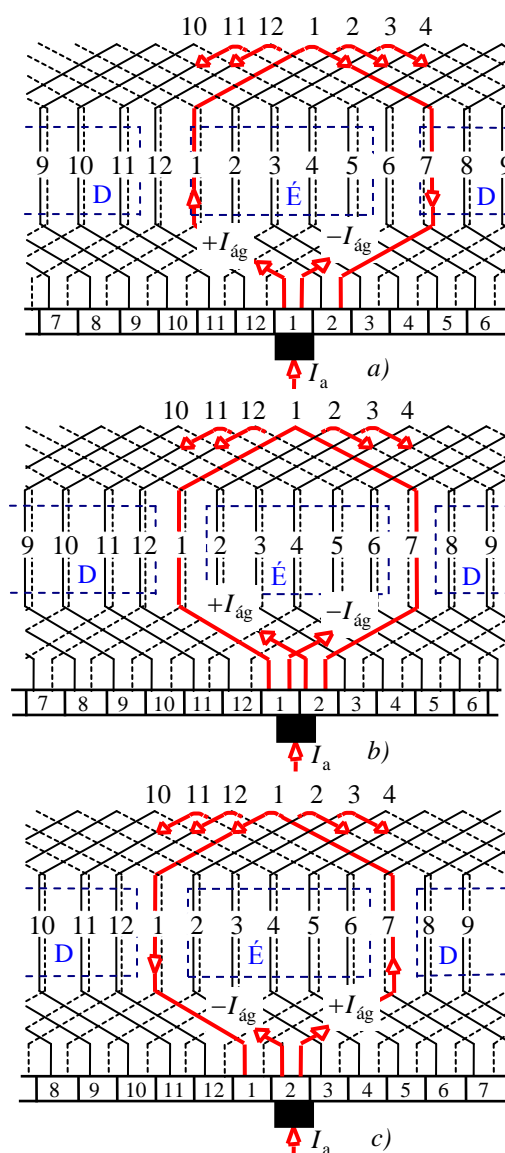
Az egyenáramú gépek zavartalan üzemének egyik legfontosabb problémája a nagy armatúraáramot egy csúszó kefekontaktuson és a kommutátoron keresztül úgy átvezetni a forgórészbe, hogy az ne okozzon kefeszikrázást, helyi többletvesztéseket és a kefék és a kommutátor túlzott melegedését. A kefeszikrázás a kommutátor nem kívánatos beégését, gödrösödését és mind a kefék, mind pedig a kommutátor idő előtti elhasználódását okozhatja.

Mint arról már a korábbiakban is szó volt, a kommutátor feladata továbbá az armatúra vezetőiben akkor megfordítani az áram irányát, amikor azok a semleges vonalon áthaladnak. Az 5.27. ábrában az 5.7. ábra kapcsán már megismert 12 hornyú, kétpólusú, hurkos tekercselésű egyenáramú gép 1-es és 7. hornyában elhelyezett 1-es számú (vastag vonallal kiemelt) vezetőkeretének *kommutációját* követhetjük nyomon.

Az 5.27a ábrán az armatúraáram az 1-es szeleten keresztül folyik, és szimmetriát feltételezve az  $I_{\text{ág}}$  ágáram (ebben az esetben az armatúraáram fele) folyik a vizsgált tekercsben az óra járásával egyező irányban (a másik fele pedig a 12-es számú tekercsben ellenkező irányban).

A vizsgált tekercs kommutációja abban az időpillanatban kezdődik, amikor a kefe *felfutó éle* (értelmezését lásd az 5.28b ábrán) eléri a 2-es szelet szélét és a tekercs rövidzárása megkezdődik.

Bizonyos idő eltelte utáni (a forgórész  $15^\circ$ -ot fordult el, vagyis időben éppen a kommutációs folyamat felénél tartunk) állapotot rögzít



$$Z = K = 12; \quad 2p = 2a = 2.$$

5.27. ábra A kommutáció folyamata



az 5.27b ábra. A kefe fele részben az 1-es szelettel, fele részben a 2-es szelettel érintkezik. Ha feltételezzük, hogy a keféből elfolyó áram a felfekvő felületek arányában oszlik meg a két kommutátor szelet között (a kefék alatti áramsűrűség egyenletes), akkor az 1-es és a 2-es szelet az armatúraáram 50-50 %-át fogja továbbítani. Az 1-es szeletből az áram a 12-es keretbe, a 2-es szeletből a 2-es keretbe folyik, mivel a vizsgált (rövidrezárt) keret nem visz külső áramot.

A tekercs kommutációja abban az időpillanatban fejeződik be, amikor a kefe *lefutó éle* elhagyja az 1-es szeletet.

Az 5.27c ábrán a forgórész további 15°-os elfordulása miatt a kefe érintkezése az 1-es szelettel megszűnt, teljes egészében a 2-es szelettel érintkezik. Az armatúra áram a 2-es szelethez csatlakozó két párhuzamos ágban fele-fele arányban, az 1-es keret végző, és a 2-es keret kezdő végén fog elfolyni. A vizsgált 1-es keretben újra az armatúra áram fele folyik, de ellenkező irányban. A kommutáció befejeződött, a kefe alatt elforduló tekercsben a kommutálás ideje alatt  $\Delta I = 2 \cdot I_{\text{ág}}$  nagyságú áramváltozás következett be.

Az idő függvényében ábrázoltuk a kommutáló menet áramának változását az 5.28a ábrán. Ha az áramváltozás mértéke a kommutáció alatt állandó, *lineáris*-, vagy *ideális* kommutációról beszélünk (1-es jelű kommutációs görbe). Ideális azért, mert az árameloszlás (áramsűrűség) a kefében valamint a kefe alatt egyenletes, és a kommutációs út alatt befejeződik az áramirányváltás a kommutáló tekercsben.

Bizonyítható, hogy a kefében az áramsűrűség az  $I_{\text{ág}}(t)$  kommutációs görbe tetszőleges pontjaihoz húzott húrok meredekségével (pl. a felfutó élen a  $\overline{AC}$  szakasz  $\alpha_1$ , a lefutó élen a  $\overline{BC}$  szakasz  $\alpha_2$  hajlásszögének tangense) arányos. Lineáris kommutációnál az áramsűrűség (az  $\overline{BA}$  szakasz meredeksége) a kommutáció alatt mindig ugyanaz. A lefutó él áramsűrűségének változását a kommutáció alatt az 5.28c ábrán rajzoltuk fel.

### 5.6.1. A reaktancia feszültség

A kommutáló tekercsben a kommutáció alatt az áram  $+I_{\text{ág}}$ -ról  $-I_{\text{ág}}$ -ra változik. Mivel a tekercs vasba ágyazott,  $L_t = N_t^2 \cdot \Lambda_t$  induktivitással rendelkezik (ahol  $\Lambda_t$  a tekercs-csel kapcsolódó mágneses tér vezetőképessége), az áram megváltozása feszültséget indukál. Ez az önindukciós feszültség hasonló egy reaktancián az áramváltozás hatására létrejövő feszültségeséshez, ezért is nevezzük *reaktancia-feszültség*nek. A reaktancia-feszültség az

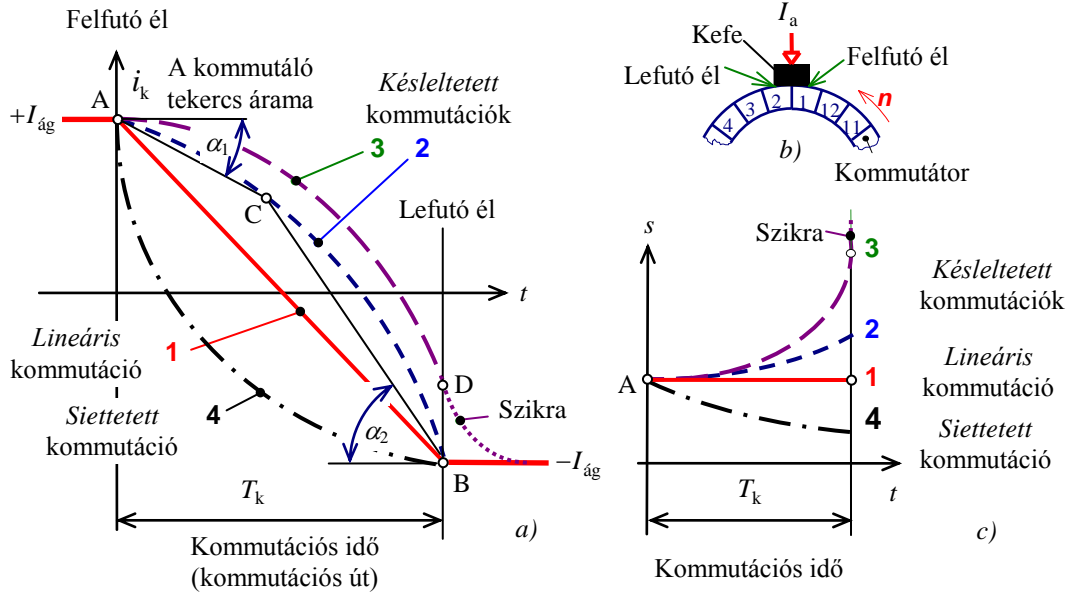
$$u_{\text{re}}(t) = L_t \cdot \frac{di}{dt} \quad (5.37)$$

összefüggés szerint arányos a kommutáló menet induktivitásával és az áramváltozás meredekségével. Az áramváltozás meredeksége lineáris kommutációt feltételezve egyenesen arányos a kommutált armatúraárammal és fordítottan arányos a kommutációs idővel. Mivel a tekercs  $b_{\text{kz}}$  kommutációs úthossza állandó, a  $T_k$  kommutációs idő fordítottan arányos a

fordulatszámmal (az armatúra kerületi sebességével). Ezeket figyelembe véve az (5.37) összefüggés a következőképpen módosul:

$$U_{re} = L_t \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} = L_t \cdot \frac{2 \cdot I_{ág}}{T_k} = c_{re} \cdot I_a \cdot n, \quad (5.38)$$

vagyis a rövidrezárt menetben keletkező reaktanciafeszültség arányos az armatúraárammal és a gép fordulatszámaival ( $c_{re}$  egy gépállandó).



5.28. ábra A kommutáció időbeli lefolyása

a) különböző típusú kommutációs görbék; b) a fel- és lefutó él értelmezése; c) a lefutó oldal áramsűrűsége a kommutáció alatt

Részletesebben megvizsgálva a reaktancia feszültséget, az ún. *Pichelmayer-formula* szerinti középértéket kapjuk (levezetését lásd [10]-ben a 84. oldalon):

$$U_{re}, V = 2 \cdot l_i \cdot m \cdot \lambda_t \cdot \frac{V_s}{A_m} \cdot A \cdot \frac{A}{m} \cdot N_t \cdot v_a \cdot \frac{m}{s}, \quad (5.39)$$

ahol a  $\lambda_t \approx 4 \dots 8 \cdot 10^{-6}$  H/m a tekercs  $l_i$  hosszra vonatkoztatott mágneses vezetőképessége.

A reaktanciafeszültség a keféken keresztül záródó áramkörben a *Lenz-törvény* értelmében olyan áramot indít, mely az áramváltozást gátolni igyekszik, vagyis ún. *késleltetett kommutáció* alakul ki (az 5.28. ábra 2-es és 3-as jelű kommutációs görbéi). A 3-as jelű görbe esetén a kommutáció annyira késleltetett, hogy a kommutáció végén (D pont az 5.28a és az 5.28c ábrában) amikor a kefe megszünteti a tekercs rövidrezárását az áram még nem érte el a  $-I_{ág}$  értéket. Ekkor a kefe *lefutó élén* az áramsűrűség olyan nagyválik (a  $\overline{BD}$  szakasz meredeksége végtelen), hogy a környező teret ionizálja, szikra alakul ki. Ez a szikra súlyosabb esetben fennmaradhat, és ún. *körtűz* jön létre.

A jó kommutációhoz a kommutáló tekercsek szórási inductívitasát a legkisebb értékre kell csökkenteni. Az inductívitas csökkentése a  $L_t = N_t^2 \cdot \Lambda_t$  összefüggés szerint a szeletek közötti kisebb menetszámmal (a tekercsoldalak számának növelésével) és a szórási vezetőképesség csökkentésével érhető el. Egyenáramú gépeknél a technológiai okokból alkalma-

zott nyitott hornyok egyúttal a szórási vezetőképességet is csökkentik. Egyes egyenáramú szervomotoroknál az armatúratekerceselés vezetőit nem ágyazzák vasba. Mindkét módszer-nél többletgerjesztéssel kell a légrés megnövekedését ellensúlyoznunk.

A kefe anyaga	Jele	Áram-sűrűség	Fajlagos ellenállás	Kefe-feszültség-esés	Maximális kerületi sebesség	Súrlódási tényező
Jelölés		$s$	$\rho$	$\Delta U_k$	$v_k$	$\mu$
Dimenzió		$\frac{A}{cm^2}$	$\frac{\Omega mm^2}{m}$	V	$\frac{m}{s}$	
Tiszta grafit	G	10	20	2	50	0,12
Elektrografit	EG	9	40	3	40	0,08
Könnyűbronz (70% rézpor)	KB	12	0,5	0,8	35	0,12
Nehéz bronz (90% rézpor)	NB	15	0,1	0,4	30	0,15

**5.1. táblázat A különböző típusú kefék jellemző adatai**

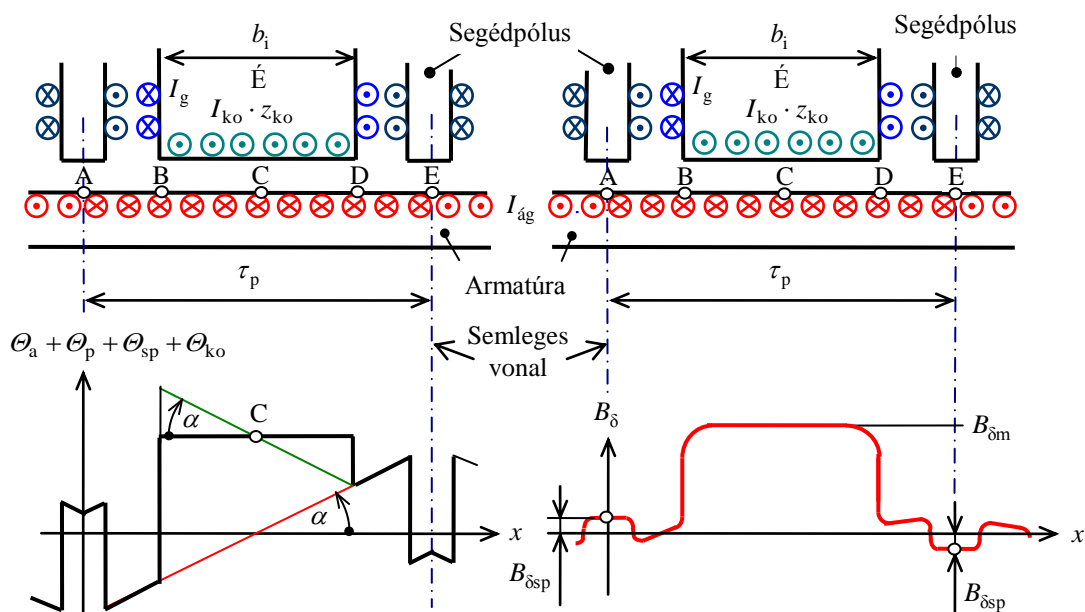
Ha nincs segédpólus, egészen kis teljesítményű egyenáramú gépek esetén az elfogadható kommutációt a kefeellenállás (kefeátmeneti feszültségesés) megnövelésével érik el. A módszer akkor hatásos, ha a kefeátmeneti feszültségesés és a reaktanciafeszültség összemérhető egymással ( $U_{re} \leq 2...3 \text{ V}$ ).

A kefék anyaga, mérete, villamos- és mechanikai tulajdonságai ezért alapvető fontosságúak a kommutáció szempontjából. A különböző típusú kefék jellemző adatait az 5.1. táblázatban foglaltuk össze. Amennyiben semmilyen adat nem áll rendelkezésünkre, a kefefeszültségesést 2 V-nak vehetjük.

### 5.6.2. A segédpólus feladatai

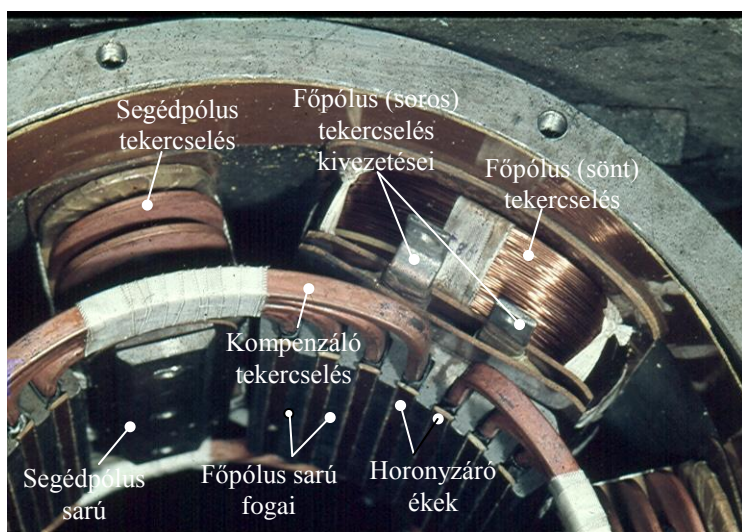
Eddig a kommutációt károsan befolyásoló két hatással ismerkedtünk meg: az egyik az armatúreakció által a semleges vonalban okozott  $B_{\delta a}$  indukció. (A kommutáló menetek vezetői ennek erővonalaira merőlegesen mozdulnak el – lásd ezzel kapcsolatban az 5.23b ábrát – és így azokban a kommutációt késleltető feszültséget indukálnak.) A másik az előzőleg vizsgált reaktanciafeszültség, amely szintén késleltetett kommutációt okoz. A főpólusok közé, a semleges vonalba helyezett segédpólusokkal mindkét problémát kezelhetjük (5.29. ábra). A megoldás lényege a következő:

- A segédpóluson (illetve kompenzált gép esetén a segédpóluson és a kompenzáló tekercselésben) létre kell hozni azt az ellengerjesztést, amely az armatúreakciót a semleges vonalban kiegyenlíti;



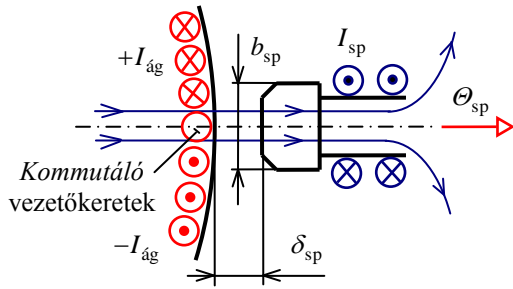
5.29. ábra A gerjesztések és a mezőgörbe térbeli eloszlása ha a főpólus-, az armatúra-, a segédpólus- és a kompenzáló tekercselés együtt gerjesztett

- Egy akkora további gerjesztést kell a semleges vonal irányában alkalmazni, amely a kommutáló menet síkjának irányában  $B_{\delta sp}$  nagyságú,  $B_{\delta a}$ -val ellentétes irányú indukciót hoz létre. Ez a mágneses tér a kommutáló menetbe a reaktanciafeszültséggel azonos nagyságú, vagy annál valamivel nagyobb ellentétes irányú feszültséget indukál be. Ezzel a kommutáló menetben *lineáris*-, vagy *siettetett* kommutációt idézhetünk elő (ilyen az 5.28. ábra a 4-es jelű kommutációs görbéje).



5.3. fénykép Egyenáramú gép gerjeszthető tekercsei

Ha az egyenáramú gép összes lehetséges tekercsét gerjesztjük, akkor a gerjesztések és a mezőgörbe térbeli eloszlása az 5.29. ábrán látható módon alakul. Az 5.26. ábrával összehasonlítva különbség, hogy a segédpólus- és a kompenzáló tekercselés (ha van) együttes hatására a semleges vonalban ellentétes irányú a gerjesztés, mint amit az armatúreakció okoz. Ennek következménye  $B_{\delta a}$ -val ellentétes irányú,  $B_{\delta sp}$  nagyságú légrésindukció.



5.30. ábra A segédpólus adatainak értelmezése

A semleges vonalban elhelyezendő összgerjesztés tehát:

$$\Theta_{sp} = \Theta_a + U_{msp} = A \cdot \frac{\tau_p}{2} + U_{msp}, \quad (5.40.)$$

ahol  $U_{msp}$  a segédpólus mágneses körében a  $B_{\delta sp}$  indukció fenntartásához szükséges gerjesztésszükséglet.

A segédpólus által a kommutáló menetekbe indukált  $U_{sp} = 2 \cdot B_{\delta sp} \cdot l_{sp} \cdot N_t \cdot v_a$  feszültségnek

(lásd az 5.30 ábrát,  $l_{sp}$  a segédpólussarú axiális hossza) minimálisan meg kell egyeznie az  $U_{re}$  reaktanciafeszültséggel. Felhasználva a Pichelmayer formulát {az (5.39) összefüggést}:

$$U_{re} = 2 \cdot \lambda_t \cdot l_i \cdot A \cdot N_t \cdot v_a = 2 \cdot B_{\delta sp} \cdot l_{sp} \cdot N_t \cdot v_a.$$

Ebből a szükséges légrésindukció:

$$B_{\delta sp} = \lambda_t \cdot \frac{l_i}{l_{sp}} \cdot A. \quad (5.41)$$

Ezzel a kommutáló menetbe indukált feszültség:

$$U_{sp} = 2 \cdot B_{\delta sp} \cdot l_{sp} \cdot N_t \cdot v_a = 2 \cdot \lambda_t \cdot l_i \cdot A \cdot N_t \cdot v_a = c_{sp} \cdot I_a \cdot n. \quad (5.42)$$

Ezt az (5.38) összefüggéssel összevetve látható, hogy a segédpólus  $c_{sp} = c_{re}$  választás esetén alkalmas a reaktanciafeszültség „automatikus” kiegyenlítésére.

A gerjesztésszükséglet számításakor csak a légrésre jutó részt figyelembe véve:

$$U_{msp} = \frac{B_{\delta sp}}{\mu_0} \cdot k_{csp} \cdot \delta_{sp} = \frac{\lambda_t}{\mu_0} \cdot k_{csp} \cdot \delta_{sp} \cdot \frac{l_i}{l_{sp}} \cdot A, \quad (5.43)$$

ahol  $k_{csp}$  az 5.7. pontban ismertetett Carter tényező.

Behelyettesítve az (5.40) összefüggésbe:

$$\Theta_{sp} = \Theta_a + U_{msp} = A \cdot \frac{\tau_p}{2} + \frac{\lambda_t}{\mu_0} \cdot k_{csp} \cdot \delta_{sp} \cdot \frac{l_i}{l_{sp}} \cdot A. \quad (5.44)$$

A semleges vonalban fellépő  $\Theta_a = A \cdot \tau_p / 2$  gerjesztéssel végigosztva:

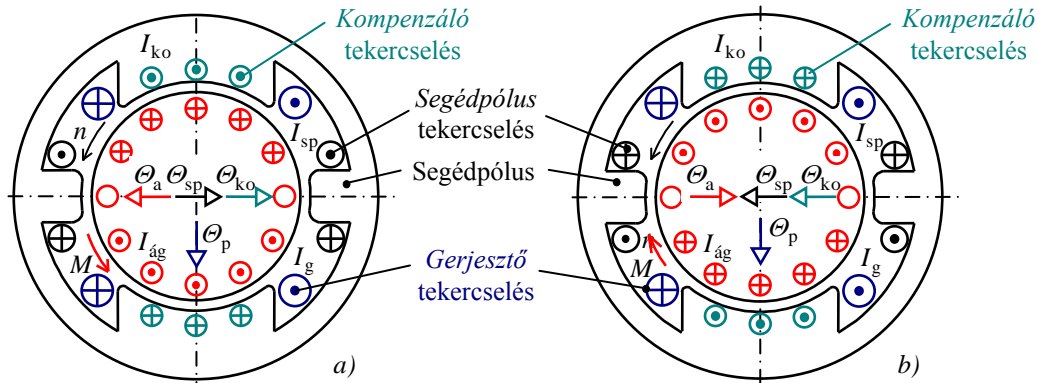
$$\frac{\Theta_{sp}}{\Theta_a} = 1 + \frac{2 \cdot \lambda_t}{\mu_0} \cdot k_{csp} \cdot \frac{\delta_{sp}}{\tau_p} \cdot \frac{l_i}{l_{sp}} = 1 + k_{sp}. \quad (5.45)$$

A  $k_{sp}$  tényező értéke  $k_{sp} = 0,2 \dots 0,3$  (ahol 0,1 vonatkozik a kisebb gépekre). Felhasználva még (5.31)-et is:



$$\Theta_{sp} = (1 + k_{sp}) \cdot \frac{A \cdot \tau_p}{2} = (1 + k_{sp}) \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{z}{p \cdot a} \cdot I_a \cdot \quad (5.46)$$

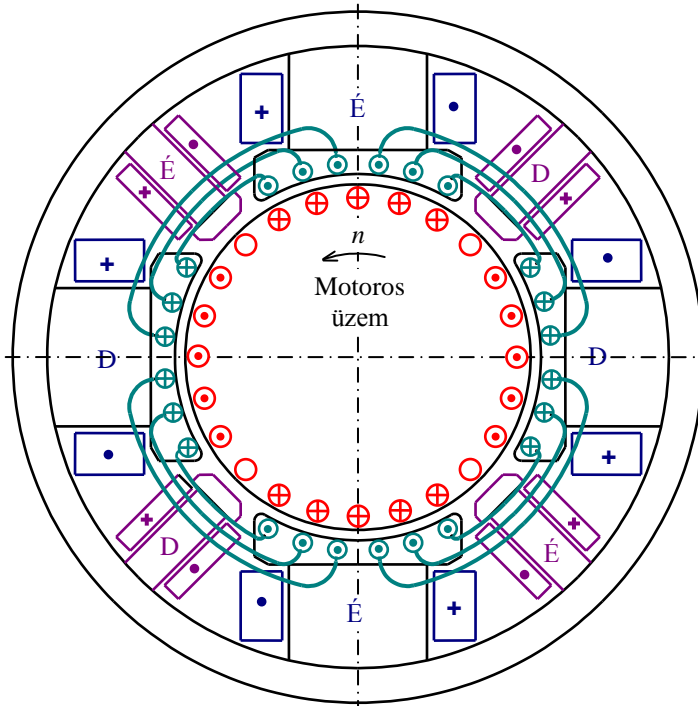
(5.46) azt mutatja, hogy a reaktanciafeszültség kompenzálására 10...30 % többletgerjesztés szükséges, és a segédpólus gerjesztésének (áramának) az armatúraárammal kell arányosnak lennie. A segédpólusokat ezért soros vagy párhuzamosított kapcsolásban sorbakötik az armatúratekercseléssel, így:  $I_{sp} = k \cdot I_a$  ( $k$  a kapcsolástól függő konstans).



5.31. ábra A segédpólus- és a kompenzáló tekercselés gerjesztési irányai motoros és generátoros üzemben

a) motoros üzem; b) generátoros üzem

Az 5.31. ábrán bejelölve a gerjesztések irányát egy az összes lehetséges tekercselését tartalmazó egyenáramú gép keresztmetszetét vázoltuk fel motoros (5.31a ábra) és generátoros (5.31b ábra) üzemállapotokban. Generátoros üzemben feltételezzük, hogy a meghajtó



5.32. ábra Motorként üzemelő, kompenzált egyenáramú gép keresztmetszete

gép az egyenáramú gépet ugyanúgy, az óramutató járásával ellentétes irányban forgatja, mint motoros üzemben. Az energiaáramlás irányának megfelelően természetesen ekkor a forgórészben megfordul az áram-, és ezzel együtt a nyomaték iránya is. Az ábrákból kitűnik, hogy a forgás irányában haladva, motoros üzemben a főpólus után azonos-, generátorként pedig ellentétes polaritású segédpólus következik.

A kompenzáló tekercselés és a segédpólusok gerjesztése egyirányú, ezért a kompenzált gépek segédpólusain annyival kevesebb gerjesztést kell elhelyezni, mint amennyit a kompenzáló tekercselés

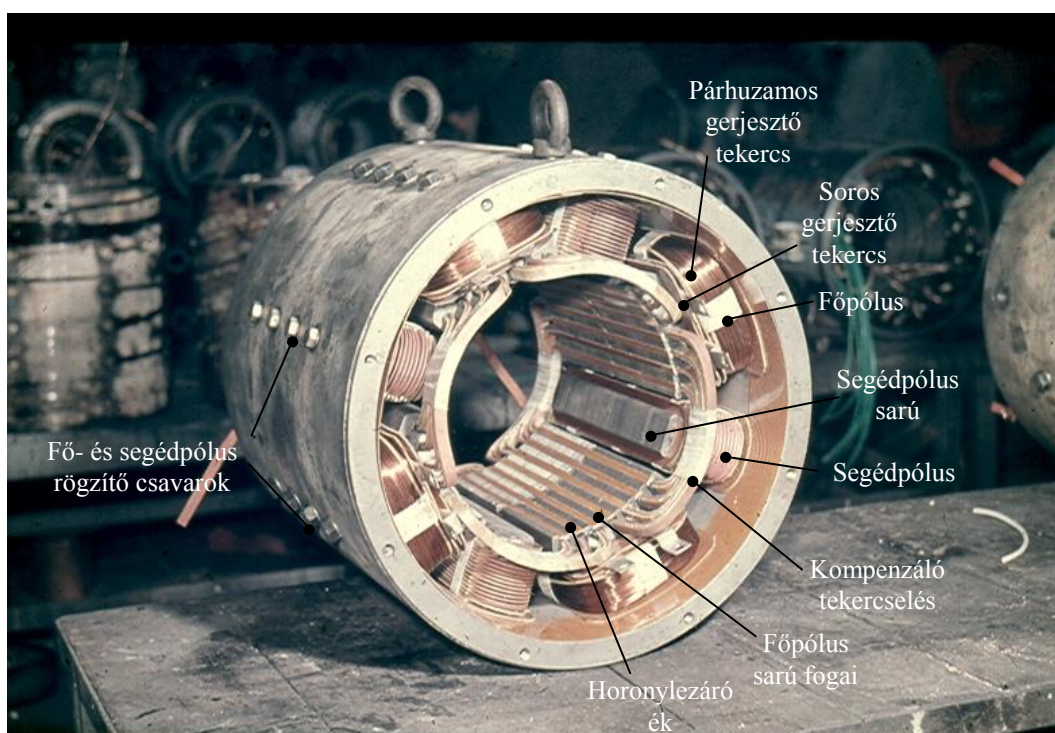
létrehoz. Az armatúreakció ellensúlyozásához szükséges gerjesztést a pólusívek arányában osztják szét a kompenzáló- és a segédpólus tekercselésre. A segédpólus tekercs menetszáma ilyenkor:

$$N_{sp} = \frac{\Theta_{sp} - \Theta_{ko}}{I_{sp}}. \quad (5.47)$$

Az 5.32. ábrán egy motorként üzemelő egyenáramú gép keresztmetszetét és gerjesztési irányait ábrázoltuk.

A segédpólus a terhelés nagyságától, a fordulatszámtól, a forgásiránytól és az üzemmódtól is függetlenül alkalmas a kommutáció javítására, ha a segédpólus fluxusa képes követni az armatúraáram változását.

Amennyiben az armatúrakör árama időben változó (nem sima egyenáram) az örvényáramok fluxuskésleltető hatásának csökkentésére a segédpólusokat is lemezelni kell.

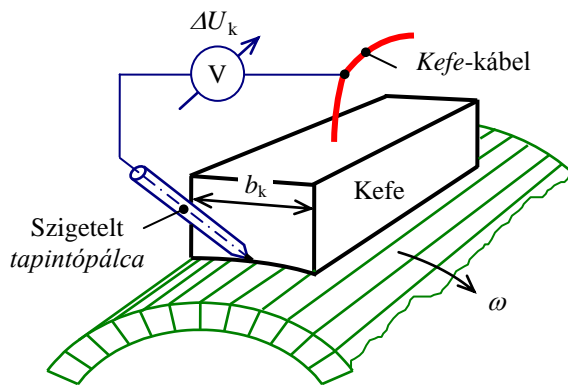


5.4. fénykép Négypólusú egyenáramú, kompenzált kommand motor állórésze

A 2.5. fényképen egy négypólusú egyenáramú kompenzált kommand motor állórészének nézeti képét láthatjuk.

### 5.6.3. A kommutáció ellenőrzése

A kommutáció minőségét elsősorban a kefék szikrázása, valamint a kefék és a kommutátor csúszófelületének minősége alapján ítélik meg. A teljesen kifogástalanul kommutáló gép keféinek élein sem névleges, sem ennél kisebb terhelések esetén nem látszik szikraképződés, még sötétben sem. A kefék teljes felülete egyenletesen tükrös a becsiszolás után; a kommutátor csúszófelületén sötétebb patinaréteg látható, és a szeletek lefutó élein sem látszanak égési nyomok.



5.33. ábra A kefegörbék felvétele

torszeletek, a szeletek közül el nem távolított csillámszigetelés, rosszul beállított kefetartók, a kefetartóban szoruló kefék, túlságosan kis rúgónyomás, rosszul becsiszolt kefék stb.

Ha a felsorolt hibaokok kizárhatók, akkor a villamos jellegű tényezőket kell megvizsgálni. Ha a forgórész tekercselése kifogástalan; a főpólusok, a segédpólusok és a kompenzáció tekercselése jól van kapcsolva és nem zárlatos; a légrésekben jelentős aszimmetriák nincsenek, akkor valószínű hogy a kefeszikrázást a rosszul beállított segédpólusoknak, ill. a kefehid elállítódásának lehet tulajdonítani.

Ha segédpólus hatása gyenge, akkor a kommutáció a késleltetett jelleg irányába tolódik el; ha a szükségesnél erősebb, akkor a kommutáció túlságosan siettetetté válik. Jó segédpólus beállítás esetén a kommutáció többé-kevésbé lineáris, vagy kismértékben siettetett, de semmi esetben sem késleltetett.

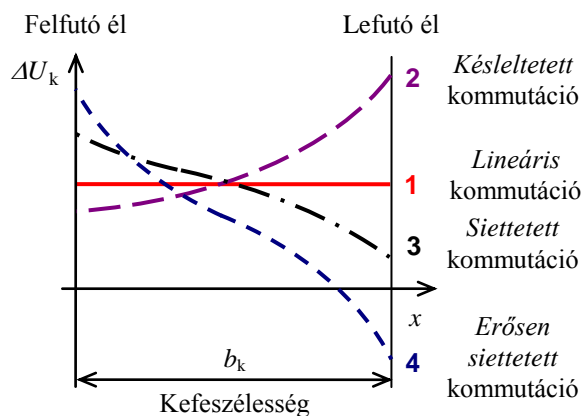
A kommutáció jellegét a 5.34. ábrán felrajzolt ún. kefegörbék felvételével ellenőrizhetjük, amelyeket a 5.33. ábrán megadott kapcsolásban mérhetünk. Egy tapintópálca és egy kb. 3 V feszültség-méréshatárú műszer segítségével mérjük a terheléssel működő gép kefe-feszülteségét úgy, hogy a feszültségmérő egyik sarkát a kefeelvezető kábelre, másik végét a tapintópálcához kötjük. A tapintópálca szigetelt, kilagyított puha vörösrézről, vagy kefeanyagból készülhet.

Először a felfutó éllel egyvonalban, majd a kefe szélessége mentén néhány pontban, végül a lefutó éllel egyvonalban mérünk és a mért értékeket a kefeszélesség függvényében ábrázoljuk.

Ha a segédpólusok gerjesztése a szükségesnél erősebb vagy gyengébb, akkor kisebb korrekciókat a segédpólusok és a koszorú közötti légrés változtatásával lehet elvégezni. A kisebb légrés növeli a  $B_{\delta p}$  indukciót a segédpólusok alatt és így a kommutáló menetekbe beindukált feszültséget is, ami a kommutációt a siettetés irányába tolja el.

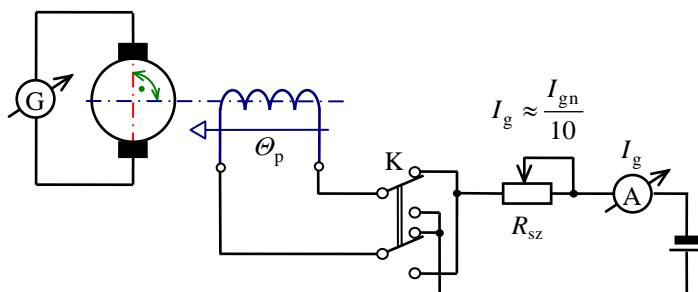
Súlyosabb esetekben a kefe lefutó élénél (a kevésbé rossz kommutációtól a rosszabb felé haladva) *gyöngyözés*  $\Rightarrow$  *szikrázás*  $\Rightarrow$  *kilövelő szikrák* és végül a *körtűz* figyelhető meg.

A feladat nehezebb része a rossz kommutáció okának megállapítása. Először célszerű tisztázni, hogy nem mechanikai tényezők okozzák-e a szikrázást. Ilyenek lehetnek: a forgórész kiegyensúlyozatlanságából származó rezgések, a kommutátor durva felülete, a csúszófelület excentritása, kiálló kommutá-



5.34. ábra Kefegörbék

A kommutáció elromlását okozhatja a *kefehid* elállítódása is. A törpegépek kivételével az egyenáramú gépek keféinek helyzete változtatható a pólusokhoz képest. Ezt az állítási lehetőséget a gyártás közben előforduló bizonytalanságok, pontatlanságok korrigálása érdekében alkalmazzák. A kefehidat rögzítő csavarokat meglazítva, az összes kefe helyzetét azonos mértékben változtathatjuk meg. A kefehid helyzetét próbateremben állítják be és a megfelelő helyzetet pontozással, vagy festékekkel megjelölik. Először ezt ellenőrizzük.



5.35. ábra Mérési kapcsolás a kefehid beállítására

A kefék pontos helyzetének megkeresésére több módszer ismeretes. Közülük a legpontosabbat, a galvanométeres beállítási módot ismertetjük. A módszer azt használja ki, hogy a gerjesztő-tekercs és az armatúratekercs mágneses tengelyeinek egymásra merőlegesnek kell lenniük. A merőlegességből adódik,

hogy a két tekercs között nem lehet mágneses csatolás; a gerjesztő-tekercsben előidézett fluxusváltozás nem indukálhat feszültséget az armatúratekerccselésben.

A mérés kapcsolását az 5.35. ábrán rajzoltuk fel, az armatúra kapcsaira állítható érzékenységgű, közép-nullahelyzetű galvanométert kapcsolunk, először a legérzékenyebb állásban. A gerjesztő tekercset egy akkumulátorról tápláljuk úgy, hogy állandósult állapotban a gerjesztőáramot kb. a névleges áram tizedére korlátozzuk egy változtatható ellenállással. Erre azért van szükség, mert a gerjesztőkörbe kötött *K* kapcsolóval az áramirányt megfordítani, *kommutálni* fogjuk. Mivel a gerjesztőtekercs nagy menetszámú, benne az  $N_g^2 \cdot A_g \cdot \frac{di_g}{dt}$  összefüggésnek megfelelően esetleg olyan nagy feszültség indukálódhatna, amely a tekercselés szigetelését átüthetné.

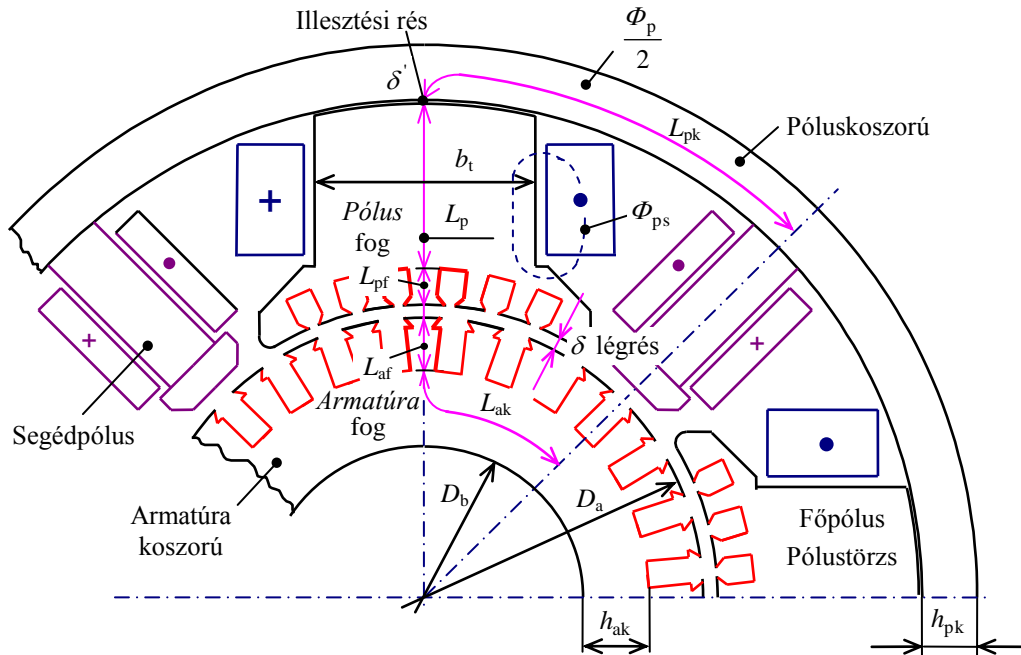
A gerjesztőáram beállítása után a forgórész álló helyzetében a gerjesztőkörben a *K* kapcsolóval kommutáljuk az áramot és figyeljük a galvanométer kitérését! A galvanométer érzékenységét is növelve a kefehidat addig fordítjuk el, amíg a legkisebb kitérést kapjuk, végül ezt a helyzetet megjelöljük. A forgórészt kismértékben elfordítva, a leírt vizsgálatot megismételjük. Eredményként próbatermi nyelven egy „*semleges zónát*” kapunk, amelynek a közepére kell végül állni, és a kefehidat itt rögzíteni.

## 5.7. AZ EGYENÁRAMÚ GÉP MÁGNESES KÖRE, AZ ÜRESJÁRÁSI ÉS BELSŐ TERHELÉSI JELLEGGÖRBE

### 5.7.1. Az egyenáramú gép mágneses köre

Az 5.36. ábrán az egyenáramú gép mágneses körének jellegzetes szakaszait láthatjuk. Ezek: a póluskoszorú ( $L_{pk}$ ); az illesztési rés ( $\delta'$ ); a pólustörzs ( $L_p$ ); a pólus fog ( $L_{pf}$ ), ha a gép rendelkezik kompenzáló tekercseléssel; a légrés ( $\delta$ ); az armatúra fog ( $L_{af}$ ) és az armatúra koszorú ( $L_{ak}$ ).

Egy adott maximális  $B_{\delta m}$  légrésindukció fenntartásához szükséges pólusgerjesztés az egyes szakaszok mágneses feszültségeinek összegeként írható fel:



5.36. ábra Az egyenáramú gép mágneses köre

$$\begin{aligned} \Theta_p(B_{\delta m}) &= \Sigma(U_m) = U_{mpk} + U'_{m\delta} + U_{mp} + U_{mpf} + U_{m\delta} + U_{maf} + U_{mak} = \\ &= H_{pk} \cdot L_{pk} + \frac{B'_{\delta}}{\mu_0} \cdot \delta' + H_p \cdot L_p + H_{pf} \cdot L_{pf} + \frac{B_{\delta m}}{\mu_0} \cdot k_c \cdot \delta + H_{af} \cdot L_{af} + H_{ak} \cdot L_{ak}, \end{aligned} \quad (5.48)$$

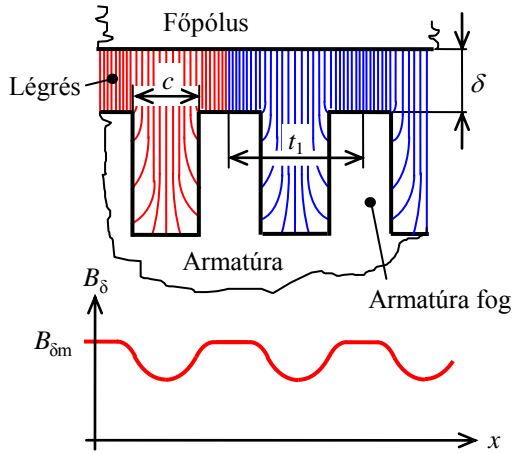
ahol  $H$ -val jelöltük az adott szakaszhoz tartozó mágneses télerősséget,  $L$ -el pedig az adott szakasz hosszát. Az összes mágneses szakasz gerjesztésszükséglete a  $B_{\delta m}$  maximális légrésindukcióval arányos. Ha a számításokat több  $B_{\delta m}$ -ra elvégezzük, akkor a gép  $B_{\delta m}(\Theta_p)$  mágnesezési jelleggörbéjét kapjuk, amely más léptékben a gép  $U_0(I_g)$  üresjárási jelleggörbéje.

A mágneses körön belül a legnagyobb gerjesztésigénye a légrés(ek)nek, utána az armatúra- ill. a pólusfogaknak van, ezért a számítást a légréssel kezdjük:

#### ✚ A légrés mágneses feszültsége ( $U_{m\delta}$ )

Az egyenáramú gépek armatúrája hornyolt, nagyon gyakori a nyitott horonyszájú, párhuzamos falú horony, mint amelyet a 5.37. ábra mutat. Mivel a hornyokban elhelyezkedő tekercselőanyag mágnesesen rossz vezetőképességű, a légrésben és a hornyokban az ábrán megrajzolthoz hasonló erővonalkép jön létre. A légrésben kialakuló radiális irányú indukcióeloszlást az ábra alsó részén adtuk meg. Az indukció lecsökkent, a hatás olyan, mintha a légrés megnövekedett volna. Ezt a „légrésnövekedést” a továbbiakban az ún. *Carter-tényező*vel vesszük figyelembe úgy, hogy az eredeti légrés helyett az *ideális légréssel* számolunk:





5.37. ábra Indukció-eloszlás a légrésben

$$\delta_i = k_c \cdot \delta. \quad (5.49)$$

(5.49)-ben Richter szerint a  $k_c$  tényező  $2 \leq \frac{c}{\delta} \leq 12$

( $c$  a horonyszáj-nyílás szélessége) esetén:

$$k_c = \frac{t_1}{t_1 + \delta - 0,75 \cdot c}, \quad (5.50)$$

ahol  $t_1 = D_a \cdot \pi / Z$  a horonyosztás. A Carter-tényező Arnold empirikus képlete szerint:

$$k_c = \frac{\delta + \frac{t_1}{8}}{\delta + \frac{f_1}{8}}, \quad (5.51)$$

ahol  $f_1$  a kerületen mért fogszélesség.

Jegyezzük meg, hogy a Carter tényező mindig egynél nagyobb szám. Ha a kompenzáló tekercselés miatt a főpólus-sarú felülete is hornyolt, akkor külön-külön ki kell számítani a  $k_{ca}$  armatúrahornyokra, ill. a kompenzáló tekercs hornyaira (a főpólus-sarú és az armatúra felülete mágnesesen ekvipotenciális) érvényes  $k_{cp}$  Carter-tényezőt. Az eredő Carter-tényező ilyenkor a két tényező szorzata:

$$k_c = k_{cp} \cdot k_{ca}. \quad (5.52)$$

A légrés mágneses gerjesztésszükséglete:

$$U_{m\delta} = \frac{B_{\delta m}}{\mu_0} \cdot \delta_i = \frac{B_{\delta m}}{\mu_0} \cdot k_c \cdot \delta. \quad (5.53)$$

#### ✚ A fogak mágneses feszültsége ( $U_{maf}$ és $U_{mpf}$ )

A fogak legtöbbször változó szélességűek (5.38. ábra). A fogat három részre bontjuk (1 fogfej, 2 fogközép és 3 fogtő). E három helyen meghatározzuk a fogindukciókat, majd a mágnesezési görbék segítségével az egyes indukciókhoz tartozó térerősségeket, amelyekből a Simpson-szabály

szerint átlagértéket képzünk.

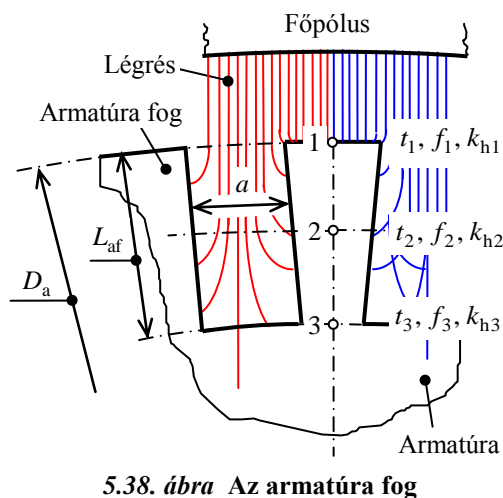
Először a szükséges geometriai méretek ( $t$ -vel az osztást,  $f$ -el a fogszélességet,  $a$ -val pedig a horony-szélességet jelöljük). A fogosztások:

$$t_1 = \frac{D_a \cdot \pi}{Z}, \quad t_2 = \frac{(D_a - L_{af}) \cdot \pi}{Z} \quad (5.54)$$

$$\text{és } t_3 = \frac{(D_a - 2 \cdot L_{af}) \cdot \pi}{Z}.$$

A fogszélességek:

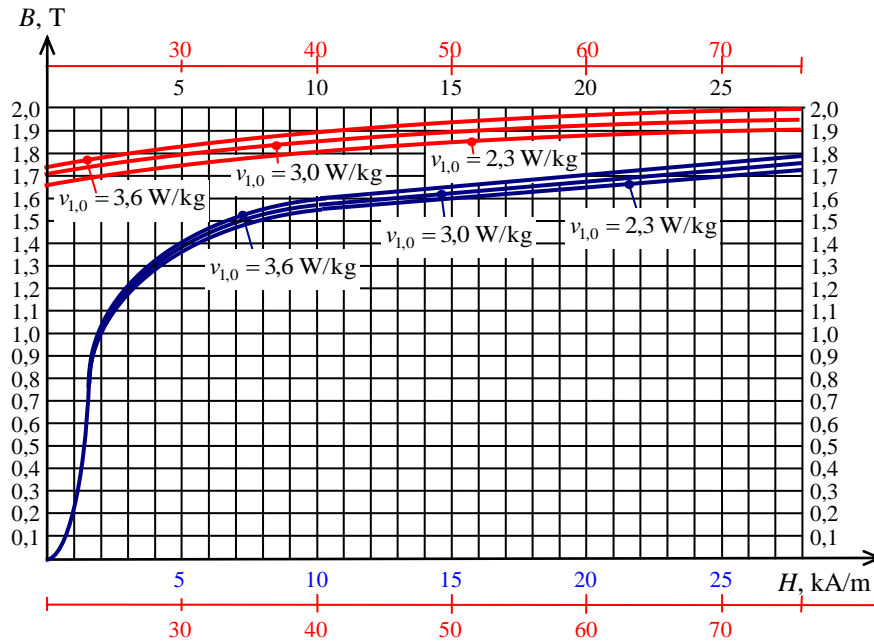
$$f_1 = t_1 - a, \quad f_2 = t_2 - a \quad \text{és} \quad f_3 = t_3 - a.$$



5.38. ábra Az armatúra fog



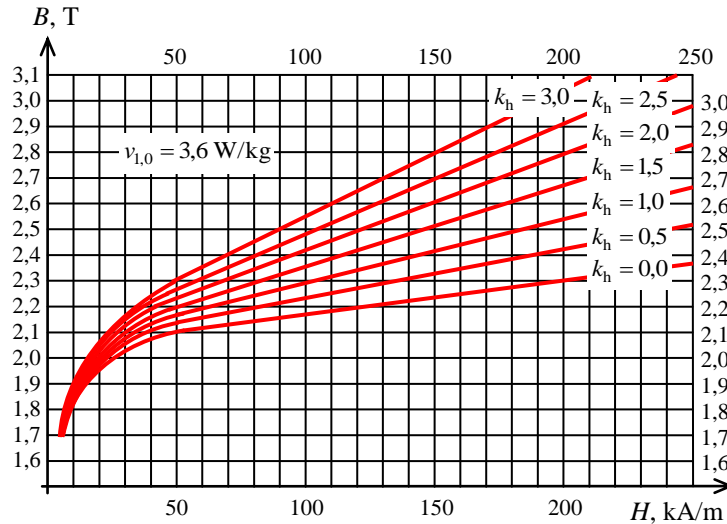
A fogindukciók értékei ( $l_v$  az armatúra vastest tényleges hossza):



5.39. ábra Dinamólemezek mágnesezési görbéi

$$B_{af1} = \frac{t_1 \cdot l_i}{f_1 \cdot l_v} \cdot B_{\delta m}, \quad B_{af2} = \frac{t_1 \cdot l_i}{f_2 \cdot l_v} \cdot B_{\delta m} \quad \text{és} \quad B_{af3} = \frac{t_1 \cdot l_i}{f_3 \cdot l_v} \cdot B_{\delta m}. \quad (5.55)$$

(5.55)-ben  $l_i$  az (5.14)-ben definiált ideális armatúrahossz. Az indukciók meghatározása után a dinamólemezek mágnesezési jelleggörbéiből visszakeressük az indukciókhoz tartozó mágneses térerősségeket. Ha a maximális fogindukció  $B_{fmax} \leq 1,8 \text{ T}$ , akkor az egyszerű mágnesezési gör-



5.40. ábra A horonyvezetési tényező figyelembevételével készített mágnesezési jelleggörbék

békből indulunk ki (5.39. ábra), ellenkező esetben a horonyvezetéseket is figyelembe kell venni.

Az ehhez szükséges horonyvezetési tényezők:

$$k_{h1} = \frac{t_1 \cdot l_a}{f_1 \cdot l_v} - 1, \quad k_{h2} = \frac{t_2 \cdot l_a}{f_2 \cdot l_v} - 1, \quad \text{és} \quad k_{h3} = \frac{t_3 \cdot l_a}{f_3 \cdot l_v} - 1, \quad (5.56)$$

ahol  $l_a$  az armatúrahossz. Ilyenkor a visszakeresésekhez az 5.40. ábrát kell használni, amelyben a horonyvezetési tényezők paraméterek.

A visszakeresés eredményeként a  $H_{af1}$ ,  $H_{af2}$  és  $H_{af3}$  térerősségeket kapjuk. A fogra érvényes  $H_{af}$  mágneses térerősséget végül átlagolással, a Simpson-szabály segítségével határozzuk meg:

$$H_{af} = \frac{H_{af1} + 4 \cdot H_{af2} + H_{af3}}{6} \quad (5.57)$$

Ezután következhet az átlagos térerősséggel a fog mágneses feszültségének meghatározása:

$$U_{maf} = H_{af} \cdot L_{af} \quad (5.58)$$

A geometriai adatoktól eltekintve a kompenzált gépeknél a pólusfog  $U_{mpf}$  mágneses feszültségének számítása teljesen megegyezik az armatúrafogéval.

#### **Az armatúrakoszorú mágneses feszültsége ( $U_{mak}$ )**

A gép fluxusa:  $\Phi = b_i \cdot l_i \cdot B_{\delta m}$ , az armatúrakoszorúban az indukció:

$$B_{ak} = \frac{\Phi}{2 \cdot l_{ak} \cdot h_{ak}} = \frac{b_i \cdot l_i}{2 \cdot l_{ak} \cdot h_{ak}} \cdot B_{\delta m} \quad (5.59)$$

amelyben  $h_{ak}$  az armatúrakoszorú magassága (lásd az 5.36. ábrát). Az indukcióhoz tartozó térerősséget visszakeressük az 5.39. ábrán megadott mágnesezési görbéből:  $B_{ak} \Rightarrow H_{ak}$ , majd a szakasz  $L_{ak}$  hosszával szorozva a gerjesztésszükséglet adódik:  $U_{mak} = H_{ak} \cdot L_{ak}$ .

#### **A pólustörzs mágneses feszültsége ( $U_{mp}$ )**

A gép állórészén (a póluson, az illesztési résen és a póluskoszorún áthaladó  $\Phi_p = (1 + \sigma) \cdot \Phi = (1 + \sigma) \cdot b_i \cdot l_i \cdot B_{\delta m}$  pólusfluxus a szórások miatt nagyobb a gép  $\Phi$  hasznos fluxusánál ( $\sigma$  értéke 0,1...0,15). Lemezelt főpólust feltételezve az indukció a pólustörzsben ( $b_t$  a pólustörzs szélessége,  $l_p$  az axiális hossza,  $k_v < 1$  a lemezelés vaskitöltési tényezője):

$$B_p = \frac{\Phi_p}{b_t \cdot l_p \cdot k_v} = \frac{(1 + \sigma) \cdot b_i \cdot l_i}{b_t \cdot l_p \cdot k_v} \cdot B_{\delta m}. \quad (5.60)$$

Az indukcióhoz tartozó térerősséget visszakeressük az 5.39. ábrán megadott mágnesezési görbéből:  $B_p \Rightarrow H_p$ , majd a szakasz  $L_p$  hosszával szorozva a főpólus gerjesztésszükségletét kapjuk:  $U_{mp} = H_p \cdot L_p$ . Meg kell jegyezni, hogy a gyártástechnológia egyszerűsítése érdekében a főpólusokat is lemezelik.

#### ✚ Az illesztési rés mágneses feszültsége ( $U'_{m\delta}$ )

Az indukció az illesztési résben:

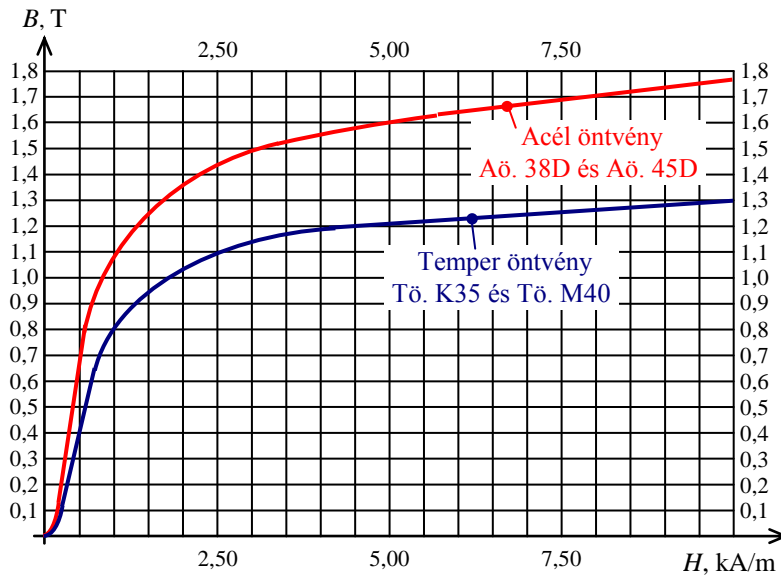
$$B'_\delta = \frac{\Phi_p}{b_p \cdot l_p} = \frac{(1+\sigma) \cdot b_i \cdot l_i}{b_p \cdot l_p} \cdot B_{\delta m}. \quad (5.61)$$

Ezzel az illesztési rés mágneses feszültsége:  $U'_{m\delta} = B'_\delta \cdot \delta'$ .

#### ✚ A póluskoszorú mágneses feszültsége ( $U_{mpk}$ )

Az indukció a póluskoszorúban:

$$B_{pk} = \frac{\Phi_p}{2 \cdot l_{pk} \cdot h_{pk}} = \frac{(1+\sigma) \cdot \Phi}{2 \cdot l_{pk} \cdot h_{pk}} \cdot B_{\delta m} = \frac{(1+\sigma) \cdot b_i \cdot l_i}{2 \cdot l_{pk} \cdot h_{pk}} \cdot B_{\delta m}, \quad (5.62)$$



5.41. ábra Az állórész koszorúnál használt anyagok mágnesezési görbéi

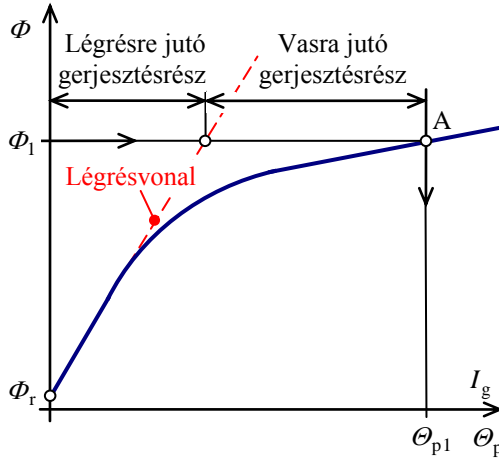
ahol figyelembe vettük, hogy a póluskoszorúban a pólusfluxus fele halad.  $L_{pk}$  a póluskoszorú hossza,  $h_{pk}$  a vastagsága.

A póluskoszorú acélöntvényből, vagy temperöntvényből készülhet, a  $B_{pk} \Rightarrow H_{pk}$  visszakereséshez a 5.41. ábrán található  $B(H)$  görbéket használhatjuk fel. A szakaszra érvényes térerősséget a szakasz hosszával szorozva a póluskoszorú gerjesztésszükségletét kapjuk:

$$U_{mpk} = H_{pk} \cdot L_{pk}.$$

### 5.7.2. Az egyenáramú gép üresjárási- és belső terhelési jelleggörbéje

Ha az előző pontban részletezett számításokat több  $B_{\delta m}$ -ra elvégezzük, akkor a gép  $\Phi(\Theta_p) = b_i \cdot l_i \cdot B_{\delta m}(\Theta_p)$  mágnesezési jelleggörbéjét kapjuk, amelyet az 5.42. ábrán ábrázoltunk. A  $\Theta_p = N_g \cdot N_g$  összefüggésnek megfelelően a vízszintes tengelyre más léptékben  $I_g$ -t is írhatunk. Kis gerjesztéseknél a mágneses kör vasmagos részei még telítetlenek, ezért gyakorlatilag az összes gerjesztés a légrésekre esik {lásd ezzel kapcsolatban (5.48) összefüggést}. Így az (5.53) összefüggésnek megfelelően a mágnesezési görbe kezdeti része egy egyenessel, az ún. *légrésvonallal* (szaggatott vonallal jelölt az 5.43. ábrában) írható le. A könyökpont környékén egyre nagyobb rész jut a vasmagra, míg a telítési részen már ez utóbbi rész lesz a meghatározó. Egyszerűbb vizsgálatoknál a telítési rész is egy a légrésvonalnál kisebb meredekségű egyenessel közelíthető.



5.42. ábra Az egyenáramú gép mágnesezési görbéje

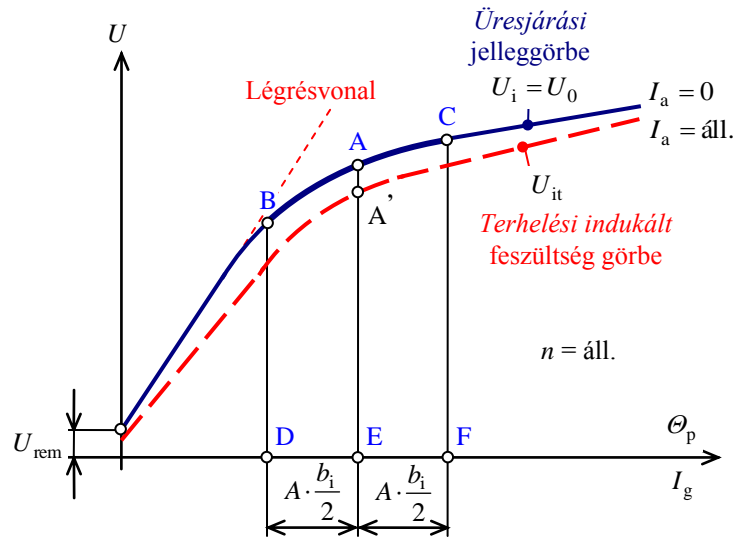
problemák elkerülésére a gerjesztést monoton csökkentve mérjük az  $U_0$  kapocsfeszültség és az  $I_g$  gerjesztőáram összetartozó értékeit (mivel az armatúrakör nyitott és ezért árammentes, az indukált- és a kapocsfeszültség megegyezik egymással). Zérus gerjesztőáramnál az indukált feszültség nem zérus. Az ún. *remanens* feszültséget a vasanyag visszamaradó indukciója okozza és meglepte alapvető fontosságú az öngerjesztésű generátorok felgerjedési folyamatában.

Az 5.5.1. pontban már foglalkoztunk az armatúravisszahatással. Mint már tudjuk, kompenzálatlan gépeknél az armatúreakció egyik káros hatása a főpólusok alatt a mező torzulása, és így a vasmagos részek telítődéséből adódó fluxuscsökkenés.

Mivel a gép indukált feszültsége a fluxussal arányos, ez a fluxuscsökkenés terhelte esetben a gép indukált feszültségének a csökkenését is okozza, az üresjárási jelleggörbe helyett az  $U_{it}$  terhelési indukált feszültséggörbével kell számolnunk. A terhelési indukált feszültséggörbe származtatása viszonylag egyszerű, ha feltételezzük, hogy a mezőgörbe torzulása a pólusív alatt ugyanolyan, mint a gép üresjárási jelleggörbéje (az üresjárási jelleggörbe vastagon kihúzott része). Ekkor ugyanis a vizsgált A-pontban a feszültségcsökkenést úgy kapjuk meg, hogy a pólus közepén és a pólus szélein lévő indukciókkal arányos szakaszokat a Simpson-szabály szerint átlagoljuk:

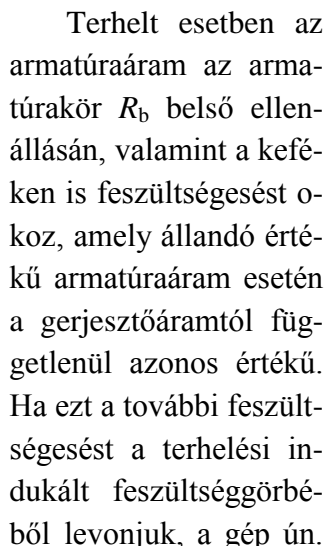
$$\overline{A'E} = \frac{\overline{BD} + 4 \cdot \overline{AE} + \overline{CF}}{6} \quad (5.63)$$

Az  $U_i = k_U \cdot \Phi \cdot n$  összefüggés szerint gép indukált feszültsége a gép fluxusával arányos, ezért a mágnesezési görbe számítása helyett a gép *üresjárási jelleggörbéjét* (5.43. ábra) legtöbbször generátoros üzemi állapotban, méréssel vesszük fel. Ehhez egy hajtógéppel a generátort állandó fordulatszámmal forgatjuk, és kiinduláskor a gerjesztést addig növeljük, amíg az indukált feszültség a névleges feszültség kb. 125 %-át el nem éri. Ezután a hiszterézis okozta



5.43. ábra Az egyenáramú gép üresjárási jelleggörbéje és a terhelési indukált feszültség görbe származtatása

legnagyobb.



#### 5.44. ábra A belső terhelési jelleggörbék származtatása

Az 5.44. ábrán két különböző  $I_{a1} < I_{a2}$  armatúraáramhoz tartozó belső terhelési jelleggörbét rajzoltunk fel, az  $I_{a1}$  áramhoz tartozónál  $I_{g1}$  gerjesztőáramnál bejelölve az üresjárási jelleggörbéhez képesti feszültségcsökkenéseket ( $\overline{AB}$ -t az armatúreakció,  $\overline{BC}$ -t az armatúraköri feszültségesek okozzák). Tudva ezt, a terhelési indukált feszültséggörbét fordított módon, a belső terhelési jelleggörbéből az adott terhelőáramnál megszerkeszthetjük úgy, hogy belső terhelési jelleggörbéhez hozzáadjuk az armatúrakör feszültségéseit.

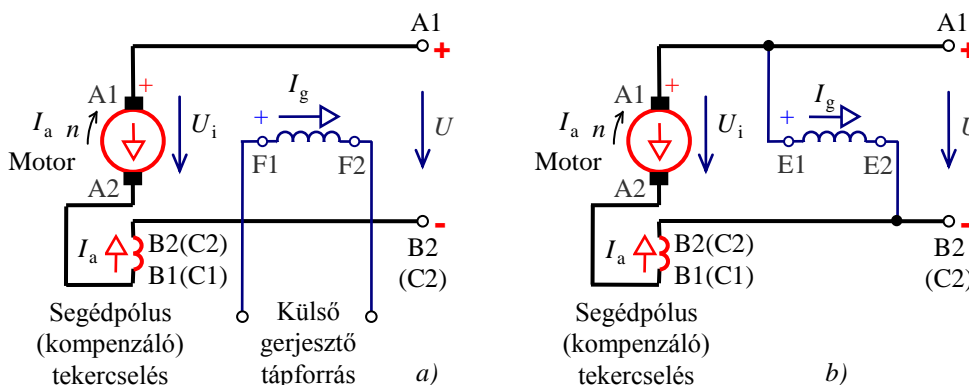
## 5.8. AZ EGYENÁRAMÚ GÉPEK GERJESZTÉSI MÓDJAI

Az egyenáramú gépek elterjedt alkalmazását a jelentősen változtatható működési karakterisztikák biztosítják, amelyek a főpólusok gerjesztőtekercseinek kapcsolási módjaitól függenek.

A gép kapocs- és tekercsjelöléseit az egységes értelmezés érdekében az IEC ajánlásait figyelembe véve szabványosították, a kötelező érvényű jelöléseket a gerjesztési módokat bemutató ábrákon alkalmazzuk. Az armatúratekercs kapcsait **A1-A2**, a segédpólus teker

csét **B1-B2**, a kompenzáló tekercsét (ha a gép rendelkezik ilyennel) **C1-C2** jelöli. A rajzolásnál figyelembe vettük, hogy az armatúra- és a gerjesztő tekercsek mágneses tengelyei merőlegesek egymásra; az armatúra- és a segédpólus-(kompenzáló-) tekercsek mágneses tengelyei pedig azonos irányúak, de ellentétes értelműek. A gyártó a gépet úgy köti el, hogy amennyiben a felhasználó az összes tekercset úgy köti be, hogy az áramok *I*-es kapcsoktól a 2-es kapcsok felé folynak (pl.: az armatúra **A1**-es kapcsa pozitív) akkor motor esetén a forgásirány a hajtásoldal felől nézve az óramutató járásával megegyező lesz.

Az 5.45. ábra rajzainak készítésénél alapvetően motoros áramirányt tételeztünk fel.



5.45. ábra Az egyenáramú gépek gerjesztési módjai

a) külső gerjesztés; b) párhuzamos, vagy mellékáramkörű gerjesztés

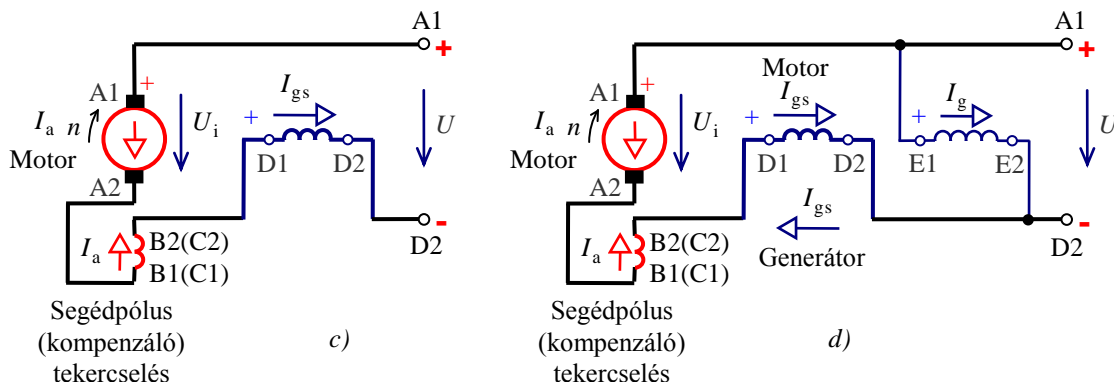
A következő gerjesztési módok lehetségesek:

- ✚ **Külső gerjesztés** (5.45a ábra): a gép gerjesztő tekercsét (jelölése: **F1-F2**, menetszáma  $N_g$ ) egy a géptől független külső tápforrásból tápláljuk, a gerjesztőáram az üzem közben állandó értékű. Terheléstől független fluxust lehet elérni állandómágneses gerjesztéssel is, a fluxus nagysága azonban ebben az esetben nem módosítható.
- ✚ **Párhuzamos, mellékáramkörű, vagy sönt gerjesztés** (5.45b ábra): a gép gerjesztő tekercsét (jelölése: **E1-E2**, menetszáma  $N_g$ ) párhuzamosan kötjük az armatúra tekercseléssel, a gerjesztés generátoros üzemmódban a kismértékben változó armatúrafeszültségtől függ.
- ✚ **Soros gerjesztés** (5.45c ábra): a gép gerjesztő tekercsét (jelölése: **D1-D2**, menetszáma  $N_{gs}$ ) sorosan kötjük az armatúratekercseléssel, így azon az  $I_a$  armatúraáram folyik át:  $I_{gs} = I_a$ . A gerjesztés és egyben a gép fluxusa is nagymértékben terhelésfüggő.
- ✚ **Vegyes gerjesztés** (5.45d ábra): a gép két azonos mágneses tengelyű gerjesztőtekercssel rendelkezik; az egyiket párhuzamosan (**E1-E2**), a másikat sorosan (**D1-D2**) kötjük az armatúrával (az állandó fluxust biztosító tekercset külső forrásból is táplálhatjuk). A soros tekercsben folyó áram irányától függően a két tekercs gerjesztése kompaund gép esetén összeadódik, ellenkompaund esetben pedig kivonódik egymásból. Mivel motoros üzemből generátorosba átmenve megfordul az armatúraáram iránya (a párhuzamos gerjesztésé változatlan) kompaund kötésű motort generátorként



alkalmazva ellenkompaund generátort kapunk. A gép viselkedése a terheléstől függő változó-, és az állandó gerjesztés arányától, a gerjesztési viszonytól függ:

$$v = \frac{\Theta_{psn}}{\Theta_{pn}} = \frac{I_{an} \cdot N_{gs}}{I_{gn} \cdot N_g + I_{an} \cdot N_{gs}} \quad (5.64)$$



5.45. ábra Az egyenáramú gépek gerjesztési módjai  
c) soros gerjesztés; d) vegyes gerjesztés

Az egyenáramú gépek karakterisztikái nagymértékben a gép fluxusának üzem közbeni viselkedésétől függenek. Ilyen szempontból az első, *állandó fluxusú* csoportba azok a gépek sorolhatók, amelyeknek a fluxusa állandó, vagy csak kis mértékben függ a terheléstől ( $v \approx 0 \dots 0,12$ ). Ebben a csoportba sorolhatók külső és párhuzamos gerjesztésű gépek. A csoport szélső esete a kompenzált külsőgerjesztésű gép, amelynek gerjesztési viszonya:  $v \approx 0$ .

A másik, a *változó fluxusú* csoport szélső esete a tisztán soros gerjesztésű gép ( $v \approx 1$ ), amelynek gerjesztése, és így fluxusa is nagymértékben a terheléstől függ. A vegyes gerjesztésű gépek átmenetet képeznek a két csoport szélsőséges esetei között.

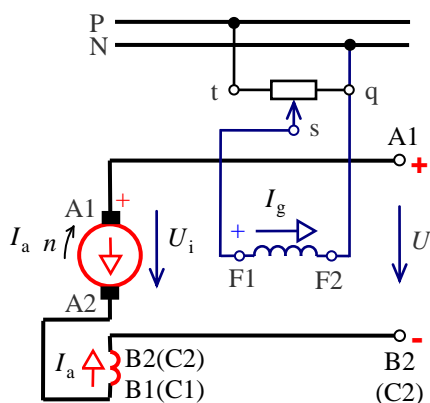
## 5.9. EGYENÁRAMÚ GENERÁTOROK JELLEGGÖRBÉI

Az egyenáramú gépek jelleggörbéi közül Az 5.7.2. pontban eddig már foglalkoztunk az üresjárási- és belső terhelési jelleggörbékkel, melyeket mindig generátoros üzemállapotban veszünk fel.

Érdeemes megjegyezni, hogy a generátorok összes jelleggörbéjének felvételénél a fordulatszámot állandó értéken tartjuk. A kapcsolófeszültség polaritása az  $U_i = k_U \cdot \Phi \cdot n$  összefüggés szerint a fluxus (gerjesztőáram) irányától és a forgásiránytól függ, ezekkel változtatható meg. A tárgyalásból kihagyjuk a terhelési karakterisztikájának labilitása miatt ritkán alkalmazott soros generátorokat.

### 5.9.1. A külsőgerjesztésű generátor

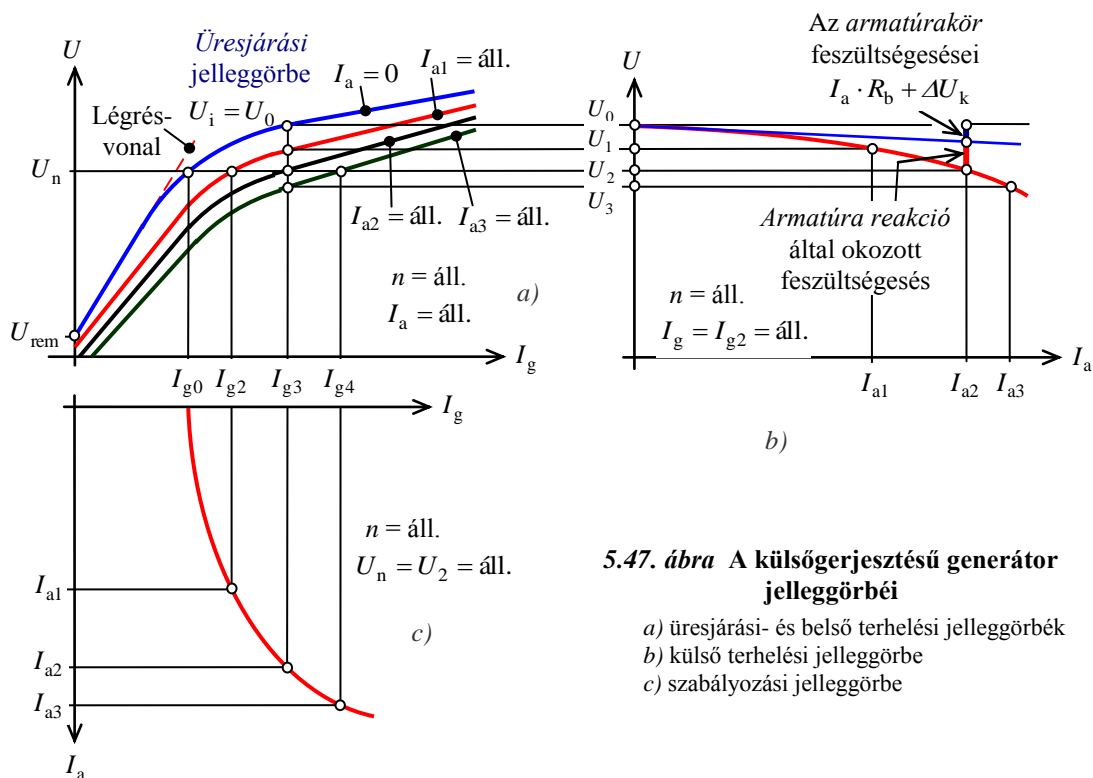
A generátor gerjesztőáramát a gerjesztőkört állandó feszültségről táplálva az  $R_{sz}$  gerjesztőköri előtétellenállással (5.46. ábra), vagy gerjesztésszabályozót alkalmazva, egy teljesítményelektronikai kapcsolással változtatjuk.



5.46. ábra A külsőgerjesztésű generátor kapcsolása

Az 5.47. ábrán az egyenáramú generátorok két újabb jelleggörbét, a *külső terhelési- és a szabályozási jelleggörbét*, valamint az eddig megismert görbék kapcsolátát mutatjuk be.

A felhasználás szempontjából generátor  $U(I_a)$  *külső terhelési*, vagy egyszerűen *külső jelleggörbéje* a legfontosabb; amelyet állandó értéken tartott fordulatszám és gerjesztőáram mellett vesznek fel. A karakterisztika a kapocsfeszültség változását mutatja a terhelőáram függvényében, amely az üresjárási és belső terhelési jelleggörbék segítségével meg is szerkeszthető (5.47a  $\Rightarrow$  5.47b ábra). Egy adott armatúraáramnál a külső jelleggörbe az  $I_{an} \cdot R_b + \Delta U_k$  feszültségesés és az armatúreakció fluxuscsökkentő hatása miatt ad kisebb kapocsfeszültséget, mint az  $U_0$  üresjárási feszültség.



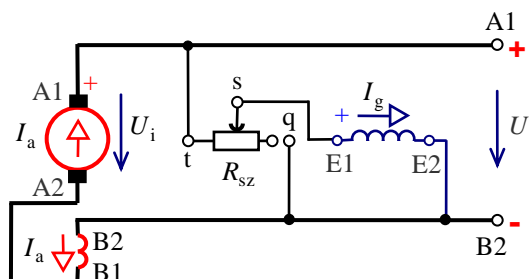
5.47. ábra A külsőgerjesztésű generátor jelleggörbéi

- a) üresjárási- és belső terhelési jelleggörbék
- b) külső terhelési jelleggörbe
- c) szabályozási jelleggörbe

A külsőgerjesztésű generátor  $I_g(I_a)$  szabályozási jelleggörbéje azt mutatja meg, hogy hogyan kell változtatnunk a terhelés változásakor a gép gerjesztőáramát ahhoz, hogy a gép kapocsfeszültsége állandó értékű maradjon. Ez a jelleggörbe is megszerkeszthető az üresjárási- és belső terhelési jelleggörbékéből (5.47a  $\Rightarrow$  5.47c ábra). A szükséges gerjesztés annál meredekebben emelkedik, minél nagyobb feszültségértéket akarunk állandó értéken tartani, vagyis minél telítettebb a gép.

## 5.9.2. A párhuzamos gerjesztésű generátor

A párhuzamos gerjesztésű-, vagy mellékáramkörű generátorok gerjesztőtekercsét egy sorosan kapcsolt gerjesztőköri szabályozó ellenálláson keresztül párhuzamosan kapcsolják az armatúrával (5.48. ábra). Mivel a gép a gerjesztőáramát önmaga szolgáltatja, szokás *öngerjesztésű generátornak* is nevezni.



5.48. ábra A párhuzamos gerjesztésű generátor kapcsolása

Az öngerjesztés elvét *Jedlik Ákos* fedezte fel 1859-ben, az első ilyen elven működő gép 1861-ben készült el. Ahhoz, hogy feszültséget szolgáltatson, a generátornak először fel kell gerjednie. A felgerjedési folyamatban (5.49. ábra) a gép remanens feszültsége játszik alapvető szerepet. Tételezzük fel először, hogy a gerjesztőköri szabályozó ellenállás ki van iktatva, vagyis a gerjesztőkör összellenállása  $R_g$ ! Az 5.49. ábrán az üresjárási jelleggörbén kívül megrajzoltuk az  $I_g \cdot R_g$  szorzatot, az ún. *ellenállásegyenest*, amely azt mutatja meg, hogy a gerjesztőkörben egy adott feszültség hatására mekkora áram folyik. Kiinduláskor a gép  $U_{rem}$  indukált feszültsége  $I_{g1}$  gerjesztőáramot indít, viszont az  $I_{g1}$  gerjesztőáramhoz  $U_{01}$  indukált feszültség tartozik, aminek a hatására már  $I_{g2}$  gerjesztőáram folyik és így tovább. A felgerjedés az 5.49. ábrából láthatóan az A pontban fejeződik be, ahol a két jelleggörbe metszi egymást, a metszéspont egyben meghatározza az állandósult állapot  $U_{04}$  feszültségét. Hallgatólagosan feltételeztük továbbá, hogy a gerjesztőtekercs úgy van bekötve, hogy a remanens feszültség hatására létrejövő gerjesztőáram növeli a gép indukált feszültségét. Ellenkező esetben a kialakuló gerjesztőáram a remanens feszültség ellen dolgozik és a gép teljesen lemágneseződik (*öngyilkos kapcsolás*).

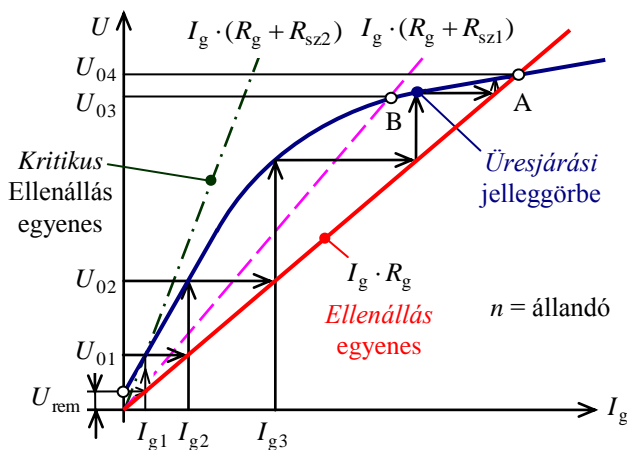
A gerjesztőkör ellenállását a beiktatott változtatható ellenállással  $R_g + R_{sz1}$ -re növelve az ellenállásegyenes mereksége növekszik, az üresjárási kapcsolásfeszültség pedig csökken ( $U_{04} \Rightarrow U_{03}$ ).

Az ellenállást még tovább növelve  $R_{sz2}$  beiktatott ellenállásnál végül eljutunk a *kritikus ellenállásegyeneshez*, amelynél a gép már nem gerjed fel, vagy felgerjedési feszültsége bizonytalanává válik.

Az eddig elmondottakat összefoglalva a párhuzamos gerjesztésű gép felgerjedési feltételei a következők:

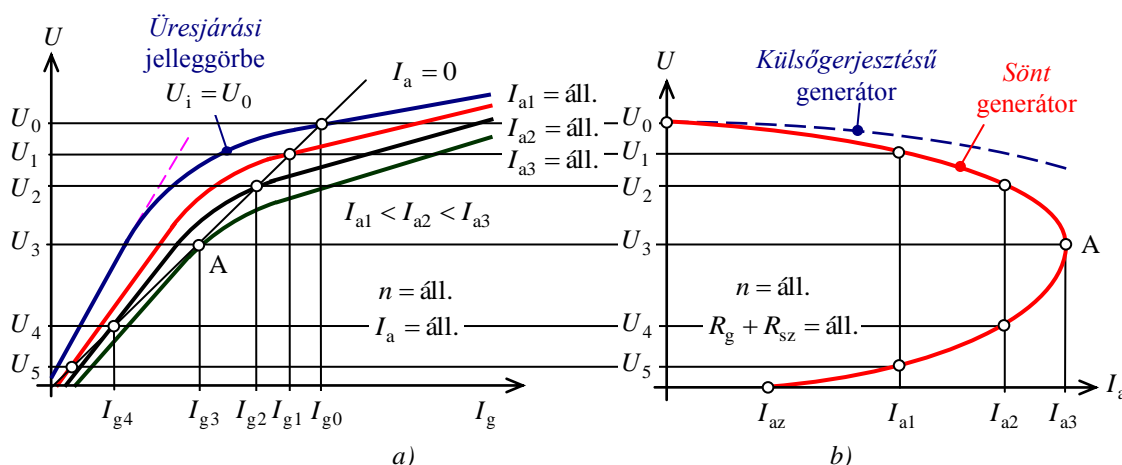
Az öngerjesztés elvét *Jedlik Ákos* fedezte fel 1859-ben, az első ilyen elven működő gép 1861-ben készült el.

Ahhoz, hogy feszültséget szolgáltatson, a generátornak először fel kell gerjednie. A felgerjedési folyamatban (5.49. ábra) a gép remanens feszültsége játszik alapvető szerepet. Tételezzük fel először, hogy a gerjesztőköri szabályozó ellenállás ki van iktatva, vagyis a gerjesztőkör összellenállása  $R_g$ ! Az 5.49. ábrán az üresjárási jelleggörbén kívül megrajzoltuk az  $I_g \cdot R_g$



5.49. ábra Az öngerjesztésű generátor felgerjedési folyamata

- ✚ A gépnek legyen remanens feszültsége. Ha a gépet pl.: egy előző öngyilkos kapcsolásban lemágnesezték, egy akkumulátor segítségével elősegíthetjük az új remanens feszültség kialakulását.
- ✚ Ne legyen öngyilkos kapcsolásban. Ezt úgy döntjük el, hogy a gerjesztőkört megszakítva mérjük a gép remanens feszültségét. Ha ez csökken a gerjesztőkör zárásakor, akkor a bekötés rossz irányú. Ekkor cseréljük meg a gerjesztő tekercs kapcsait az armatúrához képest!
- ✚ A gerjesztőkör ellenállása ne legyen nagyobb, mint a kritikus ellenállásegyeneshez tartozó érték. Ha erre gyanakszunk, csökkentjük, vagy iktassuk ki a gerjesztőkörü szabályozó ellenállást!



5.50. ábra A párhuzamos gerjesztésű generátor jelleggörbéi

a) üresjárási és belső terhelési jelleggörbék; b) külső terhelési jelleggörbe

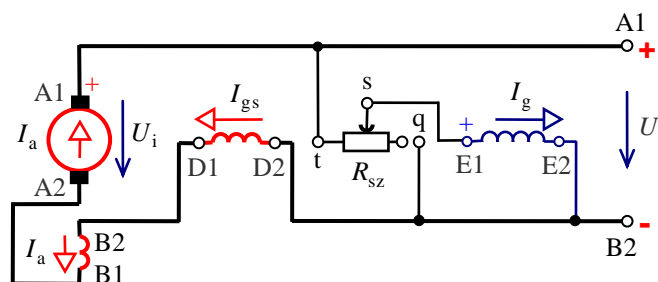
A párhuzamos gerjesztésű gép külső terhelési jelleggörbéje (5.50b ábra) mindig a külsőgerjesztésű generátor külső jelleggörbéje alatt jár (összehasonlításul pontozott vonallal berajzoltuk az 5.50b ábrába), mivel gerjesztőkörü beavatkozás nélkül a gerjesztőkör  $R_g + R_{sz}$  ellenállása állandó, és így a kapocsfeszültség változása miatt a generátor gerjesztőárama is csökken a terhelés növekedésekor. A jelleggörbét mérésrel a fordulatszámokon kívül a gerjesztőkör ellenállásának állandó értéken tartása mellett, a terhelőellenállás fokozatos csökkentésével vehetjük fel, mérve az  $U$  kapocsfeszültség és az  $I_a$  armatúraáram összetartozó értékeit. A külső jelleggörbét a belső terhelési jelleggörbékkel meg is megszerkeszthetjük, de most a szerkesztéshez az adott gerjesztőkörü összellenálláshoz tartozó ellenállásegyenest használjuk fel. A feszültségegyensúlyoknak mind üresjárásban, mind terheléskor fenn kell állniuk, így a külső jelleggörbe pontjait az üresjárási jelleggörbe és a különböző armatúraáramokhoz tartozó belső terhelési jelleggörbék, valamint az ellenállásegyenes metszéspontjai adják (5.50a ábra  $\Rightarrow$  5.50b ábra).

Külön figyelmet érdemel az 5.50a és 5.50b ábrán is bejelölt A pont, ahol az ellenállásegyenes az  $I_{a3}$  áramú belső terhelési jelleggörbét érinti, mert a gépből ekkor tudjuk a legnagyobb áramot kivenni, ez a gép *határárama*. Ha a mérés során a terhelőellenállást tovább csökkentjük, a kapocsfeszültség is, az armatúraáram is tovább csökken, és a gép legerjed.

A jelleggörbének ez az üzem közben nem használt, labilis része az  $I_{az}$  áramú rövidzárási pontba fut be.

### 5.9.3. A vegyes gerjesztésű generátor

A vegyesgerjesztésű generátorok két gerjesztőtekercssel rendelkeznek: az egyiket párhuzamosan (ez lehet külsőgerjesztésű is) a másikat sorosan kötik az armatúrával (5.51.

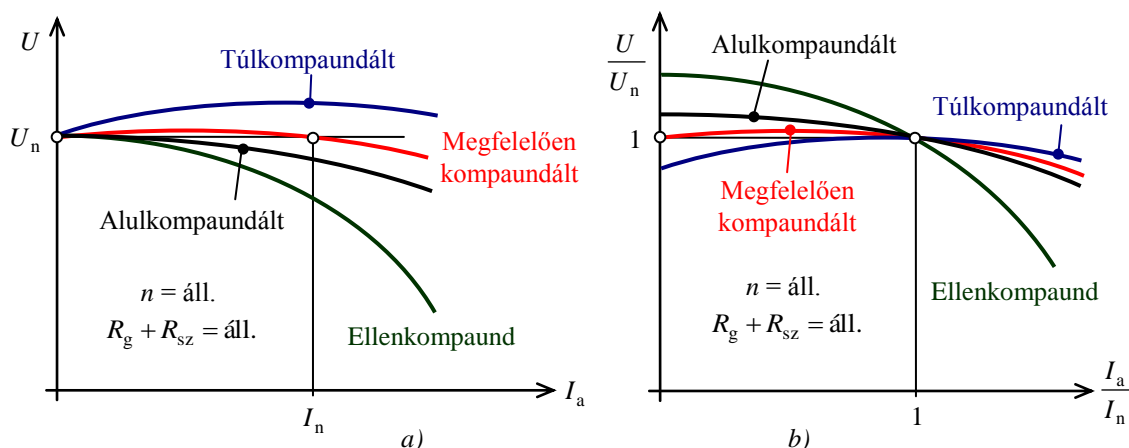


5.51. ábra Ellenkompaund gerjesztésű generátor kapcsolása

alkalmazásának (amit *kompaundálásnak* is szokták nevezni) lényege, hogy a terheléstől függő gerjesztéssel jelentősen módosítani tudjuk a vegyesgerjesztésű gép 5.52a ábrán felrajzolt külső karakterisztikáit.

A túlkompaundált generátorok feszültsége névleges terhelés esetén nagyobb, az alulkompaundáltaké pedig kisebb, mint az üresjárási feszültség. Feszültségtartó generátoroknál a kompaundálás akkor megfelelő, ha az üresjárási és a névleges feszültség megegyezik egymással. Ellenkompaundált generátorok esetén a terheléssel erősen eső karakterisztikát kapunk. Ez a jelleggörbe nagyon előnyös lehet hegesztésnél, ahol viszonylag magas ívgyújtási feszültség szükséges, de az égési áramot a feszültség csökkentésével korlátozni kell.

Az 5.52b ábrán a vegyesgerjesztésű generátorok külső terhelési karakterisztikáit névlegeshez viszonyított (relatív) egységekben ábrázoltuk.



5.52. ábra Vegyesgerjesztésű generátorok külső terhelési jelleggörbéi

a) a feszültség-terhelőáram karakterisztikák; b) a terhelési karakterisztikák relatív egységekben

## 5.10. EGYENÁRAMÚ MOTOROK JELLEGGÖRBÉI

Az egyenáramú motorok jelleggörbéinek vizsgálata esetén állandó értékűnek tekintjük a hálózat kapocsfeszültségét és az armatúrákör ellenállását.

### 5.10.1. Külsőgerjesztésű és mellékáramkörű motorok terhelési jelleggörbéi

Ebbe a csoportba sorolhatók a külső- és párhuzamos gerjesztésű motorokon kívül azok a gépek, amelyeknek soros stabilizáló (kompaundáló) tekercse van, vagyis amelyeknél az (5.64) szerinti gerjesztési viszony  $\nu = 0 \dots 0,12$  közé esik. Ezeknél a gépeknél állandó értékű gerjesztőáramot (ill. állandó értékű  $R_g + R_{sz}$  gerjesztőköri ellenállást) feltételezve a fluxus terheléstől függő változása olyan kismértékű, hogy gyakran *állandó fluxusú* csoportról beszélnek.

Amint már korábban tárgyaltuk, a kefeátmeneti feszültségeséseket elhanyagolva (5.29) alapján a motoros üzemre általánosan érvényes fordulatszám-egyenletet:

$$n = \frac{U - I_a \cdot R}{k_U \cdot \Phi} = \frac{U_a}{k_U \cdot \Phi} - \frac{R}{k_U \cdot \Phi} \cdot I_a,$$

míg a gép nyomatéka:  $M = k_M \cdot \Phi \cdot I_a$ .

A fluxusváltozás szempontjából ideálisnak tekinthető kompenzált gépnél a fluxus a terheléstől függetlenül állandó, ezért a nyomaték az armatúraárammal egyenesen arányosan változik:  $M = C \cdot I_a$  (5.53a ábra). Az  $n(I_a)$  és az  $n(M)$  fordulatszám egyenlet ekkor:

$$n = \frac{U}{k_U \cdot \Phi} - \frac{R}{k_U \cdot \Phi} \cdot I_a = n_0 - m_1 \cdot I_a, \quad \text{ill.} \quad (5.65)$$

$$n = \frac{U}{k_U \cdot \Phi} - \frac{R}{k_U \cdot k_M \cdot \Phi^2} \cdot M = n_0 - m_2 \cdot M \quad (5.66)$$

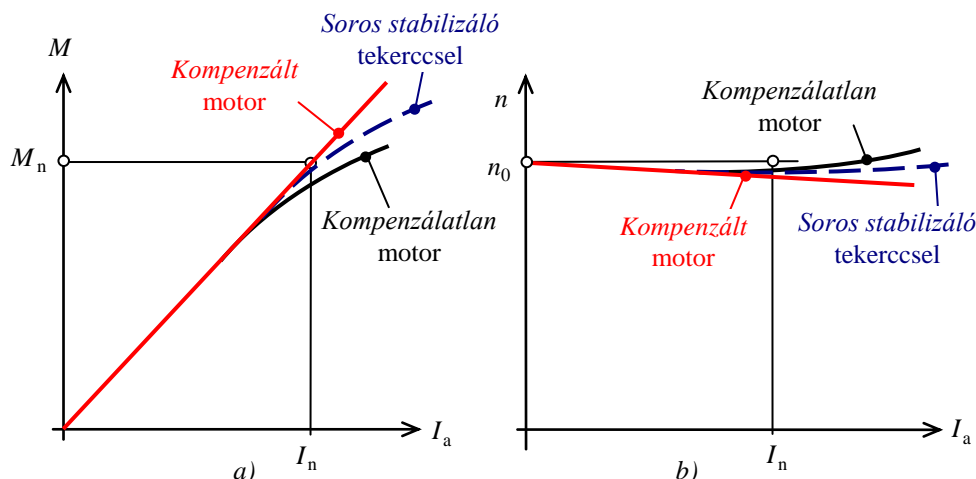
egy egyenes egyenlete, ahol  $n_0 = \frac{U}{k_U \cdot \Phi}$  az *üresjárási fordulatszám* és  $m_1 = \frac{R}{k_U \cdot \Phi}$ , ill.

$m_2 = \frac{R}{k_U \cdot k_M \cdot \Phi^2}$  az egyenes meredeksége. A karakterisztikát az 5.54b ábrán rajzoltuk fel.

(5.65) és (5.66) szerint az üresjárási fordulatszám a kapocsfeszültségtől és a fluxustól, a meredekség (fordulatszám-esés) az armatúrákör ellenállásától és a fluxustól függ.

Névleges feszültséget és fluxust, valamint 5 %-os relatív értékű belső ellenállást, mint armatúráköri ellenállást ( $R = R_b$ ) feltételezve a fordulatszám a névleges pontban az üresjárásihoz képest 5 %-ot esik. Az ilyen, a terheléstől függően kis fordulatszám-esésű jeleggörbéket ebből eredően szokták *sönt jellegű karakteriszkáknak* is nevezni. Az ilyen karakterisztika ideális a fordulatszám-tartó hajtások készítésénél, ami magyarázza széleskörű alkalmazását. Jegyezzük meg, hogy a fluxus a fordulatszám egyenletben a nevezőben szerepel, így a fluxus hiánya a fordulatszám megnövekedését, a gép *megszaladását* okozhatja. Ezért





5.53. ábra A külső- és párhuzamos gerjesztésű motorok terhelési jelleggörbéi

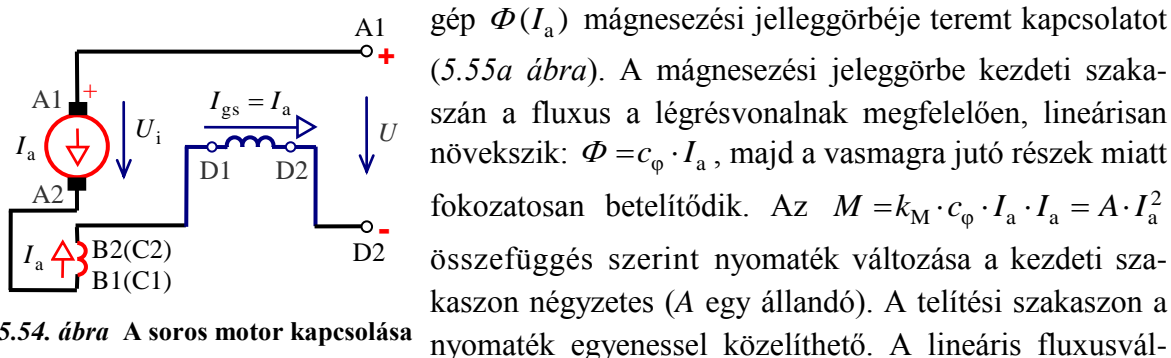
a) az  $M(I_a)$  jelleggörbék; b) az  $n(I_a)$  jelleggörbék

a gépindításakor először mindig győződjünk meg a gerjesztés meglétéről, és a gerjesztőkört fokozott gondossággal huzalozzuk.

Kompenzálatlan, ill. párhuzamos gerjesztésű gépek fluxusa függ a terheléstől. Elsősorban az armatúravisszahatás miatt a mai modern gépek fluxusa, – és ezzel együtt a gép nyomatéka is – már a névleges pont előtt csökken úgy, ahogy azt az 5.53a ábrán megmutattuk. A fluxus csökkenése a fordulatszámot az (5.65) összefüggésből láthatóan növeli, amit berajzoltunk az 5.53b ábrába. Az így kialakuló  $n(I_a)$  karakterisztika nagyobb terheléseknél, és bizonyos terhelőgép jelleggörbéknél labilis lehet. Ennek a problémának a kiküszöbölésére használják a kompaund kötésű soros stabilizáló tekercset  $v \approx 0,05...0,12$  gerjesztési viszonyal, amellyel a karakterisztikák a szaggatott vonalnak megfelelően módosulnak.

### 5.10.2. Sorosgerjesztésű motorok terhelési jelleggörbéi

A soros motor (5.54. ábra) gerjesztőtekercsét sorbakötik az armatúrával, a tekercs gerjesztése a terheléssel arányosan változik. A terhelésfüggő gerjesztés és a fluxus között a



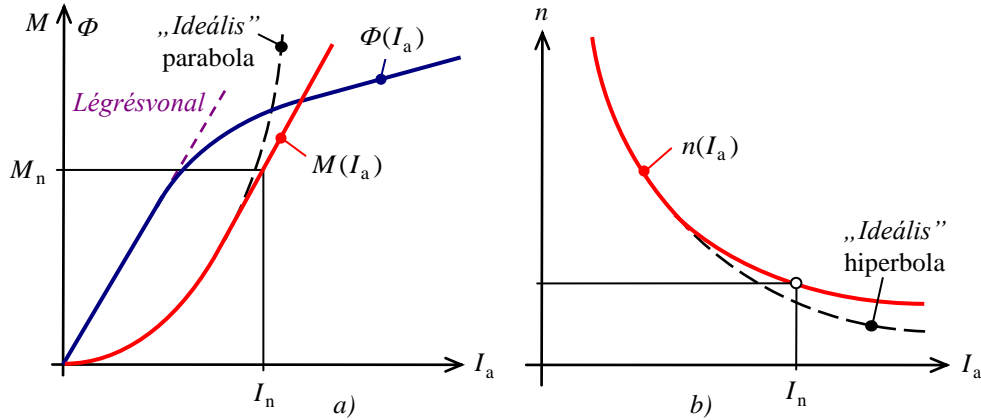
5.54. ábra A soros motor kapcsolása

gép  $\Phi(I_a)$  mágnesezési jelleggörbéje teremt kapcsolatot (5.55a ábra). A mágnesezési jeleggörbe kezdeti szakaszán a fluxus a légrésvonalnak megfelelően, lineárisan növekszik:  $\Phi = c_\varphi \cdot I_a$ , majd a vasmagra jutó részek miatt fokozatosan betelítődik. Az  $M = k_M \cdot c_\varphi \cdot I_a \cdot I_a = A \cdot I_a^2$  összefüggés szerint nyomaték változása a kezdeti szakaszon négyzetes (A egy állandó). A telítési szakaszon a nyomaték egyenessel közelíthető. A lineáris fluxusváltozást behelyettesítve a fordulatszám-egyenletbe:

$$n = \frac{U}{k_U \cdot c_\varphi \cdot I_a} - \frac{R}{k_U \cdot c_\varphi \cdot I_a} \cdot I_a = \frac{B}{I_a} - C, \text{ ill.} \quad (5.67)$$

$$n = \frac{U}{\sqrt{k_U \cdot c_\phi \cdot \sqrt{M}}} - \frac{R}{k_U \cdot c_\phi} = \frac{D}{\sqrt{M}} - C, \quad (5.68)$$

ahol  $B$ ,  $C$  és  $D$  konstansok.

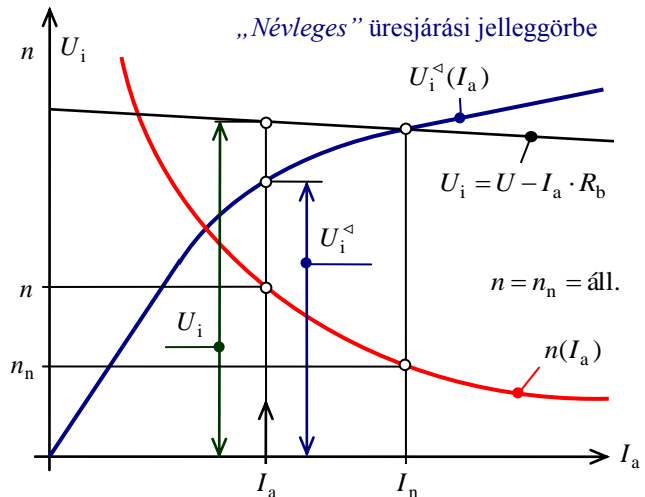


5.55. ábra Soros gerjesztésű motorok terhelési jelleggörbéi

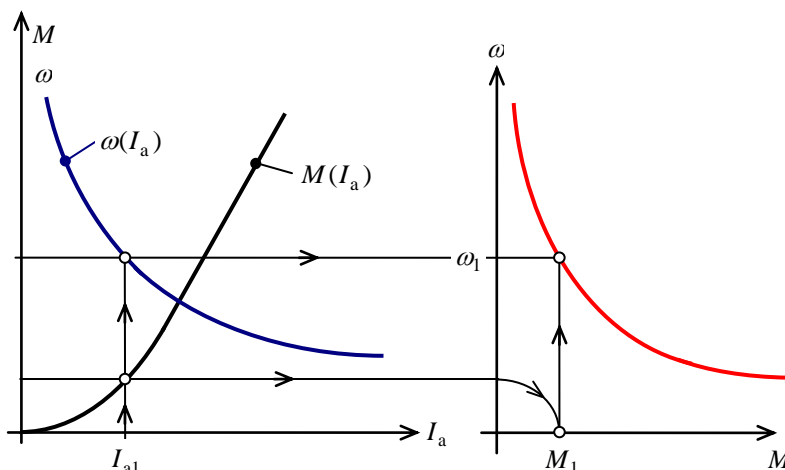
a) az  $M(I_a)$  jelleggörbék; b) az  $n(I_a)$  jelleggörbék

Az (5.67) összefüggés szerint a fordulatszám a terhelőáram függvényében egy függőlegesen eltolott tengelyű hiperbola (5.55b ábra). A telítési részen a fluxus nem nő az armatúraárammal arányosan, és mivel a fluxus a fordulatszám egyenletben a nevezőben van, ez a jelleggörbe-rész az „ideális” hiperbola felett halad. A jelleggörbéből látszik, hogy a soros motor a terhelés hatására nagymértékben változtatja fordulatszámát. Az ilyen, nagy fordulatszámesésű  $n(I_a)$  jelleggörbéket innen eredően szokták *soros jellegű karakterisztikáknak* nevezni. Az is látható, hogy a motor üresjárásban „megszaladhat”, ezért a soros motort terhelés nélkül nem szabad üzemeltetni. A soros jellegű karakterisztika másik jellemzője a nagy indítónyomaték, ami rendkívül előnyös a villamos vontatásban (trakciós motorok).

Nagy teljesítményű motorok esetén nem mindig áll rendelkezésünkre a motor  $n(I_a)$  terhelési jelleggörbéje. Ekkor a karakterisztikát a motor névleges fordulatszámán felvett üresjárási jelleggörbéje alapján is kiszerezhetjük, amelynek menetét az 5.56. ábrán mutatjuk be. Egy adott armatúraáramnál a gép  $U_i = U - I_a \cdot R_b$  indukált feszültségét az összefüggésből kapjuk meg. Ennél az armatúraáramnál (mivel a fluxus azonos) az eltérés a névleges fordulatszámon felvett üresjárási jelleggörbéhez képest csak abból származhat, hogy más a fordulatszám.



5.56. ábra Az  $n(I_a)$  terhelési jelleggörbe szerkesztése az üresjárási jelleggörbe alapján



5.57. ábra Soros motor  $\omega(M)$  mechanikai jelleggörbéjének szerkesztése az  $M(I_a)$  és az  $\omega(I_a)$  karakterisztikákból

sebesség arányosak egymással, ezért a függőleges tengelyre más léptékben a szögsebességet is felvihetjük.

Az 5.57. ábrán bemutatott szerkesztés szerint az  $\omega(M)$  mechanikai jelleggörbét úgy kapjuk meg, hogy egy adott armatúraáramnál az  $\omega(I_a)$  és az  $M(I_a)$  pontokat az  $\omega(M)$  koordináta-rendszerbe átvetítjük.

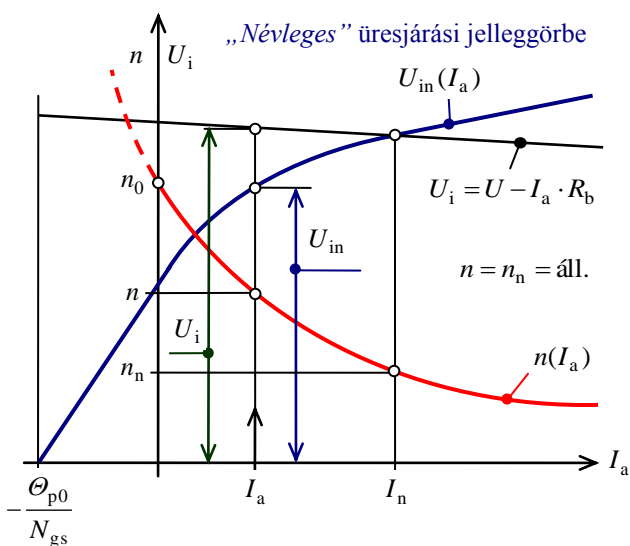
### 5.10.3. Vegyesgerjesztésű motorok jelleggörbéi

A vegyesgerjesztésű motorok soros és mellékáramkörű gerjesztőtekercssel is rendelkeznek. Jelleggörbéik az előzőleg tárgyalt két motortípus közé esnek.  $v = 0,15 \dots 0,3$  gerjesztési viszony esetén *gyengén kompaundált*,  $v = 0,4 \dots 0,7$  gerjesztési viszony esetén *erősen kompaundált* (vagy egyszerűen csak *kompaund*) motorról beszélünk.

A vegyesgerjesztésű motorokban a főpólusgerjesztés az állandó értéken tartott párhuzamos gerjesztés és a terheléstől függő soros gerjesztés összegéből áll ( $I_{gs} = I_a$ -t feltételeztünk):

$$\Theta_p = \Theta_{p0} + \Theta_{ps} = I_g \cdot N_g + I_a \cdot N_{gs}.$$

Ezt úgy is felfoghatjuk, hogy a mellékáramkörű gerjesztés jelenléte miatt az 5.56. ábra kapcsán már ismertetett „névleges” üresjárási jelleggörbe az  $I_a$  tengely negatív irányában  $\Theta_{p0} / N_{gs}$  gerjesztéssel el van tolva, de az ott ismertetett szerkesztés most is alkalmazható (5.58. ábra).



5.58. ábra Vegyesgerjesztésű motor  $n(I_a)$  jelleggörbéjének szerkesztése az üresjárási jelleggörbe alapján

$$\text{A keresett } n = \frac{U_i}{U_i^{\Delta}} \cdot n_n$$

fordulatszám az összefüggésből határozható meg. A leírt szerkesztést több pontban elvégezve a kívánt terhelési jelleggörbét kapjuk.

Villamos hajtások esetén nagyon gyakori, hogy az  $n(I_a)$  karakterisztika helyett inkább az  $\omega(M)$  mechanikai jelleggörbét használjuk. A fordulatszám és a szög-

A soros motortól eltérően a vegyesgerjesztésű motornak meghatározott  $n_0$  üresjárási pontja van, amit a  $\mathcal{O}_{p0}$  gerjesztésrész szab meg:  $n_0 = \frac{U}{k_U \cdot \Phi}$ . Ha a motor fordulatszámát külső nyomatékkal  $n_0$  fölé emeljük, az áram iránya megfordul, és a gép generátoros üzembe megy át.

A vegyesgerjesztésű motorokat elsősorban a statikus szempontból nehézüzemű hajtások esetén (emelőgép, malom, csörlő stb.) alkalmazzák. Felhasználhatók továbbá a villamos vontatásban olyan helyeken, ahol a soros motorok jó indítási tulajdonságait a mellékáramkörü motorok visszatáplálásos fékezésének lehetőségeivel kívánják összekapcsolni (pl. fogaskerekű vasút, trolibusz).

## 5.11. ÁLLANDÓ FESZÜLTSGRŐL TÁPLÁLT EGYENÁRAMÚ MOTOROK ÜZEME

Ebben a fejezetben az állandó (névleges) feszültségről táplált egyenáramú motorok indítását, egy üzem közbeni terhelési pont beállítását és fékezését vizsgáljuk. Külön tárgyaljuk az állandó-, és a terheléstől függően változó fluxusú gépeket. Az egyes csoportoknál kitérünk a motor forgásirányának beállítására, de most ismét kiemeljük: a gyártó a gépet úgy köti el, hogy amennyiben a felhasználó az összes tekercset úgy köti be, hogy az áramok 1-es jelű kapcsoktól a 2-es jelűek felé folynak (pl.: az armatúra A1-es kapcsa pozitív) akkor a forgásirány a hajtásoldal felől nézve az óramutató járásával megegyező lesz.

### 5.11.1. Relatív egységek

Amikor az egyenáramú gép üzemviszonyait tanulmányozzuk, nagyon sokszor áttekinthetőbbé teszi számításainkat az ún. *relatív egységek* használata. Például ha azt mondjuk, hogy a gép árama 100 A, ez az adat nem mond semmit a gép terheléséről, mert ez az áram lehet egy kisteljesítményű gép rövidzárási árama, vagy egy nagy gép üresjárási árama. De ha azt mondjuk, hogy a gép névleges árammal (relatív egységben 100 %-al) terhelt, akkor tudjuk, hogy a gépnek tartósan kell tudni üzemelni ezzel a terheléssel.

A relatív egység általában egy jellemző értékének és névleges értékének hányadosa, amelyet igen sokszor százalékosan adunk meg. A relatív értékeket a továbbiakban egy felső indexbe tett csillaggal fogjuk jelölni. Az egyenáramú gépeknél alkalmazott relatív egységek:

$$U^* = \frac{U}{U_n}, \quad I^* = \frac{I}{I_n}, \quad P^* = \frac{P}{P_n}, \quad M^* = \frac{M}{M_n},$$

$$R^* = \frac{R}{R_n} \quad \text{és} \quad n^* = \omega^* = \frac{n}{n_{0n}} = \frac{\omega}{\omega_{0n}}. \quad (5.69)$$

Névleges ellenállásnak tekintjük a névleges feszültség és a névleges áram hányadosát:  
 $R_n = \frac{U_n}{I_n}$ ;  $n_{0n}$  ill.  $\omega_{0n}$  a névleges üresjárási fordulatszám ill. szögsebesség. A fluxus relatív értéke:

$$\Phi^* = \frac{\Phi}{\Phi_{n0}}, \quad (5.70)$$

ahol  $\Phi_{n0}$  külső-, sönt- és vegyesgerjesztésű motoroknál a névleges mellékáramkörü gerjesztéshez ( $I_{gn} \cdot N_g$ ), soros motoroknál pedig a névleges főáramkörü gerjesztéshez ( $I_{an} \cdot N_{gs}$ ) tartozó fluxus értéke az armatúreakció nélkül.

Az indukált feszültség relatív értéke:

$$U_i^* = \frac{U_i}{U_n} = \frac{k_U \cdot \Phi \cdot n}{k_U \cdot \Phi_{n0} \cdot n_{0n}} = \Phi^* \cdot n^*. \quad (5.71)$$

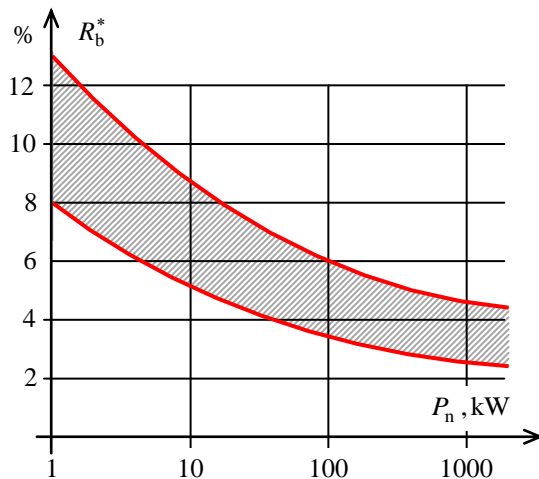
Az (5.27) összefüggést a névleges feszültséggel végigosztva a feszültség-egyenlet relatív alakja motoros üzemben:

$$U^* = \frac{U}{U_n} = \frac{U_i}{U_n} + \frac{I_a}{I_{an}} \cdot \frac{R}{\frac{U_n}{I_{an}}} = \Phi^* \cdot n^* + I_a^* \cdot R^*. \quad (5.72)$$

(5.71)-t átrendezve a fordulatszám-egyenlet relatív egységekből:

$$n^* = \omega^* = \frac{U^* - I_a^* \cdot R^*}{\Phi^*} = \frac{U^*}{\Phi^*} - \frac{R^*}{\Phi^*} \cdot I_a^*. \quad (5.73)$$

Az egyenáramú gépek belső ellenállásának relatív értékét a névleges teljesítmény függvényében (katalógusértékek alapján tájékoztató jelleggel) az 5.59. ábrán rajzoltuk fel. Az



5.59. ábra Az egyenáramú gép belső ellenállásának tájékoztató értékei relatív egységben

ábra alapján látható, hogy a belső ellenállás relatív értéke a teljesítmény növekedésével csökken, ismeretlen gép esetén (és a további számításainknál mi is ezt tesszük) 5 %-os relatív értéket szokásos feltételezni.

Eddig kapott eredményeinkkel már meg tudjuk határozni egy motor rövidzárási áramát. (5.73)-at az armatúraáramra rendezve, és  $R^* = R_b^* = 0,05$ -t, valamint névleges feszültséget feltételezve:

$$I_{az}^* = \frac{I_{az}}{I_{an}} = \frac{U^* - \Phi^* \cdot n^*}{R_b^*} = \frac{1 - 1 \cdot 0}{0,05} = 20,$$

vagyis a névleges áram húszszorososa. Egy hagyományos egyenáramú gép megengedhető maximális árama a névleges áram másfélszerese (a szabvány 60 s-ig  $1,5 I_{an}$ -t, 15 s-ra  $1,6 I_{an}$ -t enged meg).

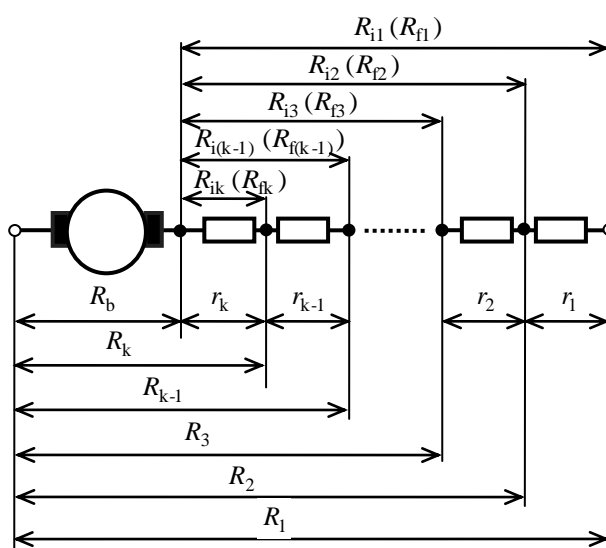
Az armatúrákörbe iktatandó külső ellenállás értéke, ha az indítás pillanatában  $1,4 I_{an}$ -t engedünk meg:

$$R_i^* = R^* - R_b^* = \frac{U^* - \Phi^* \cdot n^*}{I_a^*} - R_b^* = \frac{1 - 1 \cdot 0}{1,4} - 0,05 = 0,664,$$

vagyis a belső ellenállás 13,3 szorososa.

### 5.11.2. Állandó feszültségről táplált egyenáramú motorok indítása

Az indítás pillanatában a fordulatszám nulla, ezért a gépnek még nincs indukált feszültsége, vagyis a teljes kapocsfeszültség az armatúrákör ellenállására esik. Az előző,



5.60. ábra Az indító (fékező) ellenállások esetén alkalmazott jelölések

5.11.1. pontban már tárgyaltuk, hogy a gép belső ellenállása kicsiny, így a kialakuló rövidzárási áram olyan nagy, hogy azt a motor nem viseli el.

Az indítás során az áramot az armatúrákörbe sorosan beiktatott *indító ellenállásokkal* korlátozzuk úgy, hogy értéke  $I_{amin}$  és  $I_{amax}$  közé essék. A indító- és fékező ellenállások esetén alkalmazott jelöléseket az 5.60. ábra mutatja. Az  $I_{amax}$  áramot a gép megengedhető maximális terhelhetősége  $I_{amax} \leq 1,5 I_{an}$ , a minimális pedig a terhelőnyomatéki jelleggörbe, ill. az indítás időszükséglete és az indítási veszteségek határozzák meg. Ha minimális

áram túl kicsiny, kicsi lesz a gyorsításra rendelkezésre álló *dinamikai nyomaték*, az indítás elhúzódik, és az indítási veszteségek túlzottan nagyra válnak. Ezért általában  $I_{amin} \geq 0,8 I_{an}$ .

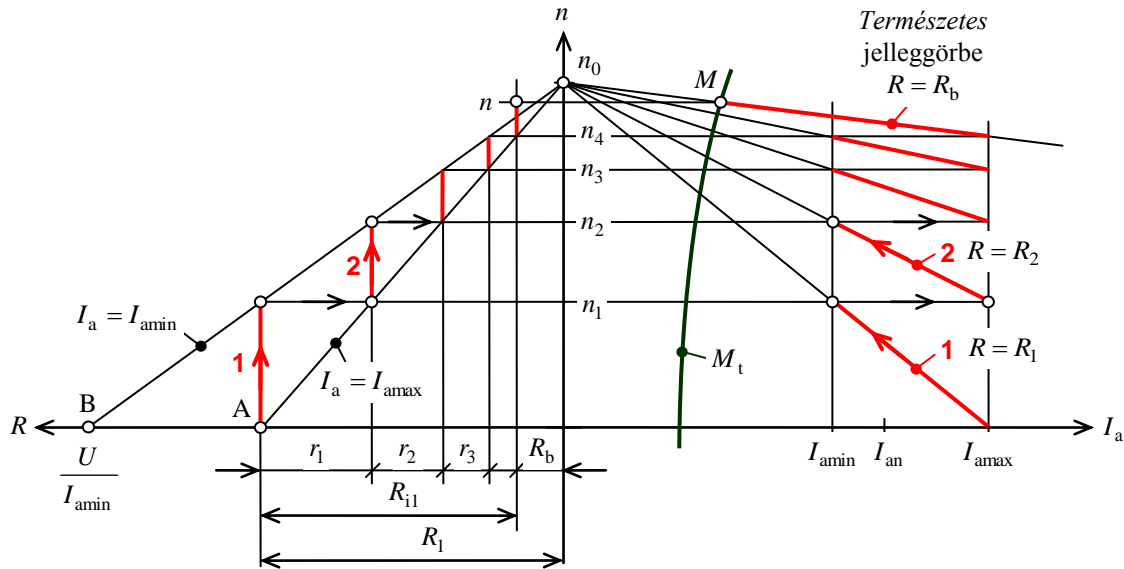
#### 5.11.2.1. Állandó fluxusú gépek indítása

Ennek a csoportnak a tárgyalásánál kompenzált gépet (vagyis lineáris jelleggörbét) tételezünk fel, az ettől való eltérésekkel 5.10.1. pontban foglalkoztunk. A motor forgásirányát az armatúra-, vagy a gerjesztőtekercs felcserélésével változtathatjuk meg.

Az indítás az 5.61. ábrán látható módon zajlik le: az indítás pillanatában az  $R_1$  ellenállás (a beiktatott  $R_{i1}$  indító-ellenállás) az áramot  $I_{amax}$ -ra korlátozza (1-es jelleggörbe). Az ellenállás beiktatása az  $n_0$  üresjárási pontot nem változtatja meg, ez az egyenes másik pontja. Ahogy a fordulatszám nő, úgy nő az indukált feszültség is, az áram pedig csökken. Az áramot az  $I_{amin}$  áramig engedjük csökkenni, ekkor az  $r_1$ -es ellenállás kiiktatásával a 2-es fokozatra kapcsolunk át ( $R_2$  összellenállás és  $R_{i2}$  nagyságú indítóellenállás) amely az indítási áramot ismét  $I_{amax}$ -ra növeli, és így tovább. Az indítás akkor fejeződik be,



amikor a motor  $R_b$  összellenállású természetes jelleggörbéjére térünk át, majd a hajtás a munkagép  $M_t$  terhelési karakterisztikája és a motor természetes jelleggörbéje által meghatározott  $M$  munkapontba áll be.



5.61. ábra Az indítás folyamata állandó fluxusú gépek esetén

Az indítási áramot  $I_{amax}$ -ra korlátozó ellenállás:  $R_1 = U / I_{amax}$ . Az átkapcsolás pillanatában a forgó részek tehetetlensége miatt a fordulatszám és ezzel együtt az indukált feszültség is állandó, ezért az első fokozatról a másodikra történő átkapcsoláskor a feszültség-egyenlet alapján írható:

$$U_{i1} = U - I_{amin} \cdot R_1 = U_{i2} = U - I_{amax} \cdot R_2 \Rightarrow I_{amin} \cdot R_1 = U_{i2} = I_{amax} \cdot R_2.$$

Általánosan a  $k$ . fokozatról a  $k+1$ . fokozatra történő átkapcsolás pillanatában:

$$I_{amin} \cdot R_k = U_{i2} = I_{amax} \cdot R_{k+1}.$$

Mivel  $I_{amin}$  és  $I_{amax}$  állandó, az ellenállások mértani sorozatot alkotnak, amelynek állandó értékű hányadosa:

$$q = \frac{I_{amin}}{I_{amax}} = \frac{R_{k+1}}{R_k}. \quad (5.74)$$

Ha az indítás  $m$ -fokozatú és a természetes jelleggörbére áttérés pillanatában az áram pontosan  $I_{amax}$ -ra nő (az utolsó fokozat is *egész fokozat*) a mértani sorozat alapján írható:

$$q^m = \frac{R_b}{R_1}. \quad (5.75)$$

Az elmondottak alapján kétféle méretezési eljárás lehetséges:

✚  $m$  számú egész fokozatra méretezésnél először felvesszük  $I_{amax}$ -t, majd a  $q$  hányados értékét a  $q = \sqrt[m]{\frac{R_b}{R_1}}$  kifejezésből határozzuk meg.

A  $q$  ismeretében a minimális áram:  $I_{\text{amin}} = q \cdot I_{\text{amax}}$ .

Ha  $I_{\text{amin}}$  és  $I_{\text{amax}}$  áramok értékét előre felvesszük, akkor legtöbbször csonka fokozatot kapunk. Ekkor a mértani sorozat hányadosa:

$$q = \frac{I_{\text{amin}}}{I_{\text{amax}}}, \text{ a fokozatok száma pedig: } m = \frac{\log \frac{R_b}{R_l}}{\log q} \text{ lesz.}$$

Az indítást az ellenállás-síkon is megszerkeszthetjük. Az (5.29) fordulatszám-egyenlet állandó értékű armatúraáram esetén

$$n = \frac{U}{k_U \cdot \Phi} - \frac{I_a}{k_U \cdot \Phi} \cdot R = n_0 - m_R \cdot R \quad (5.76)$$

szintén egy egyenes egyenlete, amelynek pontja az  $n_0$  üresjárási fordulatszám, negatív meredeksége pedig  $m_R = \frac{I_a}{k_U \cdot \Phi} = \text{áll. értékű}$ . Az 5.61. ábrán az  $I_{\text{amin}}$  és  $I_{\text{amax}}$  áramok-

hoz tartozó egyeneseket két pontjuk alapján rajzolhatjuk fel: mindegyik egyenes közös pontja az  $n_0$  üresjárási pont, a másikat pedig legcélszerűbb zérus fordulatszámánál meghatározni. Álló állapotban  $I_{\text{amax}}$  áramhoz a már ismert  $R_l$  (A pont az 5.61. ábrában),  $I_{\text{amin}}$  áramhoz pedig  $U / I_{\text{amin}}$  tartozik (B pont). A pontok alapján az egyenesek megrajzolhatók.

Az ellenállás-síkon az egyes fokozatok ellenállása közvetlenül leolvasható, mivel egy-egy fokozat esetén az ellenállás állandó (vastagabban kihúzott függőleges egyenesek), átkapcsoláskor pedig vízszintesen mozgunk.

#### 5.11.2.2. Soros (terheléstől függő fluxusú) motorok indítása

A sörös motor forgásirányát az armatúra- és a gerjesztőtekerccs egymáshoz képesti felcserélésével változtathatjuk meg.

A sörös motorok indítása esetén a helyzet bonyolultabb, mint állandó fluxusú gépeknél, mert az átkapcsolás pillanatában a gép fluxusa is megváltozik. Az indítás folyamatát az 5.62. ábrán követhetjük nyomon.

Az indítási áramot  $I_{\text{amax}}$ -ra korlátozó ellenállás most is  $R_l = U / I_{\text{amax}}$  értékű. Általánosan a  $k$ . fokozatról a  $k+1$ . fokozatra történő átkapcsolás pillanatában érvényes fordulatszám-egyenlet:

$$n_k = \frac{U - I_{\text{amin}} \cdot R_k}{k_U \cdot \Phi_{\text{min}}} = \frac{U - I_{\text{amax}} \cdot R_{k+1}}{k_U \cdot \Phi_{\text{max}}}.$$

Ebből:

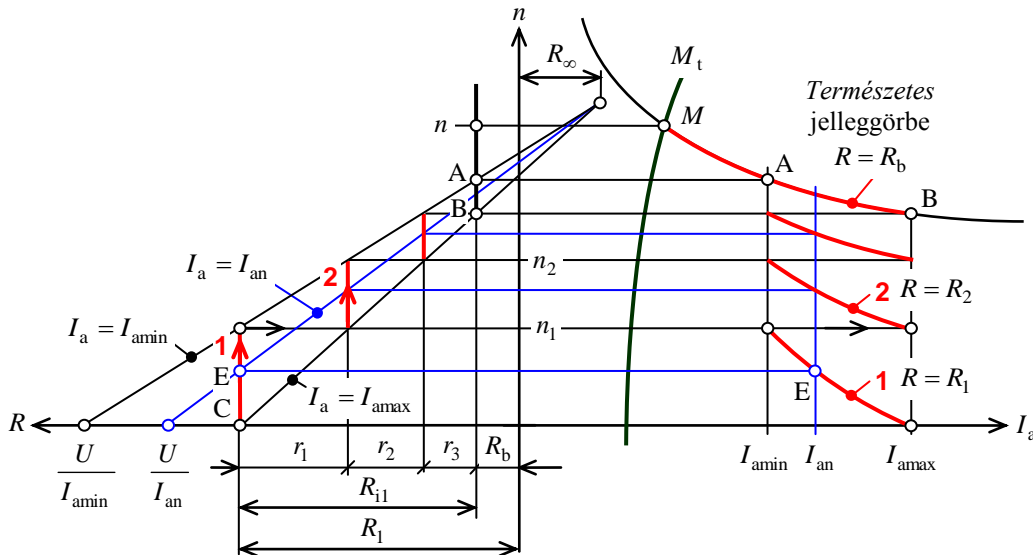
$$R_{k+1} = \frac{I_{\text{amin}}}{I_{\text{amax}}} \cdot \frac{\Phi_{\text{max}}}{\Phi_{\text{min}}} \cdot R_k - \left( \frac{\Phi_{\text{max}}}{\Phi_{\text{min}}} - 1 \right) \cdot R_l.$$

Vezessük be a következő jelöléseket:

$$q_s = q \cdot \varphi = \frac{I_{a\min}}{I_{a\max}} \cdot \frac{\Phi_{\max}}{\Phi_{\min}} \quad (\text{ahol } \varphi = \frac{\Phi_{\max}}{\Phi_{\min}}) \quad \text{és} \quad R_{\infty} = -R_1 \cdot \frac{\varphi - 1}{1 - q_s}, \quad (5.77)$$

amelyekkel a negatív értékű, fiktív  $R_{\infty}$  ellenállással csökkentett ellenállásértékek mértani sorozatot alkotnak:

$$q_s = q \cdot \varphi = \frac{R_{k+1} - R_{\infty}}{R_k - R_{\infty}}. \quad (5.78)$$



5.62. ábra Az indítás folyamata soros gépek esetén

Az indítás folyamata az ellenállás-síkon is nyomon követhető. Ugyanis állandó értékű armatúraáramoknál (mivel ekkor a fluxus is állandó) az ellenállás síkon most is egyeneseket kapunk, igaz tehát az (5.76) összefüggés. Az 5.62. ábrán az  $I_{a\min}$  és  $I_{a\max}$  áramokhoz tartozó egyeneseket két-két pontjuk alapján rajzolhatjuk fel: az ismert természetes jelleggörbe  $I_{a\max}$ -hoz és  $I_{a\min}$ -hez tartozó pontjait az ellenállás-síkon az belső ellenállás függőleges egyenesére átvetítve az A és B pontokat kapjuk. Álló állapotban  $I_{a\max}$  áramhoz a már ismert  $R_1$  (C pont),  $I_{a\min}$  áramhoz pedig  $R_1 = U / I_{a\min}$  tartozik (D pont). A pontok alapján az egyenesek megrajzolhatók, amelyek a fiktív értékű  $R_{\infty}$  ellenállásnál metszik egymást.

A soros motor matematikailag nehezen leírható  $n(I_a)$  jelleggörbéi az  $R(I_a)$  ellenállás-síkon egyenesek, amelyek segítségével a görbék bármely pontja meghatározható. Az 5.62. ábrán a pl. a névleges áramhoz tartozó jelleggörbe-pontokat jelöltük ki a különböző fokozatoknál (E-pont az 1-es fokozat esetén).

Állandó feszültségű hálózat esetén az indító ellenállással történő indítás egyszerű, de sajnos veszteséges, rossz hatásfokú módszer, mert az indítás alatt a hálózathoz felvett villamos teljesítmény közel fele az indító ellenállásokban disszipálódik. A mai modern hajtásokban az indítás alatt a kapocsfeszültséget úgy változtatják, hogy az indítás ideje alatt az

áram állandó értékű legyen. Ezzel a kérdéssel a következő 5.12.1. pontban, az 5.74. ábra kapcsán a foglalkozunk részletesebben.

### 5.11.3. Állandó feszültségről táplált egyenáramú motorok fordulatszám változtatása

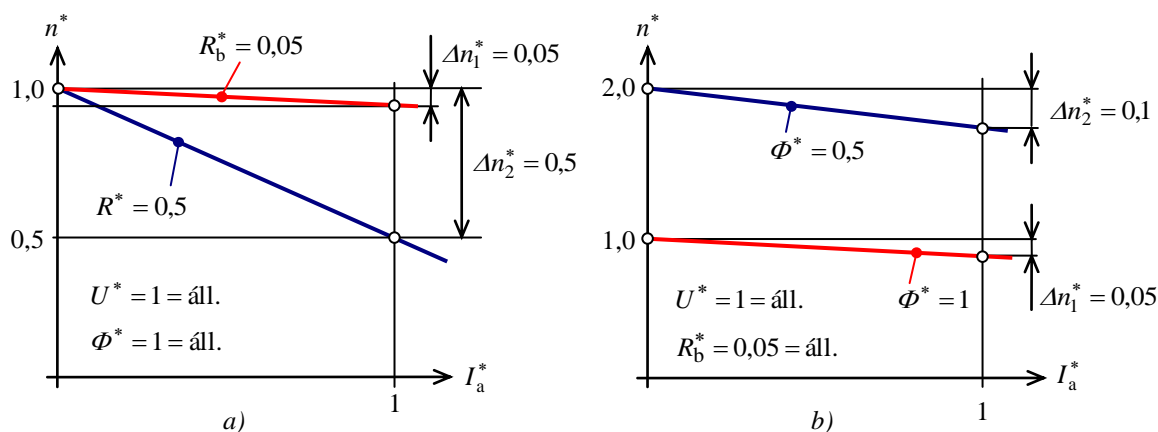
#### 5.11.3.1. Állandó fluxusú motorok fordulatszám változtatása

Az állandó fluxusú gépeket széleskörűen alkalmazzák könnyű fordulatszám-szabályozhatóságuk miatt. Lineáris karakterisztikát (kompenzált gépet) feltételezve a nyomaték  $M = k_M \cdot \Phi \cdot I_a$ , a fordulatszám pedig az

$$n = \frac{U}{k_U \cdot \Phi} - \frac{R}{k_U \cdot \Phi} \cdot I_a = n_0 - m \cdot I_a$$

összefüggésnek megfelelően változik. Mint már volt róla szó, ez a negatív meredekségű egyenes az  $n_0$  ideális üresjárási fordulatszámnál metszi a függőleges tengelyt, meredeksége pedig  $m$ .

Állandó feszültséget feltételezve tehát a gép fordulatszámát az armatúrakör ellenállásával és a gép fluxusával változtatjuk meg. A két esetben a változtatások hatását a viszonylagos egységekben felrajzolt 5.63. ábrán a természetes jelleggörbéhez ( $R_b^* = 5\%$ ) hasonlítva mutatjuk meg.



5.63. ábra Állandó feszültségről táplált, terheléstől független fluxusú motor fordulatszám változtatása

a) az ellenállás változtatásának hatása; b) a fluxus változtatásának hatása

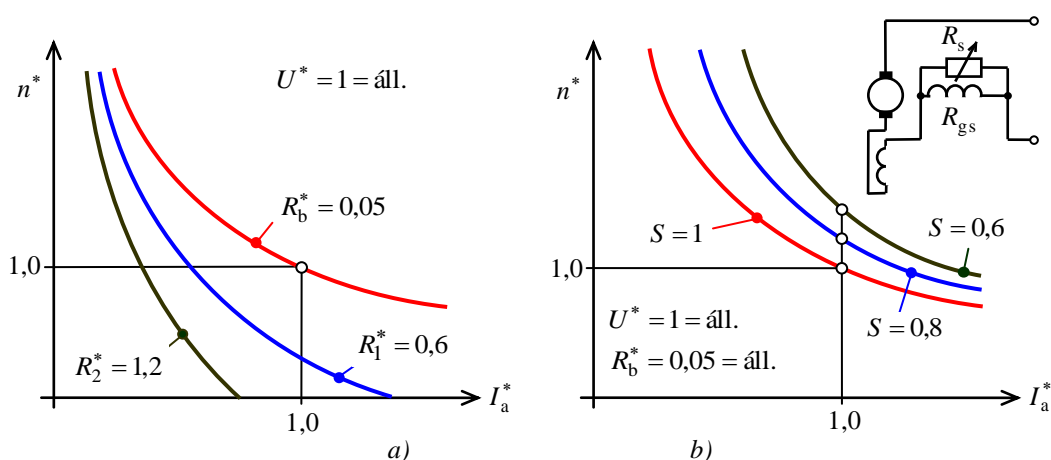
**Ellenállás-változtatáskor** (5.63a ábra) az üresjárási pont a helyén marad, csak az egyenes meredeksége változik meg. Az ellenállás növelésének hatására a meredekség, vagyis a terhelés hatására bekövetkező fordulatszámcsökkenés növekszik. Azt szokták mondani, hogy az armatúrakör ellenállásának növelése a jelleggörbéket *lággyítja*. Az ábra szerinti esetben relatív egységben 45 % külső ellenállást kapcsolunk sorba az armatúrával, így az összellenállás ( $R_2^* = 50\%$ )-ra nőtt meg. A feszültségegyenletből következik és a számítások esetén jól használható, hogy egy armatúraáramnál az  $n_0$  „ideális üresjárási” fordulatszámhoz képesti  $\Delta n$  fordulatszámcsökkenés arányos az armatúrakör ellenállásával:

$$\frac{\Delta n_2}{\Delta n_1} = \frac{n_0 - n_2}{n_0 - n_1} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_2^*}{R_b^*} = \frac{0,5}{0,05} = 10. \quad (5.79)$$

**Fluxus változtatásakor** csak a fluxus csökkentése, az ún. *mezőgyengítés* jöhet szóba. A mai modern gépeket ugyanis a vasanyag jó kihasználása érdekében a mágnesezési görbe könyökpontjának környékére méretezik, így a fluxus növelése a mágneses kört telítésbe vinné. Mivel a nyomaték a fluxussal is arányos, a mezőgyengítés mint módszer csak akkor használható, ha a mezőgyengítéssel együtt a nyomatékigény is csökken. Nem kompenzált gépeknél további problémákat okozhat az armatúreakció, mert a mezőgörbe torzulása miatt változatlan armatúraáramnál a szeletfeszültség megengedett maximális értéke válik korlátozó tényezővé (ezzel a kérdéssel a terhelhetőségi határokkal kapcsolatban az 5.12.3. pontban foglalkozunk részletesebben). A fluxus csökkenése miatt a gép üresjárási fordulatszáma és a karakterisztika meredeksége is megnő, vagyis a jelleggörbe lágyul. Az 5.63b ábrán a természetes jelleggörbéhez képest a fluxust a felére csökkentettük, így az üresjárási fordulatszám és a meredekség is a duplájára nőtt meg.

#### 5.11.3.2. Soros (terheléstől függő fluxusú) motorok fordulatszám változtatása

A soros motorok jelleggörbéivel az 5.10.2. pontban foglalkoztunk, most csak az armatúraköri ellenállás és a fluxusváltoztatás hatásait vizsgáljuk az  $n(I_a)$  jelleggörbékre (5.64. ábra).



5.64. ábra Soros gerjesztésű motorok terhelési jelleggörbéi

a) az armatúraköri ellenállás változtatásának hatása; b) a fluxusváltoztatás (mezőgyengítés) hatása

A hatások jellege ugyanolyan, mint az állandó fluxusú gépeknél. Az armatúraköri ellenállás növelése (5.64a ábra) a jelleggörbét legyezőszerűen szétnyitja, lágyítja. A karakterisztikákat a természetes jelleggörbét ismerve az ellenállás-sík segítségével (az 5.61. ábra kapcsán ismertetett módszer), a névleges üresjárási jelleggörbét ismerve az 5.10.2. pontban az 5.56. ábrán ismertetett módszer szerint kaphatjuk meg.

Ugyanúgy, mint az állandó fluxusú gépek esetén, a soros motoroknál is csak a mezőgyengítés mint módszer jöhet számításba a fluxus változtatásakor. A soros motor fluxusát

csökkenteni pl.: az gerjesztőtekercs söntölésével lehet. A mezőgyengítést az söntölési aránnyal jellemezhetjük, amelynek értéke:  $S = \frac{I_{gs}}{I_a} = \frac{R_s}{R_{gs} + R_s}$ . Ekkor a gerjesztőtekercsben folyó áram a nagysága:  $I_{gs} = S \cdot I_a$ . A söntölési arányt legfeljebb 1/3-ra választják, amelynek a mágnesezési jelleggöréből adódóan kb.  $\Phi_s \approx \Phi_s / 2$  fluxus felel meg. Ebből adódik, hogy fluxuscsökkentéssel a soros motor fordulatszámát maximum 2:1 arányban növelhetjük a természetes szögsebesség fölé. A mezőgyengített jelleggörbék a természetes jelleggörbe felett haladnak, és a terhelés hatására a fordulatszámesésük nő (5.64b ábra).

### 5.11.3. Állandó feszültségről táplált egyenáramú motorok fékezése

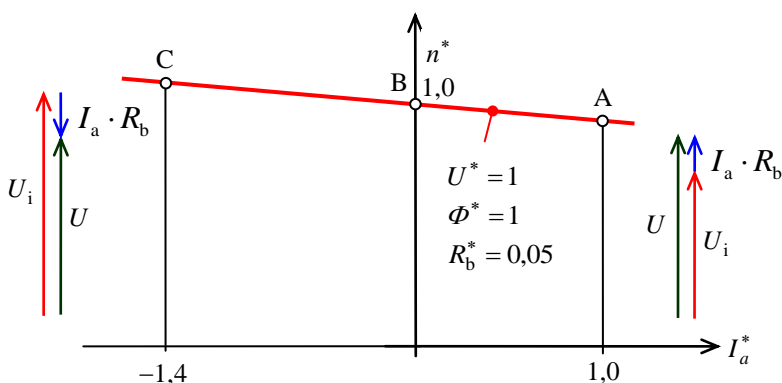
Az egyenáramú gépek üzemének harmadik fontos területe a fékezés. A fékezés természetesen mechanikus fékekkel is lehetséges, azonban a fékbrutók élettartama kicsi, és a fékezési folyamat nem tartható olyan jól kézben, mint villamos fékezésnél. További előnye a villamos fékezésnek, hogy lehetséges a fékezési energia visszanyerése, a visszatápláló fékezés.

A fékezés akkor jön létre, amikor az egyenáramú gépben az indukált feszültség iránya és az armatúrákörben folyó áram iránya (másképpen: a forgásirány és a nyomaték iránya) egymáshoz képest ellentétesé válik. Az egyenáramú gépek esetén háromféle fékezési módszer lehetséges:

- ✚ visszatápláló (rekuperációs) fékezés;
- ✚ ellenállásos (dinamikus) fékezés;
- ✚ ellenáramú (irányváltós) fékezés.

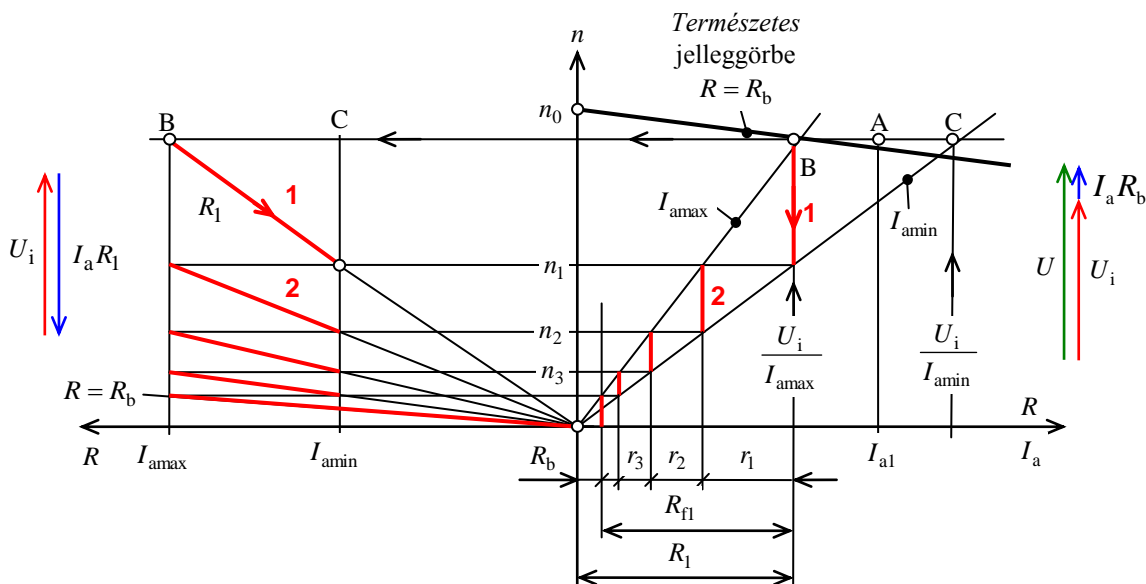
**Visszatápláló fékezés** akkor jön létre, ha a forgórészt egy külső kényszer (ilyen lehet pl.: egy lejtőn lefelé haladó jármű esete) a motoros munkaponthoz (A-pont) képest gyorsítja (5.65. ábra). Mivel a fluxus állandó, a fordulatszámnövekedés hatására az indukált feszültség is nő, a motoros áram pedig csökken. A gép akkor megy át generátoros állapotba (féküzembe), amikor az indukált feszültség nagyobbá válik, mint a hálózat kapcsolófeszültsége (B-pont).

Ekkor az áramirány megfordul és így ellentétes irányúvá válik mint a változatlan irányú indukált feszültség. Az adott síknegyedben (A és C pontban) érvényes feszültségirányokat az ábrák szélein tüntettük fel. Amennyiben a hálózat ezt az ellentétes irányú áramot fogadni tudja, a



5.65. ábra Visszatápláló fékezés létrehozása

fékezett teljesítményt visszanyerjük, ezért beszélhetünk visszatápláló (rekuperációs) fékezésről. A visszatápláló fékezést soros gépek esetén nem alkalmazzák.



**Elle 5.66. ábra** Terheléstől független fluxusú egyenáramú gép dinamikus fékezése lekapcsoljuk a hálózatról, és kapcsaira fékező ellenállásokat kapcsolunk (amelyek értelmezése ugyanaz, mint az 5.60. ábrán az indító ellenállásoknál). Fékezésnél a fékezőáramot ugyanúgy  $I_{amin}$  és  $I_{amax}$  között ingadoztatjuk, mint indításnál. A fékezés folyamatát az 5.66. ábrán rajzoltuk fel.

A motorosról (A-pont) generátoros (B-pont) üzemre áttérés pillanatában a fékezőáramot  $I_{amax}$ -ra beállító ellenállás:  $R_1 = U_i / I_{amax}$ , ahol az indukált feszültség motoros állapotban az  $U_i = U - I_{a1} \cdot R_b$  összefüggésből számítható. Az indításhoz képest különbség az, hogy most a fékezési jelleggörbék az origóba futnak be.

Általánosan a  $k$ . fokozatról a  $k+1$ . fokozatra történő átkapcsolás pillanatában:  $I_{amin} \cdot R_k = I_{amax} \cdot R_{k+1}$ , így a fékező ellenállások ugyanúgy mértani sorozatot alkotnak, mint indításnál. A mértani sorozat hányadosa:

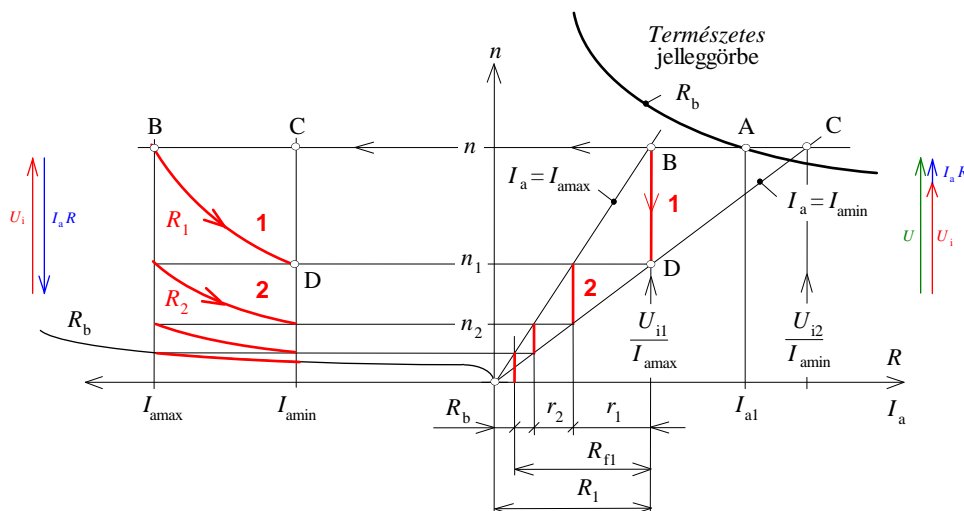
$$q = \frac{I_{amin}}{I_{amax}} = \frac{R_{k+1}}{R_k}, \text{ és } m \text{ számú egész fokozat esetén } q^m = \frac{R_b}{R_1}.$$

A fékezés végén a fordulatszám csökkenése miatt az indukált feszültség és a fékező nyomaték is megszűnik, így külön mechanikus (rögzítő) féket kell alkalmazni. Az adott síknegyedben (A és B pontban) érvényes feszültségirányokat az ábrák szélein tüntettük fel.

Soros motoroknál az ellenállásos fékezésre áttérés pillanatában az armatúra tekercselés sarkait a gerjesztőtekercseléshez képest fel kell cserélni. Mind a fékezési jelleggörbék, mind az ellenállásegyenesek az origóba futnak be (5.67. ábra). Az átkapcsolás pillanatában az állandó fluxusú gépekhez képest figyelembe kell venni, hogy az indukált feszültség a fluxusváltozás miatt  $U_i$ -ről  $U_{i1} = \frac{\Phi(I_{amax})}{\Phi(I_{a1})} \cdot U_i$ -re nő meg. A fékező ellenállások itt is mértani sorozatot alkotnak, de a sorozat hányadosa:



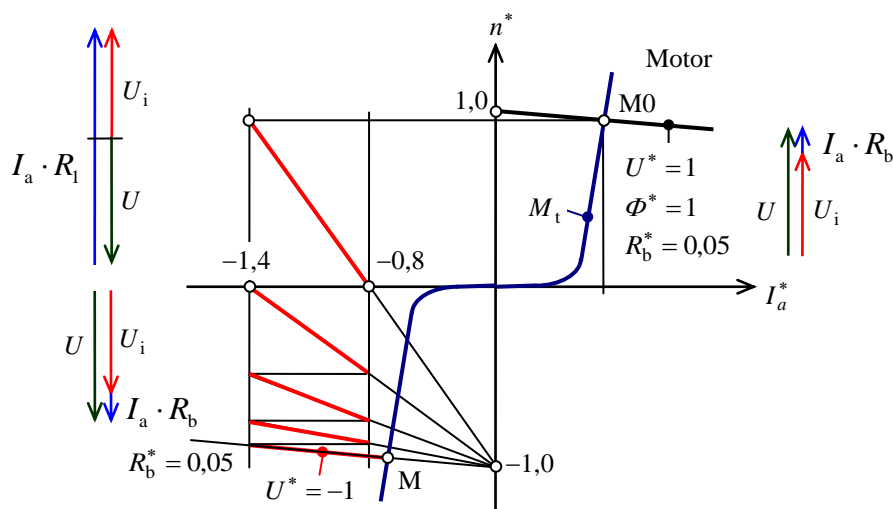
$$q_s = q \cdot \varphi = \frac{I_{a\min}}{I_{a\max}} \cdot \frac{\Phi_{\max}}{\Phi_{\min}} = \frac{R_{k+1}}{R_k}, \quad \text{és} \quad q_s^m = \frac{R_b}{R_l}.$$



5.67. ábra. A soros gép dinamikus fékezése

**Az ellenáramú, vagy irányváltásos fékezésnél** megfordítjuk a kapocsfeszültség irányát, miközben az indukált feszültség iránya változatlan marad. Az ellenállásos fékezéshez képest az a különbség, hogy az armatúrákör ellenállására a fékező negyedben a két feszültség összege jut, és így ahhoz, hogy a maximális áramot ne lépjük túl, az értékét nagyon,  $R_l = \frac{U + U_i}{I_{a\max}}$ -re kell növelnünk. A fékezést terheléstől független fluxusú gépekre a

gyakoribb passzív (mindkét forgásirányban fékező) jellegű terhelés esetében a 5.68. ábrán mutatjuk be. Az első fokozat végén (B-pont) a fordulatszám zérusra csökkent. Ha nem akarunk forgásirányt váltani, akkor a motort ebben a pontban le kell választani a hálózatról, és a forgórészét rögzítőfékkel meg kell fogni. A fékezést további fokozatokra átkapcsolva a forgásirány megfordul, és végül a gép motoros üzemmódban a terhelés által meghatározott

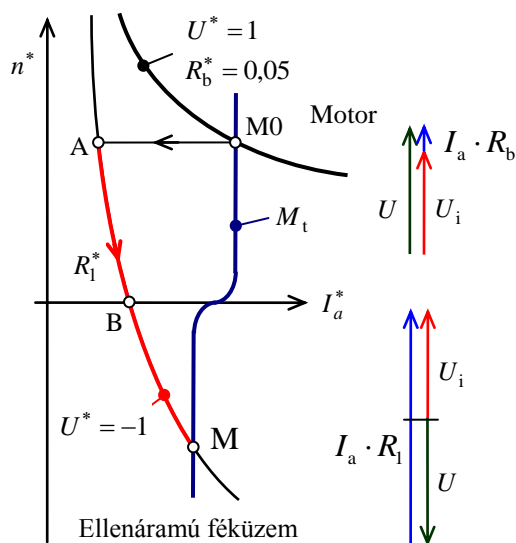


5.68. ábra Ellenáramú fékezés állandó fluxusú gép passzív terhelése esetén

új, M munkapontba áll be. Érdekes megjegyeznünk, hogy ellenáramú féküzemben a gép mind a hálózatról felvett teljesítményt, mind a fékezett teljesítményt a fékező ellenállásokban disszipálja.

Soros gépek esetén a féküzemre átkapcsolás pillanatában az armatúratekercselés sarkait a gerjesztőtekercshez képest meg kell fordítani.

A fékezést az 5.69. ábrán egy aktív terhelés esetén (ilyen pl.: egy emelő hajtás, mert a terhelőnyomaték minkét forgásirányban azonos irányú,) mutatjuk be. A fékezésre az M0 munkapontból úgy térünk át, hogy az armatúrakörbe  $R_1$  ellenállást kapcsolunk (A pont). Mivel most a motor nyomatéka kisebb, mint a terhelőnyomaték, a hajtás lassul, míg végül forgásirányt váltva az M ellenáramú féküzemi pontba áll be. Ha nem kívánunk forgásirányt váltani, a motort a B pontban le kell kapcsolni a hálózatról, majd a forgórészt rögzíteni szükséges.



5.69. ábra Ellenáramú fékezés soros gép aktív terhelése esetén

## 5.12. VÁLTOZÓ KAPOCSFESZÜLTSEGRŐL TÁPLÁLT EGYENÁRAMÚ MOTOROS HAJTÁSOK

Az ipari elektronika fejlődése és a szabályozó berendezések olcsóbbá válása tette lehetővé, hogy jelenleg az egyenáramú motorok legnagyobb hányadát változó kapocsfeszültségről táplálják. A változó kapocsfeszültség ipari elektronikával történő előállítása nem témaköre ennek a könyvek, viszont foglalkozunk a nem sima egyenfeszültségről táplálás hatásaival. Ebben a fejezetben vizsgáljuk továbbá a motorok terhelhetőségi határait, valamint az egyenáramú gépes hajtások hatásvázlatát és a hatásvázlatokban szereplő időállandókat.

### 5.12.1. A változó feszültségről táplált egyenáramú motorok fordulatszám változtatása. a Ward-Leonard hajtás

Ebben a pontban a csak a kapocsfeszültség változtatásának hatásait vizsgáljuk az egyenáramú gépek karakterisztikáira. Az egyenáramú motorok jelleggörbéit a 3.10. pontban vizsgáltuk részletesen.

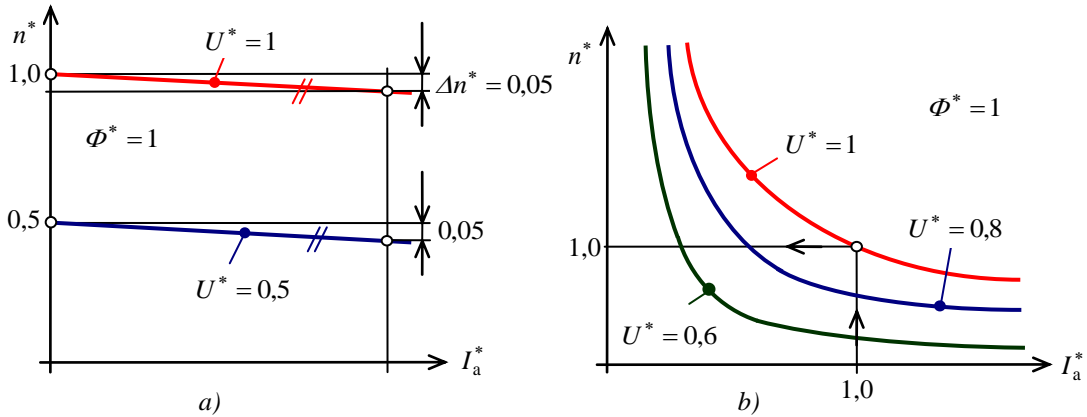
A (5.65) és (5.67) összefüggések szerint a terheléstől független fluxusú gépek fordulatszámát az

$$n = \frac{U}{k_U \cdot \Phi} - \frac{R}{k_U \cdot \Phi} \cdot I_a = n_0 - m_1 \cdot I_a$$

egyenlet, a soros motorokét pedig az

$$n = \frac{U}{k_U \cdot c_\varphi \cdot I_a} - \frac{R}{k_U \cdot c_\varphi \cdot I_a} \cdot I_a = \frac{B}{I_a} - C$$

összefüggés határozza meg.



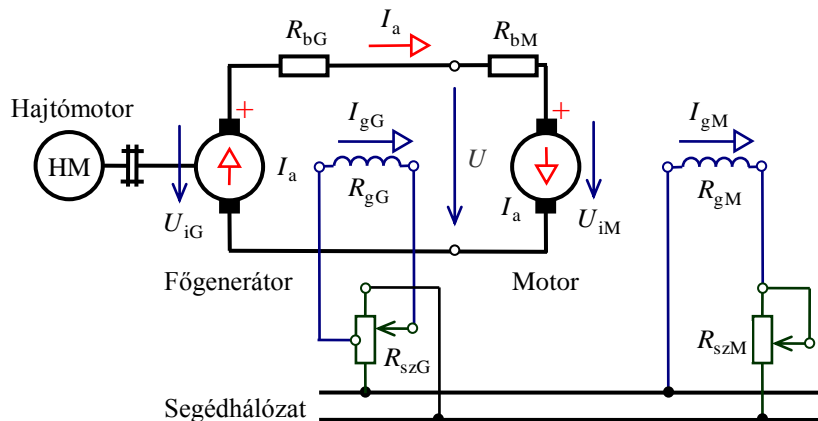
5.70. ábra A kapocsfeszültség változtatásának hatása a terhelési jelleggörbékre

a) állandó fluxusú motor; b) soros motor

Állandó fluxusú gépeknél az  $n(I_a)$  jelleggörbe egy negatív meredekségű egyenes, amely az  $n_0$  üresjárási fordulatszámánál metszi a függőleges tengelyt. Az összefüggésből az is látható, hogy a kapocsfeszültség csak az üresjárási fordulatszámot befolyásolja, a meredekséget nem, vagyis a feszültség változtatásakor a jelleggörbék párhuzamosan tolódnak el (5.70a ábra). Az üresjárási fordulatszám megváltozása egyszerűen egy egyenes arányosságból számítható ki:  $n_{01} = \frac{U_1}{U_n} \cdot n_{0n}$  (az 5.70a ábrán a kapocsfeszültséget a felére csökkentettük).

A soros motor jelleggörbéi a telítetlen szakaszon eltolt hiperbolák, nagyobb áramoknál a valóságos jelleggörbék a hiperbola felett járnak. A feszültségváltozás a hiperbolák alakját változtatja meg, feszültségcsökkenéskor az új jelleggörbék a természetes jelleggörbe alatt helyezkednek el. A karakterisztikák szerkesztésére a 5.56. ábra kapcsán ismertetett módszert használhatjuk.

Klasszikus villamos gépes módszer a kapocsfeszültség változtatására és négynegyedes hajtás készítésére a Ward-Leonard rendszer, melynek alapvető felépítését a 5.71. ábrán rajzoltuk fel. A rendszer a motorból és az azt tápláló főgenerátorból áll. A főgenerátort hajtó gép robbanómotor, diesel-elektromos mozdonyokban diesel motor, vagy akár villamos gép is lehet.



5.71. ábra A Ward-Leonard hajtás kapcsolása

A főgenerátor gerjesztőtekercsét a segédhálózathoz középpont-megcsapolású szabályozó ellenállással mindkét polaritással táplálhatjuk. A két gép armatúráját párhuzamosan kötjük egymással, így az armatúrakör összellenállása  $R = R_{bG} + R_{bM}$  (G index jelöli a generátor, M a motor jellemzőit) lesz. Az armatúrakör feszültségegyenletéből egyszerűen megkapható a Ward-Leonard hajtás  $n(I_a)$  jelleggörbéinek egyenlete:

$$n_M = \frac{U_{iG} - I_a \cdot R}{k_{iUM} \cdot \Phi_M} = \frac{k_{UG} \cdot \Phi_G \cdot n_G - I_a \cdot R}{k_{iUM} \cdot \Phi_M} . \quad (5.80)$$

A Ward-Leonard hajtás jelleggörbéit négynegyedes üzem esetén a 5.72. ábrán rajzoltuk fel, melyből látható, hogy a karakterisztikák két határ között önmagukkal párhuzamosan tolódnak el. A rendszer fő előnye az, hogy tetszőleges fordulatszámnál hajtó és fékező üzemállapotot egyaránt létrehozhatunk. Az energiairány megfordíthatóságának (a visszatápláló fékezésnek) az a feltétele, hogy a hajtómotor képes-e fogadni az ellenkező értelmű teljesítményt. A diesel motor pl. csak igen korlátozott mértékben, ezért a főgenerátornál is felesleges a motoros üzem. Ilyenkor az egyenáramú gépet az olcsóbb és üzembiztosabb diódás szinkrongenerátorral lehet és szokásos helyettesíteni.

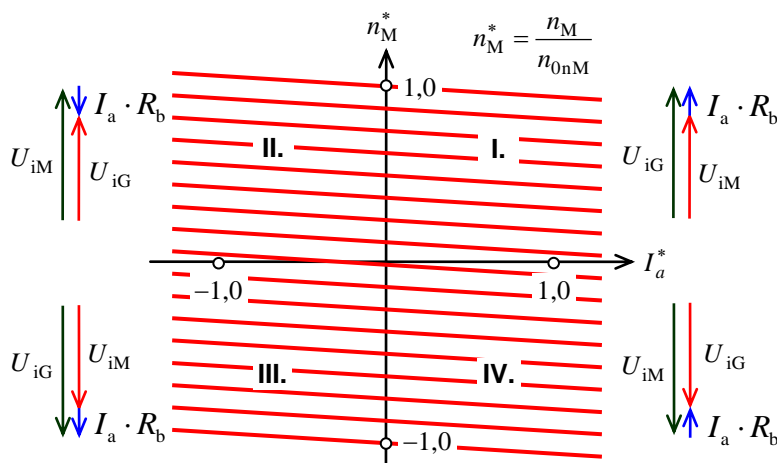
Változtatható feszültségű hajtással mind az indítás, mind a fékezés sokkal gazdaságosabban végezhető, mint állandó kapocsfeszültségűvel. Ezt az 5.73. ábra kapcsán tudjuk bemutatni.

Az 5.73a ábra szerinti  
állandó szöggyorsulású in-  
dításnál a főgenerátor  $U_{iG}$

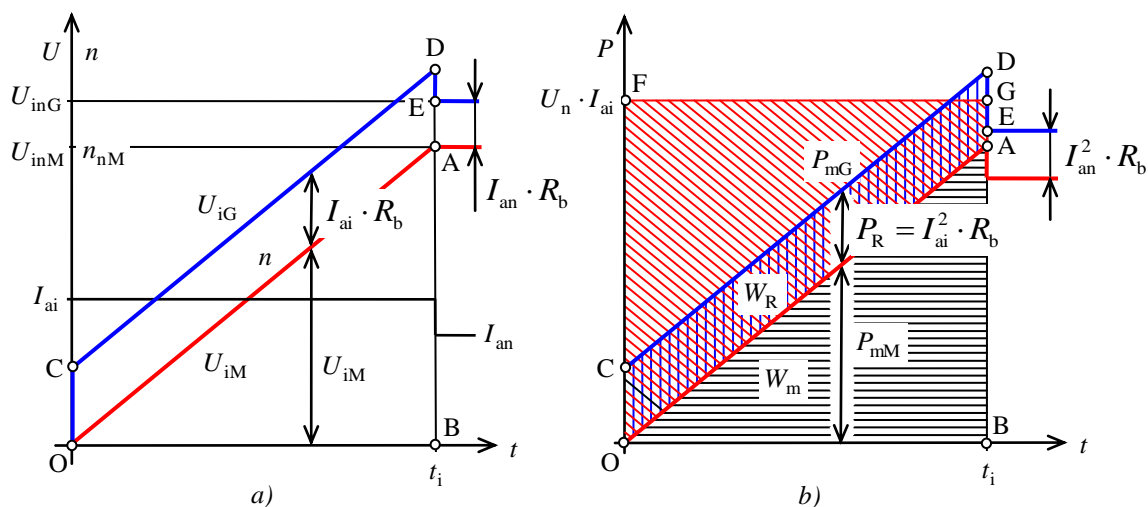
indukált feszültségét úgy változtatjuk ( $O \Rightarrow C \Rightarrow D \Rightarrow E$ ), hogy az indítás alatt az armatúraáram állandó legyen, majd az indítás végén álljon vissza a névleges értékre. Az állandó fluxusú motor egyenletesen gyorsul,  $U_{iM}$  indukált feszültsége lineárisan változik:  $O \Rightarrow A$ . A két indukált feszültség közötti különbség a gépek belső ellenállásain esik.

Az 5.73b ábrán a hajtás teljesítmény- és energetikai viszonyait ábrázoltuk az indítás alatt. Mivel a nyomaték állandó, a motor által leadott  $P_{\text{mM}}$  mechanikai teljesítmény lineárisan nő ( $O \Rightarrow A$ ). A generátor által leadott teljesítménynek ezen kívül fedeznie kell az armatúrakörök  $P_{\text{R}} = I_{\text{aj}}^2 \cdot R$  tekercsveszteségeit is ( $O \Rightarrow C \Rightarrow D$ ).

Ha a teljesítményeket az indítási idő alatt integráljuk, a vonalkázott energiával arányos területeket kapjuk. A motor által az indítás alatt végzett  $W_m$  mechanikai munka (a vízszintesen vonalkázott OAB háromszög területe) fedezi a terhelés munkaigényét és növeli a rendszer kinetikai energiáját.



**5.72. ábra** A Ward-Leonard hajtás jelleggörbéi



5.73. ábra A Ward-Leonard hajtás indítása

a) az indukált feszültségek- és a fordulatszám változása; b) teljesítmény- és energetikai viszonyok

A  $W_R$ -el jelölt függőlegesen vonalkázott (OCDA romboid) terület az armatúrákörök belső ellenállásain hővé alakul, ez a hajtás indítási vesztesége. Az indítás a hajtómotortól az OCDB trapéz területének megfelelő munkát igényel; a hatásfok az OAB/OCDB területek arányától függ.

Összehasonlításként: ha a motort az  $U_n$  állandó kapcsolófeszültségről indító-ellenállással indítottuk volna, akkor az indító ellenállásban a ferdén vonalkázott terület (OFGA trapéz) alakulna hővé, a hatásfok pedig az OAB/OFGB területek arányától függene, ami láthatóan lényegesen (mintegy 20...30 %-al) rosszabb, mint a Ward-Leonard hajtásé.

### 5.12.2. Nem sima egyenfeszültségről táplált egyenáramú motorok

Jelenleg az egyenáramú motorok igen nagy hányadát (az armatúrát, a gerjesztő tekercset vagy esetleg mindkettőt) valamilyen ipari elektronikai berendezésről, többnyire gyújtásszög-vezérelt tirisztoros hídról táplálják. A problémát az jelenti, hogy ebben az esetben a tápláló feszültség és a kialakuló áram is jelentős váltakozó összetevővel ( $I_v$ ) rendelkezhet. A feszültséget, vagy az áramot ilyen szempontból a  $\gamma$  hullámosággal, vagy az  $F$  fomatényezővel jellemezhetjük, melyek definíciói:

$$\gamma_1 = \frac{\sqrt{\sum_v I_v^2}}{I_d} = \frac{I_{\text{veff}}}{I_d} \quad \text{és} \quad F_1 = \sqrt{\gamma_1^2 + 1}. \quad (5.81)$$

Az 5.2. táblázatban megadtuk a legkisebb rendszámú harmonikus 50 Hz-es hálózati frekvenciára vonatkoztatott rendszámát, frekvenciáját és az adott áramirányító kapcsolásban fellépő maximális feszültség hullámosság %-os értékét.

Az áramirányító típusa	A legkisebb rendszámú harmonikus rendszáma ( $\nu = p$ )	A legkisebb rendszámú harmonikus frekvenciája, Hz	A feszültség-hullámosság értéke %
Féligvezérelt egyfázisú hídkapcsolás	2	100	70
Féligvezérelt háromfázisú hídkapcsolás	3	150	42
Teljesen-vezérelt háromfázisú hídkapcsolás	6	300	28

### 5.2. táblázat A különböző áramirányító kapcsolások maximális feszültség-hullámossága

A viszonylagosan nagy értékű váltakozóáramú komponens egy egyenáramú gépben a következő problémákat okozza:

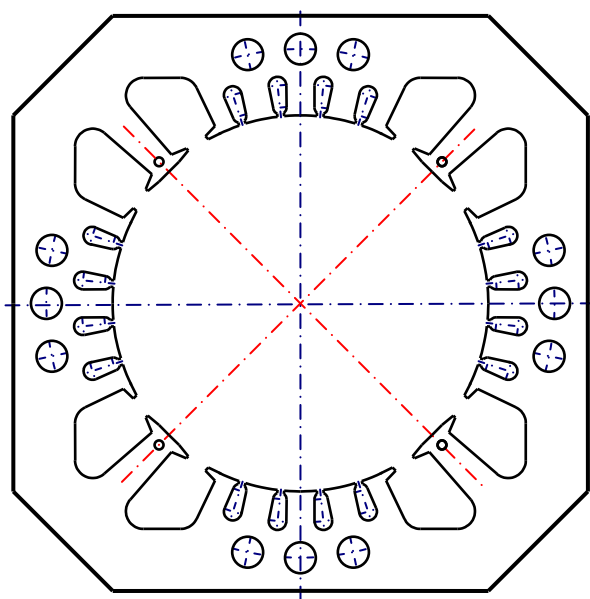
- Az armatúrában indukálódó feszültség a nagy szeletszámból adódóan egy sima egyenfeszültség, amelynek gyakorlatilag nincs váltakozó összetevője. Ezért már viszonylag kis értékű kapocsfeszültség-hullámosság a rendkívül kis belső impedancián nagy áramot indít, nagy lesz az áramhullámosság.
- Az armatúrakörben folyó váltakozó összetevő átfolyik a vele sorbakötött segédpólus tekercselésen is, és a segédpólus fluxusának követnie kellene az armatúraáram változását. A segédpólusban fellépő örvényáramok azonban késleltetik a fluxusváltozást, ezért a segédpólus nem tudja teljes egészében ellátni két fő feladatát: az armatúrareakció ellensúlyozását és a reaktanciafeszültség kompenzálását. Ezért romlik a kommutáció és kefeszikrázás lép fel. Az örvényáramok hatásának csökkentésére a mai modern gépekben a segédpólust is lemezelik.

A megengedett áramhullámosság értéke a gép mágneses körének felépítésétől függően 5...20 %. Az áramhullámosságot az armatúrakörrel sorbakötött fojtótekercssel lehet csökkenteni. A simításnál értékének meghatározásánál érdekes lehet, hogy a motor belső induktivitása közelítőleg a

$$L_b, \text{ mH} \approx k_a \cdot k_p \cdot \frac{U_n, \text{ V}}{I_{an}, \text{ A} \cdot p_M \cdot \omega_n, 1/\text{s}} \quad (5.82)$$

összefüggésből számítható.

(5.82)-ben  $k_a \approx 0,6...0,8$  kompenzálatlan és  $k_a \approx 0,25...0,3$  kompenzált motornál,  $k_p$  az áramirányító ütemszámától függő tényező:  $k_p \approx 0,8$   $p = 2$ -nél;  $k_p \approx 0,6$   $p = 3$ -nál és  $k_p \approx 0,4$   $p = 6$ -nál,  $p_M$  a motor póluspárjainak száma.



5.74. ábra Teljesen lemezelt egyenáramú gép állórész lemezkialakítása

Hullámos áramú táplálás esetén a gyárak a hagyományos építésű motorokat az áram formatényezőjétől függően „leértékelik”. A teljesítménycsökkentési tényező:

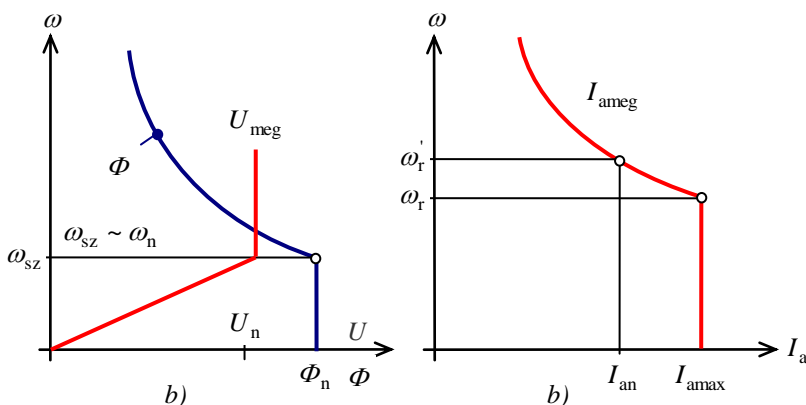
$$r_\gamma = \frac{1}{F_I^2} \quad (5.83)$$

Az áramirányítóról táplálás a gyakorlati felhasználás szempontjából olyan fontos, hogy a gyártók az ebben a pontban elmondott problémák csökkentésére modern, teljesen lemezelt gépeket fejlesztettek ki. Egy ilyen motor állórészének lemezttest-kialakítása látható az 5.74. ábrán.

### 5.12.3. Egyenáramú motorok terhelhetőségi határai

A motor  $I_{an}$  *névleges árama* az az érték, amelyet a gyártó cég elsősorban termikus, kommutációs és mechanikai szempontok alapján a motorra megállapít és azt az adattáblán feltünteti. Egy hagyományos egyenáramú gép megengedhető  $I_{amax}$  *maximális árama* a névleges áram másfélszerese (a szabvány 2 min.-re  $1,5 I_{an}$ -t, 15 s-ra  $1,6 I_{an}$ -t enged meg).

A terhelhetőségi határokat befolyásoló tényezőket csak kompenzált gépeknél vizsgáljuk (nem kompenzált gépeknél bonyolultabbak a viszonyok). Az egyenáramú gép megengedhető igénybevételeit alapvetően a kommutáció befolyásolja. Az 5.75a ábrán a szögsebességet ábrázoltuk a maximálisan megengedhető áram függvényében.



5.75. ábra Az egyenáramú motorok terhelhetősége

a) a fluxus és a megengedett armatúrafeszültség; b) a megengedett armatúraáram

Ha a szögsebességet álló állapotból növeljük, akkor először  $\omega_{sz}$  szögsebességnél eléjük a szeletfeszültségre a villamos ív fennmaradásának elkerülése érdekében maximálisan megengedhető

$$U_{szmax} \approx 35 \text{ V-os}$$

értéket. Az  $\omega_{sz}$  szögsebesség jó közelítéssel megegyezik, vagy valamivel nagyobb a gép névleges szögsebességénél:  $\omega_{sz} \approx 1...1,3 \omega_n$ .

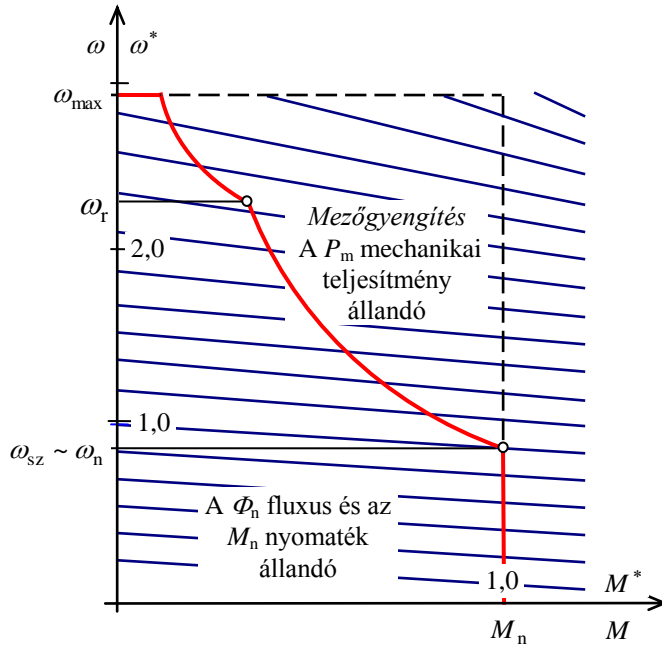
Ha a szögsebességet tovább akarjuk növelni, akkor a gép fluxusát a



$$\Phi = \Phi_n \cdot \frac{\omega_{sz}}{\omega} \quad (5.84)$$

hiperbolikus összefüggés szerint csökkenteni kell (5.75b ábra). Ezen a szakaszon a gép továbbra is a névleges árammal terhelhető, ezért mechanikai teljesítménye:

$$P_m = M \cdot \omega = c \cdot \Phi \cdot I_{an} \cdot \omega = c \cdot \Phi_n \cdot I_{an} \cdot \frac{\omega_{sz}}{\omega} \cdot \omega = c \cdot \Phi_n \cdot I_{an} \cdot \omega_{sz} = \text{áll.}$$



5.76. ábra Egyenáramú motorok terhelhetősége

A gép maximálisan megengedhető  $\omega_{\max}$  szögsebességét a mechanikai igénybevételek (a legkényesebb pont általában a kommutátor) korlátozzák. A hagyományos gépek esetén a szabvány a névlegesnél csak 20 %-al nagyobb pörgetési próbát ír elő, ezért mezőgyengítéses alkalmazások esetén (ahol a fluxus kb. a névleges érték harmadáig csökkenthető) ebben a kérdésben a gyártóval történő egyeztetés szükséges.

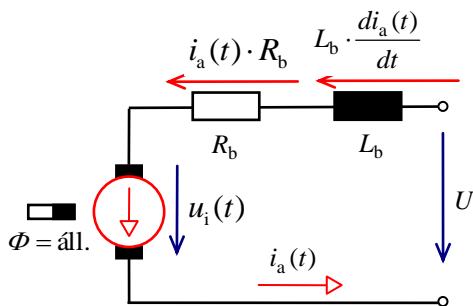
Az 5.76. ábrába vastag vonallal jelöltük be a kompenzált gép terhelhetőségi határának változását.

A másik korlátozó tényező reak-tanciafeszültség, amelynek értéke az  $U_{re} = c_{re} \cdot I_a \cdot \omega$  összefüggés szerint szintén a szögsebességgel arányos, és maximálisan megengedhető értéke 6...12 V, amelyet  $\omega_r$  szögsebességnél érünk el. Az  $\omega_{sz}$  és az  $\omega_r$  szögsebességek közül az  $\omega_r$  a nagyobb.

Ennél nagyobb szögsebességen a megengedhető armatúraáram értékét

$$\text{az } I_{ameg} = I_{amax} \cdot \frac{\omega_r}{\omega} \quad (5.85)$$

összefüggés szerint csökkenteni kell, így a gép terhelhetősége másodfokú hiperbola szerint csökken.



5.77. ábra Az egyenáramú motor tranziens üzemre érvényes helyettesítő kapcsolási vázlata

#### 5.12.4. Egyenáramú motoros hajtások hatásvázlata. Egyenáramú gépek időállandói

Egyenáramú motoros hajtásokban a fordulatszám-, vagy a pozíciószabályozó változó kapcsolófeszültséggel táplálja a motort. Az átmeneti jelenségek miatt ezekben esetekben a helyettesítő vázlatban már nem hanyagolhatjuk el

az egyenáramú gép armatúraköri induktivitását (5.77. ábra). Vizsgálatainkat az ilyen hajtásokban nagyon gyakori terheléstől független fluxusú (kompenzált gép, állandó mágneses gerjesztésű egyenáramú gép) gépekre végezzük.

Az armatúrakör feszültségegyenlete az armatúrára  $U$  nagyságú feszültségugrást kapcsolva:

$$U = u_i(t) + i_a(t) \cdot R_b + L_b \cdot \frac{di_a(t)}{dt}, \quad \text{vagyis}$$

$$U = c \cdot \Phi \cdot \omega(t) + i_a(t) \cdot R_b + L_b \cdot \frac{di_a(t)}{dt}, \quad \text{ahol} \quad c = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{z \cdot p}{a} \text{ gépállandó.} \quad (5.86)$$

A  $c$  gépállandóval a  $m$  motornyomaték időfüggvénye:  $m(t) = c \cdot \Phi \cdot i_a(t)$ . A motornyomaték a terhelőnyomatékra, és a rendszer gyorsítására fordítódik:

$$m(t) = c \cdot \Phi \cdot i_a(t) = m_t(t) + m_d(t) = m_t(t) + J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt}, \quad (5.87)$$

ahol  $J$  a rendszer tehetetlenségi nyomatéka. Az egyszerűség kedvéért tételezzük fel továbbá, hogy a teljes nyomaték a gyorsításra fordítódik, vagyis  $m_t(t) = 0$ . Ekkor (5.87)-ből a motoráram:  $i_a(t) = \frac{J}{c \cdot \Phi} \cdot \frac{d\omega(t)}{dt}$ , amit behelyettesítve (5.86)-ba:

$$U = c \cdot \Phi \cdot \omega(t) + \frac{J \cdot R_b}{c \cdot \Phi} \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + L_b \cdot \frac{J}{c \cdot \Phi} \cdot \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} \quad (5.88)$$

Ezt az egyenletet  $c \cdot \Phi$ -vel végigosztva:

$$\frac{L_b}{R_b} \cdot \frac{J \cdot R_b}{c^2 \cdot \Phi^2} \cdot \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} + \frac{J \cdot R_b}{c^2 \cdot \Phi^2} \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = \frac{U}{c \cdot \Phi} = \omega_0 \quad (5.89)$$

ahol  $\omega_0$  az  $U$  kapocsfeszültséghez tartozó üresjárási szögsebesség. (5.89)-ben az  $\frac{L_b}{R_b}$  hányados az armatúrakör  $T_v$  villamos-, a  $\frac{J \cdot R_b}{c^2 \cdot \Phi^2}$  hányados pedig a rendszer  $T_m$  elektromechanikai időállandója. Az időállandókkal az (5.84) egyenlet:

$$T_v \cdot T_m \cdot \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} + T_m \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = \frac{U}{c \cdot \Phi} = \omega_0 \quad (5.90)$$

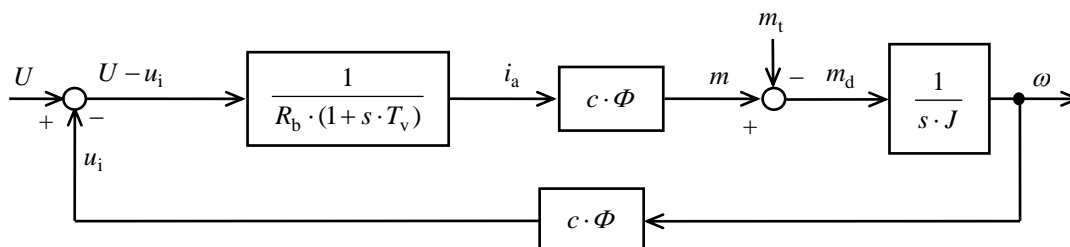
Az (5.90) egyenlet Laplace-transzformált alakja ( $s$ -el jelölve a Laplace operátort):

$$s^2 \cdot T_v \cdot T_m \cdot \omega(s) + s \cdot T_m \cdot \omega(s) + \omega(s) = \frac{U}{s \cdot c \cdot \Phi} = \frac{\omega_0}{s}. \quad (5.91)$$

(5.91)-ből kifejezve a szögsebesség Laplace-transzformáltját:

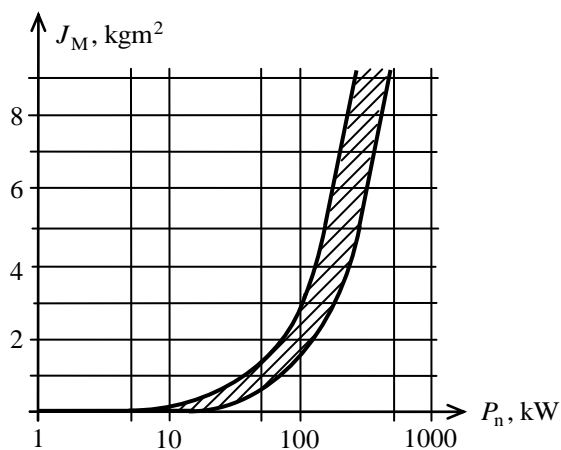
$$\omega(s) = \frac{\omega_0}{s} \cdot \frac{1}{s^2 \cdot T_v \cdot T_m + s \cdot T_m + 1}, \quad (5.92)$$

ami egy kéttárolós arányos tag egységugrás függvényre adott válasza. Az egyenlet visszatranszformálásával a szervomotorokkal kapcsolatban az 5.15.3. pontban foglalkozunk. Az (5.87) egyenlet alapján az 5.78. ábrán felrajzoltuk a terheléstől független fluxusú egyenáramú motor hatásvázlatát.



5.78. ábra Állandó fluxusú egyenáramú motorok hatásvázlata

Az armatúrákör villamos időállandója 0,02...0,15 s között változik, a nagyobb érték vonatkozik a nagyobb teljesítményű gépekre. Az armatúrákör ellenállását legtöbbször egyenáramú V-A-mérős módszerrel határozhatjuk meg. Az armatúrákör induktivitására a (5.77) összefüggés kapcsán már kitértünk.



5.79. ábra Az egyenáramú gép tehetetlenségi nyomatékának tájékoztató értékei a teljesítmény függvényében

Az egyenáramú gépek másik, az armatúrákör időállandójánál legalább egy nagyságrenddel nagyobb villamos időállandója a gerjesztőkori időállandó:  $T_g = \frac{L_g}{R_g}$ . Az idő-

állandó függ a telítéstől, ezért általában a telítetlen szakaszra adják meg, értéke motorok esetén 0,1...6 s, generátoroknál 0,1...4 s. Első becslésként a

$$T_g, s = 10 \cdot 3 \sqrt{\frac{P_n, kW}{n \cdot 2p}} \quad (5.93)$$

tapasztalati képletet alkalmazhatjuk.

Mivel a gerjesztőkori időállandó legalább egy nagyságrenddel nagyobb, mint az armatúrákörü, ezért egy egyenáramú hajtásnál mindig a gép armatúrákörébe kell beavatkozni, ha gyors reakció kívánatos. A gerjesztőkori folyamatok gyorsítására általánosan használt módszer az ún. *forszírozás*, amikor is az állandósult gerjesztőáram eléréséig a névleges gerjesztőfeszültség 2...4-szeresét kapcsoljuk a gerjesztőtekercsre.

A  $T_m = \frac{J \cdot R_b}{c^2 \cdot \Phi^2}$  elektromechanikai időállandót a rendszer tehetetlenségi nyomatéka, az

armatúrákör ellenállása és a gép fluxusa befolyásolják. Az 5.79. ábra tájékoztató értéket ad az egyenáramú gép tehetetlenségi nyomatékára a teljesítmény függvényében.

### 5.13. EGYENÁRAMÚ GÉPEK VESZTESÉGEI ÉS HATÁSFOKA

A gép veszteségei a következők:

- ✚ *Armatúra vasveszteség* ( $P_v$ ): a forgórész átmágnesezése az  $f=p \cdot n$  frekvencia szerint változik, így a vasveszteség:

$$P_v = k_j \cdot \left[ v_{1,0h} \cdot \frac{f}{50} \cdot B^2 + v_{1,0\delta} \cdot \left( \frac{f}{50} \cdot B \right)^2 \right] \cdot m_v. \quad (5.94)$$

$v_{1,0h}$  és  $v_{1,0\delta}$  a vas lemezanyagára jellemző, 1 kg-ra vonatkozó,  $f = 50$  Hz-en, 1 T maximális indukciónál mért hiszterézis- és örvényáram-veszteségi tényező,  $B$  a maximális indukció Teslában,  $k_j$  a sajtolás- és lemezelés technológia miatt fellépő veszteségnövekedés ( $k_j \approx 2 \dots 2,5$ ),  $m_v$  a vastest tömege kg-ban. A vasveszteséget az armatúrakoszorúra és az armatúra fogakra külön-külön kell meghatározni.

- ✚ *Kefesúrlódási veszteség* ( $P_{ks}$ ):

$$P_{ks} = v_k \cdot A_k \cdot p \cdot \mu, \quad (5.95)$$

ahol  $v_k$  a kommutátor kerületi sebessége,  $A_k$  a kefék súrlódó felülete,  $p$  a fajlagos rúgónyomás,  $\mu$  a súrlódási tényező.

- ✚ *Kefeátmeneti veszteség* ( $P_k$ ):

$$P_k = \Delta U_k \cdot I_a, \quad (5.96)$$

ahol  $\Delta U_k$  a kefék feszültségesése, értékét elektrografit keféknél 2 V-ra szokás felvenni.

- ✚ *Ventilációs és csapágysúrlódási veszteség* ( $P_{s+v}$ ): változását a kerületi sebesség függvényében – a névleges teljesítmény %-ában – diagramban adják meg. A kerületi sebességgel kb. négyzetesen változik.

- ✚ *Főáramkörüi tekercselési veszteség* ( $P_t$ ):

$$P_t = I_a^2 \cdot R_b. \quad (5.97)$$

- ✚ *Járulékos veszteség* ( $P_j$ ): kompenzált gépeknél 0,5 %-a, kompenzálatlan gépeknél 1 %-a a névleges teljesítménynek:  $P_j = 0,005 \dots 0,01 P_n$ .

- ✚ *Gerjesztési veszteség* ( $P_g$ ):

$$P_g = U_g \cdot I_g = \frac{U_g^2}{R_g} = I_g^2 \cdot R_g. \quad (5.98)$$

A gép összes vesztesége:

$$\Sigma V = P_v + P_{ks} + P_k + P_{s+v} + P_t + P_j + P_g. \quad (5.99)$$

A hatásfok:

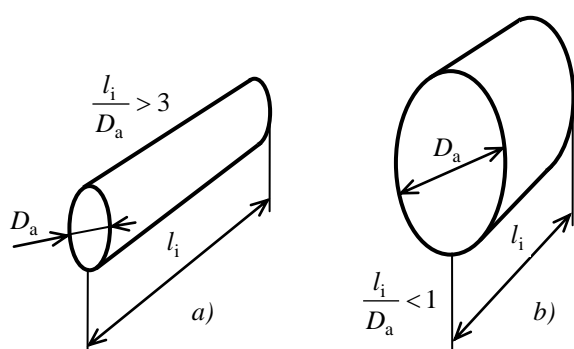
$$\eta = \frac{P_1 - \Sigma V}{P_1}, \quad (5.100)$$

ahol  $P_1$  a gép felvett teljesítménye.

#### 5.14. EGYENÁRAMÚ GÉPEK FŐMÉRETEI ÉS FELEPÍTÉSE

Az egyenáramú gépből kivehető teljesítmény közelítő meghatározásához tételezzük fel, hogy a gép ideális, vagyis 100 % hatásfokú. Ebben az esetben a gép leadott teljesítménye:

$$P_2 \approx P_b = U_i \cdot I_a = k_U \cdot \Phi \cdot n \cdot I_a = \frac{z \cdot p}{a} \cdot B_{\delta m} \cdot \alpha_i \cdot \frac{D_a \cdot \pi}{2p} \cdot l_i \cdot n \cdot 2a \cdot A \cdot \frac{D_a \cdot \pi}{z}.$$



5.80. ábra Különböző forgórész kialakítások  
a) szervomotor; b) nyomatékmotor

Elvégezve az egyszerűsítéseket és figyelembe véve, hogy a forgórész vastest térfogata:

$$V_a = \frac{D_a^2 \cdot \pi}{4} \cdot l_i,$$

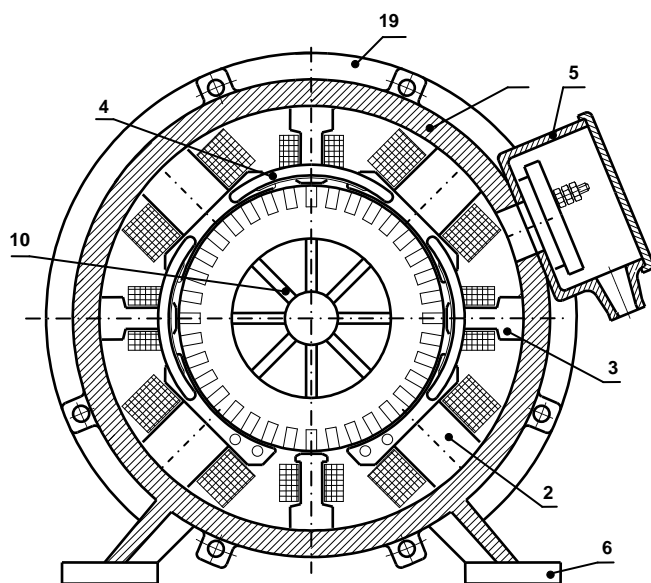
$$P_2 = 4\pi \cdot \alpha_i \cdot V_a \cdot B_{\delta m} \cdot A \cdot n. \quad (5.101)$$

Eszerint a leadott teljesítmény az aktív anyagok kihasználtságával (a  $B_{\delta m}$  maximális légrésindukció a mágneses kör anyagai-, az  $A$  kerületi áram az armatúra kihasználtságát jelzi), a fordulatszámmal és a forgórész köbtartalmával arányos.

A fordulatszámot vizsgálva ez azt jelenti, hogy azonos aktív anyag kihasználtságot és forgórész térfogatot feltételezve kétszeres fordulatszámon a kivehető teljesítmény is kétszeres lehet. A forgórész térfogatát elemezve azonos teljesítmény esetén készíthetünk kis átmérőjű, hosszú armatúrájú motorokat (5.80a ábra), amelyeknek így kicsi lesz a tehetlenségi nyomatéka és ezzel együtt az elektromechanikai időállandója. Ez a kialakítás előnyös *szervomotorok* esetén, ahol az  $l_i / D_a$  viszony szokásos értéke  $l_i / D_a \geq 3$ . A hagyományos gépek  $l_i / D_a$  viszonya 0,8...1,5 körüli érték. Készíthetünk azonban motorokat nagy átmérővel és kis hosszal is. Az átmérővel növekszik a gép nyomatéka (és természetesen tehetlenségi nyomatéka is), így ezeket a motorokat *nyomatékmotoroknak* szok-

$P_2$ , kW	$B_{\delta m}$ , $\frac{Vs}{m^2}$	$A$ , $\frac{A}{m}$
1...2	0,52	$1,6 \cdot 10^4$
2...4	0,56	$1,8 \cdot 10^4$
4...10	0,63	$2,2 \cdot 10^4$
10...30	0,68	$2,5 \cdot 10^4$
30...100	0,76	$3,0 \cdot 10^4$

5.3. táblázat A maximális légrésindukció és a kerületi áram tájékoztató értékei



5.81. ábra Egyenáramú gép keresztmetszete

külső- és belső ventilációs, ellenáramú hűtésű gépet az 5.81. és az 5.82. ábrán.

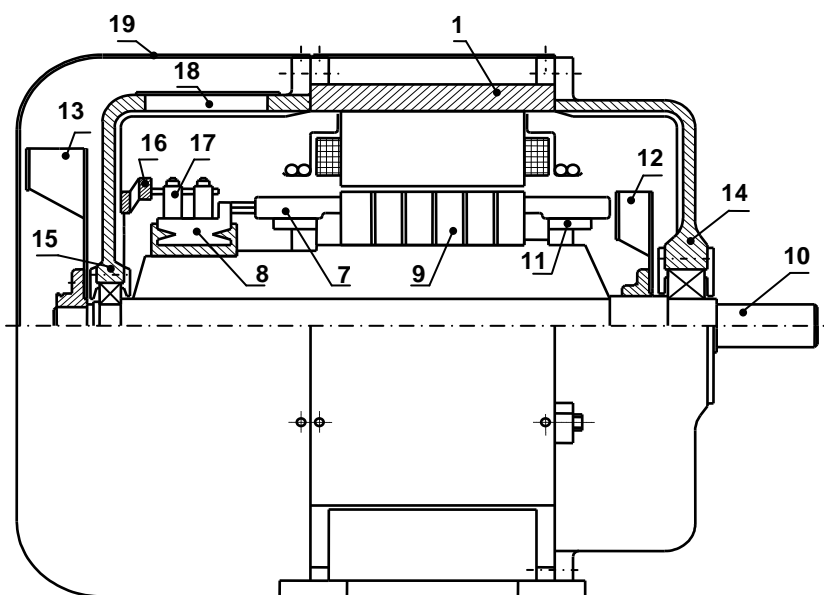
A tengely és az azon elhelyezett alkatrészek alkotják a gép forgórészét. Közülük a fontosabbak: a 8 kommutátor, 9 armatúra vastest, 7 a tekercselés. A kommutátor és a vastest a 10 bordás tengelyen helyezkedik el. A tekercsfejeket a centrifugális erő okozta elmozdulás ellen acélhuzalból vagy üvegszálakból készített bandázssal rögzítik. A 11 tekercsfejtartók alátámasztják a tekercsfejeket, nehogy a feszes bandázs összeroppantsa azokat. A 12 belső-, és a 13 külső szellőző kerék a gép hűtését segíti elő.

Az állórészhez tartozik a 14 hajtásoldali, és a 15 kommutátoroldali csapágypajzs a csapágyakkal; a 16 kefehid a 17 kefetartóval és 18 szerelő nyílással, valamint a 19 légvezető

kás nevezni. A nyomatékmotoroknál az  $l_i / D_a \leq 1$  (5.80b ábra).

Az 5.3. táblázatban egy nyitott, átszellőztött gépre megadtuk a  $B_{\delta m}$  maximális légrésindukció és az  $A$  kerületi áram tájékoztató értékeit. Az adatokból látszik, hogy az aktív anyagok kihasználtsága a teljesítmény növekedésével nő.

Hasonlóan a többi villamos gépéhez, az egyenáramú gépek szerkezeti megoldásaira is számos változat alakult ki az idők folyamán, a teljesítménynagyság függvényében. E megoldások közül mutatunk be egy teljesen zárt (IP44 védetségű)



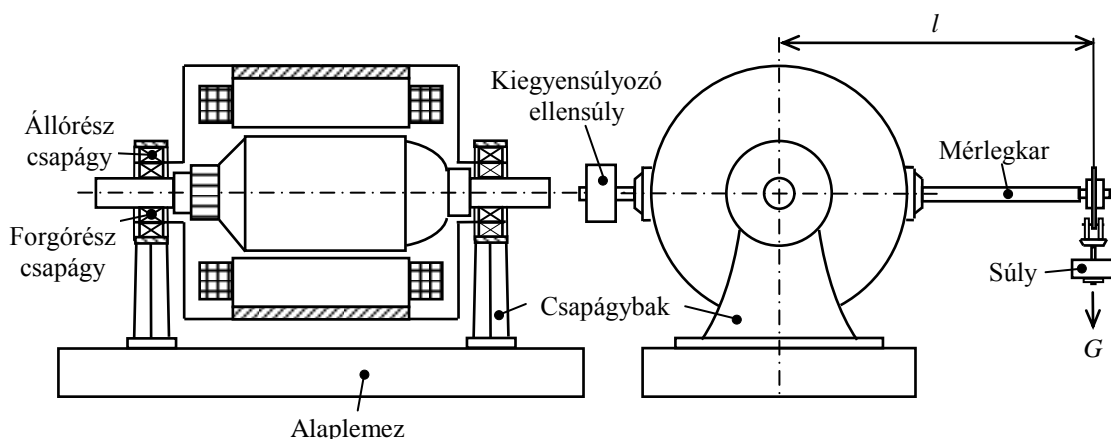
5.82. ábra Egyenáramú gép hosszmetzete

burkolattal. A 2 főpólusok a 3 segédpólusok az 1 állórész házhoz csavarozottak. Az állórész házat acélcsőből, meghajlított kazánlemezről készítik. Az állórész házhoz rögzítik még az 5 kapocsszekrényt és a 6 talpat. A 4 kompenzáló tekercselést a főpólus-sarú hornyaiba helyezik.

## 5.15. KÜLÖNLEGES EGYENÁRAMÚ GÉPEK

### 5.15.1. Mérleggépek

Mérleggépnek nevezik az olyan villamos gépet, amelynek az állórészét is csapágyazzák, és így az akció-reakció elv értelmében az állórész elfordulását megakadályozva mérni tudjuk a nyomatékot. Elvileg a mérleggép nem csak egyenáramú gép lehet, de kedvező üzemi tulajdonságai miatt a mérleggépek legnagyobb része egyenáramú. Mérleggépnek általában külső gerjesztésű kompenzált, vagy soros stabilizáló tekercseléssel rendelkező egyenáramú gépet használunk, melynek villamos felépítése teljesen megegyezik egy hagyományos egyenáramú gépével. A mérleggép építési alakja legtöbbször ún. *bakcsapágyas-alaplemez*, a csapágyazás elvi megoldását az 5.83. ábrán vázoltuk fel.



5.83. ábra Egyenáramú karos mérleggép (mérlegdinamó)

A mérleggép működhet motoros üzemben is (pl. egy szivattyú hajtásakor), de sokkal gyakoribb a fékező, generátoros üzemmód (pl. egy robbanómotor, vagy egy másik villamos gép fékezése). Ez utóbbi miatt egyszerűen *mérlegdinamónak* szokták nevezni. Az állórész motoros üzemben a forgórészszel ellentétes, generátoros üzemben azonos irányban igyekszik elfordulni. A fékezett energiát vagy ellenálláson emésztjük fel, vagy nagyobb teljesítmények esetén hálózati kommutációs inverteren keresztül visszatápláljuk a hálózatba.

A mérleggépeket a mérlegkar súlyserpenyőjébe helyezett súlyokkal egyensúlyozzuk ki (a kart a súlyokkal vízszintes helyzetbe hozzuk). A tengelyre ható nyomaték ekkor:

$$M = G \cdot l \pm M_{s+v} = m \cdot g \cdot l \pm M_{s+v}, \quad (5.102)$$

ahol  $M_{s+v}$  egy súrlódásból és ventilációból származó korrekciós nyomaték, amely pozitív generátoros, és negatív motoros üzemben. A korrekciós nyomaték üresjárásban vizsgáló-



gépes módszerrel a fordulatszám függvényében mérésrel meghatározható. A korrekciós nyomaték figyelembevételével a mérleggép pontossága kb. 2 %. A fordulatszámot is mérve a fékező(hajtó) mechanikai teljesítmény:

$$P_m, W = \frac{2\pi}{60} \cdot M, \text{ Nm} \cdot n, \frac{1}{\text{min}} = \frac{1}{9,55} \cdot M, \text{ Nm} \cdot n, \frac{1}{\text{min}} . \quad (5.103)$$

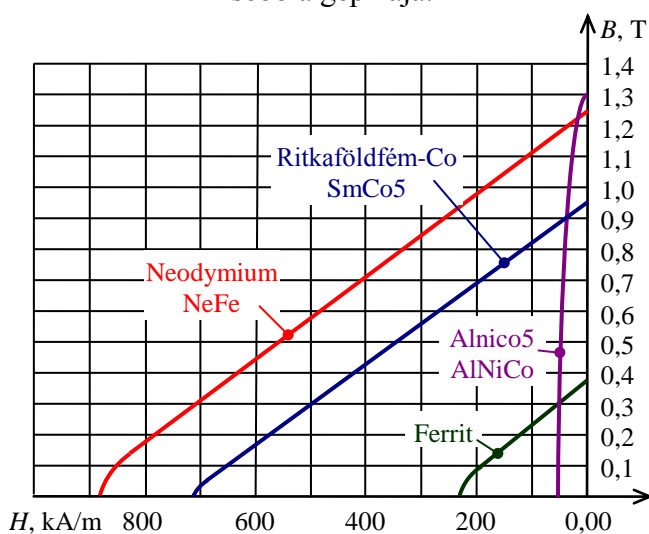
A korszerű mérleggépekre ráépítik a fordulatszám jeladót, amely analóg tachogenerátor, vagy digitális inkrementális jeladó lehet, a súly mérése helyett pedig nyúlásmérőbéllyeges erőmérőcellát alkalmaznak a nyomaték mérésére. Mivel a gépcsoport rezgéseinek befolyása a mérési eredményekre nem kívánatos, a mérlegkar és a cella közé gumiból készült csillapító elemeket helyeznek el.

### 5.15.2. Állandómágneses egyenáramú gépek

Amíg a közép és nagyteljesítményű egyenáramú gépek elektromágneses gerjesztésűek, addig a speciális (kisteljesítményű) gépekben, szervomotorokban (ahol nem szükséges a fluxus üzem közbeni változtatása) gyakran állandómágneses gerjesztést alkalmaznak.

Az állandó mágnesek alkalmazásának a következő főbb előnyei vannak:

- ✚ Nincs gerjesztési veszteség, javul a hatásfok (kis gépeknél a hatásfokjavulás akár 15...20 % is lehet).
- ✚ Kisebb a tömeg; csökken a rézfelhasználás.
- ✚ Mivel a mágnesanyag anizotróp, a keresztirányú armatúrareakció irányában a mágneses vezetőképesség sokkal kisebb, mint az izotróp dinamólemezzé. Ezért az armatúrareakció csak kis mértékben befolyásolja a gép fluxusát, vagyis a gép  $n(M)$  karakterisztikái egyenesek.
- ✚ Az állandómágneseikkel nagyobb  $M/J$  viszony érhető el, jobbák a szabályozási tulajdonságok.
- ✚ Nincs gerjesztéskimaradás.
- ✚ Kisebbek az üzemeltetési költségek.
- ✚ Kisebb a gép zaja.



5.84. ábra Tipikus állandómágnese-anyagok lemágnesezési görbéi

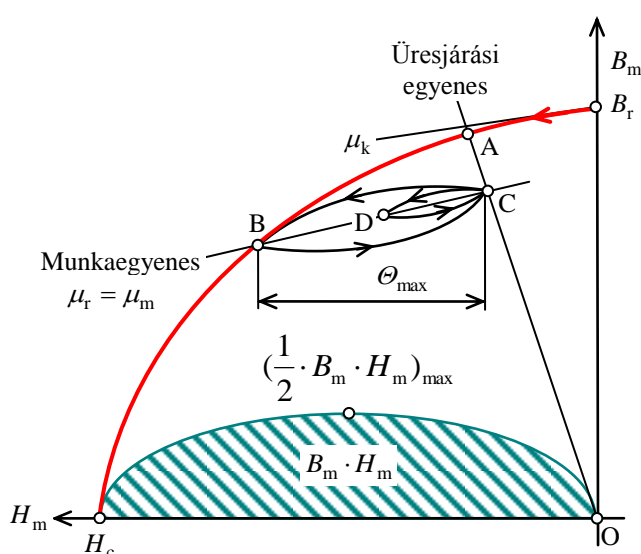
Olcsóságuk miatt a legelterjedtebbek az ún. *ferrit* mágnesek, amelyeknek azonban mind remanencia indukciójuk, mind a koercitív erejük kicsi.

Az 5.84. ábra tipikus állandómágnese jelleggörbéket mutat. A mágnesanyagok két csoportba sorolhatók. Az egyik csoport jellegzetes képviselője az AlNiCo tartalmú, ALNICO5 fantázianevű mágnes, amelynek nagy a visszamaradó-, vagy remanens indukciója, de kicsi a koercitív ereje. Ezért a mágnes csak ott alkalmazható, ahol nem lép fel

nagy lemágnesező gerjesztés, viszont nagy indukált feszültség szükséges. Tipikus alkalmazási területe a tachométer-generátorok.

A másik csoportnál viszonylag kicsi a remanens indukció, de nagy a koercitív erő. E csoportba tartoznak a ritkaföldfém-mágnesek (pl. a Szamárium-Cobalt ötvözet). Alkalmazási területük a szervomotorok, ahol rövid ideig akár a névleges áram 10-szerese is megengedett. Igény esetén a légrésindukció maximális értékét a sarufelület (lásd az 5.86. ábrát) csökkentésével növelik. A ritkaföldfém mágnesek viszonylag drágák. Mindkét szempontból kiváló mágneses tulajdonságot mutat a *Neodymium-Vas* összetételű mágnes és viszonylag olcsó is. A jelenleg terjedő neodymium mágnesek fő problémája a hőérzékenység (*Curie-pontjuk* 130...150 C°) és a korrózió.

Az állandómágnesek jellemző adatait az 5.85. ábra alapján ismertetjük. A mágnesanyag két meghatározó adata a  $B_r$  remanens, vagy visszamaradó indukció, valamint a



5.85. ábra Állandómágnes-anyagok jellemzői

$H_c$  koercitív erő. A lemágnesezési görbe kezdeti szakaszának meredeksége a  $\mu_k$  kezdeti permeabilitás. A mágnesanyag fajlagos energiatartalmát a  $w_m = \frac{1}{2} \cdot B_m \cdot H_m$  szorzat határozza meg. A gép munkapontját célszerű úgy megválasztani, hogy az a maximális energiatartalom környékére essék.

Tételezzük fel, hogy a mágnesanyagot az ellengerjesztés a B pontig mágnesezi le. Ha a gerjesztést megszüntetjük, akkor a hiszterézis miatt nem az A pontba, hanem a C üresjárási pontba (az  $\overline{OA}$  üresjárási egyenes

és a  $\overline{BC}$  munkaegyenes metszéspontja) kerülünk vissza. Amennyiben a  $\theta_{max}$  lemágnesező gerjesztésnél nagyobbat nem alkalmazunk (pl.  $C \Rightarrow D \Rightarrow C$ ), akkor olyan hiszterézishurkon mozgunk, amelyeknek tengelyvonala a  $\overline{BC}$  munkaegyenes, azaz a munkaegyenes a legnagyobb lemágnesezés stabilizálta.

Az állandómágnesből készült pólustörzs keresztmetszete  $A_m$ , hossza  $L_m$ ; az  $A_m$ -hez képest szűkített pólussarú felülete  $A_\delta$  (5.86. ábra). A mágnes-törzs a felmágnesezés után  $\Theta_m = H_m \cdot L_m$  nagyságú gerjesztést képvisel. A mágnes-törzs  $\Phi_m$  fluxusa a  $\Phi$  hasznos és a  $\Phi_s$  szórás fluxusból tevődik össze:  $\Phi_m = \Phi + \Phi_s$ . A szórás fluxus erővonalai a levegőben záródnak, így ez a fluxusrész a pólustörzs  $\Theta_m$  gerjesztésével arányosan növekszik:  $\Phi_s = \Lambda_s \cdot H_m \cdot L_m$ , ahol  $\Lambda_s$  a szórás utak mágneses vezetőképessége. A mágnes-törzs fluxusa:  $\Phi_m = \Phi + \Phi_s = (\Lambda + \Lambda_s) \cdot H_m \cdot L_m$  a  $\Lambda$  hasznos mágneses vezetőképességet figyelembe véve. A mágnes-törzsben az indukció:

$$B_m = \frac{\Phi_m}{A_m} = \frac{\Phi + \Phi_s}{A_m} = (\Lambda + \Lambda_s) \cdot \frac{L_m}{A_m} \cdot H_m, \quad (5.104)$$

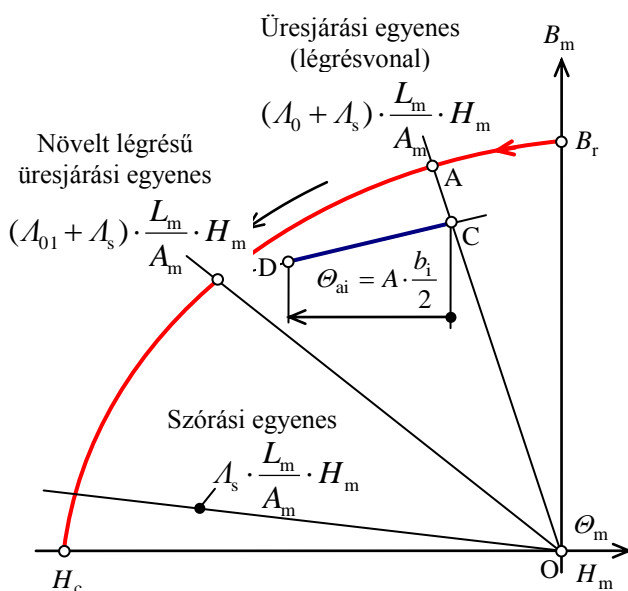
ami a  $B_m(H_m)$  koordináta-rendszerben egy egyenes egyenlete.

Üresjárásban a vasmagra jutó gerjesztést elhanyagolva tételezzük fel, hogy a teljes gerjesztés a  $\delta$  légrésre esik (ez lesz a légrésvonal):

$$\Theta_m = H_m \cdot L_m = \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot k_c \cdot \delta. \quad (5.105)$$

Üresjárásban a szükséges hasznos fluxus:

$$\Phi_{m0} = \Lambda_0 \cdot H_m \cdot L_m. \quad (5.106)$$



5.86. ábra Az állandómágneses kör

(5.105)-öt és (5.106)-ot összehasonlítva az üresjárási vezetőképesség:

$$\Lambda_0 = \mu_0 \cdot \frac{A_\delta}{k_c \cdot \delta}. \quad (5.107)$$

A vezetőképesség fordítottan arányos a gép légrésével. A

$$B_m = (\Lambda_0 + \Lambda_s) \cdot \frac{L_m}{A_m} \cdot H_m \text{ üresjárási-}$$

$$\text{és a } B_m = \Lambda_s \cdot \frac{L_m}{A_m} \cdot H_m \text{ szórási}$$

egyenest berajzoltuk az 5.87. ábrába. A légrés megnövekedése  $\Lambda_0$ -ról  $\Lambda_{01}$ -re csökkenti a vezetőképességet, ezzel az üresjárási egyenes meredeksége is csökken. Látható, hogy a légrés megnövekedése a lemágnesezés irányába hat. Ezért jegyezzük meg, hogy a kis koercitív erejű mágnessel készített gépet nem szabad szétszedni, ill. a kis koercitív erejű mágneseket a gépbe építés után mágnesezik fel.

Az armatúrareakció lemágnesező hatása „automatikusan megnöveli” a mágnes gerjesztését ( $C \Rightarrow D$ ), ami azt jelenti, hogy a mezőgörbe kevésbé torzul, az állandómágnessel gerjesztett gép hasonlóan viselkedik, mint egy külsőgerjesztésű kompenzált gép.

Az állandómágnesek felmágnesezése úgy történik, hogy a mágnes gerjesztő felmágnesező tekercsen keresztül egy tirisztor bekapcsolásával egy előzőleg feltöltött elektrolit kondenzátort sütnek ki. Beépítés előtt mágnesezik fel a nagy koercitív erejű mágneseket. Ennek hátránya, hogy gyártáskor az alkatrész a mágnesezhető anyagokat magához vonzza,

5.87. ábra Az állandómágneses gép munkapontja

és a forgórészt befűzéskor beránthatja (ennek elkerülésére külön befűző készülék szükséges). A kis koercitív erejű mágneseket a gép összeszerelése után mágnesezik fel. Az esetlegesen bennmaradó felmágnesező tekercset rövidrezárva, az véd a rövid idejű lemágnesezéssel szemben.

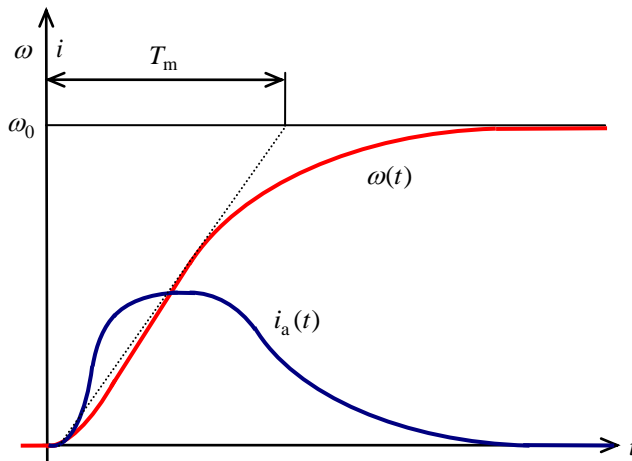
### 5.15.3. Egyenáramú szervomotorok

Mint már említettük, az állandómágnesek felhasználásával nagyobb  $M/J$  viszony érhető el, ami előnyös tranziens üzemben működő szervomotorok építése esetén. Az egyenáramú motorok tranziens állapotban érvényes helyettesítő vázlatával az 5.12.4. pontban foglalkoztunk. Kapocsfeszültség-ugratás esetén a szögsebesség Laplace-transzformáltja (lásd 5.92.-t):  $\omega(s) = \frac{\omega_0}{s} \cdot \frac{1}{s^2 \cdot T_v \cdot T_m + s \cdot T_m + 1}$ . Ezt visszatranszformálva az időtartományba:

$$\omega(t) = \omega_0 \cdot \left( 1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \cdot e^{\alpha_1 t} - \frac{\alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_2} \cdot e^{\alpha_2 t} \right), \quad (5.108)$$

ahol  $\alpha_1, \alpha_2$  az  $s^2 \cdot T_v \cdot T_m \cdot \omega(s) + s \cdot T_m \cdot \omega(s) + \omega(s) = 0$  karakterisztikus az egyenlet gyökei:

$$\alpha_{1,2} = \frac{-T_m \pm \sqrt{T_m^2 - 4 \cdot T_m \cdot T_v}}{2 \cdot T_m \cdot T_v}. \quad (5.109)$$



5.88. ábra Szervomotor időfüggvényei aperiódikus beálláskor

Ha a négyzetgyök alatti rész negatív ( $T_m < 4 \cdot T_v$ ), a beállítás lengő, egyébként aperiódikus. Szervomotoroknál csak a lengésmentes beállítás elfogadható, ennek feltétele, hogy

$$T_m \geq 4 \cdot T_v \quad (5.110)$$

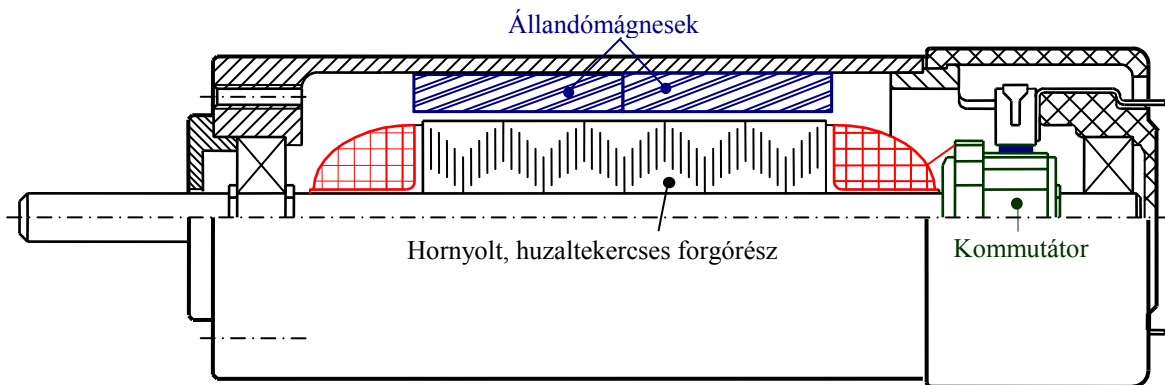
legyen. Aperiódikus beállítás esetén az  $\omega(t)$  és az  $i_a(t)$  időfüggvényeket az 5.88. ábrán rajzoltuk fel.

Szervomotorok esetén a  $T_m \geq 4 \cdot T_v$  feltétel betartása mellett arra is törekednünk kell, hogy a két időállandó értéke a lehető legkisebb legyen. Ezért a  $T_m \cdot T_v$  szorzatot együtt kell minimalizálni. (5.89) és (5.90) definícióit felhasználva a szorzat:

$$T_m \cdot T_v = \frac{J \cdot R_b}{c^2 \cdot \Phi^2} \cdot \frac{L_b}{R_b} = \frac{J \cdot R_b}{k^2 \cdot N^2 \cdot \Phi^2} \cdot \frac{\Lambda \cdot N^2}{R_b} = \frac{J \cdot \Lambda}{k^2 \cdot \Phi^2}, \quad (5.111)$$

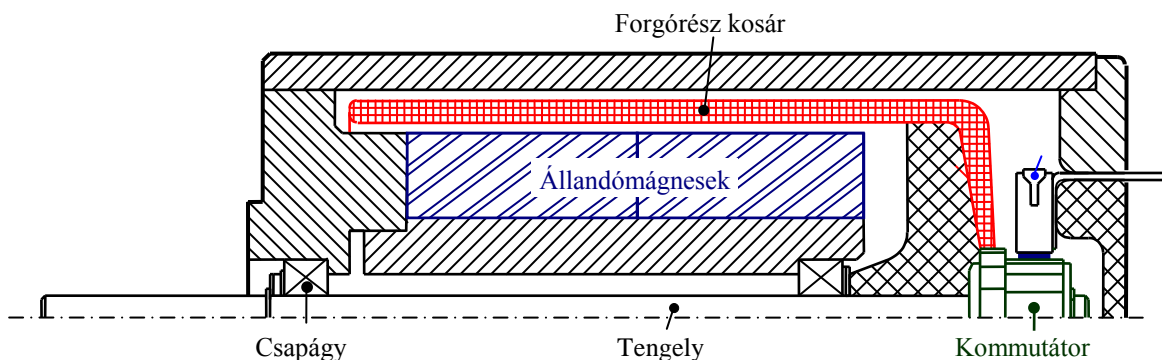
ahol  $N_a = \frac{z}{4 \cdot a}$  az armatúra hatásos menetszám, így:  $c = \frac{1}{2\pi} \frac{z \cdot p}{a} = k \cdot N_a$ .  $\Lambda$  az armatúra vezetőikkel kapcsolódó tér mágneses vezetőképessége. (5.111) alapján a szervomotorok gyors működésének feltételei:

- A forgórész tehetetlenségi nyomatéka legyen kicsi, mivel  $J = \frac{1}{2} m \cdot R^2$ , a forgórész sugarát a lehető legkisebbre kell választani. Ezért a hagyományos építésű szervomotoroknál a teljesítményt a hossz növelésével érik el úgy, hogy az  $l_1 / D_a \geq 3$ . A motor hosszú, csőszerű kinézetű (csőmotoroknak is szokták nevezni). Egy ilyen szervomotor felépítését mutatja az 5.89. ábra.

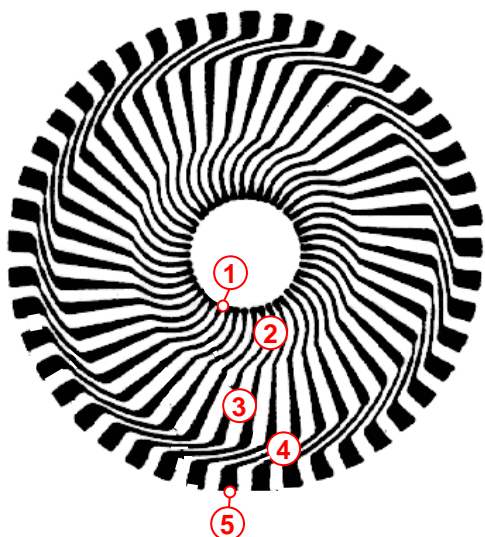


5.89. ábra Hornylt forgórészű, állandómágneses gerjesztésű szervomotor nagy  $l_1 / D$  viszonyal

- Az armatúra-vezetőkkel kapcsolódó tér  $\Lambda$  mágneses vezetőképessége legyen kicsi. Ezt úgy érik el, hogy az armatúraveetőket nem ágyazzák vasba (vasmentes forgórész). Ennek a módszernek az előnyei: a villamos és az elektromechanikai időállandó egyidejű csökkentésén kívül (a forgórész tehetetlensége is csökken a kisebb tömeg miatt!) az, hogy kicsi lesz a kommutáló menetek induktivitása és ezzel együtt a reaktancia feszültség is. Így elhagyható a segédpólus, vagy a kommutáció szempontjából a névlegeshez képest lényegesen nagyobb áramok engedhetők meg. A hornyolás hiánya a nyomatékot a kerület mentén még egészen kis fordulatszámoknál is rendkívül egyenletessé teszi. Sajnos a vas hiánya miatt a légrés és így a mágneses kör gerjesztésigénye is megnövekszik, a termikus időállandó pedig csökken.



5.90. ábra Kosárforgórészű, állandómágneses gerjesztésű szervomotor



1-belső hegesztőfűl; 2-belső evolvens, kommutátor;  
3-a vezető aktív része (tekercsoldal); 4-külső evolvens;  
5-külső hegesztőfűl

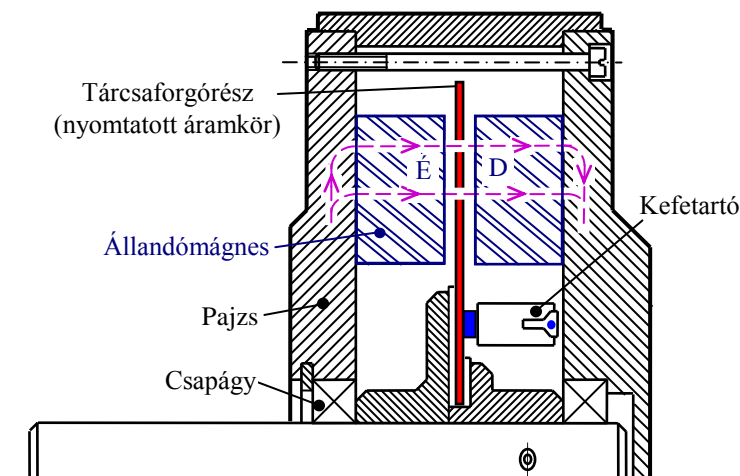
**5.91. ábra Nyomatott áramkörös motor forgórésze**

Az elv felhasználásával többféle típusú szervomotor készül. az 5.90. ábra ún. *kosár-forgórészű* szervomotort mutat. A kosárszerűen feltekercselt armatúrát műgyantával merevítik, az állandómágnes a serlegen belül helyezkedik el.

Szervomotorok esetén gyakori a forgórész tárcsaszzerű kialakítása, és ezzel együtt a hasznos fluxus *axiális iránya* is. Két motortípus terjedt el: a nyomatott áramkörös forgórészű tárcsamotor és a tekercselt forgórészű tárcsamotor. A nyomatott áramkörös forgórészű motorok armatúravezetőit nyomatott áramköri technikával készítik (5.91. ábra). Mivel a lapon kevés a hely, mindig a nagyobb feszültséget adó hullámos tekercselést alkalmazzák és a

nyomatott áramkör sokszor többretegű. A technológia kényes része az oldalak kívül és belül történő összeforrasztása.

A nyomatott áramkör egyben kommutátorként is használt. A motor szerkezeti felépítését az 5.92. ábra mutatja.

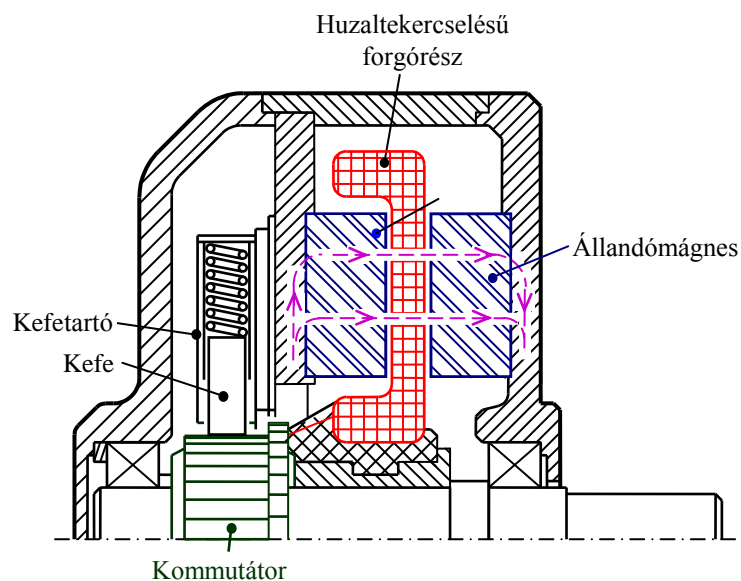


**5.92. ábra A nyomatott áramkörös motor szerkezeti felépítése**

A huzaltekerceseléses forgórészű tárcsamotorok szerkezeti felépítése az 5.93. ábrán látható. A gép axiális fluxusú, az armatúra tekercselemek és a mágnesek is körcikkszerűek.

✚ a szervomotor elektromechanikai időállandóját csökkenti, ha nagy a gép fluxusa. Ilyen szempontból, és az armatúreakció közömbösítésére is előnyös nagy koercitív erejű mágnesek alkalmazása.





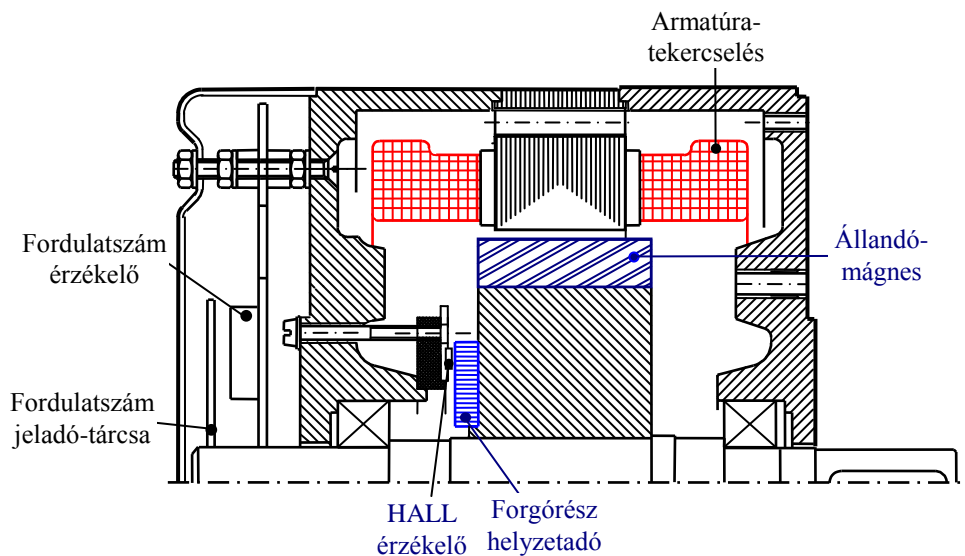
**5.93. ábra Huzaltekercselésű, tárcsaforgórészű motor szerkezeti felépítése**

A szervomotorok villamos időállandója ms, elektromechanikai időállandója pedig 10...100 ms nagyságrendű.

#### 5.15.4. Elektronikus kommutációjú motorok

A teljesítményelektronika fejlődése tette lehetővé az egyenáramú gépek legkényesebb alkatrészének, a kommutátornak és a kefének elektronikus elemmel történő kiváltását. Ezáltal gyakorlatilag megszűnnek az egyenáramú gép kefékopásból adódó karbantartási igényei, valamint a kommutáció által termelt mechanikus és villamos zajok.

Ahhoz, hogy az elektronikus kommutálást könnyebben, az álló géprészen végezhessük, a gépet ki kell fordítani. Így az állandómágnes főpólusok a forgórészre, a mind-



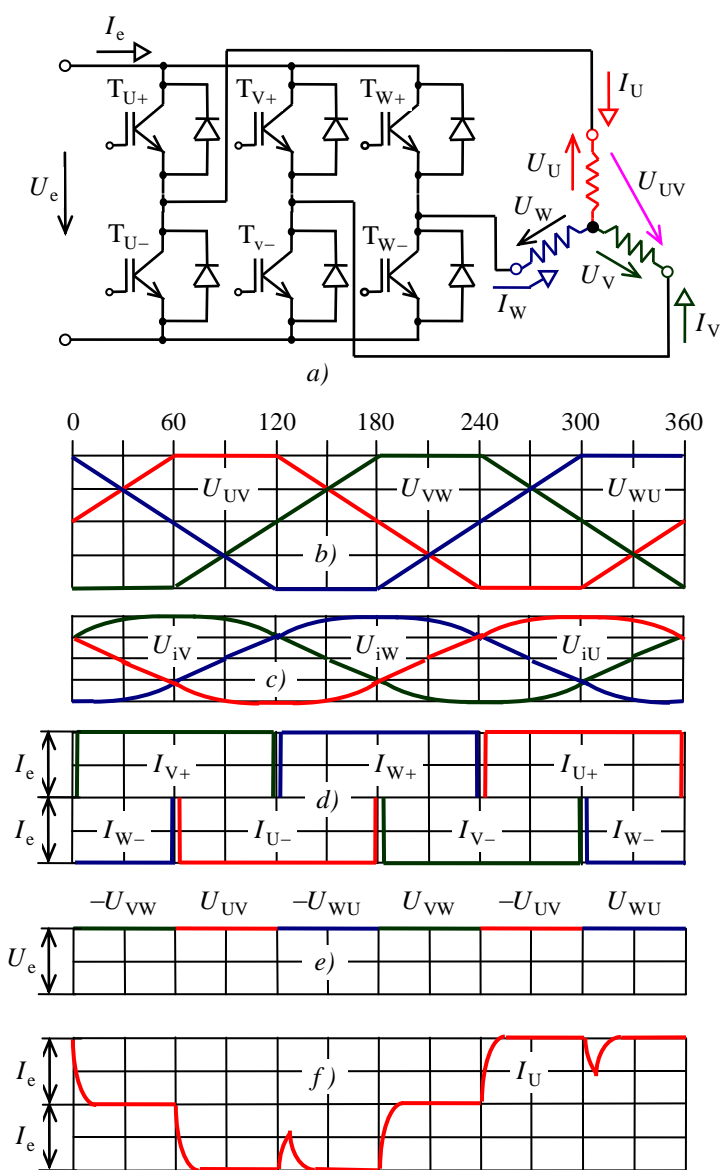
**5.94. ábra Elektronikus kommutációjú motor felépítése**



össze 2...4 (legtöbbször 3) tekercselemből álló armatúra-tekercselés az állórészre kerül (5.94. ábra). Mivel ez gyakorlatilag egy szinkron gép felépítése, a motor szinuszos indukált feszültségű, szinuszos armatúraáramú változatát szinkron szervomotornak is szokták nevezni.

Az egyenáramú gép működésének lényege, hogy az armatúra vezetőkben a kommutátor megfordítja az áram irányát, amikor azok a semleges vonalon áthaladnak. Ez egyben azt is jelenti, hogy a gép motoros üzemállapotában az áram és az indukált feszültség fázisban, generátoros esetben pedig ellenfázisban vannak. Az egyenáramú gép indukált feszültségét a pólusgerjesztés hozza létre, amelynek gerjesztési iránya a forgórész  $d$ -irányú mágneses tengelyéhez, azaz a forgórész helyzetéhez kötődik. Ha tehát az adott armatúra-tekercselem (továbbiakban fázis) áramát a forgórész helyzetétől függően úgy kapcsoljuk ki és be, hogy az indukált feszültség és áram fázisban (vagy generátoros üzemben ellenfázisban) legyen, akkor az elektronikus kommutáció az egyenáramú géppel megegyezően a armatúragerjesztést a pólusgerjesztés tengelyére merőlegesen úgy rögzíti, hogy a legnagyobb nyomatékot kapjuk. A tekercselemeket a nyomatéklüktetés elkerülése érdekében villamos  $180^\circ$  helyett csak  $360^\circ/m$  szögre kapcsoljuk be, ahol  $m$  az armatúra fázisainak száma. A bekapcsolást a forgórészen elhelyezett mágneses vagy optoelektronikus érzékelő vezérli. Az 5.94. ábrán a helyzetadó egy  $2p$  pólusra felmágnesezett gyűrű alakú ferritmágnes, az érzékelő pedig Hall-szonda.

Az 5.95. ábrán az elektronikus kommutációjú motor időfüggvényeit rajzoltuk fel. A csillagkapcsolású motort háromfázisú tranzisztoros hídról tápláljuk (5.95a ábra). Feltételezzük, hogy a gép vonali indukált feszültségei (5.95b ábra) trapéz alakúak, amelyeknek megfelelő, az állandómágnes pólusok által az armatúrába indukált fázisfeszültségek láthatóak az 5.95c ábrán. Az adott fázishoz tartozó felső(alsó)

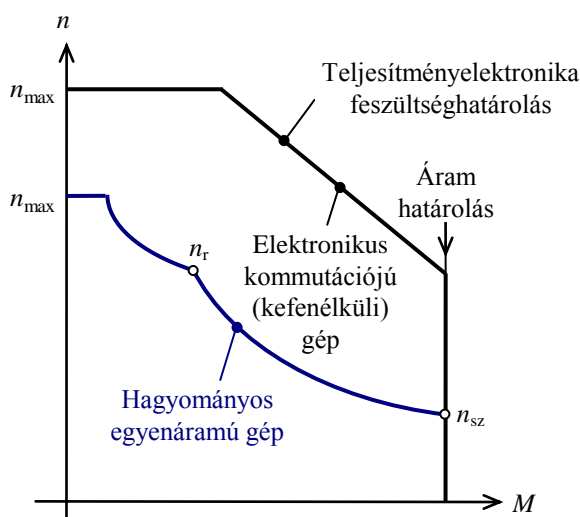


5.95. ábra Elektronikus kommutációjú motor időfüggvényei

tranzisztorokat akkor kell bekapcsolni, amikor az adott fázisfeszültség a pozitív oldalon a legnagyobb, a negatív oldalon pedig a legkisebb. Például az első 120°-os részben az pozitív oldalon a  $V$ -fázis indukált feszültsége a legnagyobb (ezért az  $V_F$ -t kell bekapcsolni), a negatív oldalon pedig az első 60°-os részben a  $W$ -fázis a legnegatívabb (ezért az  $W_A$ -t kell bekapcsolni) és így tovább.

Az adott tranzisztorok ki- és bekapcsolását a forgórész helyzetadóról kapott jelekkel vezéreljük. Az egyes tartományokban (hat 60°-os rész) vezető tranzisztorokat jelöli az 5.95d ábra. Az 5.95e ábrán megrajoltuk a motortekercsekre kapcsolt feszültségek burkológörbéjét, jelölve, hogy melyik két fázistekercs bekapcsolásából származik. Az ábra alapján látható, hogy a motorra kapcsolt feszültség állandó és értelemszerűen a hidat tápláló egyenfeszültséggel egyezik meg. Az 5.95d ábra alapján az is látható, hogy az egyenáramú körből a motorba befolyó  $I_e$  egyenáram, és így végül a motorba jutó belső teljesítmény is állandó. Ideális gépet feltételezve egy adott fordulatszámra a belső teljesítmény állandósága az egyes szakaszokban azonos értékű nyomatékokat jelent.

Valójában az armatúrakör induktivitásai miatt a kommutációk nem zajlanak pillanatszerűen. Csak az  $U$ -fázisra egy a valóságoshoz közelebb álló áramképet rajzoltunk fel az 5.95f ábrán. Az áram időfüggvényét a tekercsek villamos időállandói, valamint a félvezetők nem pillanatszerű kommutációjából adódó fedések befolyásolják.



5.96. ábra A hagyományos és az elektronikus kommutációjú egyenáramú motorok terhelhetőségi határainak összehasonlítása

Az elektronikus kommutációjú motorok fordulatszámát – ugyanúgy mint az egyenáramú gépeket – a kapocsfeszültség változtatásával befolyásolhatjuk. Ez a motortekercsekkel sorbakapcsolt tranzisztorok vezetési szakaszon belüli ki- és bekapcsolásával (Impulzus-SZélesség Modulációval) történik. Mivel egy vezetési szakaszban mindig egy felső- és egy alsó tranzisztor van sorbakapcsolva, a kapcsolási veszteségek csökkentésére elegendő vagy csak a felső-, vagy csak az alsó tranzisztorokat ISZM üzemmódban kapcsolgatni.

Az 5.96. ábrán összehasonlítottuk a hagyományos egyenáramú gépek és a kefenélküli gépek terhelhetőségi határait

(lásd ezzel kapcsolatban az 5.12.3. pontban tett megjegyzéseket). A kommutátor és a kefék hiánya miatt jóval nagyobb a megengedhető maximális fordulatszám. Lényeges különbség az is, hogy a többi részen a terhelhetőséget elsősorban nem a kommutáció és a szeletfeszültség, hanem a teljesítményelektronika feszültség- és áramkorláta határozzák meg.

### 5.15.5. Soros kommutátoros (univerzális) motorok

Az univerzális motorok kisteljesítményű (teljesítménytartományuk 1...800 W), egyen- és váltakozó feszültségről egyaránt működtethető, felépítésüket tekintve teljesen lemezelte mágneses körű, segédpólus nélküli soros egyenáramú gépek.

Váltakozóáramról azért működtethetők, mert az egyenáramú gép

$$m(t) = c \cdot \Phi(t) \cdot i_a(t)$$

nyomatéki összefüggése szerint ha az áram és a fluxus együtt vált előjelet, akkor a nyomaték a váltakozóáram mindkét félperiódusában azonos irányú.

$i_a(t) = \sqrt{2} \cdot I_a \cdot \sin \omega t$  szinuszos armatúraáramot ( $I_a$  az effektív érték)

feltételezve az 5.97. ábrában felrajzoltuk a fluxus és a nyomaték időfüggvényét. A szintén szinuszosan változó,  $\Phi_m$  maximális értékű fluxus a pólusokban fellépő vasvesztés miatt  $\varepsilon$  szöggel késik az áramhoz képest:  $\Phi(t) = \Phi_m \cdot \sin(\omega t - \varepsilon)$ .

Ezekkel a nyomaték időfüggvénye:

$$m(t) = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \cdot \frac{z \cdot p}{a} \cdot I_a \cdot \Phi_m \cdot \{\sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varepsilon)\}.$$

Alkalmazva az addíciós tételeket a nyomatékra végül

$$m(t) = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{z \cdot p}{a} \cdot I_a \cdot \Phi_m \cdot \{\cos \varepsilon - \cos(2\omega t - \varepsilon)\} \quad (5.112)$$

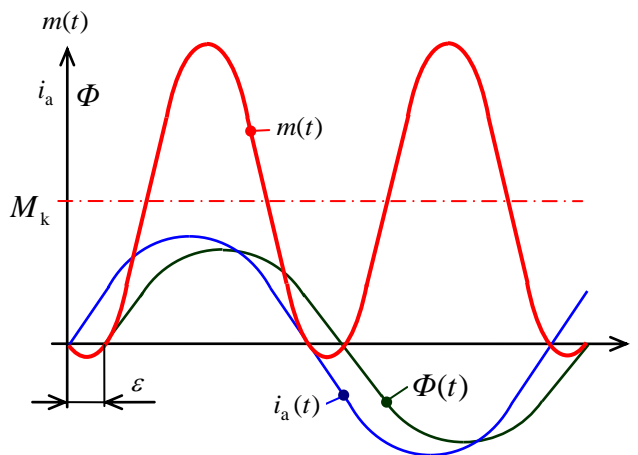
összefüggést kapjuk.

Az (5.112) szerint a nyomaték-időfüggvény az

$$M_k = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{z \cdot p}{a} \cdot I_a \cdot \Phi_m \cdot \cos \varepsilon$$

középérték körül kétszeres körfrekvenciával leng (lásd az 5.97. ábrát), az egyenáramú tápláláshoz képest azonos  $B_{\delta m}$  maximális légrésindukciót feltételezve a nyomaték  $\cos \varepsilon / \sqrt{2}$ -ed részére csökkent.

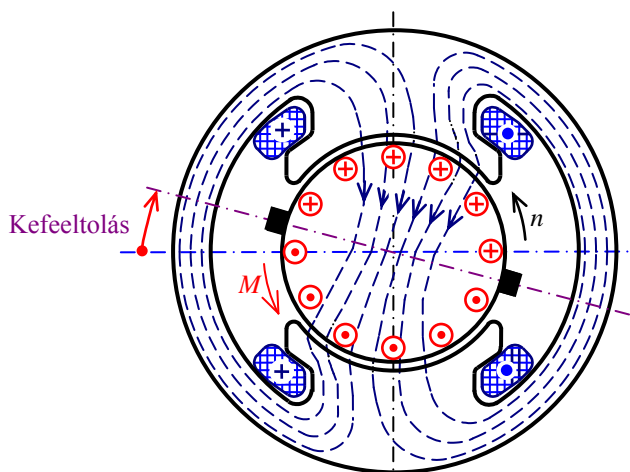
A nyomatékot csökkentő, a kommutációt rontó  $\varepsilon$  szögeltérés, valamint a vasvesztés csökkentésére az univerzális motor állórészét is lemezelní kell. A lemeztest egy szokásos alakját az 5.98. ábrán rajzoltuk fel. Az ábrába egy adott időpillanatban berajzoltuk az áram és erővonalirányokat. Az univerzális motorok gyakorlatilag csak kétpólusú kivitelben



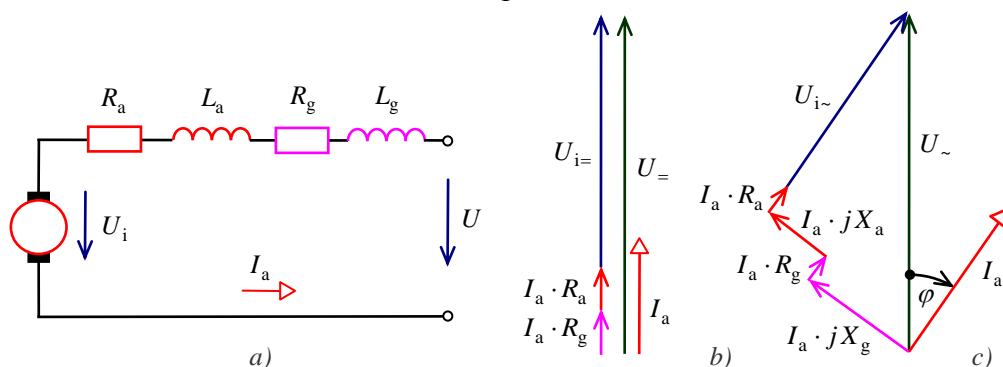
5.97. ábra A soros kommutátoros motor nyomaték-idő függvénye váltakozóáramú tápláláskor

készülnek, mert így a nagyobb fordulatszámok miatt jobb a leadott teljesítmény/súly viszony (lásd az 5.101 összefüggést).

Váltakozóáramú táplálás esetén a kommutáló menetbe az armatúreakció, a kommutációs áramváltozás és a szinuszosan változó fluxus transzformátorosan indukál feszültséget és okoz ezzel rossz kommutációt. Mivel nincs segédpólus, a kommutációt csak a motoros forgásiránnyal szembeni kefeeltolással, ill. nagy ellenállású kefék alkalmazásával javíthatjuk. A univerzális motor kommutációja általában rosszabb, mint egy nagy egyenáramú gépé, ezért a keletkező nagyfrekvenciás villamos zajok szűrésére zavarcsűrő kondenzátorokat szoktak a géppel párhuzamosan kapcsolni (5.102. ábra). A gép induktivitásai a zavarcsűrő kör részeit képezik.



5.98. ábra Az univerzális motor egy szokásos felépítése



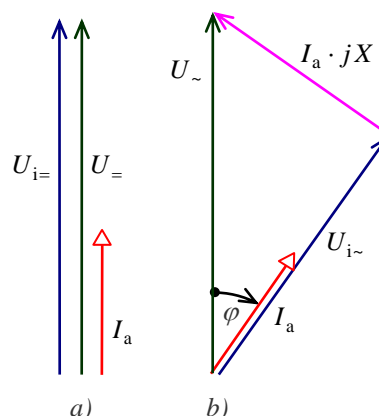
5.99. ábra A soros kommutátoros motor helyettesítő kapcsolási vázlata és vektorábrái

a) helyettesítő vázlat; b) egyenáramú táplálás; c) váltakozó áramú táplálás

A továbbiakban a viszonyok egyszerűsítése érdekében az armatúraáram és a fluxus között fellépő, korábban tárgyalt  $\varepsilon$  szöget elhanyagoljuk. A motor helyettesítő kapcsolási vázlata az 5.99a ábrán, az egyen- ill. váltakozófeszültségről táplált esetre felrajzolható vektorábrák az 5.99b és az 5.99c ábrákon láthatók. Különválasztva ábrázoltuk az armatúra- és a gerjesztőtekercs feszültségeit. Mivel ebben az egyszerűsített esetben az armatúrában indukálódó feszültség:

$$u_i(t) = k_U \cdot \Phi(t) \cdot n = k_U \cdot C \cdot i_a(t) \cdot n,$$

az armatúraáram időfüggvénye és az indukált feszültség időfüggvénye fázisban van egymással és arányos a fordulatszámmal. Már ebből a vektorábrából is jól látható, hogy azonos kapcsolási-



5.100. ábra A soros kommutátoros motor egyszerűsített vektorábrái

a) egyenáramú táplálás; b) váltakozóáramú táplálás

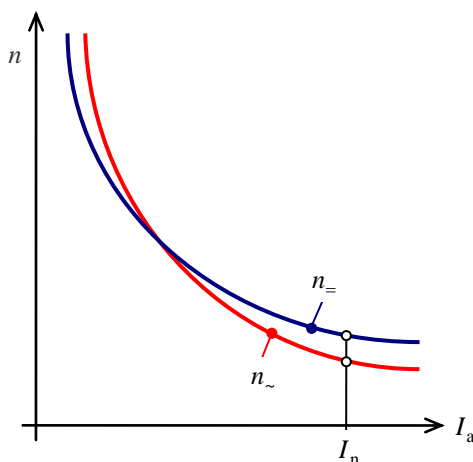
séget és terhelőáramot feltételezve az armatúrakör induktivitásain eső feszültségesések miatt:

$$U_{i-} \geq U_{i=}.$$

Az 5.100. ábrán a  $U_{i-}$  és az  $U_{i=}$  közötti összefüggés közelítő meghatározására a vektorábrákat tovább egyszerűsítettük:  $R_a$ -t és  $R_g$ -t elhanyagolva az  $X_a$  és  $X_g$  reaktanciák összevonhatók:  $X = X_a + X_g$ . Azonos egyen- és váltakozó- kapocsfeszültség esetén közelítőleg írható:

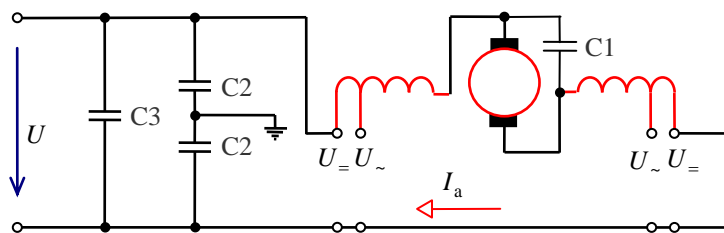
$$U_{i-} = U_{i=} \cdot \cos \varphi, \quad \text{amiből} \quad n_{-} = n_{=} \cdot \cos \varphi. \quad (5.113)$$

(5.113) azt mondja ki, hogy azonos terhelőáram esetén az armatúraköri induktivitásokon okozta feszültségesések miatt a váltakozóáramú jelleggörbe az egyenáramú alatt jár (5.101 ábra). A gép jelleggörbéje a gerjesztőtekercs kapcsolásából adódóan tipikus soros jellegű karakterisztika. Kisebb armatúraáramoknál nem a feszültségesések, hanem a váltakozóáramú táplálás miatt a vastestben fellépő örvényáramok fluxuscsökkentő hatása módosítja a jelleggörbét. Így kis terheléseknél a váltakozóáramú karakterisztika az egyenáramú felett jár. A gép maximális fordulatszáma  $(10...30) \cdot 10^3$  1/min, ügyelni kell a terhelésmegszüntetés hatásaira (pl. porszívóknál a ventilátorlapátok eltávolításakor). A motor forgásiránya a gerjesztőtekercs és az armatúratekercs egymáshoz képesti felcserélésével oldható meg, fordulatszámát triac-os szaggató kapcsolással (a motorra jutó feszültség módosításával) szokták változtatni.



5.101. ábra Az univerzális motor terhelési jelleggörbéi

Sok esetben igény, hogy a névleges pont környékén a gép egyen- ill. váltakozó feszültségről táplálva azonos fordulatszámmal járjon. Ez a követelmény a gerjesztőtekercsek megcsapolásával elégíthető ki (5.102. ábra). Az ábrába berajzoltuk a



5.102. ábra Az univerzális motor és zavarcsűrőjének kapcsolási rajza

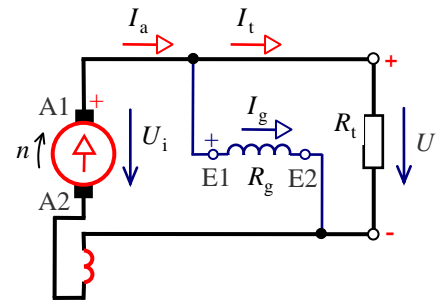
korábban említett zavarcsűrés megoldását is ( $C1 \approx 100$  nF,  $C2 = 5...10$  pF,  $C3 \approx 100$  nF).

A soros kommutátoros motorok nagy tömegben gyártott, tipikus „háztartási” célgépek. Alkalmazási területeik: a háztartásban porszívók, kávéőrlők, szeletelők, (haj)szárítók stb.; a különböző kéziszerszámok: fűrő-, nyíró, vágógépek; orvosi készülékek; irodagépek.

## 5.16. EGYENÁRAMÚ GÉP SZÁMPÉLDÁK

**5.16.1. számpélda.** Egy  $U = 220$  V kapocsfeszültségű, névleges terhelési pontban üzemelő,  $P_n = 120$  kW-os névleges teljesítményű egyenáramú söntgenerátort  $n = 1440$  1/min fordulatszámmal forgatunk (5.103 ábra). Ha a gépet egy – az előzővel azonos kapocsfeszültségű – hálózatról motorként járattuk, akkor a hálózatról egy adott terhelésnél  $P_1 = 60$  kW teljesítményt vesz fel.

Mennyi ekkor a motor  $n$  fordulatszáma? A gép belső ellenállása  $R_b = 0,011$   $\Omega$ ; a gerjesztőtekercs ellenállása pedig  $R_g = 38$   $\Omega$ . A kefék átmeneti feszültségese  $\Delta U_k = 2$  V; az armatúreakció hatását hanyagoljuk el!



5.103. ábra Sönt generátor áramai

### Megoldás

Generátoros állapotban a gép armatúraárama (a gerjesztőáramot a generátor szolgáltatja):

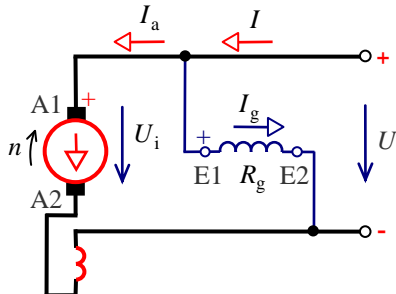
$$I_a = I_t + I_g = \frac{P_n}{U} + \frac{U}{R_g} = \frac{120 \cdot 10^3}{220} + \frac{220}{38} = 551 \text{ A}.$$

Így az indukált feszültség:

$$U_i = U + I_a \cdot R_b + \Delta U_k = 220 + 551 \cdot 0,011 + 2 = 228 \text{ V},$$

amiből az adott fluxusnál a tekercselésre jellemző gépállandó:

$$k_U \cdot \Phi = \frac{U_i}{n_{\text{gen}}} = \frac{228 \cdot 60}{1440} = 9,5 \text{ Vs}.$$



5.104. ábra Sönt motor áramai

Motoros állapotban (5.104. ábra) a gép armatúraárama (a kapocsfeszültség állandósága miatt változatlan értékű gerjesztőáramot a motor most a hálózatról vesz fel):

$$I_a = I - I_g = \frac{P_1}{U} - \frac{U}{R_g} = \frac{60 \cdot 10^3}{220} - \frac{220}{38} = 267 \text{ A}.$$

Motoros állapotban az indukált feszültség:

$$U_i = U - I_a \cdot R_b - \Delta U_k = 220 - 267 \cdot 0,011 - 2 = 215 \text{ V}.$$

Mivel a két állapotban a gerjesztőáram azonos, a gép fluxusa változatlan. Ezt felhasználva a motor fordulatszáma:

$$n_{\text{mot}} = \frac{U_i}{k_U \cdot \Phi} = \frac{215 \cdot 60}{9,5} = 1358 \text{ 1/min}.$$

**5.16.2. számpélda.** Egyjáratú, hullámos tekercselésű, generátorként üzemelő egyenáramú gép armatúrájának horonyszáma  $Z = 25$ ; a póluspárok száma  $p = 2$ ; a tekercsenkénti menetszám  $N_t = 4$ ; az egy horonyra és egy rétegre jutó tekercsoldalak száma  $u = 3$ . A gép fluxusa  $\Phi = 0,65 \cdot 10^{-2}$  Wb; az armatúraáram  $I_a = 27$  A; a fordulatszám  $n = 1500$  1/min. Határozzuk meg a gép belső teljesítményét!

#### Megoldás

A generátorként üzemelő gép belső teljesítménye:  $P_b = U_i \cdot I_a$ , amelyben az indukált feszültség:  $U_i = k_U \cdot \Phi \cdot n = \frac{z \cdot p}{a} \cdot \Phi \cdot n$ .

Határozzuk meg először az armatúra hatásos vezetőinek számát!

$$z = 2 \cdot u \cdot N_t \cdot Z = 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 25 = 600 \text{ vezető.}$$

A gép tekercselésére jellemző feszültség-állandó:

$$k_U = \frac{z \cdot p}{a} = \frac{600 \cdot 2}{1} = 1200,$$

mivel egyjáratú hullámos tekercselésnél  $a = 1$ . A számított adatokkal az indukált feszültség:

$$U_i = k_U \cdot \Phi \cdot n = 1200 \cdot 0,0065 \cdot \frac{1500}{60} = 195 \text{ V.}$$

Definíciója szerint a belső teljesítmény:

$$P_b = U_i \cdot I_a = 195 \cdot 27 = 5265 \text{ W.}$$

**5.16.3. számpélda.** Hány százalékkal kell csökkenteni egy  $U = 110$  V kapocsfeszültségű, külsőgerjesztésű generátor fluxusát, ha terhelése 3,0 kW-ról 1,5 kW-ra csökkent, hogy kapocsfeszültsége állandó értékű maradjon? A kefeátmeneti feszültségesés  $\Delta U_k = 2$  V; az armatúrareakció hatását és a főáramkör veszteségein kívül minden más veszteséget hanyagoljunk el. A generátor belső ellenállása  $R_b = 0,5 \Omega$ .

#### Megoldás

A két terhelési állapotban a feszültségegyenlet:

$$U = U_{i1} - I_{a1} \cdot R_b - \Delta U_k \quad \text{és} \quad U = U_{i2} - I_{a2} \cdot R_b - \Delta U_k, \quad \text{melyekben}$$

$$U_{i1} = \frac{z \cdot p}{a} \cdot \Phi_1 \cdot n = k_U \cdot \Phi_1 \cdot n = k \cdot \Phi_1, \quad \text{ill. hasonlóan} \quad U_{i2} = k \cdot \Phi_2.$$

Az armatúraáramok:

$$I_{a1} = \frac{P_1}{U} = \frac{3000}{110} = 27,3 \text{ A}; \quad \text{és} \quad I_{a2} = \frac{P_2}{U} = \frac{1500}{110} = 13,65 \text{ A.}$$



Az indukált feszültségek arányára írhatjuk:

$$\frac{U_{i2}}{U_{i1}} = \frac{k \cdot \Phi_2}{k \cdot \Phi_1} = \frac{U + I_{a2} \cdot R_b + \Delta U_k}{U + I_{a1} \cdot R_b + \Delta U_k}.$$

A relatív fluxusváltozás:

$$\frac{\Delta \Phi}{\Phi_1} = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Phi_1} = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} - 1 = \frac{U + I_{a2} \cdot R_b + \Delta U_k}{U + I_{a1} \cdot R_b + \Delta U_k} - 1 = \frac{110 + 13,65 \cdot 0,5 + 2}{110 + 27,3 \cdot 0,5 + 2} - 1 = -0,055,$$

vagyis a szükséges fluxuscsökkentés 5,5 %-os.

**5.16.4. számpélda.** Egyenáramú, külsőgerjesztésű gép fluxusa  $\Phi = 3,1 \cdot 10^{-2}$  Wb. A forgórészen elhelyezett armatúratekerceselés hurkos elkötésű, lépésrövidített. Az egyjáratú tekercselés további adatai: a kommutátorszemek száma  $K = 102$ ; egy réteg tekercsoldalainak száma  $u = 3$ ; a tekercs menetszáma  $N_t = 1$  (rúdtekercselés, de a könnyebb gyártás érdekében  $c = 2$  párhuzamos szálla bontott).

Az  $U = 160$  V kapcsolófeszültségű hálózatra kapcsolt,  $P_n = 120$  kW névleges teljesítményű, négyfázisú ( $2p = 4$ ) motor a névleges terhelési pontban  $n = 1440$  1/min. fordulatszámmal jár, hatásfoka  $\eta = 90$  %.

*Feladatok:*

- Határozzuk meg a motor  $I_{an}$  névleges armatúraáramát;
- Határozzuk meg az  $I_{\Delta g}$  ágáramokat;
- Határozzuk meg a szükséges vezetőkeresztmetszetet, ha az áramsűrűség  $s = 6$  A/mm<sup>2</sup>;
- Adjuk meg a tekercselés műhelyvázlatát, a horonyszámot, és a tekercselési jellemzőket ( $y_1, y_2, y_k, \varepsilon, y_h$ );
- Számítsuk ki az  $U_i$  indukált feszültséget;
- A gép armatúraátmérője  $D_a = 390$  mm, az ideális vastest hossza  $l_i = 195$  mm. Határozzuk meg a  $B_{\delta k}$  közepes, és a  $B_{\delta m}$  maximális légrésindukció értékét, ha  $\alpha_i = 0,65$ .

*Megoldás*

a) A gép leadott teljesítménye:  $P_2 = P_n = 120$  kW. A felvett teljesítmény:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{120}{0,9} = 133,3 \text{ kW}.$$

Mivel a motor külsőgerjesztésű, az armatúraáram:

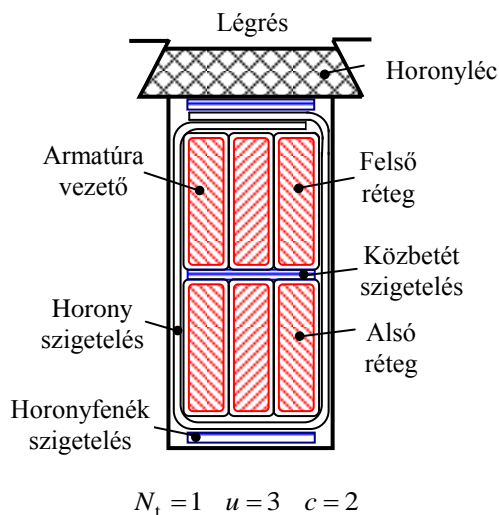
$$I_{an} = \frac{P_1}{U_n} = \frac{133,3 \cdot 10^3}{160} = 833 \text{ A}$$

b) A tekercselés egyjáratú, hurkos, ezért az ágpárok száma:  $a = p = 2$ . Így az ágáramok:

$$I_{\text{ág}} = \frac{I_{\text{an}}}{2a} = \frac{833}{2 \cdot 2} = 208 \text{ A}.$$

c) A szükséges vezetőkeresztmetszet:

$$A_{\text{CU}} = \frac{I_{\text{ág}}}{c \cdot s} = \frac{208}{2 \cdot 6} = 17,3 \text{ mm}^2.$$



5.105. ábra. Az armatúrahorony metszete

A szabványos vezető-keresztmetszeteket figyelembe véve válasszuk a négyszög keresztmetsetű, 3,2x5,5 mm-es huzalt ( $A_{\text{CU}} = 17,6 \text{ mm}^2$ ).

A kiinduló tekercselési adatok:

$$a=p=2; K=102; u=3; N_t=1; c=2.$$

A horonyszám:

$$Z = \frac{K}{u} = \frac{102}{3} = 34.$$

A hurkos tekercselés szimmetria-feltétele, hogy

$\frac{Z}{p}$  és  $\frac{K}{p}$  értéke egész szám legyen. Esetünkben:

$$\frac{Z}{p} = \frac{34}{2} = 17; \text{ és } \frac{K}{p} = \frac{102}{2} = 61,$$

vagyis a feltételek teljesülnek. Az armatúra hatásos vezetőszáma:

$$z = 2 \cdot u \cdot N_t \cdot Z = 2 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 34 = 204.$$

A horonymetszetet az 5.105. ábra mutatja. A horonylépés:

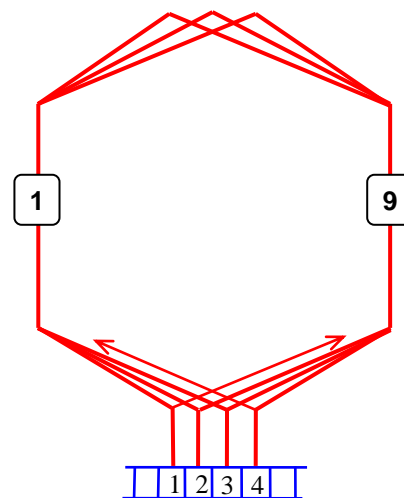
$$y_h = \frac{Z}{2p} - \varepsilon_h = \frac{34}{4} - \frac{1}{2} = 8,$$

tehát  $\varepsilon_h = \frac{1}{2}$  (lépésrövidítés).

A tekercsvégek elkötéséhez szükséges lépések:

$$y_1 = u \cdot y_h = 3 \cdot 8 = 24; y = 1; \text{ és } y_2 = y_1 - y = 24 - 1 = 23;$$

vagyis a tekercselés keresztzetlen. A számított adatok alapján megrajzolt tekercselési műhelyvázlat az 5.106. ábrán látható.



5.106. ábra. Az armatúra tekercselés műhelyvázlata

e) A gép indukált feszültsége:

$$U_1 = \frac{z \cdot p}{a} \cdot \Phi \cdot n = \frac{204 \cdot 2}{2} \cdot 3,1 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1440}{60} = 152 \text{ V} < 160 \text{ V}$$

f) A pólusosztás:

$$\tau_p = \frac{D_a \cdot \pi}{2p} = \frac{0,39 \cdot 3,14}{2 \cdot 2} = 0,3065 \text{ m}.$$

Az ideális pólusív:

$$b_i = \alpha_i \cdot \tau_p = 0,65 \cdot 0,3065 = 0,1992 \text{ m}.$$

A maximális légrésindukció:

$$B_{\delta m} = \frac{\Phi}{b_i \cdot l_i} = \frac{3,1 \cdot 10^{-2}}{0,1992 \cdot 0,195} = 0,798 \text{ T};$$

míg a közepes:

$$B_{\delta k} = \frac{b_i}{\tau_p} \cdot B_{\delta m} = \alpha_i \cdot B_{\delta m} = 0,65 \cdot 0,798 = 0,518 \text{ T}.$$

**5.16.5. számpélda.** Egyenáramú soros motor belső ellenállása  $R_b = 0,7 \Omega$ ; ebből a soros gerjesztőtekercs ellenállása  $R_{gs} = 0,2 \Omega$ . A motor  $n_1 = 750$  1/min. fordulatszámmal jár, amikor  $I_{a1} = 30$  A áramot vesz fel az  $U = 440$  V kapcsolófeszültségű hálózatról.

*Feladatok:*

- Határozzuk meg ebben a munkapontban a motor  $M_1$  nyomatékát;
- Határozzuk meg az  $M_2$  nyomatékot és a motor  $n_2$  fordulatszámát, ha a gerjesztőtekercset söntöljük egy  $R_s = 0,4 \Omega$ -os ellenállással és a motor  $I_{a2} = 45$  A áramot vesz fel a hálózatról.

A megoldásnál a villamos  $\Rightarrow$  mechanikai energiaátalakítást tekintjük ideálisnak és a kefe-feszültségesést valamint az armatúrareakciót hanyagoljuk el, és.

*Megoldás*

Ideális villamos  $\Rightarrow$  mechanikai energiaátalakítást feltételezve a belső teljesítmény teljes mértékben átalakul mechanikai teljesítménnyé, ezért írható:

$$M_1 \cdot \omega_1 = U_{i1} \cdot I_{a1}.$$

Az első esetben a motor indukált feszültsége:

$$U_{i1} = U - R_b \cdot I_{a1} = 440 - 0,7 \cdot 30 = 419 \text{ V}.$$

A motor által kifejtett nyomaték:

$$M_1 = \frac{U_{i1} \cdot I_{a1}}{\omega_1} = \frac{U_{i1} \cdot I_{a1}}{2\pi \cdot n_1} = \frac{419 \cdot 30 \cdot 60}{2 \cdot 3,14 \cdot 750} = 160 \text{ Nm}.$$

A második esetben a söntölt gerjesztőkör ellenállás:

$$R_{g2} = \frac{R_{gs} \cdot R_s}{R_{gs} + R_s} = \frac{0,2 \cdot 0,4}{0,2 + 0,4} = 0,133 \Omega.$$

Az új indukált feszültség:

$$U_{i2} = U - (R_b + R_{gs} + R_{g2}) \cdot I_{a2} = 440 - (0,5 + 0,133) \cdot 45 = 411,5 \text{ V}$$

A söntölés miatt a második esetben a gerjesztőkör árama:

$$I_{g2} = \frac{R_s}{R_s + R_{gs}} \cdot I_{a2} = \frac{0,4}{0,4 + 0,2} \cdot 45 = 30 \text{ A},$$

vagyis ugyanaz, mint az első esetben. Mivel az armatúrareakció fluxuscsökkentő hatását elhanyagoljuk, a két esetben a gép fluxusa megegyezik:  $\Phi_1 = \Phi_2$ . Az indukált feszültség arányos a fordulatszámmal, ezért a második esetben a fordulatszám:

$$n_2 = \frac{U_{i2}}{U_{i1}} \cdot n_1 = \frac{411,5}{419} \cdot 750 = 736,6 \text{ 1/min}.$$

Végül a második munkapontban a nyomaték:

$$M_2 = \frac{U_{i2} \cdot I_{a2}}{\omega_2} = \frac{U_{i2} \cdot I_{a2}}{2\pi \cdot n_2} = \frac{411,5 \cdot 45 \cdot 60}{2 \cdot 3,14 \cdot 736,6} = 240 \text{ Nm}.$$

**5.16.6. számpélda.** Egyenáramú sönt motor  $U = 415 \text{ V}$  kapocsfeszültségű hálózatra csatlakozik. A motor belső ellenállása  $R_b = 0,25 \Omega$ ; a gerjesztőtekercs ellenállása  $R_g = 200 \Omega$ . Terhelés nélkül a motor  $n_0 = 750 \text{ 1/min}$ . fordulatszámmal jár, és  $I_{a0} = 4 \text{ A}$  áramot vesz fel a hálózatról. Egy  $R_{gsz} = 50 \Omega$ -os ellenállást sorbakapcsolva a gerjesztőtekercsrel a gép fluxusa 10 %-al csökken, miközben a terhelőáramot  $I_{a1} = 50 \text{ A}$ -ra növeljük.

*Feladatok:*

Határozzuk meg a fluxuscsökkentett, terhelt esetben a motor:

- $P_{\text{teng}}$  tengelyteljesítményét;
- $\eta$  hatásfokát;
- $n$  fordulatszámát.

A megoldásnál a kefe-feszültségesést vegyük  $\Delta U_k = 2 \text{ V}$ -nak; a vas-, és a súrlódási veszteségek változását, valamint az armatúrareakciót hanyagoljuk el.

*Megoldás*

A vas-, súrlódási- és ventilációs veszteségek üresjárásban:

$$\Sigma V_0 = U_{i0} \cdot I_{a0} = (U - I_{a0} \cdot R_b - \Delta U_k) \cdot I_{a0} = (415 - 4 \cdot 0,25 - 2) \cdot 4 = 1648 \text{ W}.$$

A terhelt esetben a felvett teljesítményből levonva a főáramkörü veszteségeket:

$$P_b = U_i \cdot I_a = (U - I_a \cdot R_b - \Delta U_k) \cdot I_a = (415 - 50 \cdot 0,25 - 2) \cdot 50 = 20025 \text{ W}.$$

A terhelt esetre áttéréskor elhanyagolva az üresjárási veszteségek változását a tengelyteljesítmény:

$$P_{\text{teng}} = P_b - \Sigma V_0 = 20025 - 1648 = 18377 \text{ W}.$$

A gép hatásfoka:

$$\eta = \frac{P_t}{P_{\text{fel}}} = \frac{P_t}{(I_{a1} + I_g) \cdot U} = \frac{18377}{\left(50 + \frac{415}{250}\right) \cdot 415} = 0,857; \quad \text{vagyis } 85,7\%.$$

Mivel  $U_i = k_U \cdot \Phi \cdot n$ , az indukált feszültségek arányára írható:

$$\frac{U_{i0}}{U_i} = \frac{\Phi_0 \cdot n_0}{\Phi \cdot n} = \frac{\Phi_0 \cdot n_0}{(0,9 \cdot \Phi_0) \cdot n} = \frac{n_0}{0,9 \cdot n}.$$

Ebből terhelte esetben a keresett fordulatszám

$$n = \frac{U_i}{U_{i0}} \cdot \frac{n_0}{0,9} = \frac{U - I_a \cdot R_b - \Delta U_k}{U - I_{a0} \cdot R_b - \Delta U_k} \cdot \frac{n_0}{0,9} = \frac{415 - 50 \cdot 0,25 - 2}{415 - 4 \cdot 0,25 - 2} \cdot \frac{750}{0,9} = 810 \text{ 1/min.}$$

**5.16.7. számpélda.** Egy egyenáramú,  $R_b = 0,8 \, \Omega$  belső ellenállású mellékáramkörű motor által hajtott munkagép állandó értékű terhelőnyomatékot igényel a motortól, amely egy  $U = 400 \text{ V}$  kapocsfeszültségű hálózatra csatlakozik. Amikor a fordulatszám  $n_1 = 600 \text{ 1/min.}$ , a gép armatúraárama  $I_{a1} = 15 \text{ A}$ . Mekkora  $R_e$  előtétellenállást kell sorbakapcsolni az armatúrával hogy a fordulatszám 10 %-al csökkenjen? Mekkora lesz az  $n_3$  fordulatszám, ha ezután a gerjesztőkör ellenállásának megnövelésével a gép fluxusát is 10 %-al csökkentjük?

A megoldásnál az armatúra-reakció fluxuscsökkentő hatását hagyjuk figyelmen kívül, a kefe-feszültségesést vegyük  $\Delta U_k = 2 \text{ V}$ -nak és a villamos  $\Rightarrow$  mechanikai energiaátalakítást tekintjük ideálisnak.

#### Megoldás

Az indukált feszültség az első esetben:

$$U_{i1} = U - I_{a1} \cdot R_b - \Delta U_k = 400 - 15 \cdot 0,8 - 2 = 386 \text{ V.}$$

A három esetben a terhelő(motor) nyomaték azonos, ideális gépet feltételezve írható:

$$M = M_1 = M_2 = M_3 = \frac{U_{i1} \cdot I_{a1}}{\omega_1} = \frac{U_{i1} \cdot I_{a1}}{2\pi \cdot n_1} = \frac{386 \cdot 15 \cdot 60}{2 \cdot 3,14 \cdot 600} = 92,15 \text{ Nm.}$$

Az előtétellenállás beiktatásakor a fordulatszám 10 %-al csökken – a nyomaték, a gép armatúraárama és fluxusa is változatlan – így az indukált feszültség:

$$U_{i2} = \frac{n_2}{n_1} \cdot U_{i1} = \frac{0,9 \cdot n_1}{n_1} \cdot U_{i1} = 0,9 \cdot 386 = 347,4 \text{ V.}$$

A sorbakötendő előtétellenállás értéke:

$$R_e = \frac{U - \Delta U_k - U_{i2}}{I_{a2}} - R_b = \frac{400 - 2 - 347,4}{15} - 0,8 = 2,573 \, \Omega.$$

Az állandó értékű terhelőnyomaték-igény miatt a fluxus 10 %-os csökkentésekor az armatúraáramot 10 %-al növelni kell:  $I_{a3}=1,1 \cdot I_{a1}=1,1 \cdot 15=16,5 \text{ A}$ . A fluxuscsökkentés és armatúraáram növelése után az indukált feszültség:

$$U_{i3}=U-(R_b+R_e) \cdot I_{a3}-\Delta U_k=400-(0,8+2,573) \cdot 16,5-2=342,3 \text{ V}.$$

Ezzel az új fordulatszám:

$$n_3=\frac{U_{i3} \cdot I_{a3}}{2\pi \cdot M_3}=\frac{341,8 \cdot 16,67}{2 \cdot 3,14 \cdot 92,15} \cdot 60=586 \text{ 1/min}.$$

**5.16.8. számpélda.** Egy egyenáramú  $P_n = 22 \text{ kW}$  névleges teljesítményű,  $2p = 4$  pólusú, kompenzált külsőgerjesztésű motor kapocsfeszültsége  $U = 220 \text{ V}$ ; névleges fordulatszáma  $n = 1500 \text{ 1/min}$ ; hatásfoka  $\eta = 86,5 \%$ . Az armatúrán  $z = 248$  hatásos vezető van elhelyezve, a tekercselés egyjártú, hullámos, a gép belső ellenállása  $R_b = 0,1 \Omega$ . A gerjesztőfeszültség  $U_g = 220 \text{ V}$ ; a gerjesztőtekercs ellenállása  $R_g = 82,5 \Omega$ . A kefeátmeneti feszültségesést, a súrlódási és a ventilációs veszteségeket és az armatúra-visszahatást hanyagoljuk el.

*Feladatok:*

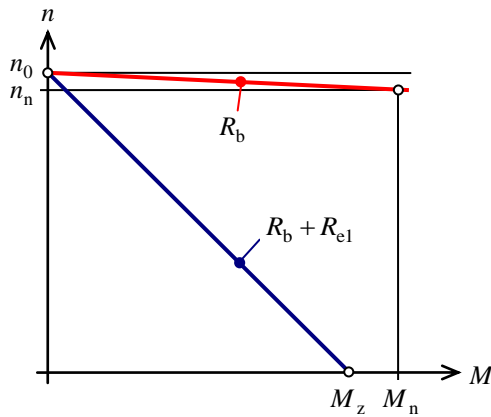
- Határozzuk meg a természetes (az armatúrakör ellenállása  $R_b$ ) és az  $R_{e1} = 2 \Omega$ -os előtétellenálláshoz tartozó  $M(n)$  jelleggörbét;
- Határozzuk meg, hogy névleges nyomaték esetén mekkora  $R_{e2}$  előtétellenállást kell az armatúrakörrel sorbakapcsolni, hogy  $n_1 = 900 \text{ 1/min}$ . fordulatszámot kapjunk;
- Mekkorára kell csökkenteni a kapocsfeszültséget, ha névleges nyomatéknál  $n_2 = 900 \text{ 1/min}$ . fordulatszámot kívánunk beállítani?
- Mennyivel kellene a gerjesztőkör ellenállását megnövelnünk, hogy a fordulatszám névleges nyomatéknál  $n_3 = 1600 \text{ 1/min}$ . legyen? A gép üresjárási jelleggörbáját az 5.111. ábrán adtuk meg.

*Megoldás*

- a) A kompenzált (állandó fluxusú gép) fordulatszáma  $\Delta U_k$ -t elhanyagolva az armatúra-áram függvényében:

$$n = \frac{U - I_a \cdot R_b}{k_U \cdot \Phi} = \frac{U}{k_U \cdot \Phi} - \frac{R_b}{k_U \cdot \Phi} \cdot I_a = n_0 - m \cdot I_a$$

Ez nem más, mint egy egyenes egyenlete, melynek meredeksége  $m$ , az ordinátatengelyt pedig az  $n_0$  üresjárási pontban metszi (5.107. ábra). A valóságban ez az eset nem állhat elő, mert a veszteségek miatt az armatúra áram nem lehet zérus. Az üresjárási- és a névleges munkapontra a feszültségegyenleteket felírva:



5.107. ábra A természetes és az  $R_{e1}$  előtétellenálláshoz tartozó jelleggörbék

$$U=U_0=k_U \cdot \Phi \cdot n_0 \text{ és } U_i=U-I_{an} \cdot R_b=k_U \cdot \Phi \cdot n_n.$$

A két egyenletből  $n_0$ -t kifejezve:

$$n_0 = \frac{U}{U - I_a \cdot R_b} \cdot n_n.$$

A gép névleges armatúraárama:

$$I_n = \frac{P_n}{U} = \frac{22 \cdot 10^3}{0,865 \cdot 220} = 115,6 \text{ A}.$$

Így az üresjárási fordulatszám:

$$n_0 = \frac{U}{U - I_a \cdot R_b} \cdot n_n = \frac{220}{220 - 115,6 \cdot 0,1} \cdot 1500 = 1583 \text{ 1/min}.$$

A névleges nyomaték:

$$M_n = 9549 \cdot \frac{P_n, \text{ kW}}{n_n, \text{ 1/min}} = 9549 \cdot \frac{22}{1500} = 140 \text{ Nm}.$$

A gép álló állapotában  $R_{e1}=2 \Omega$ -os előtétellenállás esetén az armatúrákör ellenállása:  $R_{a1}=R_b + R_{e1}=0,1+2,0=2,1 \Omega$ ; az armatúrákörben ekkor folyó „zárlati” áram:

$$I_{az} = \frac{U}{R_b + R_{e1}} = \frac{220}{0,1+2,0} = 104,8 \text{ A}.$$

A nyomaték a névleges és a zárlati pontban:

$$M_n = k_M \cdot \Phi \cdot I_{an} \text{ és } M_z = k_M \cdot \Phi \cdot I_{az}.$$

A két egyenletből:  $M_z = \frac{I_{az}}{I_{an}} \cdot M_n = \frac{104,8}{115,6} \cdot 140 = 127 \text{ Nm}.$

A kiszámított két pont alapján a jelleggörbe felrajzolható (5.107. ábra).

b) A terheléskor fellépő fordulatszámesés:

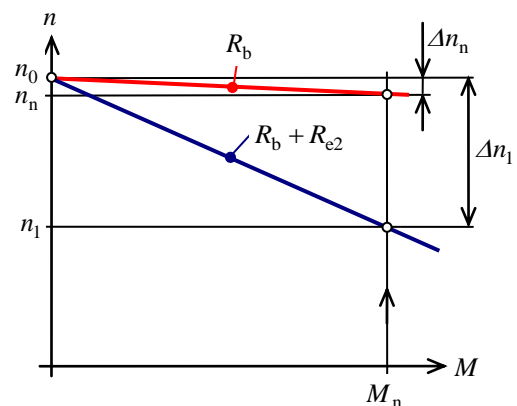
$$U=U_0=k_U \cdot \Phi \cdot n_0 \text{ és } U_i=U-I_{an} \cdot R_b=k_U \cdot \Phi \cdot n_n$$

A névleges nyomaték:  $M_n = k_M \cdot \Phi \cdot I_{an}$ , amiből kifejezve a névleges áramot:

$$I_{an} = \frac{M_n}{k_M \cdot \Phi}.$$

Ezt a feszültségegyenletbe helyettesítve a névleges pontban:

$$k_U \cdot \Phi \cdot n_n = U - \frac{R_b}{k_M \cdot \Phi} \cdot M_n$$



5.108. ábra A természetes és az  $R_{e2}$  előtétellenálláshoz tartozó jelleggörbék



Az üresjárási egyenletből kivonva:

$$\text{Ebből: } k_U \cdot \Phi \cdot (n_0 - n_n) = \frac{R_b}{k_M \cdot \Phi} \cdot M_n.$$

$$\Delta n_n = n_0 - n_n = \frac{R_b}{k_U \cdot k_M \cdot \Phi^2} \cdot M_n.$$

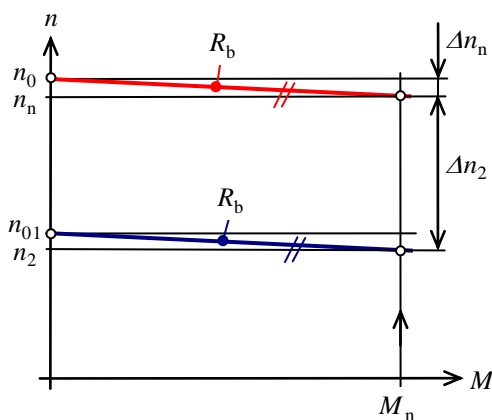
Az armatúrákörbe  $R_{e2}$  ellenállást kapcsolva:

$$\Delta n_1 = n_0 - n_1 = \frac{(R_b + R_{e2})}{k_U \cdot k_M \cdot \Phi^2} \cdot M_n.$$

Ebből a két utóbbi egyenletből  $R_{e2}$  értéke:

$$R_{e2} = R_b \cdot \left( \frac{\Delta n_1}{\Delta n_n} - 1 \right) = R_b \cdot \left( \frac{n_0 - n_1}{n_0 - n_n} - 1 \right) = 0,1 \cdot \left( \frac{1583 - 900}{1583 - 1500} - 1 \right) = 0,723 \, \Omega.$$

Az ellenállás-változtatás hatására a jelleggörbék meredeksége változik, az üresjárási pont változatlan marad (5.108. ábra).



5.109. ábra A feszültségváltozás hatása

c) Feszültségcsökkenés esetén a jelleggörbék párhuzamosan tolódnak el (5.109. ábra). A névleges pontban a fordulatszámok különbsége:

$$\Delta n_2 = n_n - n_2 = 1500 - 900 = 600 \, 1/\text{min}.$$

A párhuzamosságból következik, hogy az új üresjárási fordulatszám:

$$n_{01} = n_0 - \Delta n_2 = 1583 - 600 = 983 \, 1/\text{min}.$$

Ideális gép esetén az üresjárási fordulatszámokra írható:

$$U = k_U \cdot \Phi \cdot n_0, \quad \text{ill.} \quad U_1 = k_U \cdot \Phi \cdot n_{01}.$$

Ebből következik, hogy:

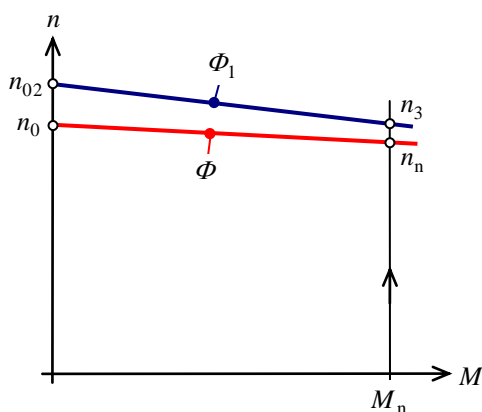
$$U_1 = U \cdot \frac{n_{01}}{n_0} = 220 \cdot \frac{983}{1583} = 136,6 \, \text{V}.$$

d) A motor fordulatszámát a nyomaték függvényében az

$$n = \frac{U}{k_U \cdot \Phi} - \frac{R_b}{k_U \cdot k_M \cdot \Phi^2} \cdot M$$

egyenletű egyenes írja le, vagyis a jelleggörbe a fluxus csökkenésével meredekebbé válik, az üresjárási fordulatszám növekszik (5.110. ábra). Az egyenletben szereplő állandók:

$$k_U = \frac{z \cdot p}{a} = \frac{248 \cdot 2}{1} = 496 \quad \text{és} \quad k_M = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{z \cdot p}{a} = \frac{k_U}{2\pi} = \frac{496}{2 \cdot 3,14} = 78,94.$$



5.110. ábra Fordulatszám változtatás  
mezőgyengítéssel

Az egyenletet a fluxusra rendezve másodfokú egyenletet kapunk:

$$\Phi_1^2 - \frac{U}{k_U \cdot n_3} \cdot \Phi_1 + \frac{M_n \cdot R_b}{k_U \cdot k_M \cdot n_3} = 0.$$

Az egyenletbe az adatokat beírva:

$$\Phi_1^2 - \frac{220 \cdot 60}{496 \cdot 1600} \cdot \Phi_1 + \frac{1400 \cdot 0,1 \cdot 60}{496 \cdot 78,94 \cdot 1600} = 0$$

A megoldóképletbe helyettesítve  $\Phi_1$ -re a következő két értéket kapjuk:

$$\Phi_{1,1} = 1,578 \cdot 10^{-2} \text{ Wb} \quad \text{és} \quad \Phi_{1,2} = 0,082 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}.$$

A két érték közül a  $\Phi_1 = 1,578 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$  a helyes érték, ugyanis a második fluxusérték kicsi egy 22 kW-os gépnél. A gép eredeti fluxusa:

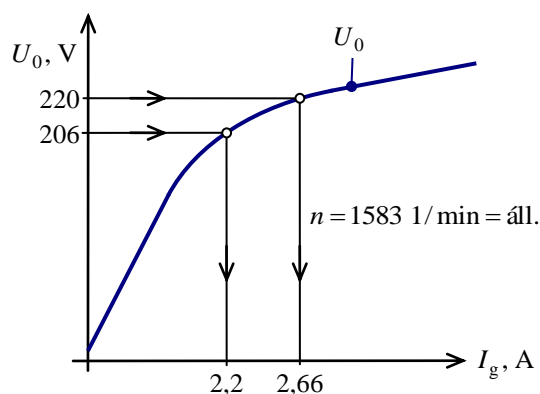
$$\Phi = \frac{U}{k_U \cdot n_0} = \frac{220 \cdot 60}{496 \cdot 1583} = 1,681 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}.$$

Az új üresjárási fordulatszám:

$$n_{02} = \frac{U}{k_U \cdot \Phi_1} = \frac{220 \cdot 60}{496 \cdot 1,578 \cdot 10^{-2}} = 1686 \text{ 1/min}.$$

A  $\Phi_1$  fluxushoz tartozó indukált feszültség az üresjárási jelleggörbén (5.111. ábra):

$$\begin{aligned} U_{01} &= k_U \cdot \Phi_1 \cdot n_0 = \\ &= 496 \cdot 1,578 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1583}{60} = 206,5 \text{ V}. \end{aligned}$$



5.111. ábra A motor üresjárási jelleggörbéje

Az üresjárási jelleggörbében ehhez  $I_{g1} = 2,2 \text{ A}$  gerjesztőáram tartozik. Az  $I_{g1}$  gerjesztőáram beállításához szükséges gerjesztőköri szabályozó ellenállás:

$$R_{gsz} = \frac{U_g}{I_{g1}} - R_g = \frac{220}{2,2} - 82,5 = 17,5 \Omega.$$

**5.16.9. számpélda.** Egy egyenáramú kompenzált külsőgerjesztésű motor névleges armatúraárama  $I_{an} = 400 \text{ A}$ , kapocsfeszültsége  $U = 500 \text{ V}$ . Névleges terheléskor a gép fordulatszáma  $n_n = 1000 \text{ 1/min}$ ; az üresjárási fordulatszám pedig  $n_0 = 1050 \text{ 1/min}$ .

*Feladatok:*

- Tervezzünk az állandó kapocsfeszültségről indított géphez indítóellenállást, ha  $I_{amax} = 1,5 \cdot I_{an}$  és  $I_{amin} = 1,1 \cdot I_{an}$ !
- Határozzuk meg az átkapcsolási fordulatszámokat;
- A feladatot számítással és szerkesztéssel is oldjuk meg.

### Megoldás

a) Az indukált feszültség a névleges pontban:

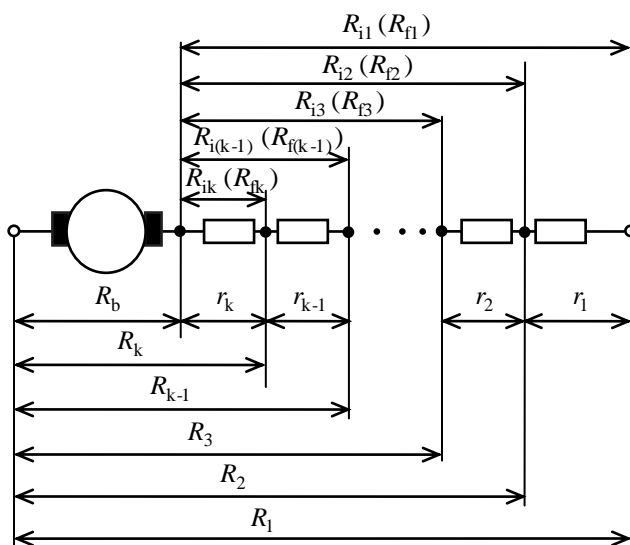
$$U_i = U \cdot \frac{n_n}{n_0} = 500 \cdot \frac{1000}{1050} = 476,2 \text{ V}.$$

A feszültségesés értéke:

$$\Delta U_b = U - U_i = 500 - 476,2 = 23,8 \text{ V}.$$

A gép belső ellenállása:

$$R_b = \frac{\Delta U_b}{I_{an}} = \frac{23,8}{400} = 0,0595 \Omega.$$



5.112. ábra Az indító- (fékező-) ellenállások esetén alkalmazott jelölések

A maximális és a minimális áram indításkor:

$$I_{amax} = 1,5 \cdot I_{an} = 1,5 \cdot 400 = 600 \text{ A és}$$

$$I_{amin} = 1,1 \cdot I_{an} = 1,1 \cdot 400 = 440 \text{ A}.$$

Az egymást követő ellenállások (a mértani sorozat) hányadosa:

$$q = \frac{I_{amin}}{I_{amax}} = \frac{R_{k+1}}{R_k} = \frac{440}{600} = 0,733.$$

Az első fokozat ellenállása:

$$R_1 = \frac{U}{I_{amax}} = \frac{500}{600} = 0,833 \Omega.$$

A mértani sorozatot felhasználva a fokozatszám:

$$m = \frac{\lg \frac{R_b}{R_1}}{\lg q} = \frac{\lg \frac{0,0595}{0,833}}{\lg 0,733} = 8,55, \text{ vagyis az utolsó fokozat csonka.}$$

Az első indító-ellenállás fokozat:  $R_{i1} = R_1 - R_b = 0,833 - 0,0595 = 0,774 \Omega;$

A második fokozat összellenállása:  $R_2 = q \cdot R_1 = 0,733 \cdot 0,833 = 0,611 \Omega;$

Az első kiiktatott fokozat ellenállása:  $r_1 = R_1 - R_2 = 0,833 - 0,611 = 0,222 \Omega$

és így tovább.

Az ellenállások értelmezését az 5.112. ábrán láthatjuk, a további számítások eredményeit az 5.4. táblázatban foglaltuk össze. A 9. fokozat csonka, mert:

$$R_{10} = q \cdot R_9 = 0,733 \cdot 0,0697 = 0,0511 < 0,0595 = R_b.$$



Az átkapcsolási fordulatszámok számítása a következő: mivel a fluxus terheléstől független, a  $k_U \cdot \Phi$  állandó értéke:

$$k_U \cdot \Phi = \frac{U}{n_0} = \frac{500}{1050} = 0,4762 \text{ Vmin}.$$

Általánosan a  $k$ . fokozatról a  $k+1$ . fokozatra történő átkapcsolás pillanatában a fordulatszám:

$$n_k = \frac{U - I_{\text{amin}} \cdot R_k}{k_U \cdot \Phi} = \frac{U - I_{\text{amax}} \cdot R_{k+1}}{k_U \cdot \Phi}.$$

Konkrétan az első fokozatról a másodikra történő átkapcsolás pillanatában a fordulatszám:

$$n_1 = \frac{U - I_{\text{amin}} \cdot R_1}{k_U \cdot \Phi} = \frac{500 - 440 \cdot 0,833}{0,4762} = 280 \text{ 1/min}.$$

Az átkapcsolási fordulatszámokat megadtuk az 5.4. táblázatban.

**5.16.10. számpélda.** Egy egyenáramú, kompenzált külsőgerjesztésű motor kapocsfeszültsége  $U = 500 \text{ V}$ ; üresjárási fordulatszáma  $n_0 = 1050 \text{ 1/min.}$ ; névleges armatúraárama  $I_{\text{an}} = 400 \text{ A}$ ; belső ellenállása  $R_b = 0,0595 \Omega$ . A motor a névleges terhelési pontban  $n_n = 1000 \text{ 1/min}$  fordulatszámmal jár, amikor féküzemre kapcsolunk át.

*Feladatok:*

- Mekkorának kell lennie az dinamikus fékezéskor az  $R_1$  armatúraköri fékező ellenállásnak, hogy a maximális fékezőáram  $I_{\text{amax}} = 500 \text{ A}$  legyen?
- Tervezzünk  $m = 4$  fokozatú fékezőellenállást úgy, hogy a negyedik fokozat végén csak  $R_b$  maradjon az armatúrakörben! Adja meg  $I_{\text{amin}}$ , a fékező ellenállások, és az átkapcsolási fordulatszámok értékét. A feladatot szerkesztéssel is oldja meg.
- A motoros üzemi pontból ellenáramú féküzembe térünk át a kapocsfeszültség polaritásának megfordításával. Mekkorának kell lennie most az  $R_1$  armatúraköri fékezőellenállásnak, hogy a maximális fékezőáram  $I_{\text{amax}} = 500 \text{ A}$  legyen? A motort ezzel a fokozattal fékezzük megállásig. A kapocsfeszültség le-, és a rögzítőfék bekapcsolásának pillanatában mekkora az  $I_{\text{az}}$  armatúraáram?

*Megoldás*

Az indukált feszültség motoros üzemben a névleges terhelési pontban és így a fékezésre történő áttérés pillanatában:

$$U_i = U \cdot \frac{n_n}{n_0} = 500 \cdot \frac{1000}{1050} = 476 \text{ V}.$$

a) Dinamikus fékezés esetén az  $I_{\text{amax}}$  áramra korlátozó fékezőellenállás:

$$R_1 = \frac{U_i}{I_{\text{amax}}} = \frac{476}{500} = 0,952 \, \Omega.$$

b) A fékező ellenállások mértani sorozatot alkotnak. A mértani sorozat hányadosa:

$$q = \sqrt[m]{\frac{R_b}{R_1}} = \sqrt[4]{\frac{0,0595}{0,9522}} = 0,5.$$

Ezzel a minimális áram:

$$I_{\text{amin}} = q \cdot I_{\text{amax}} = 0,5 \cdot 500 = 250 \, \text{A}.$$

Az első fékezőellenállás fokozat:  $R_{11} = R_1 - R_b = 0,952 - 0,0595 = 0,893 \, \Omega$ ;

A második fokozat összellenállása:  $R_2 = q \cdot R_1 = 0,5 \cdot 0,952 = 0,476 \, \Omega$ ;

Az első kiiktatott fokozat ellenállása:  $r_1 = R_1 - R_2 = 0,952 - 0,476 = 0,476 \, \Omega$

és így tovább.

Az ellenállások értelmezését az 5.112. ábrán láthatjuk, a további számítások eredményeit az 5.5. táblázatban foglaltuk össze. Az átkapcsolási fordulatszámok számítása a következő: mivel a fluxus terheléstől független, a  $k_U \cdot \Phi$  állandó értéke:

$$k_U \cdot \Phi = \frac{U}{n_0} = \frac{500}{1050} = 0,4762 \, \text{Vmin}.$$

Általánosan a  $k$ . fokozatról a  $k+1$ . fokozatra történő átkapcsolás pillanatában a fordulatszám:

$$n_k = \frac{I_{\text{amin}} \cdot R_k}{k_U \cdot \Phi} = \frac{I_{\text{amax}} \cdot R_{k+1}}{k_U \cdot \Phi}$$

Konkrétan az első fokozatról a másodikra történő átkapcsolás pillanatában a fordulatszám:

$$n_1 = \frac{I_{\text{amin}} \cdot R_1}{k_U \cdot \Phi} = \frac{250 \cdot 0,952}{0,4762} = 500 \, 1/\text{min}.$$

Az átkapcsolási fordulatszámokat megadtuk az 5.5. táblázatban.

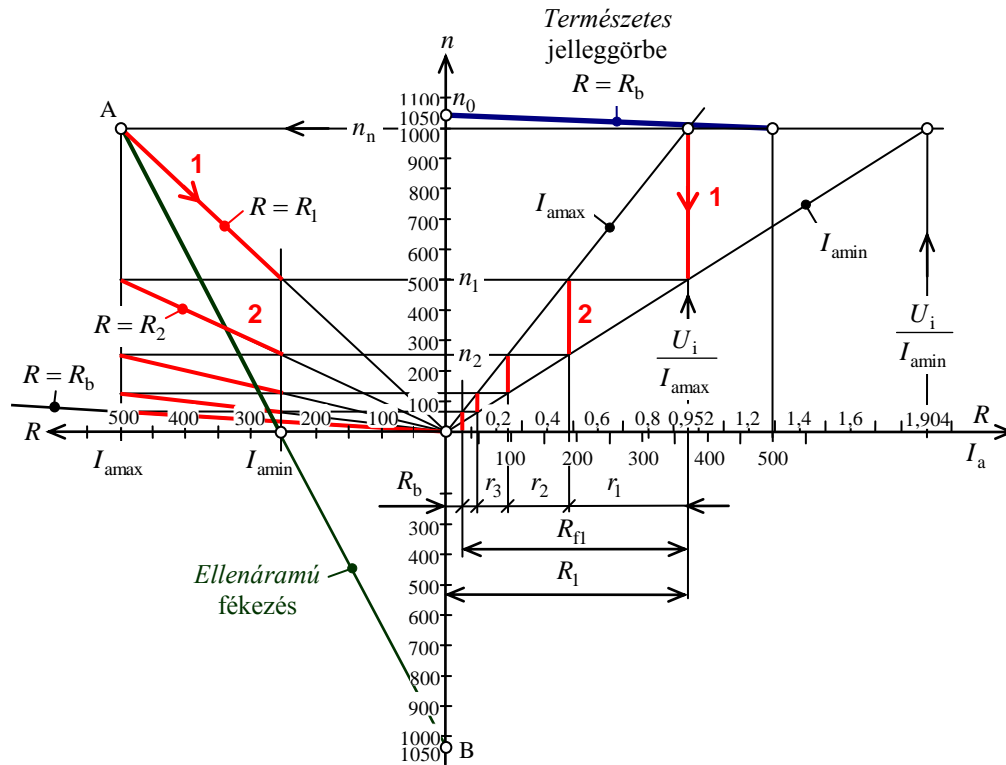
A feladatot szerkesztéssel az 5.114. ábrán oldottuk meg. A szerkesztés menete a következő: először megrajzoljuk a természetes jelleggörbét  $\{n(I_a); R_a = R_b\}$ ; és a munkapontot motoros üzemben. Ezután közös fordulatszám tengellyel felvesszük az  $n(R)$  és az  $n(I_a)$  koordinátarendszert. A fékezőellenállás-egyenesek az origóba futnak be. Az átkapcsolási fordulatszámnál  $I_{\text{amax}}$  áramhoz az  $R_1$  ellenállás,  $I_{\text{amin}}$  áramhoz az

$k$	1	2	3	4
$R_k, \text{m}\Omega$	952	476	238	119
$R_{fk}, \text{m}\Omega$	893	417	179	60
$r_k, \text{m}\Omega$	476	238	119	60
$n_k, 1/\text{min}$	500	250	125	75

5.5. táblázat Az fékezőellenállás-számítások eredményei

$$R_{I_{amin}} = \frac{U_i}{I_{amin}} = \frac{476}{250} = 1,904 \, \Omega$$

ellenállás tartozik. Az egyenesek két pontjuk alapján megrajzolhatók.



5.114. ábra A dinamikus fékezés folyamatának szerkesztése

Az  $n(I_a)$  síkon az  $R_1$  ellenálláshoz tartozó jelleggörbe átkapcsolási fordulatszámnál az  $I_{amax}$  áramból indul. Ezen a jelleggörbén vagyunk, amíg az áram  $I_{amin}$ -re nem csökken, amikor is  $n_1$  fordulatszámon átkapcsolunk az  $R_2$  ellenállású fokozatra és így tovább. Az ellenállás-síkon egy-egy fokozatban az ellenállás állandó, ezért az adott fokozatban függőleges egyenesen mozgunk a minimális áram egyenesének eléréséig. Az ellenállás síkon az indító ellenállások értékei közvetlenül leolvashatók.

c) Az ellenáramú fékezésre történő áttérés pillanatában a szükséges fékezőellenállás:

$$R_1 = \frac{U_i + U}{I_{amax}} = \frac{476 + 500}{500} = 1,952 \, \Omega.$$

A hasonló háromszögeket felhasználva a lekapcsolás pillanatában az áram:

$$I_{az} = \frac{n_0}{n_0 + n_n} \cdot I_{amax} = \frac{1050}{1050 + 1000} \cdot 500 = 128 \, \text{A}.$$

Az ellenáramú fékezés  $\overline{AB}$  egyenesét berajzoltuk az 5.114. ábrába.



## 5.17. ELLENŐRZŐ KÉRDÉSEK

1. Ismertesse az egyenáramú gép szerkezeti felépítését!
2. Ismertesse egy egyenáramú motor működési elvét!
3. Milyen és mekkora frekvenciájú feszültség indukálódik egy egyenáramú gép armatúrájában?
4. Mi a különbség a transzformátor és a dinamólemez között?
5. Mitől függ a kommutátor szeletszáma?
6. Hogyan határozható meg az egyenáramú gép armatúráján elhelyezett, ún. hatásos vezetők száma?
7. Adja meg a hullámos tekercselés kommutátor-lépését!
8. Adja meg az armatúratekercselés ágpárjainak számát hurkos-, ill. hullámos tekercselés esetén!
9. Definiálja az ágáram fogalmát!
10. Definiálja a közepes légrésindukció fogalmát!
11. Definiálja az ideális vastest hossz ( $l_i$ ) fogalmát!
12. Mitől függ az egyenáramú gép indukált feszültsége?
13. Mitől függ az egyenáramú gép nyomatéka?
14. Rajzolja fel az egyenáramú motor helyettesítő kapcsolási vázlatát!
15. Írja fel egy egyenáramú generátor feszültségegyenletét!
16. Mitől függ az egyenáramú gép fordulatszáma?
17. Mi az indító ellenállások szerepe egyenáramú gép esetén?
18. Milyen hatásait ismeri az egyenáramú gép armatúra-visszahatásának?
19. Hol helyezkedik el, és mi a kompenzáló tekercselés szerepe?
20. Mikor lép fel, és mitől függ a reaktanciafeszültség?
21. Mikor kezdődik, és mikor fejeződik be a kommutáció?
22. Milyen jellegű kommutációs görbéket ismer? Hogyan mérjük ezeket?
23. Sorolja fel a segédpólus feladatait!
24. Milyen módszereket ismer a kommutáció javítására?
25. Hogyan lehet csökkenteni a kommutáló tekercs induktivitását?
26. Rajzolja fel az egyenáramú gép keresztmetszetét az összes lehetséges tekercseléssel! A tekercsekbe jelölje be az áramok (gerjesztések irányát)!
27. Definiálja, hogy mit fejez ki a gerjesztési viszony az egyenáramú gépek esetén!
28. Rajzolja fel egy egyenáramú sönt motor kapcsolását a szabványos betűjelekkel!
29. Rajzolja fel egy egyenáramú soros motor kapcsolását a szabványos betűjelekkel!
30. Rajzolja fel egy egyenáramú, kompond gerjesztésű motor kapcsolását a szabványos betűjelekkel!
31. Miért jár az egyenáramú generátorok belső terhelési jelleggörbéje az üresjárási jelleggörbe alatt?