

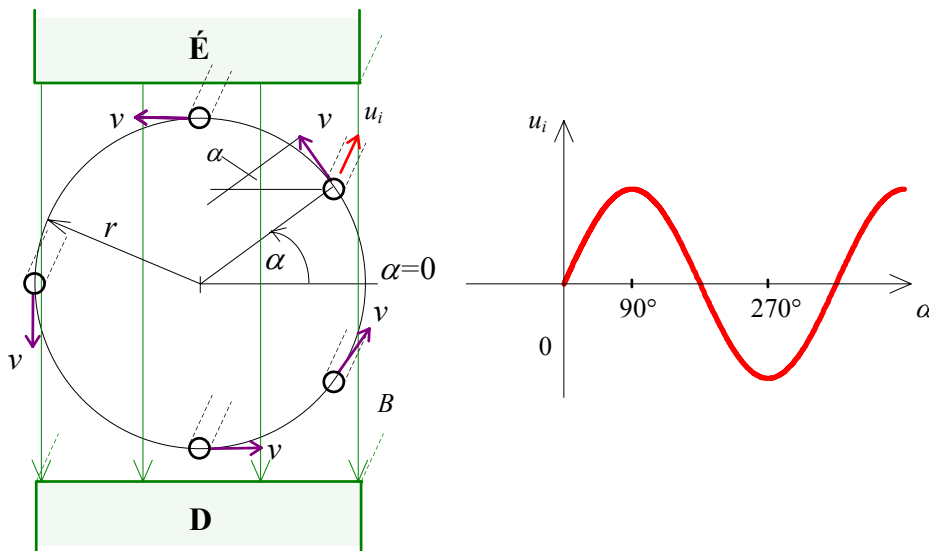
## V. Egyenáramú gépek

Ahogy az első áramforrások, úgy az első villamos gépek is egyenáramúak voltak. Az első egyenáramú villamos hálózatot az Edison által tervezett egyenáramú generátorok táplálták. Egyenáramú gépeket tömegesen a villamos vontatásban (tömegközlekedési eszközök, anyagmozgató járművek, villamos járművek) és a gépjárművek segédhajtásainál (pl. indító motorok) használtak. Egyszerű szabályozástechnikai tulajdonságaik miatt az egyenáramú gépek az automatizált hajtásokban is fontos szerepet tölthettek be, de jelentőségük a korszerű váltakozó áramú megoldások terjedésével rohamosan csökken. Ennek az a legfőbb oka, hogy elsősorban a kommutátor alkalmazása miatt az egyenáramú gépek nagy súlyúak, gyártásuk drága, üzemeltetésük a karbantartási igény miatt költséges. Ezzel szemben az aszinkron motoros hajtások – köszönhetően a teljesítményelektronikai és az információ elektronikai eszközök (inverterek, mikrokontrollerek stb.) fejlődésének, költségük csökkenésének – egyre terjednek, nem csak a szabályozott hajtásokban, de a városi közlekedésben és a vasúti vontatásban is növekszik a részarányuk.

### Az egyenáramú gépek működési elve

Ha egy homogén mágneses térbe helyezett vezető rögzített tengely körül az ábra szerint állandó szögsebességgel forgatnak, akkor az indukálódó feszültség a kerületi sebességnek az indukció irányára merőleges összetevőjével lesz arányos, nagysága a vezető helyzetétől függően fog változni:

$$u_i = Blv \sin \alpha.$$



Mágneses térben forgatott vezető indukált feszültsége

A vezető  $a$ -val jelölt helyzetében a kerületi sebesség vektora merőleges az indukcióvonalakra, ekkor az erővonal metszés és az indukált feszültség a legnagyobb, míg a  $b$ -vel jelölt helyzetben a kerületi sebesség (és a vezető mozgásának) iránya párhuzamos az indukcióvonalakkal (nincs erővonal metszés), az indukált feszültség nulla. Az alsó félkör mentén a sebesség indukcióra merőleges összetevője az előzőekkel ellentétes irányú, emiatt az indukált feszültség is előjelet vált. Tehát egyirányú mágneses mezőben állandó szögsebességgel körbeforgatott vezető végein időben szinuszosan váltakozó indukált feszültséget kapunk. Az indukált feszültség pillanatértéke:

$$u_i(t) = Blv \sin(\Omega_m t),$$

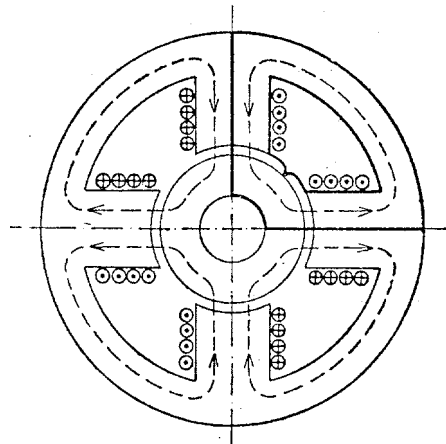
itt  $\Omega_m$  – a forgatás mechanikai szögsebessége, a  $t=0$  pillanatban a vezető az  $0$  ponton halad át. Ezt az összefüggést annak feltételezésével kaptuk, hogy az állandó  $B$  indukciójú térben mozgatott vezető  $v$  sebességének az indukcióra merőleges komponense  $v \sin \alpha$ , ugyanez az eredmény akkor is, ha fordítva tekintjük: a vezető állandó  $v$  kerületi sebességgel forog, miközben a  $B$  indukciónak a  $v$  sebességre merőleges  $B_r$  (radiális) összetevője szinuszosan változik,  $B_r = B \sin \alpha$ . A váltakozó áramú forgógépeknél ez utóbbi eset áll fenn, a légrés mentén az indukció szinuszos eloszlású, vagy a számítások egyszerűsítése érdekében szinuszosnak feltételezzük.

A mágneses teret gerjesztett vagy állandó mágnes pólusokkal hozzák létre. A feszültség maximuma akkor indukálódik, amikor a vizsgált vezető egy pólus alatt halad el, míg a pólusköz középvonalában (az úgynevezett semleges zónában) az indukált feszültség pillanatértéke nulla.

Kétpólusú elrendezésnél (1 északi és 1 déli pólus esetén) a vezető egy teljes (geometriai) körfordulása alatt az indukált feszültségnek egy teljes periódusa zajlik le. Négy-pólusú elrendezésnél egy periódushoz csak a vezető félfordulatára van szükség, hiszen ezalatt kerül újból a kiindulási mágneses pozícióba. Úgy is fogalmazhatunk, hogy egy fél mechanikai (geometriai) fordulat villamos szempontból egy teljes „fordulatnak” felel meg, tehát a villamos szögsebesség a mechanikainak kétszerese

$$\Omega_{vill} = 2\Omega_{mech}.$$

Általánosítva:  $\Omega_{vill} = p\Omega_{mech}$ , ahol  $p$  - a póluspárok száma.



Négy-pólusú elrendezés

A továbbiakban a villamos szögsebességet index nélkül  $\Omega$ -vel, a mechanikai szögsebességet pedig  $\Omega_m$ -el jelöljük:

$$\Omega = \Omega_{vill}; \quad \Omega_m = \Omega_{mech}; \quad \Omega = p\Omega_m.$$

A fentiek figyelembevételével az indukált feszültség általánosabb összefüggése:

$$u_i(t) = Blr\Omega_m \sin(p\Omega_m t) = Blr\Omega_m \sin(\Omega t),$$

$r$  – a vezető távolsága a forgástengelytől, sugár.

A különböző mennyiségek időbeli lefolyásának vizsgálatánál a szinusz függvény argumentumában szereplő  $\Omega$ -t villamos szögsebesség helyett általában körfrekvenciának nevezik, gyakran  $\omega$ -val jelölik

$$\Omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T},$$

ahol  $f$  – a jel frekvenciája,  $T$  – a periódus ideje. Ezzel

$$u_i(t) = Blr\Omega_m \sin(2\pi f t).$$

A valóságos gépek armatúra tekercselése nem egyes vezetők, hanem vezető párokból – menetekből áll. Egy-egy menet vezetői egymástól általában  $\tau_p$  pólusosztásnyira (két szomszédos, ellentétes értelmű pólus közötti távolság a kerület mentén) helyezkednek el, és úgy kapcsolódnak egymáshoz sorosan, hogy a bennük indukálódó feszültségek összeadódnak

$$u_{i\text{ menet}}(t) = 2Blr\Omega_m \sin(\Omega t).$$

Ugyanezt az eredményt kapjuk akkor is, ha az indukált feszültséget a fluxus változásából számítjuk. Kétpólusú elrendezésnél az egy menet által körülhatárolt felület nagysága  $A=2rl$ , a körülfogott fluxus nagysága  $\Phi=BA$ . Az egymástól  $2r$  távolságra lévő két  $l$  hosszúságú vezető által alkotott menet akkor fogja körül a maximális  $\Phi_m$  fluxust, amikor a menetre fektethető sík éppen merőleges az indukcióvonalakra:

$$\Phi_m = 2rlB.$$

A vezetőkeret elfordulásakor a menet által körülfogott fluxus csökken, mindig arányos a keret felületének az indukcióvonalakra merőleges vetületével

$$\phi(t) = \Phi_m \cos\alpha = 2rlB \cos\alpha = 2rlB \cos(\Omega t).$$

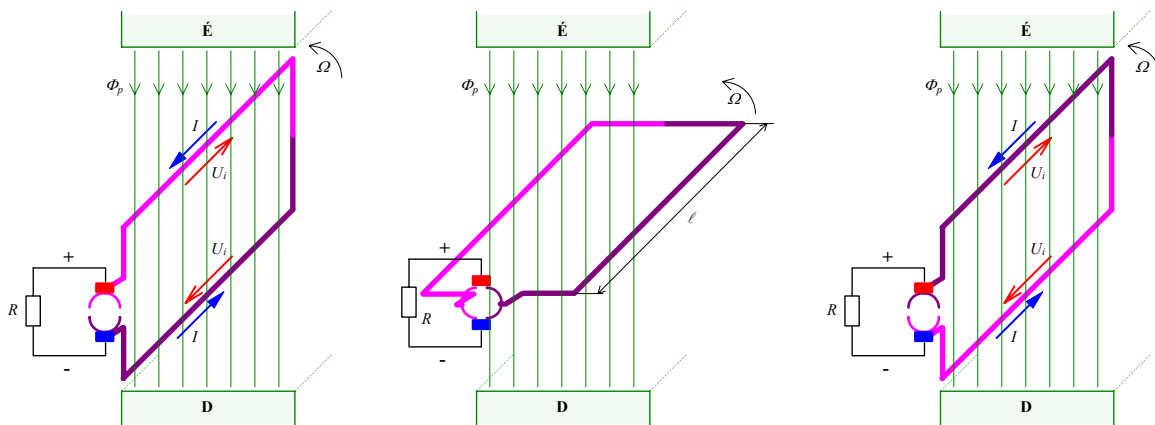
A menetben indukált feszültséget a fluxus változása indukálja, ezért annak differenciálhányadosával egyenlő, az előjel az alkalmazott pozitív iránytól függ:

$$u_{i\text{ menet}}(t) = \frac{d\phi}{dt} = -\Omega_m \Phi_m \sin(\Omega t) = -2Blr \Omega_m \sin(\Omega t).$$

### A kommutátor szerepe

Ha a vezető keret két végét a vezető kerettel együtt elforduló félkörív alakú lemezekhez rögzítjük akkor olyan megoldást kapunk, amelyben az ábrán pirossal jelzett, térben álló kefe mindig az éppen a felső térrészben tartózkodó vezetőhöz csatlakozik, a kékkel jelzett pedig az alsóhoz. Ennek az az eredménye, hogy a feszültség polaritása annak ellenére nem változik, hogy az egyes vezetőkben váltakozó irányú  $u_i$  feszültség indukálódik.

A vezető keret végeihez erősített lemezpárt kommutátornak (áram-irányváltónak) nevezik, feladata az indukálódó váltakozó feszültség egyenfeszültséggé alakítása. Ez az elrendezés az egyenáramú gép alapja.



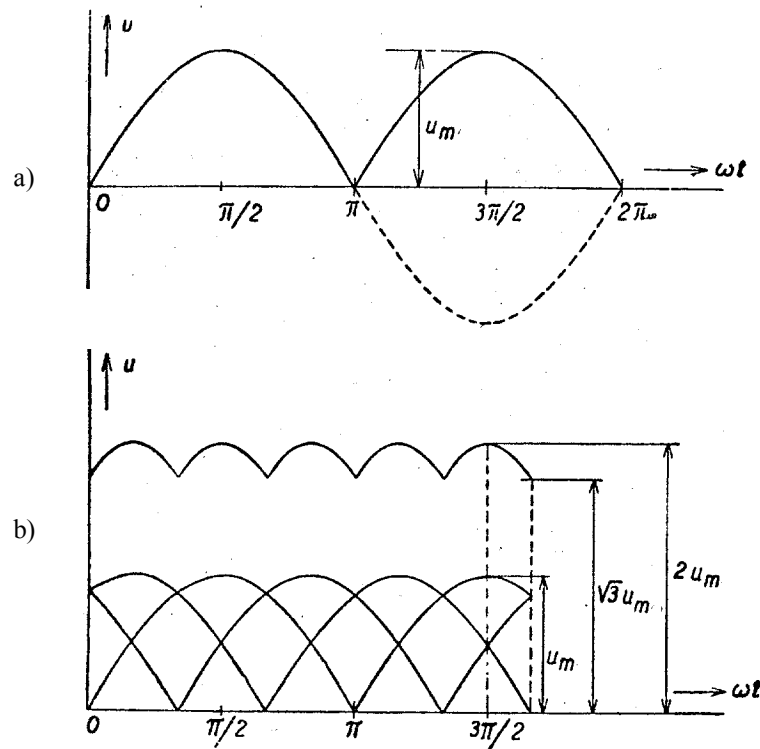
A kommutáció elve

A két kefe között különböző hornyokban elhelyezkedő vezetők egymástól eltérő időpontban érnek ugyanabba a pozícióba, így bennük egymáshoz képest időben eltoltsinuszos feszültségek indukálódnak, a keféken ezek összege jelenik meg. A kefék feszültségének időbeli változását az ábra egy menet (2 kommutátor szelet) és három menet (6 kommutátor szelet) esetére mutatja.

Szimmetrikus kialakítást feltételezve 6 kommutátor szelet esetén két kefe között 3 vezető van egymástól  $60^\circ$ -kal eltolt helyzetben. Így a bennük indukálódó feszültségek között is  $60^\circ$ -os fáziseltérés van:

$$\begin{aligned}u_{i1}(\Omega t) &= U_{max} \sin(\Omega t), \\u_{i2}(\Omega t) &= U_{max} \sin(\Omega t + \pi/3), \\u_{i3}(\Omega t) &= U_{max} \sin(\Omega t + 2\pi/3),\end{aligned}$$

ahol  $U_{max} = Blr\Omega$ .



A feszültség időbeli változása a) 2 és b) 6 kommutátor szelet esetén ( $U_m = U_{max}$ )

A két kefe közötti feszültség a 3 vezető indukált feszültségének összege:

$$u_i(\Omega t) = u_{i1}(\Omega t) + u_{i2}(\Omega t) + u_{i3}(\Omega t).$$

$$\Omega t = 0\text{-nál} \quad u_i = U_{max}(0 + \sin \pi/3 + \sin 2\pi/3) = \sqrt{3} U_{max},$$

$$\Omega t = \pi/6\text{-nál} \quad u_i = U_{max}(\sin \pi/6 + \sin \pi/2 + \sin 5\pi/3) = 2U_{max},$$

$$\Omega t = \pi/3\text{-nál} \quad u_i = U_{max}(\sin \pi/3 + \sin 2\pi/3 + 0) = \sqrt{3} U_{max}.$$

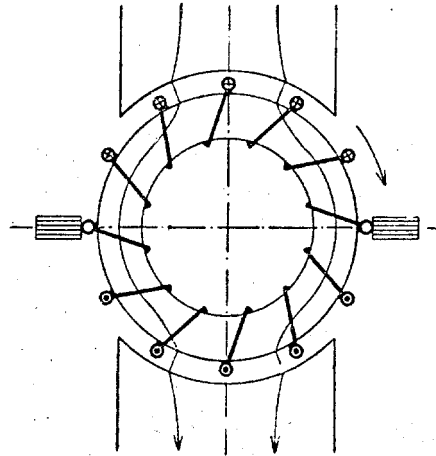
Az egyenáramú generátor feszültsége bizonyos mértékben mindig hullámos, a hullámosság foka annál kisebb, minél nagyobb a kommutátor szeletek száma. Az áramban ez a hullámosság kevésbé jelenik meg az áramkör induktivitásainak simító hatása következtében.

### Az egyenáramú gépek felépítése

A gyakorlatban a forgórész (armatúra) sok menetből álló tekercsrendszerből épül fel. Elvi működését az ábra egy olyan gyűrűs tekercselésű forgórészen (a forgórész tekercselése egy mágneses vezető gyűrű körül helyezkedik el) szemlélteti, ahol a vezetők külső felülete szigetetlen és hozzájuk a semleges zónában álló kefék csatlakoznak.

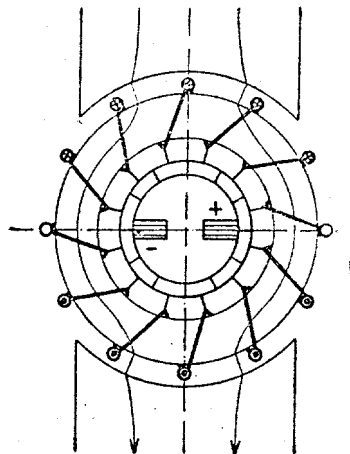
A tekercselés önmagában zárt, az áram bevezetése és elvezetése azokon a vezetőkön keresztül történik, amelyek éppen a kefék alatt tartózkodnak. Az áram egyidejűleg két párhuzamos

ágon, az alsó és a felső tekercsfélen át folyik, a két keféen mérhető feszültség a közöttük lévő vezetőkben indukálódó feszültségek összege.



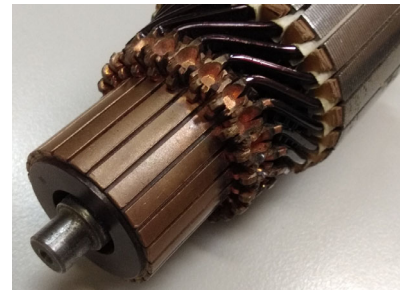
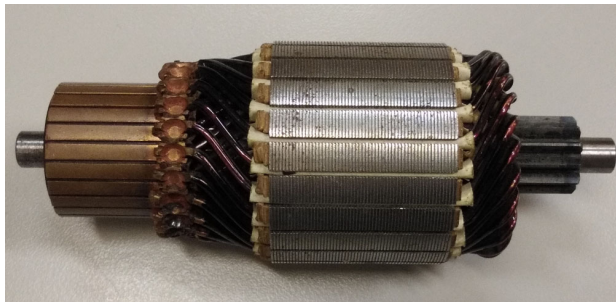
*Gyűrűs tekercselésű forgórész*

A valóságos gépben a kefék olyan szélesek, hogy legalább egy vezetővel mindig érintkezésben maradjanak, nehogy az áramkör megszakadjon. Megfigyelhető, hogy az egyes vezetőkben a kefe alatti elhaladáskor az áramirány megfordul, a vezető kommutál.



*Gyűrűs tekercselésű kommutátoros forgórész*

Jobb megoldást jelent, ha a kefék a tekercseléstől elkülönített szerkezeti egységen, a kommutátoron futnak. Az egymástól elszigetelt rézlemez (kommutátor szeletek, szegmensek) össze vannak kötve a tekercselés elemeinek csatlakozó pontjaival. A keféknek szélesebbeknek kell lenniük a szegmensek közötti szigetelésnél.

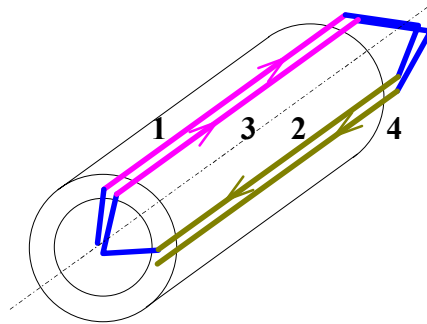


*Egyenáramú gép forgórésze*

Az ábrán egy kis egyenáramú gép forgórésze látható: a tekercselés horonyba fektetett meneteknek csatlakozó pontjait kivezették a kommutátor lemezeihez (amelyekhez az álló kefék csatlakoznak).

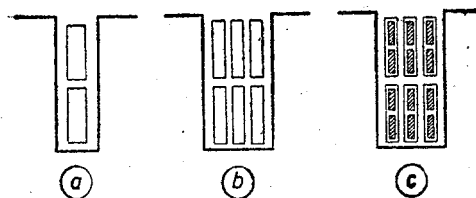
### Az egyenáramú gépek armatúratekercselése

Az eddig bemutatott gyűrűs típusra az jellemző, hogy a külső felületen elhelyezett vezetőket a vastest belső palástjának mentén elhelyezett vezetők kötik sorba. Az indukcióvonalak magában a vastestben haladnak, a gyűrűn belül elhelyezett átkötő vezetők nem metszenek erővonalakat, ezért bennük feszültség nem indukálódik.



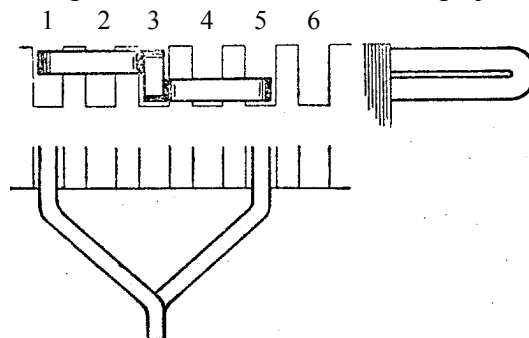
*A dobtekercselés elve (4 pólusú forgórész)*

A gyakorlatban úgynevezett dobtekercselést készítenek, amelynél az egyes vezetőket a következő pólus alatt fekvővel kötik össze. Így az egyes menetek mindkét vezetője hatásos. Az egymás után következő vezetők (a tekercsoldalak) kb.  $\tau_p$  pólusosztásnyira fekszenek egymástól, ezért az ilyen forgórész csak azonos pólusszámú állórészben használható. A dobtekercselés elvi vázlatát 4 pólusú esetre az ábra mutatja.



*Tekercsek kétrétegű elhelyezése*

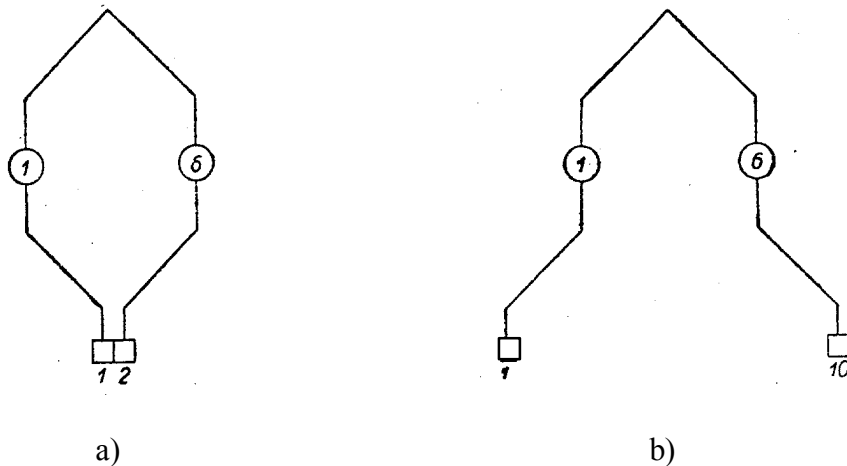
A tekercseléseket általában nem a forgórész külső felületén, hanem az armatúra vastestébe sajtolt hornyokban helyezik el. A hornyok egyrészt mechanikailag védik a vezetőket, másrészt az armatúra és a pólusok közötti légrés csökkentését teszik lehetővé. A légrés méretétől nagy mértékben függ a szükséges indukció létrehozásának gerjesztés-igénye.



*A tekercsfej kialakítása*

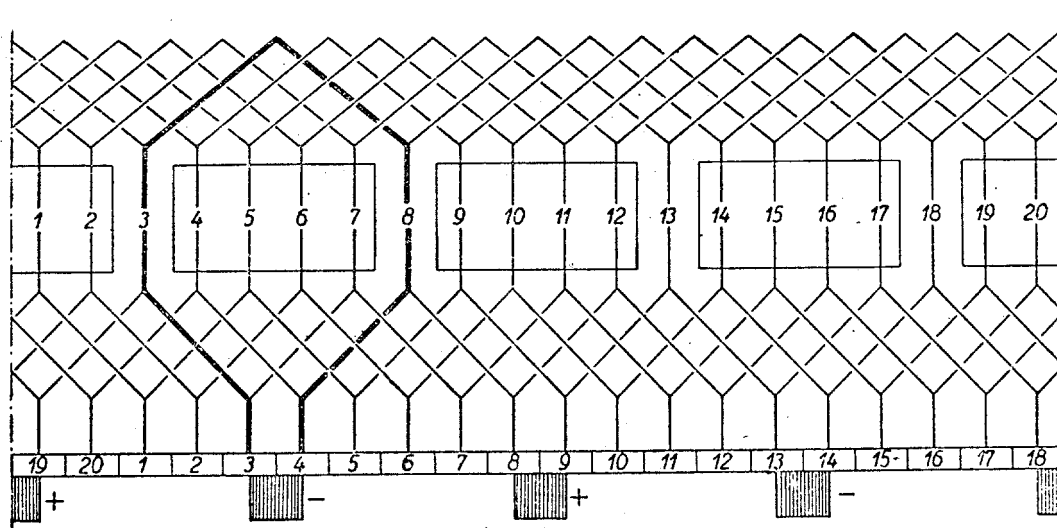
A tekercsokat legtöbbször két rétegben helyezik el a hornyokban, az egyik tekercsoldal a felső, a másik az alsó rétegben fekszik. Az ábrán három horony látható kétrétegű tekercsekkel, az *a* rajzon mindkét rétegben 1-1 tekercsoldal, a *b* rajzon mindkét rétegben 3-3 tekercsoldal van. A *c* rajzon is mindkét rétegbe 3-3 tekercsoldalt helyeztek és az egyes tekercselemek kétmenetűek.

A fenti ábra azt mutatja három nézetben, hogyan köti össze a tekercsfej a különböző rétegekben fekvő tekercsoldalakat.



a) hurkos, b) hullámos tekercselési elem

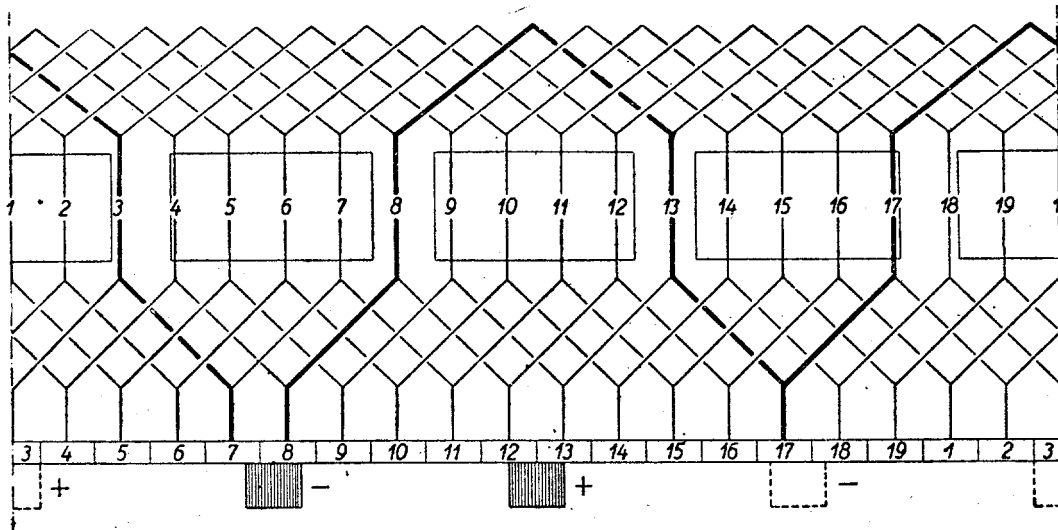
A dobtekercselésnek két fő típusa van: hurkos és hullámos. A fenti ábra egy hurkos és egy hullámos tekercselemet mutat, míg a következő ábrákon egy teljes kétrétegű hurkos és egy kétrétegű hullámos tekercselés kiterített vázlatát látható. A hurkos tekercselésre az jellemző, hogy a két egymással sorba kötött vezető után következő harmadik ugyanaz alatt a pólus alatt fekszik, hullámosnál pedig egy azonos polaritású másik pólus alatt van.



Hurkos tekercselés

Hurkos tekercselésnél két sorba kötött tekercsoldalt két szomszédos kommutátor szelethez vezetnek ki, míg hullámos tekercselésnél ezek a kommutátor szeletek egymástól közel pólusosztásnyira vannak. Ezzel kapcsolatos, hogy míg hurkos tekercselésnél a párhuzamos ágpárok

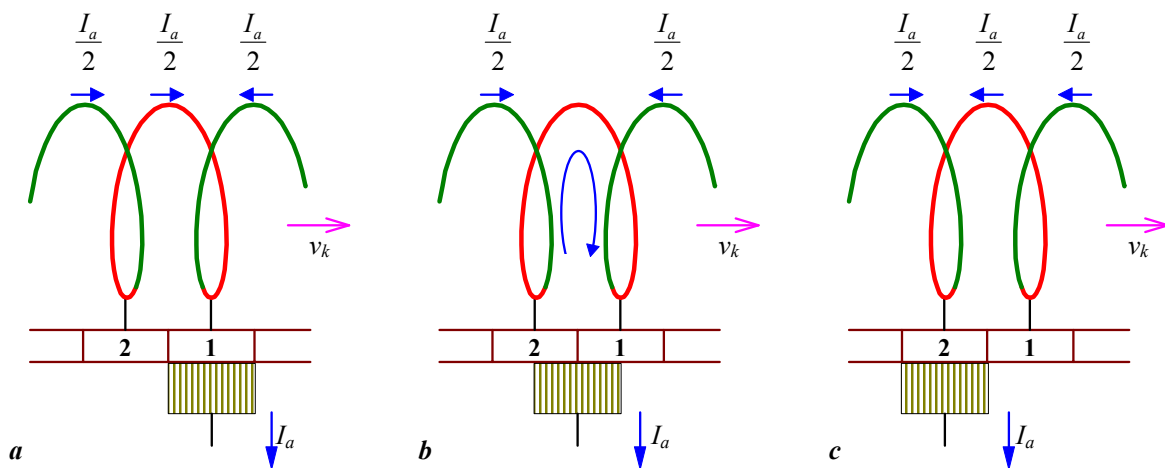
száma megegyezik a póluspárok számával  $a=p$ , hullámos tekercselésnél a párhuzamos ágparók száma a pólusok számától függetlenül  $a=1$ .



Hullámos tekercselés

### A kommutáció folyamata

Mint korábban láttuk, a kommutáció eredményeképpen az armatúra vezetőiben indukálódó váltakozó irányú feszültséget a „külvilág” egyenfeszültségnek érzékeli, a kommutáció lényegében mechanikus egyenirányítást jelent. A kétpólusú gyűrűs tekercseléséből kiemeltük a kommutációban éppen résztvevő (az 1 és 2 szegmens között elhelyezkedő) menet környezetét annak feltételezésével, hogy a kommutáció a semleges zónában zajlik, így a kommutáló menetben semmilyen fluxus (pólusfluxus, armatúrafluxus) nem indukál feszültséget.



A kommutáció folyamatának vázlatja

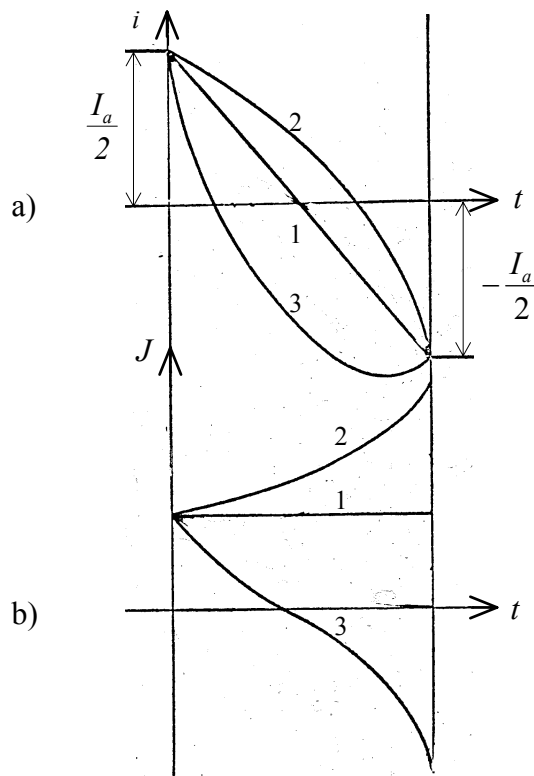
Az *a* ábrán a kefe az 1-el jelölt kommutátor szeleten van, a teljes kefeáram az 1-es szegmensen folyik, az armatúra minden vezetőjében az áram nagysága a teljes  $I_a$  áram fele. Ahogy a  $v_k$  sebességgel haladó kommutátor elmozdul, az 1-es szegmens kezd kicsúszni a kefe alól, a 2-es pedig a kefe alá kerül (*b* ábra). A kefe eközben rövidre zárja az 1-es és 2-es szelethez kivezetett menetet, ezért a kefeáram megoszlik a két szegmens között. Abban a pillanatban, amikor az 1-es szelet teljesen kifut a kefe alól, a vizsgált menetben a kommutációt megelőzőhöz képest ellenkező irányú áramnak kell folyni (*c* ábra), hiszen ekkorra ez a menet már átkerült a másik (jobb oldali) párhuzamos ágba.



A kefe alatt elhaladó (kommutáló) menetben tehát áram irányváltás történik, az áram értéke  $I_a/2$ -ről  $-I_a/2$ -re változik (a változás mértéke  $\Delta I = I_a$ ), mialatt a kommutáló menetet a kefe rövidre zárja. Az áramváltozás lehetséges időbeli menetét az alábbi *a* ábra, a lefutó kefesáv áramsűrűségének időbeli változását a *b* ábra mutatja. Ha a kommutátor átmérője  $D_k$  és a

szegmensek száma  $K_{sz}$ , akkor a kommutátor felszínén egy szegmenshez  $\Delta\alpha_{sz} = \frac{2\pi}{K_{sz}}$  szélességű ív tartozik. Adott  $\Omega$  szögsebességnél így egy szegmens  $\Delta t_k = \frac{\Delta\alpha_{sz}}{\Omega}$  idő alatt halad el a kefe alatt, vagyis a kommutáció ideje

$$\Delta t_k = \frac{2\pi}{K_{sz}\Omega}.$$



*a) áramváltozás a kommutáló menetben b) a lefutó kefesáv áramsűrűsége  
 1) lineáris, 2) késleltetett, 3) siettetett kommutáció esetén*

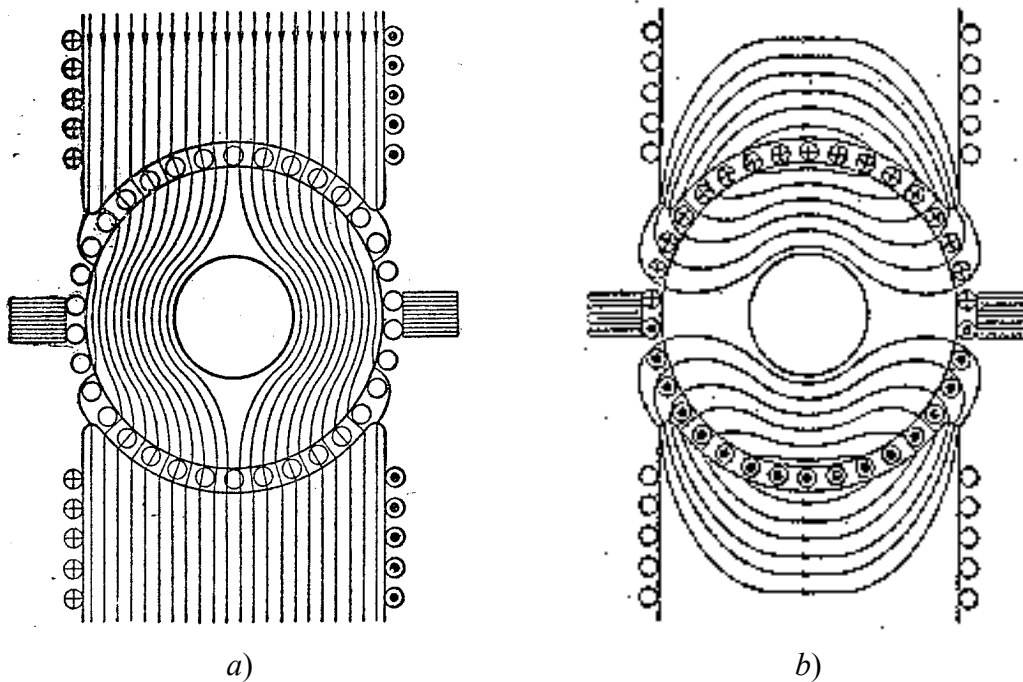
Ha a kommutáló menet (ami akár egy többmenetű tekercs is lehet) induktivitása  $L_k$  és a  $\Delta t_k$  idő alatti áramváltozás  $I_a$ , akkor a keletkező önindukciós feszültség, amit  $U_r$  reaktancia feszültségnek neveznek:

$$U_r = L_k \frac{\Delta I}{\Delta t_k} = L_k \frac{K_{sz}}{2\pi} I_a \Omega = c I_a \omega.$$

Ez a reaktancia feszültség Lenz törvénye értelmében az áramváltozás ellen hat (jelen esetben az 1-es szegmens potenciálja pozitívabb a 2-nél), vagyis igyekszik fenntartani azt az áramot, ami a kommutációt megelőzően folyt. Ennek az a hatása, hogy a kommutáció pl. az ábra 2-görbéje szerint zajlik le (késleltetett kommutáció). Amennyiben a kefe alól lefutó szegmens árama a kommutáció  $\Delta t_k$  ideje alatt nem éri el a  $-I_a$  értéket, a kefeáram egy része a reaktancia feszültség hatására a levegőn keresztül létrejövő ívben folyik, ami kefeszikrázásban mutatko-

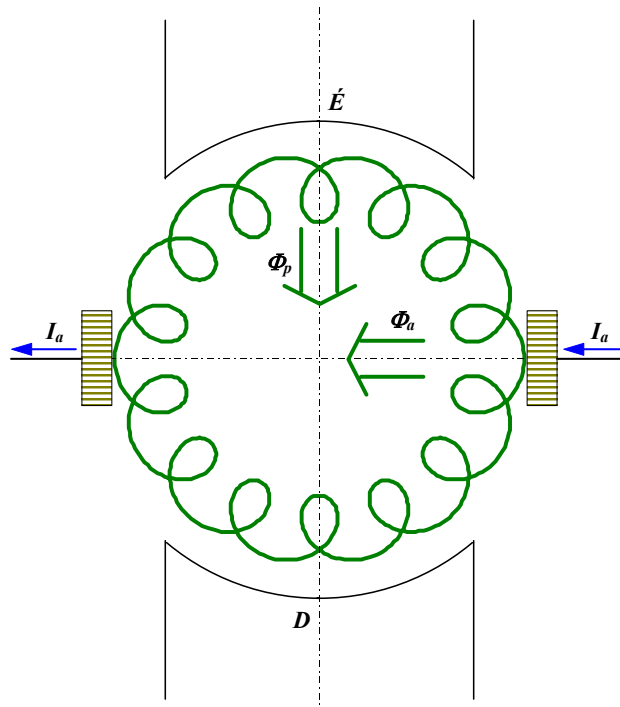
zik meg. A kefeszikrázás nemkívánatos jelenség, mert károsítja a kefét és a kommutátor felületét.

### A mágneses tér összetevői, az armatúragerjesztés hatása



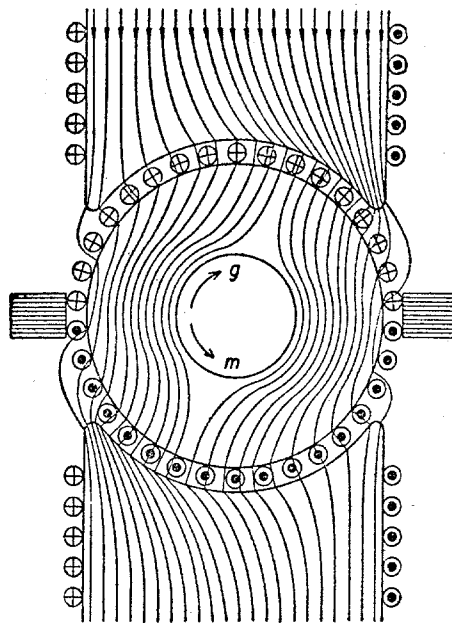
a) A pólusfluxus indukcióvonalai (az armatúra árammentes)  
 b) Az armatúrafluxus indukcióvonalai (a pólustekercs árammentes)

Árammentes armatúra esetén a gép fluxusát az állórészen elhelyezett pólusok gerjesztése határozza meg. Erre az esetre az indukcióvonalak útját egy kétpólusú gépben az *a)* ábra mutatja. Jól látható, hogy a kefék környezetében az indukció a forgórész érintőjével párhuzamos, ezért a kefék alatt elhaladó vezetőik erővonalat nem metszenek, bennük forgási feszültség nem indukálódik (semleges zóna).



*A pólus- és az armatúra fluxus iránya*

Ha az armatúratekercsen  $I_a$  áram folyik, akkor az létrehozza saját fluxusát, amelynek indukcióvonalait gerjesztetlen pólusok esetére a *b)* ábra mutatja. Az armatúrafluxus közel merőleges a pólusfluxusra, ennek következtében a geometriai semleges zónában (a pólusköz középvonalában) fekvő vezetőkben feszültséget indukál.



m: motoros, g: generátoros üzemi forgásirány

*Az eredő fluxus indukcióvonalai*

A valóságban az egyenáramú gépben egy olyan eredő mező alakul ki amelyben a pólusgerjesztés által létrehozott indukciót az armatúragerjesztés hatása módosítja, torzítja. Ezt a jelenséget armatúra-visszahatásnak (armatúreakciónak) nevezzük.

Az armatúragerjesztésnek két hatása látszik:

a) A pólusok egyik oldalán csökken, a másikon nő az indukció - így a pólusok egyik oldalán telítődés léphet fel. Ennek következtében lényeges különbség lehet az ugyanazon pólus alatt eltérő pozícióban haladó vezetők indukált feszültségében.

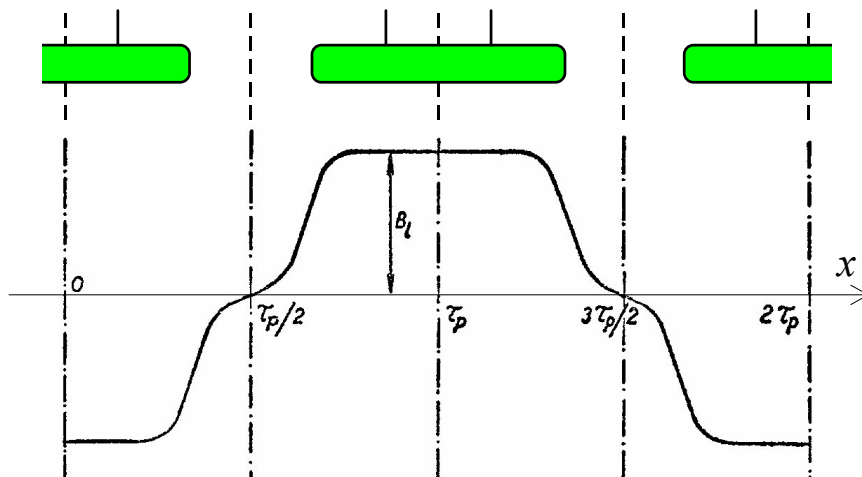
b) A kefék környezetében az indukcióvonalak iránya módosul, a tényleges (mágneses) semleges zóna eltolódik, a geometriai semleges zóna vezetőiben feszültség indukálódik. Ennek a feszültségnek a hatására a kefék által rövidrezárt kommutáló menetekben nagy áram alakul ki, aminek változását a menet-induktivitás késlelteti. A késleltetés miatt a kommutáció végén az áram megszakad és ez szikrázást okoz.

A légrés síkban kiterített ábrái a indukció-eloszlást mutatják különböző esetekben.

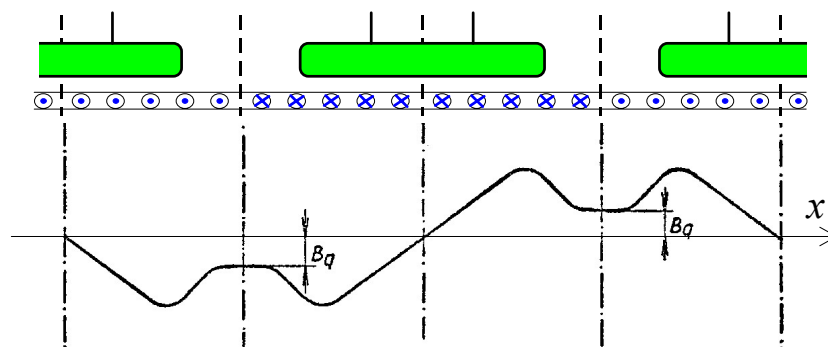
A főpólus indukciójának ideális térbeli eloszlása esetén a főpólus alatt minden vezetőben azonos nagyságú feszültség indukálódik, ezért a kommutátor szegmensek közötti feszültség is azonos.

Az armatúra gerjesztés által egyedül előidézett légrésindukció  $B_q$  értéke (az armatúreakció) a pólusok középvonalában (keresztirányban) viszonylag kicsi, bár a gerjesztés ezen a helyen a legnagyobb. Ugyanis ezeken a helyeken a mágneses ellenállás – a nagyobb légrés miatt – lényegesen nagyobb mint a pólusok alatt.

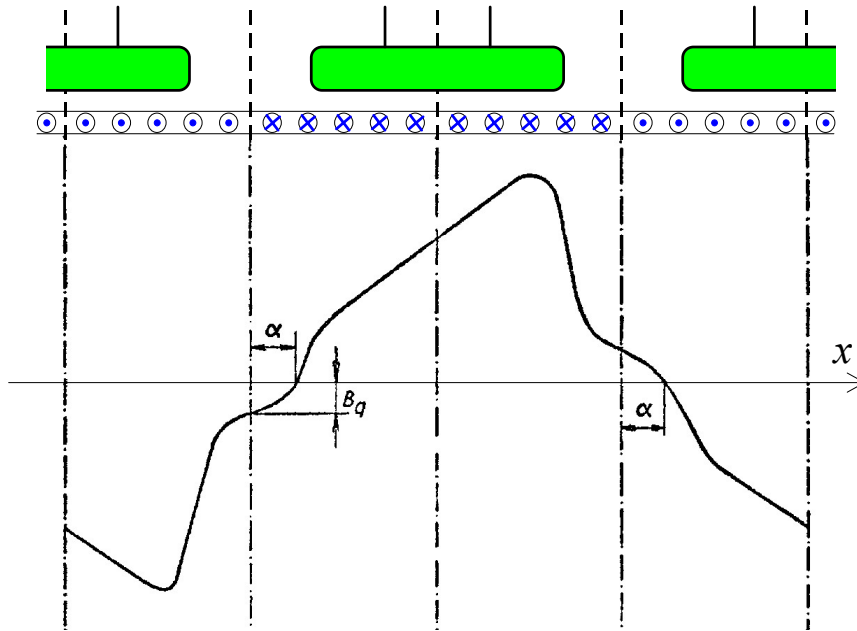
Az armatúreakció eltorzítja a főpólus terét, emiatt a szomszédos vezetőkben eltérő feszültségek indukálódnak, a kommutátor szegmensek közötti feszültségek is eltérőek és a semleges zóna (az indukció nulla értéke) eltolódik a pólusok középvonalához képest.



*A főpólus légrésindukciójának térbeli eloszlása*

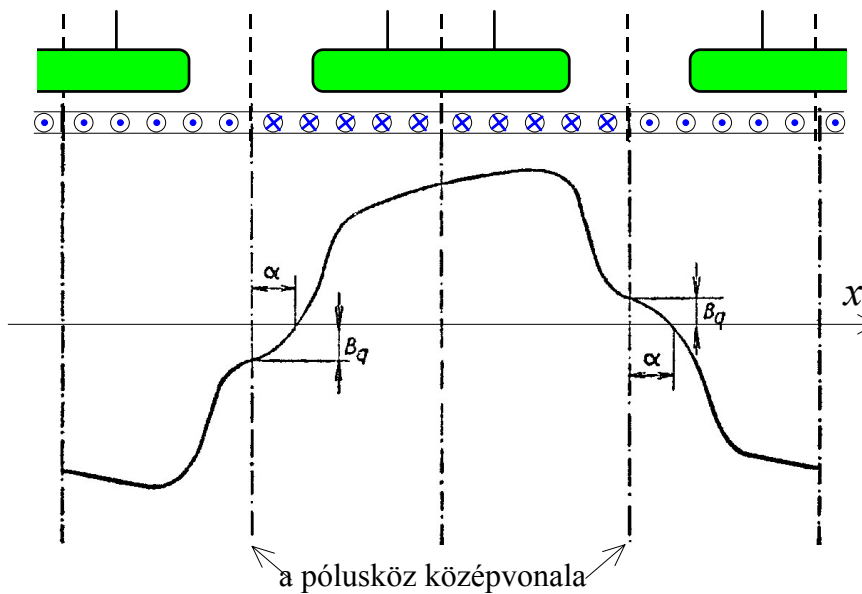


*Az armatúra gerjesztés okozta légrésindukció térbeli eloszlása*



*Az armatúra gerjesztés légrésindukció torzító hatása (a telítés figyelembevétele nélkül)*

Ha a pólusokon kialakuló indukció maximuma nem éri el a telítési értéket, akkor a torzulás nem befolyásolja a légrésindukció  $B_{lk}$  középértékét.

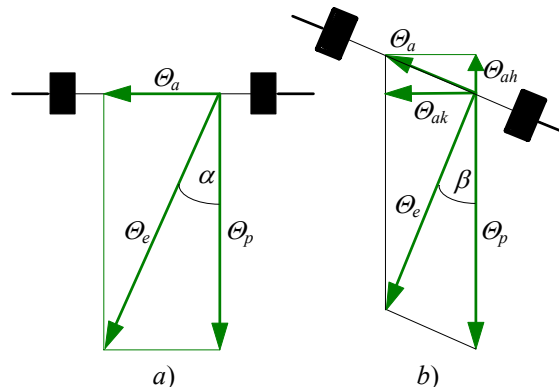


*Az armatúra gerjesztés légrésindukció torzító hatása (a telítés figyelembevételével)*

Telítődés esetén az indukció növekmény a kisebb lesz a csökkenés mértékénél, ami csökkenti a középértéket és ezzel az eredő indukált feszültséget is.

Mivel az armatúreakciót az armatúra árama okozza, a torzulás mértéke – beleértve a semleges zóna eltolódását is – munkapont-függő.

Az armatúreakció hatását gerjesztés vektorokkal is szemléltethetjük. Az ábrán  $\Theta_p$  a főpólus,  $\Theta_a$  az armatúra gerjesztése,  $\Theta_e$  pedig az eredő gerjesztés vektora, az a) ábrán a kefék a geometriai, a b) ábrán a mágneses semleges zónában állnak.



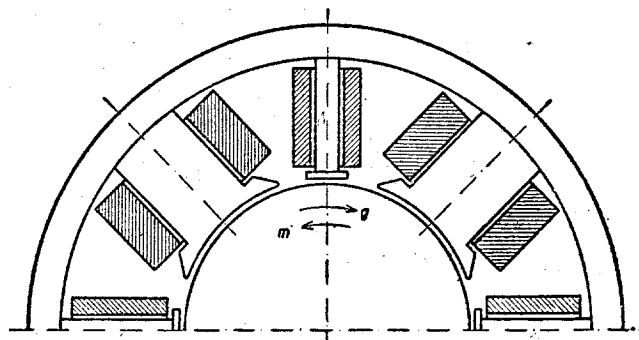
A főpólus és az armatúra gerjesztés vektora

Ha a keféket eltoljuk a tényleges semleges zónába ( $\Theta_e$ -re merőleges irányba állítjuk), akkor a b) ábra szerint a  $\Theta_a$  armatúragerjesztést két összetevőre bonthatjuk: egy  $\Theta_{ah}$  hosszirányú és egy erre merőleges  $\Theta_{ak}$  keresztirányú komponensre. (A főpólusok irányát nevezzük hossziránynak, az erre merőlegest pedig keresztiránynak.) A hosszirányú összetevő a pólustengely irányába esik, a pólusfluxussal ellentétes irányú, ezért hatásával közvetlenül gyengíti azt.

### Az armatúreakció hatásának csökkentése, a kommutáció javítása

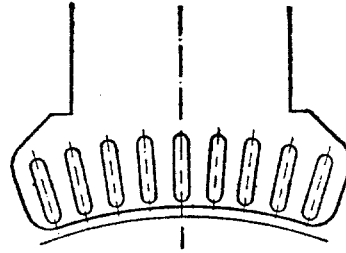
Az armatúreakciónak az előbbieken két hatását láttuk:

- feszültséget indukál a geometriai semleges zónában,
- torzítja a főpólusok alatti indukció-eloszlást.



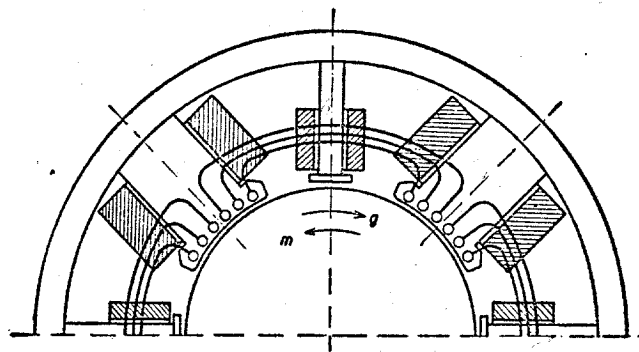
Négypólusú segédpólusos gép vázlata

Mivel az armatúragerjesztés az armatúraárammal arányos, az armatúreakció mértéke a gép terhelésétől függ (üresjárásban elhanyagolható). Az a) hatás ellen ezért úgy védekeznek, hogy a főpólusok közé (vagyis az armatúra gerjesztés irányának térbeli tengelyébe) azoknál kisebb méretű, de kialakításában hasonló segédpólusokat helyeznek. A segédpólusok tekercseit az armatúraárammal gerjesztik oly módon, hogy  $\Theta_s$  gerjesztésük ellentétes irányú legyen a  $\Theta_a$  armatúragerjesztéssel.



*A kompenzáló tekercs hornyai a főpólus saruban*

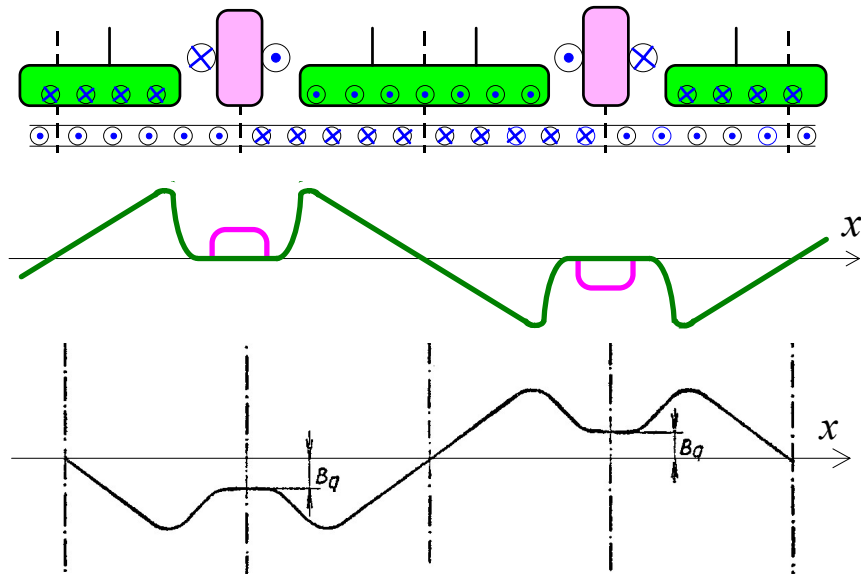
A segédpólus gerjesztésének nagyságát úgy tervezik, hogy ne csak az armatúreakciót közzömbösítse a semleges zónában, hanem a kommutáló menetek reaktancia feszültségét is ellensúlyozza. Ez azért megvalósítható, mert az  $U_r$  reaktancia feszültség is az armatúraárammal arányos.



*Segédpólusos, kompenzált gép vázlata*

A reaktancia feszültség önindukciós feszültség, amit a segédpólus fluxusának forgási indukált feszültsége ellensúlyoz.

Az armatúreakció pólusindukciót torzító hatását egy olyan tekercs gerjesztésével lehet kompenzálni, amelyik egytengelyű (koncentrikus) az armatúratekercseléssel és benne ugyanakkora, de ellentétes irányú áram folyik. Ezt a tekercset kompenzáló tekercsnek nevezik, a főpólusok saru részébe helyezik el és szintén az armatúraárammal gerjesztik.



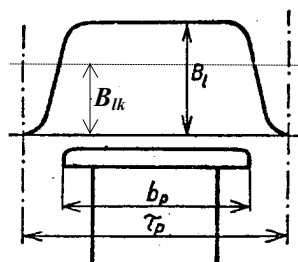
A kompenzáló tekercs és a segédpólus együttes légrésindukciója, valamint az armatúreakció hatása

A kompenzáló tekercs hatása a főpólus alatt, a segédpólusé a főpólusok között érvényesül. A kompenzált, segédpólusos egyenáramú gépet tehát az jellemzi, hogy főpólusai alatt az indukció állandó, kommutációja lineáris és ezért szikrázás mentes.

#### Az indukált feszültség számítása

A pólus  $\Phi_p$  fluxusát két részre bonthatjuk: az egyik az armatúrán át záródó, abban feszültséget indukáló  $\Phi$  hasznos fluxus, a másik rész az armatúrát megkerülő  $\Phi_{ps}$  szórás fluxus  $\Phi_p = \Phi + \Phi_{ps}$ .

Az armatúrávezetőkben indukálódó feszültség arányos a légrésindukció sugárirányú komponensével (ez merőleges a vezető mozgásának irányára), aminek légrés menti eloszlása kompenzált segédpólusos gépnél az ábra szerint alakul: a pólusok alatt az indukció radiális összetevője közel állandó, a pólus szélei alatt csökken, a semleges zónában pedig nulla.



Az indukció sugárirányú összetevőjének pólusok alatti eloszlása

Az ábrán  $B_l$  – a maximális,  $B_{lk}$  – pedig a közepes légrésindukció, amit a görbe alatti terület pólusosztásnyi kerületre történő átlagolásával kapunk,  $b_p$  – a pólussaru szélessége.

Egy-egy vezetőben átlagosan

$$u_{i1} = B_{lk} \ell v$$

nagyságú feszültség indukálódik,  $\ell$  – a tekercsoldalak a mágneses térben mozgó hossza (a vezető aktív hossza).



A  $v$  kerületi sebességet az  $n$  fordulatszámmal és a forgórész kerületével is kifejezhetjük,  $v=D\pi n$  ( $D$  – az átmérő,  $n$  mértékegysége *fordulat/s*), vagy a pólusosztással  $v=\tau_p 2pn$  ( $2p$  – a pólusok száma), így

$$u_{i\ell} = B_{lk} \ell \tau_p 2pn.$$

Itt  $\ell \tau_p = A_p$  az a felület, amelyen a pólus indukciója áthalad, vagyis a  $\Phi$  hasznos fluxus

$$\Phi = B_{lk} A_p = B_{lk} \ell \tau_p.$$

Ezzel az egy vezetőben indukált közepes feszültség

$$u_{i1k} = \Phi 2pn.$$

Ha egy forgórészen összesen  $z$  darab vezető van és a párhuzamos áramágak száma  $2a$ , akkor két kefe között  $z/2a$  vezető van sorba kötve és az ezekben indukált feszültségek összeadódnak. Az armatúra teljes indukált feszültsége, amit belső feszültségnek neveznek

$$U_b = \frac{z}{2a} u_{i1k} = \frac{z}{2a} 2p\Phi n = k'\Phi n,$$

itt -  $k' = \frac{z}{a} p$ .

Ha az  $n$  fordulatszám helyett az  $\Omega_m$  mechanikai szögsebességgel számolunk  $n = \Omega_m / 2\pi$ , akkor

$$U_b = \frac{z}{2\pi a} p \Phi \Omega_m = k \Phi \Omega_m,$$

ahol  $k = \frac{z}{2\pi a} p$ .

A képletből megállapíthatóan a belső feszültség előjele akkor változik meg, ha vagy a  $\Phi$  fluxus irányát, vagy a forgásirányt megváltoztatjuk. A kettő egyidejű megváltoztatása esetén a belső feszültség polaritása nem változik.

Az egyenáramú gépek armatúratekerceselésénél számos különleges megoldást alkalmaznak az egyes vezetők elhelyezésére és összekötésére. Ezek a megoldások, amelyek részletezése túlnő ennek a tárgynak a tematikáján, meghatározza az indukált feszültség és az ágramok számításának módját.

### A nyomaték kialakulása és nagysága

Tekintsünk egy kompenzált, segédpólusos gépet, amelynek közepes légrésindukciója  $B_{lk}$  és az indukcióvonalak a pólus íves kialakításának következtében sugárirányúak. Ha az armatúra teljes árama  $I_a$  és a párhuzamos ágparók száma  $a$ , akkor az armatúra  $z$  számú vezetőjének mindegyikében  $I^* = I_a / 2a$  nagyságú áram folyik. Ennek az áramnak és a  $B_{lk}$  indukciónak együttes hatására az egyes  $\ell$  hosszúságú vezetőkre  $F^*$  nagyságú erő hat:

$$F^* = B_{lk} \ell I^* = B_{lk} \ell \frac{I_a}{2a}.$$

Mivel az indukció merőleges a vezető irányára, az keletkező erő iránya merőleges az  $\ell$  és  $B_l$  által meghatározott síkra, vagyis érintő irányú.

Ha az armatúra átmérője  $D$ , akkor ez az  $F^*$  erő a forgórészre  $M^*$  nagyságú nyomatékot fejt ki

$$M^* = F^* \frac{D}{2} = B_{lk} \ell \frac{D}{2} \frac{I_a}{2a}.$$

Ezt a nyomatékot a pólusfluxussal is felírhatjuk: ha az egy pólus alatti felület  $A_p = D\pi/2p$  és

$\Phi = B_{lk} A_p$ , akkor  $B_{lk} = \frac{\Phi}{A_p}$ , amit az  $M^*$  nyomaték kifejezésébe helyettesítve:

$$M^* = \frac{\Phi}{A_p} \ell \frac{D}{2} \frac{I_a}{2a} = \frac{\Phi}{D\pi l} 2pl \frac{D}{2} \frac{I_a}{2a} = \frac{p}{2\pi a} \Phi I_a.$$

Feltételezve, hogy az armatúra valamennyi vezetőjére közel azonos nagyságú erő hat,  $z$  számú vezető esetén a teljes nyomaték  $M = zM^*$

$$M = \frac{zp}{2\pi a} \Phi I_a = k \Phi I_a.$$

Itt  $k$  azonos az indukált feszültség számításánál kapott állandóval  $k = \frac{z}{2\pi a} p$ .

A képletből megállapíthatóan a nyomaték iránya akkor változik meg, ha vagy fluxus irányát, vagy az armatúraáram irányát megváltoztatjuk. A kettő egyidejű megváltoztatása esetén a nyomaték iránya nem változik. (Ez a magyarázata annak, hogy a soros gerjesztésű egyenáramú motorokat elvben váltakozó árammal is lehet működtetni.)

### A pólusgerjesztés létrehozása

Az egyenáramú gép mágneses terét alapvetően a főpólus gerjesztése által létrehozott indukció határozza meg. A főpólusok legtöbbször elektromágnesek, de használnak állandó mágnesből készült pólusokat is (pl. az egyenáramú szervomotorokban). Gerjesztett pólusoknál a pólustörzsön elhelyezett tekercsek áramköri kapcsolása alapján négy megoldást különböztetünk meg:

- külső gerjesztésről akkor beszélünk, ha a gerjesztő áram független az armatúra áramkörétől. A külső gerjesztő tekercs nagy menetszámú, kis keresztmetszetű vezetőből készül.

- párhuzamos gerjesztésnél (mellékáramkörű vagy sönt gépek) a gerjesztő tekercset az armatúra kapcsairól táplálják. Ez a megoldás csak abban különbözik a külső gerjesztéstől, hogy itt az armatúra feszültségének változása egyúttal a gerjesztő feszültség változását is jelenti. A párhuzamos gerjesztő tekercs is nagy menetszámú, kis keresztmetszetű vezetőből készül.

- soros gerjesztésnél (főáramkörű gépek) a gerjesztő tekercseket az armatúra áramkörébe kapcsolják, így a gerjesztő áram megegyezik az armatúraárammal, annak változásával együtt változik, tehát munkapont-függő. A soros gerjesztő tekercs kis menetszámú, nagy keresztmetszetű vezetőből készül.

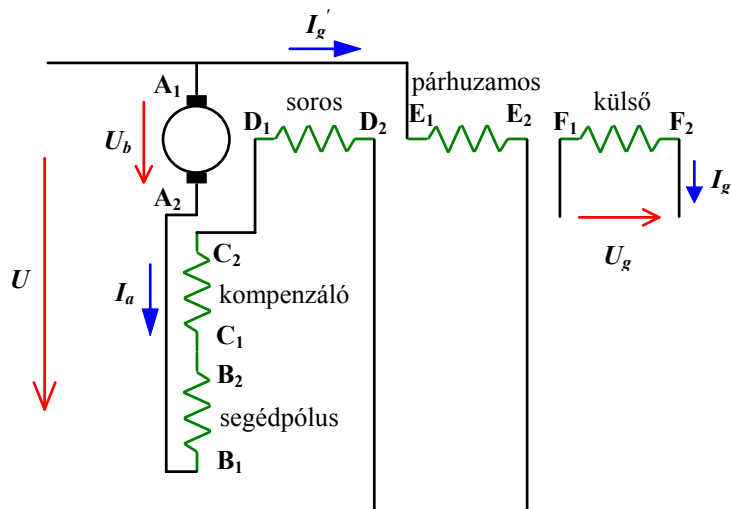
- a vegyes (kompaund) gerjesztésű gépeknek két gerjesztő tekercse van, egy soros és egy párhuzamos vagy külső. Ennél a megoldásnál a gerjesztés egyik része állandó, másik része az armatúraárammal (terheléssel) változik.

### Az egyenáramú gép kapcsolása és áramköri vázlata

Az előzőekben megvizsgáltuk a feszültség indukálás és a nyomatékképzés folyamatát és számítási módját.

Gerjesztett pólusokat feltételezve minden esetben, amikor az armatúra vezetőiben áram folyik, a gépben nyomaték képződik, és minden esetben, amikor a gép forog, az armatúra vezetőiben feszültség indukálódik. A nyomaték és a belső feszültség jelenléte független attól, hogy a gép motorként vagy generátorként üzemel.

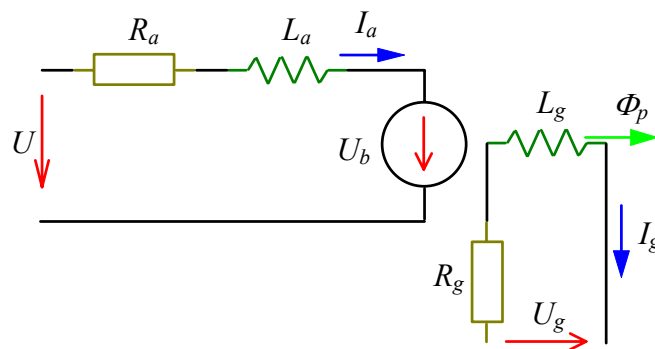
Motor üzemben a gép a tengelyén leadott  $M$  nyomatékkal hajtja a hozzákapcsolt és  $M_t$  terhelőnyomatékokat képviselő mechanikai rendszert, az armatúra  $U_b$  belső feszültsége pedig egyensúlyt tart a kefékhez vezetett  $U$  kapocsfeszültséggel. Motor üzemben  $M > M_t$  és  $U > U_b$ .



*Az egyenáramú gép kapcsolási rajza és kapcsainak jelölése*

Generátor üzemben a gép tengelyét kívülről forgatják, a keletkező  $M$  nyomaték egyensúlyt tart az  $M_h$  külső hajtónyomatékkal, az indukált belső feszültség hatására pedig áram folyik át a gép kapcsaira kötött terhelésen. Generátor üzemben  $M < M_h$  és  $U < U_b$ .

Az ábrán az egyenáramú gép kapcsolási rajza és a kapcsok szabványos jelölése látható:  $A_1-A_2$ : armatúra,  $B_1-B_2$ : segédpólus,  $C_1-C_2$ : kompenzáló tekercs,  $D_1-D_2$ : soros gerjesztő tekercs,  $E_1-E_2$ : párhuzamos gerjesztő tekercs,  $F_1-F_2$ : külső gerjesztő tekercs. A gép csatlakozási pontjait a kapocstáblán helyezik el. Ide nem vezetnek ki minden tekercsvéget, az armatúra áramkört belső elkötésekkel alakítják ki. Egy külső gerjesztésű gép kapocstábláján általában  $A_1$ ,  $C_2$ ,  $F_1$  és  $F_2$  jelű csatlakozókat találunk.



*A külső gerjesztésű kompenzált egyenáramú gép egyszerűsített áramköri vázlata*

A legegyszerűbb áramköri vázlaton az armatúra valamennyi ellenállását és valamennyi induktivitását egy-egy koncentrált soros elemmel veszik figyelembe. Az  $R_a$  armatúraköri ellenállás tartalmazza az armatúravezetők, a segédpólus, a kompenzáló tekercs, a soros gerjesztő tekercs, a kefék és a közöttük lévő átkötések ellenállását, az  $L_a$  armatúraköri induktivitás pedig magában foglalja mindezek ön- és kölcsönös induktivitását. A párhuzamos vagy a külső gerjesztő áramkör tekercsekből és azok átkötéseiből áll, a gerjesztő kört az  $R_g$  ellenállással és az  $L_g$  induktivitással jellemezzük.

Az egyszerűsített rajzokon a segédpólust és a kompenzáló tekercset nem ábrázolják.

### **Az egyenáramú gép alapegyenletei**

A továbbiakban feltételezzük, hogy a gép kompenzált, segédpólusos, így az armatúreakció hatásaival nem számolunk.

Az egyenáramú gép áramköri felépítését és működését tükröző egyszerűsített helyettesítő áramkör alapján az  $U$  feszültségre kapcsolt gép (armatúra-köri) feszültségegyenlete

$$U = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + u_b$$

ahol  $R_a$  – az armatúrakör összes ellenállása,  $L_a$  – az armatúrakör összes induktivitása.

Állandósult állapotban:

$$U = I_a R_a + U_b.$$

Az előzőekben már bemutatott számítások alapján az  $U_b$  belső feszültség és az  $M$  nyomaték a  $\Phi$  fluxussal arányos

$$u_b = k \Phi \Omega,$$

$$M = k \Phi i_a.$$

A gerjesztő kör feszültség egyenlete állandósult állapotban

$$U_g = I_g R_g.$$

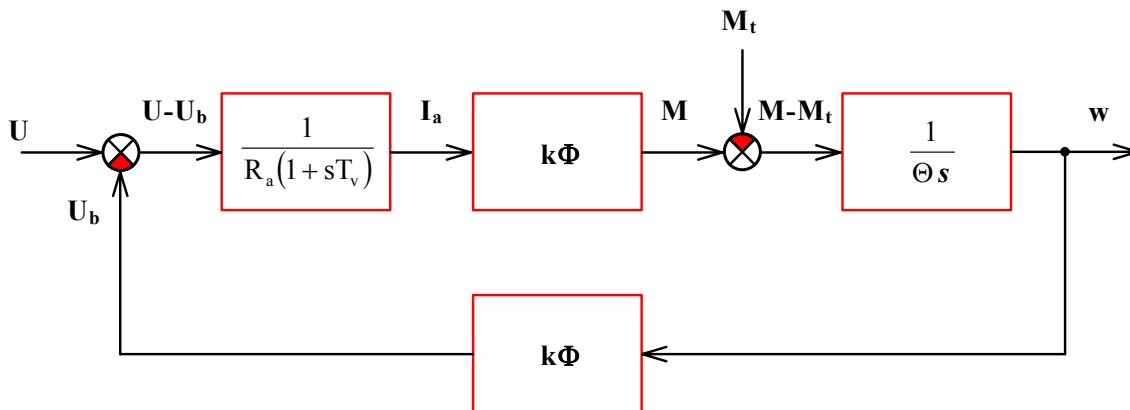
Az  $M$  nyomaték és a  $w_m$  mechanikai fordulatszám megváltozása közötti összefüggés – a mozgásegyenlet

$$M_d = M - M_t = \Theta \frac{d\Omega_m}{dt},$$

ahol  $M_d$  – a dinamikai nyomaték,  $M$  – a gép nyomatéka,  $M_t$  – a terhelőnyomaték (vagy hajtőnyomaték),  $\Theta$  – a teljes mechanikai rendszer (az egyenáramú gép és a hozzá kapcsolt mechanizmus) tehetetlenségi nyomatéka.

### A külső gerjesztésű gép blokkvázlata

A Laplace-transzformált alapegyenleteknek megfelelő blokkvázlat jól szemlélteti a külső gerjesztésű gép működését.



A külső gerjesztésű egyenáramú gép blokkvázlata

### Az egyenáramú gép jelleggörbéi

A gépek üzemi tulajdonságait legjobban az úgynevezett jelleggörbék (karakterisztikák) mutatják. Az üzemmódtól függően más-más összefüggés fejezi ki a jellegzetességeket.

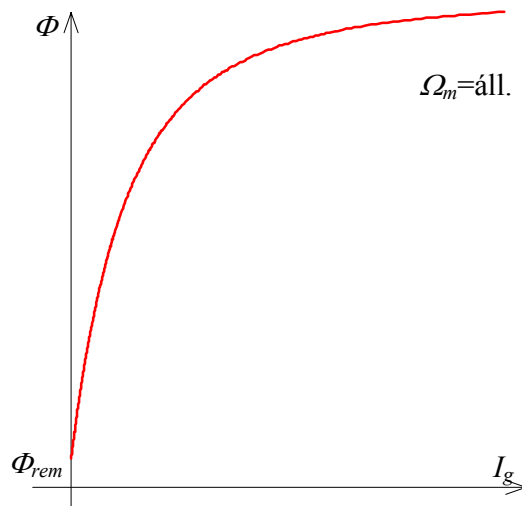
Generátor üzemben legfontosabb az üresjárású és a külső jelleggörbe. Az  $U_0(I_g)$  üresjárású jelleggörbe állandó (legtöbbször névleges) fordulatszám mellett a kapcsolófeszültség változását mutatja a gerjesztő áram függvényében. Ez a görbe feszültség léptékben adja a gép mágnesesítési görbét és betekintést ad a mágneses kör telítési viszonyaira, mert üresjárásban a kapcsolófeszültség megegyezik az indukált belső feszültséggel (ami állandó fordulatszámon ará-

nyos a pólusfluxussal), a gerjesztő áram pedig a pólusgerjesztéssel (a mágneses térerősséggel) arányos. Az  $U(I_a)$  külső jelleggörbe a kapocsfeszültség változását mutatja a terhelőáram (armatúraáram) függvényében, állandó pólusfluxus mellett. Ez a görbe információt ad a belső ellenálláson eső feszültség és az armatúra reakció nagyságáról.

Motor üzemben leggyakrabban az  $\Omega_m(M)$  mechanikai és az  $M(I_a)$  sebességi jelleggörbét használják.

### A külső gerjesztésű gép jelleggörbéi

Kompenzált gépnél a  $\Phi$  hasznos fluxus és a pólustekercs  $I_g$  gerjesztő árama közötti kapcsolatot a mágnesezési görbe adja, amelynek lineáris szakaszán a fluxus arányos a gerjesztő árammal.



A pólusfluxus és a gerjesztő áram kapcsolata

Az ábrán aránytalanul felnagyított  $\Phi_{rem}$  remanens fluxus a névleges érték 2-4%-a.

Az armatúra feszültségegyenlete alapján a kapocsfeszültség

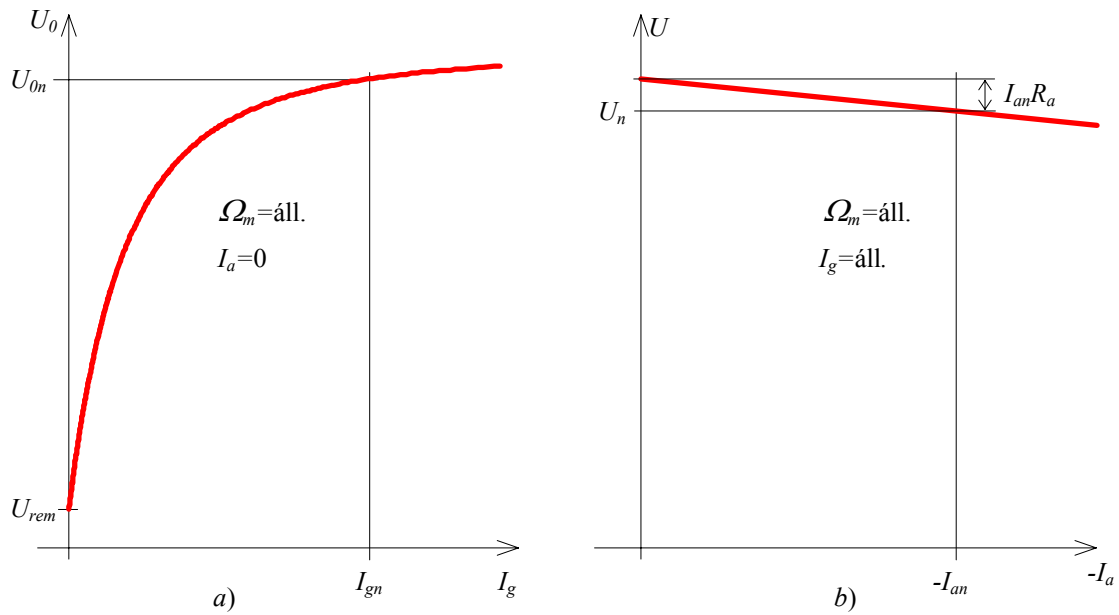
$$U = I_a R_a + U_b = I_a R_a + k\Phi \Omega.$$

Ha az armatúra árammentes ( $I_a=0$ ), akkor az állandó szögsebességen felvett  $U_0(I_g)$  üresjárási jelleggörbe gyakorlatilag megegyezik a fluxus-görbével. Az  $U(I_a)$  külső jelleggörbe  $I_g=áll.$  és  $\Omega_m=áll.$  mellett  $U_0=k\Phi\Omega$  értékről indul és enyhén eső jellegű. (Generátor üzemben  $U_b > U$ , ezért az  $I_a$  armatúraáram negatív.) A külső gerjesztésű generátor kapcsainak rövidzárásakor fellépő  $I_{az}$  rövidzárási áram a névleges áram (15-25)-szöröse lehet

$$I_{az} = \frac{k\Omega_m\Phi}{R_a}.$$

Motor üzemben a terhelés növelésekor – az armatúra  $I_a R_a$  feszültségesése miatt – az  $\Omega_m$  szögsebesség és az  $U_b$  belső feszültség csökken:

$$\Omega_m = \frac{U_b}{k\Phi} = \frac{U - I_a R_a}{k\Phi} = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I_a R_a}{k\Phi} = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M R_a}{(k\Phi)^2}.$$

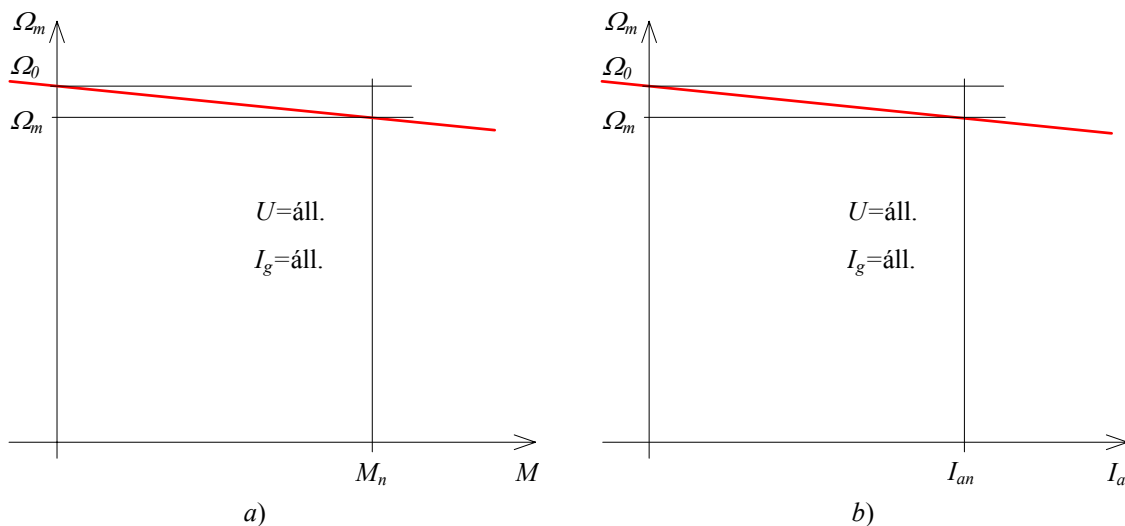


A külső gerjesztésű gép a) üresjárási és b) külső jelleggörbéje generátor üzemben

Az  $\frac{U}{k\Phi} = \Omega_{0m}$  tag az üresjárási szögsebesség, amivel

$$\Omega_m = \Omega_{m0} - \frac{I_a R_a}{k\Phi} = \Omega_{m0} - \frac{M R_a}{(k\Phi)^2}.$$

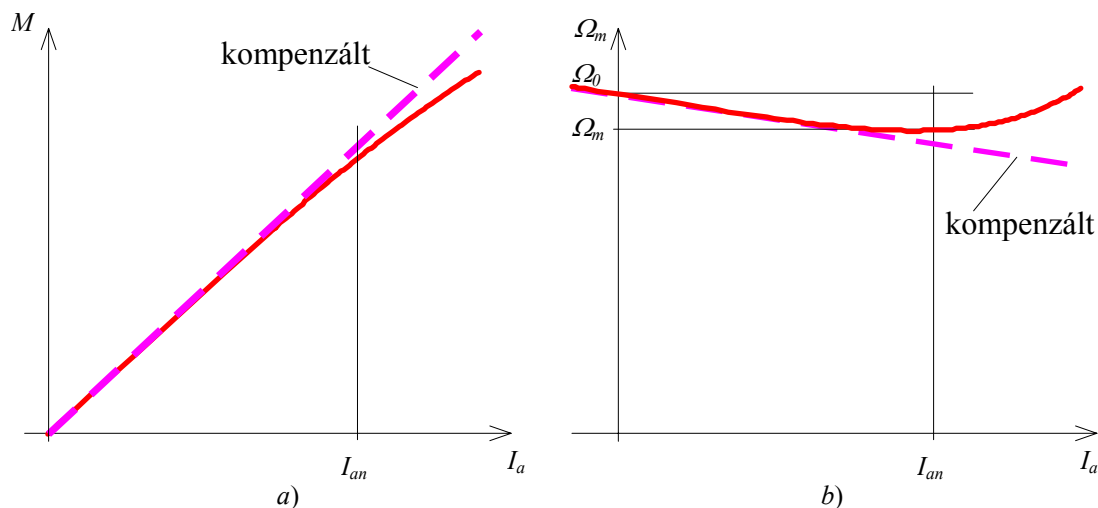
Állandó  $\Phi$  fluxus esetén a  $\Omega_m(M)$  mechanikai és az  $\Omega_m(I_a)$  sebességi jelleggörbe azonos menetű.



A külső gerjesztésű gép a) mechanikai és b) sebességi jelleggörbéje motor üzemben

Negatív terhelőnyomaték (hajtónyomaték) fellépésekor a gép  $\Omega_m$  szögsebessége nagyobb lehet az  $\Omega_{0m}$  üresjárási értéknél, ilyenkor a gép munkapontja automatikusan átkerül a motor üzemből a generátor üzemi tartományba.

Kompenzált gépnél az eredő fluxus  $\Phi = \Phi_p$ .



Kompenzálatlan külső gerjesztésű gép a)  $M(I)$  és b) sebességi jelleggörbéje motor üzemben

A kompenzálatlan gép fluxusa az armatúraáram növekedésével csökken (az armatúreakció hatására), ami a fordulat emelkedéséhez vezet. A fluxuscsökkenés a nyomatékra is hat, csökken az azonos armatúraáramnál képződő nyomaték nagysága.

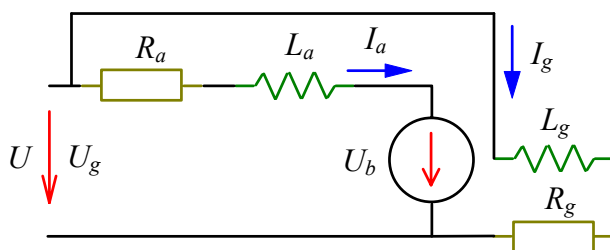
Kompenzálatlan gépnél az eredő fluxus:  $\Phi \leq \Phi_p$ .

A külső gerjesztésű motor túlterhelésekor igen nagy áram léphet fel, az álló állapot rövidzárási áram a névleges áram (15-50)-szöröse is lehet:

$$I_{rz} = \frac{U}{R_a}$$

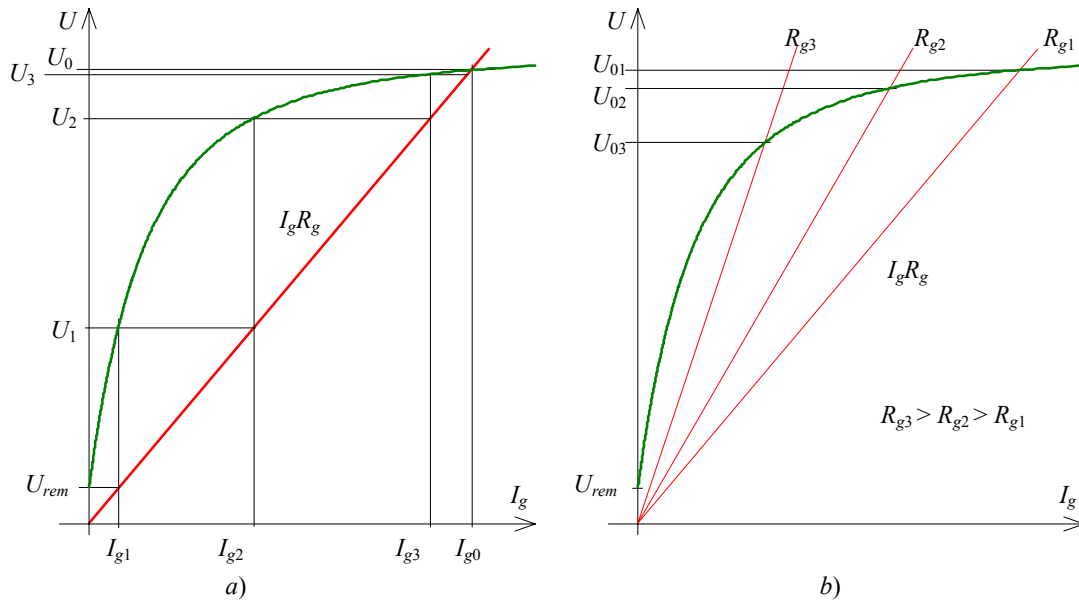
### A párhuzamos gerjesztésű (sönt) gép jelleggörbéi

A párhuzamos gerjesztésű (mellékáramkörű) gép generátor üzemi  $U_0(I_g)$  üresjárási jelleggörbéje gyakorlatilag egyezik a külső gerjesztésű gépével. Ugyan az armatúra nem lehet árammentes, mert a gerjesztő tekercset a kapocsfeszültségről táplálják, de a gerjesztő áram a névleges áramnak mindössze 1-2%-a, ezért az  $R_a$  ellenálláson üresjárásban eső feszültség elhanyagolható.



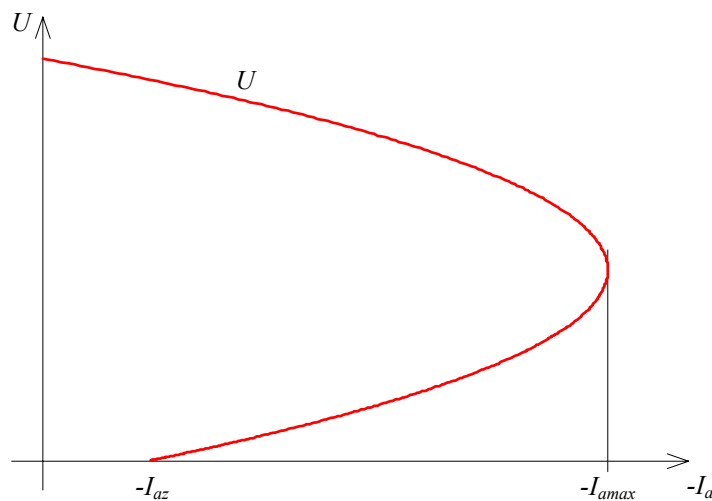
A párhuzamos gerjesztésű egyenáramú gép áramköri vázlatja

A gerjesztő kör és az armatúra párhuzamos kapcsolása miatt egyensúlyi állapot csak annál a feszültségnél és gerjesztő áramnál állhat be, amelyre  $U_0(I_g) = U_g = I_g R_g$ . Az  $U_0(I_g)$  üresjárási görbe és az  $U_g(I_g)$  egyenes metszéspontja adja a söntgenerátor (dinamó) állandósult üresjárási munkapontját. A jelleggörbe nem nullából, hanem az  $U_{0\text{ rem}}$  remanencia feszültségtől indul, amit a pólusok gerjesztés nélkül fennálló  $\Phi_{\text{rem}}$  maradék fluxusa indukál az armatúrában.



a) A párhuzamos gerjesztésű gép üresjárási jelleggörbéje, b) a gerjesztőköri ellenállás változtatásának hatása generátor üzemben

A gép generátorként úgynevezett öngerjedésre képes, ennek folyamata az *a* ábrán követhető. A névleges érték 2-4%-át kitevő  $U_{rem}$  remanencia feszültség hatására  $I_{g1}$  gerjesztő áram folyik. A gerjesztő tekercs megfelelő polaritású bekötése esetén az  $I_{g1}$  áram fluxusa hozzáadódik a remanenciához és a feszültség  $U_1$ -re növekszik. Helytelen elkötés esetén  $I_{g1}$  legerjeszti a remanenciát, ezt nevezik „öngyilkos” kapcsolásnak. Az  $U_1$  feszültség  $I_{g2}$ -re növeli a gerjesztő áramot, ettől a feszültség  $U_2$ -re nő, a gerjesztő áram  $I_{g3}$ -ra stb. egészen az egyensúlyt jelentő  $U_0(I_{g0})$  pontig. Külső ellenállás beiktatásával a gerjesztő kör teljes  $R_g$  ellenállása, vele az  $I_g R_g$  egyenes meredeksége növelhető, lehetővé téve az állandósult üresjárási munkapont változtatását. Létezik egy  $R_{gmax}$  érték, amelynél az  $U_g(I_g)$  egyenes csak érinti az  $U_0(I_g)$  görbét,  $R_g > R_{gmax}$  ellenállás esetén az  $I_g R_{gmax}$  egyenes nem metszi a görbét, ami azt jelenti, hogy a gép nem képes felgerjedni.



A párhuzamos gerjesztésű generátor külső jelleggörbéje



Az öngerjesztés elvét Jedlik Ányos ismerte fel 1859-ben, első öngerjesztéses gépét 1863-ban készítette. A hivatalos felfedező viszont a Jedliktől függetlenül tevékenykedő és az elvet szabadalmaztató Werner von Siemens<sup>1</sup>.

Az  $U(I_a)$  külső jelleggörbén láthatóan a generátor terhelését növelve (a terhelő ellenállás értékét csökkentve) az armatúraáram egy ideig nő, majd egy  $I_{amax}$  értéket elérve csökkenni kezd a lecsökkent kapocsfeszültség (egyben gerjesztő feszültség) miatt. A kapcsokat rövidre zárva a feszültség nullára, az armatúraáram a rövidzárási értékre csökken. A rövidzárási áramot a remanencia feszültség okozza, ezért nagysága a névleges áram néhány százaléka.

$$I_{az} = \frac{U_{rem}}{R_a}$$

Állandó  $U$  kapocsfeszültség mellett a párhuzamos gerjesztésű motor üzemi jellemzői meg- egyeznek a külső gerjesztésnél kapottakkal. Ha a kapocsfeszültség változik, akkor változik a gerjesztő áram és így a fluxus is, ami a görbéket telítésfüggővé teszi,

$$I_g = \frac{U}{R_g}, \quad \Phi = cI_g = \frac{cU}{R_g}$$

A mágnesezési görbe lineáris szakaszán  $\Phi = cI_g$ , itt a mechanikai és a sebességi jelleggörbe:

$$\Omega = \frac{R_g}{kc} - \frac{MR_a}{U^2} \left( \frac{R_g}{kc} \right)^2$$

$$\Omega = \frac{U - I_a R_a}{kc \frac{U}{R_g}} = \frac{R_g}{kc} - \frac{I_a}{U} \frac{R_a R_g}{kc}$$

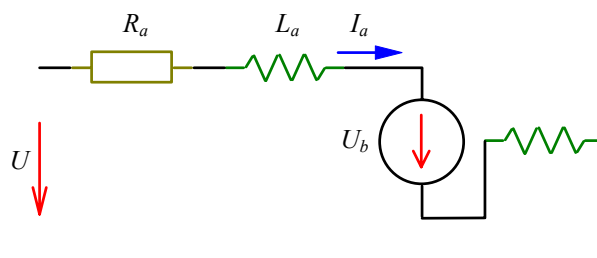
vagyis a  $\Omega_{0m} = \frac{R_g}{kc}$  üresjárású szögsebesség nem függ a kapocsfeszültség változásától, míg a fordulatszámese fordítottan arányos

- a sebességi jelleggörbénél a feszültséggel,
- a mechanikai jelleggörbénél a feszültség négyzetével.

A külső gerjesztésű géphez hasonlóan negatív terhelőnyomatéknál a söntmotor munkapontja is automatikusan átkerül a generátor üzemi tartományba.

### A soros gerjesztésű (series) gép jelleggörbéi

A soros gerjesztésű (főáramkörű) gép üresjárását csak külső gerjesztéssel lehet értelmezni, (hiszen soros kapcsolásban  $I_g = I_a$ ), emiatt az üresjárású jelleggörbe ugyanolyan, mint a külső gerjesztésű gépé.



A soros gerjesztésű egyenáramú gép áramköri vázlata

A soros gerjesztésű gép elvileg működhet generátorként is, de gyakorlatilag csak motorként használják. Generátor üzemben külső vagy öngerjesztéssel gondoskodni kell a gép felgerjesz-

<sup>1</sup> von Siemens, Ernst Werner (1816-1892) német mérnök, kutató

téséről. A külső jelleggörbe felrajzolásánál figyelembe kell venni, hogy a gépet az armatúra áram gerjeszti, a fluxus terhelésfüggő, ezért az  $U_b$  belső feszültség és az  $U$  kapocsfeszültség kb. a névleges áramig nő. Nagyobb áramnál – a telítődés következtében – az  $U_b$  belső feszültség növekedése kisebb az  $I_a R_a$  feszültségesés növekedésénél, ez a kapocsfeszültség csökkenését okozza. Rövidzáraskor a gépben nagy áram folyik, amit a maximális gerjesztésnek megfelelő legnagyobb belső feszültség az  $R_a$  eredő armatúra-ellenálláson hajt át.

Az armatúraköri ellenállás viszonylag nagy (armatúra + gerjesztő tekercs), ezért a zárlati áram a névlegesnek csak kb. háromszorosa.

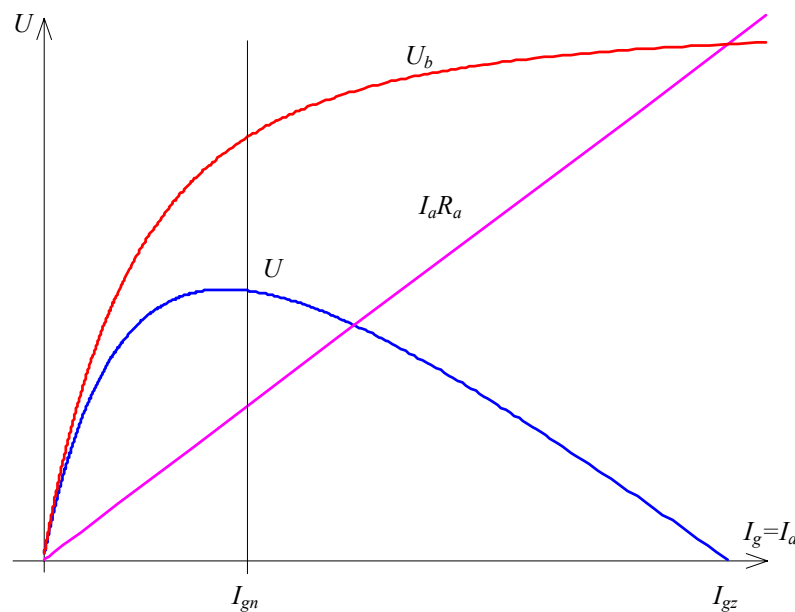
A soros gerjesztésű motor mechanikai és sebességi jelleggörbéit csak a mágnesezési görbe ismeretében lehet felrajzolni.

A belső feszültség  $U_b = k\Phi(I_a)\Omega$  (a lineáris szakaszon  $U_b = kcI_a\Omega$ ), a nyomaték  $M = k\Phi(I_a)I_a$ , (a lineáris szakaszon  $M = kcI_a^2$ ). Ennek megfelelően a szögsebesség

$$w = \frac{U}{k\Phi(I_a)} - \frac{I_a R_a}{k\Phi(I_a)} = \frac{U}{k\Phi(I_a)} - \frac{MR_a}{[k\Phi(I_a)]^2},$$

illetve a mágnesezési görbe egyenes szakaszán

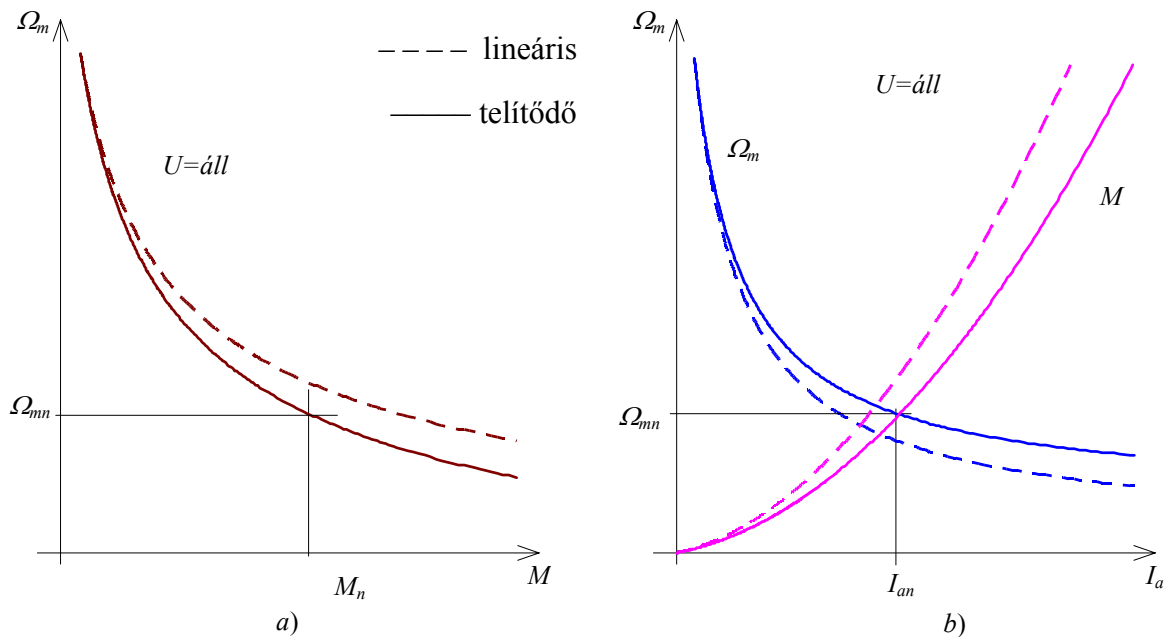
$$\Omega = \frac{U}{kcI_a} - \frac{R_a}{kc} = \frac{U}{\sqrt{kcM}} - \frac{R_a}{kc}.$$



A soros gerjesztésű gép külső jelleggörbéje generátor üzemben

Az elméleti mechanikai és sebességi jelleggörbe hiperbolikus jellegű, az egyenletek a terheletlen állapothoz nem adnak véges szögsebesség értéket. A valóságos soros motor szögsebessége kis terheléseknél az igen kis fluxus miatt nagymértékben emelkedhet és megengedhetetlen értéket is elérhet. A nagy szögsebességgel járó centrifugális erők a forgórészt károsíthatják és akár a kommutátor széteséséhez, „kommutátor robbanáshoz” is vezethetnek. (Ez külső gerjesztésű motornál is előfordulhat, ha a gerjesztő köre megszakad.)

Az ábrán a szaggatott vonallal rajzolt görbék lineáris  $\Phi(I_a)$  kapcsolatot feltételezve készültek. A telítődő szakaszon ugyanakkora (gerjesztő) áramhoz kisebb fluxus tartozik, ezért a szögsebesség nagyobb, a nyomaték pedig kisebb.

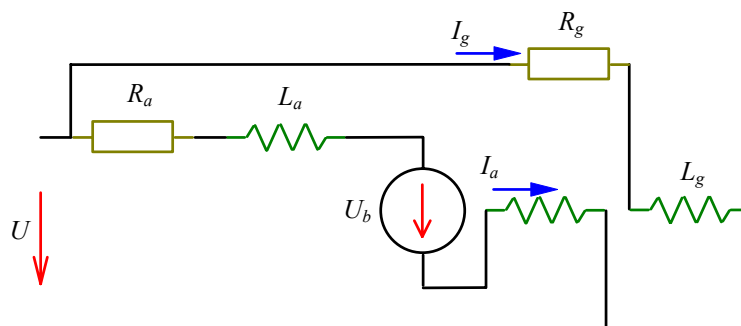


A soros gerjesztésű gép a) mechanikai és b) sebességi, valamint  $M(I_a)$  jelleggörbéje motor üzemben

A soros gerjesztésű motor jellegzetessége, hogy szögsebessége a terheléssel nagymértékben csökken, nyomatéka pedig nő. Ez a tulajdonság vontatási és anyagmozgatási alkalmazásoknál előnyös, mert egyrészt nagy indítónyomatékot biztosít, másrészt nagyobb terheléseknél a fordulatszámcsökkenés csökkenti az áramfelvételt (például a külső gerjesztésű motorhoz képest). A soros motor munkapontja automatikusan nem, csak bonyolult kapcsolási folyamatok eredményeként kerülhet át a generátoros féküzemi tartományba, hiszen a gerjesztő áram irányát meg kell fordítani az armatúraáramhoz képest. Ezt a feladatot legegyszerűbben félvezetős kapcsolásoknál oldják meg.

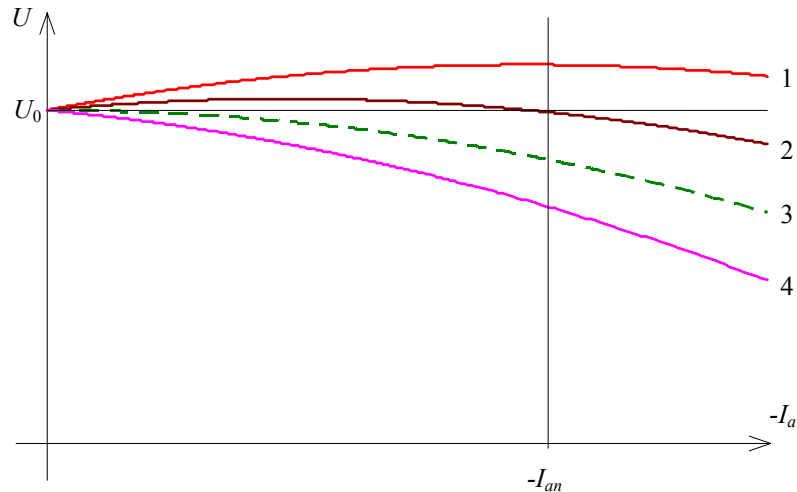
### A vegyes gerjesztésű (kompaund) gép jelleggörbéi

A vegyes (kettős) gerjesztésű generátor alapvetően párhuzamos vagy külső gerjesztésű, de van soros gerjesztő tekerce is, aminek terhelésfüggő fluxusa a külső jelleggörbe feszültségeseésének kiegyenlítését szolgálja, tehát a két gerjesztés egymást erősíti. Az eredő gerjesztés  $\mathcal{O}_e = N_p I_g + N_s I_a$ , ha  $N_p$  a párhuzamos és  $N_s$  a soros gerjesztő tekeres menetszáma.



A vegyes gerjesztésű egyenáramú gép áramköri vázlatja

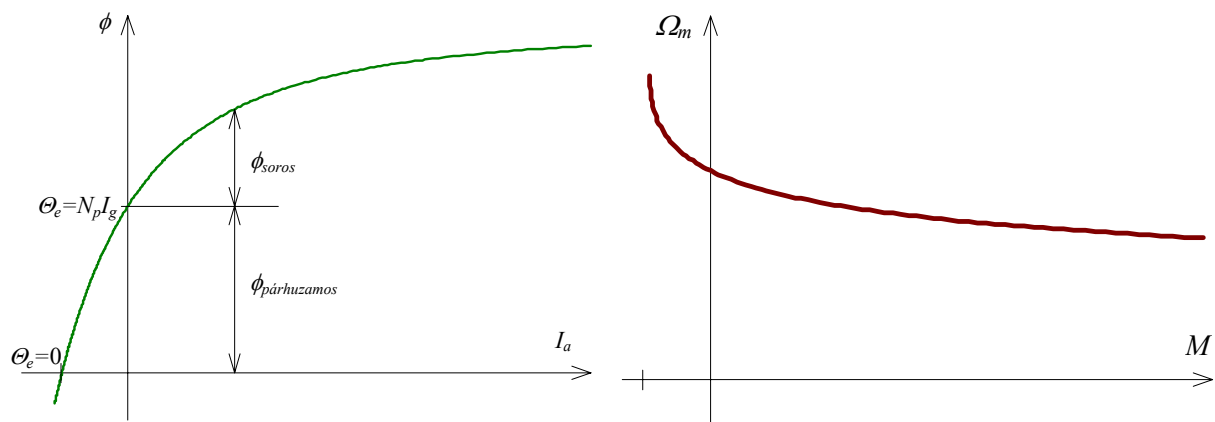
A soros gerjesztés nagysága szerint a gépeket négy kategóriába sorolják. Kompaund a gép, ha névleges áramnál a kapocsfeszültség megegyezik az üresjárásival (2 görbe), túlkompaundált, ha nagyobb (1 görbe) és alulkompaundált, ha kisebb (4 görbe).



*A vegyes gerjesztésű generátor külső jelleggörbéi  
1-túlkompaundált, 2-kompaundált, 3- nem kompaundált, 4-alulkompaundált*

A két gerjesztésnek egymást erősíteni kell motor üzemben is, hogy üresjárásban se csökkenjen a fluxus nullára. A kettős gerjesztés eredményeképpen kialakuló  $\Phi(I_a)$  görbe szerint a fluxus csak valamilyen negatív áramnál válik nullává, üresjárásban megegyezik a párhuzamos gerjesztés fluxusával.

Végeredményben a mechanikai jelleggörbe lágyabb mint a külső gerjesztésű gépénél és a gép terheletlenül sem szalad meg.



*A vegyes gerjesztésű gép  $\Phi(I_a)$  és mechanikai jelleggörbéje*

### **Az egyenáramú motorok indítása és fordulatszám változtatása**

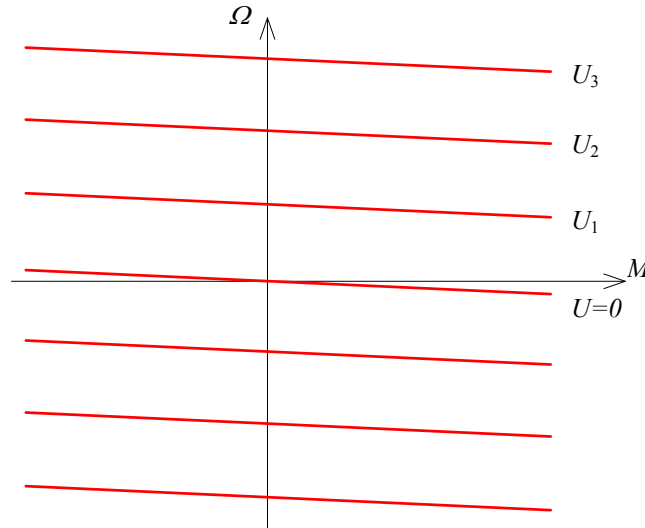
Állandó feszültségű egyenáramú hálózatról üzemelő motoroknál szükség lehet az indítási áram és nyomaték korlátozására. Az armatúraáram változatlan szögsebesség mellett a kapcsolófeszültségtől és az eredő armatúra-ellenállástól függ

$$I_a = \frac{U - U_b}{\Sigma R_a} = \frac{U}{\Sigma R_a} - \frac{k\Phi \Omega}{\Sigma R_a}$$

Ennek megfelelően két indítási módszert alkalmaznak: az armatúrával sorba kapcsolt külső ellenállásokat és a tápfeszültség változtatását. Ez a két módszer a fordulatszám változtatására is alkalmas.

Az állandó fluxusú gépnél a kapocsfeszültség változásával a mechanikai jelleggörbe üresjárási szögsebessége változik, a görbe meredeksége viszont állandó, vagyis az egyes feszültség értékekhez tartozó jelleggörbék párhuzamos eltolással adódnak

$$\Omega = \frac{U - I_a R_a}{k\Phi} = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M \Sigma R_a}{(k\Phi)^2}.$$



*Külső gerjesztésű motor mechanikai jelleggörbéi változó kapocsfeszültségnél*

A hajtás akkor üzemképes mind a négy térfegyedben, ha a változó feszültségű tápforrás lehetővé teszi mind a feszültség polaritásváltását, mind pedig az áram irányváltását.

### **Az egyenáramú motorok fordulatszámának változtatása**

A szögsebesség kifejezéséből következik, hogy adott terhelő nyomaték vagy armatúraáram mellett a szögsebesség a kapocsfeszültségtől, az armatúra-ellenállástól és a fluxustól függ. A kapocsfeszültség és az armatúra-ellenállás hatását a külső gerjesztésű gép mechanikai jelleggörbéjére az indítással kapcsolatban már áttekintettük. A fluxus változtatása kevésbé hatásos megoldás egyrészt azért, mert a telítés miatt inkább csökkenteni lehet, növelni alig, másrészt azért, mert a fluxus csökkenése az azonos armatúraáramhoz tartozó nyomatékot is csökkenti ( $M=k\Phi I_a$ ).

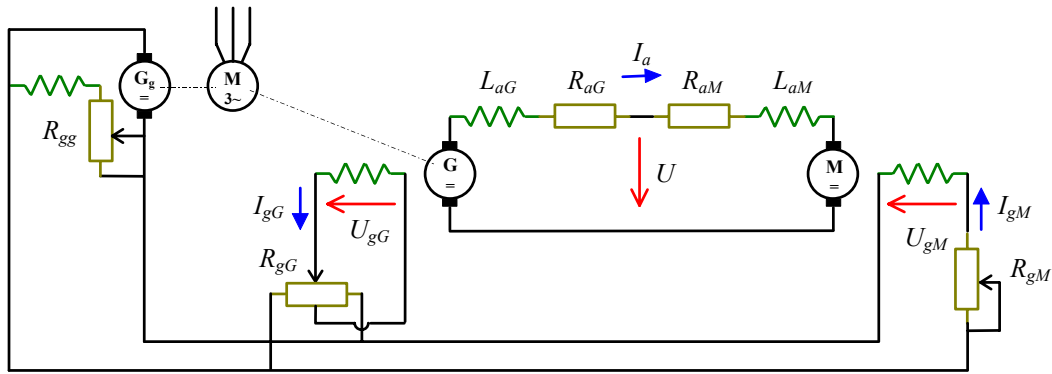
A külső gerjesztésű gép üresjárási szögsebessége és a sebességi jelleggörbe esése fordítottan arányos a fluxussal, a mechanikai jelleggörbe esése a fluxus négyzetével arányos fordítottan.

### **Kapocsfeszültség változtatása W. Leonard<sup>2</sup> gépcsoporttal**

A kapocsfeszültség folyamatos változtatásának leggyakoribb klasszikus megoldása a W. Leonard gépcsoport, korszerű félvezetős eszköze az egyenáramú szaggató és a vezérelhető egyenirányító. A kapocsfeszültséget a felfutás alatt mindhárom megoldásnál az áram folyamatos érzékelése alapján szabályozzák.

A W. Leonard rendszert az ábra mutatja. A  $G$  egyenáramú generátort egy váltakozó áramú vagy belső égésű motor hajtja közel állandó fordulaton. A hajtó motorral egy tengelyen lévő kisebb teljesítményű öngerjesztésű  $G_g$  generátor táplálja a  $G$  generátor és az  $M$  motor gerjesztő körét. A motor és a generátor armatúráját közvetlenül összekötik. A generátor gerjesztésének nagyságát és polaritását az  $R_{gg}$  ellenállással változtatják, a generátor  $U$  kapocsfeszültsége folyamatosan változtatható a  $-U_{max} \leq U \leq U_{max}$  tartományban.

<sup>2</sup> Leonard, Harry Ward (1861-1915) amerikai mérnök, feltaláló



A klasszikus W. Leonard rendszer kapcsolási vázlatja

### Ellenőrző kérdések

1. Az egyenáramú gép működési elve, mágneses terének fő összetevői.
2. Mekkora az egyenáramú gépek mágneses terének fordulatszáma?
3. Mi a kommutáció célja, mi a kommutátor szerepe?
4. Vázolja a kommutáció folyamatát, lehetséges lefolyását.
5. Milyen hatása van a kommutációnak a kefék által rövidrezárt menetben?
6. Mi a semleges zóna, mi a jelentősége?
7. Mi a reaktancia feszültség, mitől függ a nagysága?
8. Hogyan ellensúlyozható a reaktancia feszültség?
9. Mi az armatúra reakció, milyen hatása van a pólusfluxusra kefeeltolás esetén?
10. Hogyan ellensúlyozható az armatúra reakció a főpólus alatt és a hogyan a pólusközben?
11. Mik a segédpólus feladatai, milyen árammal gerjesztik, milyen mezőt hoz létre?
12. Mi a kompenzáló tekercs feladata, milyen árammal gerjesztik, milyen mezőt hoz létre?
13. Hogyan számítható a kompenzált külső gerjesztésű egyenáramú gép belső feszültsége?
14. Hogyan számítható a kompenzált külső gerjesztésű egyenáramú gép nyomatéka?
15. Írja fel a kompenzált külső gerjesztésű egyenáramú gép alapegyenleteit.
16. Rajzolja fel a kompenzált külső gerjesztésű egyenáramú gép áramkörti vázlatát.
17. Rajzolja fel a kompenzált külső gerjesztésű egyenáramú gép mechanikai jelleggörbáját.
18. Milyen gerjesztési megoldásokat alkalmaznak?
19. Rajzolja fel és értelmezze a külső gerjesztésű egyenáramú gép blokkvázlatát.
20. Hogyan hat a kapocsfeszültség változása a kompenzált külső gerjesztésű egyenáramú gép mechanikai jelleggörbéjére?
21. Rajzolja fel a soros gerjesztésű gép mechanikai jelleggörbáját.
22. Rajzolja fel és értelmezze a vegyes gerjesztésű gép  $\Phi(I_a)$  és mechanikai jelleggörbáját
23. Ismertesse a W. Leonard rendszer működését.

Összeállította: Kádár István  
2019. december