

1. A modul címe

Egyenáramú, állandó mágneses motorok és hajtások

1.1 lecke: A lecke címe

Állandómágneses egyenáramú motorok felépítése, működési elve.

Cél

Az állandómágneses egyenáramú motorok felépítésének, működési elvének, jelleggörbéinek, főbb sajátosságainak megismerése.

Követelmények

A hallgató legyen képes

- *ismertetni* a mágneses térben lévő áramjárta vezetőre ható erő-, és általa a forgórészben a nyomaték keletkezését, a motor mágneses erővonalainak útját, a tekercselés szerepét, a kommutátor szerepét, a motor alapegyenleteit, a fluxus és a nyomaték számítását, a motor szögsebesség-függvényeit, a mozgásegyenletet, a viszonylagos egységeket, a motor karakterisztikáját, az R ellenállás jelentőségét.
- *lerajzolni* a motor elvi felépítését, egy vezetőkeret végeinek kommutátor-kefe csatlakozását az indukciómentes zónában, elvi kapcsolási vázlatát, szögsebesség-áram karakterisztikáját változó feszültségekre, a sebességcsökkenés mértékét terhelt motorban.

Kulcsfogalmak:

A mágneses térben lévő áramjárta vezetőre ható erő, légrés, állórészkoszorú, kapocs- és a belső feszültség, gépállandó, hurkos tekercselés, kommutátor, indukciómentes zóna, mágneses indukció, fluxus, nyomaték, mozgásegyenlet, szögsebesség-függvény, motor karakterisztika, névleges ellenállás

Időszükséglet

A tananyag elsajátításához *körülbelül 140 percre* lesz szüksége

Tevékenységek

- *Olvassa el és jegyezze meg* a mágneses térben lévő áramjárta vezetőre ható erő-, és általa a forgórészben a nyomaték keletkezését, a motor mágneses erővonalainak útját, a tekercselés szerepét, a kommutátor szerepét, a motor alapegyenleteit, a fluxus és a nyomaték számítását, a motor szögsebesség-függvényeit, a mozgásegyenletet, a viszonylagos egységeket, a motor karakterisztikáját, az R ellenállás jelentőségét.
- *rajzolja le* a motor elvi felépítését, elvi kapcsolási vázlatát, a mágnesezési görbét, szögsebesség-áram karakterisztikáját változó feszültségekre, a sebességcsökkenés mértékét terhelt motorban,

1. Tananyag

Állandómágneses egyenáramú motorok felépítése, alkalmazásuk

Egyenáramú motorok: az állandó mágneses egyenáramú motor

Az igen széles körben alkalmazott, különféle módokon létrehozott mágnesterű egyenáramú motorok közül többségük mára háttérbe szorult a frekvenciaszabályozott váltakozóáramú motorok terjedése által, és új építéssel, fejlesztéssel gyakorlatilag szinte már csak az állandó mágneses fajták léteznek, főként az automatizált rendszerekhez, kis, és egészen kis teljesítményekkel és növekvő alkalmazási területtel (egy nagyobb felszereltségű korszerű autóban számuk elérheti az ötvenet.) Gyártóik rendszerint már motorhajtó, illetve motor-irányító vezérlővel együtt forgalmazzák, tipikusan számítógépen történő programozási- és nagyobb rendszerekbe illesztési lehetőséggel.

Vezérlőik a beavatkozáshoz szükséges egyenfeszültség nagyságát elektronikus vezérléssel, impulzus-szélesség modulációval, folytonos jelleggel - fokozat nélkül- változtatják.

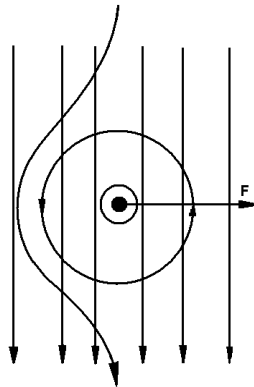
Fajlagos teljesítmény-adottságaik a folyamatos fejlesztéseknek köszönhetően sokat javultak. Irányító rendszereik révén sebesség-, vagy gyakrabban pozíciószabályott üzemet láthatnak el, utóbbiak egyes feladatokhoz egy szögmásodpercnél kisebb beállási hibájúak is lehetnek.

Nő a felhasznált mennyiség a repülési-űrtechnikai, az orvosi-sebészeti, más különféle vizsgálati, és a lézeres mérés technikai eszközökben.

A tanulmányok során az elméleti ismereteket a tárgy célkitűzésének megfelelően a működés megértéséhez szükséges mélységben vesszük.

Az állandómágneses (permanent magnet „PM”), egyenáramú „DC” rövidítve: PMDC motor felépítése, működési elve, alapegyenletei

A B indukciójú állandósult mágneses térben, annak irányára merőleges helyzetű vezetőben folyó áram hatására fellépő F erőt az 1. ábra szemlélteti.



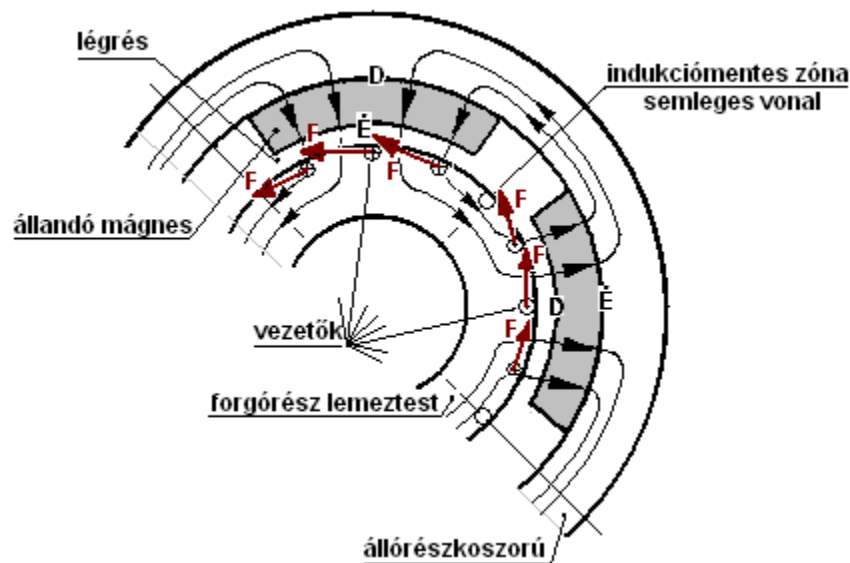
1. ábra. Az erő keletkezése mágneses térben lévő, áramjárta vezetővel kölcsönhatásban

Az I [A] árammal átjárt, l [m] hosszúságú vezető körül keletkező mágneses tér erővonalai a vezető iránya és az áram értéke által meghatározottak. A két mágneses tér kölcsönhatásaként a berajzolt vezető körüli kétféle eredetű erővonalak irányának helyi változásai a vezetőre erőt fejtenek ki, eredőként itt jobbra mutatóan. Értéke az indukció és az áram

$$F=B \times I l \text{ [N]}$$

vektor-, míg a hosszúsággal skalárszorzataként számítható (Lorentz-törvény). Itt B a mágneses indukció [Vs/m^2], I a vezetõben folyó áram, és l a vezetõ hossza [m]. Skalárszorzatként $F=B I l$, ha 90 fok szõghelyzetet tételünk fel a mágneses tér és a vezetõben folyó áram iránya között. A 2-nél többpólusú motorokban a mágnesek elhelyezése és mágnesezési iránya a légrésben gyakorlatilag sugárirányú mágneses indukció irányt eredményeznek, azaz a fenti skalárszorzat az összes vezetõre gyakorlatilag kis elhanyagolással alkalmazhatónak mondható.

Az állandó mágneses egyenáramú motor felépítését, szerkezeti elrendezését, az erõk keletkezését a 2. ábra mutatja.



2.ábra. Állandó mágneses egyenáramú motor felépítése és a nyomatékot képzõ erõk keletkezése

A motor állórésze nem lemeztelt, tömör lágvas koszorú, amelyre felerősítik a mágnes íveket, a pólusszámnak megfelelően. A mágnesekbõl az északi jelû oldalon lépnek ki az erõvonalak, gyakorlatilag merõlegesen áthaladnak a légrésen, majd a forgórésznek a 0,3-0,5 mm vastag lemezekbõl összeállított vasmagjában haladva a következõ, most déli pólus felé ismét átlépnek a légrésen, végül az állórészkoszorúban a nyilak szerint haladnak, zárt folyamat képezve.

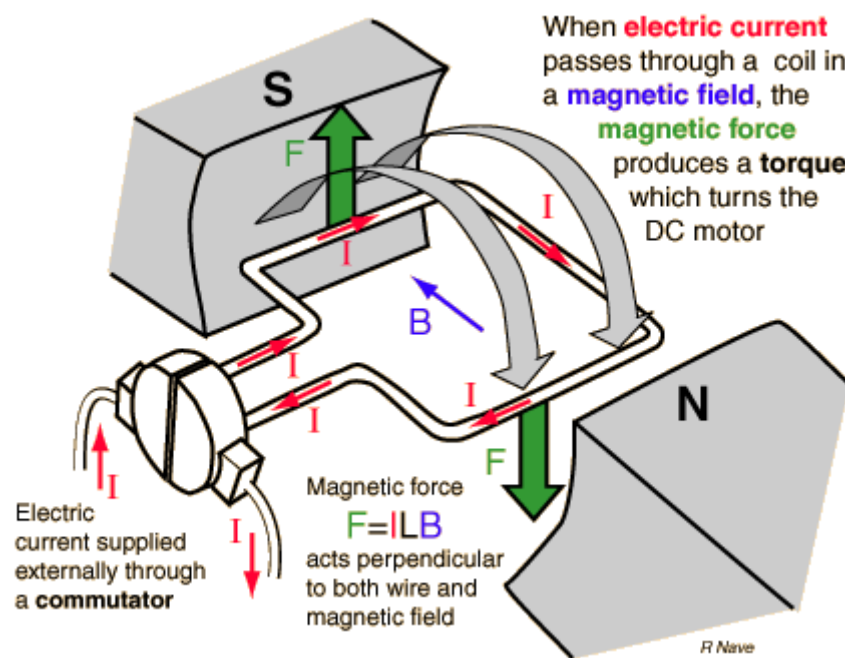
A behelyezett forgórészt megfelelő gépészeti kialakítás tartja a motor – villamos gép – forgástengelyében. A vezetõk egyenes elosztásban vannak elhelyezve, rögzítve a forgórész –rotor - palástjához közel kialakított hornyokban, vagy modern kis motorokban egy vékony héjszerkezetet alkotnak, a légrésben még biztonságosan elfordulhatóan. E megoldás csak egészen kis gépekben lehetséges, a nagyobbakban a vezetõk nagy méretük, s a fellépõ jelentõs kerületirányú erõk miatt csak a rotorpalást tengelyirányú hornyaiban helyezhetõk el.

A vezetõk vezetõkeretet, tekercselemet alkotnak egy vagy több menettel, és végeik a kommutátor egymástól elszigetelt szeleteihez, megfelelő sorrendben csatlakoznak. Ma lágforrasztás helyett besajtolást vagy hegesztést alkalmaznak a vezetõ és a kommutátor réz szeletei között.

Adott vezetőkeret – ami már egy menetet jelent - más-más oldalaként azok a vezetők, amelyek az ábrában rajzolva vannak, az egyes pólusok alatt hasonló viszonylagos helyzetben vannak. A berajzolt 3-3 vezető párijai, amelyek egy –egy menetet alkotnak, a pólusív ugyanazon helyein vannak a másik pólus alatti légrésben. Mivel a két szomszédos pólus alatt az indukció irányai ellentétesek, ugyanazon jellegű, tangenciális F erők létrehozatalához a megváltozott indukcióirány miatt az áram irányának is változnia kell. Ezt valósítja meg a forgó mechanikus szerkezet, a kommutátor, a kefékkel együttesen.

A következő ábra szemléletesen mutatja be mindezt. A mágnessaruk közötti indukció értéke B -vel jelölt. Mivel a vázlat szerinti motorból hiányzik a forgórész-vastest, a sokszorosra növekedett áthidalandó légréz miatti nagy mágneses ellenállás következtében csak igen kis indukció állhat fenn, így csak kis erőhatás és nyomaték keletkezhet.

Valós motorok mágneskörének útjában csak igen rövid, mikromotorokban néhány tized mm, nagyobb gépekben egy-két mm-nyi légréz - vasmentes szakasz - van, és így a mágneskör relatíve kis eredő mágneses ellenállásának köszönhetően a légrézben akár $0,7-1 \text{ Vs/m}^2$ mágneses indukció is létrehozható.

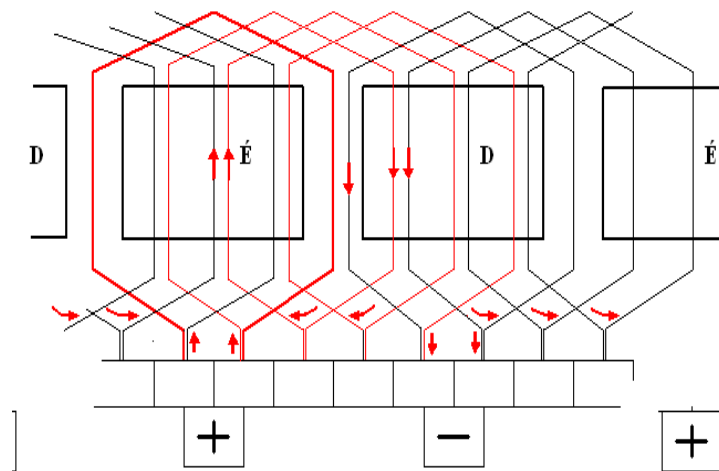


3. ábra. Az erők keletkezése egyszerűsített motormodellben

Az alábbi 4. ábra egy motorban lévő vezetőkeretből álló tekercselést ábrázol, amelyből a vastag pirossal rajzolt vezetőkeret a pólusok között tartózkodik éppen, az indukciómentes zónában. A menet két végéhez kapcsolt kommutátor szelet-pár éppen egy kefe előtt fut el, amely most rövidre zárja az itt egyetlen menet végeit. A mágneses térben mozgó vezetőben feszültség indukálódik:

$$U_{\text{ind}} = B \times v \cdot l \text{ [V]},$$

ahol v a sebesség [m/s], l a hasznos vezető hossz [m], amelyben a feszültség indukálódhat. Skalárszorzata az erő keletkezésénél említett 90° irányokkal $U_{ind} = B l v$.



4. ábra. Hurkos tekercselés vázlata egyenáramú gépben a kefék helyével és az áram kétirányú behaladásával, jobbra és balra hurkolódva történő tovahaladásával, körbejárva a teljes tekercselést

Ha a kefével érintkező keretben volna indukált feszültség, akkor a kefével zárt végű vezetőkeretben zárlati áram folyna. Ennek elkerülésére a keféket ott helyezik el, ahol az előttük elfutó tekercselemek végein indukált feszültség nem jelenik meg.

Az egymás után következő menetek a kommutátorhoz csatlakozásnál összekötődnek, azok egymáshoz hurkolódnak (az egyik fajta, ún. hurkos tekercselésnél). A kiterített tekercselési vázlatot, ha hengerként körbehajlított módon, végtelenítve képzeljük el, annak a folytonossá tétele minden horonyban (legalább) kettő vezetővel lesz csak lehetséges, egyik a másik alatt vagy mellett. Ezzel a továbbépítéssel a pozitív kefénel befolyó áram két irányban fog haladni: jobbra is és balra is tovahurkolódik a következő, negatív keféig. Az ábra így egy teljes, de csak egymenetű tekercsekből álló tekercselést mutat be.

A forgórészsel együtt forgó tekercsnek a kefével találkozási pontjain az áram iránya megfordul a kefétől való tovahaladásakor, amint ezt az alábbi szemléltető program is mutatja:



A motor mágneses viszonyainak néhány szempontja

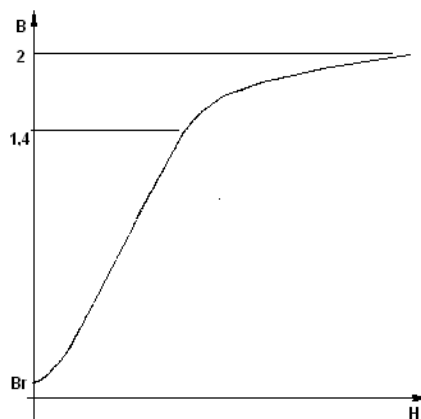
A motor vasból készült szakaszaiból összeállított mágneskörének mágneses ellenállását a kör mágneses feszültségét szolgáltatató állandó mágnes győzi le. A változó vaskeresztmetszetű szakaszok eltérő mágneses vezetése szabja meg a helyi indukció értékét, miközben a mágneskörön áthaladó fluxus értéke a kör teljes hosszában állandó marad:

$$\Phi = B A \quad [\text{Vs}],$$

ahol a B indukció és az A vaskeresztmetszet [m^2] értékei egy-egy mágnesköri szakaszra jellemzőek. A fenti 2. ábrán az állórészkoszorúé a legkisebb, és a pólusok alatt, a légrésre merőlegesen a legnagyobb a fluxus útjára merőleges vaskeresztmetszet. A forgórész hornyai, ha vannak, ott jelentősen lecsökkentik a fluxus útjába eső vaskeresztmetszetet, és emiatt a B értéke nagyra nőhet, ami már a vas telítődését eredményezheti. Ilyenkor a B értéke a szokásos

1~1,4 helyett 2~2,2 Vs/m^2 -re nőhet, amely az esetleg szükségessé váló további átmágneseződést már nem, vagy alig teszi lehetővé.

Az 5. ábra a mágnesezési görbe jellemző alakját és értékeit mutatja a térerősség függvényében. A görbe a B_r remanens indukciótól indul, és a könyöknek mondott meredekség-csökkenéstől kezd megjelenni a telítődés jelensége.



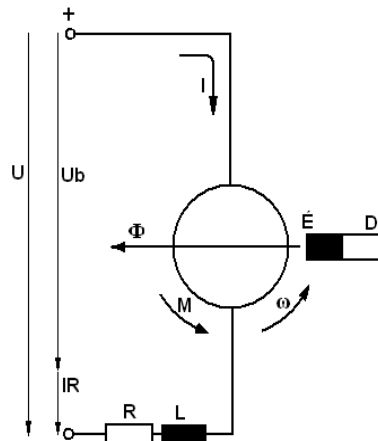
5. ábra. A vas mágnesezési görbéje és fontosabb pontjai

A telítési határ felett a vas mágnesezhetősége már csak a levegőével lesz azonos, azaz mintegy 800-szor kisebb, ekkora a vas és a levegő relatív permeabilitásának aránya. E tartományban a megfelelő indukció fenntartása akár ekkora arányú többlet-mágnesezést is igényelhetne. A természetes vas mágnesezési adottságai még költséges ötvözőkkel sem javíthatók jelentősen, emiatt adott fluxust igénylő villamos gép keresztmetszeti méreteit, vele az egész villamos gép méreteit a fluxus szükségessége arányában növelni kell, ugyanolyan indukció értékek mellett. A keresztmetszeteket, valamint a kívánt indukciót eredményező mágneses térerősséget, ebből a szükséges gerjesztést adó állandó-mágnes térfogatot a tervezési mágneses igénybevételek értékei szerint határozzák meg, sok részletszámítással elvégezhetően.

A motor forgatónyomatéka az 1. és 2. ábrák szerinti, áramjárta vezetőkenti F erők algebrai összegeként értelmezett tangenciális irányú erő-összeg és a sugár szorzataként keletkezik.

Elvi kapcsolási vázlat

A PMDC motorok működés közbeni állapotot jelentő elvi kapcsolási vázlata, rákapcsolt U tápfeszültségnél a 6. ábrán követhető.



6. ábra. Állandó mágneses egyenáramú motor elvi kapcsolási vázolata

A tápfeszültség hatására kialakuló áram átfolyik a forgórész tekercsén. Az R forgórész kör, másként nevezve armatúra-ellenállás jelképe akár el is hagyható, beleértődik a forgórész-jelképbe. Az L induktivitás az armatúra tekercs menetszámával és a mágneses jellemzőkkel arányos. Időben változó áramoknál az induktivitáson

$$U_L = L \frac{dI}{dt}$$

induktív feszültség keletkezik, amely az áramváltozást késlelteti, a

$$T_v = L/R$$

villamos időállandó szerint. L jelképe is elhagyható, és hatása a lassan változónak tekintett áramú üzemben akár el is hanyagolható, de gyorsan változó áramerősség esetén már számítani szükséges, amit a szimulációk realizálnak, lásd a hatásvázlat modellezése c. anyagot.

A berajzolt feszültség-jelképek, nyilak hossza célszerűen feszültség-arányos. Előjeleik megfelelnek a feszültségegyenletben lévő tagokénak, elősegítve az egyenletek grafikus ábrázolását, vele a motorüzem különböző eseteinek könnyebb megértését. Az U_b belső-, vagy indukált feszültség, és az IR áramarányos ohmos feszültség-esés összege azonos nagyságú az U kapocsfeszültséggel, motoros üzemben.

Az M nyomaték iránya szabványos motornál, szemből a tengelyre tekintve óramutató szerinti, de belülről, ahol keletkezik, a tengely felé tekintve előbbiével ellenkező, azaz balra forgató. A hatására kialakuló szögsebesség előjele is ilyen.

A PMDC motor alapegyenletei az alábbiak szerint fogalmazhatóak meg, $\Phi =$ állandó fluxus feltételezésével:

- kapocsfeszültség teljes alakja:

$$U = U_b + IR + L \frac{dI}{dt}$$

de elhanyagolható mértékű áramváltozási sebességnél röviden csak

$$U = U_b + IR.$$

- belső, vagy indukált feszültség:

$$U_b = k\Phi\omega$$

- gépállandó:

$$k = \frac{zp}{a} \frac{1}{2\pi},$$

ahol: z az összes vezető-, p a póluspárok-, a a párhuzamos ágpárok száma. A szokásos hurkos tekercselésnél $p/a = 1$.

- nyomaték: a mechanikaival egyenértékű P_b belső teljesítményből:

$$M = \frac{P_b}{\omega} = \frac{U_b I}{\omega} = \frac{k\Phi\omega I}{\omega} = k\Phi I, \quad [\text{Nm}].$$

- szögsebesség, vagy csak sebesség az áram függvényében:

$$\omega = \frac{U_b}{k\Phi} = \frac{U}{k\Phi} - \frac{IR}{k\Phi} = \frac{U}{k\Phi} - \frac{IR}{k\Phi}, \quad \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right].$$

Itt csak az I áram változó, és így az $\omega = f(I)$ sebességi jelleggörbét kapjuk.

- a sebesség a nyomaték függvényében: mivel $M = k\Phi I$, ebből $I = M/k\Phi$, s ezt beírva I helyére

$$\omega = \frac{U_b}{k\Phi} = \frac{U}{k\Phi} - \frac{IR}{k\Phi} = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{(k\Phi)^2},$$

az $\omega = f(M)$ terhelési jelleggörbét kapjuk;

- a mozgásegyenlet, amely meghatározza, mikor fog változni a szögsebesség:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M - M_t}{\Theta}$$

a pillanatnyi sebességtől függetlenül, és ebből $d\omega/dt=0$, ha $M=M_t$, ahol M_t a terhelés nyomatéka a motor tengelyén, tehát a számláló nem lehet zérus, ha a sebességet változtatni akarjuk. Itt Θ a motor tengelyére visszaszámított - redukált- eredő tehetetlenségi nyomaték $[\text{kgm}^2]$.

- az elektromechanikai időállandó:

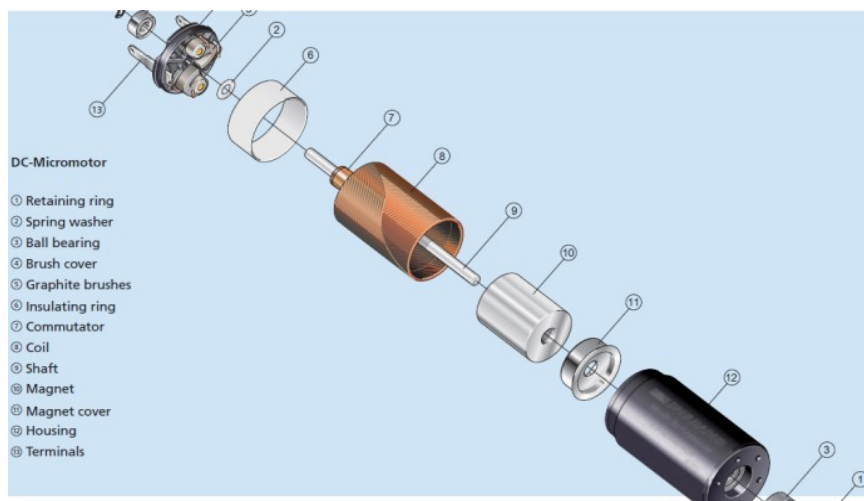
$$T_{em} = \frac{\Theta R}{(k\Phi)^2} \quad [\text{s}].$$

Ebben az összefüggésben mind a mechanikai energiátároló késleltető hatása a Θ tehetetlenségi nyomatékkal, mind a villamos időállandóé az L és R értékeivel szerepel. T_{em} főként tájékoztató jellegű, mert a villamos időállandó tipikusan kis értéke miatt csak a Θ hatása lesz domináns, s mivel egy képletbe összevontan szerepelnek, a külön-külön létező, és

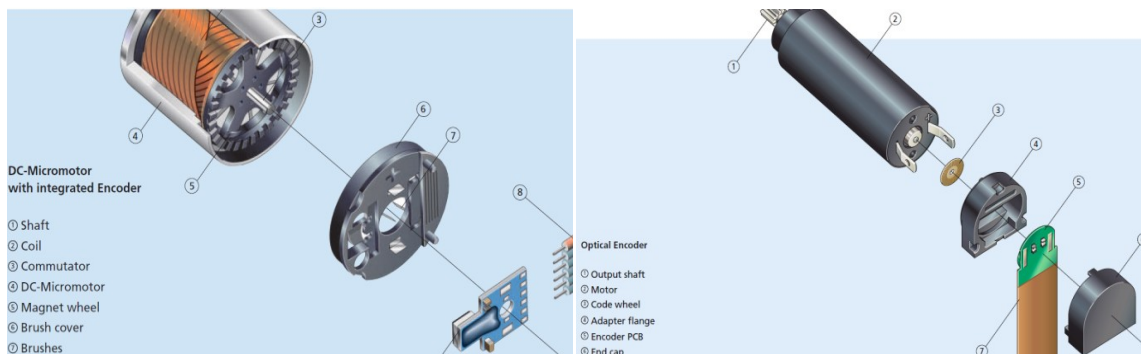
sorba kapcsolt egytárolós tagokból születő kéttárolós, kedvezőtlen arányú időállandók esetében akár valóban lengő tag ilyen tulajdonságainak megjelenését elfedi. A mai vizsgálati lehetőségek, szimulációk már mindkét tárolós tag jelenlétét, együttes hatását elemezhetik, lásd a hatásvázlattal kapcsolatban leírtakat, így a T_{em} , mint összevont alak az elfedő jellege miatt háttérbe szorul.

Néhány építési példa a legújabb motorfejlesztési eredményekből

A forgórésznek csak a tekercse forog, speciális héj-konstrukcióként, a rotor vasteste áll, de itt még az álló és forgó részek is helyet cseréltek: a mágneses pólusokat tartalmazó állórész lett a belső henger, és az eddig volt rotor vashengere pedig a motor külső lágyvas-hengere, azaz a háza. Csak a héjtekercs forog egy kissé növelt légrésben, míg mindkét henger áll. A héjtekercs Θ értéke közel 2 nagyságrenddel kisebb, mint a normál kivitelé, és rendkívül nagy szöggyorsulásokat tesz lehetővé, kis méreteknél 1000 rad/s^2 felett is. Az átlós vezető-elrendezés merevíti a tekercset, és egyúttal extrém kicsi nyomatéklüktetést, kisebb, mint 0,2 %-ot eredményez a szögelfordulás függvényében, némi hatásfokromlás árán. A belülről tett mágneshenger, mint állórész kisebb kívülre jutó mágneses teret idéz elő, amely egyes alkalmazásoknál fontos lehet, 7. ábra.

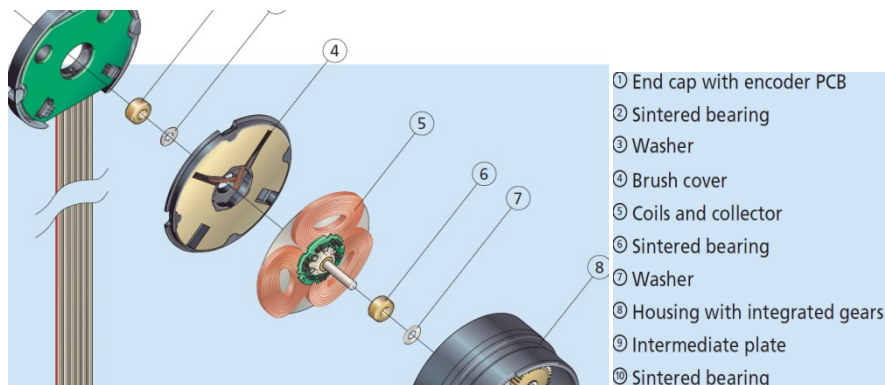


7. ábra. Héjtekercseléssel és nem forgó forgórész-vastesttel épült PMDC motor (Faulhaber)

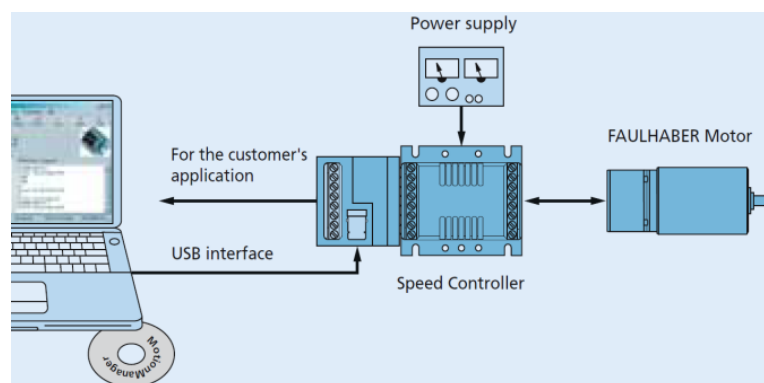


8. ábra. Az előző motorhoz választható mágneses és optikai inkrementális útmérők képei, a pozíciószabályozási feladatokhoz

Tárcsa alakú rotor, rövid építési hossz elérhetősége érdekében, 9. ábra. Axiális irányú mágnesmezőt hoztak létre, amely erővonalai a tárcsa alakú mágnesből indulnak, a 8 házban rögzítve, és a 4 tárcsa vasbetétjein fordulnak vissza. A nyomaték az 5 rotor tekercseiben keletkezik, és itt is annak ragasztásával kapott merevsége folytán adódik át a tengelyre. A kis nyomatékot áttétel növeli meg.



9. ábra. Tárcsa alakú forgórészsel épült PMDC motor



10. ábra. Számítógépirányítású, mikroprocesszorvezérelt PMDC motoros hajtásrendszer vázlatja

Az állandó-mágneses egyenáramú motor tulajdonságai jelleggörbéi alapján

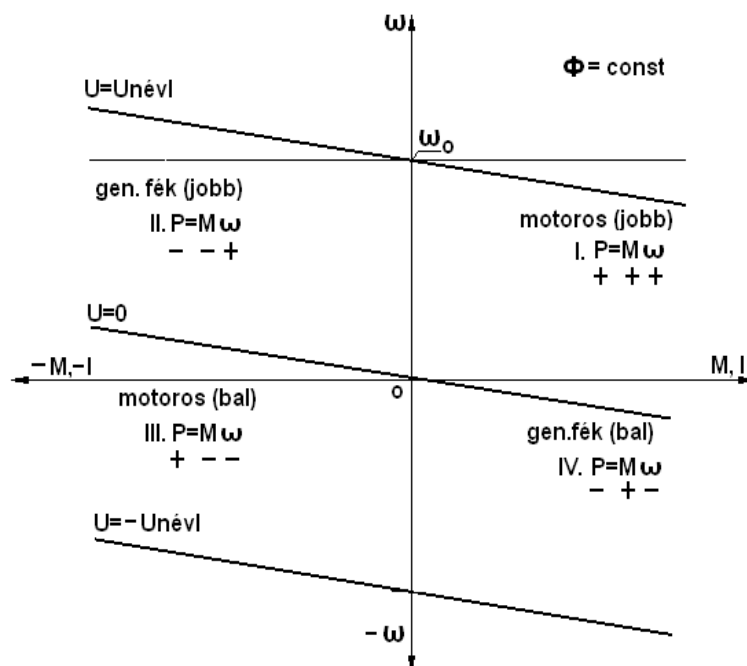
Ábrázolási módok. A motor üzemének síknegyedei

Villamos hajtások tulajdonságait általában a szögsebesség-nyomaték, DC motoroknál az összevont szögsebesség – nyomaték és/vagy áram jelleggörbéken követhetjük. A motorok karakterisztikáin tipikusan a kapocsfeszültség adott, konstans értékű, azaz paraméter. A mai motorok állandó mágnesével a motor fluxusa különböző üzemállapotokban is csak kismértékben csökken a terhelés hatására, így a tárgyalást megkönnyítendő, a fluxust állandónak tekintjük (a motorok tervezése során természetesen részletes elemzéssel tárják fel az eltérések jellegét és mértékét).

A 11. ábrán egy PMDC motor jelleggörbéi láthatók névleges-, zérus-, és ellenkező polaritású, negatív előjelű, de névleges kapocsfeszültségekre. A görbék alakját a 12. ábrán elemezzük, itt csak azt jegyezzük meg, hogy a karakterisztikák vízszintestől eltérése, ferdesége a motor

belső ellenállásától függ, $R=0$ esetén párhuzamos az abszcisszával. Az ordinátán, az ω - tengelyen a motor nem vesz fel áramot, és nem fejt ki nyomatékot. Pozitív áramok, nyomatékok motoros, negatívok generátoros féküzemhez tartoznak. Az áramok-nyomatékok csak a $k\Phi$ szorzó értékével térnek el egymástól, így kettős lépték alkalmazásával azonos értékeik ábrázolhatók.

Az egyes üzemmódok negyedeit I-IV. számokkal jelölik, amelyekben a teljesítmények előjelei szerint nevezzük motorosnak vagy generátorosnak az üzemet, illetve röviden a síknegyedet. A pozitív ω mező egy adott, tipikusan a + forgásirány szerint lehetséges motoros vagy generátoros fék I és II negyedeit tartalmazza, míg a negatív ω mező, az origó alatt az ellenkező irányban forgásúakat. Ehhez az áttérés a motoron a kapcsolófeszültség polaritásának megváltoztatásával valósítható meg.



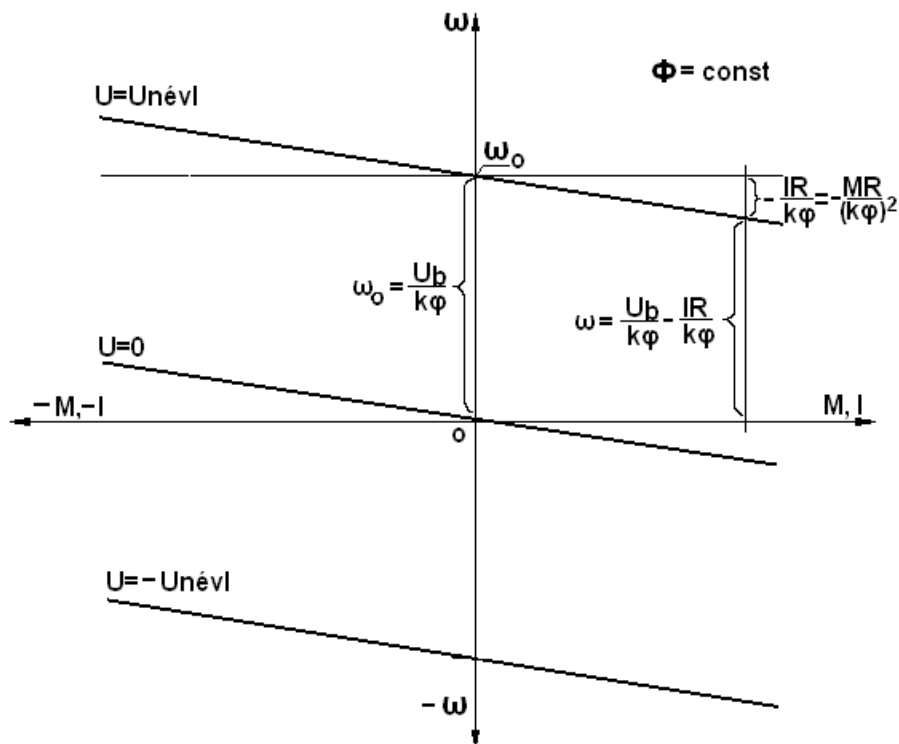
11. ábra. PMDC motor jelleggörbéi változó kapcsolófeszültségekre.

Az egyes síknegyedek szükségessége a villamos hajtástól elvárt tulajdonságok szerint fogalmazódik meg: egy ventilátor, köszörű, fűrógép stb. jellemzően egy forgásirányú, és nem igényel féküzemet, ezekhez egynegyedes üzem elegendő. Egyszerű daruhajtás le-fel üzemben, de villamos lassító fékezés nélkül dolgozik, így az I és III negyedeket használja, hasonlóan egy visszapillantó tükör két irányban lehetséges állító mozgatásához. Szerszámgép-, robot-, járműhajtások elindulásuk után villamos féküzemükben fognak lassítani, szükség esetén megállásig, és ezt a másik forgásirányban is elvárjuk tőlük, tehát az I-II, illetve a III-IV negyedekben is azonos módon tudnak dolgozni.

A motorokat tápláló áramforrásnak a motor által igényelt feszültség- és áramértékeket kell szolgáltatnia, a megfelelő polaritás-irány szerint. Egy egyszerű ventilátort csak egy feszültségszinten, s csak egyféle áramirányra képesen kell táplálni, míg egy robot-, vagy járműhajtást forgásirány szerint más-más polaritáson, és 0-tól a legnagyobb lehetséges értékig

változtatható szintű feszültségen kell tudni táplálni. Utóbbi tápforrás felépítésében, rendszerében jelentősen összetettebb, ára magasabb ugyanazon teljesítménykategóriában.

A 12. ábrán a PMDC motor karakterisztikájának menetét vizsgáljuk. Az üresjárásnak is nevezett terheletlen állapotokban a munkapontok az ω – tengelyen vannak, s ezeknek egymástól mért távolságaik feszültségarányosak. Itt ω_0 -al jelöltük az adott feszültséghez tartozó görbe üresjárási sebesség-értékét.



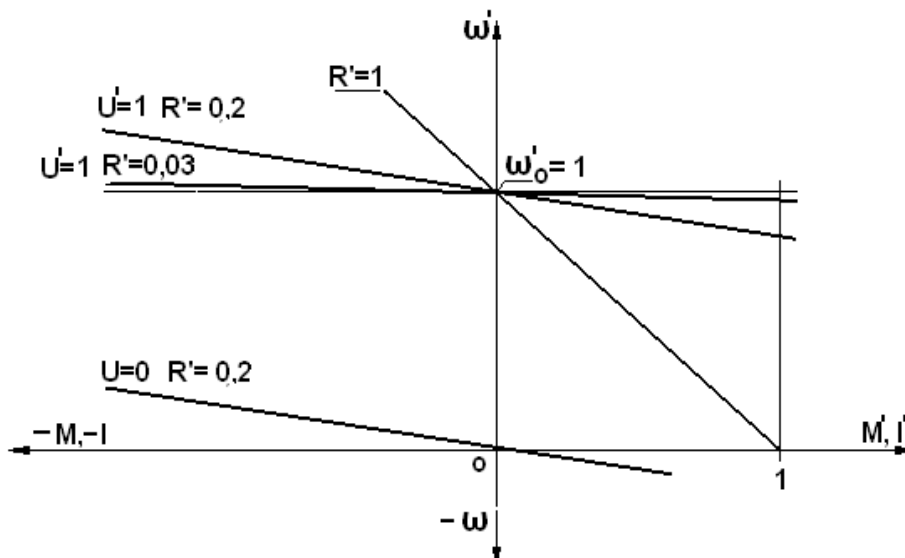
12. ábra. PMDC motor karakterisztikájának R -függése

Az előzőekben megismert egyenletekben láttuk a szögsebesség függését az áramtól és a nyomatéktól. Árammentes állapotban $IR=0$, a kapocs- és a belső feszültségek azonos értékűek, ω_0 az U vagy U_b értékéből egyaránt számítható. A növekvő áramokhoz tartozó sebességcsökkenés értékeit a $-IR/k\Phi$ összefüggés adja, ezek lesznek a függőleges metszések az ω_0 –hoz tartozó vízszintes vonaltól a motor jelleggörbe egyes pontjaihoz, míg az áramnyomatéktengelytől mérve a karakterisztika egy eső egyenes, ahol ω értékeit az $U_b/k\Phi$ -ból kivonással kapjuk. $R=0$ esetén a karakterisztikák feszültségfüggő vízszintes egyenesek lennének.

Viszonylagos mennyiségek alkalmazása

A 13. ábrán az egyes mennyiségek vesszővel jelölt viszonylagos egységeit tüntettük fel. Bevezetésével a százalékos mennyiségekhez hasonló módon, a névleges értékhez viszonyított nagyságokat szerepeltethetjük, ami realiztikusabb ábrázolást ad, konkrét motoradatok nélkül is. Az egyes viszonylagos mennyiségeket a névlegeshez tartozóan képezzük:

$U'=U/U_{névl}$, $I'=I/I_{névl}$ stb., és csak az $R'=R/R_{névl}$ értéke kíván kiegészítést. Az $R_{névl}=U_{névl}/I_{névl}$ számérték pontosan akkora értékű ohmos ellenállást jelent, amelyhez az ábrán az $R'=1$ értékkel jelölt, -1 meredekségű egyenes, mint motorjelleggörbe tartozik, és amelyen a névleges áram a feszültségegyenletben az $I'R'=1$ értékű névleges kapocsfeszültséget jelenti. Nem tud helyet hagyni U_b bármilyen kis értékének sem – az ilyen módon épült motor a névleges nyomatékkal terhelve, névleges áramot felvéve, és névleges nyomatékot kifejtve épp nem tud megmozdulni, csak zérus sebességű forgás lenne lehetséges: $U'=I'R'=1$, $U'_b=0$ mellett. E motoron névleges áramnál az I^2R veszteségteljesítmény a teljes felvett $P=U I$ teljesítménynek felel meg, a hatásfok értéke zérus.



13. ábra. Viszonylagos mennyiségek alkalmazása, és az $R'=1$ jelleggörbe menete

Eszerint az egyes valós motorok hatásfokát alapvetően meghatározó R' értéke a motor veszteségeinek mértékét is megjelöli: az $R'=0,2$ értékkel gyártott motor hatásfoka

$\omega_0' - \omega' = 1 - 0,2 = 0,8$, azaz 80 % lehet az esetben, ha a veszteségeket csak a tekercsveszteség adja. Valójában ehhez további, 1-2 % mértékű veszteségek társulnak. 1000 kW feletti, pl. villamos mozdonyba épített DC motorok 3-5 %-os veszteségei, és ennek megfelelő 95-97 % hatásfoka az $R'=0,03-0,05$ értékű viszonylagos ellenállásokkal érhetőek el, amelyek görbéinek esése -0,03, -0,05 értékű meredekséggel írható le.

Önellenőrző kérdések

1 Válassza ki a *hibás* válaszokat az állandómágneses motor tulajdonságok közül: (mind hibás)

- rugalmas, nem fordulatszám tartó,
- sebessége hiperbolikusan függ a terheléstől,
- indító nyomatéka áramfüggetlen,
- sebessége független a belső feszültségtől,

- hatásfoka az R' -nél nagyobb értékű,

- indítási árama kedvezően alacsony, nem igényel korlátozást.

2. Jelölje meg azokat a szempontokat, amelyektől függ a nyomaték: a *menetszámtól*, a *légrésindukciótól*, a *légrés nagyságától*, a *feszültségtől*, a *fluxustól*, *fordulatszámától*, a *frekvenciától*, az *áramtól*, a *terhelő nyomatéktól*, az *időállandótól*.

3. Jelölje meg a hibás válaszokat! (a, b, c hibásak):

- a) „Mivel a két szomszédos pólus alatt az indukció irányai ellentétesek, a másik pólus alatt ugyanazon jellegű tangenciális F erők létrehozatalához a megváltozott indukcióirány miatt az áram irányának már nem kell változnia.”
- b) „Mivel a két szomszédos pólus alatt az indukció irányai ellentétesek, a másik pólus alatt ugyanazon jellegű tangenciális F erők létrehozatalához az áram irányának nem kell változnia.”
- c) „Mivel a két szomszédos pólus alatt az indukció irányai ugyanazok, a másik pólus alatt ugyanazon jellegű tangenciális F erők létrehozatalához az áram irányának változnia kell.”

1.2. A lecke címe

Állandómágneses egyenáramú motorok jellegzetes üzemmódjai ω -M ábrákban és időfüggvény-ábrákban.

Hatásvázlat. A PMDC motor önszabályozó jellege. Pozíciószabályozás hatásvázlata. Néhány szabályozási tulajdonság.

Cél

Az állandómágneses egyenáramú motorok jellegzetes üzemmódjainak(indítás, gyorsítás szabályozott árammal, generátoros féküzembe lépés és lassulás állandó árammal) megismerése jelleggörbe mezőkben és időfüggvény-ábrákon.

A PMDC motor hatásvázlatának felépítése, a motor önszabályozó jellege.

Pozíciószabályozás PMDC motorral, a hatásvázlat bővítésével. Fontosabb szabályozási adottságok. Tulajdonságjavítás PI szabályozóval, véges és állandósult terhelőnyomatékra.

Követelmények

A hallgató legyen képes

- *ismertetni* a PMDC motorok jellegzetes üzemmódjait (indítás, gyorsítás szabályozott árammal, generátoros féküzembe lépés és lassulás állandó árammal), a PMDC motor hatásvázlatának felépítését, a motor önszabályozó jellegét a pozíciószabályozást a hatásvázlat bővítésével, a fontosabb szabályozási adottságokat, a tulajdonságok javítását PI szabályozóval, véges és állandósult terhelőnyomatékra.
- *lerajzolni* a motor üzemmódokat jelleggörbe mezőkben és időfüggvény-ábrákon, a motor saját hatásvázlatát, továbbá a pozíciószabályozásra bővítést, P és PI jelleggel.

Kulcsfogalmak: PMDC motor hatásvázlata, a motor önszabályozó jellege, pozíciószabályozás, P és PI szabályozás

Időszükséglet

A tananyag elsajátításához *körülbelül 150 percre* lesz szüksége

Tevékenységek

- *Olvassa el és jegyezze meg* PMDC motorok jellegzetes üzemmódjait (indítás, gyorsítás szabályozott árammal, generátoros féküzembe lépés és lassulás állandó árammal), a PMDC motor hatásvázlatának felépítését, a motor önszabályozó jellegét a pozíciószabályozást a hatásvázlat bővítésével, a fontosabb szabályozási adottságokat, a tulajdonságok javítását PI szabályozóval, véges és állandósult terhelőnyomatékra.
- *rajzolja le* a motor üzemmódokat jelleggörbe mezőkben és időfüggvény-ábrákon, a motor saját hatásvázlatát, továbbá a pozíciószabályozásra bővítést, P és PI jelleggel.

1.2. Tananyag

Állandómágneses egyenáramú motorok jellegzetes üzemmódjai ω -M, I ábrákban és időfüggvény-ábrákban.

Hatásvázlat. A PMDC motor önszabályozó jellege. Pozíciószabályozás hatásvázlata. Néhány szabályozási tulajdonság.

Jellegzetes üzemmódok. Indítás

Feszültségmentes, álló és nyomatékkal nem terhelt állapotban lévő PMDC motor indítási folyamatát tekintjük át a következőkben.

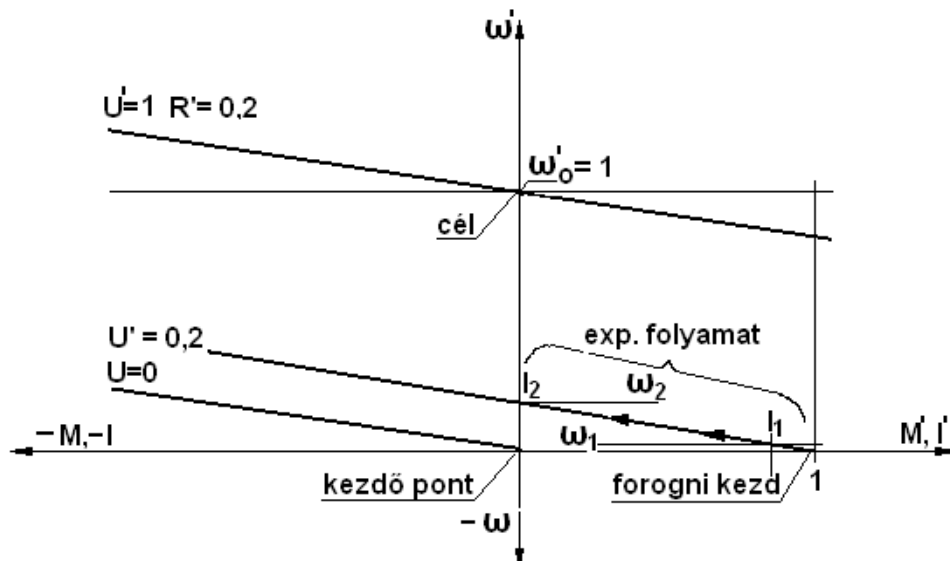
Legyen az elérendő sebesség akkora számértékű, amelyhez csak egyszeri alkalommal beállított, majd nem változtatott kapcsolófeszültség is elegendő, miközben a motor árama nem haladja meg például a névleges értékét.

Ha a motor $R' = 0,2$ viszonylagos ellenállású, akkor $U' = I'R' = 1 * 0,2 = 0,2$, azaz 20 % értékű lehet az a feszültség, amelyet egységugrás jelleggel a motorra kapcsolva, az átfolyó áram értéke $I' = 1$, tehát 100%, névleges értékű. Valós motorokra nem-névleges hőfokú állapotban a névlegesnek 1,5-5 -szöröse is megengedhető lehet, rövid ideig, de a névleges értékkel egyszerűbb az áttekintés.

A ráadott feszültség tehát $U' = 0,2$, amelynek vonalát, mint a zérus feszültségű görbe felett a $U' = 0,2$ feszültségű áramforrás egységugrás jelleggel előállítja. A motor áramát csak induktivitása késlelteti, amely 1000 kW-os motorra közelítően 1~2 s, 10 W-osra pedig 0,1~0,5 ms időállandójú.

Ha valamely módon elérhető, hogy a motor csak akkor kezdhesen forogni, amikor az áram elérte Ohm-törvény szerinti értékét, akkor a meginduláskor $I' = 1$ áll fenn. Ekkor még a feszültségegyenlet $U' = I'R'$ alakú, mert az $\omega = 0$ állapotban az U_b értéke zérus. Ha a megindulás névleges árammal és $M_f = 0$ terhelőnyomaték mellett történik, a motor szöggyorsulása $d\omega/dt = M/\Theta$ értékű lesz, a terheletlen állapotnak megfelelően nagy. A sebesség $\omega \neq 0$ értékétől kezdve $U_b = k\Phi\omega \neq 0$ lesz, és sebességarányos, 1. ábra.

Az $U' = 0,2$ értékű kapcsolófeszültség egyenletében a növekvő ω -val együtt növekvő U_b -hez csak csökkenő IR társulhat, azaz az áram a sebesség növekedésének megfelelően, a motor jelleggörbéje szerint fog csökkenni, az ábra $U' = 0,2$ jelű görbájén az $I' = 1$ ponttól kezdve balra és felfelé haladva, a berajzolt nyilak szerinti munkapont vándorlással, az $I_2 = 0$ pontig tartva, és az $\omega = 0,2$ pontra felgyorsulva. Az áram itt már zérus a terheletlen állapotnak megfelelően, a feszültségegyenletben az IR tag vált zérussá, mialatt $U = U_b$ állt be. A folyamat egyre lassuló módon folyt le, exponenciális jelleggel, a csökkenő árammal csökkenő mértékű szöggyorsulással. Az ábra nem tájékoztat a folyamat időbeli jellegéről.



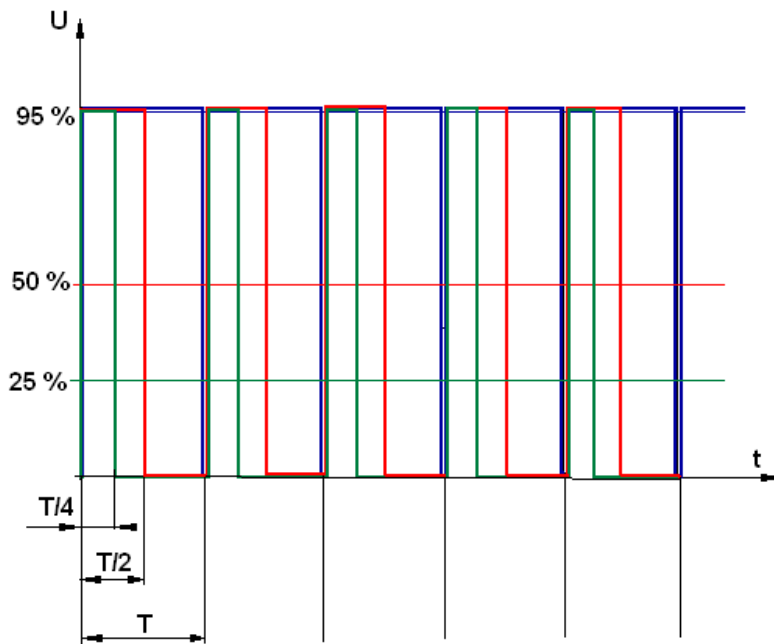
1. ábra. A PMDC motor indításához

Áramszabályozó alkalmazása

Ha nem $U'=0,2$, hanem nagyobb feszültséget kell a motorra adnunk egy nagyobb, pl. névleges sebesség eléréséhez, akkor korlátozott áramerősség mellett kell a feszültség növelését elvégeznünk. Amíg nem voltak elektronikus feszültség szabályozó eszközök, ún. indító ellenállások fokozatos kiiktatásával korlátozták a motor áramát. Ma teljesen folytonos jelleggel változtatható a kapcsolófeszültség, zérustól a legnagyobb értékig, ami megkönnyíti tetszőleges értékű áram beállíthatóságát és szabályozhatóságát.

Az egyenfeszültség változtatása

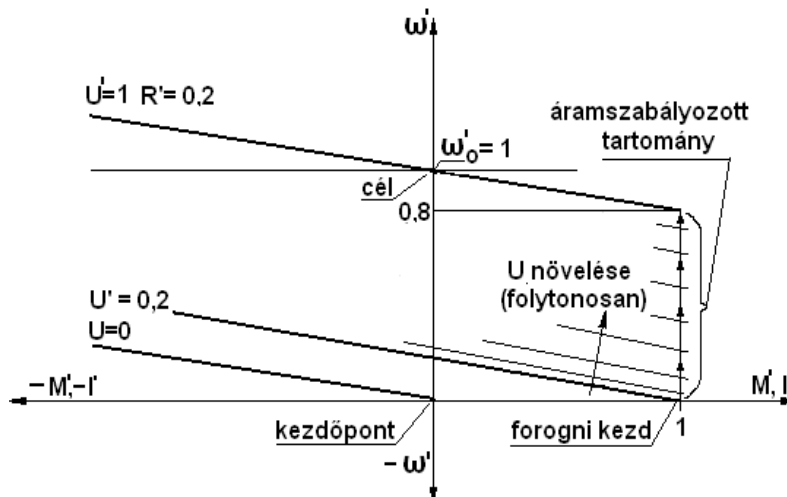
A félvezetőkre alapozott, régebben tirisztoros, ma többnyire tranzisztoros, MOSFET vagy IGBT modulokból felépített tápforrások tipikusan impulzusszélesség-változtató módszert alkalmaznak. Ezekkel egy állandó értékű egyenfeszültségből, annak jellemzően állandó frekvenciájú szaggatásával, itt a 2. ábrán T periódusidővel, de változtatható hosszúságú vezetési idővel, azaz változtatható kitöltési tényezővel egy zérus és az egyenfeszültség szintje közötti effektív értékű feszültség állítható elő, az ábrán 95, 50 és 25 % értékekhez bejelölve. Ennek alakja ugyan négyszöghullám, de a folyó áram alakja a kör induktivitásának köszönhetően exponenciális szakaszokból áll, és a simító hatás miatt kissé hullámos egyenfeszültség jellegű.



2. ábra. Impulzusszélesség-moduláció: a feszültség-idő terület változtatása

A szaggatási frekvencia ma néhány kHz és több 100 kHz közötti, bár utóbbiak csak egészen kis teljesítményekre alkalmasak. Ha a motorkör villamos időállandója pl. $T_v=0,1$ s, akkor egy $f=10$ kHz frekvenciájú PWM (impulzusszélesség modulált) kimenet áram alakjában, amelynek periódusideje 0,1 ms, az exponenciális görbe elért értéke a 0,1 s időállandójúnak csak $1/1000$ –e lesz, azaz a görbe alig hajlik felfelé. Tehát így elég simának mondható egyenfeszültséget kapunk, míg zérus időállandójú körben az áram a feszültség négyszöghullám alakját követné.

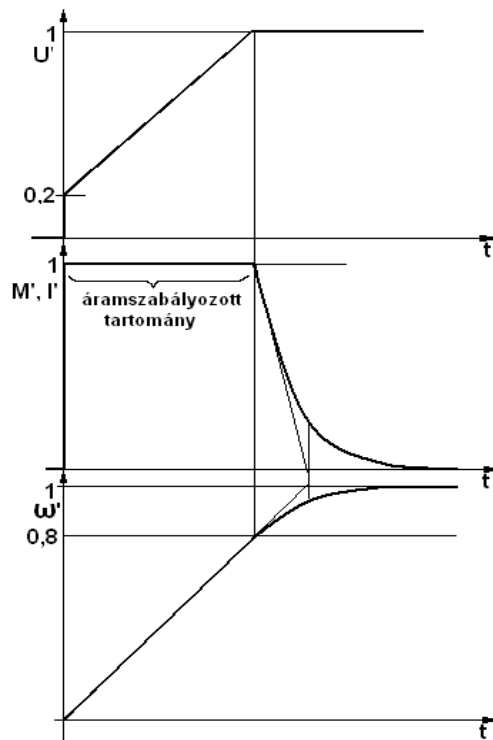
Az indítás során figyelembe veendő áram korlátozás jellegű, de betartandó érték is, amelyet áramszabályozó valósít meg, az elektronikusan változtatható feszültségű áramforrás szabályozó körében, oly módon, hogy amint a sebesség növekedése miatt csökkenő áram értéke eltér a szoftveresen előírttól, a szabályozó a feszültség növelésével állítja vissza az áramot az előírt értékre. A mai áramszabályozók működése igen gyors, beavatkozásukat már az áram egy-két ezreléknyi csökkenésekor megkezdik, aminek köszönhetően a szabályozás magas minőségű, pontos és eredményes. A folyamat lezajlása közben így az áram értéke az előírt lesz, miközben a feszültség a sebesség növekedésének megfelelően növekszik. Ez teszi lehetővé, hogy az elindult motor árama a felgyorsulás során állandó maradjon, egészen a beállított feszültség szint eléréséig, a 3. ábrán áramszabályozott tartományként jelölve. A néhány bejelölt motorjelleggörbe itt növekvő feszültség szinteket jelöl, de ezek a folytonos működésű szabályozónak köszönhetően valójában végtelen sűrűen, fokozatmentesen követik egymást, amelyre a régebbi motorindításoknál használt ellenállás-fokozatok nem voltak alkalmasak. A tárgy nem foglalkozik azokkal, az irodalomban megtalálhatóak.



3. ábra. Sebességnövelés állandó árammal, áramszabályozóval

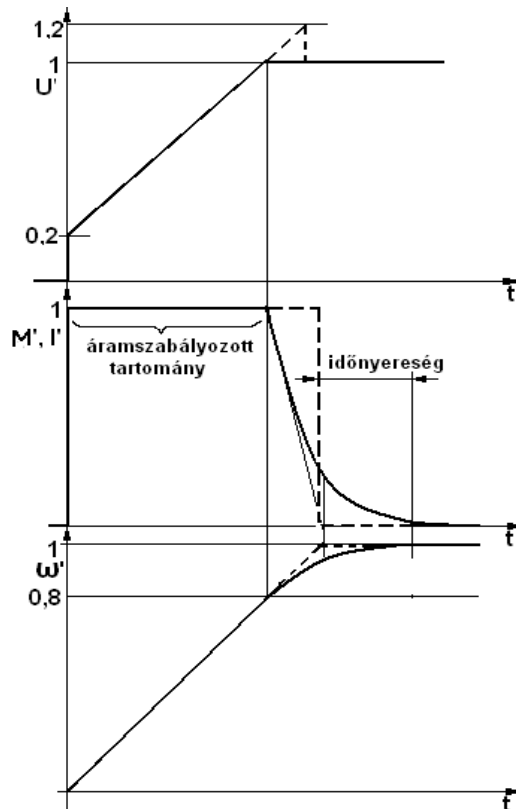
Az áramszabályozó csak addig töltheti be feladatát, ameddig a feszültség növelése lehetséges. Ha a példa csak a névleges feszültséget alkalmazza, ennek elérésekor az áramszabályozó elveszti működőképességét, mert az áram további csökkenésekor nem tud feszültséget emelni, az áram csökkenését nem tudja megakadályozni, az pedig a kisebb feszültségű indításnál leírtak szerint a sebesség növekedésének megfelelően, a jelleggörbe ferdesége szerint csökken, üresjárás esetén zérusig. Ez a tartomány a sebesség 80 %-os értékénél kezdődik, és az üresjárás $\omega' = 1$ értékig folytatódik.

Időfüggvény-ábrákban is megtekinthetők az elmondottak. A 4. ábra az indítástól kezdve $I' = 1$ értékre beállított áramszabályozóval végzett sebességnövelést mutatja. Az áramszabályozott tartományban a feszültség növekedésének jellege, a nyomaték és a szöggyorsulás is állandó, ez utóbbi az alsó ábrán látható. Az exponenciális szakasz kezdeti iránytangense a T_{em} értékének felel meg. A folyamat valós ideje Θ értékétől is függ, egy 0,1 mNm-es mikromotor terheletlenül és önállóan akár 0,01 s alatt, egy villamos hajtású autóbusz ~ 30 s alatt, egy tehervonat több perc alatt gyorsul fel.



4. ábra. A felgyorsulás folyamatának időfüggvény-ábrái

Főként robot-, de más hajtásokban is szükség lehet arra, hogy a gyorsítási folyamat időben elhúzódó exponenciális részét rövidítsék vagy megszüntessék, csökkentve az azonos folyamatok közti ciklusidőt. Ez elérhető, ha az alkalmazott feszültséget megnöveljük, a példabeli esetben 100 helyett 120 %-ra. Az I-szabályozóval ekkor nem 80%, hanem 100% sebességig lehet állandó árammal gyorsítani, és elmarad a folyton csökkenő áramú exponenciális tartomány. Ez csak egy újabb eszköz, a sebességérzékelő bevezetésével lehetséges, hogy a kívánt sebesség elérésekor a már 120 %-ra nőtt feszültség gyorsan visszavehető legyen 100% -ra, és a sebesség ne növekedjék a kívánt fölé. Időfüggvény ábrákban mindez az alábbiakban figyelhető meg, 5. ábra. A meghosszabbodott, állandó nyomatékkal gyorsító tartomány az exponenciális rész elmaradásával jelentős időbeli eredményt hoz, 10-30 % mértékben is.

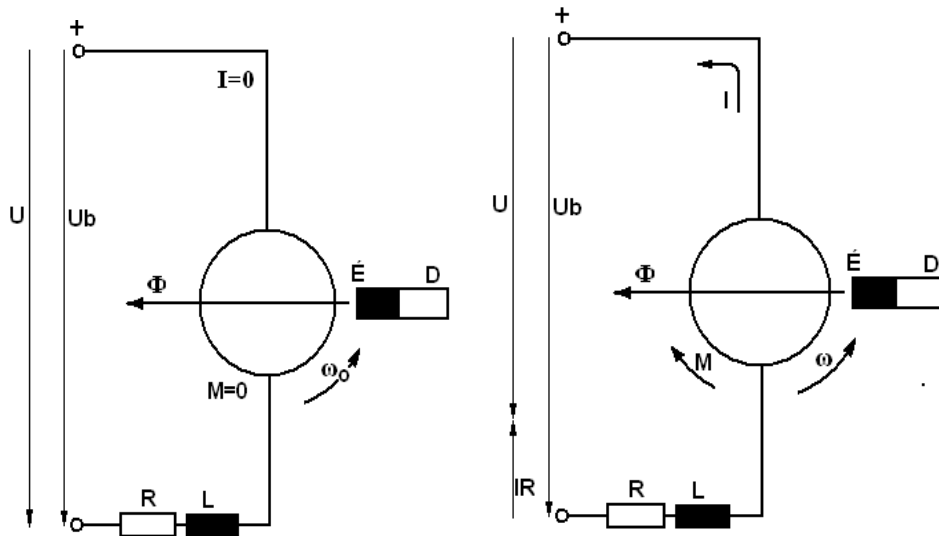


5. ábra. A felgyorsulás folyamatának időfüggvény-ábrái, növelt feszültség alkalmazásával

PMDC motorok féküzeme

A motor generátoros fékezését valamely $\omega \neq 0$ sebességről végezzük. Jellemzően motoros üzemállapot előzi meg, amelyből a féküzembe átlépés üresjárási állapoton át történik. Ez utóbbiban áram- és nyomatékmentes állapot, valamint a feszültséghez tartozó szögsebesség áll fenn, 6. ábra. A kapocs- és belső feszültségek azonos nagyságúak. A féküzembe kerülés egyik módja, hogy valamely külső hatás a motort sebességnövelésre kényszeríti, például villamos jármű lejtőbe kerül, és sebessége növekedni kezd, a lejtőirányú erő „tolja” a motort.

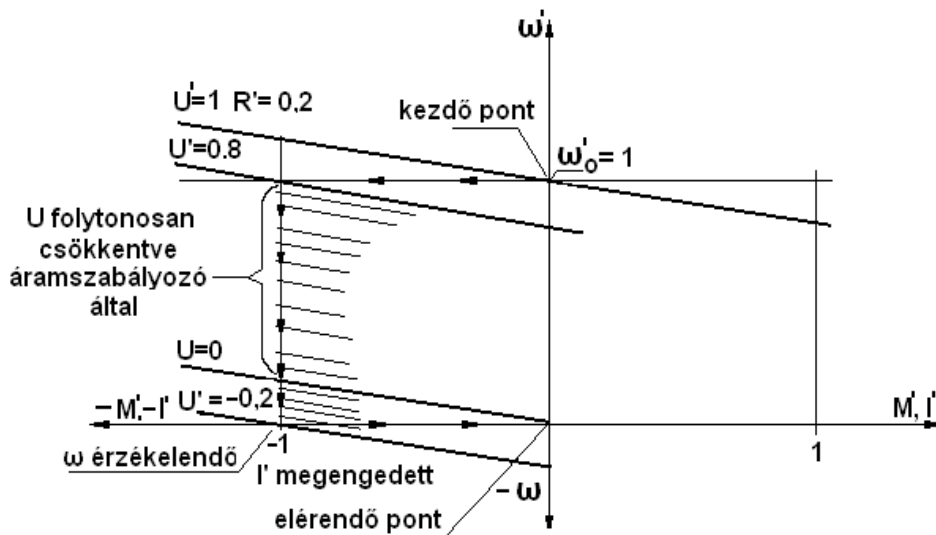
A 7. ábra $U'=1$ jellegvonala a II. negyedben generátoros fék tartalmú, ha tehát a külső ok miatt ω növekszik, és a motor táplálásában változás nem történt, akkor ugyanazon kapocsfeszültségen már $U_b > U$ áll elő, negatív előjelű áram indul meg, amely féknyomatékot fejt ki. Ha a példakénti, $R'=0,2$ adottságú motor sebessége 20 %-ot nő egy erősebb lejtőben futás hatására, féknyomatéka 100% lesz. Ebben az üzemben tartós generátoros állapot állhat fenn, ha lejtő hosszú. Csökkenő mértékű lejtő kisebb sebességtúllépéssel kisebb féknyomatékot tart fenn. Egyenáramú hegyi vasutak 1890 körül már elterjedten alkalmazták. A negatív előjelű áram a tápforrás felé halad, és ha az fogadóképes, energetikailag hatékony visszatáplálás történik. Diódás egyenirányítós ellátás esetén ez nem áll fenn, az áram csak egy erre a célra beépített, elegendően nagy teljesítményű ohmos ellenállásra folyhat, amely hőjét szellőztetés viszi el.



6. ábra. PMDC motor üresjárási és féküzemi állapota

Változó sebességekre más értékű kapcsolófeszültség beállításával idézhető elő a kívánt üresjárási sebesség, és a féküzem sebességi tartománya.

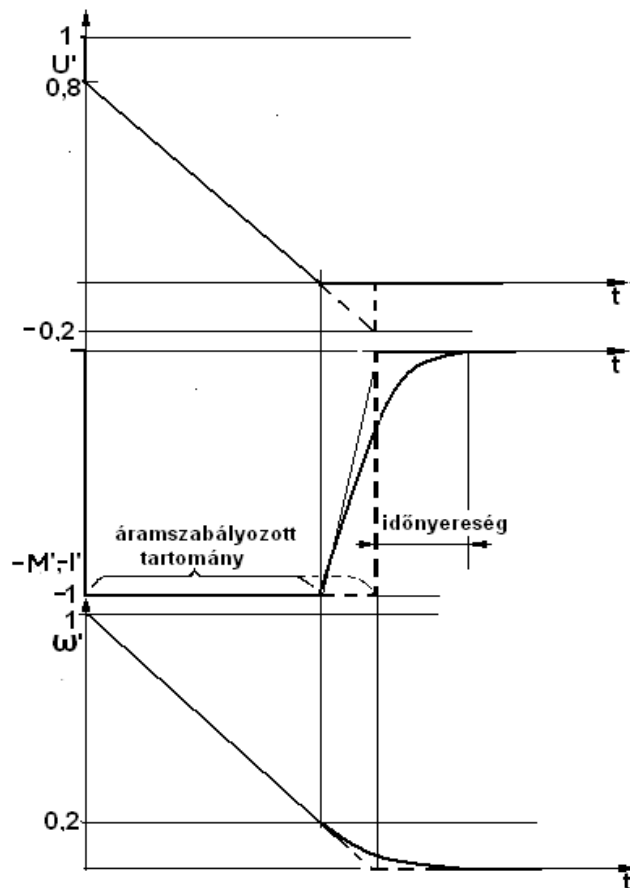
Robotok, villamos autók féküzemét a feladattól függően kell megkezdni, azaz nem lehet külső erőhatás megjelenésére várni. Mivel a féküzembe lépés az aktuális üresjárási sebesség felett kezdődik, és mivel ennek értéke az aktuális kapcsolófeszültségtől függ, lehetőség van arra, hogy bármely sebességen fékezni kezdhessünk a kapcsolófeszültség megfelelő mértékű beállításával, tipikusan csökkentésével. Az ábrán a példakénti sebesség 100%, így a 20 %-al



7. ábra. PMDC motor féküzembe lépése feszültségcsökkentéssel, lassítás áramszabályozóval

lecsökkentett kapcsolófeszültség olyan generátoros féküzemet állít be, amelyben az áram és a nyomaték értéke -100% lesz. Ha leállásig kívánunk fékezni és állandó értékű árammal, áramszabályozót alkalmazunk, amely most a feszültség további csökkentését használja beavatkozó eszközként, ha az áram a sebesség csökkenése miatt csökkenni kezd. Ha a

beállítható legkisebb feszültség 0 V értékű, akkor ennek elérése után exponenciális folyamatban csökken a sebesség és az áram megállásig. Ha rendelkezésre áll negatív tápfeszültség, azaz a polaritás fordítható, tehát a zérus feszültség elérése után folyamatosan lehet növelni a már negatív előjelű kapocsfeszültséget, az ábrán $U'=0$ -tól $U'=-0,2$ -ig, akkor intenzív, forszírozott féküzemet hozhatunk létre, amely a megállásig tarthat. Ezt sebességérzékelővel észlelve a feszültséget azonnal zérusra kell visszaállítanunk, mert a hajtás elindulna a negatív előjelű sebességtartományban. A 8. időfüggvény részábrákon mindez követhető, rajta szaggatott vonallal jelöltek az intenzív fékezés görbe-szakaszai.

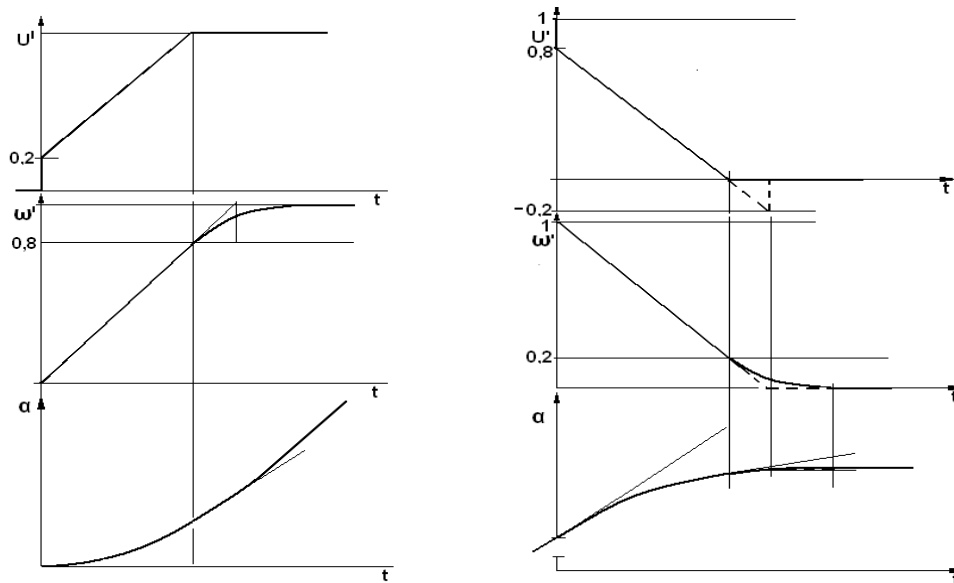


8. ábra. PMDC motor féküzemi időfüggvény ábrái

Hasonló gondolatmenettel lehetséges további elemzéseket elvégezni zérustól különböző terhelő nyomatékokra és elérendő pozitív vagy negatív sebességekre is.

Út-idő ábrák

A motor forgórésze által megtett szögelfordulás α [rad] a szögsebesség időfüggvényének integráljaként számítható. A 9. ábrán szerkesztéssel határoztuk meg a megtett út időfüggvény alakját indításra és fékezésre. Az állandó meredekségű szöggyorsulás a sebesség ábrában $x^2/2$ parabolaként, az állandó sebességű mozgás állandó meredekségű út-idő függvényként jelenik



9. ábra. Út-idő ábrák (alul) gyorsításkor és megállásra fékezéskor

meg. A megtett út csökkentése csak a sebesség előjelének megfordításával lehetséges. Állandó értékű út-idő függvény csak zérus sebesség mellett lehetséges.

Az ábrákban jól megfigyelhető, hogy a motorra adott feszültség növekvő jellege mutatkozik meg a sebesség időfüggvény-értékeiben mindkét típusfeladatban, tehát a sebesség csökkentésekor is. Azaz, egy adott, teljesítendő sebesség-idő függvény ismerete előrevetíti a szükséges feszültség-idő függvény alakját is, amely az áram-idő függvény adataival együtt lehetővé teszi a szükséges adottságú tápforrás meghatározását.

Az állandómágneses egyenáramú motor modellje, hatásvázlata

A motor tulajdonságait egyenletekben fogalmaztuk meg. Az egyenletek olyan algoritmus szerint is elrendezhetők és számíthatók, amellyel a motor működésének időfüggvény ábráinak értékei a modellfuttatás időléptéke szerint nyerhetők, anélkül, hogy a kész motorral végeznénk vizsgálatokat. A motor hatásvázlata lesz ennek az algoritmus-jellegű számítási rendszernek a megjelenési formája, amelyet elsősorban a szabályozástechnika tudományterülete alkalmaz egyik fő eszközeként. A motor hatásvázlata tetszés szerint egészíthető ki a hajtott berendezés mozgatott, vagy áramjárta részeinek időfüggvényeket eredményező vizsgálatával.

A PMDC motor hatásvázlata a 10. ábrán látható.

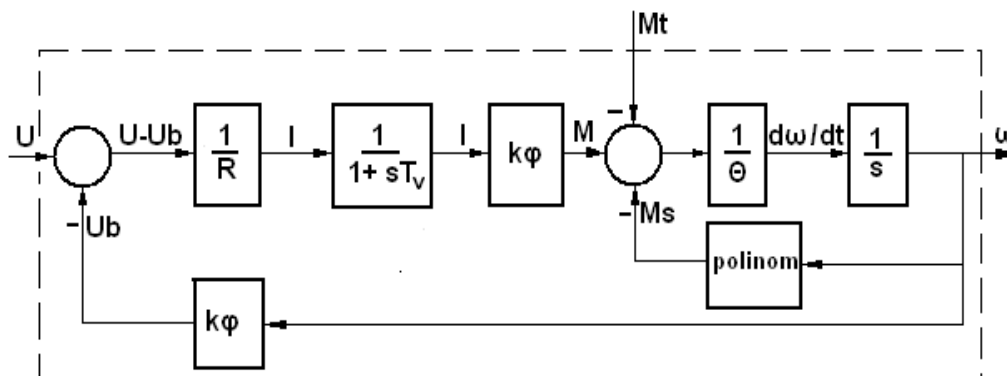
A motor hatásvázlata – tulajdonságainak következtében – megfelel egy arányos típusú szabályozási körnek, amelynek alapjele az U kapocsfeszültség, és szabályozott jellemzője az ω szögsebesség.

A különbségképzőbe az U és U_b feszültségek jutnak, utóbbi sebességarányos visszacsatoló jel. A feszültségkülönbségből az R -el osztással áramjel születik, melynek felfutását egytárolós arányos tag késlelteti. A $k\Phi$ szorzással keletkező nyomaték a mozgásegyenletbe jut, és a

$d\omega/dt$ szöggyorsulásból az $1/s$ integrátor állítja elő ω értékét, valamely választható numerikus integrálási módszerrel.

Az M_s súrlódó nyomaték a szögsebességgel szorzott többfokú polinommal számítható, de egyszerű esetben sebességfüggetlen konstansként, vagy teljesen elhanyagolhatóként is kezelhető. Utóbbi esetben nem lesz csillapító hatás, amely a kialakuló szabályozás lengéseket mérsékli, energiafogyasztás révén.

A lengések a $T_v = L/R$ villamos-, és a Θ -tól függő mechanikai energiátároló időállandó-arányaitól függően alakulhatnak ki, a kéttárolós tagokra vonatkozó feltételek szerint (ezekről részletesebben: lásd a szabályozástechnika irodalmát).



10. ábra. PMDC motor hatásvázlata

Tipikus motor- és hajtott rendszer kapcsolatban a villamos időállandó 1-3 nagyságrenddel kisebb, így gyorsan csillapodóak a lengések, de előállíthatók, modellezhetők lengő állapotot eredményező körülmények is.

A hatásvázlattal bármely elképzelhető folyamat modellezhető, azaz a modell, valamely számítógépi programban összeállítva és futtatva egy működtethető motort fog egyenleteivel helyettesíteni, a változásokat időfüggvényként számítani, s ezeket tipikusan azonnal kirajzolni.

A hatásvázlatot körülvevő szaggatott vonalon belül lévő tagok és blokkok a motor legyártásával, előállításával paramétereiket is felveszik, és a kész motor adatai, és jellege nem változtathatóak meg. A vonalon kívülre jutó mennyiségekkel állhatunk csak kapcsolatban: kapocsfeszültség, terhelő nyomaték, és a szögsebesség. Ha a modellmotor tulajdonságai nem megfelelőek, adatainak módosításával a kívánt tulajdonság a modellben létrehozható, de ahhoz már egy más valós motor fog tartozni.

A hatásvázlat az U kapocsfeszültség valamely értékéhez ω -t rendel, mégpedig a motor $U = \text{konst}$ értékéhez tartozó, R -től függő karakterisztikája szerint, az M_t hatását is figyelembe vevő módon. Ennek jellegét az R adott értéke mellett, áram-, vagy nyomatékarányosan bekövetkező sebesség-csökkenés vizsgálata során ismertük meg.

Ha ω eltér a karakterisztika szerinti értékétől, a motor belső (ön-) szabályozó tulajdonsága érvényesül. Egy átmeneti folyamat kezdődik, amelynek áram- és nyomaték értékei és előjelei

az ω értékét úgy módosítják, hogy az vegye fel a motorkarakterisztika szerinti értéket. Állandósult állapot csak ezen a munkaponton lehetséges, mert attól eltérés esetén megkezdődik és lejátszódik ez a belső, inherens szabályozás. Nem minden motorfajtára, vagy nem minden üzemi tartományukra jellemző e tulajdonság.

Egyetlen példával is bemutatható mindez:

legyen üzemben a motor állandósult állapotban, terheletlenül, azaz áram- és nyomatékmentesen, névleges feszültségen. Ekkor sebessége ω_0 -al jellemezhető. Valamilyen módon adjunk rá $M_t' = 1$, azaz 100 % értékű terhelőnyomatékot egységugrás jelleggel. Milyen folyamat indul meg, és milyen változások jönnek létre tartósan, tehát milyen lesz az új állandósult állapot? $R' = 0,2$.

A hatásvázlatban sem, a szabályozásban sincs sebességérzékelő. Az M_t megjelenésekor megkezdődő szöglassulás $d\omega/dt = -M_t/\Theta$ értékű lesz, kezdetben. A sebesség csökkenésekor az $U_b = k\Phi\omega$ is csökkenni kezd, amely miatt az $U - U_b$ különbség az eddigi zérusról növekedni kezd, megjelenik a kör felső ágában az áram és a nyomaték.

A mozgásegyenletben $M > 0$ jelenik meg, és a $d\omega/dt = (M - M_t)/\Theta$ szöglassulás a számláló csökkenése miatt a kezdeti legnagyobb értékéről csökkenni kezd, de még továbbra is nagy értékű. A további ω esések miatt U_b már nagyobb mértékben kisebb, és az áram és nyomaték jelentősebben megnőtt. M növekedése miatt a $d\omega/dt = (M - M_t)/\Theta$ szöglassulás egyre kisebbé válik, és ha $M = M_t$ bekövetkezik, meg is szűnik.

Ez akkor jön létre, amikor ω annyival lesz kisebb, mint a kezdeti ω_0 , hogy az U_b csökkenése az $U - U_b$ különbségét olyan nagyra növeli, hogy az áram, és vele arányos nyomaték egyenlő lesz M_t -vel. A szöglassulás most zérussá válik, az exponenciális jelleg befejező részén vagyunk, az áram és nyomaték is új állandósult értékét veszi fel. Ha $R' = 0,2$, akkor 100 % áram kikényszerítéséhez 20 %-nyi $U - U_b$ különbség, és 20 %-nyi tartós ω esés szükséges, így az új állandósult sebesség 80 %-os lesz.

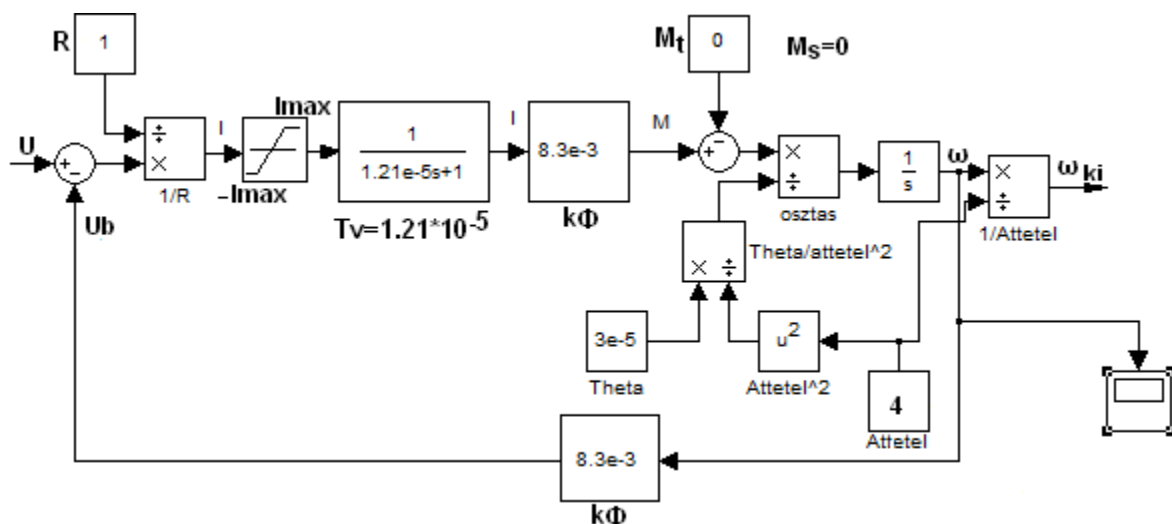
A modellezett folyamat tehát ugyanazt az eredményt adja, mint amit korábban a jelleggörbék elemzésével kaptunk. Hasonló gondolatmenettel bármely változtatás hatása bemutatható, olyanok is, amelyeket a valós motoron esetleg nem volna megengedett elvégezni.

A motor hatásvázlata nem a hardveres kapcsolatok megjelenítése. Ha motort ellátjuk áramszabályozóval, ennek valós kapcsolódása a motorhoz a PWM jellegű feszültségforráson keresztül történik: ott történik az áram érzékelése, és a ma már szoftveres felépítésű áramszabályozó kör a PWM irányítására hat, addig csökkenti a kimenő feszültséget, míg kapcsain az előírt értékű áram nem folyik. A motor hatásvázlatában ez úgy jeleníthető meg, hogy elhelyezünk benne egy olyan blokkot, amely hatását a számítógépi program kiértékeli, és a valós hardveres megoldási lehetőségektől függetlenül e blokkba írt tartalmat végrehajtja: célszerűen áramkorlát blokkot helyezünk el, amelybe a maximális és negatív maximális értékeket beírva felülről korlátozást írunk elő. E maximumokat általában szimmetrikusan adjuk meg, kevés kivételtől eltekintve.

Ha az áram állandó értéke, egy szabályozott áram-nagyság szükséges, akkora feszültség-többletet állítunk be, amelyet a motor a sebesség emelkedésével várhatóan elfogyaszt, miközben a felülről korlátozás áramszabályozásként jelenik meg. A szükségesnél kisebb kezdeti feszültségnél a sebesség növekedésével a belső feszültséggel elérve a kapocsfeszültséget, a már megismert exponenciálisan csökkenő áramú folyamatba lép a futtatás.

Más esetekben feszültségkorlátozást is alkalmazhatunk, amellyel adott sebességű motor-üzemet tudunk előírni. Régebben sebességszabályozó kört építettek fel sebességérzékelővel, szabályozóval és erősítővel, ma a beírható, és alkalmas módszerrel akár folytonosan átírható feszültségkorláttal mindig megszabhatjuk egy PMDC motor aktuális szögsebességét. Ez mai valós motorhajtásban is így történik, a pillanatnyilag beállított, de üzemben is átírható, és a PWM módszerrel pontosan betartható feszültség szint fogja megszabni a motor sebességét, és kikényszeríti a féküzemet is, ha csökkenő feszültséget írunk elő.

A hatásvázlat számítógépes szimulációs feldolgozása, feladatonkénti megoldása időfüggvény ábrákban megjelenítve ma nélkülözhetetlen eszköze a rendszertechnikai tanulmányoknak, vizsgálatoknak és fejlesztéseknek. A 11. ábra Matlab-Simulinkben összeállított modellt mutat.



11. ábra. PMDC motor hatásvázlatának egy lehetséges Matlab modellje

A hatásvázlat alkalmazása

Mivel a motor hatásvázlata csak a motornak a viselkedését tudja leírni, egy hajtott rendszer vizsgálatához, akár tervezési, akár azt megelőző stádiumban, a hatásvázlatot kiegészítik a hajtott berendezés modelljével is, ideértve az alkalmazható különféle felépítésű és tulajdonságú szabályozó berendezések modelljét is. Ezek a modellbővítések is csak matematikai összefüggéseket tartalmaznak, gyakorlatilag az egyes tagok átviteli függvényeit. E függvényeket a programok (Matlab, Modellica, VISSIM stb.) blokkok formájában jelenítik meg, többnyire a függvény közvetlen matematikai kiírása nélkül.

Egyszerű hajtás-feladatnál, amely nem tartalmaz szabályozást, elegendő lehet a motor hatásvázlatának olyan bővítése, amely a mechanikai kapcsolattal átvett esetleges áttételt és a

megnövekedett inerciát tartalmazza. Ez utóbbi a Θ értékének növekedésben jelenik meg, a hajtott rendszer tömeghatásainak megfelelő átszámítása után. Ha áttétel is van a motor és a berendezés között, akkor a motor szögsebessége helyett az áttétel kimeneti sebessége hajtja a rendszert. Az inerciák figyelembe vételét a Θ értékének az áttétel-négyzettel történő osztásával végezzük el.

Szabályozott hajtások tipikusan sebesség- vagy pozíciószabályozottak, feladatuk szerint. A motor hatásvázlata a szükséges bővítéseket fogja tartalmazni, az általunk megfogalmazott és beírt szabályozási tulajdonságokkal együtt. Tekintve, hogy ma a sebességszabályozásokhoz a PWM jellegű tápegységek tetszőleges kimeneti feszültségét beállíthatjuk, a sebességszabályozás viszonylag egyszerűen teljesíthető. Az alkalmazások nagyobb bonyolultságú feladatait a pozíciószabályozások jelentik.

Pozíciószabályozás hatásvázlata

Igen gyakori alkalmazás DC motorokkal kis teljesítményű és kis mozgás tartományú mechatronikai rendszerekben adott távolságú út megtétele, általában adott sebességgel, útméréssel kiegészítve. Ma az útmérés gyakran 1 mikrométer felbontású, vagy finomabb, a megteendő legkisebb úthossz akár 0,01 mm is lehet, s ezt akár több mp alatt kell egyenletes mozgással elvégeznie.

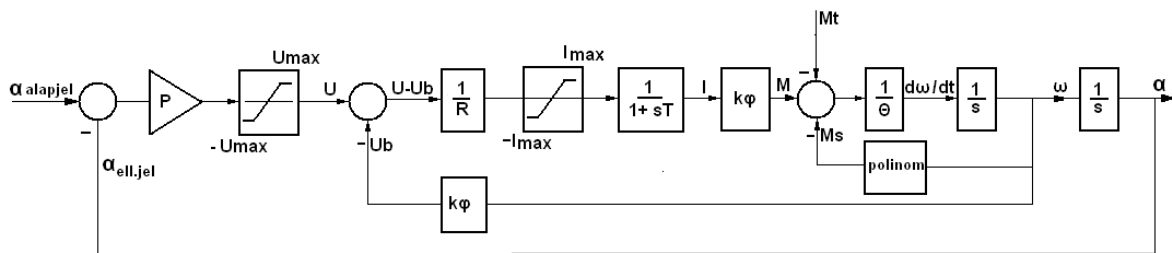
A motor forgómozgásának útegysége a megtett szögelfordulásra az ívmérték, radiánban, amit alapjelként is meg kell adnunk a motorra vonatkoztatva.

Az α szöghelyzet a szabályozott jellemző. A mozgás sebességét a feszültségkorláttal állíthatjuk be, míg az áramkorlát a nyomatékot korlátozza. A korlát tartalom azért elegendő, mert a tápfeszültség állandó érték, és bármely feladathoz elegendő, azaz az aktuálisan szükséges feszültség szint a tápfeszültség névleges értékét csak igen ritkán éri el.

A szögelfordulás, mint megtett út, alkalmas eszközzel mérendő, de a hatásvázlatban a mérőeszközt csak el nem hanyagolható időállandója vagy más, nem kedvező tulajdonsága esetén jelöljük saját átviteli függvényével, egyébként merev, időkésés nélküli egységnyi visszacsatolást ábrázolunk.

A motor hatásvázlatát alapul véve az egy áramkorlátozó blokk beillesztésével bővült. Kívülről egy további integrátor állítja elő a sebességből a szöghelyzetet, 12. ábra. A különbségképzés után a szöghibával arányosan felerősített kapocsfeszültséget kapná a motor, de a feszültség mindenképpen korlátozódik – egyszerű esetben a tápegység kimeneti maximumára. Mivel a legtöbb feladathoz ez túl nagy sebességet eredményezne, a beépített, és valójában folytonosan átírható értékű feszültségkorlát tetszőlegesen kis sebesség beállítását teszi lehetővé. A P, arányos szabályozóval a kör tulajdonságai gyakran elfogadhatóak, míg az I, integráló és ritkábban D, differenciáló tagokkal bővítve már egészen jó szabályozási tulajdonságok

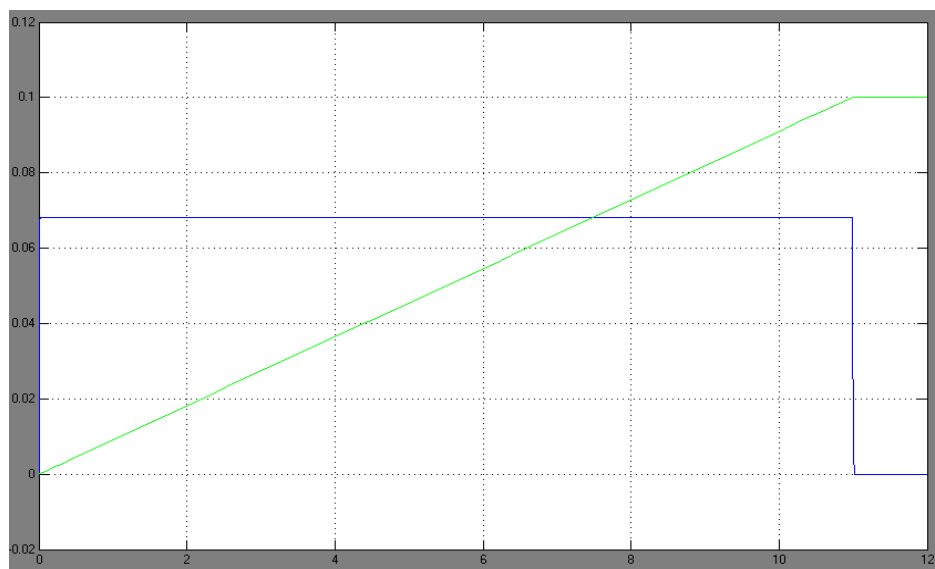
állíthatók be. Igen magas



12. ábra. PMDC motor pozíciószabályozási hatásvázlata, áramszabályozás helyett -korlátozással

követelmények, nagy pontosságú beállítás extrém kis idő alatt részben más felépítésű optimum-
stb. szabályozókkal teljesíthetők.

Az alábbi pozíciószabályozási folyamat 11 s alatt 0,1 radián elfordulási szöghelyzetet valósít meg a zöld vonal szerint, a kék vonal szerinti állandó szögsebességgel, erőteljes gyorsítással-fékezéssel, de a feladatot két nagyságrenddel kisebb idő alatt már csak elfogadhatatlan hibával tudná teljesíteni, ami itt nincs ábrázolva.



13. ábra. Pozíciószabályozás még lengésmentes beállási folyamata az aperiodicitás határán. Zöld: szöghelyzet, kék: sebesség. Az erősítés további növelése túllendüléshez vezetne, ami számos esetben nem megengedett

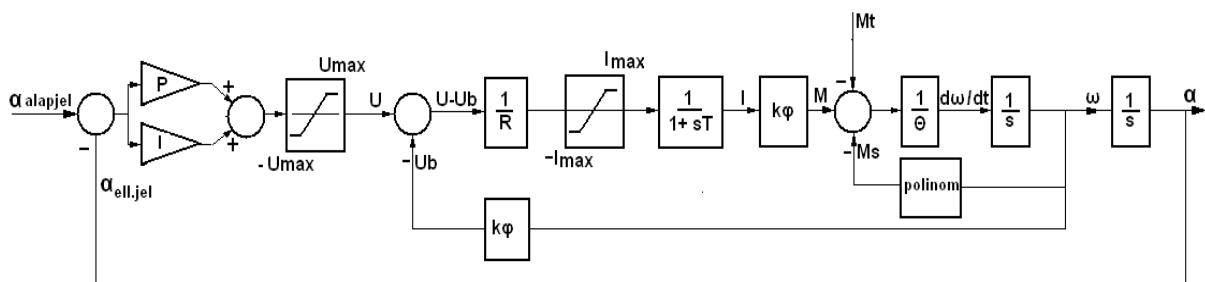
A pozíciószabályozás egyszerűbb esetében az M_t terhelő nyomaték értéke zérus, és ezzel a megállt motor nyomaték- és árammentes lehet, a szabályozási kör felső ága jelmentessé válik. A szögsebesség-elfordulás kapcsolat egyszeres integráló tartalma miatt ez „1 típusú” I-szabályozás, állandósult állapotban zérus hibával, ha nincs zavaró hatás.

Ha M_t értéke nem zérus, a felső ág csak akkor adhat tartósan feszültséget, áramot és nyomatékot, ha az előírt helyett kisebb, vagy nagyobb lesz az elért szöghelyzet, és a hibajel felerősítve a kívánt áramhoz szükséges feszültséget eredményezi. Egy robotkar súlyerő ellenében dolgozó motorja a kívánt robotkar-helyzetben megállítva a súlyerő nyomatékát ellensúlyozza. Ez a szabályozás szöghelyzet-hiba árán tudja csak a kívánt nyomatékhoz

szükséges áramot és feszültséget fenntartani, emiatt a robotkar az előírt pozícióhoz képest lejjebb áll.

Ez a szöghelyzet-hiba nagyobb körerősítéssel csökkenthető, de meg nem szüntethető, és a P-típusú, arányos szabályozások egyik lehetséges hátrányaként lengővé, használhatatlanná válik a szabályozás, ha az erősítést túl nagyra állítjuk. Modellvizsgálatok egyik előnye, hogy ilyen beavatkozásokat tényleges károsodások nélkül vizsgálhatunk.

Elvben is hibamentes megoldást kaphatunk a kör tulajdonságainak, ehhez felépítésének megváltoztatásával. A P jellegű szabályozót PI jellegűre kibővítve, a P csatorna mellett (az ábrán alatt) egy integráló csatornát is elhelyezve, és kimenő jeleiket összegezve megszűnik az addigi arányos kapcsolat a hibajel és a szabályozó kimenete között, 14. ábra.



14. ábra. PMDC motor PI jellegű pozíciószabályozási hatásvázlata, arányos és integráló csatornával

Az I tag a tartósan zérus bemenő jelre véges értékű, tehát nem zérus kimenőjelet ad, amellyel elérhető, hogy zérus szöghelyzet-hiba mellett is fennállhasson a szükséges feszültség, az áram és a nyomaték az M_t ellensúlyozásához. Így az előbbi robotkar a súlyerő nyomatékát kiegyenlítő motornyomaték fenntartása mellett is zérus szöghelyzet- hibával fog állva maradni az előírt pozícióban.

Az integráló tag $K_i=1/T_i$ erősítési tényezője a T_i időállandójának megfelelő sebességgel végzi el a szöghelyzet-hiba megszüntetését. Kis időállandó nagy sebességű beavatkozást eredményez, amely túllendüléshez, lengésekhez vezet, és a szabályozás nem tesz eleget az aperiodikus beállítás fontos követelményének, túlfutásával károkat okozhat. Nagy időállandó elhúzódó beállási folyamatot ad, amelyben a szöghelyzet-hiba csak lassan korrigálódik. Ezért, és mert explicit módon nem számítható ki pontosan a megfelelő P és I arány, szimulációs vizsgálatok, vagy a megépült rendszeren történő kísérletezés közbeni P és I korrekciók szükségesek.

A P és I erősítések arányának megfelelő megválasztása túllendülés nélküli, általában elegendően gyors beállást eredményez. További, D, differenciáló csatorna is alkalmazható, főként gyorsításra.

A PI típusú szabályozó további tulajdonságai az alábbiakban foglalhatók össze:

átviteli függvénye

$$W_{PI}(s) = A_P \left(1 + \frac{1}{sT_I} \right) = \frac{A_P}{T_I} \frac{1 + sT_I}{s},$$

alakú, ahol a szabályozó arányos csatornájának A_p erősítése, és az I csatorna T_I integrálási ideje pozitív értékek. A szabályozó a körerősítést A_p / T_I -szeresére változtatja, és a kör típuszámát eggyel növeli. A PI szabályozóra az általánosnak mondható esetre vonatkozó idő- és frekvencia-tartománybeli tulajdonságok állnak fenn.

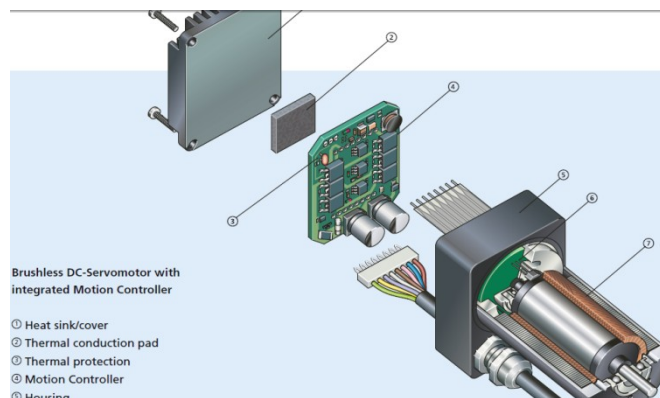
Az átmeneti függvény alakja korlátolatlan esetben

$$v_{PI}(t) = A_P \cdot 1(t) \cdot \left(1 + \frac{t}{T_I} \right).$$

Az alkalmazható feszültség- és áramkorlátozások a felfutás meredekségére hatnak, 26. ábra sebesség - zöld - görbéje.

Korszerű építési módok

kompakt egybeépítés, új fejlesztések eredményeként, 15. ábra.



15. ábra. Kompakt építési mód beintegrált vezérlő-irányító rendszerrel

Önellenőrző kérdések

1 Válassza ki a *hibás* válaszokat az állandómágneses motorindítására és fékezésére vonatkozó megállapítások közül: (hibások: a,c,e,f,g)

- a) a motor belső feszültsége az indítás folyamán végig zérus,
- b) exponenciális jellegű gyorsulási és fékezési folyamat állandó feszültségen lehetséges ,
- c) a féküzemre vonatkozó kapcsolási ábra csak ugyanazon előjelű feszültségeket tartalmaz,
- d) intenzív lassulás féküzemben egészen közel a megállásig tarthat,
- e) a hatásvázlat alapvetően hardveres kapcsolatokat szemléltet,
- f) a pozíciósabályozások bármilyen időfüggvényű terhelőnyomatéokra zérus maradó beállási hibával rendelkeznek.

- g) az I -taggal bővítés kizárólag a sebességviszonyokat javítja.

2 Jelölje meg azokat a szempontokat, amelyekről függ a pozíciószabályozás állandósult állapotban fennmaradó hibája: erősítési tényező(k), áramkorlát, feszültségkorlát, időállandók, terhelő nyomaték nagysága és időfüggvénye, tápfeszültség, útmérés pontossága, P vagy PI jellegű-e a szabályozás?

3. Jelölje meg a hibás válaszokat! (a, b, c mind hibásak):

- a) a súlyerő nyomatékával terhelt robotkar a motornyomaték megfelelő beállítása mellett zérus szöghelyzet- hibával nem tud állva maradni az előírt pozícióban, sem P , sem PI szabályozásnál,

- b) súlyerő nyomatékával nem terhelt robotkar a motornyomaték megfelelő beállítása mellett változó szöghelyzet- hibával fog állva maradni az előírt pozícióban PI szabályozásban,

- c) a súlyerő nyomatékával terhelt robotkar a motornyomaték megfelelő beállítása mellett zérus szöghelyzet- hibával fog állva maradni az előírt pozícióban már P szabályozásban is.