

## 2. MÉRÉS

### FORGATÓNYOMATÉK ÉS HATÁSFOK MÉRÉSE (MÉRLEGGÉPEK)

#### A mérés célja:

Mérleggépek megismerése, nyomaték, fordulatszám, áramerősség és feszültség mérése. Villamos motor, generátor hatásfok (terhelés) jelleggörbe mérése.

#### 1. Bevezetés

A gépészmérnöki gyakorlatban működő gépek döntő többsége forgó gép, amelyek **erőgépek** vagy **munkagépek** egyaránt lehetnek. Erőgépek között a leggyakoribb a villamos motor és a belsőégésű motor: villamos energiát, vagy az üzemanyag belső energiáját mechanikai munkává alakítják. A munkagépek a forgó mozgás formájában rendelkezésre álló mechanikai munkát hasznosítják adott feladatra, ilyenek például a generátorok, a szerszámgépek, a szivattyúk, ventilátorok, vagy a háztartási gépek.

Forgó mozgást végző gépek jellemzői a fordulatszám (szögsebesség) és a forgatónyomaték.

#### 2. Forgatónyomaték mérése

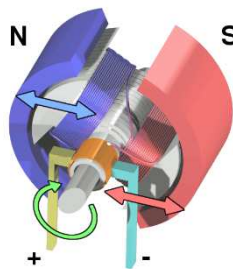
Tengelyen átvitt nyomaték meghatározása sokféle módon történhet. Ismert, hogy egy tengelyszakasz elcsavarodása (deformációjának nagysága) arányos az átvitt nyomatékkal, így a tengely elcsavarodásának mérése lehetővé teszi a nyomaték meghatározását. Ezzel a - műszaki életben gyakran alkalmazott - módszerrel későbbi tanulmányaikban fognak találkozni.

A jelen mérési feladatban a nyomatékot mérleggépek (mérlegmotor és mérleggenerátor) felhasználásával fogják meghatározni. Erőgép által szolgáltatott nyomaték mérésére alkalmas eszköz a **mérleggenerátor**, a munkagép által felvett nyomaték mérésére alkalmas a **mérlegmotor**.

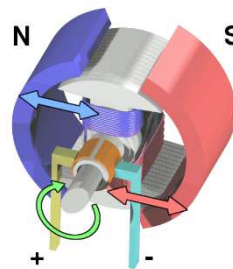
A mérleggépek mérési elve a következőekben foglalható össze. Egy villamos gép (motor, generátor) házát, azaz állórészét az alaphoz kell rögzíteni, hogy az állórész és a forgórész között üzemszerűen ébredő elektromágneses kölcsönhatás (nyomaték) hatására ne mozduljon el. A forgórészt terhelő nyomatékok ugyanis a hatás-ellenhatás elve szerint terhelik az állórészt is. Mérleggépeknél az állórész nincs szilárdan az alaphoz rögzítve, a csapágyazás lehetővé tesz - ütközőkkel korlátozott - elfordulást (**2.1. ábra**). Az álló- és forgórész tekercsei közötti elektromágneses kölcsönhatás az állórészt el akarja forgatni.



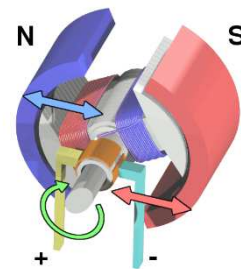
A villamos motorok két fő alkatrésze a forgórész és az állórész. A házhoz rögzített állórész tekercseiben folyó áram mágneses mezőt hoz létre (ezt hívják "**gerjesztésnek**"). A forgórész szintén vezetőhurkokból áll össze (ezek általában jóval kisebb menetszámúak, mint az állórész tekercsei), amelyekben áram folyik. A külső mágneses mezőben az áramjárta vezetőkre Lorentz-erő hat. Ha egy elektromos vezetékbe áramot vezetünk, magában a vezetékben elektromos töltés halad végig. A vezetékben mozgó, töltéssel rendelkező részecskékre erő hat, mely arányos az áramerősséggel, a vezető hosszával és a mágneses indukcióvektor nagyságával. Az erő maximális, ha egy hurok a mágneses erővonalakra merőleges, míg zérus, ha az erővonalakkal párhuzamos. A motor forgórész tekercselés esetében az erő a tengelyen forgatónyomatékokat hoz létre, mely a tekercset elfordítja. Az alábbi ábrán a leg-egyszerűbb, leginkább kis játékokban használt állandó mágneses motor működésén keresztül mutatjuk be a villamos motor működését.



Ha a tekercsben áram folyik, körülötte mágneses mező létesül, amely igyekszik az állórész mező irányába állni.



A forgórész a kommutátorral együtt forog, a kefék az állórészhez rögzítettek, és a kommutátor egymástól elszigetelt lemezein csúsznak.



Minden fél fordulatnál a stabil helyzet elérésekor a kommutátor megfordítja a tekercsben folyó áram irányát, így a forgás folytatódik.

Az egyenáramú motorok egyenárammal vannak megtaplálva. Az állórész tekercselése az egyenáram hatására az ábrán bemutatotthoz hasonlóan állandó mágneses teret hoz létre. A forgórészbe az áram az ún. **kommutátoron** keresztül jut be. A kommutátor a forgórész tekercsinek tengelyre rögzített kontaktusai, melyekre szénkefék (grafit kopóelemen) keresztül jut az áram. Egyenáramú motor esetén az egyenes forgatónyomaték elérése érdekében a forgórészen több, egymástól elszigetelt tekercs található, melyek közül mindig csak egy két pólusa kapcsolódik az áramforráshoz. A kommutátor feladata nem csak az egy tekercsben folyó áramirány megfordítása, hanem a tekercselések közötti kapcsolás is. Így a kommutátor a forgórész helyzetének megfelelően mindig az állórész mágneses mezőjével legnagyobb nyomatékokat létrehozó tekercset kapcsolja rá a betáplálásra. (A fenti ábrán bemutatott egyszerű motor esetén a motor nyomatéka 0 és egy maximum érték között változik a tengely elfordulása során.) Az egyenáramú motoroknál kétféle elrendezést különböztethetünk meg:

- a soros motorokat – ahol a forgórész és az állórész tekercselése sorba van kötve,
- illetve a mellékáramkörű motorokat, ahol az állórész gerjesztése egy, a forgórészről független áramkörben van szabályozva ("külső gerjesztés").

A soros motorok a leghatékosabb elrendezést jelentik. A soros motorok legnagyobb előnye ugyanis a nagy indítási nyomaték. Induláskor a motoráramot korlátozni kell, erre korábban indító/szabályzó előtétellenállásokat, manapság elektronikus szaggató berendezést alkalmaznak. A soros motoroknál – főként nagyobb sebességnél – további szabályozás érhető el az állórészrel párhuzamosan kapcsolt ún. "söntellenállás" beiktatásával. Elvileg a soros motor fordulatszámát nem korlátozza egyik áramköri elem sem, súrlódás nélkül a végtelenségig tudna gyorsulni. A söntellenállás változtatásával a motor fordulatszáma könnyen szabályozható. A soros motorok állórészének pólusátkapcsolásával a motor fékezőerőt is kifejthet, ezt hívják villamos fékezésnek. Ekkor lényegében a motor dinamóként üzemel.

A háromfázisú motorokat háromfázisú váltakozó feszültségről üzemeltetik. A motor gerjesztése így periodikus: az állórész tekercsek forgó mágneses mezőt hoznak létre, mely a betáplált váltóáram frekvenciáján forog körbe. (A póluspárok, azaz a tekercsek számának növelésével osztható a frekvencia, azaz előállítható 50, 25,  $16\frac{2}{3}$ , 12,5, stb. Hz). Megkülönböztetünk szinkron és aszinkron gépeket. A szinkron gépeknél a motor fordulatszáma megegyezik



a mező frekvenciájával, míg aszinkron gép esetén kismértékű szlip, azaz csúszás van, a motor fordulatszáma kicsivel alacsonyabb a mező fordulatszámanál. Aszinkron gépeknél az állórész és a forgórész közötti elektromágneses mezők közötti csúszás viszi át a nyomatókat, ezek lényegesen egyszerűbb kialakításúak, mint a szinkrongépek. A járműtechnikában a motor fordulatszám szabályozásához változtatható frekvenciájú váltóárammal kell táplálni, mellyel megfelelő pontossággal kell követni a motor forgási frekvenciáját. Ez ma már nem okoz problémát, de az erősáramú elektronikus rendszerek előtti világban (az 1980-as évek előtt) komolyan akadályozta a háromfázisú motorok elterjedését. A Kandó-mozdonyokon – amelyek háromfázisú motorokkal rendelkeztek már a '30-as években – pl. nagyobb volt a változtatható frekvenciájú váltóáramot előállító berendezés (mely póluspár változtatással működött), mint maga a vontatómotor, és ez a rendszer is összesen négyféle frekvenciát tudott előállítani (aV40-es mozdony ezért csak 25, 50, 75 és 100 km/h-s sebességgel volt képes huzamosan haladni). A fokozatmentes szabályzás a feszültség és a frekvencia egyidejű változtatásával lehetséges.

A korai villamosított vasútvonalakon ezért terjedt el kezdetben az egyenáramú vontatás (pl. Olaszországban a 3 kV egyenáram, a Budapesti HÉV-en az 1 kV egyenáram, a villamosoknál a 600 V egyenáram). Szinte kizárólag ilyenrel találkozhatunk a régebbi magyarországi villamosokon, a mai metró-, HÉV és fogaskerekű szerelvényeken, a GVM trolibuszokon illetve a hazai régebbi dízel-elektromos és villanymozdony típusokon. Megjegyzendő, hogy ezen az elven egyfázisú váltóárammal is lehetne üzemeltetni a motort, és ez alacsony frekvencián működik is. A német nyelvterületen ezért terjedt el a 16 2/3 Hz-es vasúti vontatófeszültség (hazánkban a Rákospalota – Veresegyház – Vác – Gödöllői HÉV volt ilyen feszültséggel villamosítva).

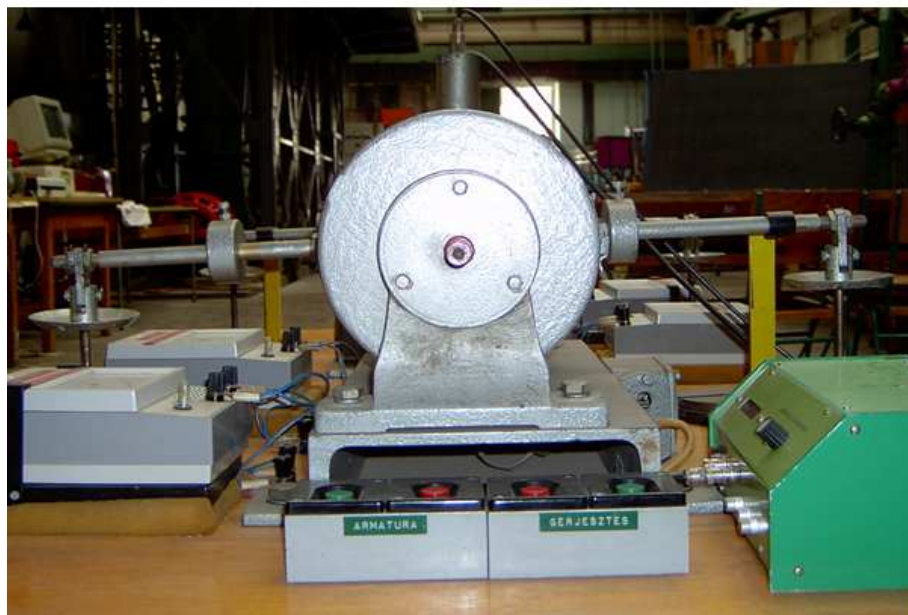
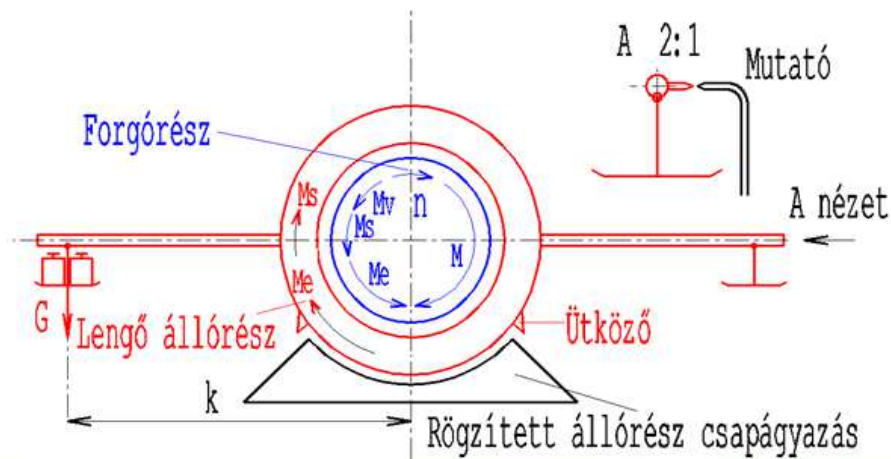
Am nagyobb frekvencián a motor kommutátora az indukciós hatások következtében komoly szikrázásokba kezdhet, mely végül "körtűz"-höz vezethet (ez egy villamos ívhúzás két – egymástól normális esetben elszigetelt – kommutátorszelet között, mely végigugorhat sorban az összes kommutátorszeleten, teljes kör alakú rövidzárlatot okozva). A legmagasabb egyfázisú frekvenciát hagyományos motorok mellett az Innsbruck mellett Stubaitalbahn-on alkalmazták 1983-ig (50 Hz, 3 kV).

A nagyobb mágneses gerjesztés végett mind a forgórész, mind az állórész tekercselés vasmagot vesz körül, mely természetesen elektromosan el van szigetelve a vezetőktől. Az UV típusú villamosoknál a forgórész kommutátorai között csillámlemez szigetelést alkalmaznak, a vezetőhurkok pedig megfelelő bevonattal és gyantával vannak szigetelve.

A mai villamos vontatástechnikában és ipari berendezésekben már szinte kizárólag háromfázisú rövidrezárt forgórészű motorokat hajtanak, melyek megtáplálása frekvenciaváltón keresztül történik. A frekvenciaváltó egy teljesítményelektronikai eszköz, amely a bejövő áramból egyenáramot állít elő, majd a kívánt motorfordulatszámnak megfelelő frekvenciájú és feszültségű háromfázisú váltóáramot állít elő. A frekvenciaváltó betáplálása lehet egyfázisú, illetve háromfázisú váltóáram és egyenáram is (ekkor nincs szükség egyenirányításra). Ezzel az eljárással lehetséges olyan vasúti járművek létrehozása, melyek a különböző villamosítási rendszerrel kiépített vasúti hálózatok (Magyarország 25 kV 50Hz, Ausztria, Németország 16kV 16<sup>2</sup>/3Hz, Olaszország 3000V egyenáram) között átjárhatnak mindenféle emberi beavatkozás nélkül.

**Generátor** esetén a hajtott forgórész "magával akarja vinni" az állórészt. **Motor** esetén a forgórész "elrugaszkodik" az állórésztől, azaz a forgásértelemmel ellenkező értelmű nyomaték jelentkezik a házon.

Ezeket a nyomatékokat az elbillenő állórészre szerelt karokon lévő mérlegtányérokba helyezett súlyok nyomatékával egyenlíthetjük ki, azaz mérhetjük meg (**2.1. ábra**).



2.1 ábra Mérleggenerátor nyomatéki egyensúlya és képe

A nyomatéki egyensúlyt külön vizsgáljuk az állórészen és külön a forgórészen, és figyelembe vesszünk más - viszonylag kis - nyomatékokat is.

Az egyenletekben az alábbi jelöléseket fogjuk használni:

- $M$  az erőgép által szolgáltatott, mérendő nyomaték, amit tengelykapcsoló juttat a generátor forgórészére,
- $M_E$  a forgó-, ill. állórészre ható elektromágneses eredetű forgatónyomaték,
- $M_S$  a csapágsúrlódásból, kefesúrlódásból származó fékezőnyomaték,
- $M_V$  a forgás következtében fellépő légsúrlódás okozta és a hűtőlevegőt szállító ventilátor hajtásához szükséges, ún. ventilációs nyomaték,
- $G$  az állórész kiegyensúlyozásához szükséges tömegek súlya,
- $k$  karhossz.

### A generátor forgórész egyensúlya:

A forgórész egyensúlyi állapotában a fordulatszám állandó, ekkor a nyomaték egyensúly:

$$M = M_E + M_S + M_V .$$

A mérendő  $M$  hajtónyomatéknak ugyanis a súrlódási ellenállást és a tengelyen lévő hűtő-ventilátor hajtásához szükséges nyomatékokat is fedeznie kell. Az állórész egyensúlya - a mérősúlyokkal beállított - vízszintes karok esetén **(2.1. ábra)**:

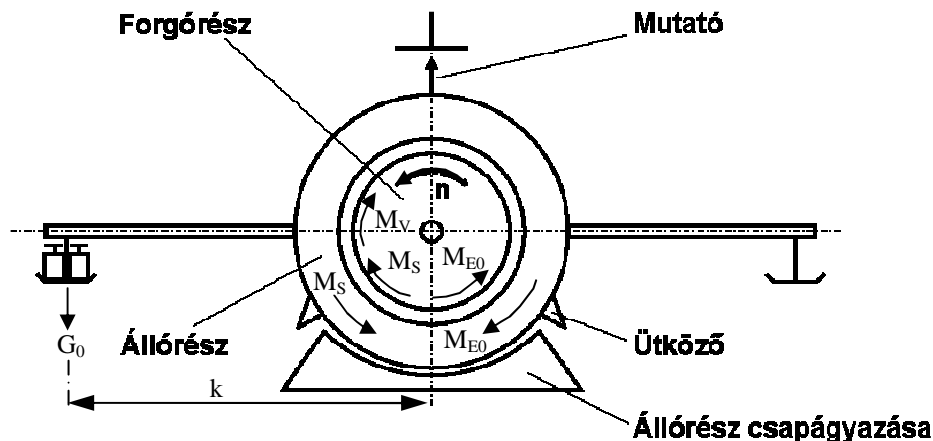
$$M_E + M_S = G \cdot k ,$$

miel a ventilációs nyomaték – ellentétben az elektromágneses- és a csapágsúrlódási nyomatékkal – nem adódik át az állórészre. Az **állórész** egyensúlyára az alaphoz és az mérlegkarhoz erősített **mutatók fedéséből** következtethetünk.

A két egyenlet egybevetéséből:

$$M = G \cdot k + M_V . \quad (1)$$

A második tag meghatározására ún. **üresjárás mérést** kell végezni. Ekkor a mérleggenerátort lekapcsolva az erőgéptől, a forgásirány megtartásával olyan **motorként** üzemeltetjük, amelyet csak a belső ellenállások ( $M_V + M_S$ ) terhelnek **(2.2. ábra)**.



2.2. ábra Mérlegmotor üresjárás egyensúlya.

A forgórész egyensúlya üresjáráskor:

$$M_{E0} = M_V + M_S .$$

az állórész egyensúlya üresjáráskor:

$$M_{E0} = G_0 \cdot k + M_s .$$

A két egyenletből:

$$M_v = G_0 \cdot k .$$

Ezt a szorzatot az (1) eredménybe behelyettesítve a **generátorüzemben** mért nyomaték:

$$M = (G + G_0) \cdot k .$$

Hasonló levezetés után a **motorüzemben** mért nyomaték:

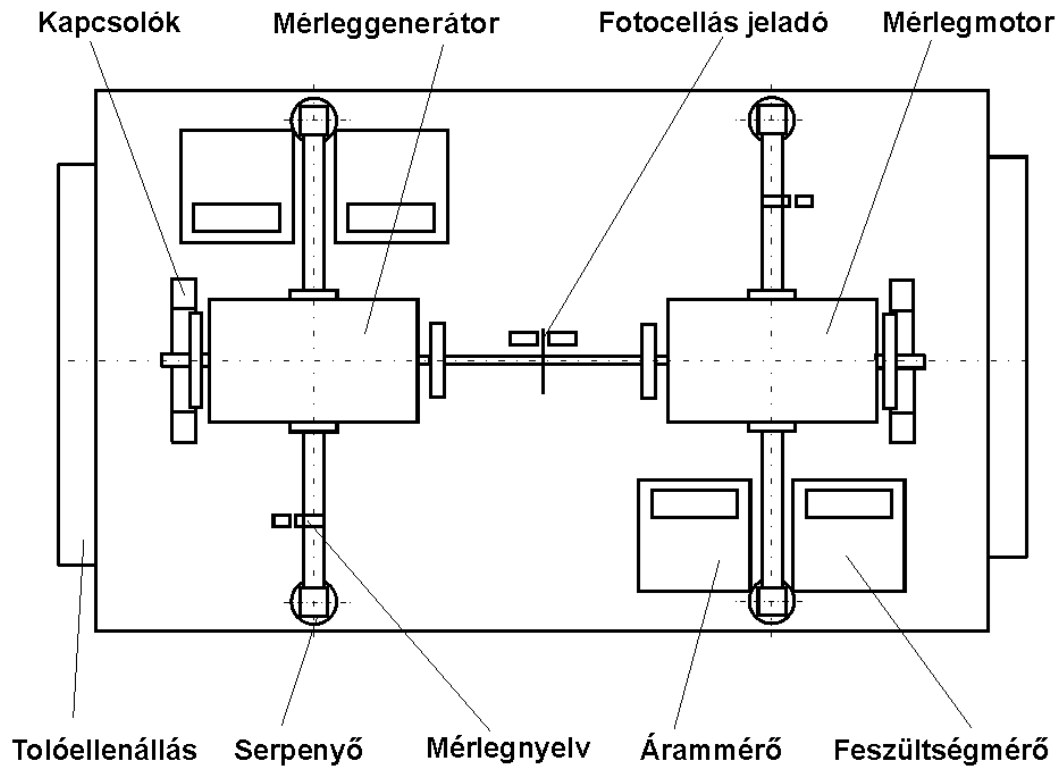
$$M = (G - G_0) \cdot k .$$

Az üresjárási mérést rendszerint több fordulatszámmon elvégzik és a  $G_0$  értékeket a fordulatszám függvényében ábrázoló diagramot a mérleggéphez mellékelik.  **$G_0$  értékének előjele** függ attól, hogy üresjáráskor melyik oldali serpenyőbe kellett helyezni a súlyt, továbbá attól is, hogy a mérleggépet motorként, vagy generátorként alkalmazzuk-e.



### 3. A mérési gyakorlat

**A mérőállomás** merev tengelykapcsolóval összekapcsolt egyenáramú mérlegmotorból és mérleggenerátorból álló gépcsoport (**2.3. ábra**).



2.3. ábra  
Berendezés vázlatja és fényképe

A **mérési feladat** a mérlegmotor, (vagy a mérleggenerátor) hatásfokának meghatározása a terhelési fok függvényében  $n = 2000/\text{min}$  állandó fordulatszámon.

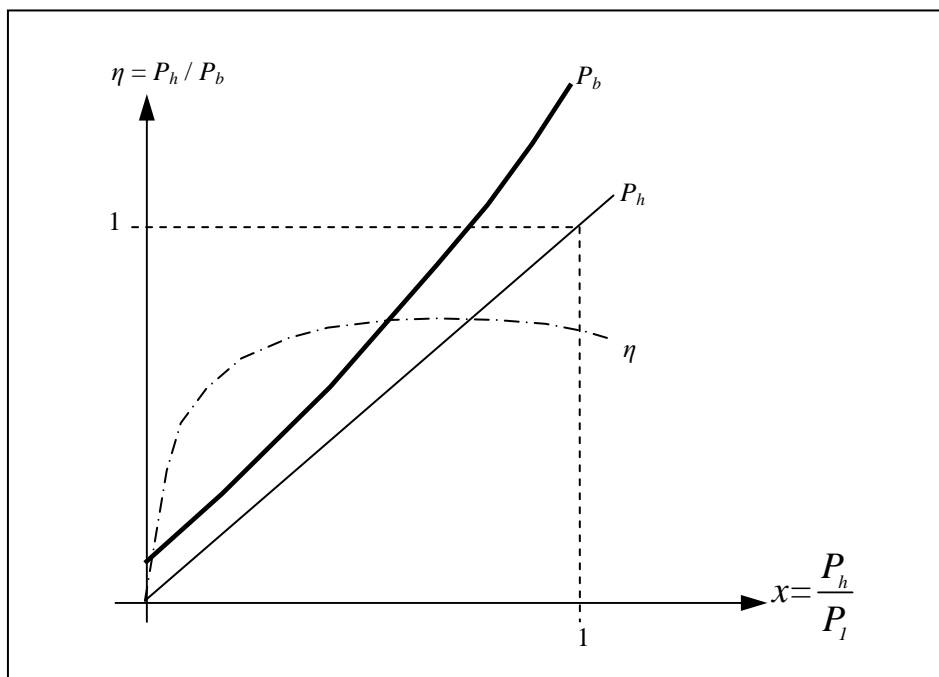
Az  **$x$  terhelési fok** a hasznos teljesítmény ( $P_h$ ) és a névleges teljesítmény ( $P_l$ ) hányadosa:

$$x = \frac{P_h}{P_l}.$$

A villamos gép **hatásfoka** ( $\eta$ ) a hasznos teljesítmény ( $P_h$ ) és a bevezetett teljesítmény ( $P_b$ ) hányadosa:

$$\eta = \frac{P_h}{P_b}.$$

A villamos gépek **hatásfoka** ( $\eta$ ) a **terhelési fok** ( $x$ ) függvényében a **2.4.ábra** szerint alakul. Ezen az ábrán a hasznos ( $P_h$ ) és a bevezetett ( $P_b$ ) teljesítmény görbéjét is megrajzoltuk.



2.4.ábra  
Mérleggép jelleggörbéi

A **villamos teljesítményt**, amely a **motornál bevezetett**, a **generátornál hasznos teljesítmény**, az ampermérővel mért áramerősségből és a voltmérővel mért feszültségből határozzuk meg. A műszerek sönt, illetve előtét ellenállással vannak felszerelve, a mutató kitérését, - a leolvasott osztást - egy,



a helyszínen megállapítandó állandóval ( $c_v$  [V/osztás], ill.  $c_A$  [A/osztás]) kell szorozni, hogy a feszültséget voltban, az áramerősséget amperben kapjuk (méréshatárok: 6 A és 300 V)(**2.5., 2.6. ábra**).



2.5. ábra



2.6. ábra

**A mechanikai teljesítmény** (amely a mérlegmotor esetén a hasznos, mérleggenerátor esetén a bevezetett teljesítmény) a mérleggép kiegyensúlyozásához szükséges nyomatékból és a mért fordulatszámából számítjuk. Az  $m_0$  tömeg értéke - üresjárási mérés alapján -  $n=2000/\text{min}$  fordulatszámon mindkét mérleggépnél.

$$m_0 = 0,02 \text{ kg .}$$

Ebből:

$$G_0 = m_0 g .$$

A motor leadott nyomatéka az

$$M = (m - m_0) \cdot g \cdot k ,$$

a generátor felvett nyomatéka pedig az

$$M = (m + m_0) \cdot g \cdot k$$

összefüggésből számítható.

A fordulatszám mérése a fotocellás jeladó segítségével történik.

A **terhelés számításához** szükségünk van a **gépek névleges teljesítményére**.  $P_1$  a gép  $x=1$  terheléshez tartozó hasznos teljesítménye, azaz a névleges teljesítmény. A **generátor** ezen adata a géptáblán leolvasható névleges villamos adatokból ( $U$ ,  $I$ ) számítható, hiszen a generátor hasznos teljesítménye a villamos teljesítmény:

$$P_{1G} = 1540 \text{ W} .$$

A **motor** névleges teljesítménye a géptáblán feltüntetett feszültség és az áramfelvétel mellett szolgáltatott mechanikai teljesítmény, amelyet előzetes méréssel meghatároztunk:

$$P_{1M} = 1300 \text{ W} .$$

### Összefoglalva:

- A mérési feladat a mérlegmotor, (vagy a mérleggenerátor) hatásfokának meghatározása a terhelési fok függvényében  $n = 2000 / \text{min}$  állandó fordulatszámon. (A hallgatók fele mérlegmotort, a másik fele mérleggenerátort mér a laborgyakorlaton.)
- 10 terhelési állapot mellett feljegyezzük a mérlegmotor/mérleggenerátor kiegyensúlyozásához szükséges tömeget, a felvett/leadott áramerősséget és a villamos feszültséget. A kapott adatokból számoljuk a berendezés hasznos és bevezett teljesítményt. A névleges és a hasznos teljesítményből meghatározzuk a terhelési fokot ( $\mathbf{x}$ ), a hasznos és a bevezetett teljesítmény hányadosából pedig számoljuk a hatásfokot ( $\boldsymbol{\eta}$ ).

### A kiértékelés menete:

A jegyzőkönyvben rögzítsük a mért **mérleggép** és a használt **műszerek** típusát és számát.

A mérés során a jegyzőkönyv sablonban szereplő táblázat vastag vonaltól balra lévő oszlopait **soronként** kitöltjük. A **kiértékelés során** a mérőcsoport minden tagja kiértékel három-négy mérési pontot (végigszámol három-négy sort), majd az utolsó két oszlopot összediktálja a mérőcsoport. Mindenki önállóan felrajzolja az  $\eta(x)$  grafikont.

### A kiértékelésnél felhasznált összefüggések:

Villamos feszültség	$U = c_V \cdot U'$ ,
Áramerősség	$I = c_A \cdot I'$ ,
Villamos teljesítmény	$P_{vill} = U \cdot I$ ,
Mechanikai teljesítmény	$P_{mech} = (m \pm m_0) \cdot g \cdot k \cdot n \cdot 2 \cdot \pi$ ,
Terhelési fok	$x = \frac{P_h}{P_1} = \text{-----}$ ,
Hatásfok	$\eta = \frac{P_h}{P_{bev}} = \text{-----}$ .

A  $P_{mech}$  képletében, ill. a táblázatban szereplő  $m_0$  **előjelét** a mért mérleggépnek megfelelően írjuk be. A mért mérleggéptől (hogy generátor-e, vagy motor) függ  $x$  és  $\eta$  képlete is.

**A kapott hatásfokértékeket A4-es milliméterpapíron a terhelés függvényében kell majd ábrázolni.** A léptékek felvételét a 0. mérésnél már megtanultuk (1 egység csak 1, vagy 2, vagy 5 cm legyen).

A diagramon tüntessük fel a diagram címét, a fordulatszámot, melyen a mérést végeztük, a dátumot, a diagram készítőjének nevét és Neptun kódját.

### A MÉRÉSRE VALÓ FELKÉSZÜLÉS

- Hozzanak magukkal 1 db A4-es milliméterpapírt, ceruzát, vonalzót, számológépet.
- Mérés előtt ellenőrizni fogjuk a mérésre történő megfelelő felkészülést, a mérés során alkalmazott összefüggések ismeretét és helyes használatát elméleti, ill. rövid számpéldán keresztül. (Pl.: a mintakérdések a honlapon; megjegyzés: a beugrón ezektől eltérő kérdések is lehetnek. )
- Töltsék ki otthon a biankó jegyzőkönyvet a 4. pontig (az 5-8 pontot majd a mérésen fogjuk).

A mérésleírással illetve a méréssel kapcsolatos észrevételeket a [csizmadia@hds.bme.hu](mailto:csizmadia@hds.bme.hu) címre várjuk.