Az 1997-es évektől kezdve a szénkefe nélkül működő motorokkal egy forradalmi változásnak lehetünk tanúi az elektromos motorokkal meghajtott modellező kategóriákban. A hagyományos, szénkefés motorokkal szembeni generációs váltás most történik, mert az új motorok segítségével a régóta stagnáló, vagy fejlődési ívében csökkenő eredmények új lendületet kaptak. Mivel a képzeletbeli rajtpisztoly már eldördült, itt az ideje annak, hogy még az elején értesüljünk a technikának ennek az újdonságáról.

Ludwig Retzbach

SZÉNKEFE NÉLKÜL

ELEKTROMOS KOMMUTÁLÁSÚ MOTOROK

Fordította: Sosztarich András (elektro *MODELL* 3/96)
Szaklektorálás: Kukorelli Károly

kommutáció:	áramirányváltozás a kommutátoros elektromos gépek forgórész-tekercselésében.
kommutátor:	egyenáramú motorokban a forgórész pólusváltoztatását biztosító berendezés.
kollektor:	ua. mint a kommutátor

Dr. Manfred Schwind már 1987-ben az akkori nyugat-Németországban nagyon szemléltetően bemutatta, hogyan működnek az elektromos kommutálású motorok. Egy sajátkészítésű, külső forgású motorja forgott a kézzel tekercselt tekercsmagja körül és eközben még egy óriási légcsavart is képes volt meghajtani.

Figyelemreméltó, hogy ez az egész dolog már akkoriban is 80%-os hatásfok felett történt.

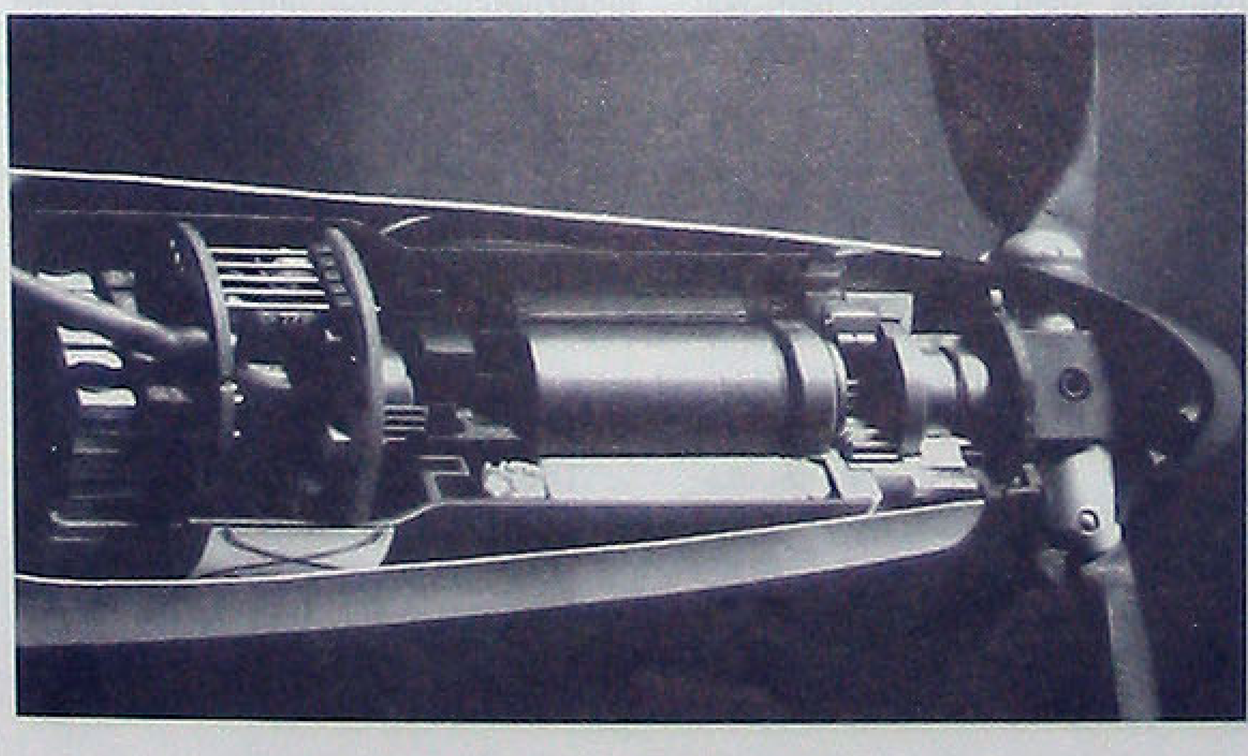
Az eredményesen lefolytatott kísérleteket a szinte „tömegsírnyi" mennyiségű bipoláris tranzisztor (60 db. BD 435) is befolyásolta - mely döntően oka volt annak, hogy annak idején a kissé előresiető fejlesztőnek nem sikerült gyártót találnia a teljesítményét igazoló, és már messzemenőn kiérlelt motorjához.

Ez a kísérlet akkor két dolgot is előrevetített:

1. Az elektronikus úton kommutált motoré a jövő.
2. A sorozatban való előállítást a teljesítményelektronika fejlődése határozza meg.

A magányos harcostól a szériahősökig

Az AVEOX ma már – majdnem 10 évvel az előzmények után – szériában kapható, s gazdag változatban érkezik az USA-ból. Rövidesen a ROVOX is jön, ami az előbbi továbbfejlesztése (a Robbe cég forgalmazásában). Ettől függetlenül különböző kis gyártók is szorgalmasan dolgoznak a „szénkefétlen" típusú motorjaikon.



Így már néhány pylon-repülős és hajómodellező vígan vágtázik az elektronikusan kommutált Lehner-motorral meghajtott modelljével. Ezekről elmondható, hogy a súlyuk alig fele, mint a hasonló teljesítményű szokványos motoroké.

Amint hallottuk, a bajor motorvarázslónak ismét sikerült a konkurencia részére egy kis rejtvényt felállítania: a motorjainak kommutációja ma már szenzor nélkül történik. Így ezeknél a motoroknál mindenféle időzítő szabályozás feleslegessé vált.

Stuttgartban a Köhler testvérek a NEWTOR motorjuk szériagyártásának megkezdése előtt állnak. Ez egy külsőfutású típus, amelynél a motorköpeny az álló tekercselés körül forog.

Ez a motor már több délnémetországi versenyen bebizonyította képességét, mint egy vontatógép erőteljes meghajtóműve.

Nagyon érdekes és sokat ígérő Edwin Bloch (MEB Antriebtechnik) koncepciója, amelynek alapján készítik a kis sorozatú elektronikusan kommutált motorokat. A MEB-Brusshless ugyanis kétségtelenül a harangankeres motorok mintájára készült, de azoktól eltérően nála a hengerformájúra tekercselt drótmenetek öntőgyanta segítségével szilárdan be vannak ágyazva az acél motorházba. Az ilyen megoldású motorok semmiféle mágneses visszatartó erőt nem mutatnak és a legnagyobb fordulatszám elérésére alkalmasak. Ezeket ezért előszeretettel alkalmazzák a nagy csökkentő áttételű bolygó-meghajtással.

A motorgyártók támogatást kapnak elektronikai specialistáktól. Ők már a mikroprocesszor-technika és a teljesítményelektronika keverékével a szokványos elektromotorokat is továbbfejlesztették, ami által utat mutattak az elektromos meghajtású repülésnek.

Beszélhetünk a KONTRONIK cégről is, amely már régóta gyárt szabályozót az AVEOX-motorokhoz. Az 1996-os Dortmundi Vásáron az ehhez illő KONTRONIK motorok szériáját is bemutatták. Ezek alkalmazhatóságuk-

ban univerzálisak és 6-tól 32 cellás területen lévő felhasználást fednek át.

Mi válik jobbá?

Mondjuk ki őszintén: a legnagyobb akadályát az elektronikusan kommutált motorok továbbfejlesztésének még mindig a szokványos, szénkefés elektromotorok jelentik.

S ez az őslény, a csúszó-érintkezők időszakának maradványa az évtizedek során elérte, hogy rendszerének hátrányai ellenére olyan jó volt, hogy a fizika már csak nagyon kevés lehetőséget biztosított a további javulására. Így pl. a távol-keleti nagyszériás gyártmányok manapság elérik a 70-80%-os hatásfokot. Ezért forradalmi újításokra ezeknek túl sok lehetőségük már nincs. És ha visszatekintünk, ne felejtkezzünk meg az elektromos repülés már eddig megtörtént jelentős fejlődéséről, s hogy éppen a számtalan kis lépés vezetett odáig, ahol most állunk.

Hol van tehát az előnye, s így fejlődési potenciálja az új „szénkefétlen" motoroknak?

A válasz erre az, hogy a kollektor nélküli motoroknak oly csekély a kopása, hogy erről az előnyös tulajdonságáról nem lehet lemondani. Egy olyan alkatrész szűnik meg, mely eddig láthatóan szikrázott, ami miatt éppen az új, modern „tuningszénkefék" nem tagadhatták anyagi rokonságukat a szénnel, mint tüzelőanyaggal.

Továbbiakban éppen ez az áramátadási hely terhelt a jelentős elektromos veszteségekkel, mivel a szénanyag – még ha rézzel vagy akár ezüsttel is van gazdagítva – egy meglehetősen gyalázatos áramvezető. És az érintkezés milyensége az a kommutátor vörösréz lapocskáihoz, ami még egy pótlólagos veszteséget képez. Itt eddig nagy szénkefe-keresztmetszetekkel, nagy kommutátor átmérővel és erőteljes hozzányomó erővel találkoztunk. Ennek ellenére az ördögöt nemritkán Belzebubbal űzték ki, mivel egyidejűleg megnőttek a mechanikus veszteségek is, lévén a kommutátorra ezekkel az eszközökkel egy állandóan ható „dobféket" szereltek.

Ez is az egyik oka annak, hogy a versenymotorok teljesítőképességeiket csak különlegesen nagy terhelésnél (vagyis magas áramerősségnél) adják le, ami jelentősen beszűkíti az alkalmazási területüket. Így pl. ha egy 10 cellás hagyományosan kommutált versenymotort később egyszer civil árammal vagy nagyobb feszültséggel, áttételes hajtóművel szeretnénk alkalmazni, akkor ez főleg fékként fog működni, amely a hatásfokot leszorítja a pincébe.

Az elektronikusan kommutált motor ezzel szemben biztosan nagyobb alkalmazási területet tud nyújtani.

Ha egy szokványos elektromotor kommutátorát nézzük, akkor nem kerülheti el figyelmünket az ott lefolyó tűzijáték, ami gyakorlatilag a közvetlen környezetének az elektromágneses „szennyezése". Ez pedig a távirányító berendezés hatósugarát képes beszűkíteni. Az új motorokkal ezen a téren is várható jelentős gyakorlati javulás.

Igazán döntő hátránya a régi elektromotoroknak abban van, hogy a tekercselt ankernak kellett forognia. Emiatt nemcsak elektromos és mágneses szempontból kellett optimálisnak lennie, hanem még meg kellett felelnie a rá váró fordulatszámnak is. Az ilyen motorok építésének a művészete többek között abból állt, hogy a rendelkezésre álló tekercsteret a lehetőség szerint legjobban ki kellett tölteni a szigetelt, vörösréz drótmenetekkel. A fizikai realitások miatt ez persze nem volt teljesen megoldható. Bár a tekercsek műgyantával való kiöntése (a homogenitás érdekében) és a kész anker dinamikus kiegyensúlyozása sokat javított és jóvá tett, de ezek az együttes megoldások akkor sem voltak optimálisnak nevezhetőek.

Még nehezebbek a viszonyok a kommutátornál, ami az üzemelés jellegénél fogva állandóan növekvő kopásnak van kitéve. Így pl. egy „bejáratott" kollektor a legnagyobb fordulatszámnál mint egy autó lökésgátlója vizsgázik a 200-as tempó mellett, ahol állandóan attól lehet tartani, hogy megszűnik a talajjal való érintkezés. Ennélfogva az ilyen felépítésű elektromotoroknál egy nem pontosan definiálható, a kollektor állapotától függő, relatíve alacsony fordulatszámhatárral kell megelégednünk.

Az új motorgenerációnál minden sokkal egyszerűbb. Itt egy megközelítőleg homogén henger forog, a kommutálásról 3 szilárdan rögzített Hall-elem gondoskodik, amelyek az elektronikának „megmondják" hogy a mágneses pólusok éppen hol tartózkodnak. Így mindegy, hogy ezek a motorok belső vagy külső futásúak. A mindenkori forgórész kerek és kerek is marad.

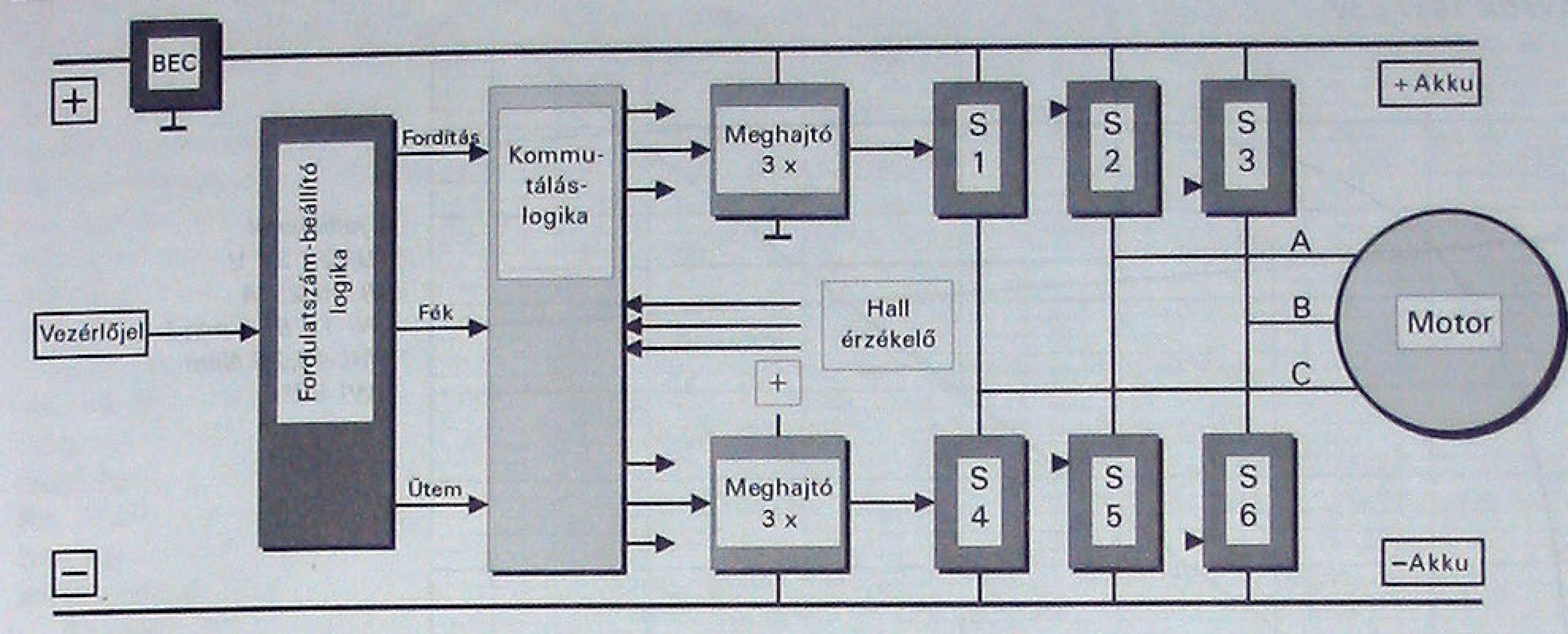
Ezáltal már ki is derült az új motortechnológia tulajdonképpeni előnye. Ez magában foglalja a magas fordulatszámok területét, ami végső hatásában annyit jelent, hogy a szénkefétlen motorok azonos teljesítmény mellett kisebbre és könnyebbre készíthetőek. E téren azonban azt is meg kell említeni, hogy ez azért legtöbbször nem megy áttétel nélkül.

További előny jelentkezik a belső futású motorok külső tekercselhelyezésében. Ez a keletkezett hőt a környezetbe közvetlenül képes elvezetni a motorköpenyen keresztül. Ezért az ilyen motorok már rövid üzemelés után már relatíve forróak lesznek, ami azonban tárgyilagosan nézve rendben lévő. A hiányzó tömeg következtében gyengébb a hőleadó képessége, ezért a keletkezett hőt valamilyen módon el kell vezetni róla.

Egy érdekes ráadást jelent még az elektronikusan kommutált egyenáramú motorok irányváltoztató képessége, amelyet nem szabad említés nélkül hagyni. Hajó és járműmodelleknél ezt a tulajdonságot igencsak értékelik, s talán az elektronikus vitorlázóknál a már rég elfelejtett jó öreg hatásirányváltozás reneszánszát is megérhetjük.

Mit jelent itt a szabályozó?

Tévedés lenne azt gondolni, hogy a szénkefe nélküli motoroknak nincsenek negatív tulajdonságaik. Ugyanis forgásának szabályozásához egy komplikált vezérlési elektronikát igényel. Ennek a nem egészen helyesen



1. ábra Egységek kapcsolási képe és működési sémája.

„szabályozónak" nevezett elektronikának egyidejűleg több feladatot kell ellátnia, így ebben benne van természetesen a fordulatszám szabályozása is.

A „szabályozó" vagyis ezután megfelelően nevezve a teljesítménykapcsoló eredendő feladata abból áll, hogy az áramot a megfelelő időpontban a megfelelő irányban a megfelelő motortekercsen át áramoltassa úgy, hogy a rotor folyamatosan a helyes forgási irányban forogjon. Ennek nagy sebességgel, abszolút fázispontosan kell lezajlania. S mivel az elektromosan kommutált motorok szokás szerint négypólusúak, akkor minden megtett fordulathoz két teljes kapcsolási ciklus szükséges.

Szerencsére mindkét kapcsolási folyamat ugyanazokkal a FET-ekkel végezhetőek el úgy, hogy itt egy valódi szinergia effektusról lehet beszélni. És bár ezek a félvezetők „egyszemélyben" a fékezésért (EMK) és a szabadonfutásért is felelősek, a teljesítmény-FET-ekből ma még egy egész csomóra van szükség.

A kapcsolási játék

Az 1.ábra bemutatja a teljesítménykapcsoló egyes funkció-blokkjainak alapvető összedolgozását a motorral. A vevőcsatlakozásnál látható, hogy a kis telepfeszültséget itt is el tudja látni egy BEC. A vevőcsatorna impulzusát a fordulatszám-beállító logika dolgozza fel. Ez három különböző információt kap:

ÜTEMVISZONY... ami a tulajdonképpeni fordulatszám információ. Ez a stoptól a teljes gázig terjed.

FÉK... ami az EMK fék aktivizálása.

REVERS... ami a forgási irány változása.

A teljesítménykapcsoló agya a kommutáláslogikai egységben van. Ez értékeli a fordulatszám-beállító logikát és a 3 Hall-szenzor jeleit és kapcsolási parancsokat ad az összesen hat meghajtólépcsőnek, amelyek viszont S1-től S6-ig a POWER-FET-eket látják el irányító feszültséggel. Mivel csak N-csatornájú tranzisztorokból épül a kapcsolás, a három felső meghajtónak, a mindenkori KAPU-nak (GATE) még elő kell állítaniuk a vezérlőfeszültséget is.

A motortekercsek áramellátását az S1-S6 kapcsolók vezérlik. Itt az S1/S4; S2/S5; valamint az S3/S6 elemek úgynevezett mindenkori fél-hidakat képeznek. A kommutációs logikának természetesen biztosítani kell, hogy az egy félhídhoz tartozó két kapcsoló sohase legyen bezárva, mert másképpen óriási szikrázás lenne.

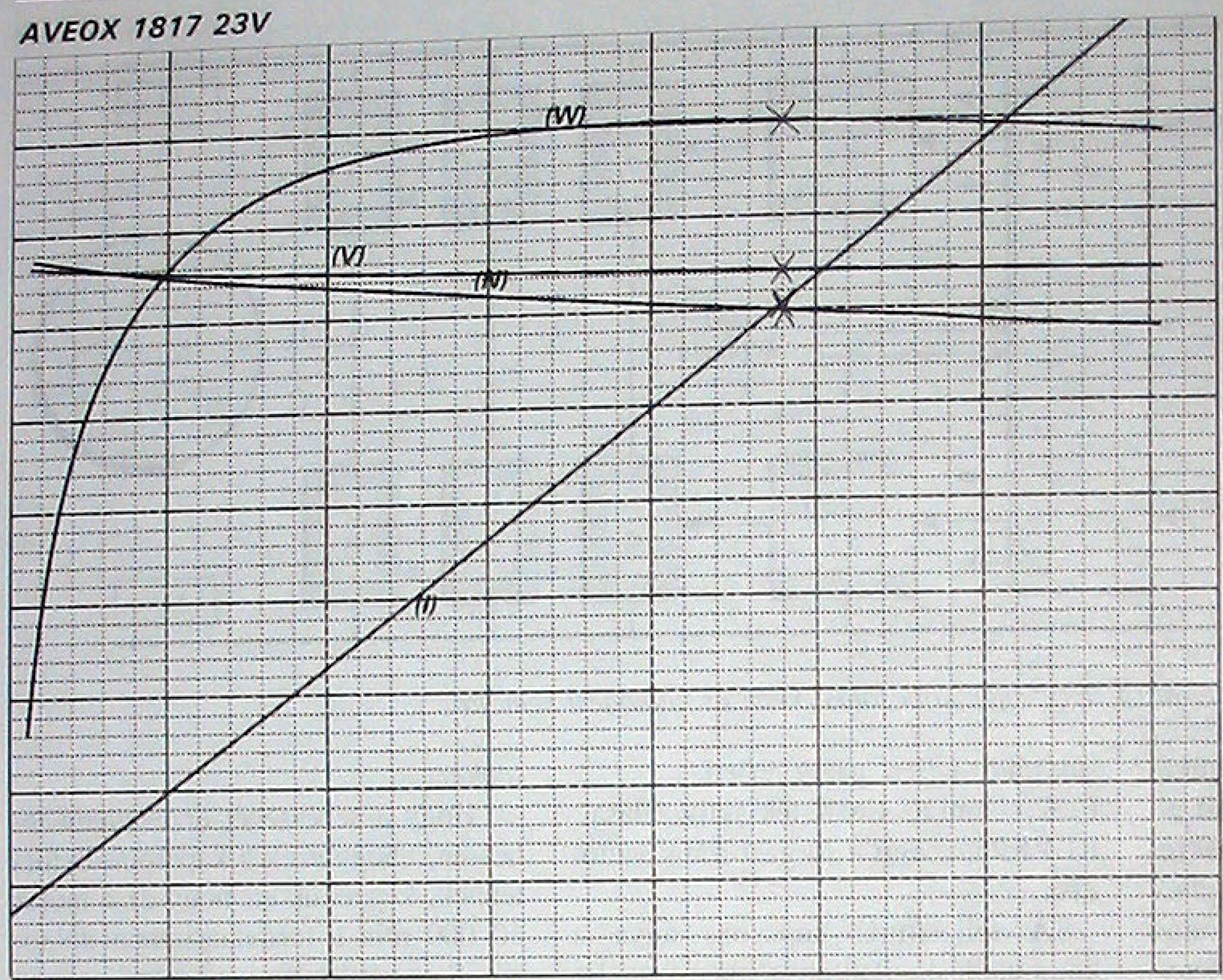
Ezzel szemben lehetséges minden más kapcsolási kombináció. Ez azt eredményezi - mivel a három kapcsoló mindegyike két szembelévővel kombinálható-, hogy hat különböző lehetőség lehet, ami végül annyit tesz, hogy az áram a motortekercsben hat különböző, mindenkor egymáshoz képest 60 fokkal elforgatott mágneses mezőt képes létesíteni.

Ha ezek a mezők ciklikusan követik egymást, akkor beszélünk forgómezőről. S ahogy már kiderült, a négypólusú motornál egy ilyen kapcsolási ciklus kétszer történik fordulatonként.

Hogy a sebességet érzékeltetni lehessen, ahogy ezek a kapcsolások történnek, képzeljük el, hogy ez a motor 60 000 min-1 fordulatszámon dolgozik. S ez egyáltalán nem mértéktelenül nagy érték ennél a motornál. Tehát ezen idő alatt az elektronika képes elvégezni 120 000 teljes kapcsolási ciklust, azaz másodpercenként 2000-et. Ez a kapcsolási frekvencia azután a Rész-gáznál még növekszik a fordulatszámbeállító munkafrekvenciájával. Ez az érték az eredeti AVEOX-nál 8 kHz, a KONTRONIK-nál pedig már 12 kHz-t ért el. Tehát az ilyenféle teljesítménykapcsoló belsejében nincs túlságosan nagy nyugalom.

És éppen itt van ennek az új motorgenerációnak egy másik sebezhető pontja. Ugyanis nem lehet egyszerűen az asztal alá söpörni a rengeteg kapcsolásokból adódó veszteségeket. Az ilyen erejű áramnak a villámgyors be- és kikapcsolása mindig veszteséggel jár. További veszteség keletkezik a modern POWER-FET-eken is, amelyeken darabonként 10 mOhm nagyságrendű az ellenállás bekapcsolásonként. A hagyományos szabályozóknál ezt a fogyatékosságot több FET párhuzamos kapcsolásával könnyen ki lehetett iktatni. Ott öt párhuzamos FET-nél az átmeneti ellenállás 2 mOhm-ra esett vissza, ami 50 A esetében összesen 0,1V feszültségveszteséget „eredményezett".

A szénkefétlen szabályozónál- mivel hat kapcsolót kell figyelembe venni-, hatszoros mennyiségű FET-et kell



A jelölésnél
(U) 22,27 V
(I) 35,29 A
(N) 13 964 min^{-1}
(M) 48,26 Ncm
(W) 90%

2. ábra
AWEOX 1813 görbéje 23 V-nál. Megfigyelhető a nagyon széles hatásfok-maximum.

U, I, N, W → M	Feszültség (U) 3 V/osztás Fordulatszám (N) 2000 min^{-1}/osztás Hatásfok (W) 10%/osztás	Áram (I) 5 A/osztás Nyomaték (M) 10,00 Ncm/osztás

alkalmazni. Az ilyen viszonyok pedig a kicsinyes, kereskedői gondolkozással kevésbé áthatott technikusokat is kompromisszumokra kényszerítik.

Tizenkettő FET, vagyis kapcsolásonként kettő van ma az elfogadhatóság határán. Tetézi ezt, hogy az áramnak minden alkalommal két kapcsolón kell átfutnia.

Így ennél a példánál maradva az ellenállás FET-páronként 5 mOhm, amely érték kétszereződik a fent említett soros kapcsolás miatt. Így 50 A tekercsáram esetén 0,5 V-t esik a kapocsfeszültségből (50 x 0,01), dacára annak, hogy ez a az egység több mint dupla FET-et tartalmaz, mint a példabeli hagyományos szabályozó. Kevésbé vigasztaló az, hogy a szokványos szabályozónál szokásos üresjárati dióda szerepét egy más FET-híd képes kevesebb veszteséggel átvenni, s az EMK-fékhez itt elegendő az összes a FET egyidejű bekapcsolása.

Ebből látható, hogy az elektromosan kommutált modellmotor még messze nem érte el a fejlesztési lehetőségének a végét. De reményt jelent az előrelépéshez, hogy TO-220-as tokozásban olyan új POWER-FET-ek vannak a piacon, amelyek 4 V Kapu-feszültséggel 6 m maradék ellenállást mutatnak fel. (1996 márciusi adat!)

Nem kérdéses, hogy itt van a kulcsa a 90%-nál nagyobb hatásfokú modellmotornak, amely – s itt van az igazi előrelépés – a 400-as méretben is megvalósítható!

Mire van lehetőség már ma?

A FAI-AVEOX motor (Typ 1817) görbéi, amelyeket a mérési eredmények kedvezőbbé formálásával

És így működik...

A belsőfutásos kefe nélküli motornál a kívülfekvő tekercselés képezi e gerjesztést. Hogy a motor minden helyzetben önállóan el tudjon indulni, az elektronikusan kommutált motornál is legalább 3 tekercs szükséges. Ennek belsejében forog a rotor, ami szokványos esetben egy négypólusú mágnes.

A tekercsek kivezető szálai az elektronikus kapcsolókhoz vezetnek, amelyek az áram irányát mindenkor úgy kapcsolják át, hogy a keletkező elektromágneses tér az ankert mindig tovább löki. A beépített 3 Hall-szenzornak az a feladata, hogy jelezzék az elektronikának a mágneses sarkok mindenkori helyzetét. Ezek jelet szállítanak ahhoz, hogy a kommutálás megfelelő időpontban történjen. Az is lehetséges, hogy a kommutációs információt közvetlenül a tekercsek indukciós feszültségéből lehessen megszerezni. (Lehner-motor) Ezzel még egységesebb a motor.

A külsőfutású motor felépítése olyan, mint egy harangé. Ez a harangtest forog a beépített mágneseivel. A gerjesztést azok a tekercsek végzik, amelyek mint egy szokásos anker, a harangtesten belül helyezkednek el. Ez a megoldás abban különbözik a belsőfutásútól, hogy itt csak kisebb fordulatszámot lehet elérni.

A külsőfutású motor elvitathatatlan előnye a nagy forgatónyomaték, ami attól is függ, hogy mekkora a távolság (emelőkar) a mágnesek és a forgástengely között. Ezek a motorok előnyösen csak a direkt meghajtáshoz alkalmazhatóak. Még versenyzik egymással a két építési elv.

nem gyanúsítható pályázó társ mért ki (Lehner), már nagyon meggyőzőnek tűnnek. (2.ábra) Határozottan felismerhetőek az elektronikusan kommutált motorok extrémen széles alkalmazási határai. A motor már 15 A áramerősségtől számítva 85% hatásfokkal működik, s ezt az értéket 50 A-nél még nem veszti el.

Egy újítás döntő megítélését azonban mindig a gyakorlat adja még. Ezért egy EXTRA 300-as repülőgépmodellnél az eddig alkalmazott ULTRA 2000/5 hagyományos motor helyett egy AVEOX-1412/4Y-t (Robbe jelölés) alkalmaztunk.

Az azonos feladat teljesítéséhez az ULTRA 2000/5 motor 640 grammos súlyával szemben az AVEOX mindössze 290 gr. volt. Bár ehhez még hozzáadódik a teljesítménykapcsoló +40 grammos többletsúlya, de még ez sem befolyásolja károsan ezt a kiegyenlítetlen súlyviszonyt.

Érdekes módon a két külsőleg eltérő motor között annyi hasonlóság van, hogy cseréjük lényeges változtatás nélkül történhet. Mindkettő 30 db. 1700 mA celláról „tankolható", és egy 2:1 SYNCHRO-GEAR 2500 csökkentő áttétellel egy nagy APC légcsavart lehet meghajtani.

Ezt a motorcsere következtében csak kis mértékben 14"x12"-ról 13,5"x10"-ra kellett csökkenteni. A modellen az elért súlymegtakarítás 7% az eredetileg 4600 grammos műrepülő modellnél. A startteljesítmény változatlanul megközelítőleg 1,2kW.

A 180 cm-es fesztávú nagyméretű modellben elképesztően kicsinek tűnt az AVEOX motor. Kérdéses volt, hogyan fog viselkedni az igazi nyúzópróbán a levegőben?

Az idős műrepülőgép, ami az eltelt évek alatt jó néhány gramm műgyantával nehezebb lett, egyszerűen megfiatalodott. Jobb emelkedést, nagyobb loopingokat, hosszú, felhúzott bukófordulókat produkált. A második startban az óvatos elsővel ellentétben a pilóta mindent kipróbált. Ezalatt sem volt füst, teljesítmény-visszaesés, vagy egyéb hiba. Az akku 5 perc alatt merült ki.

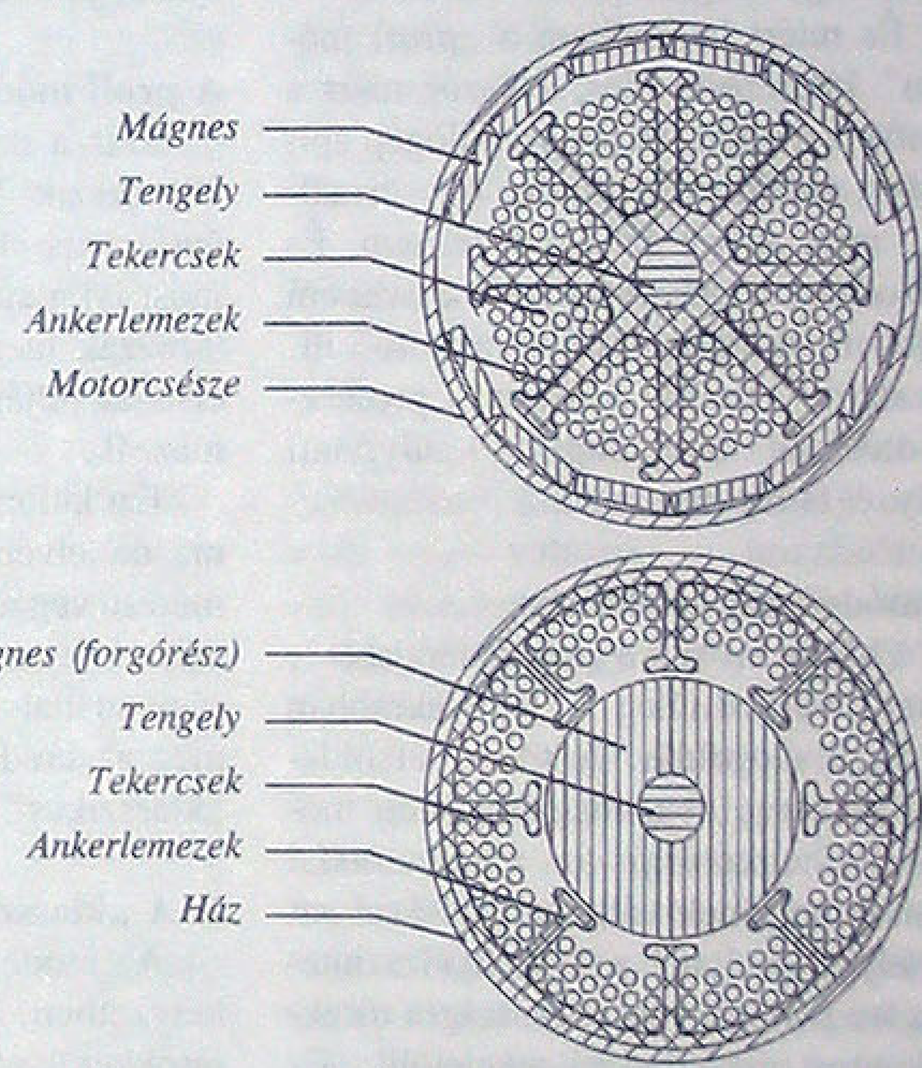
Leszállás után a motorra ragasztott hőmérsékletet mérő csík szerint a motortest legalább 140 C-ra melegedett, s vele izzott a teljesítménykapcsoló is.

Az elektronikusan kommutált motorok előnyeinek és hátrányainak áttekintése

+ kisebb építési forma, kisebb tömeg
+ 90% feletti hatásfok
+ a kollektoron nincs szikraképződés és ezért zavarás sem
+ nincs kopás a szeneken és a kollektoron
+ kb.100.000 f/min elérhető
+ széles alkalmazási terület
+ nincs szükség bejáratásra
+ a forgási irányváltoztatás elektromosan lehetséges

- speciális teljesítménykapcsoló szükséges
- még kifejlesztés alatt áll a teljesítménykapcsoló elektronikája
- a teljesítménylehetőségek csak áttétellel használhatóak ki jól (belső futású motor)
- még nincs áttekinthető kínálat
- az egész rendszernek magas az ára

3.ábra Szénkefés motor keresztmetszete



4.ábra Szénkefe nélküli motor keresztmetszete

Ilyen terhelésnél természetesen mindkettőt megfelelően hűteni kell.

A KONTRONIK cég azt is beismeri, hogy a kapcsoló egyidejűleg még nem alkalmas 100 %-ban a „Részgázra".

Végkövetkeztetés

Az elektromos modellmotorok terén valóban elkezdődött egy generációs váltás. De a motor-oldalról az előnyök csak akkor érvényesülhetnek, ha majd a FET-ek bekapcsolási ellenállása megfeleződik. A jelenleg a kereskedelemben kapható belső futású motor, ha a teljesítőképességüket valóban ki kívánjuk használni, ehhez elengedhetetlen az áttételes hajtómű.

A távol-keleti nagy szériában előállított motorok piacbeli pozíciója még sokáig nem lesz veszélyeztetve.

Ezekkel szemben a szénkefétlen motorok még sokáig nem lesznek versenyképesek az áruk miatt. Még akkor sem, ha – mint várható – az árak nemsokára erősen csökkennek.