

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

LAPÁTOS LÉGMOTOROK OPTIMÁLIS MŰKÖDÉSI TARTOMÁNYÁNAK MEGHATÁROZÁSA

Készítette: **BEREGSZÁSZI GERGŐ**
MSc I. évf. hallgató

Témavezetők: **DR. JÁNOSI LÁSZLÓ**
egyetemi tanár,
tanszékvezető



**Gödöllő
2014**

Tartalom

1.	Bevezetés.....	3
1.1.	A téma indoklása	3
1.2.	Célkitűzés	4
2.	Irodalom feldolgozás.....	5
2.1.	Légmotorok	5
2.1.1.	Légmotorok alkalmazásának előnyei és hátrányai	5
2.1.2.	Típusok és azok felépítése	6
2.1.3.	Fordulatszám szabályozás.....	8
2.1.4.	Alkalmazások.....	10
2.2.	Mérés és modellezés	10
2.2.1.	Modellezés	11
2.2.2.	Méréstechnika	12
2.2.3.	Jelek és feldolgozásuk	14
2.3.	Áramlási vizsgálatok	15
2.3.1.	Közegáram	16
2.3.2.	Mérőeszközök	18
2.4.	A kagylódiagramok szerepe	19
2.4.1.	Belsőégésű motorok kagylódiagramja	20
2.4.2.	Szivattyúk kagylódiagramja	21
2.4.3.	Ventillátorok kagylódiagramja	22
3.	Anyag és módszer	23
3.1.	Mérési módszer.....	23
3.2.	A mérés eredményei	27
3.3.	Virtuális modell	32
3.4.	Identifikáció és validálás	34
4.	Eredmények, diagramok.....	38
5.	Összefoglalás.....	47
6.	További feladatok.....	47
7.	Summary	48
8.	Köszönetnyilvánítás	48
9.	Felhasznált irodalom	49

1. BEVEZETÉS

1.1. A téma indoklása

A munkám célja, hogy lapátos légmotorokhoz olyan diagramokat készítsék, amelyek segítségével azok optimális működési tartománya meghatározható.

A légmotorok legáltalánosabb fordulatszám szabályozási lehetősége, hogy a beáramló levegő mennyiségét fojtják. Ez analógiája a munkahengereknél használt úgynevezett primer fojtásnak. A szekunder fojtás alkalmazása a legtöbb légmotornál nem lehetséges, ugyanis a kipufogás a motor felületén történik, csatlakozás nélkül. Többek között ennek okán a légmotorok fordulatszám szabályozása terhelésfüggő.

A legnépszerűbb diagramok egyike, ahol a motor leadott nyomatékát ábrázolják adott fordulatszámon. Néhány esetben ehhez tartozik még egy légfogyasztás diagram is. Ugyanakkor ebből nem derül ki, hogy a motorok milyen körülmények között működnek az elérhető legjobb hatásfokon. Az belátható, ha minél nagyobb keresztmetszeten minél több levegő jut be a motorba, egy bizonyos határértékig, azaz amíg az tönkre nem megy, a leadott teljesítmény növekszik. Ugyanakkor minél nagyobb az elérendő teljesítmény, annál több és több levegőre van szükség, amely kielégíti ezt az igényt. Ez egy bizonyos pont felett hatásfok romláshoz vezet.

A munkám során olyan méréseket kívánok végezni, amelyek segítségével a belsőégésű motorokhoz hasonlóan kagylódiagramokat tudok létrehozni. Ezen diagramok segítségével az adott motorok optimális működési tartománya egyszerűen meghatározható. A későbbi, gyakorlati használhatóság érdekében a méréseket modellekkel egészítem ki.

A méréseimet egy az Ingersoll Rand által forgalmazott motoron hajtottam végre. A motorhoz a Rézmű Kft. jóvoltából jutottam hozzá.

A Rézmű Kft 1993 óta létezik, és eredetileg rézből készült termékekkel foglalkozott. Ma már a legkülönbözőbb fémanyagokkal dolgoznak, elsősorban belsőépítészeti munkákhoz. Ilyen munkák például: lépcsőkorlátok, rácsok, bútorok, függönytartók, stb., magyar és külföldi piacra egyaránt.

Ipari felhasználók részére gyártanak különféle hegesztéstechnikai segédeszközöket és kisgépeket, közöttük pneumatikus forgácsológépeket. Utóbbiban használnak légmotorokat.

Korábban közös együttműködéssel felújításra került az általuk forgalmazott forgácsológép, amely során nehézséget okozott a légmotor optimális működési tartományának

meghatározása. Ezen probléma megoldása során merült fel jobban használható diagramok készítése.

A mérésekben és a mérőeszközök biztosításában a Festo Kft. segített.

A Festo Kft. 1925 –ben alapult Németországban és akkoriban faipari megmunkálással foglalkozott. Az idő során profilja sokat változott és ma már meghatározó szerepet játszik az automatizálásban világszinten. Az elsősorban pneumatikus termékpaletta, ma már a különféle elektromos végrehajtókkal és érzékelőkkel bővült.

1.2. Célkitűzés

A munkám célja, hogy mérések alapján olyan diagramokat dolgozzak ki lapátos légmotorokhoz, amelyek segítségével az adott működési körülményekhez meghatározható a motor optimális működési tartománya.

2. IRODALOM FELDOLGOZÁS

2.1. Légmotorok

2.1.1. Légmotorok alkalmazásának előnyei és hátrányai

Manapság a legtöbb helyen forgómozgás létrehozására elektromos motorokat használnak. Szabályzásuk megfelelő irányító eszközökkel viszonylag egyszerű, és a legfontosabb, hogy az elektromos áram ma már majdnem mindenhol jelen van, ami használatukat tovább könnyíti. Ugyanakkor a karbantartásuk bonyolult, a tönkrement motorokat egyszerűbb cserélni mintsem azt javítani, ennél fogva a karbantartásuk költséges is. Továbbá érzékenyek a különböző környezeti hatásokra. Amennyiben mégis szélsőséges körülmények között szeretnénk használni, a megfelelő védelemmel ellátott motorok rendkívül robosztus méreteket képesek öltetni. Ennél fogva ma is széles alkalmazási palettája van a légmotoroknak a különböző mérnöki alkalmazásokban, amelyet BEATER (2007) részletesen kifejt.

A legszembetűnőbb előnye egy légmotornak egy villanymotorral szemben a teljesítmény/tömeg aránya. Ugyanaz a teljesítményű légmotor akár ötször könnyebb és jelentősen kisebb méretű, mint egy villanymotor, írja ezt az INGERSOLL RAND (2009) katalógus. Ennek oka, hogy a villanymotorokat jócskán túl kell méretezni a melegedés miatt, máskülönben nagyon könnyen leégnek. Ebből következik az az előnyük is, hogy a légmotorokat tulajdonképpen nem lehet leégetni. Egyrészt a bevezetett levegő alapvetően hűti a szerkezetet, de még ha annyira leterheljük, hogy a motor tengelye megáll, akkor sem történik baj, amennyiben megfelelő nyomáson üzemeljük azt.



2-1. ábra Azonos teljesítményű (0.25kW) lég -és villanymotor (Forrás: INGRSOLL RAND (2009) katalógus)

Mind BEATER (2007) és az INGERSOLL RAND (2009) katalógus kiemelik továbbá az egyszerű és olcsó elemekből felépíthető szabályzást, az egyenáramú motorhoz hasonlító nyomaték –fordulatszám jelleggörbét és nem utolsósorban a szélsőséges körülmények közötti üzemeltethetőséget. A szerkezetbe, majd abból kiáramló levegő a különböző környezeti szennyeződéseket tulajdonképpen eltaszítja a motortól. Ezen kívül robbanásveszélyes körülmények között is használható. A szerkezet egyszerű felépítéséből adódóan pedig a karbantartásuk viszonylag alacsony költségekkel jár.

BEATER (2007) kitér a hátrányokra is, amiből a legnyilvánvalóbb a rendkívül magas légfogyasztás, amihez hatalmas méretű és költséges kompresszor, kompresszorok szükségesek. Ezen kívül még megemlíti a rossz hatásfokot, amely átlagosan 20% egy légmotor esetén, továbbá, ami minden pneumatikus eszköznél problémát okoz: a nagy zajjal járó kipufogást.

2.1.2. Típusok és azok felépítése

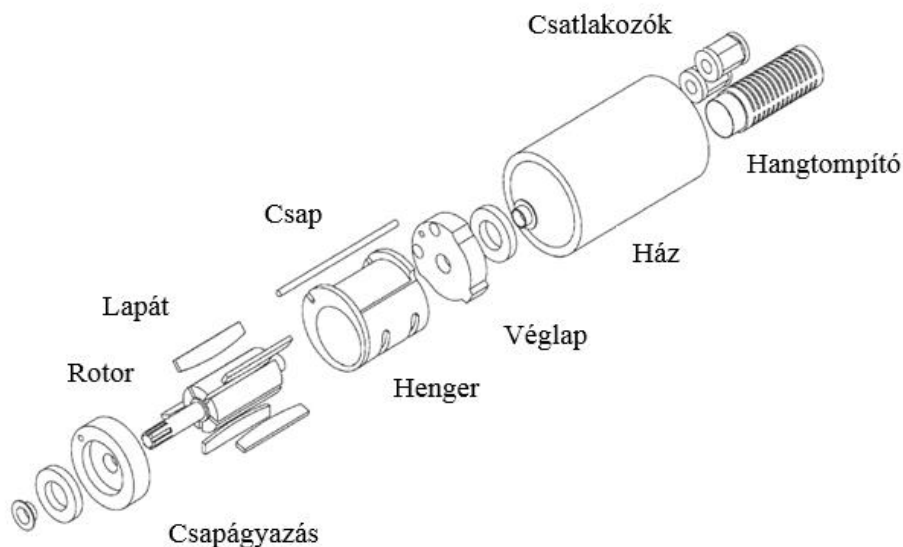
A FESTO PNEUMATIKA ALAPOK (2001) tanfolyami anyagában négy különböző típusú légmotort említene meg:

- lapátos motorok
- dugattyús motorok
- fogaskerék motorok
- turbinás motorok.

Az INGERSOLL RAND (2009) katalógus szerint rendszerint az első kettő található meg ipari környezetben.

2.1.2.1. Lapátos motorok

A legelterjedtebb típusú légmotorok. Felépítésük rendkívül egyszerű. A forgórész (rotor) amelynek horonymegvezetésében lapátok helyezkednek el, excentrikusan helyezkedik el az állórészben (sztátor). A lapátok száma általában páratlan és rendszerint 3 -11 db között van. A lapátokat álló helyzetben rugóerő szorítja az állórész falához, amelyet üzemközben átvesz a centrifugális erő. A forgatónyomatékot a lapátok felületén felépülő nyomás hozza létre.



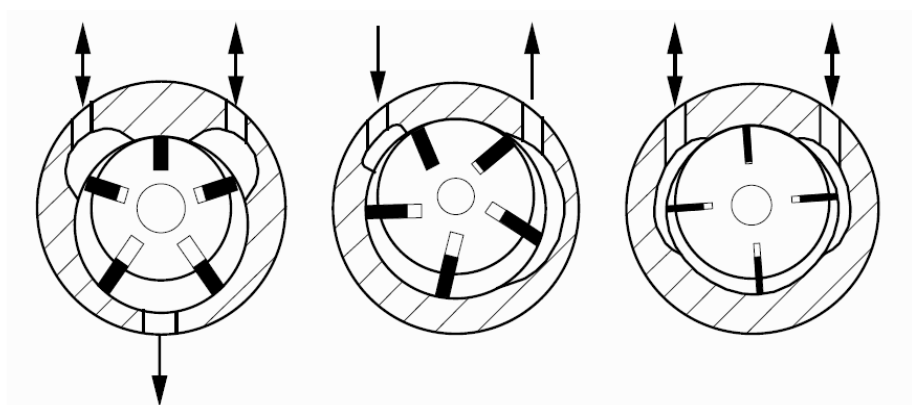
2-2. ábra Lapátos légmotor robbantott ábrája (Forrás: BEATER (2007))

BEATER (2007) megkülönböztet három különböző típusú lapátos motort.

A háromnyílású két forgásirányú légmotorok, ahogy nevéből is adódik, mindkét irányba forgathatóak, amelyek közül egy egyszerű 4/2 –es szeleppel válthatunk. Külön van egy-egy bemenete és egy kimenet a kipufogáshoz a levegőbe.

A kétnyílású egy forgásirányú motoroknak csak egy bemenete van, amellyel csak egy forgásirány valósítható meg, a kipufogás pedig itt is a motorházon elhelyezett nyíláson, nyílásokon valósul meg. Ezek a legelterjedtebb motorok Európában.

Ezekén kívül léteznek még kétnyílású két forgásirányú motorok, amelyeknek a ki és bemenő ágán is található csatlakozó.

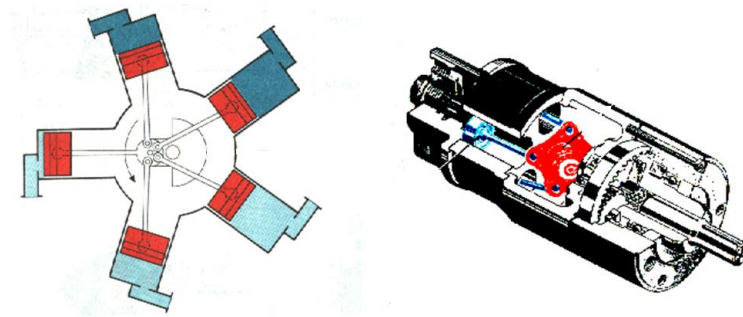


2-3. ábra A háromnyílású két forgásirányú, kétnyílású egy forgásirányú és a kétnyílású két forgásirányú légmotorok elvi felépítése (Forrás: BEATER (2007))

2.1.2.2. Dugattyús motorok

A második legelterjedtebb típus a dugattyú motorok. Ezekkel mérés szinten nem foglalkoztam a munkám során.

A dugattyús motorokból megkülönböztetünk axiális-, illetve radiál dugattyús kivitelűeket. Működési elvük hasonló. Mindkét esetben több munkahenger együttes mozgása hozza létre a forgatónyomatékot. A radiális kivitelű motorok esetében a munkahengerek excentrikus mozgással hozzák létre a forgómozgást, míg az axiális kivitelűnél egy ferde tárcsára fejt ki nyomóerőt a dugattyúrúd. Általában robosztus kivitelűek, nagy nyomatékot és kis fordulatszámot biztosítanak. Az INGERSOLL RAND (2009) katalógus szerint az egyik legelterjedtebb speciális alkalmazásuk, mikor nehéz tömegeket kell lassan függőlegesen mozgatni.



2-4. ábra Radiális dugattyús és az axiális dugattyús légmotor elvi rajza (Forrás: JÁNOSI (2012) előadásjegyzet)

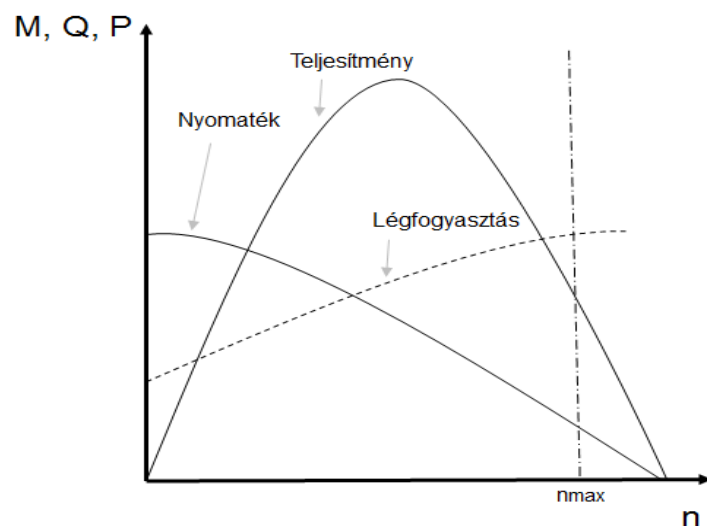
2.1.3. Fordulatszám szabályozás

A következőkben csak a lapátos motorokkal foglalkozom, ugyanis a mérések is ilyen típusú motorral történtek.

A lapátos légmotorok sebesség szabályozása rendszerint primer, azaz bemenő ágon történik. Az INGERSOLL RAND (2009) katalógus és BEATER (2007) is kétféle szabályozást emel ki, attól függően mire van szükségünk:

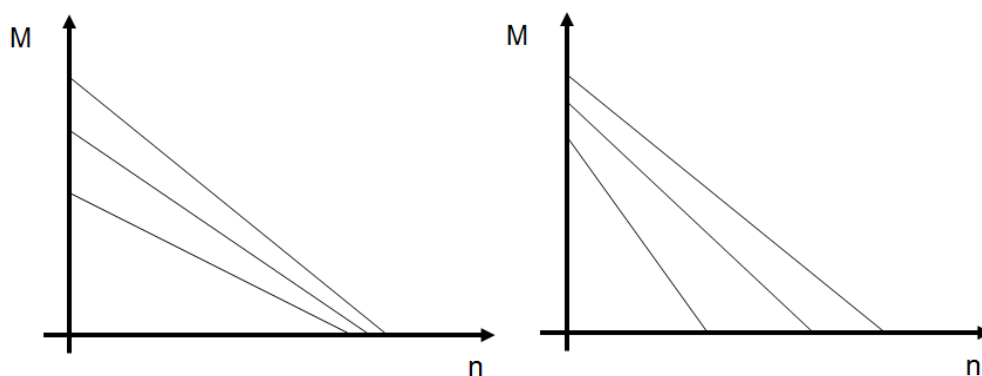
- Fojtóval vagy,
- reduktorral, azaz nyomásszabályozóval.

Normális esetben a teljesítmény a teljes fordulatszám-tartomány 50% -ánál van maximumon. A nyomaték álló helyzetben a maximális és a fordulatszám növekedésével csökken. A legtöbb motort terhelés nélkül nem szabad elindítani, ugyanis „túlpöröghet” ami a szerkezet károsodásához vezethet.



2-5. ábra A nyomaték, légfogyasztás és teljesítmény jelleggörbe a fordulatszám függvényében. (Forrás: BEATER (2007) alapján, saját szerkesztés)

A korábban említett két szabályozásnak különböző hatásai vannak a 2-5. ábrán bemutatott jelleggörbére. Amennyiben reduktossal szabályozunk, a nyomaték változik nagyobb mértékben a fordulatszámhoz képest, ha pedig fojtóval, akkor a fordulatszám változik jelentősebben. A reduktoros szabályozást rendszerint pneumatikus nyomatékkulcsoknál alkalmazzák, ahol a cél a meghúzási nyomaték pontos beállítása, a fordulatszám nagysága pedig nem fontos. Egyéb műszaki alkalmazásokban forgómozgást végző végrehajtóknál elsősorban a fordulatszámot szeretnénk változtatni.



2-6. ábra Bal oldalt: szabályozás reduktossal, jobb oldalt: szabályozás fojtóval (Forrás: BEATER (2007) alapján, saját szerkesztés, lineáris közelítés)

2.1.4. Alkalmazások

Mint azt már korábban írtam a légmotorok felhasználása igen széleskörű. Néhány alkalmazás, amely a gyakorlatban a legelterjedtebb a DESOUTTER (2011) katalógus szerint:

- Textilipar
- Hajózás
- Petrolkémia
- Élelmiszerfeldolgozás
- Mezőgazdasági berendezések
- Nyomtatók
- Vegyipar
- Kötözőgépek

Az INGERSOLL RAND (2009) katalógusban külön ajánlanak légmotorokat forgácsolási célra. A katalógus kiemeli ezeket az alkalmazásokat olyan esetekben, amikor a forgácsológép mozgó részén, azaz valamely szánján kell elhelyezni végrehajtókat. A légmotorok jó tömeg/teljesítmény arányuk miatt jönnek ilyenkor szóba, ugyanis a szánnak ekkor kevesebb tömeget kell magával mozgatnia.

2.2. Mérés és modellezés

FARKAS (1997) rávilágít arra a tényre, hogy a legtöbb esetben nem tudunk egy egész rendszert, jelenséget egyben vizsgálni, csak annak bizonyos aspektusait. A tervezés folyamán az eszköz kiválasztásban van ennek nagy szerepe, ugyanis nem vásárolhatunk meg mindent és próbálhatunk ki minden létező alkatrészt egyesével. Ezért a különböző jelenségeket a mérnöki gyakorlatban leegyszerűsítjük, olyannyira, hogy csak a számunkra szükséges részeket hagyjuk meg, azaz más néven modellt készítünk.

2.2.1. Modellezés

A modellezés a mérnöki problémamegoldás egyik fő lépése. FARKAS (1997) a modellezési eljárásokat három nagy csoportra osztja: fizikai, analóg és matematikai modellezés.

2.2.1.1. Fizikai modell

A fizikai modell elkészítése során tulajdonképpen az eredeti rendszer egy kicsinyített változatát készítjük el. Rendkívül körülményes, és időigényes eljárás, ugyanis bár sok részletet elhanyagolhatunk, végső soron létre kell hozni a modellezni kívánt rendszert vagy eszközt. A számítógépek és még inkább az elektronika elterjedése előtt ez a modellezési eljárás volt a legegyszerűbb. Ma már kevésbé elterjedt, bár használják, elsősorban a 3D nyomtatóknak köszönhetően. A legnépszerűbb alkalmazása a szélcsatornás kísérletek.

2.2.1.2. Analóg modell

Az analóg modell az eredeti rendszer olyan másolata, amely a rendszerben zajló jelenségek törvényszerűségeiben mutat hasonlóságot. Rendszerint akkor alkalmazzuk ezt a modellt, ha valamilyen nem villamos rendszerről szeretnénk modellt készíteni, és azt villamos elemekből építjük fel. Ennek alapvető célja, hogy az eredetinél költséghatékonyabb, manapság az élet minden területén teret hódító villamos eszközöket használjunk fel. Ugyanakkor meg kell említeni azt a tényt, hogy amennyiben változtatni szeretnénk a modellen, az adott villamos elemeket fizikailag ki kell cserélnünk.

2.2.1.3. Matematikai modell

Egyértelműen kijelenthetjük, hogy a mérnöki gyakorlatokban ez a módszer a legelterjedtebb köszönhetően a számítástechnika gyors fejlődésének. Ennél a módszernél a valós rendszert leíró differenciálegyenleteket készítünk, majd azokat megoldva megkapjuk az adott rendszer valamilyen bemenő jelre adott válaszát. A matematikai modellt legegyszerűbben analitikus megoldási módszerrel tudjuk megoldani, viszont ennek az egyik hátránya, hogy analóg számítógépre van szükségünk, amelynél az adatok be- és kivétele nehézkes. Ennek a problémának egy lehetséges kiküszöbölése, hogy digitális számítógépre készítünk egy hibrid-analóg szimulációs szoftvert, amelynek segítségével egyszerűen megoldhatóak ezek az egyenletek. A gyakorlatban az egyik legelterjedtebb ilyen szoftver a MATLAB+SIMULINK programrendszer, amelyet a munkám során használni fogok.

A matematikai modelleket FARKAS (1997) további három csoportra bontja, annak előállítási módja szerint:

- White box modell. Ebben az esetben a modell készítése során alapvető fizikai és működési információkra támaszkodunk. Ez a módszer rendkívül bonyolult, ugyanakkor nagy előnye, hogy a modell fizikai paramétereinek valós tartalma van. Többnyire akkor alkalmazzuk, ha igény és lehetőség van részletes információszerzésre a rendszerről.
- Black box modell vagy más néven modellidentifikációnál a rendszerről csak mérésekkel, kísérletekkel lehet információkat szerezni. Előnyök, hogy viszonylag egyszerűek, viszont hátrányuk, hogy a paramétereknek nincs fizikai tartalmuk.
- Gray box modell az előző kettőnek a kombinációja. Az alkalmazott modellt a felhasználás fogja eldönteni. Az identifikált modell legegyszerűbb felhasználási lehetősége, hogy a rendszer kimenő változóit a bemeneti függvények különböző értékeinél meghatározzuk.

A munkám során a MATLAB Simulink Simscape beépülő moduljának a segítségével építtem fel az alkalmazott modelljeimet, amelynek különlegessége, hogy a felhasznált blokkok és az őket összekötő adatáramlás fizikai mennyiségeket tartalmaz, azaz white box modellt alkalmazok.

2.2.2. Méréstechnika

Az általam használt White-box modellezés alapja, ahogy azt fentebb is említettem, a részletes és pontos információszerzés, amelyekre mérésekkel tudok szert tenni. Ebben az esetben a szerkezet jellegéből adódóan áramlási vizsgálatokra, mérésekre lesz szükségem.

BOROS (1978) megfogalmazásában a méréstechnika alapvető feladata a különböző fizikai mennyiségek meghatározása műszeres méréssel. A méréstechnika magában foglalja az adott méréssel kapcsolatos összes ismeretet, a metrológiai alapfogalmaktól, a mérőműszerekre vonatkozó ismeretekeken át a mérések gyakorlati végrehajtásával kapcsolatos kérdéseket is.

A mérés során tulajdonképpen a fizikai mennyiséget összehasonlítjuk annak mérőszámával. Az összehasonlítás módja szerint kétféle mérést különböztetünk meg:

- közvetlen mérés és
- közvetett mérés.

A közvetlen mérés során, ahogy az a nevéből is adódik a mérendő mennyiséget közvetlenül annak mérőszámával hasonlítjuk össze. Egyszerű és gyors mérésről van szó,

ugyanakkor a pontosságát alapvetően befolyásolja a műszer pontossága. Ennél fogva általában gyors, és nagy pontosságot nem igénylő mérések során alkalmazzák.

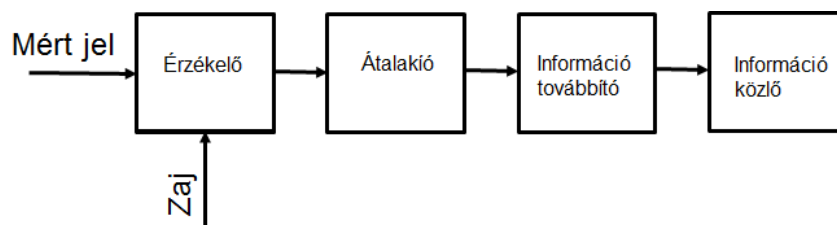
A közvetett mérés során a mérendő mennyiségnek egy másik, általunk ismert mérőszámra gyakorolt hatását figyeljük és mérjük meg, amiből elméleti összefüggések alapján határozzuk meg a számunkra szükséges mennyiséget. Ezen mérési módszer alapján működő műszereket kalibrálni kell a mérendő mennyiségre.

A közvetett mérésen alapuló műszereket további három csoportra bonthatjuk. Az egyik az átalakítás útján történő mérés. A lényege hogy a közvetlenül nem mérhető mennyiséget átalakítjuk közvetlenül mérhető mennyiségre, amit meg tudunk mérni.

A helyettesítési mérés során a műszerrel megmérünk egy etalont, amelynél ismerjük a mérendő mennyiség pontos értékét, majd az általunk mért mennyiséggel összehasonlítjuk.

Végül a nullmódszerek lényege, hasonló, mint a helyettesítési módszer, azaz a mérendő mennyiséget itt is egy etalonnal hasonlítjuk össze, annyi különbséggel, hogy egy műszer segítségével addig növeljük vagy csökkentjük a mérendő mennyiség értékét, amíg az megegyezik az etalonnal. Ekkor az etalon és a növelés vagy csökkentés mennyiségének a különbsége megadja a mérendő mennyiség értékét.

BOROS (1978) megfogalmazásában a mérőberendezésen a mérés elvégzéséhez szükséges összes eszköz halmazát értjük a mérés elvégzésére alkalmas állapotban.



2-7. ábra Mérőberendezés általános felépítése (Forrás: BOROS (1978))

Az érzékelő a mérőberendezés legfontosabb része, amely kapcsolatban van a mérendő mennyiséggel és követi annak változásait.

Az átalakító az érzékelőtől kapott jelet olyan formába hozza, amely információ továbbítására alkalmas. A FESTO: BEVEZETÉS A SZENZORIKÁBA (2007) megfogalmazása szerint az érzékelőt és átalakítót együttes néven szenzornak nevezzük.

Az információ továbbító szerepe, ahogy a nevéből is olvasható, az információ továbbítása az információ közlőhöz.

Az információ közlő vagy más néven indikátor feladata a mért mennyiség kijelzése oly módon, ami számunkra értelmezhető, leolvasható.

Egy mérőberendezés tervezésénél vagy kiválasztásánál a következő szempontokat fontos szemelőt tartani:

- a mért mennyiség nagysága beleessen a méréstartományba,
- a mérés pontossága elegendő legyen,
- a mérés végrehajtásának időtartama,
- továbbá figyeljünk oda a biztonsági előírásokra és a zavaró tényezőkre is.

2.2.3. Jelek és feldolgozásuk

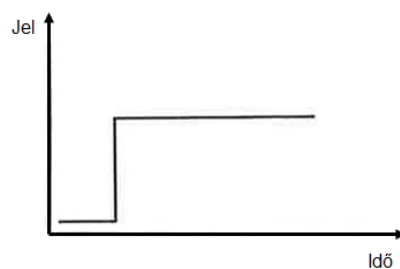
Manapság a mérnöki gyakorlatban a mérőberendezések információ közlő részének a feladatát számítógépek látják el. A mérés eredményét a számítógépek rendszerint valamilyen mérés adatgyűjtőtől kapják meg soros protokollokon keresztül. Részletesebb elemzést kíván ugyanakkor az érzékelő és az adatgyűjtő közötti információáramlás, azaz az átalakítótól érkező jel milyensége.

Fontos szempont a mérési eredmények megfelelő közlése. Egy eredmény egyik legfontosabb velejárója a szórás, írja ezt Dr. SVÁB (1981). Ez tulajdonképpen a mérésünk pontosságára utal.

2.2.3.1. Jelek csoportosítása

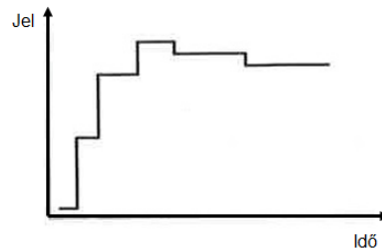
HOLMAN (1989) a jeleket két csoportra osztja: digitális és analóg. A FESTO: BEVEZETÉS A SZENZORIKÁBA (2007) jegyzetben fel van tüntetve még egy csoport: a bináris jel.

- A bináris jel a legegyszerűbb típusú jel. Csupán két értéket vehet fel: magas vagy alacsony



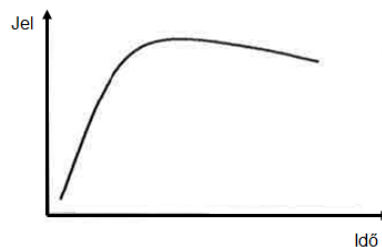
2-8. ábra Példa a bináris jelre (Forrás: FESTO: BEVEZETÉS A SZENZORIKÁBA (2007))

- A digitális jel a bináris jel komplexebb változata. Értéktartománya bővebb, de továbbra is csak meghatározott értékeket vehet fel, amely az alapérték egész számú többszöröse. Az egyik értékről a másikra ugrásszerűen vált.



2-9. ábra Példa a digitális jelre (Forrás: FESTO: BEVEZETÉS A SZENZORIKÁBA (2007))

- Az analóg jel értéktartománya folytonos, tetszőleges értékeket vehet fel. Megállapodás szerint a fizikai jelek szinte mindegyike analóg jelnek számít, ugyanakkor, az analóg jel, mint olyan, csak matematikailag létezik. A kvantummechanika elve szerint léteznie kell egy legkisebb mennyiségnek, így annak a jele sem lehet analóg, csak „lépcsős”. A gyakorlatban pedig megállapodás kérdése, amely a mérés felbontásától függ. Amennyiben a mérés felbontása nagyságrendekkel nagyobb, mint a jel felbontása akkor analóg jelekről beszélünk.



2-10. ábra Példa az analóg jelre (Forrás: FESTO: BEVEZETÉS A SZENZORIKÁBA (2007))

2.3. Áramlási vizsgálatok

Az elkészített modelleket, ahhoz, hogy megfelelő biztonsággal lehessen használni validálni kell. Ehhez áramlási vizsgálatokat kell, hogy végezzünk a légmotoron. A vizsgálatokat az általam talált szakirodalmak közel azonos módon írják le, de mielőtt ezt bemutatom, pár alapfogalmat tisztázok.

2.3.1. Közegáram

A közegáram mérésének fontos szerepe van a vezérléstechnikában. Közegáram alatt összefoglaló néven térfogat, - tömegáramot értünk a FESTO: BEVEZETÉS A SZENZORIKÁBA (2007) jegyzet megfogalmazása szerint.

2.3.1.1. Térfogatáram

SITKEI (1997) leírja, hogy a térfogatáram egy rendszerben tulajdonképpen időegység alatt átáramlott közegre vonatkoztatott homogén sebességtérben az áramvonalakra merőleges, A felületű és v magasságú téglatest térfogata:

$$\dot{V} = A \cdot v. \quad (2-1)$$

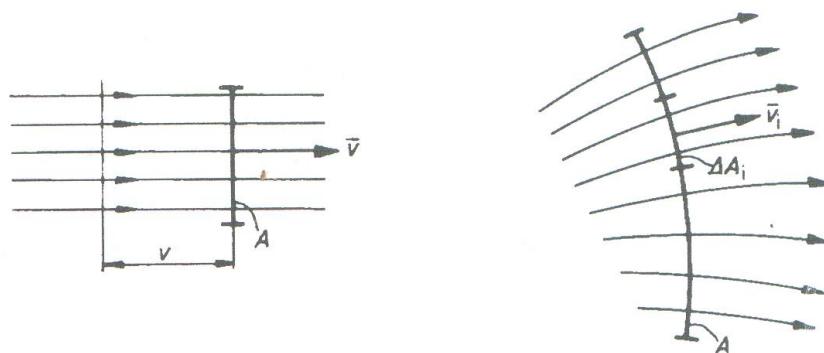
Inhomogén áramlási térben bonyolultabb a helyzet. Ekkor az áramvonalakra merőleges A felület térfogatáram úgy határozható meg, hogy a felületet kis ΔA_i felületű részekre osztjuk, melyen belül a tér homogén.

Amennyiben az áramlási sebesség v_i , a térfogatáram:

$$\Delta V_i = v_i \Delta A_i, \quad (2-2)$$

a teljes felületé pedig:

$$\dot{V} = \sum_i \Delta V_i = \sum_i v_i \Delta A_i. \quad (2-3)$$



2-11. ábra Homogén és inhomogén áramlás. (Forrás: SITKEI (1997))

A gyakorlatban az A felületet a kis részek átlagsebességével (v_a) szorozzuk meg:

$$\dot{V} = v_a * A \left[\frac{m^3}{s} \right]. \quad (2-4)$$

2.3.1.2. Tömegáram

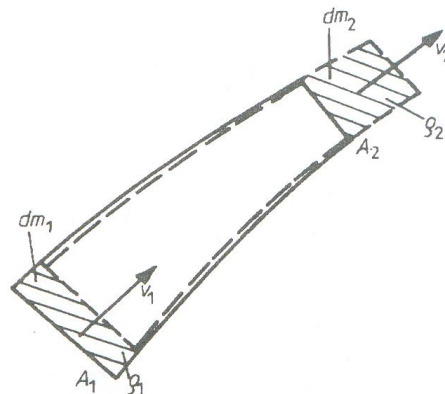
A tömegmegmaradás elve szerint a zárt rendszerek tömege állandó. Ugyanakkor az áramlási rendszerek általában nyíltak, így meg kell fogalmaznunk az elvet nyílt rendszerekre is. Adott idő alatt egy nyílt rendszer tömege adott idő alatt ugyanannyit változik, mint a környezetéé. Egy rendszerben a tömegátadás a környezetétől elválasztó ellenőrzőfelületen történő átáramlás formájában megy végbe.

A tömegáram nem más, mint ezen az ellenőrző felületen időegység alatt átáramló tömeg:

$$I_m = \frac{dm}{dt}. \quad (2-5)$$

A 2-12. ábrán ábrázolt csőszakaszba ρ_1 sűrűségű, v_1 átlagsebességű közeg lép be A_1 felületen. A tömegfolytonosság elve szerint a csőszakaszból ugyanakkora tömegű közegnek kell kilépni. Ezek alapján:

$$I_{m1} = \rho_1 * A_1 * v_1 = \rho_2 * A_2 * v_2 = I_{m2} \left[\frac{kg}{s} \right]. \quad (2-6)$$



2-12. ábra Csőszakaszon ábrázolt tömegáram (Forrás: SITKEI (1997))

SZALADNYA – TELEK (2009) is leírja, és a (2-4) –es és a (2-6) –os egyenletből látható, hogy a tömegáram és a térfogatáram közötti különbség csupán, hogy az utóbbit meg kell szorozzuk a közeg sűrűségével és máris tömegáramot kapunk.

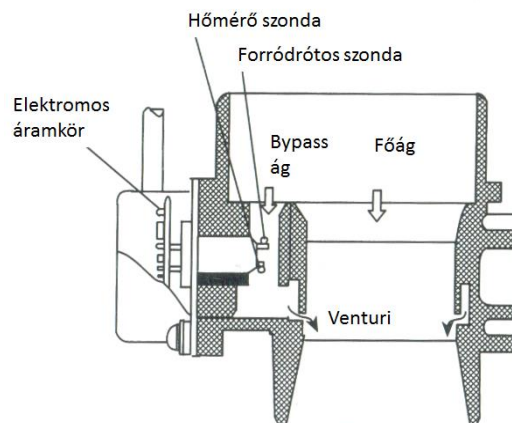
2.3.2. Mérőeszközök

A légmotor jellemző paramétereit egy fékpad segítségével határoztam meg. A fékezés során mértem a beáramló levegő mennyiségét, nyomását és hőmérsékletét. A következőkben ezen értékelők általános felépítését mutatom be.

2.3.2.1. Áramlásmérők

JURGEN (1994) megkülönböztet mérés szempontjából tömeg és térfogatáram mérőket. A gyakorlatban a legnépszerűbbek a termikus tömegárammérők. A szenzor tartalmaz egy fűtőelemet, amelyet a légáram hűt. Ennek a hűtésnek a mértéke arányos a levegő tömegáramával.

A termikus tömegárammérők egyik alaptípusa a forródrótos áramlásmérő, ahol egy fűtött tekercs helyezkedik el az áramlásban. A legnagyobb hátránya, hogy a legcsekélyebb légszennyezés is kárt tud okozni a tekercsben. Ezt megoldandó a tekercset egy bypass ágba szokták helyezni a szenzoron belül, ahonnan az áramlás a Venturi-elv szerint valósul meg, és a szenzor az ott létrejövő áramlást méri.

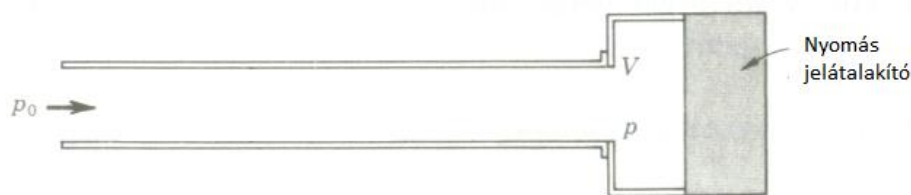


2-13. ábra Bypass ágba helyezett szonda (Forrás: JURGEN (1994))

HOLMAN (1989) további, speciális esetekben alkalmazott áramlásmérőket is felsorol. Ilyenek például a mágneses és optikai elven működő áramlásmérők.

2.3.2.2. Nyomásmérők

A nyomásmérés rendszerint a nyomáskülönbség által létrehozott alakváltozás mérésére vezethető vissza, írja ezt HOLMAN (1989).



2-14. ábra Nyomásmérők elvi felépítése (Forrás: Holman (1989))

A legnépszerűbb hagyományos mérőeszköz a bourdon-csöves manométer. Ezek működése is alakváltozáson alapul, amely hagyományos esetben egy mérőórát mozdítanak el áttételek segítségével megfelelő mértékben. Létezik olyan változata is ahol ezt az elmozdulást elektromosan érzékeljük, de ezek kevésbé népszerűek.

A gyakorlatban használt nyomásmérők rendszerint kapacitív, induktív vagy piezoelektromos elven működnek, amely annyit jelent, hogy az első kettőnél egy membránra kifejtett elmozdulást kapacitív vagy induktív módon érzékelünk, utóbbinál pedig egy piezokristály alakváltozásából adódó feszültségváltozást tudunk mérni.

2.3.2.3. Hőmérsékletmérés

A gyakorlatban BOROS (1978) két hőmérő típust különböztet meg. Az egyik típus az ellenálláshőmérők. Alapjukat a félvezető termoellenállások képezik. A másik pedig a hőelemes hőmérők, ami két megfelelő választású anyag kapcsolatán alapszik.

2.4. A kagylódiagramok szerepe

A kagylódiagramok felvételének célja rendszerint valamilyen optimumpont megtalálása. Ezt többféle célfüggvénnyel kereshetjük. Ezek az esetek nagy többségében a legnagyobb teljesítmény a legkisebb hajtóanyag fogyasztás mellett. A diagramok elkészítése viszonylag körülményes, nagy mennyiségű mérés szükséges hozzá. Ugyanakkor átfogó információt ad egy gép működési tartományairól és a legtöbb esetben jobban átlátható, mint néhány 3 dimenziós diagram.

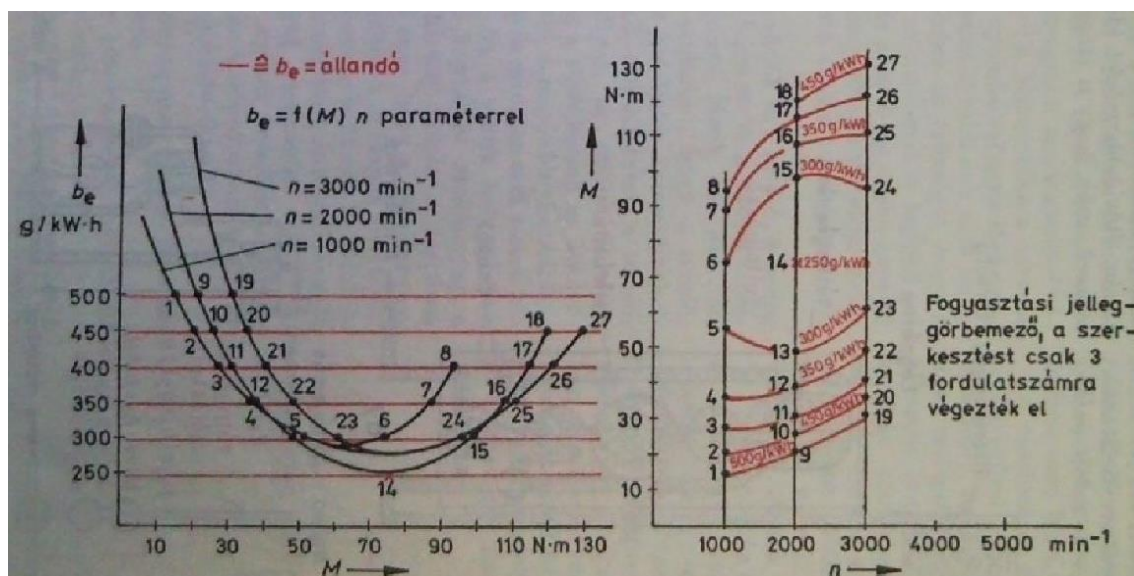
Mivel számomra az optimális hajtóanyag fogyasztás megtalálása a cél, ezért egy, a kagylódiagramokhoz hasonló ábra megalkotása kézenfekvő. A következőkben áttekintem, hogy a gyakorlatban hol, és milyen formában használnak kagylódiagramokat.

2.4.1. Belsőégésű motorok kagylódiagramja

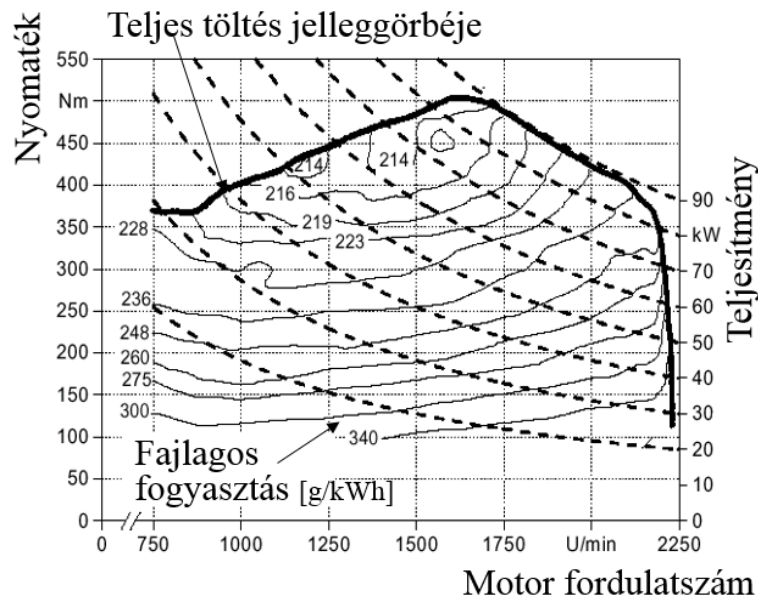
H. GROHE (1982) és JUREK (1956) részletesen leírja egy belsőégésű motor kagylódiagramjának felvételi módszerét.

Először a motor fogyasztását kell meg mérni oly módon, hogy a terhelő nyomatékot változtatom miközben a fordulatszámot állandó értéken tartom. Ezt a mérést többször meg kell ismételni különböző, de állandó fordulatszámokon. Minél több mérést végzünk, annál nagyobb felbontással kapom meg a fogyasztási jelleggörbéket. A fogyasztási jelleggörbéket a forgató nyomaték függvényében ábrázolják, ahol az állandó fordulatszámok szerepelnek paraméterként.

Ezt követően a görbeseregen vízszinteseket húzunk. A metszéspontok megadják az állandó fajlagos fogyasztásokat. Ezeket felmérjük egy másik, fordulatszám – nyomaték diagramban, majd összekötve az összetartozó értékeket megkapjuk az állandó fajlagos fogyasztáshoz tartozó kagylókat. Ebben a diagramban célszerű ábrázolni az állandó teljesítmények hiperboláit, melynek segítségével egyszerűen leolvasható, hogy adott teljesítményen milyen tartományban fogyaszt a legkevesebbet a motor.



2-15. ábra Fogyasztási jelleggörbék szerkesztése (Forrás: H. Grohe (1982))

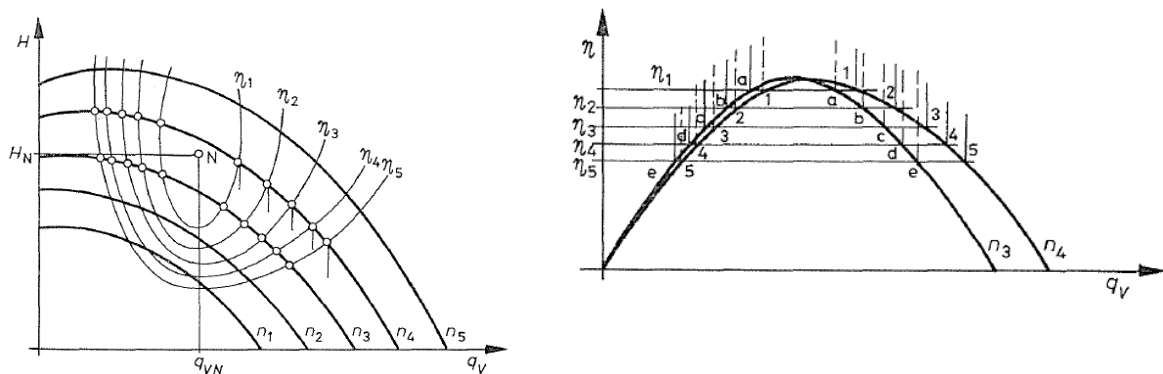


2-16. ábra Fogyasztási jelleggörbe és teljesítményhiperbolák (Forrás: BME előadás jegyzet)

2.4.2. Szivattyúk kagylódiagramja

Dr. PATTANTYÚS (1983) és NYULI (1966) részletesen ír a különböző szivattyúkról és azok használatáról. A kagylódiagram a szivattyú legfontosabb jellemzőit tartalmazza. Leolvasható róla a térfogatáram, a fordulatszám, a szállítómagasság és a szivattyú hatásfoka is. Felvétele hasonló a belső égésű motorokéhoz.

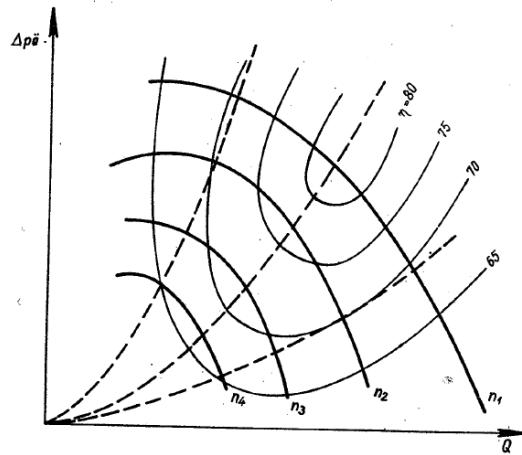
Állandó fordulatszámokon fel kell venni a nyomómagasság diagramokat és a hatásfok diagramokat a szállítás függvényében. Utóbbiban vízszinteseket húzva megkapom az állandó hatásfokokat. Ezt felvetítem az első diagramba, majd összekötve az összetartozó pontokat megkapom a hatásfok kagylókat. Ebből leolvasható az optimális működési tartomány, amelyet jelen esetben normálpontnak nevezünk. Ez a gép lehetséges legjobb hatásfokú pontja. Ezen diagramok jellegzetessége, hogy a kagylók felül nyitottak maradnak.



2-17. ábra Szivattyúk kagylódiagramjának szerkesztése (Forrás: Dr. Pattantyús (1983))

2.4.3. Ventillátorok kagylódiagramja

Ventillátorok szabályozásával Dr. GRUBER (1968) foglalkozott. A módszer és eljárás ugyanaz, mint a szivattyúk esetében, csak szállítómagasság helyett az összes nyomáskeresőt ábrázoljuk a függőleges tengelyen.



2-18. ábra Ventilátor kagylódiagramja (Forrás: dr. Gruber (1968))

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

A mérést követően a meghatározott adatok segítségével a pneumatikus motort a továbbiakban a MATLAB szoftver segítségével modellezem. Ahhoz, hogy a motort tudjam modellezni illetve validálni, mérésekre lesz szükségem. A mérendő paraméterek:

- fordulatszám: egy Festo induktív jeladó segítségével végeztem el.
- Nyomaték: Lorenz DR-2493 nyomatékmérő.
- Légszállítás: FESTO SFAM-62-3000 analóg légszállítás mérő.
- Bemenő nyomás: FESTO SPTW-P10 analóg nyomásmérő,
- és hőmérséklet: FESTO léghőmérő.

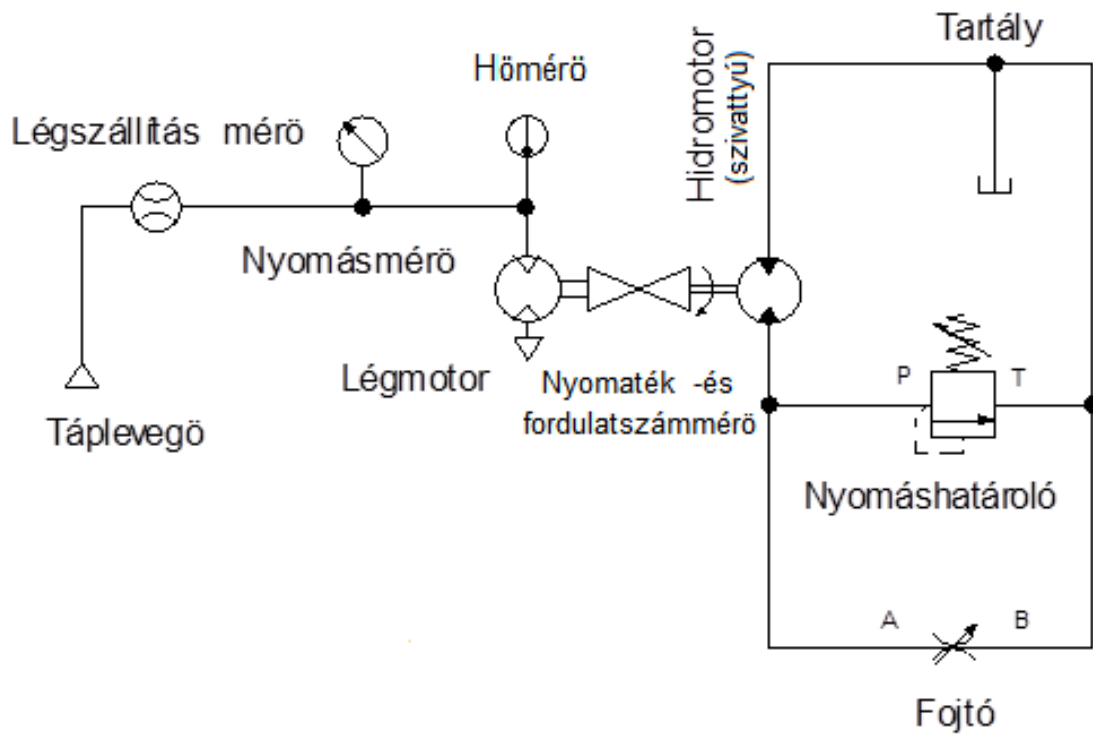
A motorok mérésére magam állítottam össze egy mérőkört. Két motor állt rendelkezésemre a mérésekhez:

- INGERSOLL RAND, 33ME720,
 $P_{max} = 0.56\text{kW}$, fordulatszám P_{max} helyen, $n = 370$ fordulat/perc.
- INGERSOLL RAND, 4800M,
 $P_{max} = 2.76\text{kW}$, fordulatszám P_{max} helyen, $n = 560$ fordulat/perc.

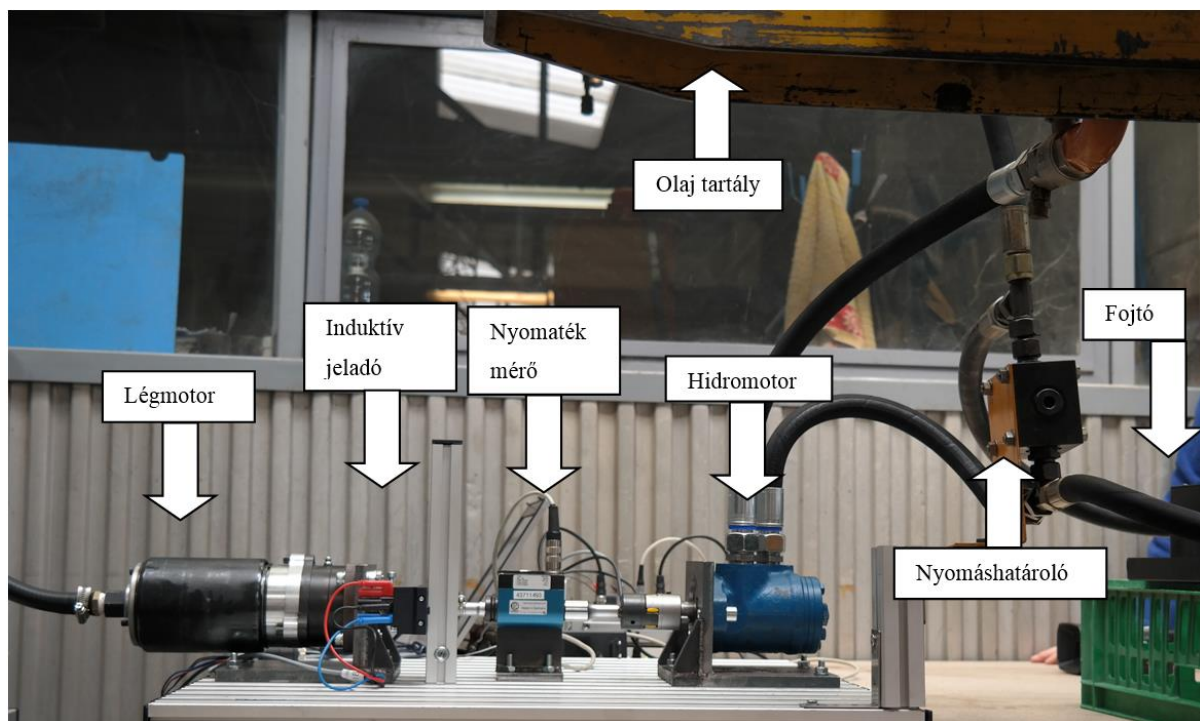
3.1. Mérési módszer

A légmotorok méréséhez egy fékpadot terveztem, ahol azokat egy OMP 50 –es hidraulikus motorral fékeztem, amelyet szivattyúként használtam. A két motor tengelykapcsolatát egy nyomatékmérőn keresztül körmös tengelykapcsolókkal biztosítottam. A hidraulika tartályt a hidromotor fölé helyeztem és az olaj folyását a gravitáció biztosította. A motor kilépő oldalára pedig egy fojtót helyeztem és a terhelő nyomatékot annak segítségével szabályoztam. Végül az olaj visszafolyt a tartályba.

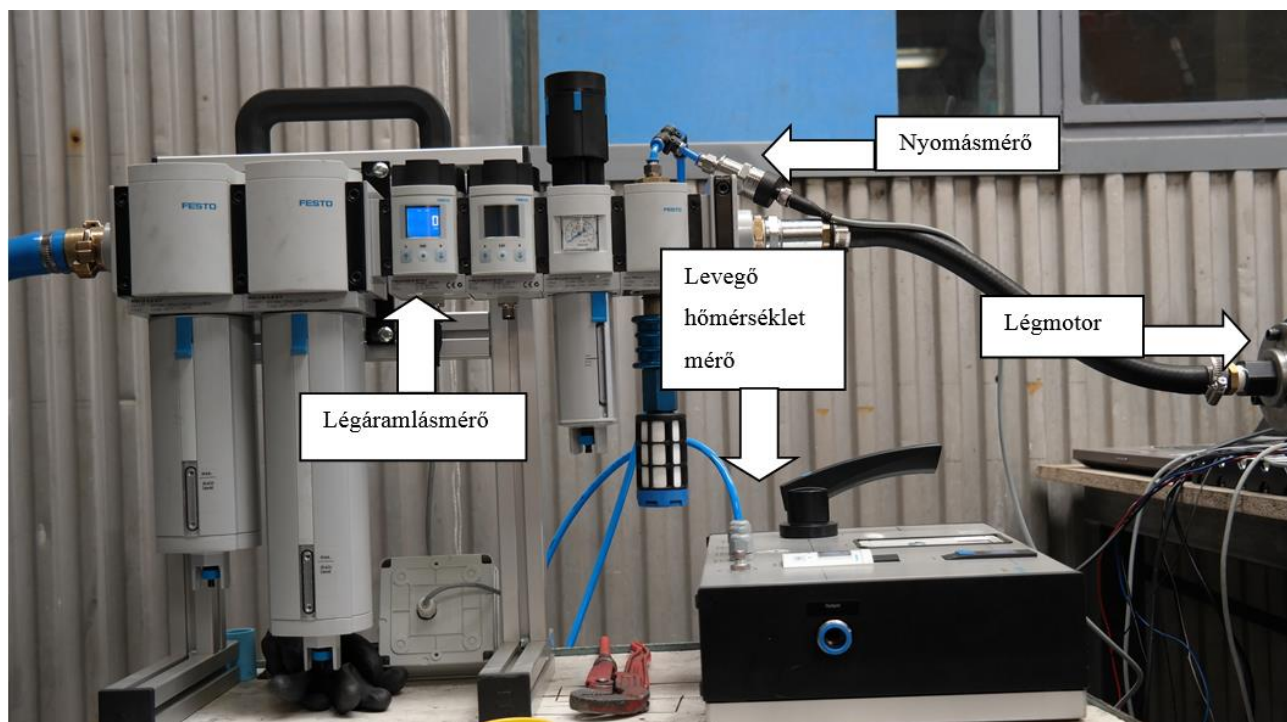
A hidraulikus kör továbbá tartalmazott egy biztonsági nyomáshatároló szelepet is.



3-1. ábra A mérőkör kapcsolási rajza



3-2. ábra Fékpad és a mechanikus paraméterek mérése



3-3. ábra Légmotor pneumatikus paramétereinek mérése

A hidromotor kiválasztása során a méreteznem kellett azt, hogy megfelelő nagyságú fékezőnyomatékot állíthassak elő.

$$M = \frac{\Delta p \cdot V_g}{2 \cdot \pi}, \quad (3-1)$$

ahol M a motor nyomatéka, Δp a legnagyobb nyomáskülönbség és V_g pedig a motor fajlagos térfogata. Az OMP 50 –es típusjelzésű motor fajlagos térfogatát a nevéből is leolvashatjuk: 50 cm^3 . A maximális nyomáskülönbség pedig a nyomáshatárolótól függ. A mérés során használt nyomáshatároló maximum 100 bar –ig állítható. Ez esetben:

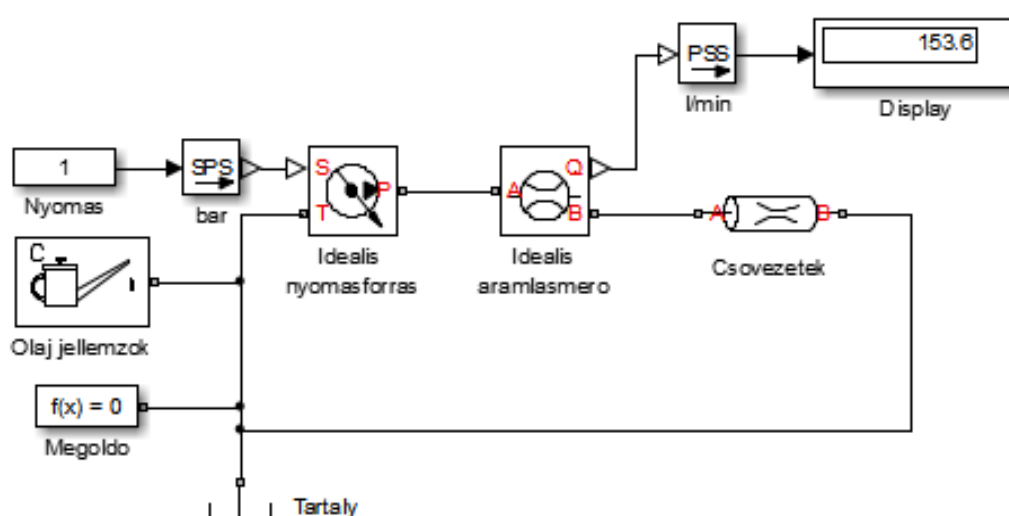
$$M = \frac{100e5 \cdot 50e-6}{2 \cdot \pi} = 80 \text{ Nm}, \quad (3-2)$$

A Danfoss katalogus szerint OMP motor esetén, a veszteségeket közelíthetem 30% -nak így a tényleges fékezőnyomaték 104 Nm . Ezt a későbbi mérések is alátámasztották. A 33ME720 motor maximális nyomatéka 25 Nm , míg a 4800M motoré a katalogus adatok szerint 94 Nm , azaz az OMP 50 –es hidromotor elegendő a fékezéshez.

A legnagyobb olajszállítás a legnagyobb fordulatszámon jellemző, amely jelen esetben körülbelül $700 \text{ fordulat/perc}$:

$$Q = V_g \cdot n_{\max} = 50e - 6 \cdot \frac{700}{60} = 5,8 \frac{m^3}{mp} = 35 \frac{l}{perc}. \quad (3-3)$$

A motorba csatlakozó csövek belső átmérője 19mm és a hossza 700mm. A csövön átáramló olaj mennyiségének meghatározásához, a MATLAB Simscape szoftver segítségével modelleztem azt. A modell $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$ olajsűrűséggel és $T = 26^\circ\text{C}$ -al számol. A nyomást a cső belépő oldalán a külső légköri nyomás hatására 1 bar -nak közelítettem és elhanyagoltam, hogy a szivattyúként használt motor belépő oldalán szív, azaz valamekkora vákuum van. Ettől függetlenül is a modell alapján $Q = 150 \text{ l/perc}$ olajat képes a cső szállítani, amely bőven elegendő.



3-4. ábra Hidraulikacső olajszállításának modellezése

A motorok mérése során a hidromotorral a terhelést fokozatosan állítottam. A hidraulikus körben lévő fojtót a mérés kezdetekor teljesen betekertem, azaz maximálisan fojtottam a kört. A bemenő levegő csővezetékének a keresztmetszete mindig állandó volt.

Ezt követően a fojtót lépcsőzetesen nyitottam. Erre azért volt szükség, hogy egy –egy állapot állandósuljon, miközben csökken a terhelés és a légmotor egyre gyorsabban forog. Mindeközben mértem a légmotorba áramló térfogatáramot, a pneumatikus és hidraulikus nyomást egyaránt, a motor tengelyén ébredő nyomatékot és annak fordulatszámát, továbbá a levegő hőmérsékletét. Végül teljesen megszűnt a hidraulika körben a fojtás és a légmotor maximális sebességen működött.

Két motort mértem meg, de a kísérleti eredmények közül végül a 33ME720 –as motorét választottam. Ennek az oka, hogy a 4800M mérése közben a belépő nyomás több mint 30% -ot esett. A 33ME720 –as motor mérése közben a nyomás kevesebb, mint 3% -ot esett, ami elhanyagolható.

Az utóbbi motor mérése közben a diagramok alsó nyomaték tartományai hiányosak. Ennek az az oka, hogy a légmotor teljesítménye sokkal kisebb volt, mint a terhelést előállító hidraulikus OMP 50 –es motoré. Amikor a hidraulika körben a fojtást teljesen megszüntettem, az összes terhelést az OMP 50 –es motor üresjáratú terhelése okozta. Ez körülbelül 8 -10 Nm volt, miközben a légmotor által kifejtett maximális nyomaték 25 Nm



3-5. ábra 33ME720 légmotor mérése

3.2. A mérés eredményei

A mérés során az elektromos szenzorok jeleit egy Festo MDS adatgyűjtő fogadta. Az adatgyűjtő adatait a mérés befejeztével egyszerűen át lehet konvertálni egy EXCEL táblázatba, hogy a feldolgozás egyszerűbb legyen. Az első oszlopban az idő, a másodikban a térfogatáram liter/perc –ben, a harmadik oszlopban a nyomás bar –ban, a negyedik oszlopban a nyomaték Nm –ben, végül a fordulatszám jelenik meg digitálisan. A további szenzor jeleinek rögzítése papíron történt.

t	U_AE1	U_AE4	U_AE11	U_AE12
0	1037.4	6.2114	22.926	0
0.001	1038.26	6.2106	22.907	0
0.002	1038.85	6.2128	22.852	0
0.003	1038.45	6.2112	22.853	0
0.004	1039.71	6.2152	22.873	0
0.005	1037.5	6.2148	22.863	1
0.006	1038.57	6.212	22.865	1
0.007	1038.35	6.2085	22.907	1

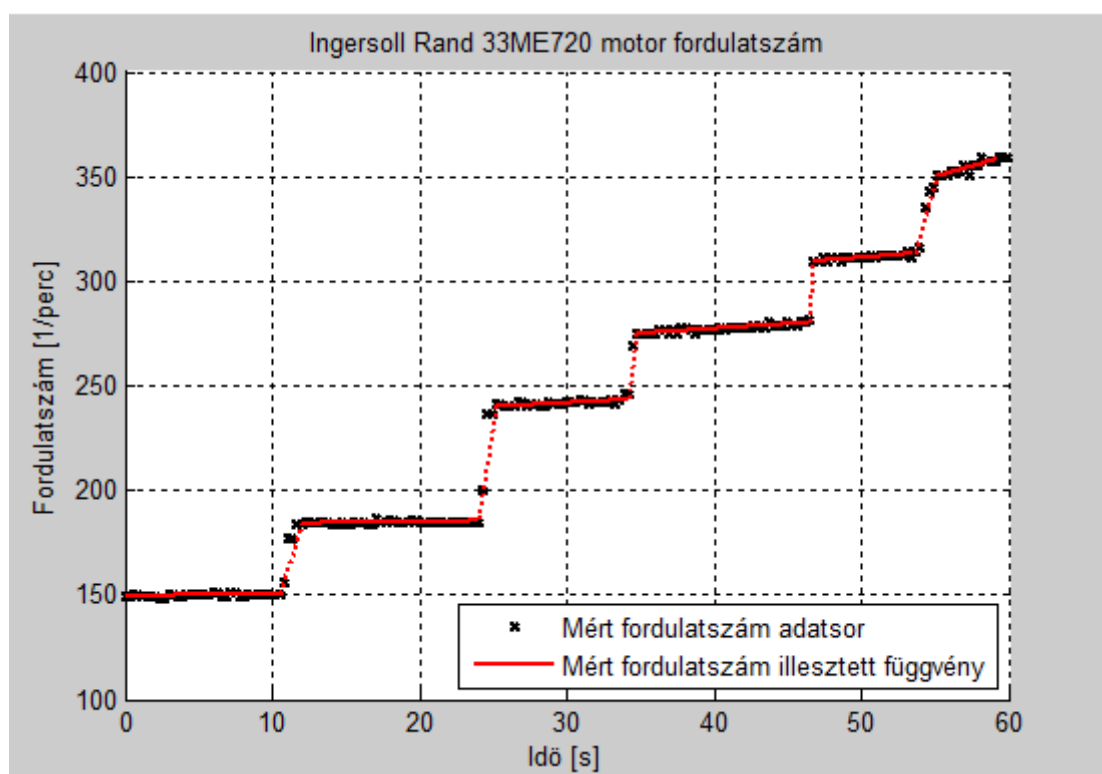
3-6. ábra Részlet a 33ME720 motor mérési adataiból

A mintavételezés frekvenciája 1 kHz –es volt. Erre elsősorban a fordulatszám mérő induktív jeladó miatt volt szükség, hogy nagy fordulatszámok mellett is biztosan adjon jelen.

Több mérést is végeztem, ugyanakkor az adatok feldolgozását követően egy adatsort találtam megfelelőnek. A hibát legtöbb esetben a nyomáscsökkenés okozta.

A mérés és az ábrázolás is az idő függvényében történt. A mérési pontok állandósult szakaszaira elsőfokú polinomot illesztettem. A polinom a modell validálásánál lesz fontos, ahol azt össze tudom hasonlítani a modell eredményeivel. Az állandósult szakaszok közötti részt pontvonallal kötöttem össze. A további számításaimban ezek a szakaszok nem vesznek részt ugyanis, azok a mérés során történt beavatkozások eredményei.

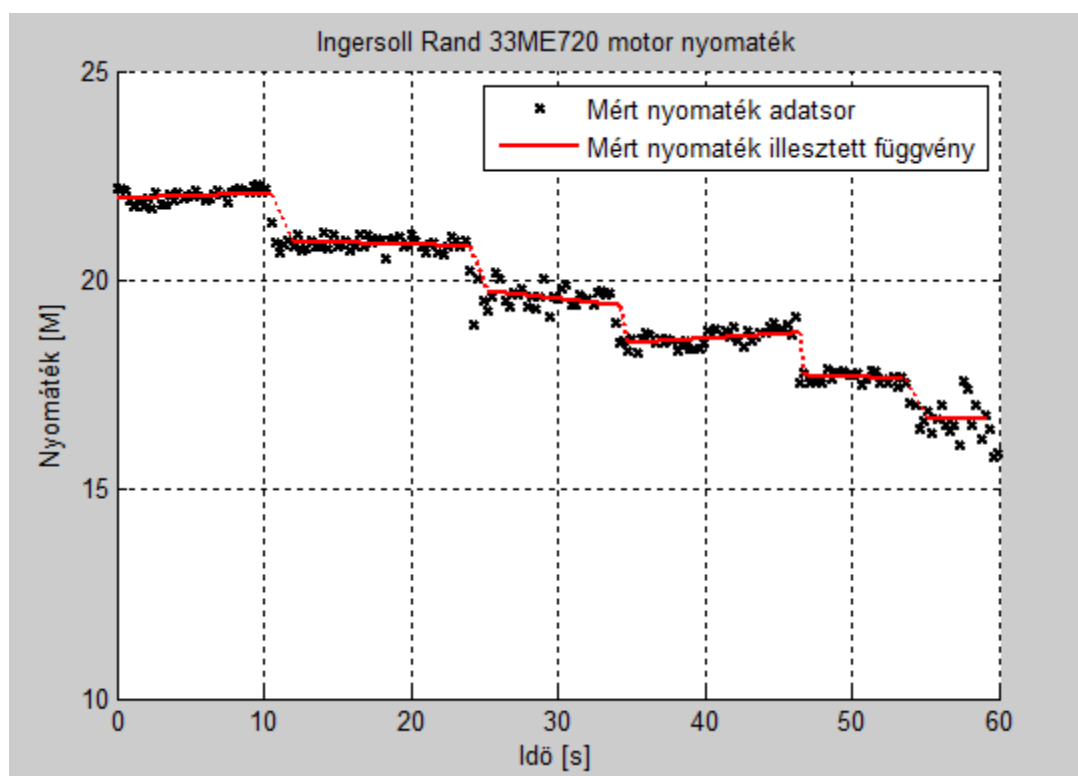
Ezt követően kiszámoltam az állandósult szakaszokra az adatsor átlagát, szórását, minimumát, maximumát, továbbá a variációs koefficiensét, amely a középérték százalékában kifejezett szórása. Végül annak az átlagát az összes szakaszra vonatkoztatva. Az adatok feldolgozását a MATLAB szoftver segítségével végeztem.



3-7. ábra Mért fordulatszám az idő függvényében

3-1. táblázat Fordulatszám mérési adatok

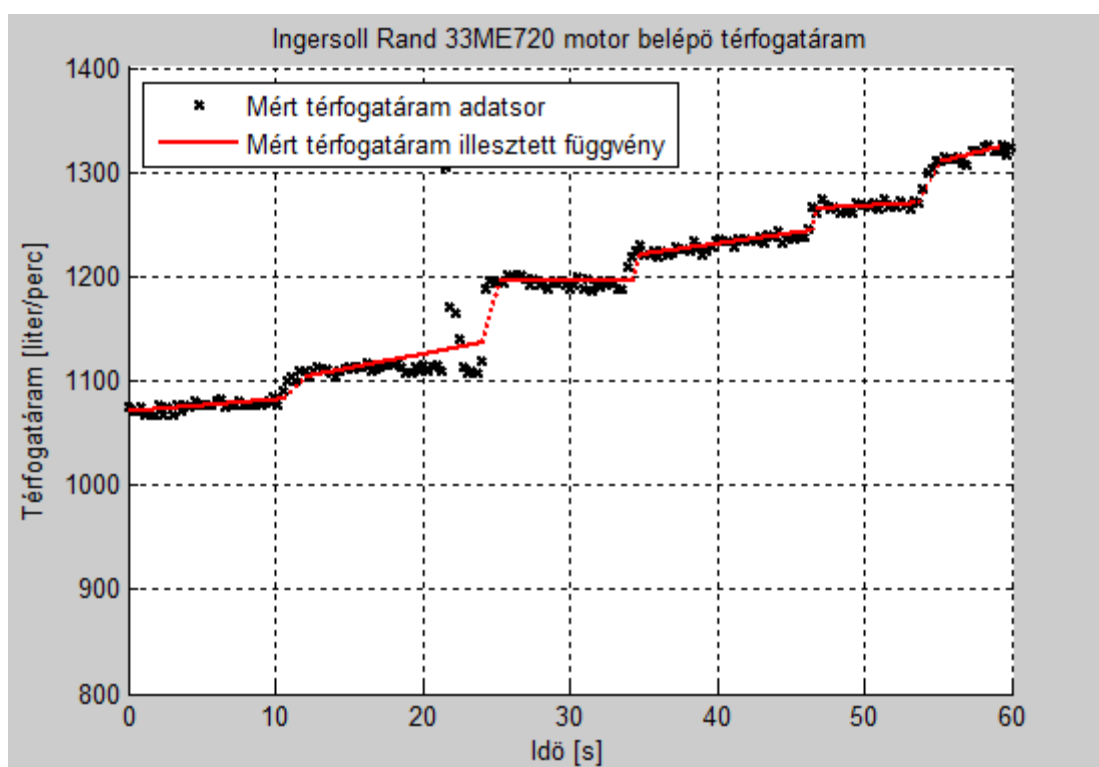
	Átlag [1/perc]	Szórás [1/perc]	Minimum [1/perc]	Maximum [1/perc]	Variációs koefficiens [%]
1. szakasz	150	0.72	148.5	151.1	0.48
2. szakasz	185	0.68	183.5	186.3	0.37
3. szakasz	242	1.46	240.0	245.9	0.60
4. szakasz	278	1.75	275.2	281.7	0.63
5. szakasz	311	1.39	309.3	314.1	0.45
6. szakasz	354	3.02	350.9	359.3	0.85
Átlag	-	-	-	-	0.56



3-8. ábra Mért nyomaték az idő függvényében

3-2. táblázat Nyomaték mérési adatok

	Átlag [Nm]	Szórás [Nm]	Minimum [Nm]	Maximum [Nm]	Variációs koefficiens [%]
1. szakasz	22.0	0.18	21.36	22.30	0.85
2. szakasz	20.8	0.18	20.21	21.14	0.87
3. szakasz	19.6	0.32	18.49	20.16	1.63
4. szakasz	18.6	0.26	17.55	19.15	1.40
5. szakasz	17.7	0.12	17.47	17.90	0.70
6. szakasz	16.7	0.43	16.05	17.59	2.55
Átlag	-	-	-	-	1.33

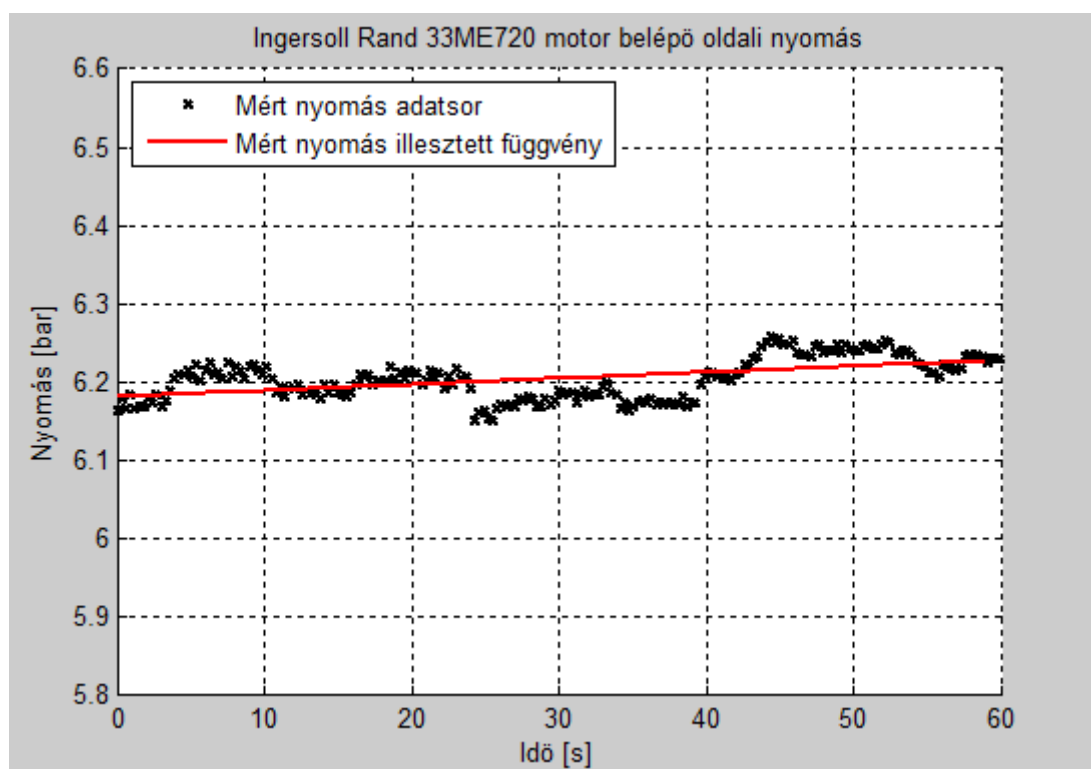


3-9. ábra Mért térfogatáram az idő függvényében

3-3. táblázat Térfogatáram mérési adatok

	Átlag [liter/perc]	Szórás [liter/perc]	Minimum [liter/perc]	Maximum [liter/perc]	Variációs koefficiens [%]
1. szakasz	1076	5.0	1067	1091	0.47
2. szakasz	1119	32.5	1103	1305	2.89
3. szakasz	1195	6.8	1186	1219	0.56
4. szakasz	1232	8.8	1218	1267	0.72
5. szakasz	1267	3.9	1260	1275	0.31
6. szakasz	1317	5.9	1307	1326	0.45
Átlag	-	-	-	-	0.90

Mivel a nyomás közel állandó volt, itt nem teszek különbséget a mérési szakaszok között.



3-10. ábra Mért nyomás az idő függvényében

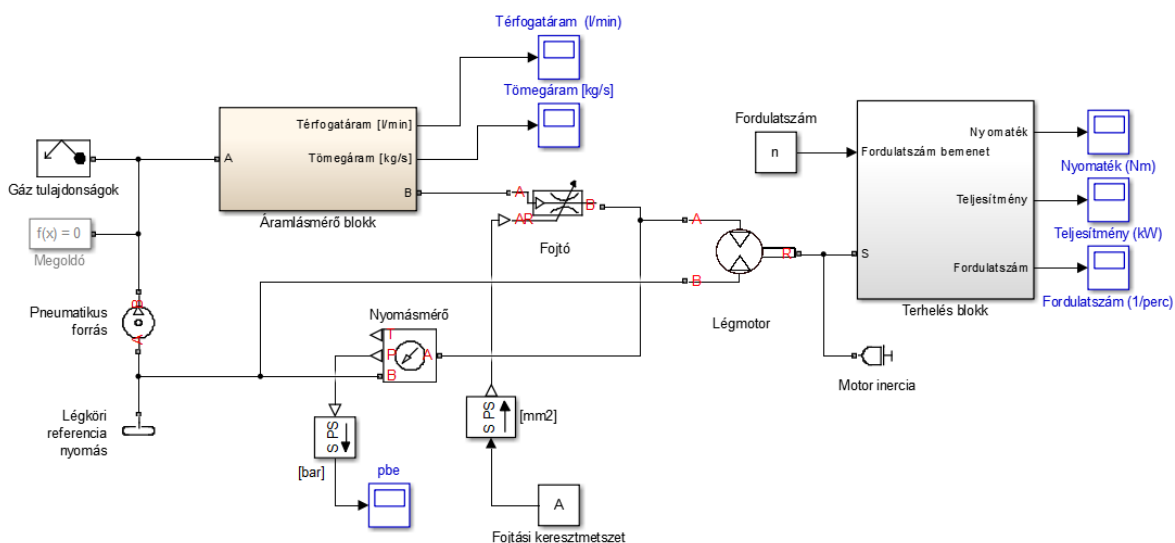
3-4. táblázat Nyomás mérési adatok

Átlag [liter/perc]	Szórás [liter/perc]	Minimum [liter/perc]	Maximum [liter/perc]	Variációs koefficiens [%]
6.2	0.03	6.15	6.25	0.42

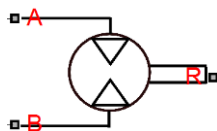
3.3. Virtuális modell

A modelleket a MATLAB Simscape szoftver segítségével készítettem el. Ez az eljárás tulajdonképpen az úgynevezett white box modellezésnek felel meg. A MATLAB-ban lerakott blokkokban az adott elem matematikai modelljei futnak le. A blokkokat összekötő vonalban pedig fizikai mennyiségek áramlanak. Ezek a jellemzők pneumatikus elemek összekötésénél: tömegáram, hőmennyiség, hőmérséklet, nyomás. Minden egyes blokk ezekkel a mennyiségekkel számol, a motor esetén alakítja át mechanikus energiává és veszteséggé.

A motor Simscape blokkjának egy adatmátrixot kell megadnia. Ez tartalmazza az összetartozó nyomaték, fordulatszám és térfogatáramokat adott nyomáson. Ezek alapján számolja, hogy mekkora lesz a leadott nyomaték és fordulatszám a blokk tengely kimenetén, ha a bemenetére adott pneumatikus jellemzők érkeznek és a kimenetén pedig távoznak. Az általam használt MATLAB motor elem be – és kilépő kinetikus és hőenergiával számol. A motor pneumatikus kimenetén, ami egyben a veszteség, a belépő pneumatikus energia és a tengelyen levett mechanikai energia különbsége jelenik meg.



3-11. ábra Teljes modell



3-12. ábra Simscape blokk légmotor modellezéséhez

A mérés során használt áramlásmérő nem tömegáramot mért, hanem térfogatáramot. A modell számításai során tömegárammal dolgozik, de a validálás és a későbbi diagramok létrehozása érdekében ezt átszámolom térfogatáramba. A műszaki gyakorlatban is a térfogatáram használata terjedt el.

A térfogatáram mérésére a MATLAB –ban közvetlenül nincs lehetőség, csak a tömeg áram mérésére. A következő képlet segítségével határozható meg a térfogatáram:

$$Q = \dot{m} \cdot v \text{ [m}^3\text{/s]}. \quad (3-4)$$

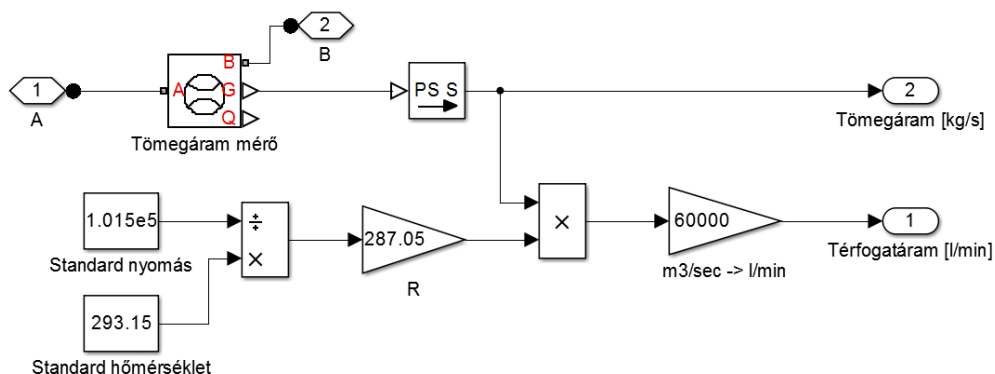
Ahol v fajlagos térfogat:

$$v = \frac{1}{\rho} \text{ [m}^3\text{/kg]}. \quad (3-5)$$

ρ sűrűség pedig:

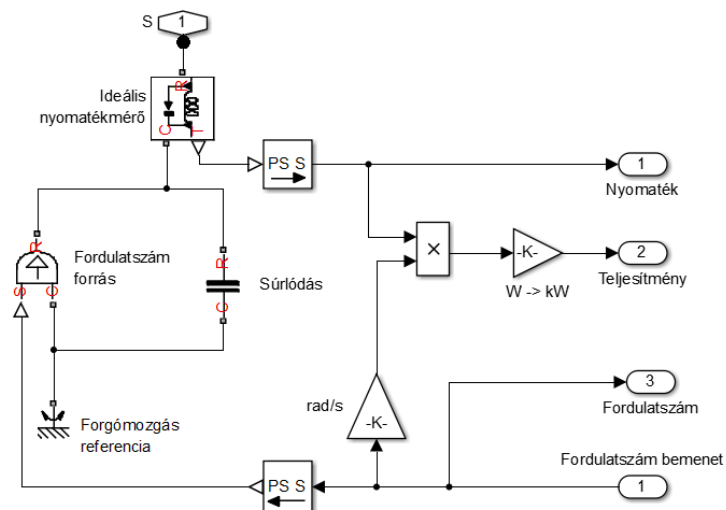
$$\rho_0 = \frac{p_0}{R \cdot T_0} \text{ [kg/m}^3\text{]}, \quad (3-6)$$

ahol az ISO 6358 szabvány szerint a standard hőmérséklet $T_0 = 20^\circ\text{C}$, a standard nyomás $p_0 = 1.015 \text{ bar}$ és az egyetemes gázállandó $R = 287.05 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$.



3-13. ábra Áramlásmérő modell

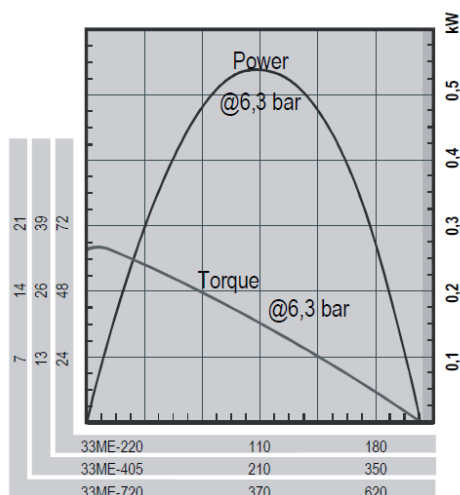
A terhelés oly módon működik, hogy egy külső fordulatszám-forrás segítségével a motor elem tengelye adott fordulatszámon, visszaadja az ahhoz tartozó leadható nyomatékot. Ez a nyomaték egy nyomatékmérő segítségével mérhető.



3-14. ábra Mechanikai terhelés

3.4. Identifikáció és validálás

A modell identifikációja tulajdonképpen abból állt, hogy a motor blokknak meg kellett adnom az összetartozó nyomaték, fordulatszám és légfogyasztás adatokat. Ezeket a gyártó által mellékelte katalógusból olvastam le.

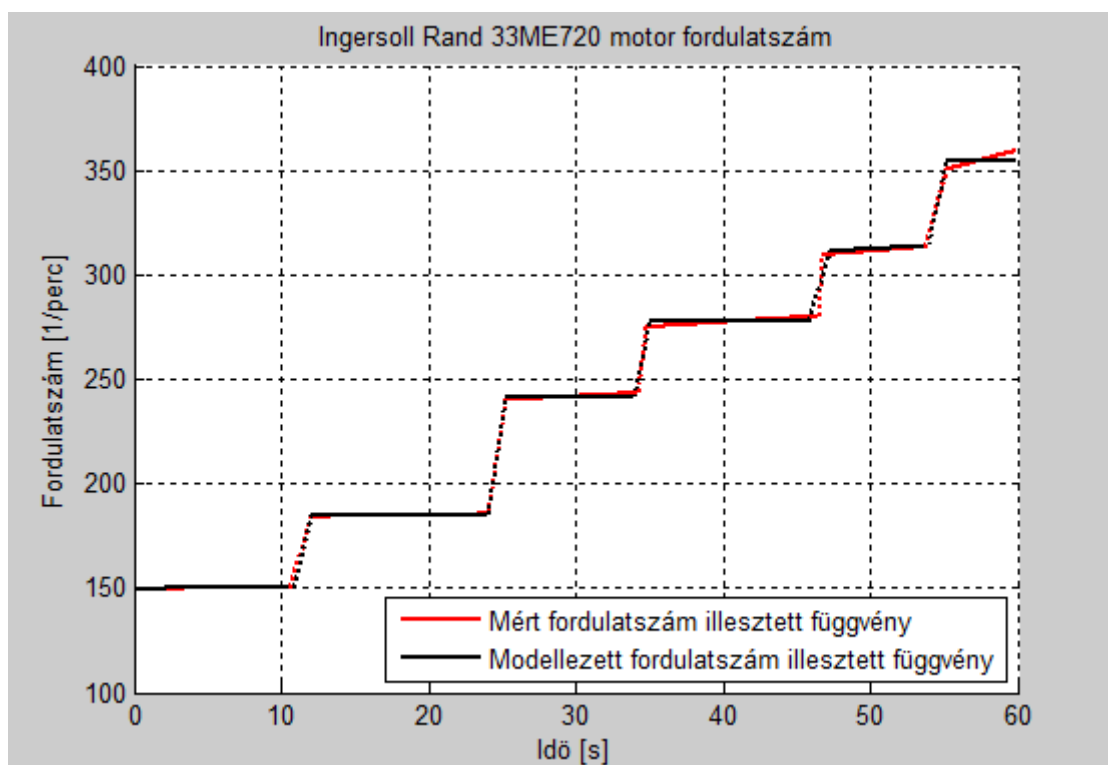


3-15. ábra Ingersoll Rand katalógus részlet (nyomaték ft. lb -ban)

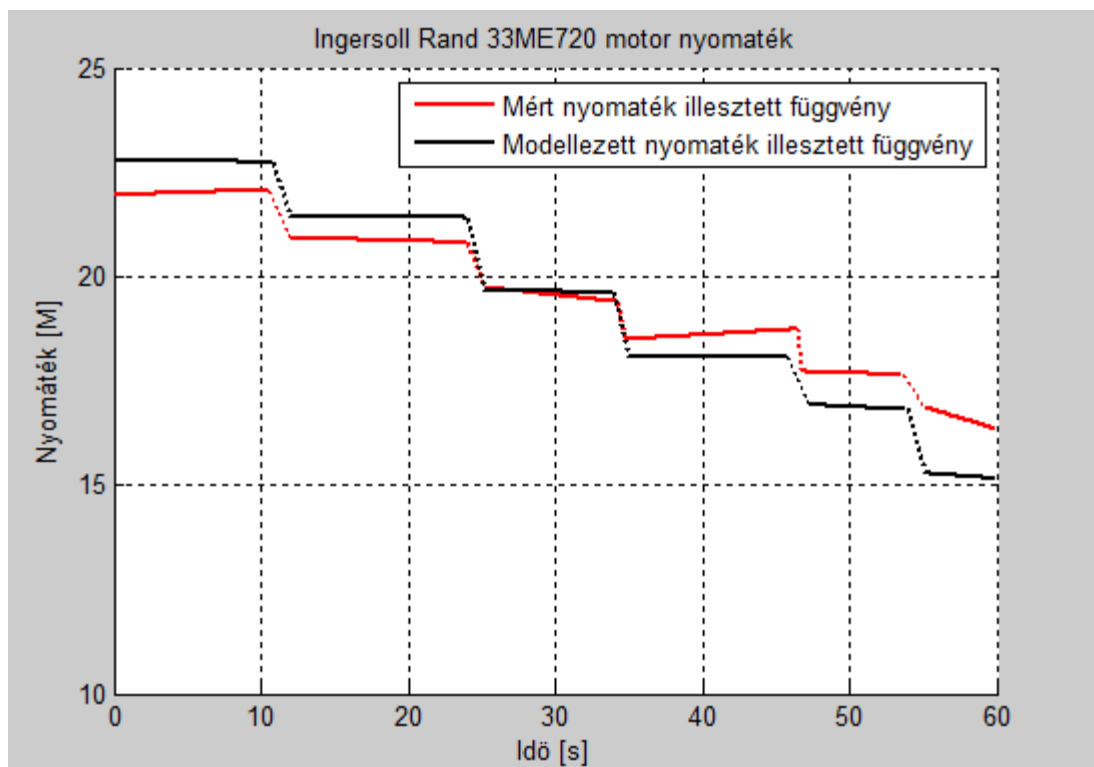
A katalógusból leolvasott értékeket átváltottam megfelelő mértékegységekre és beírtam a modellbe.

Ezután a katalógus adatokra identifikált modellemet a mérési adatok alapján validáltam MATLAB szoftver segítségével. A validálás során a modell bemeneteire ugyanazokat az értékeket adtam, mint a mérés során. Ezek a bemenetek a fojtási keresztmetszet, amely $A = 12 \text{ mm}^2$ és a fojtó alaktényezőjét 0.9 –nek ítélt meg. Ezen kívül a hőmérsékletet $T = 20^\circ\text{C}$ volt és a páratartalom átlagos, 65%.

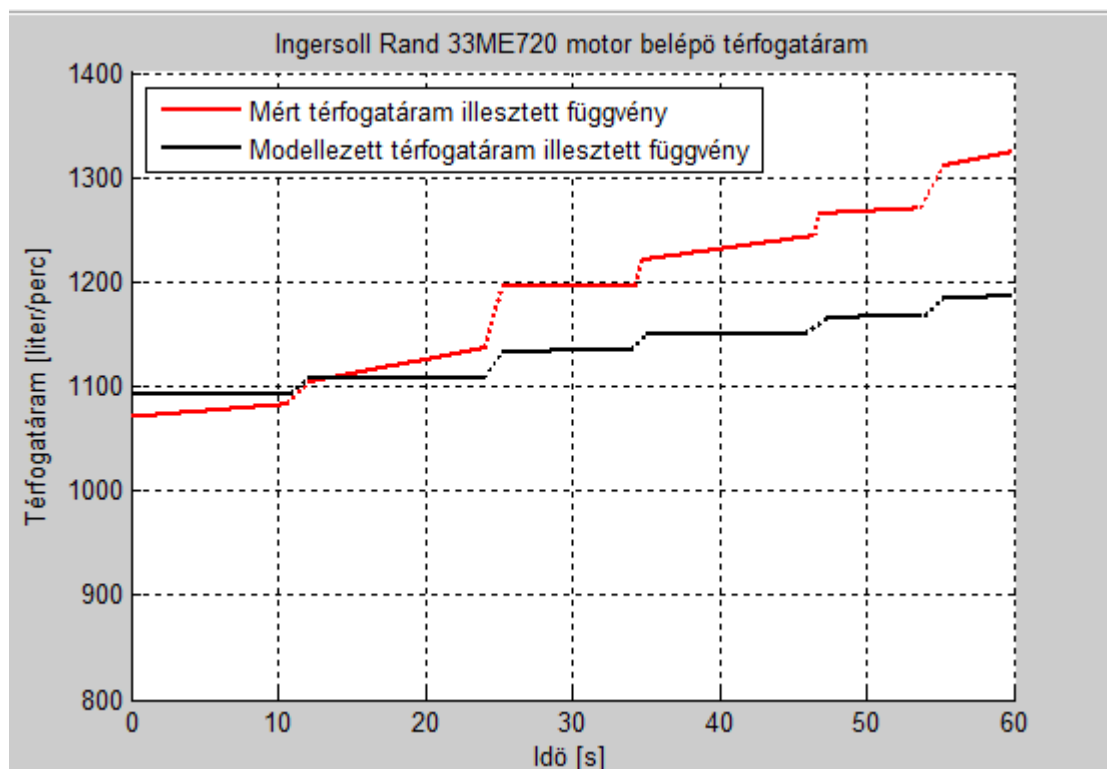
A hibát a mérési pontok és a modell eredményeire illesztett elsőfokú függvényeiből határoztam meg. Numerikus integrálással kiszámoltam az állandósult állapotok alatti területet, majd ebből különbséget képzetem. A mérésre illesztett függvény alatti területet pedig elosztottam a különbséggel. Ebből százalékosan megkaptam a hibát.



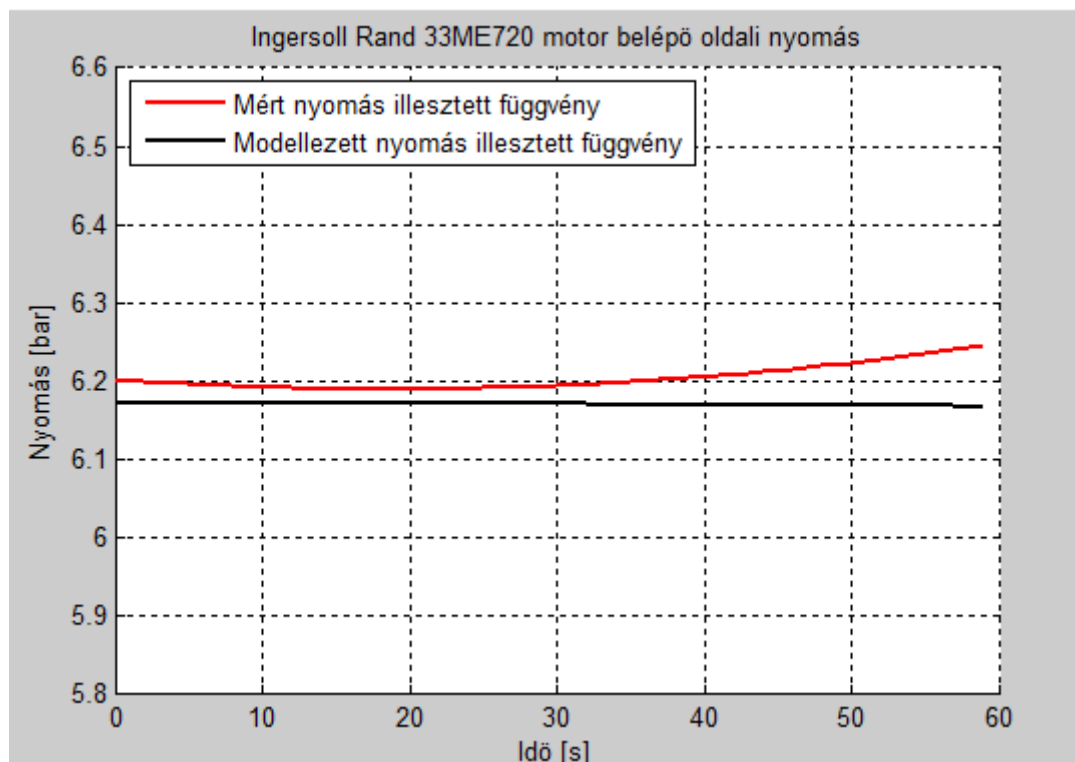
3-16. ábra Fordulatszám validálás



3-17. ábra Nyomaték validálás



3-18. ábra Térfogatáram validálás



3-19. ábra Nyomás validálás

3-5. táblázat Validálás eredményei

	Hiba [%]
Fordulatszám	2.065
Nyomaték	1.716
Térfogatáram	5.936
Nyomás	0.380

A műszaki gyakorlatban a 3% alatti hibát jónak tekintjük. Ebben az esetben a térfogatáram modellezett eredményei ezen kívül esnek, de a 6% -ot éppen nem érik el, így ezzel a modellel végzem a kísérleteket.

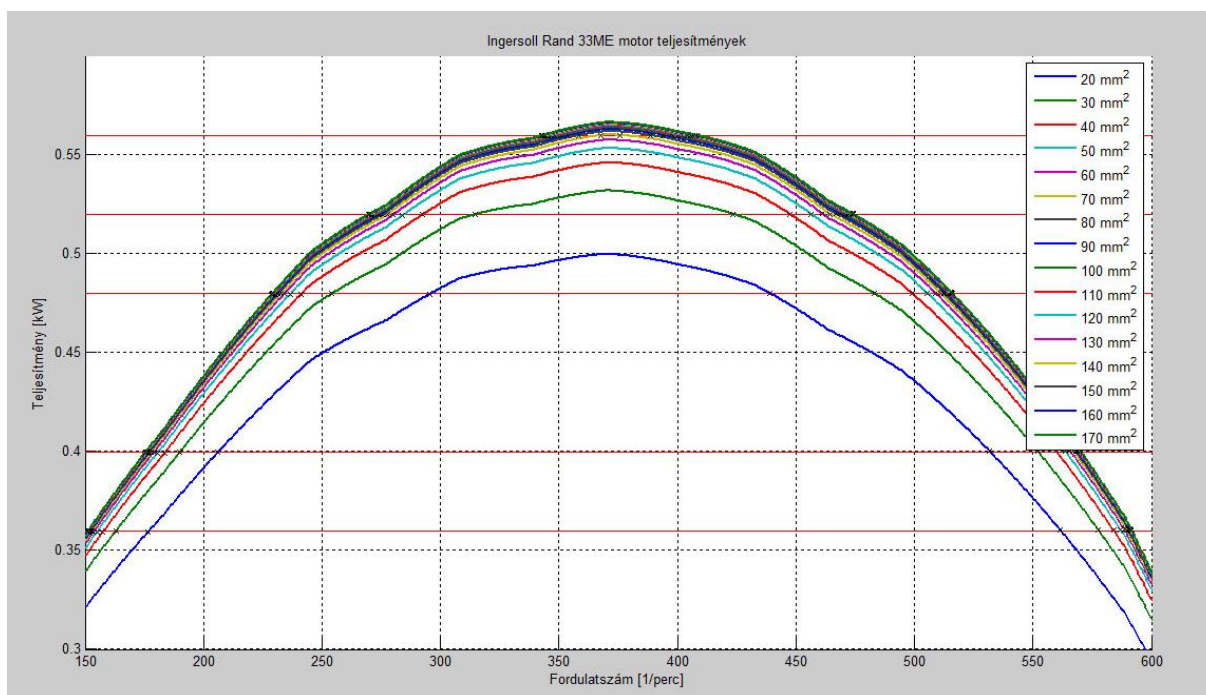
4. EREDMÉNYEK, DIAGRAMOK

A modell elkészültével kétféle módszert is modelleztem a megfelelő diagramok létrehozása érdekében.

Az egyik alkalommal, egy a gyakorlatban is egyszerűen kivitelezhető módszert alkalmaztam. Ennek a lényege, hogy a modellben állandó fojtási keresztmetszeteken, de változó terhelés mellett mértem a motor jellemzőit. Ez azt jelenti, hogy egy állandó, beállított fojtáson, amelyen még működőképes a motor, a terhelést folyamatosan növeltem. Ezt követően a fojtót nyitottam és újra nulla terheléstől, maximális terhelésig mértem a motor jellemzőit. A modell a nagyon kicsi és nagyon nagy terheléseket nem minden esetben tudta értelmezni, ennek okán a modell eredményeire polinomot illesztettem a megfelelő szakaszra, ezáltal teljes tartományokat kapva.

A modellben a fojtó és a motor közötti csőszakasz ellenállást elhanyagoltam. A valóságban ez állítható elő, hogy a fojtót közvetlenül a motor elé helyezzük.

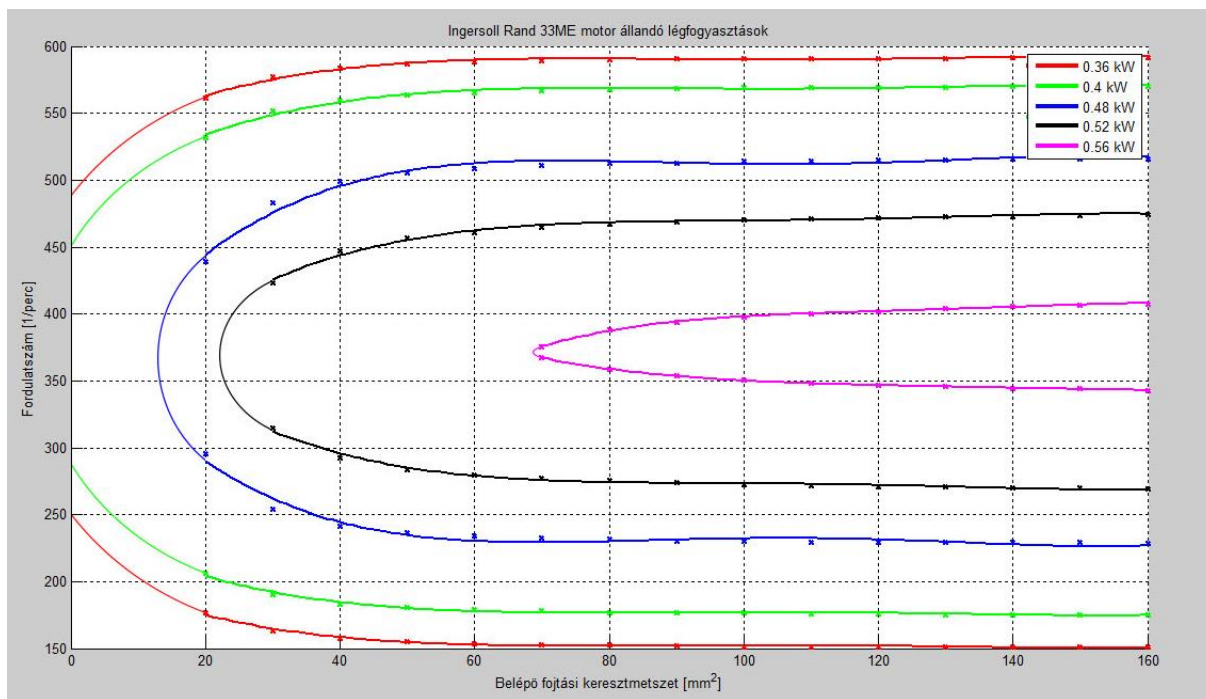
Elsőnek felvettem a motor mechanikai teljesítménygörbéit a fordulatszám függvényében különböző, de állandó keresztmetszetek mellett.



4-1. ábra Mechanikai teljesítménygörbék a fordulatszám függvényében különböző, de állandó fojtási keresztmetszeteken

A 4-1. ábrán látható, hogy a legkisebb teljesítménygörbe a legkisebb fojtáson értelmezhető, amely fojtás jelen esetben 20 mm^2 . Ahogy növelem a keresztmetszetet, az adott fordulatszámon elérhető legnagyobb teljesítmény is növekszik. Ezek a teljesítménygörbék a fojtás nyitásával besűrűsödnek, hisz belátható, hogy egy adott átmérő után, hiába növelem azt, az elérhető teljesítmény nem fog nőni. A modellezés során a fojtási keresztmetszetet 20 mm^2 -ről 10 mm^2 -ként növeltem egészen 170 mm^2 -ig. Ezt követően az elérhető teljesítmény nem növekedett.

Ezt követően vízszintes vonalakat húztam a diagramban. Ezek állandó teljesítményt jelentenek. Egy vonal metszéspontjai a görbékkel, jelenti a különböző fordulatszámon és fojtási keresztmetszeten vett állandó teljesítményt. Ezeket a metszéspontokat ábrázoltam a fordulatszám és a fojtási keresztmetszet függvényében. Összekötve az összetartozó pontokat nyitott kagylókat kaptam.

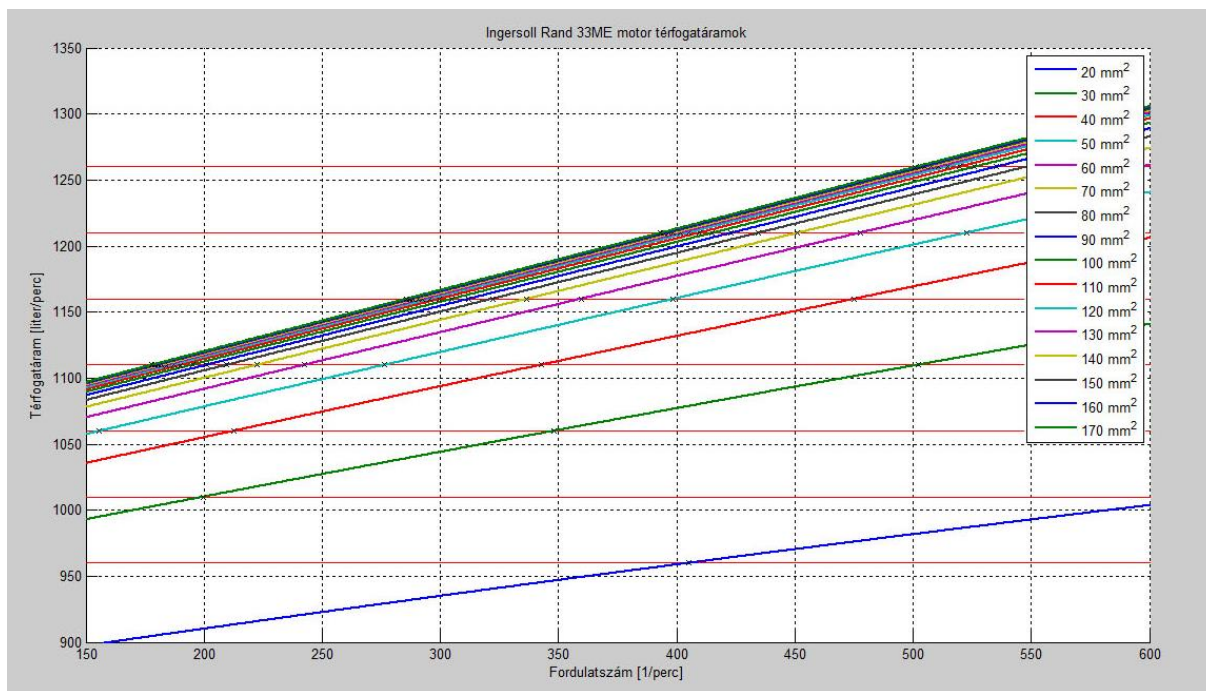


4-2. ábra Állandó teljesítmény-kagylógörbék

Jól látható, hogy egy kisebb teljesítmény nagyobb területen érhető el a diagramban. Ez azt jelenti, hogy szélesebb fordulatszám tartományon és kisebb fojtási keresztmetszeteken is elérhető. Ahogy haladunk a nagyobb teljesítmény felé a görbék kisebb területet fednek le.

A 4-2. ábrán a 0.56 kW állandó teljesítményű görbéről leolvasható, hogy ez a teljesítményszint csak 70 mm^2 fojtási keresztmetszet felett érhető el és $340 - 410$ 1/perces fordulatszám tartományon.

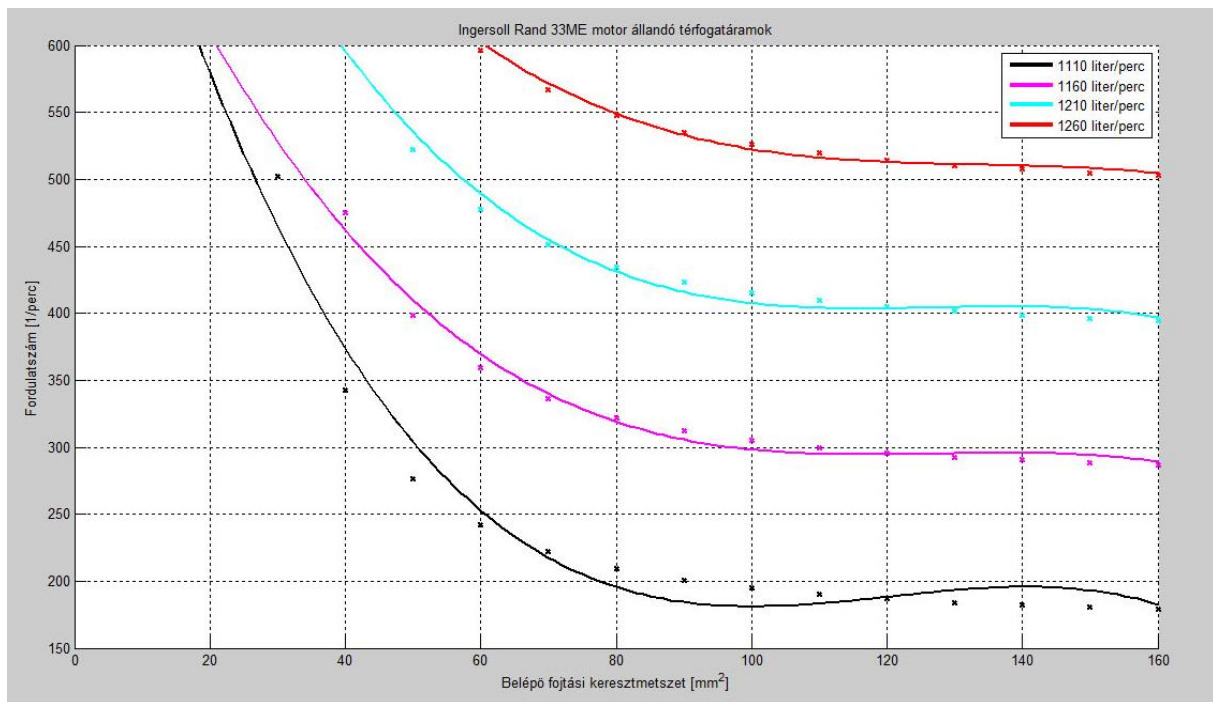
Ugyanebben a diagramban célszerű ábrázolni, hogy az adott tartományokon mennyi levegőre van szüksége a motornak. A térfogatáram görbéket ugyanazzal a módszerrel veszem fel, mint a teljesítménygörbéket. Egy állandó kicsit keresztmetszeten a legkisebbtől a legnagyobb terhelésig megmérem a belépő térfogatáramot. Ezt követően növelek a keresztmetszeten és újra mérek. Ebben az esetben is 20 mm^2 –től 170 mm^2 –ig teszem ezt meg, 10 mm^2 –es növelésekkel.



4-3. ábra Térfogatáram görbék a fordulatszám függvényében különböző, de állandó fojtási keresztmetszeteken

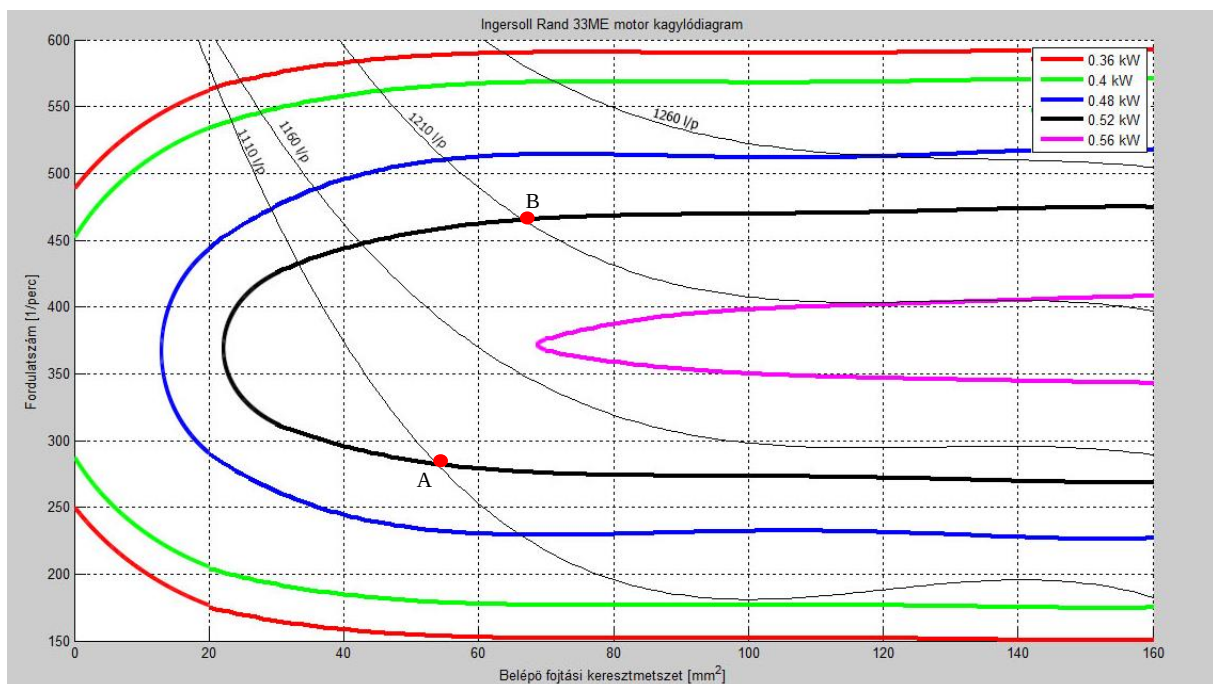
A legkisebb fojtáshoz tartozik a legkisebb térfogatáram adott fordulatszámon. Ahogy növelem a keresztmetszetet, növekszik a fogyasztás is.

Ebben a diagramban is vízszinteseket húzok, amelyek az állandó térfogatáram egyenesei. A metszéspontokat ábrázolom a fordulatszám és a fojtási keresztmetszet függvényében, majd az összetartozó pontokat összekötöm. Jelen esetben nem kagylókat kapok.



4-4. ábra Állandó térfogatáram görbék

Végül a két diagramot együtt ábrázolom.



4-5. ábra Állandó teljesítmény és állandó térfogatáram görbék

A 4-5. ábrán a térfogatáramokat is feltüntetve a teljesítmények mellett látható, hogy egy adott teljesítmény különböző fogyasztások mellett is elérhető.

Amennyiben veszem a 0.52 kW –os teljesítményhez tartozó, a 4-5. ábrán feketével jelölt diagramot, leolvasható, hogy 53 mm^2 –es fojtási keresztmetszet és 280 1/perc –es fordulatszám mellett 1110 liter/perc a motorba beáramló térfogatáram (A pont). Ugyanakkor, ha ugyanezen a teljesítményen magasabb fordulatszámot akarok elérni, például 475 fordulat/percet, akkor 68 mm^2 –re kell a fojtási keresztmetszetet nyitnom, de ez 1210 liter/perc –es térfogatáramot jelent (B pont).

Ebből belátható, hogy adott teljesítményen, de különböző fordulatszám mellett jelentős különbség van a motor fogyasztásában. Az optimum pontok látszólag a teljesítménygörbék „csúcsai”, ugyanakkor a gyakorlatban ez a diagram nehezen használható. Amennyiben változik a fojtás kialakítása és annak alaktényezője, továbbá a fojtó és a motor közötti csőszakasz ellenállása jelentős, ugyanezen fojtási keresztmetszetek mellett nem garantáltak az adott teljesítmények és térfogatáramok.

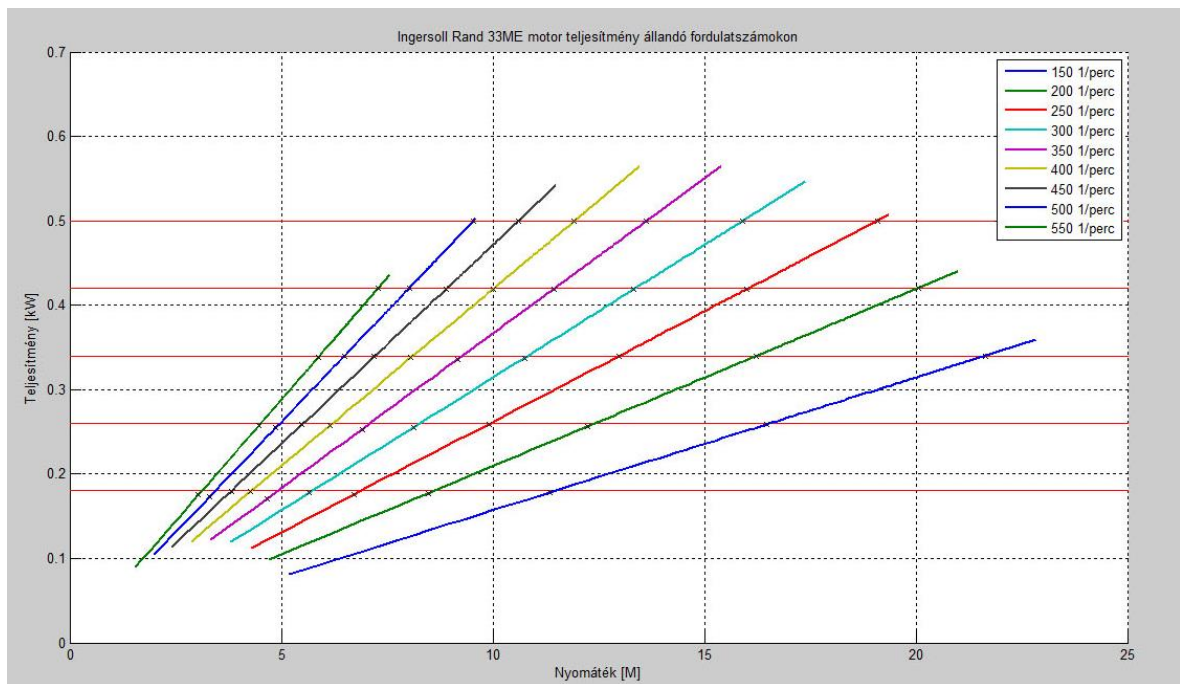
Ennek okán egy másik módszerrel is ábrázoltam a fogyasztást és a teljesítményt, de a belsőégésű motorok analógiáján azokat egy nyomaték –fordulatszám diagramba helyeztem.

Térfogat áramok helyet fajlagos fogyasztás görbéket veszek fel. A fajlagos fogyasztás mértékegységét liter/(perc·Watt). –ként ábrázolom. Ennek az az oka, hogy a gyakorlatban a térfogatáram értelmezésére a liter/perc terjedt el.

A másik módszer annyiban hasonlít a fentebb bemutatotthoz, hogy ugyanazokat a jellemzőket mérem, de a paraméter, most nem a fojtási keresztmetszet lesz, hanem a fordulatszám. Ez azt jelenti, hogy különböző, de állandó fordulatszámon veszem fel a teljesítmény és fajlagos fogyasztás görbéket.

A modell futtatásának szempontjából ez nem jelent nehezebb kihívást az előzőnél, viszont a gyakorlatban mérés technikai szempontból igen. Ugyanis szabályozás nélkül, ha terhelem a motort, a fordulatszám csökken. Mivel állandó fordulatszámon kell felvenni a jellemzőket ezért a fojtót mindig a terhelés után kell állítani, hogy ismét a megfelelő fordulatszámon forogjon a motor tengelye. Belátható, hogy ebben az esetben nem számít a csőszakasz ellenállása és a fojtó alaktényezője sem, ugyanis ezektől függetlenül mindig fordulatszámot kell állítani. Az fontos szempont ugyanakkor, hogy teljesen nyitott fojtónál a motor le tudja adni a maximális teljesítményét.

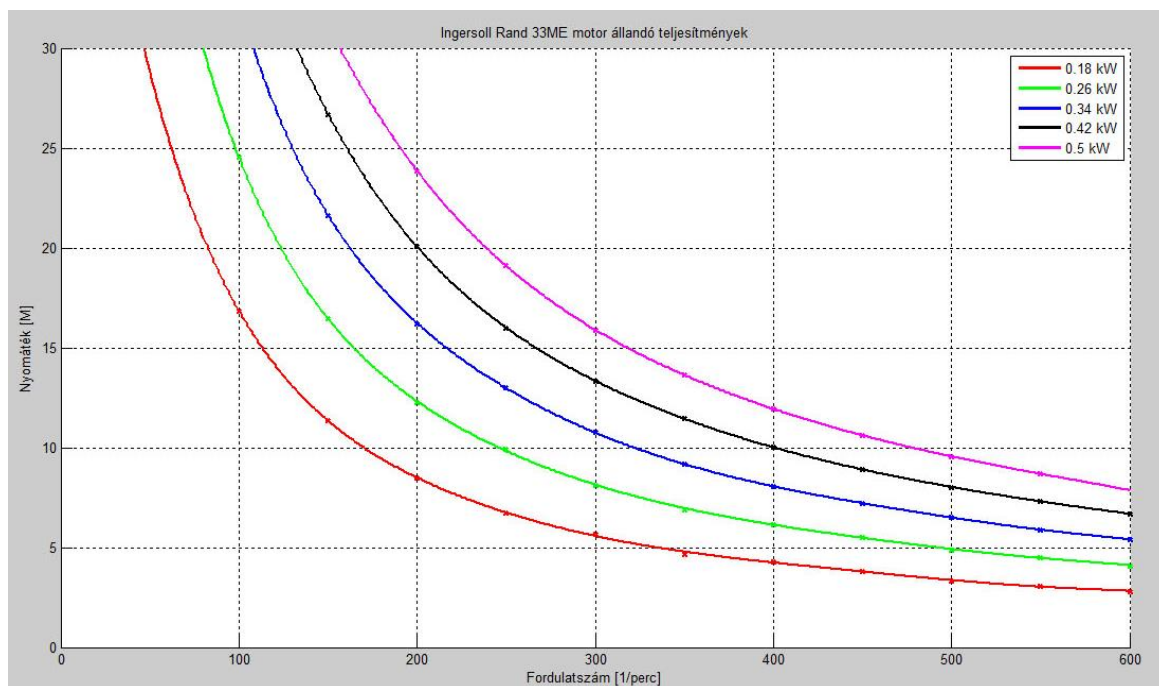
Elsőként állandó fordulatszámok mellett felveszem a teljesítmény görbéket a nyomaték függvényében.



4-6. ábra Mechanikai teljesítménygörbék a nyomaték függvényében különböző, de állandó fordulatszámok mellett

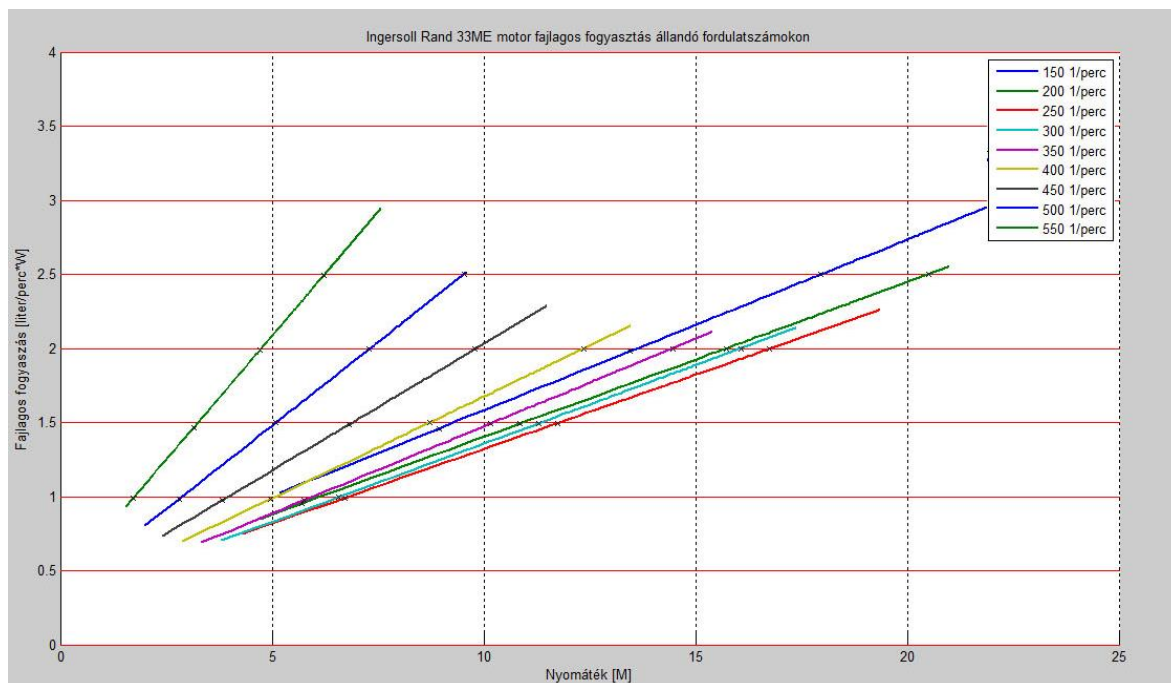
A 4-6. ábrán látható, hogy ebben az esetben 150 1/perc és 550 1/perces állandó fordulatszámokon 50 1/perces lépésközzel mértem meg a motor teljesítményét a nyomaték függvényében. Ezt követően ismét vízszinteseket húztam, amely az állandó mechanikai teljesítmény egyeneseit. A metszéspontokat egy nyomaték –fordulatszám diagramban ábrázoltam és a megfelelőket összekötöttem.

Ebben az esetben nem kagylókat kaptam, hanem hiperbolákat. Minél nagyobb a leadott mechanikai teljesítmény annál távolabb van a hiperbola az origótól.



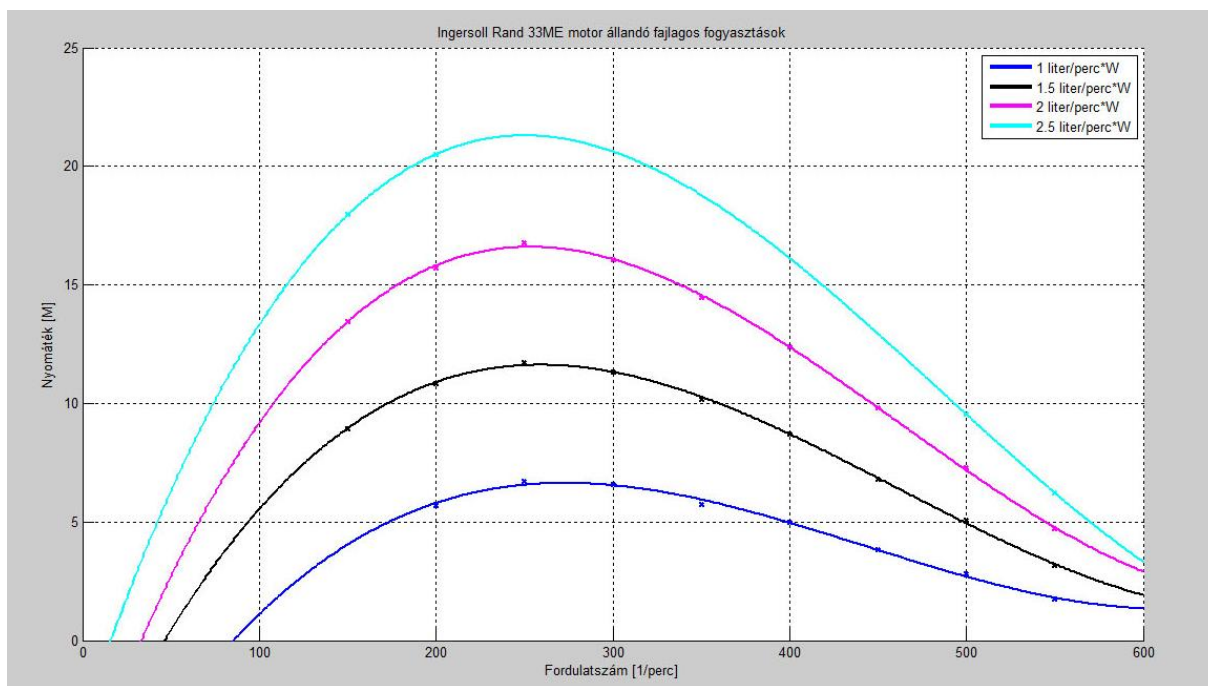
4-7. ábra Állandó teljesítmény hiperbolák

Ezt követően ismét ugyanebbe a diagramba felvettem a fajlagos fogyasztás görbéit is. Először felvettem állandó, de különböző fordulatszámok mellett a fajlagos fogyasztás görbéit a nyomaték függvényében.



4-8. ábra Fajlagos fogyasztásgörbék a nyomaték függvényében különböző, de állandó fordulatszámok mellett

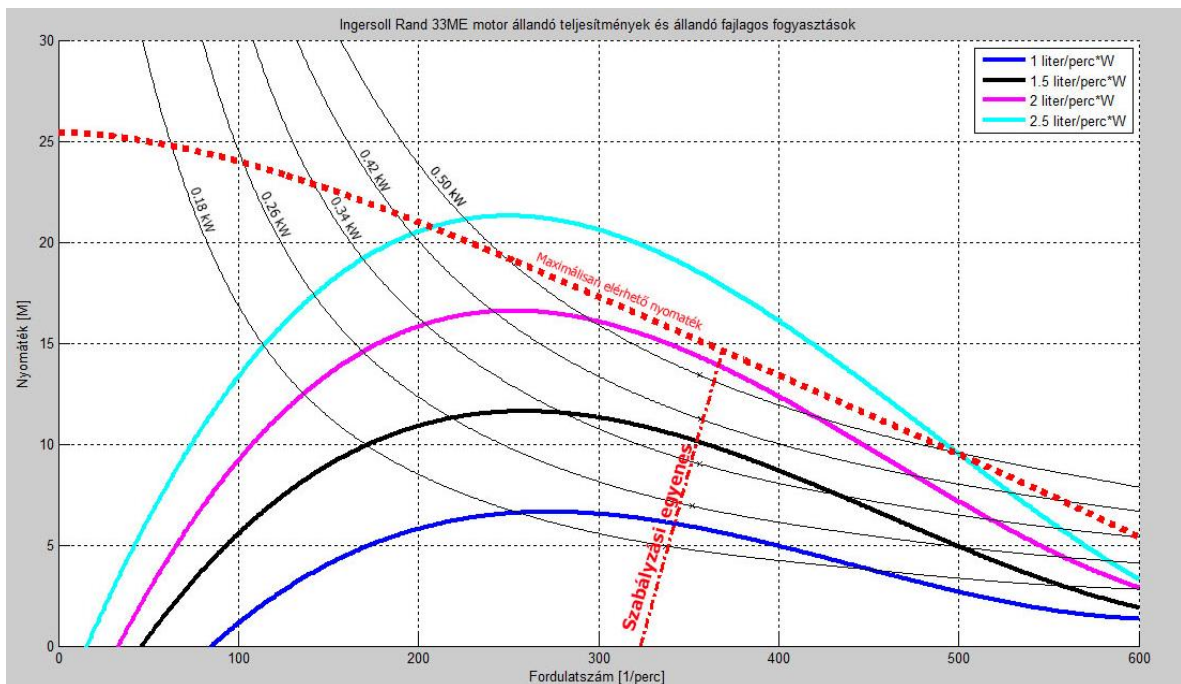
A kezdeti és a végső fordulatszám, továbbá a lépésköz is az előzőeknek megfelelő volt. Ebben a diagramban is vízszinteseket húztam. A metszéspontokat egy nyomaték – fordulatszám diagramban ábrázoltam és az összetartozó pontokat összeköttem. Ismét nem kagylódiagramokat kaptam, hanem jelen esetben haranggörbéket.



4-9. ábra Állandó fajlagos fogyasztás görbék

A 4-9. ábrán látható, hogy ugyanazt a terhelő nyomatékot különböző nagyságú fajlagos fogyasztás mellett érhetjük el a fordulatszámtól függően.

Végül egy diagramban ábrázolom az állandó fajlagos fogyasztás és állandó teljesítmény görbéket.



4-10. ábra Állandó fajlagos fogyasztás és állandó teljesítménygörbék

A 4-10. ábrán a teljesítmény hiperbolákon végighaladva belátható, hogy azoknak van egy legalacsonyabb fogyasztású pontja. Ezeket a pontokat összekötve és arra egyenest illesztve kapunk egy „szabályzási egyenest”. Ez azt jelenti, hogy a motor szabályozása során ezen az egyenesen haladva mindig a legkisebb fogyasztás mellett érjük el az adott teljesítményt.

Az egyenes 320 és 370 1/perc –es fordulát között található meg. Amennyiben más fordulatszámra van szükségünk érdemesebb azt valamilyen hajtóművel előállítani és a motort az optimális fordulatszám tartományban tartani.

A diagramba továbbá ábrázoltam a maximálisan elérhető nyomatékot is adott fordulatszám mellett.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A munkám célja, hogy mérések alapján olyan diagramokat dolgozzak ki lapátos légmotorokhoz, amelyek segítségével az adott működési körülményekhez meghatározható a motor optimális működési tartománya.

Két motoron végeztem több mérést, amelyekből a mérési eredmények alapján egyet választottam.

Ezt követően számítógépes modellt készítettem a légmotorról a MATLAB szoftver segítségével, hogy a méréseken továbbmenően a legkülönbözőbb körülményeket állíthassam elő.

Az elkészült modellt a motor katalógus adatai alapján identifikáltam, végül jó közelítéssel a mérési eredményeim alapján validáltam.

A validálást követően a modellek segítségével a munkámhoz szükséges diagramok sokaságát állíthattam elő.

Készítettem egy diagramot, ahol a motor előtti fojtás keresztmetszetének a függvényéből lehet következtetések levonni az optimális fogyasztás meghatározásának érdekében. Ezt követően elkészítettem egy, a gyakorlatban jól használható diagramot, ahol meghatároztam egy szabályozási egyenest is, amelyen haladva a motor minden teljesítményszinten a lehető legkisebb légfogyasztás mellett működik.

6. TOVÁBBI FELADATOK

Az elkészült diagramok mindegyikét számítógépes modell segítségével állítottam elő. Ennek okán bizonyos eltérések, különbségek adódhatnak a valóságtól. Bár a modellt validáltam, a validálás bizonyos aspektusai különböznek a diagramok előállításakor alkalmazott körülményektől.

Elsődleges feladatként a diagramok előállítását szeretném elvégezni valós mérések segítségével. Ezzel megkapnám azok pontosságát, továbbá az általam meghatározott szabályozási szakasz helyességét.

Ezt követően pedig különböző motoroknak szeretném meghatározni az optimális működési tartományát és valamilyen általános következtetést levonni a légmotorok használatát tekintve.

7. SUMMARY

The objective of my thesis was to make diagrams, which I can use to find the optimum working range of the vane air motors.

I measured two motors in many times, and finally choose on result.

Then I made a computerized model by using the software MATLAB to use it in different operating conditions, which are difficult to measure.

I made the identification of the model by using catalog data, then I validate it by using the measurement data. Finally I was ready to make the diagrams and find a way to define the optimum working range of the motors.

First I made a diagram where I can make conclusions about the motor working ranges by the function of the orifice area between the motor inlet. Then I made another diagram which is practically and it's possible to find the optimum working range where the motor has to be used.

8. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

Köszönöm Dr. Jánosi László Tanár Úrnak, aki bevezetett a témába és végig segített a munkám során.

Köszönöm a szakmai segítséget Dr. Földi László Tanár Úrnak és Tóth János egyetemi hallgatónak.

Köszönöm a Festo Kft. dolgozóinak, akik a méréseimhez mind szakmailag, mind eszközileg hozzájárultak.

Továbbá köszönöm Dr. Kuczik Istvánnak és a Rézmű Kft. -nek, a légmotorok és a hozzá tartozó eszközök biztosítását.

9. FELHASZNÁLT IRODALOM

- Desoutter Industrial katalógus, 2012.
- Dr. Boros Andor – Villamos mérések a gépészetben, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978.
- Dr. Farkas István – Folyamatirányítás, Szent István Egyetem Gépészmérnök Kar, Gödöllő, 1997.
- Dr. Gruber József – Ventilátorok, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1968.
- Dr. Jánosi László – Pneumatika Energiaátvitel jegyzet, SZIE, Gödöllő, 2012.
- Dr. Pattanyús Ábrahám Géza – A gépek üzemtana, MK, Budapest, 1983.
- Dr. Sváb János – Biometriai módszerek a kutatásban, MGK, Budapest, 1981
- Dr. Szaladnya Sándor – Telek Péter – A pneumatikus automatizálás eszközei, a tervezés módszerei, ÉTK Kft., Budapest, 2009.
- Festo – Bevezetés a Szenzorikába jegyzet, Festo Kft., Budapest, 2007.
- Heinz Grohe – Belsőégésű motorok mérési módszerei, MK, Budapest, 1982.
- Ingersoll Rand - Air Motors katalógus, 2009.
- Jack Philip Holman – Experimental Methods for Engineers, McGraw-Hill Book Co. – Singapore, 1989.
- Jurek Aurél – Belsőégésű motork, Tankönyvkiadó, Budapest, 1956.
- Nyuli Gyula, Dr. Oroszlány István, Szász János – Az öntözés gépei, MGK, Budapest, 1966.
- Peter Beater – Pneumatic Drives: System Design, Modelling and Controll, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.
- Pneumatikus energiaátvitel. Összenyomható munkaközégek. - MSZ ISO 6358, Magyar Szabványügyi Hivatal, 1995.
- Ronald Jurgen – Automotive Electronics Handbook, McGraw-Hill Inc., 1995.
- Sárosi József – Pneumatikus mesterséges izmok vizsgálata Doktori értekezés, SZIE, Gödöllő, 2013.
- Sitkei György – Gyakorlati áramlástan, Szaktudás Kiadó Ház Rt., 1997.