

P. FitzPatrick – Nagy Britanniai Légpárnáshajó Egyesület

**LÉGPÁRNÁSHAJÓK LÉGCSATORNÁBA ÉPÍTETT
VENTILÁTOREGYSÉGÉNEK TOLÓERŐ SZÁMÍTÁSA**

Fordította: Németh Richárd

2004. szeptember 25.

Légpárnáshajók légcsatornába épített ventilátoregységének tolóerő számítása

P. FitzPatrick – Nagy Britanniai Légpárnáshajó Egyesület

Bevezetés

A legtöbb modern könnyű légpárnáshajónál a haladó mozgáshoz szükséges tolóerőt propellerrel vagy a kereskedelembe kapható ventilátorlapáttal hozzuk létre. Ez a jegyzet a tolóerő számításának módszereit tárgyalja.

A propelleres esetén alkalmazott összefüggések ventilátorokra történő alkalmazása félrevezető eredményeket adhat. A legmegfelelőbb ventilátorok tervezetten csatornában működnek és agyba épített lapátokkal rendelkeznek. A ventilátoragy mérete sokkal nagyobb, mint egy jellegzetes propeller agyrésze.

A ventilátorok alapvetően olyan ipari célú felhasználásra készülnek, mint légkezelés, füstelszívás stb. A gyártók nem számítottak arra, hogy ezeket a ventilátorokat légpárnások hajtómű egységeiként fogják használni, következésképpen nem tették közzé a ventilátorok tolóerejére vonatkozó adataikat. Azonban a különböző fordulatszámokon és nyomásokon szállított légmennyiségi adatok a rendelkezésükre állnak.

Mi az a tolóerő?

A ventilátor kilépőoldalán távozó légmennyiséggel kifejtett erő a tolóerő. Az össztolóerő meghatározásának alapképlete:

$$T_g = Q_d \cdot V_d \cdot \rho \quad (1)$$

ahol:

T_g = össztolóerő (veszteségek nélkül), N

Q_d = a kilépő levegő mennyisége, m^3/s

V_d = a kilépő levegő sebessége (kiáramlási sebesség), m/s

ρ = a levegő sűrűsége, kg/m^3

Impulzusveszteség

A működés során ventilátor az előtte lévő levegőt beszívja, és forgó lapátjaival megnöveli annak nyomását és sebességét. Ha a belépő levegő már rendelkezik valamilyen sebességgel – ebből adódóan impulzussal – a ventilátor nem képes a légsebességet ezzel a sebességgel növelni, ezt a különbséget fejezi ki az impulzusveszteség (D_m).

$$D_m = Q_d \cdot V_0 \cdot \rho \quad (2)$$

ahol:

V_0 = a szabad levegő áramlási sebessége a ventilátor előtt, m/s

Tényleges tolóerő

A tényleges tolóerő (T_n) az össztolóerő (T_g) és az impulzusveszteség (D_m) különbsége.

$$T_n = (Q_d \cdot V_d \cdot \rho) - (Q_d \cdot V_0 \cdot \rho) = Q_d \cdot \rho \cdot (V_d - V_0) \quad (3)$$

ahol a légmennyiség:

$$Q_d = A \cdot V_d$$

A = a ventilátor keresztmetszete, m^2

Az előzőek alapján az (1) egyenlet a következő alakban írható fel:

$$T_g = A \cdot V_d \cdot V_d \cdot \rho = V_d^2 \cdot A \cdot \rho \quad (4)$$

A (3) egyenlet a $Q_d = A \cdot V_d$ összefüggés behelyettesítésével az alábbi:

$$T_n = Q_d \cdot \rho \cdot (V_d - V_0) = V_d \cdot A \cdot \rho \cdot (V_d - V_0) \quad (5)$$

Példa:

Határozzuk meg egy 1000mm átmérőjű, 40°-os lapátszögű, 2200f/perc fordulatszámú üzemelő Multi-Wing 6-12/5Z típusú ventilátor össztolóerejét.

Ventilátor átmérője $d_d = 1000\text{mm}$

amiből:

$$A = \frac{d_d^2 \cdot \pi}{4} = \frac{0.1^2 \cdot \pi}{4} = 0.785\text{m}^2$$

Kilépő levegő sebessége $V_d = 30.04\text{m/s}$

A levegő sűrűsége $\rho = 1.22\text{kg/m}^3$

Tehát az össztolóerő:

$$T_g = 30.04^2 \cdot 0.785 \cdot 1.22 = 864.2\text{N}$$

Ventilátorkiválasztás

Ezt az adatot a gyártótól, vagy a kereskedőtől kellene megszerezni. Abban az esetben, ha az adatok csak bizonyos fordulatszámokra (pl. 1440 vagy 2990f/perc) vonatkozóan érhetőek el, akkor a szükséges paramétereket az általános kisminta törvények alapján (lásd. „Emelőventilátorok működése és kiválasztása” című jegyzetet) kellene megállapítani.

Ha a megállapított tolóerőhöz tartozó teljesítmény áll rendelkezésre, akkor a kilépő légsebesség közelítő értékének a meghatározása válik szükségessé, hogy a rendszert a hajó teljesítményigényéhez illesszük. Ezek az információk azután a megfelelő teljesítményű ventilátor, vagy ventilátorok kiválasztására használhatóak. Abban az esetben, ha a ventilátor csak a tolóerő létrehozására szolgál, akkor csak akkora statikus nyomás-emelésre van szükség, amivel a rövid csatornaszakasz és a ventilátorig tartó egyéb akadályok (védőburkolat, tartóelemek, kormányfelület stb.) veszteségei legyőzhetőek. Ez általában 50Pa nagyságrendű.

A kiválasztott teljesítményigényű ventilátor esetében fontos megvizsgálni, hogy az a javasolt fordulatszámú, a legjobb hatásfokon üzemel-e. Ugyanazon a teljesítményen a jobb hatásfokú ventilátor fogja a nagyobb tolóerőt biztosítani. Általános szabály, hogy minél nagyobb és lassabb egy ventilátor, annál nagyobb hatásfokkal üzemel. Ha a ventilátorkerék túl nagy, akkor a kilépő levegő sebessége (V_d) lesz túl alacsony, ami határt szab a tényleges hajósebességnek. Emiatt, már a kiválasztás elején célszerű meghatározni V_d legkisebb elfogatható értékét.

Statikus és dinamikus tolóerő

A statikus tolóerő a hajó álló helyzetében mért erő, ami egyenlő az össztolóerővel (T_g). Használható referenciaérték kimérését nyugvó környezeti levegőnél ($V_0=0\text{m/s}$) kell végezni.

A dinamikus tolóerő meghatározásánál a veszteségeket az egyenletben figyelembe kell venni.

Feltételezzünk egy nyugodt napot, amikor kis távolságban a ventilátor előtt nincsen légáramlás. A (2) egyenlet alapján az impulzusvesztés értéke nulla. Tehát a statikus tolóerő értéke nem változik (eltekintve a különféle akadályok stb. okozta nyomásvesztések hatásaitól).

Ha a szabad levegő áramlási sebessége (V_0) pld. nagyobb, mint 10m/s , akkor a veszteséget ki kell számolni, és le kell vonni a statikus tolóerő értékéből. Az (5) egyenlet használatával az előző példában számolt tolóerő a következők szerint alakul:

$$T_n = V_d \cdot A \cdot \rho \cdot (V_d - V_0) = 30.04 \cdot 0.785 \cdot 1.22 \cdot (30.04 - 10) = 576.5\text{N}$$

Tehát 10m/s -os ellenszélben a tolóerő közelítőleg 580N -ra csökken. Ugyanez a helyzet, ha a szabad levegő áramlási sebessége nulla, de a hajó haladási sebessége 10m/s . Ahogy a hajó gyorsul és haladási sebessége megegyezik szabadlevegő áramlási sebességével, a dinamikus tolóerő értéke lecsökken, és növekszik a haladási sebesség.

A (3) egyenletből, $T_n = Q_d \cdot \rho \cdot (V_d - V_0)$ látható, ha $V_0 = V_d$, akkor a hasznos sebesség nulla, tehát a tényleges tolóerő megszűnik.

Elhanyagolva egyéb olyan ellenállásokat, mint a szoknya, vagy a hajó aerodinamikai ellenállása, látható, hogy a példánkban szereplő hajó legnagyobb elméleti sebessége 30m/s . A valóságban a maximális sebesség kisebb értékű lesz, mivel a különféle ellenállási értékek a sebesség növekedésével exponenciálisan nőnek és egy kisméretű hajó esetén a $220\text{-}445\text{N}$ -os értéket érik el.

A fentiek igazolják a ventilátor körültekintő kiválasztásának és a célokhoz történő illesztésének szükségességét. Egy cirkálóhajó esetén, 10m/s -os (36km/h) ellenszélben, megkövetelhető legnagyobb sebesség 20m/s (72km/h). A példánkban kiválasztott ventilátor, a veszteségeket elhanyagolva, lehetővé teszi e sebesség elérését, azonban ugyanez a ventilátor nem alkalmas arra, hogy egy versenyhajó, még gyenge ellenszélben is, elérje a 27m/s -os (97km/h) legnagyobb sebességet. Kisebb átmérőjű ventilátornak, ahhoz, hogy változatlan teljesítményigény mellett ugyanekkora légmennyiséget és tolóerőt biztosítson magasabb fordulatszámon kellene üzemelnie.

A szükséges tolóerő biztosítása érdekében fontos, hogy a ventilátor használja fel a rendelkezésre álló teljesítményt. Az **1.sz. ábra** a kisebb hajókban általánosan használt Multi-Wing típusú ventilátorok vonatkozó paramétereit tartalmazza.

Légpárnáshajók légcsatornába épített ventilátoregységének tolóerő számítása

Fan 900 /6-12/5Z Area = 0.636 Sqr.Mtr

Pitch SPEED

2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3100	3200	3300
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Volume (Cu/M/sec)

25	12.77	13.32	13.88	14.43	14.99	15.54	16.10	16.66	17.21	17.77	18.32
30	15.56	16.24	16.91	17.59	18.27	18.94	19.62	20.30	20.97	21.65	22.33
32.5	17.13	17.88	18.62	19.37	20.11	20.86	21.60	22.34	23.09	23.83	24.58
35	18.88	19.70	20.52	21.34	22.16	22.98	23.80	24.62	25.44	26.26	27.08
37.5	19.83	20.69	21.55	22.41	23.28	24.14	25.00	25.86	26.72	27.59	28.45
40	20.94	21.85	22.76	23.67	24.58	25.49	26.40	27.31	28.22	29.13	30.04
45	23.16	24.17	25.17	26.18	27.19	28.19	29.20	30.21	31.21	32.22	33.23
50	25.06	26.15	27.24	28.33	29.42	30.51	31.60	32.69	33.78	34.87	35.96

Velocity (M/sec)

25	20.07	20.94	21.82	22.69	23.56	24.43	25.31	26.18	27.05	27.93	28.80
30	24.46	25.52	26.59	27.65	28.71	29.78	30.84	31.90	32.97	34.03	35.09
32.5	26.93	28.10	29.27	30.44	31.61	32.78	33.95	35.12	36.29	37.47	38.64
35	29.67	30.96	32.25	33.54	34.83	36.12	37.41	38.70	39.99	41.28	42.57
37.5	31.17	32.52	33.88	35.23	36.59	37.94	39.30	40.65	42.01	43.36	44.72
40	32.91	34.34	35.77	37.21	38.64	40.07	41.50	42.93	44.36	45.79	47.22
45	36.40	37.99	39.57	41.15	42.73	44.32	45.90	47.48	49.06	50.65	52.23
50	39.40	41.11	42.82	44.53	46.25	47.96	49.67	51.38	53.10	54.81	56.52

Thrust (Lbf)

25	69	75	82	88	95	102	110	118	126	134	142
30	103	112	121	131	141	152	163	175	187	199	211
32.5	124	136	147	159	171	184	198	212	226	241	256
35	151	165	179	193	208	224	240	257	274	292	311
37.5	167	182	197	213	230	247	265	284	303	323	343
40	186	202	220	238	256	276	296	316	338	360	383
45	227	248	269	291	313	337	362	387	413	440	468
50	266	290	315	340	367	395	423	453	484	516	548

Power Consumed at Speed/Pitch (H.P.)

25	10.90	12.38	13.99	15.74	17.63	19.66	21.84	24.18	26.68	29.34	32.18
30	16.36	18.59	21.01	23.64	26.47	29.52	32.80	36.31	40.06	44.07	48.33
32.5	21.15	24.03	27.16	30.56	34.22	38.16	42.40	46.94	51.79	56.97	62.48
35	25.78	29.29	33.11	37.24	41.71	46.52	51.68	57.21	63.13	69.44	76.15
37.5	29.69	33.74	38.13	42.89	48.04	53.57	59.52	65.89	72.70	79.97	87.70
40	33.52	38.09	43.05	48.43	54.23	60.49	67.20	74.39	82.08	90.29	99.02
45	47.09	53.51	60.48	68.03	76.18	84.97	94.40	104.51	115.31	126.83	139.10
50	60.66	68.92	77.90	87.63	98.14	109.45	121.60	134.62	148.53	163.38	179.18

Modified Thrust (allowing 4 cu/M/sec for lift)

25	47	53	58	64	70	76	83	89	96	104	111
30	76	84	93	101	111	120	130	140	151	162	174
32.5	95	105	115	126	137	149	161	174	187	200	214
35	119	131	144	157	171	185	200	215	231	248	265
37.5	133	146	160	175	190	206	223	240	258	276	295
40	150	165	181	197	214	232	251	270	290	310	332
45	188	207	226	246	267	289	312	336	360	386	412
50	224	246	268	292	317	343	370	398	427	456	487

1.sz. ábra

Aerodinamikai, szoknya- és hullámellenállás okozta veszteségek

Az ellenállás kifejezést arra használjuk, hogy jellemezzük, azokat az erőket, amik a hajó mozgását akadályozzák, sebességét lassítják. A legjelentősebb ellenállások az alábbiak.

Aerodinamikai ellenállás:

A levegőben haladó hajótest és felépítmény légellenállása.

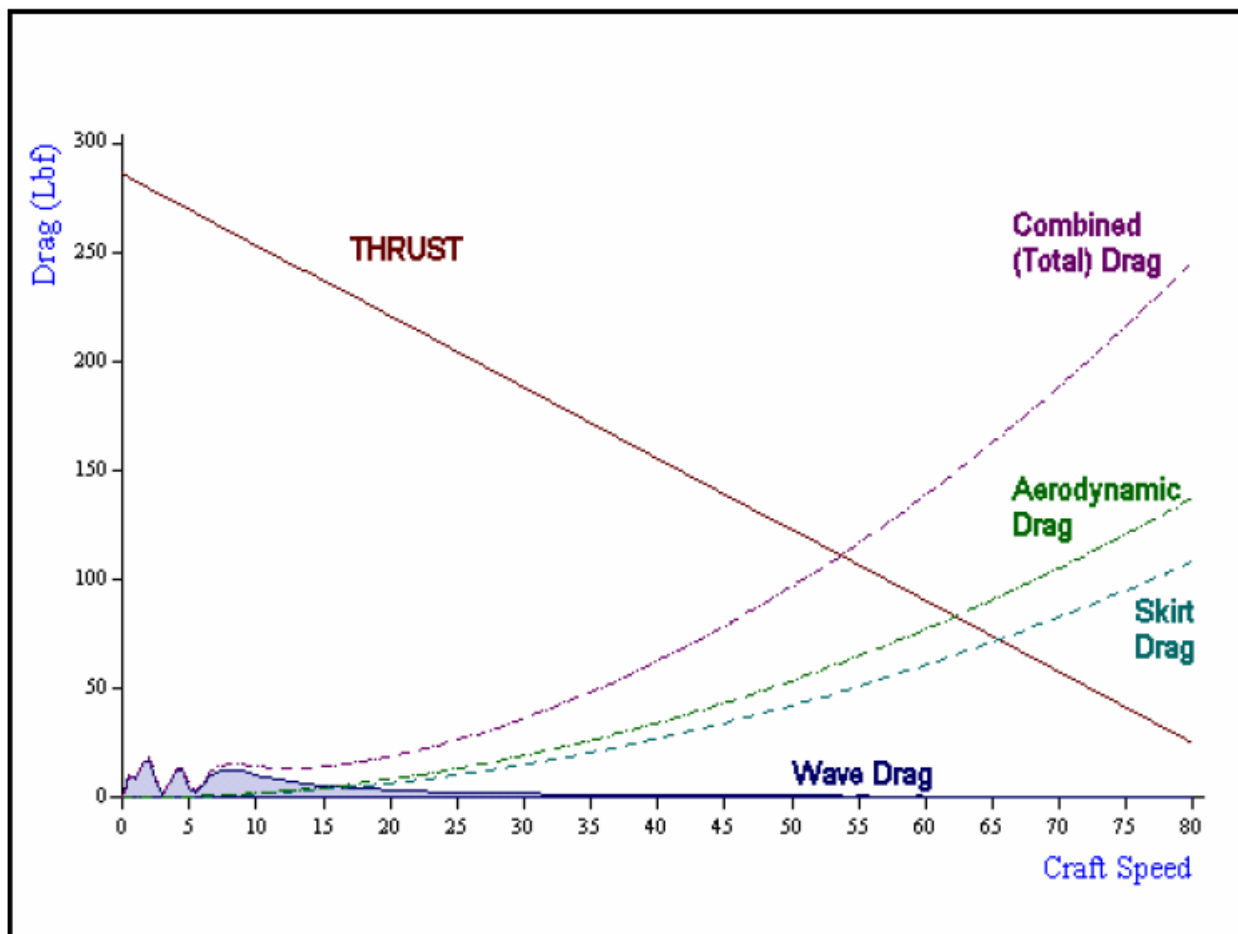
Szoknyaellenállás:

A szoknya és azok a felület között létrejövő ellenállást jelenti, amely felett a hajó mozog. Az ellenállást a felület (víz, fű stb.) és a szoknya fizikai érintkezése okozza.

Hullámellenállás:

Az az ellenerő, ami a hullámok létrehozásakor ébred, miközben a hajó a vízen halad. Az ún. felszállási sebesség eléréséig orrhullámok alakulnak ki a szoknya előtt, és az ellenállás meglehetősen nagy. A felszállási sebesség elérésével az erők csökkennek, azonban a szoknyán keresztüláramló levegő helyi örvényeket okoz, miközben a hajó előre halad. Ilyen jellegű ellenállás ébred olyan közegű felületek felett is, amelyeket a szoknya haladása közben felkavarhat, mint pld. fű, homok, hó. Sima és kemény felületeken, mint például jég, a hullám- és a szoknyaellenállás jelentősen lecsökken, ezért a hajó elérheti a legnagyobb sebességét.

A **2.sz. ábra** egy 65LE teljesítményű motorral és 900mm-es ventilátorral szerelt Forma 2-es versenyhajó tolóerejét és az ébredő ellenállásokat mutatja a sebesség függvényében, nyugvó szabadtéri levegő esetén.



2.sz. ábra

Az ábrán a tolóerő és az összellenállás vonal metszéspontjához tartozó sebesség a hajó valódi legnagyobb sebességét jelenti (ebben a pontban a tolóerő megegyezik az összellenállással).

Ventilátor hatásfoka

A ventilátor állítható lapátszögű. Az **1.sz. ábra** a különféle lapátszöghöz tartozó teljesítményekre vonatkozó részét vizsgálva látható, hogy adott teljesítmény mellett a tervező megválaszthatja, hogy különböző fordulatszámnál milyen lapátszögbeállítást használhat. A táblázat adatai részben megmutatják a korábban megfogalmazott állítás (Minél nagyobb és lassabb a ventilátor, annál nagyobb a hatásfoka) helytállóságát. A táblázatban kiemelt értékek azt mutatják, hogy 33LE teljesítménynél az alacsonyabb fordulatszám és meredekebb lapátszög esetén a tolóerő értéke nagyobb.

Erre a konkrét ventilátorra vonatkozó hatásfokértékek a következők:

Számos Multi-Wing tolóventilátor az 50%-os hatásfok középső és alsó tartományában üzemel. A lassabbak nagyobb hatásfokúak, azonban a nagyobb lapátszög nem mindig jelenti a leghatékonyabb megoldást. Sajnos nem egyszerű meghatározni a ventilátor hatékony üzemelési tartományát.

	2300 rpm	2400 rpm	2500 rpm
5Z 35°	53%	53%	52%
5Z 37.5°	56%	54%	54%
5Z 40°	56%	56%	56%
5Z 45°	53%	53%	53%

A ventilátorokat eredetileg ipari célú felhasználásra készítik és csak ritkán működnek jelleggörbéjük legnagyobb hatásfokú részén. Az összh hatásfok olyan tényezőktől függ, mint a fordulatszám, a lapátvégek és a csatorna közötti hézag mérete, a lapát alakja és a beállításának szöge, amelyek mindegyike hatással van a teljesítményigényre. Mindezt jól mutatja, ha fenti ventilátorlapátokat 4Z típusra cseréljük.

Bár a különbség jelentősnek tűnhet, az előnyök csak akkor jelentkeznek, ha a lapát szilárdsága megfelelő lenne. A tapasztalatok alapján a karcsúbb és könnyebb konstrukciójú 4Z típusú lapát nagy sebesség és terhelés alatt jobban deformálódik, mint a robusztusabb 5Z típus.

	2300 rpm	2400 rpm	2500 rpm
4Z 32.5°	57%	57%	57%
4Z 35°	61%	61%	61%
4Z 37.5°	59%	59%	59%
4Z 40°	58%	58%	58%

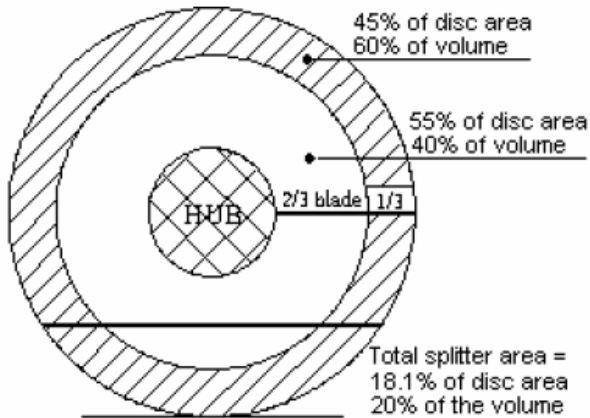
A fenti sebességi értékeken a legnagyobb hatásfokot 5Z típus esetén 40°-os lapátszögnél, amíg 4Z típus esetén 35°-nál kapjuk.

Kevesebb lapátszámú járókerekek szintén nagyobb hatásfokkal üzemelnek, azonban például egy 2 lapátos ventilátor fordulatszámának magasabbnak kell lennie, ha ugyanazt a légmennyiséget és tolóerőt kívánjuk biztosítani. Ez magasabb kerületi sebességet kíván, és potenciálisan nagyobb zajszennyezéshez vezet. Ez a megnövekedett zajszint a lapátszámok számának csökkenésével részlegesen csökkenthető, ami önmagában is zajcsökkentő hatású.

Az axiális ventilátorok egyik jellemzője, hogy a légkibocsátást a ventilátorlapát biztosítja. A levegő a lapátokat szögben hagyja el, ami egy forgó légoszlopot eredményez. A légoszlop tengelyirányú összetevője hoz létre tolóerőt, a forgó komponens elértéktelenedik és nemkívánatos csavarónyomatékot hoz létre. Áramlásrendező alkalmazása lehetővé teszi az ilyen veszteség nagymértékű visszanyerését.

Integrált emelőrendszer

Az integrált emelőrendszernél a ventilátor kilépő oldala megosztott. Az alsó ventilátor-részt az emelő-, a magmaradt részt, pedig a tolóerő létrehozására használjuk. A tolóerőt biztosító ventilátorrész százalékos arányának megállapításához ki kellene számolnunk az emelőrész nagyságát és levonnunk a ventilátorfelület nagyságából, azonban a kapott értékek ritkán adnak pontos eredményeket. A **3.sz. ábra** ezt a megoldást mutatja, amin látható, hogy az osztólemezzel elválasztott rész százalékos aránya és a felhasznált légmennyiség mértéke között különbség van. A példa kis százalékos eltérést mutat, azonban ez a járókerék méretétől, valamint az elválasztólap végleges helyzetétől függően nagyobb is lehet.



3.sz. ábra

Ez a különbség részben annak köszönhető, hogy a kereskedelmi ventilátorlapátokat általában alacsonyabb fordulatszámú üzemre szánják. Egy ideálisnak tekinthető lapát a hossza mentén mindenegyes pontban ugyanazt a nyomást és légmennyiséget biztosítaná, azonban a valóságban nem ez történik, mivel a lapát külső pontjainak kerületi sebessége nagyobb. Ez némiképp javítható azzal, ha a lapát a hossza mentén elcsavarodó, ami lehetővé teszi a lapátvég kisebb hajlásszögű kialakítását, ami csökkenti a lapátvég terhelését és nyomását. Ez a módszer, egy adott szögben elcsavart lapát esetén, azonban csak egy meghatározott fordulatszámon jelent hathatós megoldást.

Mivel a légpárnáshajók ventilátorai a gyártó által tervezett fordulatszám felett üzemelnek, ezért a fenti problémával számolnunk kell.

Emiatt előnyösebb, ha a tolóerő meghatározása előtt kiszámítjuk az emeléshez szükséges levegő mennyiségét (lásd. „A légpárnáshajó-tervezés alapelvei” c. jegyzetet) és a kapott értékét levonjuk a ventilátor által, elválasztólap nélkül, szállított mennyiségből. Ezt a módszert használtuk az **1.sz. ábra** „Módosított tolóerő-értékek” mezőjében szereplő mennyiségek megadásához.

A kilépőnyílás pontosabb keresztmetszetének a meghatározása történhet számítással, vagy méréssel is, és a kapott értékkel meghatározható a kilépő levegő sebessége. Ez a megközelítés szükséges minden olyan esetben, amikor a különféle méretű elválasztólap hatására valamilyen fokú légáramleválasztás van a csatornában (az elválasztólap alatti takart keresztmetszet változhat, azonban a tolóerőt biztosító kilépőnyílás keresztmetszete állandó marad).

A keresztmetszetek meghatározásának módszere

Ha a meghajtást csak a tolóerő létrehozására használjuk, akkor a keresztmetszet a körre vonatkozó területszámítási összefüggéssel ($A=r^2 \cdot \pi$) kiszámítható. Integrált hajtás esetén elválasztólap kerül beépítésre, ezért mindkét felületet ki kell számolnunk.

A **4.sz. ábra** a számításhoz szükséges jelöléseket mutatja, ahol h_1 egy meglévő légcsatorna esetén könnyen lemérhető, h_2 pedig az átmérő és h_1 ismeretében kiszámítható.

Az elválasztólap alatti felületet megkapjuk, ha az AOBKA körcikk területéből kivonjuk az AOBA háromszög területét.

Az O ponthoz tartozó középponti szög:

$$\hat{O} = 2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{AB}{D} \right)$$

ahol:

AB= az elválasztólap AB élének hossza, m

D= a csatorna átmérője, m

Példa:

D=900mm

AB=748mm

$$\frac{AB}{D} = \frac{0.748}{0.9} = 0.831, \text{ amiből a szög} = 112.4^\circ$$

Az AOBKA körcikk területe:

$$A_{AOBKA} = \left(\frac{\hat{O}}{360} \right) \cdot \pi \cdot r^2$$

ahol:

r= a csatorna sugara, m

Az AOBA háromszög területe:

$$A_{AOBA} = \frac{h_2 \cdot AB}{2}$$

A fentiek alapján a példában szereplő elválasztólap alatti terület:

$$A_s = A_{AOBKA} - A_{AOBA} = 0.198 - 0.0935 = 0.1045 \text{ m}^2$$

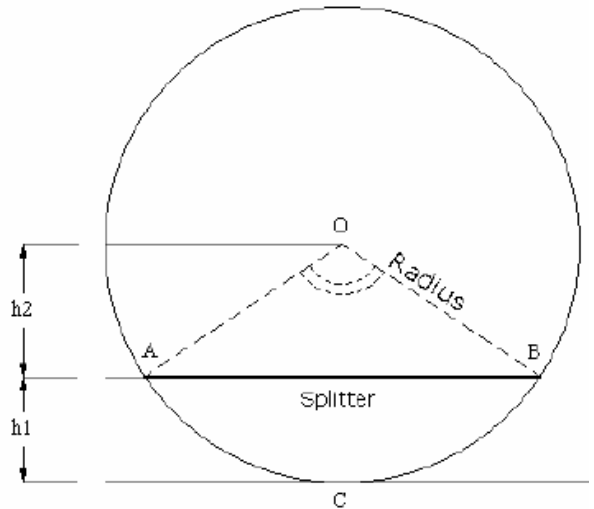
A teljes csatornafelületből levonva az elválasztólap alatti területet megkapjuk a kilépő csatornakeresztszemetet.

Ventilátorkiválasztás integrált hajtás esetén

Amikor a tolóerőt biztosító ventilátorhajtást ismertettük, megjegyeztük, hogy az alacsony áramlási veszteségek miatt, a szükséges statikus nyomásemelés értéke nagyon alacsony (általában 50Pa).

Egy kisméretű együlékes légpárnáshajónál a szükséges szoknyanyomás értéke a hajó és a terhelés tömegétől függően 300-600Pa. Integrált hajtás esetén a kiválasztott ventilátornak képesnek kell lennie ekkora értékű statikus nyomás létrehozására.

Integrált hajtások esetén számos tévhit uralkodik a nyomás és légmennyiség viszonyával kapcsolatban. Vegyünk példaként egy tolóerő kifejtésére kiválasztott 2300f/perc fordulatszámú Multi-Wing 900/6-12/5Z/PAG típusú ventilátort. Az **1.sz. ábra** alapján látható, hogy 40°-os lapátszögnél a ventilátor 20.94m³/s-os légmennyiséget biztosít. Azonban, ahogy azt korábban is megállapítottuk, a ventilátor statikus nyomása csak az 50Pa-os veszteség legyőzését teszi lehetővé.



4.sz. ábra

Példa alapján:

$$A_{AOBKA} = \left(\frac{112.4}{360} \right) \cdot \pi \cdot 0.45^2 = 0.198 \text{ m}^2$$

Példa alapján:

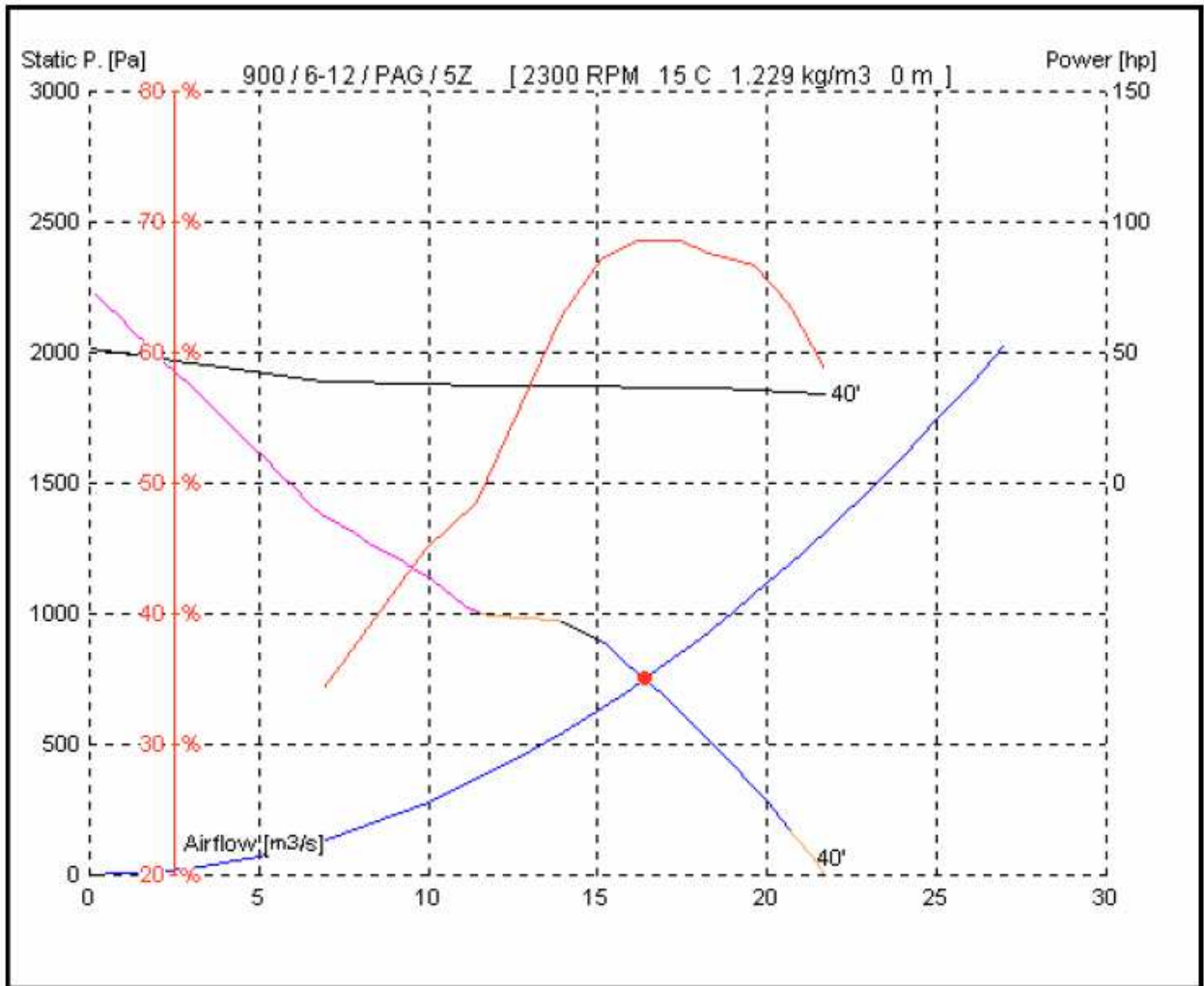
h₁=200mm

h₂=r-h₁=450-200=250mm

$$A_{AOBA} = \frac{0.25 \cdot 0.748}{2} = 0.0935 \text{ m}^2$$

Ugyanez a ventilátor beépíthető lenne egy 900mm átmérőjű légkezelő hálózat vezetékébe, ahol -a rövid légcsatorna helyett- egy hosszú légcsatornahálózat légellátását biztosítaná, ami nagyobb ellenállása miatt magasabb statikus nyomást igényel.

Az **5.sz. ábra** egy olyan beépítést mutat, ahol a rendszer ellenállása 750Pa és a ventilátor 16.6m³/s mennyiségű levegőt szállít. Ha a rendszerellenállás megváltozna, akkor a ventilátor (piros ponttal jelzett) munkapontja felfelé (nő a rendszerellenállás) vagy lefelé (csökken) mozdulna el a jelleggörbén. A rendszerellenállás megváltozhat, ha abba egy szabályozható hangtompítót építünk be. A szerkezet változó, hol nagyobb vagy kisebb ellenállása következtében változik a rendszer statikus nyomása.



5.sz. ábra

Az össznyomás (P_t) két részből, a statikus nyomásból (P_s) és a dinamikus nyomásból (P_v) adódik. A statikus nyomás az a nyomás, amellyel a levegő a csatorna falát nyomja (Légpárnáshajó esetében ez a szoknya, a föld és a rendszer minden belső felülete). A dinamikus nyomás az a nyomás, amit a rendszerben mozgó levegő fejt ki.

Ellenállás és légmennyiség

Ahogy az ellenállás (statikus nyomás) nő, a ventilátor által szállított levegő mennyiségében csökkenés figyelhető meg és fordítva. A ventilátor jelleggörbéjének alakja és mereksége határozza meg a légmennyiségváltozás mértékét. A ventilátor mindig állandó értékű össznyomást (P_t) állít elő, azonban a statikus nyomás (P_s) és a dinamikus nyomás (P_v) változik. Egy állandó átmérőjű rendszerben a dinamikus nyomás változik a légmennyiség és a sebesség megváltozásakor ($P_t = P_s + P_v$).

Az ábrán látható ventilátor 0 és 980Pa közötti nyomásérték között működik hatékonyan, 980Pa felett a hatásfok jelentősen csökken. A ventilátor legjobb hatásfoka a munkapont közelében van.

Tudjuk, hogy a ventilátorból távozó levegő a keresztmetszetben nem egyenletesen oszlik meg (lásd. 3.sz. ábra), azonban az egyszerűség kedvéért azt feltételezzük, hogy a nyomás megoszlása egyenletes.

A fenti egyszerűsítésből fakadóan az össznyomás a ventilátor teljes keresztmetszete mentén egyenletesen megoszló és állandó értékű, ezért annak bármely keresztmetszetéből elvett levegő össznyomása is az, csak az elvezetett levegő mennyisége lesz kisebb, mivel a ventilátor teljes keresztmetszetének egy kisebb nagyságú részét használjuk.

Használjuk ugyanazon a fordulatszámom az **5.sz. ábrán** bemutatott jelleggörbéjű ventilátort egy légpárnashajóban. A beépített elválasztólap feletti rövid csatornaszakasz statikus nyomásesése 50Pa körüli érték, ezért a csatornában a légsebesség és a dinamikus nyomás magas lesz ($P_v = P_t - P_s = 750 - 50 = 700\text{Pa}$).

Az elválasztólap alatti -valódi légcsatornarendszerben- a statikus nyomás egyenlő a szoknyanyomás és az össznyomásveszteség összegével. Következésképpen a statikus nyomás értéke magas, a dinamikus nyomás és a légsebesség alacsony. A szoknyanyomást az emelt súly (légpárnashajó súlya+teher) határozza meg, de az ún. gravitációs gyorsulás hatását leszámítva (a témáról bővebben lásd. „*Emelőventilátorok működése és kiválasztása*” című jegyzetet) nem változnak jelentősen a szoknya nyomásviszonyai.

Fontos megjegyezni: az elválasztólap alatti felület növelése vagy csökkentése nem befolyásolja jelentősen a szoknyanyomás értékét, hatást csak a szoknya alá jutó levegő mennyiségére gyakorol.

A rendszer össznyomásváltozása azonban nem független az elválasztólap pozíciójától. Ha a légmennyiség változik, akkor a statikus nyomás ellentétesen változik a dinamikus nyomás megváltozásával. A dinamikus nyomás nagysága -összehasonlítva a rendszer statikus nyomásával- nagyon kicsi, ezért a sebesség nagymértékű változása csak nagyon kismértékű statikus nyomásváltozást okoz. Emiatt jelenhetjük ki, hogy gyakorlatilag a szoknyanyomás változatlan értékűnek vehető.

Teljességi fok, lapátszám

A teljességi fok a lapátokkal kitöltött járókerék keresztmetszet százalékos értékét jelenti, de a kifejezés általában az alkalmazott és az összesen alkalmazható lapátszám arányára utal.

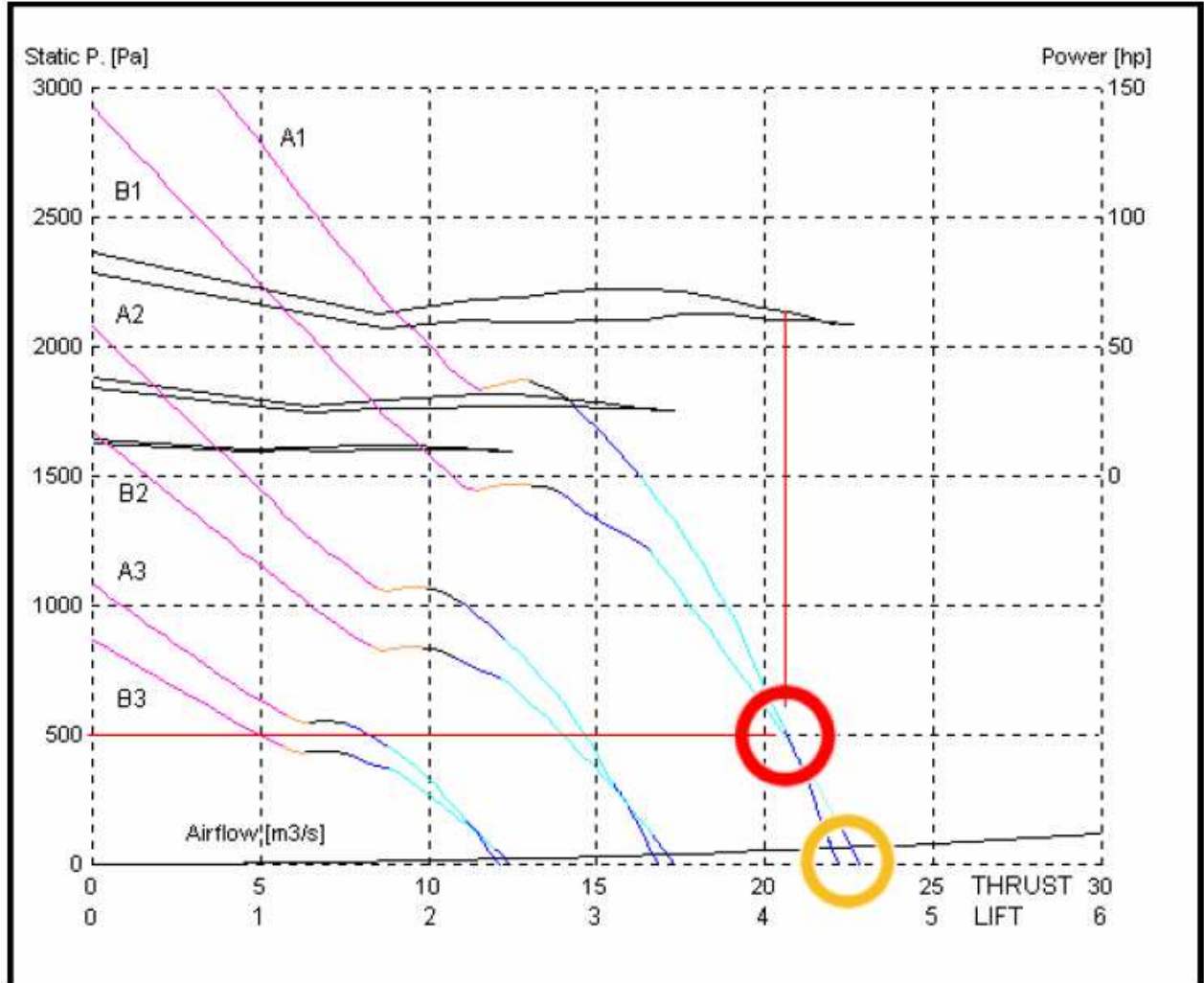
Például:

3-12=1/4-es teljességi fok

12-12= 100%-os teljességi fok

Minél nagyobb a lapátszám, annál nagyobb teljesítményigény, következésképpen egy meghatározott teljesítményérték esetén, ha növeljük a lapátok számát, akkor csökkeneni kell a lapátszöget vagy a fordulatszámot.

A **6.sz ábra** két azonos méretű, de különböző lapátszámú ventilátor, három fordulatszámértékhez tartozó jelleggörbéjét mutatja.



6.sz ábra

A1 800/9-9/4Z/37.5°/3300f/perc

B1 800/6-9/4Z/40°/3300f/perc

A2 800/9-9/4Z/37.5°/2500f/perc

B2 800/6-9/4Z/40°/2500f/perc

A3 800/9-9/4Z/37.5°/1800f/perc

B3 800/6-9/4Z/40°/1800f/perc

Példaként vegyünk egy kisméretű együlékes légpárnáshajót 500Pa-os szoknyanyomásal. 800mm átmérőjű, tisztán tolóerőt biztosító 9-9/4Z (A1) és 6-9/4Z (B1) típusú ventilátor esetén, mindkettő megközelítően 22.5m³/s légmennyiséget szállít 3300f/perc-es fordulatszámra. Az ábrából látható, hogy a 6 lapátos ventilátor némileg nagyobb légmennyiséget (és tolóerőt) biztosít, mint a 9 lapátos egység (lásd. a P_s=50Pa nyomáshoz tartozó, sárga karikával jelölt mennyiségértékeket). Ebből a pontból függőlegesen a teljesítménygörbéig elmozdulva, láthatjuk, hogy a teljesítményigény gyakorlatilag teljesen egyforma.

Ugyanezt a két ventilátort szereljük fel elválasztólappal úgy, hogy a teljes légmennyiség 20% -át emelésre, és a maradék, hozzávetőlegesen $17\text{m}^3/\text{s}$ mennyiségű levegőt, a tolóerő létrehozására használjuk fel, miközben a szükséges 500Pa-os emelőnyomást is képesek legyenek biztosítani (lásd. piros karikával jelölt értékeket). Ebből a pontból függőlegesen a teljesítménygörbéig elmozdulva (függőleges piros vonal), láthatjuk, hogy a 9 lapátos ventilátor teljesítményigénye nagyobb, mint a 6 lapátos egységé. A két szükséges teljesítményigény az ábrából leolvasható.

Kisméretű légpárnáshajónál a legnagyobb légmennyiség gyakorlati értéke valamivel kisebb, mint a fenti példában szereplő mennyiség. (lásd. „*Emelőventilátorok működése és kiválasztása*” című jegyzetet).

Ugyanennek a két ventilátornak a közepes és az üresjáratú fordulatszámú üzeméhez tartozó másik két jelleggörbét szintén a **6.sz ábra** tartalmazza. A jelleggörbék közül szembejönnek azok a lényeges különbségek, melyek befolyásolják a ventilátor kiválasztását.

A 6 lapátos, 1800f/perc-es fordulatszámú üzemelő ventilátor (B3) jelleggörbéje azt mutatja, hogy a ventilátor nem tudja a szükséges 500Pa-os emelőnyomást biztosítani. A 9 lapátos ventilátor (A3) az alacsonyabb fordulatszám ellenére előállít egy bizonyos nagyságú nyomást, és körülbelül $1.7\text{m}^3/\text{s}$ -os légmennyiséget. A ventilátor megemeli a hajót és terhét az 1800f/perc-es fordulatszámú, bár lehetséges, hogy nem tud akkora nyomást biztosítani, amivel legyőzhetőek a nyomásvesztések, ezért a hajó vonszolni fogja a szoknyáját.

A maradék két görbe, amelyek a ventilátorok közepes fordulatszámú üzemére vonatkoznak, azt mutatják, hogy ugyanakkora fordulatszámú a 6 lapátos ventilátor (B2) teljesítményigénye kisebb, mint a 9 lapátos egységé (A2), de (B2) 500Pa nyomáson kevesebb levegőt is szállít.

Következtetések és választási lehetőségek:

Ha a légpárnáshajót verseny, vagy a maximális teljesítmény elérése céljából használnánk, akkor a 6 lapátos ventilátor lenne a nyilvánvaló választás. A ventilátor nagyobb tolóerőt, és a többivel majdnem megegyező mennyiségű emelőlevegőt biztosít. Az alacsonyabb fordulatszám-tartományhoz tartozó műszaki jellemzők lényegtelenek lennének.

Ha a hajót utazási céllal, és alacsonyabb sebességre használnánk, akkor a 9 lapátos ventilátor kiválasztása tűnne jobbnak. Ez a típus már kisebb fordulatszámú is megfelelő szoknyanyomást biztosít, a közepes és üresjáratú sebesség esetén is nagyobb légmennyiséget szállít, ami alacsony sebességnél lehet hasznos az egyenetlen felületek leküzdésekor.

Kettős ventilátorhajtások

Röviden ismertetnénk a kettős, tisztán toló vagy integrált ventilátorok alkalmazását. Tisztán tolóerő előállítására beépített, két azonos teljesítményű duálventilátoros hajtás, kétszer akkora tolóerőt eredményez, mint az előző paraméterű ventilátorok közül csak az egyik beépítésével kialakított egyventilátoros rendszer. A végsebesség változatlan marad, mivel a sebesség növekedésével -az egyventilátoros hajóhoz hasonlóan- alakul a tolóerőcsökkenés mértéke. A megnövekedett súly miatt növekszik a szükséges szoknyanyomás és motorteljesítmény. Egy megegyező kilépőkeresztmetszetű egyventilátoros hajtáshoz képest, egy megfelelően tervezett duálventilátoros hajtással, vitathatatlanul elérhető egy kismértékű tolóerőnövekedés, azonban ennek ára a megnövekedett súly és a bonyolultabb szerkezeti felépítés.

Ha a duálventilátorokkal integrált hajtás valósítunk meg, akkor lényeges, hogy a kiválasztott ventilátorok a jelleggörbe hatékony tartományában működjenek. Ha a ventilátor e tartományon kívül működik, akkor az átesési pontba kerülve a teljesítmény lecsökkenhet, ami a szoknya összeesését eredményezheti. Lényegében ez azt jelenti, hogy a ventilátor sebessége lecsökken, és a ventilátor azon erőlködik, hogy létrehozza a szükséges nyomást (az A3 és B3 jelleggörbék éppen azt mutatják, amikor ez a jelenség elkezd kialakulni). Eltekintve attól, hogy a ventilátorok milyen körülmények között illesztettek a rendszerhez, különbség alakulhat ki a ventilátorok nyomásemelése között, ami a szállított légmennyiségek különbségét okozhatja. Ezt a helyzetet súlyosbíthatja az elválasztólapon kialakuló turbulens légáramlás. Bár a levegő egy közös túlnyomásos szoknyateret táplál, a valós működés során gyakran előfordul, hogy a ventilátorok levegőjének többsége a hajó egyik részébe jut (ez főleg az egymással szembeforgó ventilátorokra jellemző). Ahogy a térfogatáram bizonytalanná válik, a fenti helyzet megváltozhat úgy, hogy az egyoldalra kerülő légmennyiség hirtelen lecsökken.

A ventilátor illesztése a motorhoz

Ha megnézzük egy ventilátor teljesítmény-felhasználásának görbáját, akkor a **7.sz. ábra** szerinti jelleggörbét kapjuk. Az ábrán egy Kawasaki KR1 típusú motorkerékpár motor és egy Multi-Wing 900/6-12/5Z típusú ventilátor jelleggörbéje látható.

Az axiálventilátor teljesítményigénye a fordulatszám-változás köbével változik az alábbi összefüggés szerint:

$$\text{Teljesítmény (P)} \quad P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3$$

ahol:

P_1 = n_1 fordulatszámhoz tartozó teljesítményigény, kW

n_1 = az eredeti fordulatszám, f/perc

n_2 = az új fordulatszám, f/perc

P_2 = az új fordulatszámhoz tartozó teljesítményigény, kW

Példa:

az ábra alapján

$P_1 = 11 \text{ LE} = 8.2 \text{ kW}$

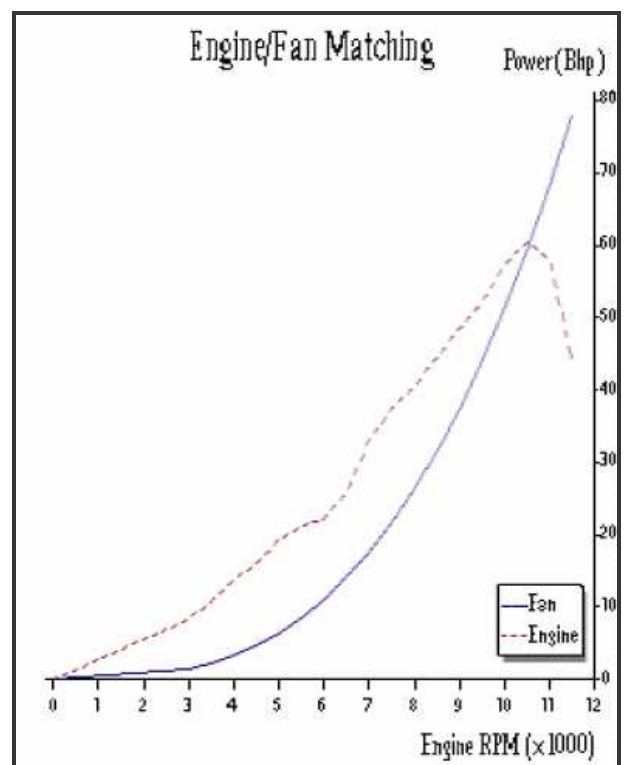
$n_1 = 6000 \text{ f/perc}$

$n_2 = 9000 \text{ f/perc}$

$$P_2 = 8.2 \cdot \left(\frac{9000}{6000} \right)^3 = 27.675 \text{ kW} = 37.12 \text{ LE}$$

A csúcsos (szaggatott piros vonallal jelölt) görbe, az adott ventilátortípushoz megfelelően illesztett modern kétütemű motor jelleggörbéje. Az ábrából kitűnik, hogy egészen a jelleggörbe csúcsáig -ahol az metszi a ventilátor (kék vonallal jelölt) görbét- a motor, közel állandó értékű teljesítménytöbbletet biztosít.

A metszéspontban a ventilátor felhasználja a teljes motorteljesítményt, így nincsen további teljesítmény, ami magasabb ventilátorfordulatszámot tenne lehetővé.



Egyes régebbi kétütemű motorok teljesítménye közepes fordulatszám tartományban némileg lecsökken, ami a jelleggörbében egy kisméretű bemélyedésként jelentkezik, azonban ez a csökkenés nem túl jelentős ahhoz, hogy ezzel a ventilátorral problémát okozzon. Ha egy ilyen pontban, a ventilátor jelleggörbéje metszené a motor jelleggörbéjét, akkor a ventilátor fordulatszám-növekedése az adott fordulatszámon megtorpanna, és nem érné el a maximális fordulatszámot.

A példában szereplő motor és ventilátor összeállítás hajtási áttétele 3.75:1. Ha a motornak laposabb jelleggörbéje van (négyütemű motor), akkor az áttételt úgy kell megválasztani, hogy a két görbe megfelelően illeszkedjen. Ha kívánatos az, hogy a motor ne pörögjön túl, akkor a ventilátor jelleggörbéjének a motor maximális fordulatszámú pontján kell átmennie.

Ez lényeges lehet egy versenylégpárnás esetén, ahol a ventilátort a legnagyobb teljesítményen kívánjuk használni, míg egy kisméretű utazóhajónál a motor a legnagyobb teljesítménye 60-80%-án üzemel.

Hasznos összefüggések

$$\text{Kerületi sebesség (} V_t \text{)} \quad V_t = \frac{d \cdot \pi \cdot n}{60} \text{ (m/s)}$$

ahol:

d= a ventilátor külső átmérője, m

n= a ventilátor fordulatszáma, f/perc

$$\text{Tengelyirányú tolóerő (} F \text{)} \quad F = \frac{4 \cdot \rho \cdot q^2}{d^2 \cdot \pi} = p_s \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \text{ (N)}$$

ahol:

d= a ventilátor külső átmérője, m

ρ = a levegő sűrűsége, kg/m³

q= a légmennyiség, m³/s

p_s = a statikus nyomás, Pa

$$\text{Hatásfok (} \eta \text{)} \quad \eta = \frac{p_t \cdot q}{P}$$

ahol:

p_t = az össznyomás, Pa

P= a teljesítmény, W

Az elválasztólap alatti terület nagysága (A)

$$A = R^2 \cdot \tan^{-1} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{R}{h_2}\right)^2 - 1} \right] - h_2 \cdot \sqrt{R^2 - h_2^2} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$\text{Ha } h_2=R, \text{ akkor } A=0, \text{ és ha } h_2 \rightarrow 0, \text{ akkor } A = \frac{R^2 \cdot \pi}{2}$$

ahol:

R= a ventilátor sugara, m

h_2 = a középpont és az elválasztólap vízszintes oldalának távolsága, m