Analiza značajki suvremenih izvora električne energije na zrakoplovu

Kirin, Tino

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:293039

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Tino Kirin

ANALIZA ZNAČAJKI SUVREMENIH IZVORA ELEKTRIČNE ENERGIJE NA ZRAKOPLOVU

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 20. travnja 2016.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Zrakoplovni elektrosustavi**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 3678

Pristupnik: **Tino Kirin (0135227564)**
Studij: Aeronautika
Smjer: Pilot
Usmjerenje: Civilni pilot

Zadatak: **Analiza značajki suvremenih izvora električne energije na zrakoplovu**

Opis zadatka:

Analizirati tehničko-eksploatacijske značajke tradicionalnih izvora električne energije na zrakoplovima. Navesti i opisati nove koncepcije zrakoplovnih generatora i identificirati tehnološka poboljšanja u odnosu na prijašnje izvedbe. Dati pregled suvremenih kemijskih izvora električne energije i procijeniti mogućnosti njihove primjene u zrakoplovstvu.

Zadatak uručen pristupniku: 4. ožujka 2016.

Mentor:

prof. dr. sc. Tino Bucak

Predsjednik povjerenstva za završni ispit:

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

ANALIZA ZNAČAJKI SUVREMENIH IZVORA ELEKTRIČNE ENERGIJE NA ZRAKOPLOVU

ANALYSIS OF CONTEMPORARY ELECTRICAL ENERGY SOURCES ON AIRCRAFT

Mentor: prof. dr. sc. Tino Bucak

Student: Tino Kirin, 0135227564

Zagreb, rujan 2016.

ANALIZA ZNAČAJKI SUVREMENIH IZVORA ELEKTRIČNE ENERGIJE NA ZRAKOPLOVU

SAŽETAK

U ovom radu analizirani su tradicionalni i suvremeni izvori električne energije na zrakoplovu. Rad sadrži šest poglavlja te popis literature, slika i kazalo oznaka i kratica.

U uvodnom poglavlju opisani su razvojni pravci prema suvremenim izvorima električne energije.

U drugom poglavlju završnog rada opisani su kemijski izvori električne energije. Analiza je podijeljena u dva dijela koji se odnose na primarne izvore (galvanski članci) i sekundarne izvore (akumulatore), koji su podijeljeni na vrste akumulatora: olovni, nikal-kadmij, nikal-željezo, srebro-cink, te potpoglavlja: kapacitet i smještaj akumulatora.

U trećem poglavlju analizirani su zrakoplovni generatori, a analiza je podijeljena na dva dijela koji se odnose na generatore istosmjerne struje i generatore izmjenične struje. U prvom potpoglavlju je opisana podjela DC generatora i njihovi regulacijski sklopovi, a u drugom potpoglavlju su opisana dva generatora: generator stabilne frekvencije i sinkroni beskontaktni AC generator.

U četvrtom poglavlju navedeni su i kratko opisani izvori električne energije u nuždi, kao što su: APU, EPU/GPU, RAT/ADG, EPU i hidraulička pumpa.

Peto poglavlje analizira glavnu temu ovog rada,a to su suvremeni izvori električne energije. Analizirani su kemijski i mehanički izvori koji nalaze ili će naći upotrebu u zrakoplovstvu. Takvi izvori su VRLA baterije, litij-ionske i litij-polimer baterije, gorive ćelije, DC alternator, visoko-izlazni generator, te AC generator stabilne i nestabilne frekvencije.

U šestom, završnom poglavlju, iznesena su zaključna razmatranja ovog istraživanja.

KLJUČNE RIJEČI: akumulator; generator; električna energija; AC; DC; baterija; kemijski izvori; suvremeni izvori električne energije.

ANALYSIS OF CONTEMPORARY ELECTRICAL ENERGY SOURCES ON AIRCRAFT

SUMMARY

This thesis analysed the traditional and modern sources of electric energy on aircraft. It consists of six chapters, a list of references, images and a list of abbreviations.

The introductory chapter summarizes the development directions from contemporary sources of electricity.

The second chapter of the dissertation describes the chemical sources of electricity. The analysis is divided into two parts relating to primary sources (galvanic cells) and secondary sources (batteries), which are divided into types of batteries: lead-acid, nickel-cadmium, nickel-iron, silver-zinc, and under sections: capacity and accommodation of batteries.

The third chapter reviews the aviation generators. The analysis is divided into two parts relating to the direct current and alternating current generators. The first section is the division of the DC generator and its control circuits, and the second sub-section describes two generators: constant frequency generator and synchronous brushless AC generator.

In the fourth chapter are listed and briefly described sources of electricity in an emergency, such as: APU, EPU/GPU, RAT/ADG, EPU and hydraulic pump.

The fifth chapter analyzes the main topic of this work – modern sources of electricity. There are analyzed the chemical and mechanical sources which are or will find use in aviation. Such sources are VRLA batteries, lithium-ion and lithium-polymer batteries, fuel cells, DC generator, a high-ouput generator and Ac generator of stable and unstable frekquency.

In sixth and final chapter are presented the final conclusions of this study.

KEY WORDS: accumulator; generator; electric energy; AC; DC; battery; chemical source; modern sources of electric energy.

Sadržaj

1. Uvod 1
2. Kemijski izvori električne energije 2
   2.1. Primarni izvori (galvanski članci) 2
   2.2. Sekundarni izvori (akumulatori) 4
      2.2.1. Olovni akumulator 4
      2.2.2. Nikal-kadmij akumulator 6
      2.2.3. Nikal-željezo (čelični) akumulator 8
      2.2.4. Srebro-cink akumulator 9
      2.2.5. Kapacitet akumulatora 10
      2.2.6. Upotreba akumulatora na zrakoplovu 10
3. Zrakoplovni generatori 11
   3.1. Generatori istosmjerne struje (DC generatori) 12
      3.1.1. Podjela DC generatora 13
      3.1.2. Regulacija i zaštita DC generatora 14
   3.2. Generatori izmjenične struje (AC generatori) 15
      3.2.1. Generator stabilne frekvencije (*Constant Frequency Generator - CFG*) 16
      3.2.2. Sinkroni beskontaktni AC generator (*Permanent Magnet Generator – PMG)* 17
4. Vanjski, pomoćni i izvori EE u nuždi 18
   4.1. APU 18
   4.2. EPU i GPU 19
   4.3. RAT/ADG 20
   4.4. EPU i elektro-hidraulička pumpa 20
5. Suvremeni izvori električne energije i njihove koncepcije 21
   5.1. VRLA akumulatori (Valve-Regulated Lead-Acid) 21
   5.2. Litij-ionske baterije 22
   5.3. Litij-polimer baterije 25
   5.4. Gorive ćelije 27
   5.5. High Output Generator 29
   5.6. AC generator stabilne frekvencije 29
   5.7. AC generatori nestabilne frekvencije 30
   5.8. VSCF elektronički pretvarač 31

5.9. VSCF DC Link 32
5.10. 270V DC pretvorba 33
5.11. Distribucijski sustav AC 20 kHz 34
6. Zaključak 35
Literatura 36
Popis oznaka i kratica 38
Popis slika 40

1. Uvod

Zrakoplovstvo je grana prometa koja bilježi velik i brz tehnološki i tehnički razvoj. Sa razvojem tehnologije, poglavito u smislu elektrike i elektronike, dolazi do povećanja potrošnje, a samim time i do veće potražnje električne energije (EE) na zrakoplovu.

Trend zrakoplovne industrije je zamijeniti hidraulične i pneumatične sustave sa električnim sustavima kako bi doprinijeli udobnosti i lakšoj kontroli parametara sustava. Svjedoci smo sve veće primjene električnih zrakoplova, odnosno zrakoplova sa električnim motorima. Razlog tomu su smanjeni operativni troškovi, te smanjenje onečišćenja koje proizvode zrakoplovi na konvencionalni pogon. U tom cilju sve se više razvijaju električni zrakoplovi i više električni zrakoplovi (*More Electric Aircraft* – MEA).

Zbog razvoja takvih zrakoplova i samog razvoja električnih potrošača koji troše sve više električne energije, potrebni su suvremeniji koncepti izvora električne energije. Standardni izvori EE kao što su galvanski izvori, akumulatori, termičke baterije, gorivni članci (kemijski izvori) i AC/DC generatori, koji će u daljnjem radu biti pobliže opisani, nadograđuju se i poboljšavaju u svrhu sve veće iskoristivosti i dobivanja veće i jače EE.

U ovom radu izvršena je tehničko-eksploatacijska analiza značajki tradicionalnih izvora, njihova poboljšanja, te primjena suvremenih izvora EE na zrakoplovima.

2. Kemijski izvori električne energije

Kemijski izvori EE koriste različite kemijske procese u kojima kemijskom reakcijom dolazi do razdvajanja nosilaca električnog naboja, te stvaranje razlike električnog potencijala koji se na izlaznim priključcima pojavljuje kao naboj. Kemijski izvori se dijele prema načelu rada na: primarne izvore (galvanski članci), sekundarne izvore (akumulatori), te ostale izvore (*single shot ili one shot* termičke baterije i gorivne članke). [1]

2.1. Primarni izvori (galvanski članci)

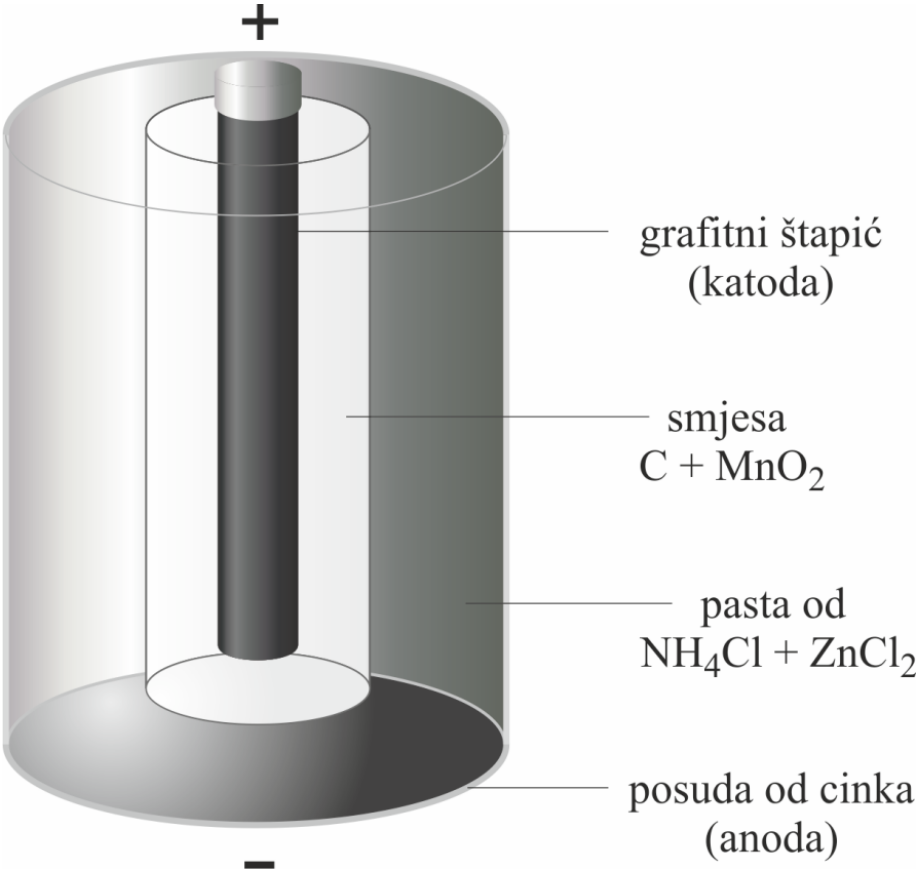
Primarni izvori (nepunjivi) obično se koriste u sigurnosnoj opremi kao što su prsluci za spašavanje i baterije. Rad takvih izvora se temelji na principu uranjanja različitih električki vodljivih materijala (elektrode) u vodenu otopinu anorganskih soli, kiselina ili lužina (elektrolit), dok se za spajanje gornjih dijelova ploča koristi električni vodič. Zbog razmjene elektrona u kemijskom procesu između elektroda i elektrolita će poteći istosmjerna struja. Primarna ćelija je limitirana na jedno pražnjenje, pošto se uništi tijekom pražnjenja. Tok struje u procesu će biti s anode (npr. bakrene ploče) prema katodi (ploči cinka) kroz električni vodič i obrnuto kroz elektrolit. Ako se prekine tok struje kroz vodič, struja će na člancima prestati teći, ali čim strujni krug opet zatvori struja se obnavlja, dok je napon prisutan i kada je strujni krug otvoren.

Prvi galvanski članak je otkrio Alessandro Volta početkom 19.st. uronivši pločice od bakra i cinka u razrijeđenu sumpornu kiselinu. Najznačajniji galvanski članci tog doba su bili Voltin, Daniellov, Groveov, Bunsenov, a najznačajniji među njima je Laclancheov članak, od kojeg su se razvili suvremeni članci – *„suhi članci“*, odnosno obična baterije za opću upotrebu. [1]

Leclancheov članak je načinjen od cinčane čašice (anoda) i ugljenog štapića u smjesi manganovog dioksida i ugljene prašine (katoda). Elektrolit je vodena otopina amonijevog

klorida (NH_4Cl) i cinkovog klorida ($ZnCl_2$). Depolarizator, koji sprječava negativan učinak oslobođenog vodika, je mangan (IV) oksid (MnO_2). Na negativnom polu se oslobađaju dva elektrona koja putuju kroz potrošač (tamo obavljaju rad), te dolaze do pozitivnog pola gdje se odvija kemijska reakcija. Kad se sav cink na čašici „potroši“, reakcija više nije moguća, te se baterija smatra „praznom“. Napon stezaljki takvog članka je 1.5V (SL. 1).

Primarni članci u zrakoplovstvu nemaju neku posebnu namjenu. Koriste se u prijenosnim pilotskim svjetiljkama, te kao pomoćne baterije računarskih sustava (litijske baterije). Teži se potpunoj zamjeni primarnih članaka sekundarnim člancima (akumulatorima). [1]



Slika 1: Leclancheov suhi članak, Izvor: http://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=suhi+%C4%8Dlanak

2.2. Sekundarni izvori (akumulatori)

Akumulator je naprava „*spremnik energije*“, koja kemijsku energiju pretvara u električnu. Načelo rada se temelji na izmjeni elektrona zbog kemijske reakcije između elektrolita i materijala elektroda. Akumulatori su punjiva vrsta baterija, te spadaju pod galvanski sekundarni članak. Punjenje je omogućeno zbog povratnih svojstava elektrokemijskih sustava. Punjenje se vrši po principima prolaska struje kroz sekundarnu ćeliju, u suprotnom smjeru od uobičajene struje u ćeliji, vraća prvobitna kemijska struktura i baterija je napunjena.

U zrakoplovstvu najzastupljeniji su olovni i alkalijski akumulatori, i to: nikal-kadmij, srebro-kadmij, nikal-željezo i srebro-cink.

2.2.1. Olovni akumulator

Prvi olovni akumulator patentirao je francuski fizičar Gaston Plante 1859.godine. Glavni dijelovi olovnog akumulatora su aktivni elementi: elektrolit (sumporna kiselina razrijeđena s vodom) i elektrode (katoda i anoda), te pasivni elementi: kućište, separator, spojnice, čepovi i vanjski priključci. Često se umjesto dviju ploča, radi većeg kapaciteta, stavljaju dva sloga ploča. Svi dijelovi akumulatora su smješteni u kućište, pa ono mora biti mehanički čvrsto i kemijski inertno, te se najčešće izrađuju od plastične otporne mase.

Olovni akumulatori (Sl. 2) imaju pozitivne ploče prekrivene olovo peroksidom, te negativne ploče načinjene od olova koje se uranjaju u elektrolit sačinjen od razrijeđene sumporne kiseline (H_2SO_4 razrijeđen s vodom). Prilikom pražnjenja, obje ploče (pozitivna i negativna) se kemijski mijenjaju u olovo sulfat, te jakost kiseline opada kako sumporni ioni prelaze na ploče. [2]

Tijekom punjenja akumulatora, olovni sulfat na pozitivnoj ploči (anodi) oksidira u olovni dioksid (PbO_2), a na negativnoj ploči (katodi) u čisto olovo. Akumulator se puni sve dok se na elektrodama ne potroši olovni sulfat. Ako se pri tome ne prekine dovođenje električne struje, nastaje elektroliza vode (oslobađaju se kisik i vodik). Kada se na akumulator priključi trošilo, kemijska reakcija se odvija u suprotnom smjeru i pretvara se u električnu, a struja u akumulatoru teče u smjeru suprotnom od smjera tijekom punjenja. Punjenje olovnog

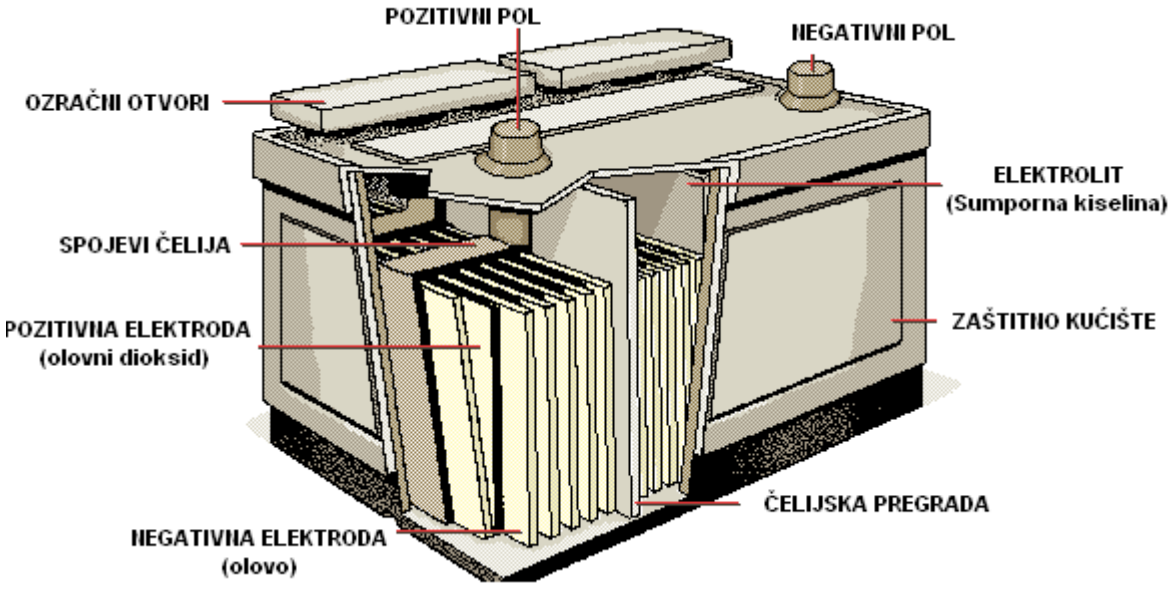
akumulatora se vrši tako što se akumulator priključi na zrakoplovni DC generator konstantnog napona, koji je malo veći od napona akumulatora otvorenog kruga.

Srednja gustoća elektrolita varira između 1.25 – 1.30 kg/m^3 za akumulatore koji su potpuno puni, pa do 1.17 kg/m^3 za ispražnjene akumulatore. Mjerenjem srednje gustoće se provjerava stanje napunjenosti olovnih akumulatora. [2]

Punjenje i pražnjenje akumulatora sažeto prikazano sljedećim izrazom:

$$\mathbf{2\ PbSO_4 + 2\ H_2O \leftrightarrow PbO_2 + 2H_2SO_4 + Pb}$$

Kako bi se provjerilo stanje napunjenosti olovnih akumulatora koriste se dvije metode: mjerenje gustoće elektrolita s pomoću aerometra i mjerenje napona stezaljki pod opterećenjem nazivnom strujom pražnjenja. Preporučeno je koristiti obje metode radi što učinkovitijih rezultata. Mjerenje se izvodi pri sobnoj temperaturi akumulatora, kako bi rezultati bili što pouzdaniji. [1]



Slika 2: Dijelovi olovnog akumulatora, Izvor: http://prvisedam.blogspot.hr/2013/08/lekcija-24-akumulatori-sekundarni.html

2.2.2. Nikal-kadmij akumulator

Alkalijski tip akumulatora koji je široko rasprostranjen kod velikih zrakoplova zbog mogućnosti stvaranja velike količine električne energije za pokretanje turbinskih motora zrakoplova. Nikal-kadmij akumulatori su jako pouzdane baterije sa dugim vijekom trajanja. [2]

Elektrolit nikal-kadmij akumulatora je vodena otopina kalijeva hidroksida (KOH), a elektrode se dijele na nekoliko vrsta prema materijalu. Anoda je sastavljena od nikla impregniranog nikal hidroksidom ($Ni(OH)_2$), dok je katoda od nikla impregniranog kadmij hidroksidom ($Cd(OH)_2$).

Pozitivna i negativna ploča su spojene zajedno, te su odvojene najlonom i celofanom. Tijekom pražnjenja, kisik se formira na anodi, te celofan djeluje kao membrana između elektroda i sprječava da kisik dođe do katode (u suprotnom bi dolazilo do zagrijavanja unutar akumulatora). Kada je akumulator ispražnjen, hidroksilni ioni iz elektrolita se miješaju sa kadmijem na katodi, te se u tom procesu otpuštaju elektroni, a hidroksilni ioni sa anode se premještaju u elektrolit, noseći elektrone sa sobom.

Proces punjenja i pražnjenja nikal-kadmij akumulatora sažeto prikazano sljedećim izrazom:

$$\mathbf{2\ NiOOH + Cd + 2H_2O \leftrightarrow 2\ Ni(OH)_2 + Cd(OH)_2}$$

Relativna gustoća nikal-kadmija akumulatora iznosi 1.24 – 1.30, ovisno o temperaturi. Za razliku od olovnih akumulatora relativna gustoća ne ovisi o stanju napunjenosti, a elektrolit ne mijenja sastav tijekom pražnjenja. Dio elektrolita upiju ploče tijekom pražnjenja, te razina elektrolita padne u ćelijama (razina elektrolita u ćelijama je najniža kada je akumulator potpuno ispražnjen). Tijekom punjenja se taj proces okreće, te razina elektrolita opet raste. [2]

Nikal-kadmij akumulator ima niz prednosti nad olovnim akumulatorima kao što su: jako mali unutarnji otpor, konstantan napon stezaljki pri pražnjenju, otporni su na udarce, vibracije, potrese (zbog sinteriranih elektroda), imaju neograničen rok skladištenja, te dugi radni vijek. Većinom su neosjetljive na duboko pražnjenje i preveliko punjenje, a održavanje je jednostavno. Pored svih prednosti postoje i neki nedostaci, kao što je recimo njihova veća cijena u odnosu na olovne akumulatore, te nemogućnost mjerenja stanja napunjenosti

(potreban je dijagnostički uređaj – integrirajući mjerač kapaciteta). Najveća mana nikal-kadmij akumulatora je „toplinski bijeg“ (*„Thermal Runaway“*). [1]

Toplinski bijeg je problem koji se javlja pri punjenju nikal-kadmij akumulatora zbog smanjenja unutarnjeg otpora tijekom kemijskih promjena. Tijekom punjenja pri konstantnom naponu može doći do povećanja generiranja topline, što pak vodi do povećanja temperature u konačnici. Toplinski bijeg može oštetiti jednu ili više ćelija Ni-Cd akumulatora (Sl. 3). [2]

Zrakoplovi koji sadrže nikal-kadmij akumulatore imaju senzorske uređaje smještene uz akumulatore kako bi pratili temperaturu ćelija akumulatora. Takvi senzori omogućuju upozorenje u slučaju visokih temperatura i sprječavaju preopterećenje tako što isključe akumulatore sa izvora punjenja pri određenoj temperaturi da bi zaustavili toplinski bijeg.



Slika 3: Oštećenje nikal-kadmij ćelija uzrokovano toplinskim bijegom, izvor: http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=2180331&page=874

2.2.3. Nikal-željezo (čelični) akumulator

Nikal-željezo (NiFe) akumulator je alkalijski akumulator sa pozitivnom pločom načinjenom od nikal(III)-oksid-hidrata (NOOH), te negativnom pločom od željeza, sa elektrolitom od vodene otopine kalij-hidroksida (KOH). Aktivni materijali se drže u čeličnim cijevima obloženih niklom. Nosač je u dobrom električnom kontaktu sa cijevi. Rešetka je napravljena od laganog okvira kostura obavijenog tankim čeličnim limom, sa podupirućom širinom na vrhu. Rešetka je, kao i svi ostali metalni dijelovi, poniklana zbog sprječavanja korozije. Elementi moraju ostati prekriveni elektrolitom, jer u slučaju da se osuše, negativne ploče oksidiraju i trebaju vrlo dug period punjenja nakon toga. [3]

Punjenje i pražnjenje uključuje prijenos kisika iz jedne elektrode na drugu (iz jedne skupine ploča na drugu). Materijal sa pozitivnih ploča se hiperoksidira u napunjenoj ćeliji, a onaj sa negativnih ploča prelazi u spužvasto ili reducirano stanje.

Tijekom pražnjenja pozitivne ploče su deoksidirane, te ih zbog prirodnih afiniteta za željezom negativne ploče opet oksidiraju. Dopušteno je prazniti akumulator pri bilo kojoj stopi do 25% iznad normalne, te u kraćim periodima do šest puta normalne. Kada normalna stopa pražnjenja prijeđe ovu vrijednost pojaviti će se abnormalni padovi napona. [3]

Proces punjenja i pražnjenja nikal-željezo akumulatora sažeto prikazano sljedećim izrazom:

$$\mathbf{2\ Ni(OH)_2 + Fe(OH)_2 \leftrightarrow 2\ NiOOH + Fe + 2\ H_2O}$$

Čelični akumulator je jako robustan, sa velikom tolerancijom na preopterećenja punjenjem ili pražnjenjem, te tolerancijom na kratki spoj. Zbog svoje niske specifične energije (19-25 Wh/kg), slabim karakteristikama punjenja, te visoke cijene proizvodnje izlazi iz upotrebe u zrakoplovstvu i zamjenjuju ga drugi tipovi akumulatora.

2.2.4. Srebro-cink akumulator

Srebro-cink akumulator je izum Francuza H. Andre polovicom 20.stoljeća. Mehanička konstrukcija je jako slična konstrukciji olovnog akumulatora. Srebro-cink akumulator koristi varijaciju kemije srebro-oksid baterije. Takav akumulator omogućuje isporučivanje jedne od najveće specifične energije od svih do sada poznatih elektrokemijskih izvora energije.

Katoda srebro-cink akumulatora je načinjena od metalik srebra sa aktivnom masom od srebro(II)-oksida (AgO), dok je anoda sačinjena od mješavine cink-oksida i čistog cinka (Zn) u prahu. Elektrolit koji se koristi je vodena otopina kalij hidroksida (KOH) gustoće 1.4 – 1.45 g/cm^3. Akumulator se sastoji od 15 redovno vezanih ćelija, tako da je ukupni napon 22.5 – 24 V. [4]

Proces punjenja i pražnjenja srebro-cink akumulatora sažeto prikazano sljedećim izrazom:

$$\mathbf{Ag + KOH + ZnO \leftrightarrow AgO + KOH + Zn}$$

Srebro-cink akumulatori su manje osjetljivi na prepunjivanje i duboko pražnjenje od olovnih akumulatora, a imaju puno veće struje kratkotrajnog pražnjenja, tako da su pogodniji za pokretanje avionskih motora. Osim toga, za isti kapacitet ovi akumulatori su do 3 puta lakši od olovnih, a manje osjetljivi pri niskim temperaturama. Vijek upotrebe im je 6 – 9 mjeseci, a cijena im je oko 10 puta veća od olovnih. Zbog svojih materijala koji su vrlo osjetljivi ovi se akumulatori skladište i održavaju u strogo odvojenim prostorijama. Srebro-cink akumulatori svoju upotrebu najviše nalaze u vojnom zrakoplovstvu, te tako služe za pokretanje zrakoplovnih motora na vojnim zrakoplovima kao što su: MiG-21, 23, 25, 29 i 31. [4]

2.2.5. Kapacitet akumulatora

Mjera koliko dugo akumulator može davati izlaznu struju, prije nego što napon na vanjskim priključcima padne ispod određene vrijednosti se naziva kapacitet akumulatora. Mjeri se u ampersatima (Ah). Kapacitet ovisi o količini aktivne mase, poroznosti elektroda, debljini elektroda, a mijenja se tijekom eksploatacije u ovisnosti o temperaturi i tlaku zraka (visina leta), te održavanju. Kapacitet akumulatora se mora provjeriti svaka 3 mjeseca, a provjera se vrši pod opterećenjem. Akumulator mora imati efikasnost 80% ili više.

2.2.6. Upotreba akumulatora na zrakoplovu

Zrakoplovni generatori su osnovni izvori električne energije na zrakoplovu, dok akumulatori služe kao rezervni izvor. Kada iz nekog razloga otkaže zrakoplovni generator, akumulator mora napajati neophodne uređaje zrakoplova najmanje 30 min. Pored napajanja uređaja, glavna zadaća akumulatora je pokretanje motora. Zbog tog razloga se na velikim zrakoplovima ugrađuju dva akumulatora, od kojih jedan služi za pokretanje motora i napajanje kritičnih potrošača u nuždi, dok drugi služi samo za napajanje kritičnih potrošača u nuždi. Još jedna od glavni zadaća akumulatora je pokretanje motora APU-a (*Auxiliary Power Unit*).

Akumulator je vezan paralelno s zrakoplovnim generatorom tako da se puni kada je napon mreže veći od napona akumulatora, a prazni kada je napon mreže manji. Zajednički rad akumulatora i generatora osiguravaju regulator napona (regulira jakost struje punjenja) i diferencijalni minimalni relej (uključuje generator u mrežu i sprječava protjecanje struje iz akumulatora u generator). [4]

3. Zrakoplovni generatori

Generatori su strojevi koji mehaničku energiju pomoću procesa elektromagnetske indukcije pretvaraju u električnu energiju. Potrebno je osigurati stalnu promjenu položaja zavojnice unutar permanentnog magnetskog polja ili promjenjivo magnetsko polje u neposrednom okolišu mirujuće zavojnice. U oba tipa generatora (AC i DC) inducirani napon je izmjeničan, a njihova razlika je u metodi prikupljanja električne energije i njezin prijenos potrošačima. [2]

Generator služi kao osnovni izvor električne energije na zrakoplovu. Ovisno o tipu zrakoplova razlikuju se njihove veličine, broj i snaga. Konstrukcija zrakoplovnog generatora se znatno razlikuje od običnih generatora zbog opterećenja koja treba podnijeti (mora moći izdržati i do 10 G u vremenu od 5 min. Generator mora raditi pouzdano u vrlo složenim uvjetima pri različitim tlakovima, temperaturama, promjeni vlažnosti, pri pojavi prašine i pijeska, pri svim položajima zrakoplova, mora moći izdržati kratkotrajna strujna preopterećenja do 50% od normalno eksploatacijskih, rad od 500 sati bez popravka, te mora biti opremljen električnim filtrom koji sprječava radio-smetnje na zrakoplovu. [4]

Pogon generatora je izveden preko pogona motora preko reduktora. Složeniji način pogona je s pomoću mehaničko/hidrauličkog sustava za održavanje konstante brzine vrtnje, te se koristi za AC generatorske sustave sa stabilnom frekvencijom. Neki tipovi zrakoplova koriste strujanje zraka u letu s pomoću zračne turbine (*RAT – Ram Air Turbine*) za pretvorbu energije rotacije za pogon generatora.

Zbog ispunjenja uvjeta što manje težine i dimenzija, generatori se maksimalno opterećuju i iskorištavaju. Pri tome dolazi do znatnog zagrijavanja generatora, pa ih je potrebno hladiti prinudnim putem. Postoje dva načina hlađenja: vlastitom i neovisnom ventilacijom. Vlastita ventilacija podrazumijeva ventilator koji se ugrađuje na vratilo generatora, a za neovisnu ventilaciju se koristi protok zraka pri letu zrakoplova. Ovakvi načini hlađenja imaju dosta nedostataka, stoga se generatore može hladiti nekim drugim fluidom (npr. uljem). [4]

3.1. Generatori istosmjerne struje (DC generatori)

DC generatori proizvode električnu energiju istosmjernog napona i struje, te se najčešće koriste na malim zrakoplovima. U mnogim slučajevima DC generatori se zamjenjuju sa DC alternatorima. Obje naprave proizvode električnu energiju za potrebe napajanja zrakoplovnih potrošača i napajanje zrakoplovnog akumulatora.

DC generator se sastoji od nepokretnog dijela (stator) s pobudnom zavojnicom, koji je namijenjen stvoriti magnetsko polje, okretnog dijela s namotajima (rotor – armatura) gdje se prilikom okretanja inducira elektro-motorna sila (*EMS*), kolektora sa četkicama koje naizmjeničnu struju stvorenu u namotajima rotora pretvaraju u istosmjernu, te kućišta s priključcima, ovjesom i ležajevima.

Stator je sastavljen od oklopa koji je izrađen od mekog željeza, a na njegovoj unutarnjoj strani nalaze se pričvršćeni glavni i pomoćni polovi. Glavni polovi (može ih biti 4, 6 ili 8) u stvari su elektromagneti koji se sastoje iz jezgre (izrađena od čeličnih limova) na kojoj se nalaze svici od izolirane bakrene žice kroz koju se propušta istosmjerna struja. Svici na glavnim polovima su pobudni svici, a struja koja teče kroz njih je poticajna struja. Pomoćni polovi (kojih može biti 3 ili 4) izrađuju se obično u jednom dijelu. [4]

Kako se radom generatora dobiva AC napon, klizni prsteni se moraju zamijeniti sklopom nazvanim kolektor ili komutator. Komutator je niz međusobno izoliranih isječaka prstena od vodljivog materijala (obično bakrene slitine zbog malog električnog otpora uz veću otpornost na mehaničko habanje). Komutator se sastoji od dva puta više isječaka nego što ih ima zavojnica da bi se smanjilo pulsiranje napona koje se dobije prespajanjem četkica na pojedini izvod zavojnice rotora. Komutator je ujedno najveća mana istosmjernog generatora, jer je na njemu stalno prisutno iskrenje, koje uz mehaničko trljanje čini komutator potrošnim dijelom generatora i mjestom električnih gubitaka.

3.1.1. Podjela DC generatora

DC generatori se obično dijele s obzirom na tip pobude (način formiranja magnetskog polja), pa obično razlikujemo tri vrste DC generatora:

1) **Generator s permanentnim magnetom**

   - Generatori koji imaju neznatnu promjenu izlaznog napona s opterećenjem, te se uobičajeno koriste za male snage.
   - Zbog nemogućnosti konstrukcije dovoljno jakih permanentnih magneta za veće izlazne snage, te nemogućnost regulacije izlaznog napona ne nalaze preveliku upotrebu.

2) **Generatori s nezavisnom vanjskom pobudom**

   - Generatori sa zavojnicom pobude koja je galvanski odvojena od armature i napaja se iz nezavisnog izvora.
   - Promjena izlaznog napona s opterećenjem im je neznatna, no nisu sigurni na preopterećenja, zbog visokih struja kratkog spoja.

3) **Samopobudni generatori**

   - Generatori koji za svoj rad koriste remanentni magnetizam u konstrukciji generatora.
   - Dijele se s obzirom na način spajanja pobudne zavojnice na armaturu (serijska, paralelna i složena pobuda) (Sl. 4). [1]

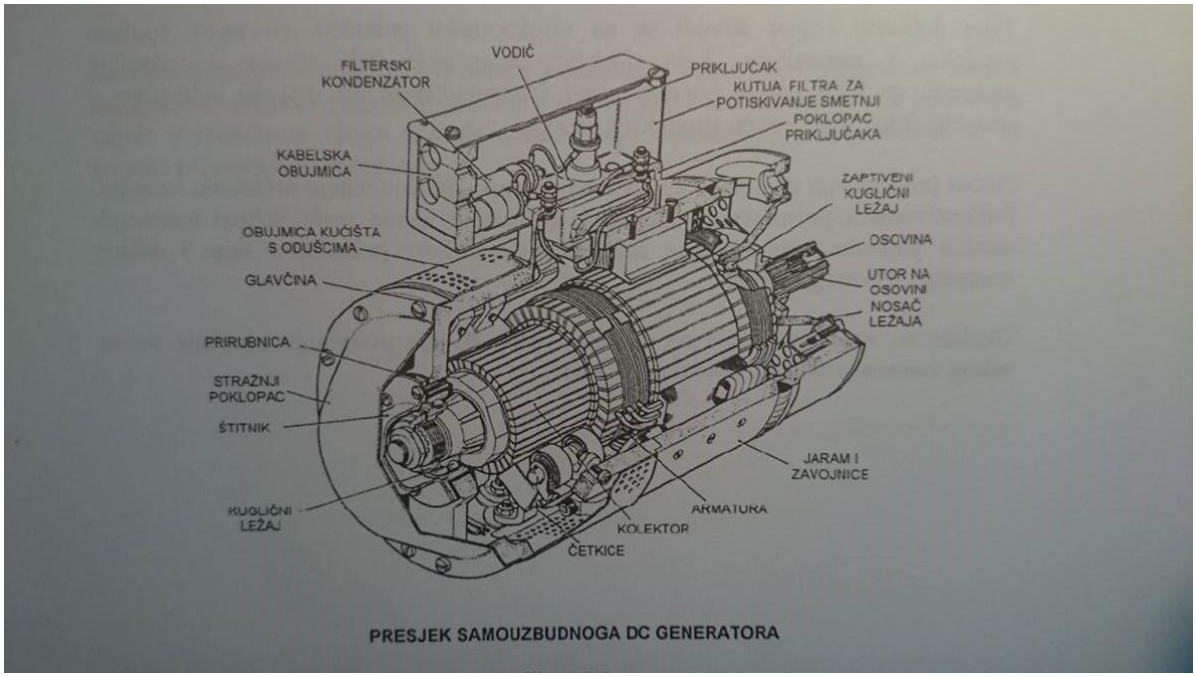
3.1.2. Regulacija i zaštita DC generatora

Strujni krug DC generatora čine i regulacijsko-zaštitni sklopovi koji upravljaju radom generatora, te štite generatori i ostatak mreže od preopterećenja. Sklopovi o kojima je ovdje riječ su:

1) Regulator napona
   - Uređaj koji održava konstantan izlazni napon generatora u dozvoljenim granicama
   - Postoje dvije vrste takvog regulatora: ugljeni i elektronički regulator

2) Prenaponska sklopka
   - Štiti strujne krugove i potrošače od prevelikog napona generatora

3) Diferencijalna sklopka
   - Namijenjena je za uključivanje DC generatora tek onda kada je njegova EMS veća za 0.3 – 1 V od napona mreže



Slika 4: Presjek samopobudnog DC generatora, Izvor: „Zrakoplovni elektrosustavi“, Tino Bucak, (2001,2011)

3.2. Generatori izmjenične struje (AC generatori)

Veliki putnički zrakoplovi zahtijevaju jako pouzdane izvore električne energije, njenu distribuciju i kontrolu pomoću kompjutora. Većina takvih zrakoplova sadrži dva ili više glavna AC generatora pogonjenih zrakoplovnim mlaznim motorima, te više od jednog pomoćnog AC generatora pokretanih pomoćnim izvorom energije (*Auxiliary Power Unit – APU*). Potrošači koji koriste izmjeničnu struju su instrumenti, svjetla, radio, motori, zaštita protiv leda i ostali grijači. Kada je AC generator u pogonu, onda zrakoplov najviše koristi izmjeničnu struju, te se takav zrakoplov naziva „*AC zrakoplov*“. [2]

AC generator (nekad zvan i alternator) proizvodi trofazno 115 V izmjenične struje pri 400 Hz. Za svaki okretaj generatora jedinica proizvodi tri odvojena napona. Osnovni dijelovi takvog generatora su nepokretni stator (na kojem su smješteni induktor i indukt), okretni rotor i klizni kontakti koji su smješteni u odgovarajuće kućište. Induktor je dio generatora koji stvara pobudno magnetsko polje i izvodi se kao zavojnica elektromagneta, a indukt je dio generatora u kojem se inducira elektromotorna sila (EMS). Uobičajeni načini spajanja zavojnica indukta AC generatora su u tzv. „zvijezdu“ ili „trokut“. [1]

Načelo rada AC generatora se temelji na elektromagnetskoj indukciji na dva načina, ili okretanjem indukta unutar permanentnog magnetskog polja određene gustoće i magnetskog toka ili okretanjem zavojnice induktora unutar zavojnice indukta. Postoji jednofazna i trofazna izvedba AC generatora. Trofazna izvedba sadrži tri izlazna namota u statoru koji su električki odvojeni unutar statora, te su smješteni tako da su njihovi naponski izlazi redom odvojeni za 120°. Sadrži samo jedan rotor unutar statora. Prednosti takvog trofaznog generatora su:

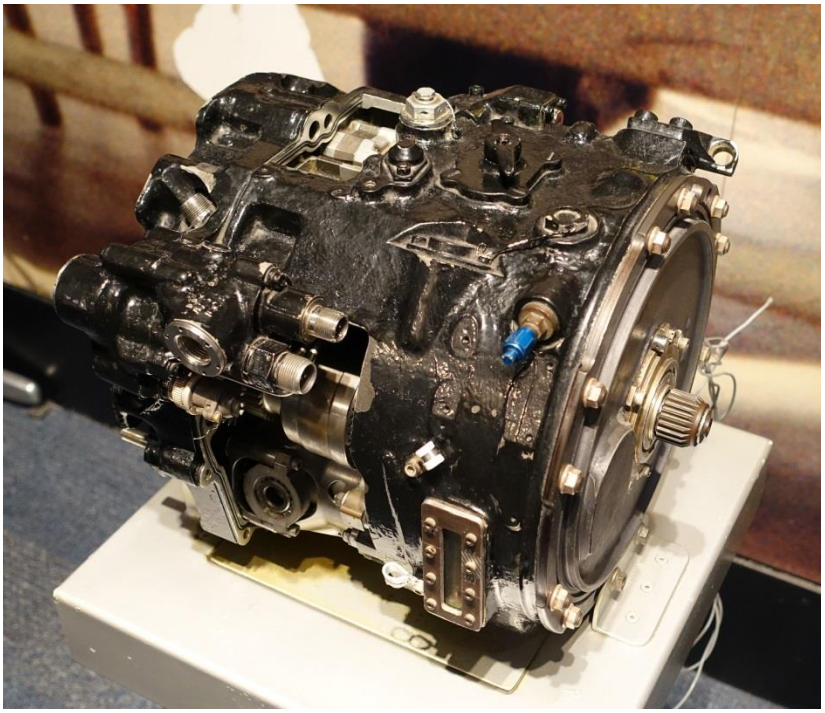
- Cijeli stator je iskoristiv, za razliku od jednofaznog generatora koji iskorištava samo dvije trećine statora.
- Bolji distribucijski faktor.
- Smanjuje količinu kabela, te je stoga i manja cijena.
- Veća je količina snage koju proizvodi naspram jednofaznog generatora. [2]

3.2.1. Generator stabilne frekvencije (*Constant Frequency Generator - CFG*)

Složeniji AC generator koji koristi metodu pobude s elektromagnetom, te predstavlja integraciju dvaju generatora osovinski spojenih rotora u kućištu. [1]

Konstantna frekvencija koju proizvodi generator može biti izvedena na način da se hidrauličko-mehanički sustav za održavanje konstantnog broja okretaja (*Constant speed Drive – CSD*) ugradi između zrakoplovnog mlaznog motora i generatora. CSD pomoću pogonskog vratila koje se okreće u širokom rasponu brzina, prenosi snagu do izlaznog vratila koje rotira konstantnom brzinom. Koriste se za pogon mehanizama , obično električnih generatora, koji zahtijevaju stalnu brzinu unosa.

Kako bi se proizveo odgovarajući napon pri konstantnoj AC frekvenciji (obično trofazno 115 V pri 400 Hz), generator se treba okretati pri konstantom okretaju u minuti (*Revolutions Per Minute – RPM*). S obzirom da okretaji motora zrakoplova variraju od praznog hoda do pune snage, stvara se potreba za upotrebom CSD-a. [5]



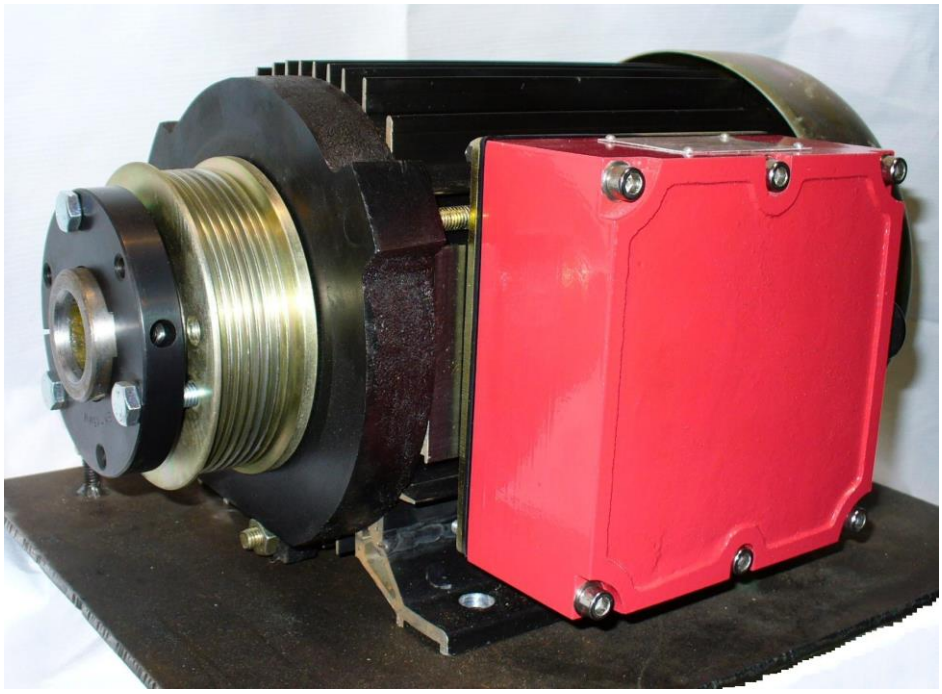
Slika 5: CSD za zrakoplov Boeing 727, izvor: https://en.wikipedia.org/wiki/Constant_speed_drive

3.2.2. Sinkroni beskontaktni AC generator (*Permanent Magnet Generator – PMG)*

PMG je AC generator koji koristi kombiniranu pobudu s permanentnim magnetom i elektromagnetom. Namotaji rotora su zamijenjeni sa permanentnim magnetom. Ovakav generator ne zahtjeva posebni odvojeni DC izvor za pobudu, niti sadrži klizne prstene i kontaktne četkice. PMG se najčešće koristi u integriranom hidrauličko-mehaničkom sustavu za održavanje konstantne brzine vrtnje (*Integrated Drive Generator – IDG*).

Magnetsko polje statora i rotora se okreće istom brzinom, eliminirajući tako gubitke pobude u rotoru (koje inače predstavlja 20% do 30% ukupnih gubitaka generatora. Manji gubici donose manje povećanje temperature u generatoru, što znači da se može upotrijebiti manji i jednostavniji sustav hlađenja. Induktor takvog generatora je smješten na rotoru sa montažom od permanentnih magneta. [6]

PMG generator (Sl. 6) zapravo sadrži tri pojedinačna generatora s osovinski vezanim rotorima u zajedničkom kućištu: pomoćnog pobudnog generatora, pobudnog generatora i glavnog generatora. [1]



Slika 6: AC PMG, izvor: http://utterpower.com/pmg.htm

4. Vanjski, pomoćni i izvori EE u nuždi

Izvori električne energije u koju spadaju aerodromski izvor EPU (*External Power Unit*) i GPU (*Ground Power Unit*), pomoćni izvor APU (*Auxiliary Power Unit*), te izvori električne energije u nuždi kao što su: RAT/ADG (*Ram Air Turbine/Air Driven Generator*), pričuvni AC generatori nestabilne frekvencije, EPU (*Emergency Power Unit*) i elektro-hidraulička pumpa.

4.1. APU

APU je mali mlazni motor koji se koristi za pokretanje glavnih zrakoplovnih motora. Kod putničkih zrakoplova najčešće je smješten na samom kraju zrakoplova ispod repa. Veliki zrakoplovni motori zahtijevaju veliki moment da bi se počeli okretati, a takav moment ne mogu proizvesti akumulatori, te se stoga koristi APU kojega pokreće takav akumulator.

Nakon startanja motora APU više nije potreban, ali koristi se za neke sekundarne potrebe kao što su:

- Osigurava zrak i električnu energiju u kabini (dok su motori još zagašeni, kako se ne bi trošio akumulator).
- U slučaju otkaza motora, osigurava električnu energiju.
- Može pokrenuti motore tijekom leta u slučaju njihovih otkaza.

APU predstavlja kritični sigurnosni uređaj na ETOPS (*Extended-range Twin-engine Operations*) zrakoplovima. Takvi zrakoplovi zahtijevaju da se APU može pokrenuti tijekom leta, a ne samo na zemlji.

4.2. EPU i GPU

EPU i GPU predstavljaju aerodromske vanjske izvore električne energije. GPU (Sl. 7) je najčešće izveden kao vozilo koje napaja električnu mrežu zrakoplova na zemlji prilikom startanja glavnih motora. GPU također može biti izveden kao dio zračnog mosta, te takva izvedba omogućuje lakši pristup zrakoplovu.

Većina zrakoplova zahtjeva 28 V DC ili 115 V 400 Hz AC. Električna energija se prenosi od generatora do konekcija na zrakoplovu preko trofaznog četiri-žičnog kabela koji može podnijeti 261 amps (90 kVA).

Postoje dvije inačice EPU/GPU, akumulatorska i generatorska. Akumulatorski tip je jednostavniji i prenosi se na kolicima do i od zrakoplova. Koristi se za startanje motora na manjim zrakoplovima (pogotovo kod jutarnjih hladnih startanja). Generatorska inačica sadrži generator koji je osovinski vezan za motor s unutrašnjim izgaranjem (najčešće dizelski).



Slika 7: Zrakoplovni GPU, izvor: http://www.aerospecialties.com/aviation-ground-support-equipment-gse-products/tld-ground-support-equipment/tld-gpu-406-e-cup-60-kva-ac-diesel-ground-power-unit/

4.3. RAT/ADG

RAT je mala turbina ugrađena u zrakoplov koja služi kao alternativni izvor ili izvor električne energije i hidraulike u nuždi. RAT proizvodi energiju uz pomoć struje zraka koja je vezana uz brzinu zrakoplova kroz zrak, te je vezana na AC generator (ADG) ili hidrauličku pumpu.

Moderni zrakoplovi koriste RAT jedino u nuždi u slučaju gubitka hidraulike ili gubitka primarnog generatora. U takvim slučajevima RAT pogoni vitalne zrakoplovne sustave kao što su upravljačke površine zrakoplova, kritični instrumenti, te navigacijska i komunikacijska oprema. Pojedini RAT-ovi proizvode jedino hidrauličku energiju koja onda pokreće električni generator za snabdijevanje zrakoplova električnom energijom.

RAT je najčešće smješten u trupu ili krilima zrakoplova. Može se pokrenuti ručno ili će se automatski aktivirati u slučaju nestanka AC električne energije. Između nestanka EE i aktiviranja RAT-a, akumulator će pokretati najvažniju instrumentaciju zrakoplova. [7]

4.4. EPU i elektro-hidraulička pumpa

*Emergeny Power Unit (*EPU) i elektro-hidraulička pumpa su izvori električne energije karakteristični za borbene zrakoplove. Koriste se za slučaj izvlačenja i spašavanja zrakoplova iz nepravilnih položaja uzrokovanih otkazom motora i električne energije zrakoplova. [1]

EPU za razliku od uobičajenih turbina nema kompresor, te koristi mješavinu hidrazina i vode umjesto zrakoplovnog goriva. Miješanjem hidrazina i vode dolazi do eksplozije koja pogoni turbinu. Tako proizvedena energija preko reduktora pokreće generator ili hidrauličku pumpu.

Elektro-hidraulička pumpa sadrži *single-shot* termičku bateriju koja se aktivira pirotehnički, te napaja hidrauličku pumpu koja se koristi za startanje motora i upravljanje kontrolnim površinama.

5. Suvremeni izvori električne energije i njihove koncepcije

U ovom su dijelu nabrojani i opisani suvremeni izvori električne energije kao što su: VRLA akumulatori, litij-ionske i litij-polimer baterije, gorive ćelije (kemijski izvori), DC alternator, visoko izlazni generator, AC generator stabilne i nestabilne frekvencije, te ostale nove koncepcije izvora EE.

5.1. VRLA akumulatori (Valve-Regulated Lead-Acid)

VRLA akumulator sadrži sav elektrolit koji je upijen u separatore od staklo-mata bez slobodnog elektrolita, te se stoga naziva i zapečaćeni akumulator. Elektro-kemijske reakcije ovakvih akumulatora su jednake kao i kod ostalih tipova akumulatora, uz iznimku da kod VRLA akumulatora prevladava mehanizam rekombinacije plina.

Tijekom punjenja VRLA akumulatora, kisik se kemijski miješa sa olovom na negativnim pločama u prisutnosti H_2SO_4, te se pritom stvara olovo sulfat i voda. Zbog takve kombinacije kisika se sprječava nastanak hidrogena na negativnim pločama. Tijekom punjenja takvih akumulatora nema gubitka vode, iako se može dogoditi manji gubitak vode u slučaju reakcije zbog samopražnjenja akumulatora. Takav gubitak je toliko mali da nije potrebno nadomještavati izgubljenu vodu. Ćelije akumulatora sadrže sigurnosni ventil za odušak tlaka, koji se može otvoriti u slučaju prepunjenosti akumulatora. [2]

VRLA akumulator je našao primjenu u različitim tipovima zrakoplova kao što su BAe 125 i 146 poslovni zrakoplovi, Harrier i njegov derivat AV8B, neke varijante F-16, te zrakoplovi generalnog zrakoplovstva i turbinski zrakoplovi. VRLA akumulatori se smatraju odobrenim zamjenama za nikal-kadmij akumulatore.

5.2. Litij-ionske baterije

Litij-ionske baterije (Li-ion baterije ili LIB) su punjive baterije u kojima se ioni litija kreću od negativne do pozitivne elektrode tijekom pražnjenja i obrnuto tijekom punjenja. Li-ion baterije koriste izmijenjeni spoj litija kao materijal jedne elektrode, za razliku od metalnog litija koji se koristi kod nepunjivih litij baterija. Glavne komponente litij-ion baterija su elektrolit (koji dozvoljava ionsko kretanje), te dvije elektrode.

Negativna elektroda li-ion baterije je napravljena od ugljika (grafita), a pozitivna elektroda je od metal oksida. Elektrolit je otopina od soli litija u organskom otapalu, kao što je etilen karbonat ili dietil karbonat koji sadrže komplekse iona litija. Elektrokemijski procesi elektroda se mijenjaju između anoda i katoda ovisno o pravcu prolaska struje kroz ćelije. Čisti litij je jako reaktivan sa vodom, stvarajući litij hidroksid i hidrogenski plin. Zbog takvih reakcija se koristi ne-vodeni elektrolit.

Tijekom pražnjenja, ioni litija prenose struju unutar baterije od negativne do pozitivne elektrode kroz ne-vodeni elektrolit i separator od dijafragme. Tijekom punjenja, vanjski izvor električne energije (krug punjenja) uzrokuje preveliki napon, koji onda tjera punjenju struju da teče unutar baterije od pozitivne do negativne elektrode. Ioni litija zatim odlaze sa pozitivne na negativnu elektrodu, gdje postaju ugrađeni u porozni materijal u procesu zvanom interkalacija. [8]

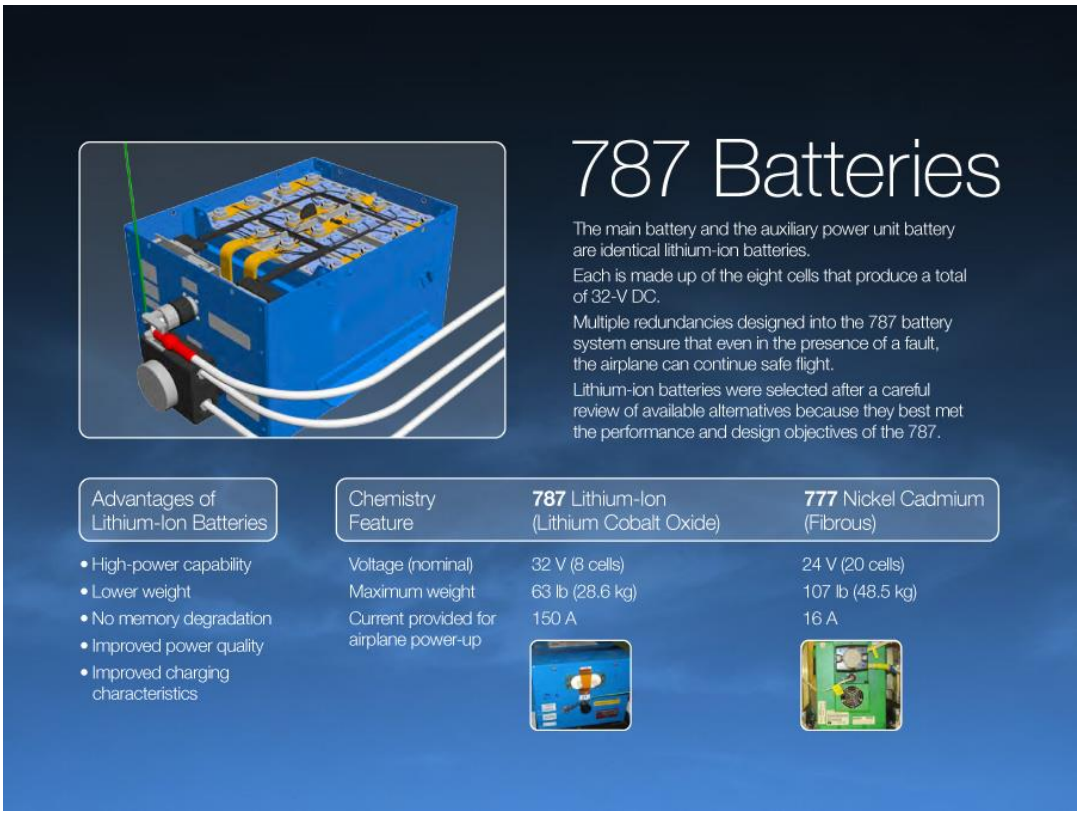
Gustoća energije litij-ionskih baterija je dva puta veća od standardnih nikal-kadmij baterija. Li-ion baterija je baterija koja zahtjeva jako malo održavanja. Ne postoji memorija niti raspored punjenja potreban za dugovječan život baterije. Samopražnjenje je upola manje nego kod nikal-kadmij baterija, te su stoga jako dobre za moderne aplikacije mjerača goriva. Li-ion baterije nemaju veliki utjecaj na okoliš prilikom njihovog odlaganja.

Unatoč puno pozitivnih strana, litij-ion baterija ima i negativnih strana. Takve baterije su krhke i zahtijevaju zaštitni krug kako bi mogli sigurno operirati. Starenje takvih baterija je drugi veliki problem o kojemu mnogi proizvođači šute. Pogoršanje sposobnosti je zamjetljivo nakon jedne godine, neovisno da li je baterija u upotrebi ili ne. Takve baterije znaju prestati raditi nakon dvije ili tri godine.

Proizvođači konstantno unapređuju litij-ion baterije. Nove i poboljšane kemijske kombinacije se uvode u upotrebu svakih šest mjeseci, te je stoga teško odrediti kako će baterije starjeti. Skladištenje baterija na hladnom mjestu je jedan od načina koji usporava starenje baterija. Proizvođači preporučuju skladištenje na temperaturama oko 15°C, a baterija bi pritom trebala biti djelomično napunjena (oko 40%). [9]

Litij-ion baterije spadaju pod opasnu robu, te su stoga zabranjene kao roba za prijevoz putničkim zrakoplovima od strane ICAO-a (i dalje se mogu prevoziti teretnim zrakoplovima). Razlog takvoj zabrani je veliki rizik od požara i teškom obuzdavanju istog zbog gustoća samih baterija.

Neovisno o rizicima zapaljenja, litij-ionske baterije se koriste na jednom od najmodernijih putničkih zrakoplova na svijetu, Boeingu 787 Dreamlineru (Sl. 8). Iako 787 kao primarni izvor električne energije koristi 6 generatora (po dva na glavnim motorima i dva na APU), također koristi i dvije primarne punjive litij-ionske baterije - bateriju za operacije na tlu i kočenje, te jednu APU bateriju koja se koristi za pokretanje APU-a.



Slika 8: Baterija B787 Dreamlinera, izvor: http://787updates.newairplane.com/787-Electrical-Systems/Batteries-and-Advanced-Airplanes

Nakon dugog i opsežnog testiranja Boeing izabire litij-ionsku bateriju zbog sposobnosti da isporuči veliku količinu snage u kratkom vremenu, te tako obavi zadatke koji zahtijevaju takve sposobnosti, kao što je startanje motora. Druga glavna prednost joj je sposobnost punjenja u relativno kratkom vremenu, što ju čini idealnom u slučaju opasnosti za vrijeme leta zrakoplova. Litij-ionska baterija B787 teži 30% manje nego NiCd baterija (otprilike veličine automobilskog akumulatora). Svaka baterija B787 sadrži osam ćelija, ukupne snage 32V DC. Jakost struje za pokretanje motora iznosi 150A, sa težinom baterije od 28.6 kg. Zbog dizajna sa višestrukim viškovima baterije, zrakoplov može sigurno nastaviti letjeti i u slučaju otkaza takve baterije. [10]



Slika 9: Smještaj baterija na B787, izvor: http://787updates.newairplane.com/787-Electrical-Systems/Batteries-and-Advanced-Airplanes

5.3. Litij-polimer baterije

Litij-polimer baterija (također poznata kao Li-Poly, LiPo, LIP) je punjiva baterija na bazi litija. Nasljednica je litij-ionske baterije od koje je tehnološki i modernija, te tako spada u drugu generaciju litijevih baterija.

Zbog litijevih elektroda ovakva baterija je vrlo lagana, te ima veliku gustoću energije koja je skoro dvostruko veća od obične NiMH baterije. LiPo baterija ima veći nazivni napon od napona koji je u baterijama na bazi nikla, ali za razliku od NiCd baterija nije ju nužno održavati, jer nije podložna štetnim efektima poput memorijskog efekta kad ju se ne koristi niti kristalizacijskog. Zbog toga nema potrebe za periodičkim pražnjenjem, a može se puniti u bilo kojem vremenu. Novina u tehnologiji kod ovih baterija je elektrolit. Čini ga polimer koji se može oblikovati u razne oblike, što baterije prethodnih generacija nisu bile u mogućnosti.

Litij-polimer baterija radi na principu umetanja i izvlačenja litijevih iona iz pozitivne i negativne elektrode, sa tekućim elektrolitom koji osigurava vodljivo sredstvo. Mikroporozni separator se stavlja između dviju elektroda kako bi se spriječio dodir između dviju elektroda, omogućavajući samo prijenos iona sa jedne na drugu stranu. Napon LiPo ćelija ovisi o kemijskom sastavu svake pojedine ćelije, te varira između 2.7 – 3 V (nenapunjena), pa do 4.2 – 4.35 V (napunjana).

Litij-polimer baterije imaju fleksibilno kućište folijskog tipa, te su zato do 20% lakše nego druge litijske baterije. Zbog male težine imaju prednost kad se uzimaju u obzir zahtjevi za što manju težinu, ali dolazi do problema kod pritiska na takva kućišta te baterije pritom gube kapacitet. Ostali problemi ovakvih baterija su prepunjenost, prevelika ispražnjenost, povećana temperatura, te kratki spoj koji mogu dovesti do otkaza rada baterije. Zbog prepunjenosti može doći do proširenja baterije uzrokovano isparavanjem elektrolita. [11]

Prednosti litij-polimer baterija:

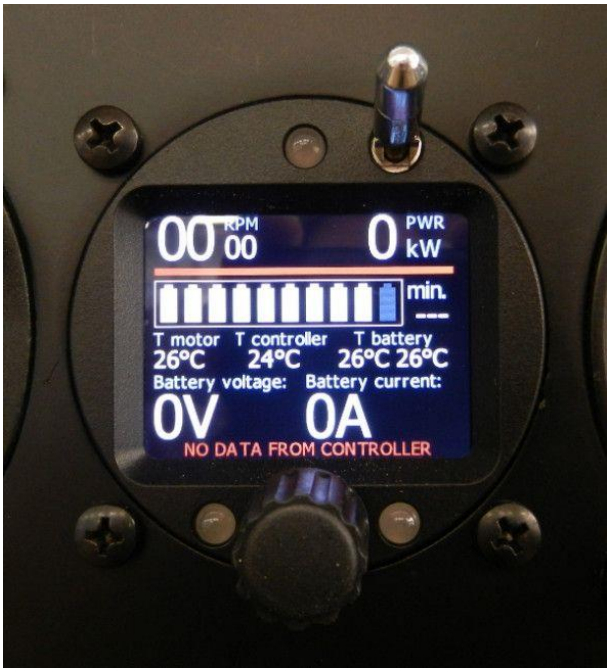
- Jako su tanke
- Vrlo se lako proizvode u različitim oblicima i veličinama
- Lagane su
- Povećana sigurnost (izdržljivija na prepunjenost i manja šansa za curenje elektrolita)

Nedostaci litij-polimer baterija:

- Manja energetska gustoća od litij-ionskih baterija
- Skupe za proizvodnju
- Ne postoji standardna veličina
- Veći odnos trošak-energija u odnosu na litij-ionske baterije

Litij-polimer baterije nalaze sve veću upotrebu u zrakoplovstvu, a najviše u modernim koncepcijama električnih, MEA i *All Electric Aircraft* – AEA. Jedan od takvih zrakoplova je i Silent 2 Electro, kojeg pogone dvije litij-polimer baterije sa kapacitetom od 4.3 kWh. Svaka baterija teži 15.5 kg, a smještaj im je blizu centra težišta zrakoplova. Baterije su lagano dostupne i prenosive, te se mogu puniti bilo gdje kada ih se izvadi iz zrakoplova. Za razliku od NiCd baterija LiPo baterije gube na napunjenosti oko 1% mjesečno pri ambientalnoj temperaturi. Litij-polimer baterija osim samog zrakoplova pogoni i sve električne uređaje na njemu. Životni vijek joj se procjenjuje na 1500 ciklusa punjenja, a nakon toga baterija daje oko 70 – 80% svoje maksimalne napunjenosti.

Postoji veliki raspon zrakoplova sa primjenom litij-polimer baterija, a najpoznatiji su Solar Impulse, Cri-Cri, GT4, Pioneer Alpi 300, Electro G2, E430 Yuneec, itd.



Slika 10: Prikaznik stanja napunjensoti baterija na zrakoplovu Silent 2 Electro, izvor: http://soaringcafe.com/2014/02/flying-the-fes-equipped-silent-2-electro/

5.4. Gorive ćelije

Goriva ćelija (ili gorivi članak) je elektrokemijski uređaj koji omogućuje neposrednu pretvorbu kemijske energije u istosmjernu električnu energiju i toplinu. Jedan od glavnih razloga zašto su gorive ćelije upravo toliko zanimljive kao izvor energije i sve češće korištenije je to što su ekološki prihvatljive.

Postoji više inačica gorivih ćelija, no sve se baziraju na istome principu rada. Sam princip rada je sličan klasičnim baterijama (vrši se pretvorba iz kemijske u električnu energiju), no zahtjeva stalan dotok reaktanata: goriva i kisika. Kemijski proces koji se odvija suprotan je elektrolizi vode. Goriva ćelija sastoji se od tri dijela: anode, katode i elektrolita. Elektrolit se nalazi između elektroda, na koje se priključuje uređaj koji se napaja. Elektrode su prekrivene slojem katalizatora koji pospješuje reakciju. Na anodu se dovodi gorivo, što može biti vodik, metanol, prirodni ili sintetički plin, a na katodu se dovodi oksidans, što je gotovo uvijek kisik.

Reakcije na elektrodama su:

Anoda: $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$

Katoda: $O_2 + 4e^- + 4H^+ \rightarrow 2H_2O$

Na anodi katalizator oksidira gorivo, pretvarajući ga u pozitivno nabijene ione i negativno nabijene elektrone. Elektrolit je tvar koja propušta ione, ali ne i elektrone. Oslobođeni elektroni putuju kroz žicu tako stvarajući električnu struju. Ioni putuju kroz elektrolit do katode. Na katodi se ioni ponovno spajaju s elektronima i reagiraju s trećom kemikalijom (kisikom), tako stvarajući vodu ili ugljikov dioksid. Konačan rezultat tih reakcija je stvaranje istosmjerne električne struje, topline i nusprodukta u obliku vode ili ugljikovog dioksida. [12]

Lange Aviation i Njemački centar za zrakoplovstvo i svemirske letove (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfart) razvili su zrakoplov na pogon vodikovim gorivim ćelijama Antares DLR-H s nultom emisijom CO2 i sa puno manje buke nego slične letjelice. Nakon ispitnih letova u Antaresu, DLR namjerava instalirati gorivu ćeliju u svom Airbusu A320, gdje će ona biti optimirana za upotrebu u širokotrupnom zrakoplovu radi opskrbe električnom

energijom unutar zrakoplova. Gorive ćelije bi gotovo potpuno mogle zamijeniti sve generatore struje na putničkim zrakoplovima, ali iz sigurnosnih razloga neće. Preuzet će puno raznih poslova pa će tako uštedjeti do 19% goriva aviona na tlu i do 15% u zraku sa blokom gorivih ćelija snage 100 kW ugrađenih u rep A320. Voda koja je nusprodukt gorivih ćelija koristit će se za razne potrebe u zrakoplovu, a dušik kao drugi nusprodukt će se koristiti kao potiskivač otvorenog plamena zamjenjujući današnje protupožarne sustave temeljene na halonskim aparatima za gašenje požara. [13]

Boeing isto testira gorive ćelije kao pogon zrakoplova i za opće korištenje u zrakoplovstvu, te je u tu svrhu izveo prvi let avionom isključivo pokretanim energijom iz vodikovih gorivih ćelija. Kao letjelica za pokusni let odabran je dvosjed Dimona od austrijskog proizvođača Diamond Aircraft, koji je modificiran na način da mu je ugrađen hibridni sustav gorivih ćelija sa polimernom membranom kao elektrolitom i litij-ionskim baterijama, koji pokreće električni motor priključen na konvencionalni propeler. Inženjeri iz Boeinga su uvjereni da se gorive ćelije potencijalno mogu primjenjivati u manjim letjelicama, dok bi u većim zrakoplovima mogle biti dio sekundarnog sustava napajanja. U ovom trenutku ne vide primjenu gorivih ćelija kao primarnih sustava napajanja u velikim putničkim zrakoplovima.



Slika 11: Smještaj gorivih ćelija u A320 DLR-a, Izvor:
http://aerosvijet.com/index.php?option=com_content&view=article&id=2706:airbus-tvrdi-da-e-utedjeti-jo-15-posto-goriva-zamjenom-apu-motora-gorivim-elijama&catid=2:inozemstvo

5.5. High Output Generator

Većina modernih visoko-izlaznih generatora su dijelovi modernih mlaznih korporativnih (bizjet) zrakoplova. Takvi mali poslovni mlažnjaci i turboprop zrakoplovi sadrže generator i starter kombiniran u istom kućištu (starter-generator). Na taj način se štedi na prostoru i težini. Starter-generator služi za pokretanje motora zrakoplova i snabdijevanje električnom energijom.

Starter-generator se sastoji od dvije navoja polja. Jedno polje služi za startanje motora, a drugo za proizvodnju električne energije. Tijekom startanja, GCU (*Generator Control Unit*) mora energizirati serijsko polje i armaturu, te se u tom slučaju starter-generator ponaša kao motor. GCU je jedinica koja regulira napon, diferencijalni naapon, sprječava preopterećenje, sprječava prevelik napon i regulira paralelne operacije generatora. [2]

5.6. AC generator stabilne frekvencije

Osnovni zahtjev sustava za napajanje stabilne frekvencije je konstantna frekvencija izlaznog napona u granicama od 400 Hz +/- 5%. Stabilnost frekvencije na izlaznim stezaljkama generatora moguće je općenito postići jedino održavanjem konstantnog broja okretaja njegovog rotora. AC generatori stabilne frekvencije ne mogu postići sami takav konstantan broj okretaja, stoga se koriste sustavi koji održavaju konstantnu brzinu vrtnje njihovih rotora.

Metode koje to omogućuju su: pokretanje generatora s pomoću motora s unutarnjim izgaranjem konstantne brzine vrtnje – metoda „elektroagregata“, zatim pogon s pomoću zračne turbine kojoj elektronički sklopovi putem ventila reguliraju tok zraka iz kompresora mlaznog motora (*Bleed Air*), te se koristi sustav CSD (*Constant Speed Drive*) i IDG (*Integrated Drive Generator*). Metoda elektroagregata se više ne koristi u zrakoplovima zbog težine i volumena, već samo kao aerodromski izvor. *Bleed Air* metoda se isto sve manje koristi zbog težine sustav, te značajno smanjuje snagu motora na polijetanju. CSD i IDG su metode koje se danas najviše koriste u velikim putničkim zrakoplovima. [1]

CSD je mehanički sklop pokretan hidraulikom preko kojeg se spaja zrakoplovni motor i generator. CSD osigurava da generator radi pri konstantnoj frekvenciji od 400 Hz, tako da sustav stabilizira broj okretaja pri promjenama snage od *idle* do max. RPM. CSD ima svoju posebnu zalihu ulja, te po potrebi može biti isključen u zraku u slučaju kvara ili pregrijavanja.

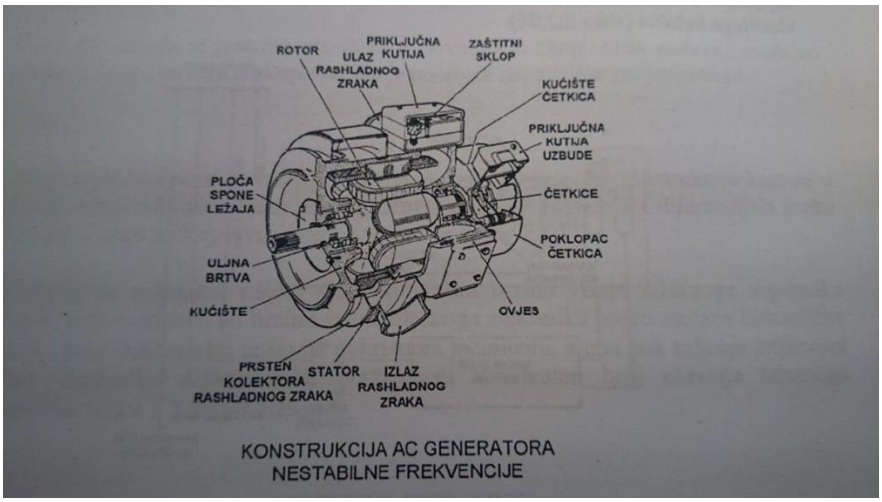
Većina današnjih zrakoplova sadrži CSD koji je opremljen QAD (*Quick Attach/Detach*) adapterom, koji omogućuje brzu i laganu zamjenu cijelog sustava. Noviji zrakoplovi imaju IDG koji ima CSD i generator projektiran u isto kućište.

5.7. AC generatori nestabilne frekvencije

Kada je AC generator pokretan direktno preko motora, ne može se ostvariti konstantna frekvencija osim ako se motor ne okreće konstantnom brzinom vrtnje. Stoga su ovi tipovi generatora mehanički vezani na pogonske motore i njihov je broj okretaja, te frekvencija i napon na stezaljkama direktno ovisan o broju okretaja motora.

AC generatori nestabilne frekvencije (Sl. 12) ne mogu raditi u paralelnom spoju, stoga se ne može postići pouzdanost opskrbljenosti strujom, a što bi se inače moglo učiniti povezivanjem više AC generatora stabilne frekvencije u paralelni spoj. Nestabilna frekvencija nije pogodna za velik broj AC potrošača, ali se naprimjer koristi kod grijača sustava odleđivanja. Svi drugi potrošači koriste DC izvor zbog pouzdanosti opskrbom, koja se postiže paralelnim izvorima. [2]

Veliki zrakoplovi koriste ovaj tip generatora kao glavni izvor napajanja sustava grijanja, odleđivanja i osvjetljenja preko AWC (*AC Wild*) sabirnice, ali se najčešće koristi u APU ili kao neovisan pričuvni (*Backup*) generator. AC *Frequency-wild* generatori, što im je i drugi naziv se najčešće koriste kao glavni AC izvor u novijim koncepcijama izvora električne energije na velikim zrakoplovima, a pomoću elektroničkih pretvarača VSCF (*Variable Speed Constant Frequency*) stabiliziraju frekvenciju. Jednostavnost ovakvog tipa hibridnog sistema je atraktivan za male mlazne zrakoplove kao što je *Hawker 800,* te turboprop zrakoplove. [1]



Slika 12: Konstrukcija AC generatora nestabilne frekvencije, Izvor: Tino Bucak: "Zrakoplovni elektrosustavi"

5.8. VSCF elektronički pretvarač

VSCF (*Variable Speed Constant Frequency*) je sustav AC/AC pretvorbe s pomoći ciklokonvertera, koji koristi beskontaktni AC generator nestabilne frekvencije sa regulacijom napona. Takav generator napaja sve potrošače preko jedinice koja sadrži ispravljač i statički inverter. Rezultat takve koncepcije je konstantna frekvencija i regulirani izlazni napon.

Održavanje koje zahtijeva CSD se temelji na hidro-mehaničkim strojevima, te za razliku od VSCF koji je kompaktan uređaj sa ventilatorskim hlađenjem i zbog toga zahtijeva malo održavanja, CSD je mehanički složeniji i ne sasvim pouzdan, te se slabo radi na njegovom daljnjem razvoju. Ipak, zbog niske cijene je još uvijek konkurentan ostalim sustavima generiranja električne energije, pa se ugrađuje i dalje u komercijalne zrakoplove. [1]

VSCF pretvorba se počela upotrebljavati na nekim dvomotornim zrakoplovima reda veličine B737, MD-90 i nekim većim komercijalnim zrakoplovima. Sustav je namijenjen da bude pouzdaniji od trenutačnih i prošlih električnih sustava zrakoplova koji se temelje na IDG ili CSD tehnologiji. Također bi trebao smanjiti težinu kada se eliminiraju teški sustavi IDG i CSD.

5.9. VSCF DC Link

VSCF DC Link je sustav AC/AC pretvorbe s DC međufazom. Mogućnost visokog napona i tranzistora velike snage omogućuju DC Link konverterima sa varijabilnom ulaznom ali konstantnom izlaznom frekvencijom, izvor energije konstantne frekvencije od zrakoplovnog generatora. Takva koncepcija je jako dobra alternativa za CSD mehaničke uređaje.

Vrijeme i troškovi održavanja takvog sustava se znatno smanjuju zbog jednostavnosti popravka i zamjene, male potrebe za održavanjem, te mogućnosti lakog lociranja komponenti električnog sustava kroz zrakoplov. DC Link sustav može biti fizički odvojen ili integriran u jedno kućište.

DC Link sustav se sastoji od generatora varijabilne brzine i frekvencije, koji nije primjeren za upotrebu u zrakoplovu; međutim, napon promjenjive frekvencije se pretvara konverterima u napon konstantne frekvencije pomoću poluvodičkih sklopova, te tako pretvara u napon pogodan za upotrebu na zrakoplovu.

Generator se pokreće izravno preko zrakoplovnog motora, stoga njegova brzina i izlazna frekvencija variraju prema brzini motora. Varijabilni trofazni napon se prenosi do puno-valnog ispravljača, gdje se pretvara u DC napon i filtrira. DC napon se invertira u trofazni AC napon frekvencije 400 Hz.

Sustav DC Linka i ciklokonvertera sadrže specifične prednosti naspram CSD tehnologije. Zamjenom mehaničko-hidrauličkog CSD-a konverterima se povećava pouzdanost sustava generiranja električne energije. Također, eliminirane su varijacije frekvencije izlaznog napona svojstvene CSD sustavu. Najkritičniji dio DC Linka je dizajn invertera i elementi regulacije snage (tranzistori i komutacijske diode), gdje će tranzistori kontrolirati sav protok energije do opterećenja. [14]

5.10. 270V DC pretvorba

270V DC je koncepcija AC/DC pretvorbe visokog DC napona. Koncepcija se temelji na neposrednom ispravljanju visokog napona generatora i zatim naknadne konverzije DC/DC odnosno DC/AC, u ovisnosti o potrebama potrošača. [1]

Glavni razlog uvođenja 270V DC sustava je povećana gustoća snage i kapaciteta. Noviji pak interesi su zbog dizajniranja sve većeg broja modernih lovačkih zrakoplova sa smanjenim radarskim odazivom (tzv. *stealth*). Naime, AC sustavi kao što su 400 Hz su puno lakše uočljivi na radaru nego DC sustav. [15]

Zrakoplovi nove generacije kao što su F/A-22 Raptor i JSF (Joint Strike Fighter) F-35 Lightning, zahtijevaju sustav veće preciznosti, bržeg odgovora i specifičnih zahtjeva skrojenih prema proizvođaču zrakoplova. Noviji zrakoplovi sadrže mnogobrojne električki pokretane hidrauličke aktuatore na svim kontrolnim površinama, te zbog toga postoji potreba za električnim sustavom koji će moći odgovoriti zahtjevima brze promjene opterećenja pri osiguravanju konstantnog napona. Zbog takvih zahtjeva sustav 270V DC je iniciran i podržan od strane *US Navy/Naval Air Development Centre* (NADC). [15]

270V DC se lagano može dobiti iz naponskog standarda od 200V/60Hz, koji se koristi na nosačima zrakoplova. Takav sustav također omogućuje efikasan sustav konstantne snage dobiven iz generatora nestabilne frekvencije, a izvori se nakon obavljenog procesa ispravljanja napona jednostavno povezuju u paralelan rad. [1]



Slika 13: 270V DC zrakoplovni kabel, izvor: http://www.aviationpros.com/product/12237205/mcm-engineering-inc-270v-dc-aircraft-cable

5.11. Distribucijski sustav AC 20 kHz

Distribucijski sustav AC frekvencije 20 kHz je koncepcija prijenosa električne energije na višim frekvencijama. Sustav se temelji na jednofaznom, 20 kHz sustavu, sa reguliranom sinusoidalnom formom valova.

Osnovna ideja uporabe više frekvencije je temeljena na tome da jednofazni sustav minimalizira upotrebu žica, senzora i manje je kompleksan od višefaznih električnih sustava. Operacijska frekvencija od 20 kHz je odabrana da bude iznad razine čujnosti, minimizirajući težinu reaktivnih komponenti, uz konstrukciju pojedinačnih dijelova snage od 25 do 30 kW.

Regulirani sinusoidalni distribucijski sustav sadrži više dobrih strana. Regulirani napon omogućava AC/DC konverzije sa upotrebom jednostavnog ispravljača. Elektromagnetska interferencija je minimalizirana upotrebom sinusoidalnog distribucijskog sustava zajedno sa „*Zero Crossing*“ prekidačima.

Trenutačna tehnologija frekvencije 20 kHz uključuje kompjutoriziranu kontrolu napona i/ili frekvencije, kabel malog induktiviteta, zaštitu strujnog kruga limitirane struje, višesmjerni protok snage, te rad motora/generatora upotrebom standardnih asinkronih strojeva. [16]

6. Zaključak

Zbog sve većeg broja potrošača u modernim putničkim zrakoplovima, te sve većoj potrebi za velikim kapacitetom struje i sigurnosti opskrbe cijelog sustava inženjeri razvijaju nove koncepcije akumulatora (baterija) i generatora, koji će zadovoljiti potrebe današnjih najnovijih zrakoplova kao što su Boeing B787 „*Dreamliner*“ i Airbus A380 koji se smatraju jednim od najvećih potrošača električne energije među zrakoplovima.

Sigurnost, koja je ključan parametar u zrakoplovstvu, koči brzu primjenu novih koncepcija suvremenih izvora električne energije, te stoga imamo velike vremenske periode između otkrića gotovog proizvoda i njegove implementacije u sustav zrakoplova. Pouzdanost rada sustava je ipak najvažnija stvar u zrakoplovstvu, te je s time i razumljivo dugotrajno testiranje i uvođenje u upotrebu novih koncepcija.

Kemijski izvori su napravili veći korak razvoja u proteklim godinama, pa stoga imamo velik broj baterija koje se danas već primjenjuju u malim zrakoplovima kao glavni izvori električne energije, ali i kao za pokretanje cijelog zrakoplova na električni pogon. Veliki putnički zrakoplovi sve više počinju koristiti baterije novih koncepcija kao što su litij-ionske, litij-polimer, te gorive ćelije za određene potrošače ili čak kao zamjena za APU, ali još ne vide veću primjenu takvih sustava zasada. Što se tiče pretvorbe električnih parametara, tu postoji par koncepcija koje najviše promovira vojna industrija, kao što su VSCF, VSCF DC Link, pretvorba 270V DC, VVVF, te zrakoplovna AC mreža temeljena na frekvenciji od 20 kHz.

Literatura

1) Bucak Tino: „*Zrakoplovni elektrosustavi*“, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet Prometnih znanosti, Zagreb (2001.,2011.)
2) Nordian AS: Electrics, London (2010.)
3) https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93iron_battery (26. lipanj 2016.)
4) http://www.mycity-military.com/Vazduhoplovno-naoruzanje-i-oprema/Izvori-elektricne-energije-na-avionu.html (28. lipanj 2016.)
5) https://en.wikipedia.org/wiki/Constant_speed_drive (28. lipanj 2016.)
6) http://www.alxion.com/permanent-magnet-generator/ (02. srpanj 2016.)
7) http://www.skybrary.aero/index.php/Ram_Air_Turbine (03. srpanj 2016.)
8) https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery (03. srpanj 2016.)
9) http://batteryuniversity.com/learn/archive/is_lithium_ion_the_ideal_battery (05. srpanj 2016.)
10) http://787updates.newairplane.com/787-Electrical-Systems/787-Electrical-System (12. srpanj 2016.)
11) https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_polymer_battery (12. srpanj 2016.)
12) https://hr.wikipedia.org/wiki/Gorivi_%C4%8Dlanak (06. kolovoz 2016.)
13) http://aerosvijet.com/index.php?option=com_content&view=article&id=2706:airbus-tvrdi-da-e-utedjeti-jo-15-posto-goriva-zamjenom-apu-motora-gorivim-elijama&catid=2:inozemstvo (24. kolovoz 2016.)
14) Ahmad Rahal: „Design of a Static Frequency Converter Suitable for Aircraft Power Systems“, Dublin City University, School of Electronic Engineering, Dublin (1991.)
15) http://www.fcxinc.com/benefits-of-270-vdc-in-the-aviation-industry/ (04. rujan 2016.)

16) Irving G. Hansen: „Description of a 20 Kilohertz Power Distribution System“, San Diego, California (1986.)

Popis oznaka i kratica

A – Amper (hrv. amper)

AC – Alternating Current (hrv. izmjenična struja)

ACW – AC Wild (hrv. izmjenična struja nestabilne frekvencije)

ADG – Air Driven Generator (hrv. generator pogonjen na zrak)

AEA – All Electric Aircraft (hrv. zrakoplov na električni pogon)

Ah – Amper hour (hrv. amper sat)

Amps – Ampers (hrv. amperi)

APU – Auxiliary Power Unit (hrv. pomoćna jedinica za napajanje)

CFG – Constant Frequency Generator (hrv. generator konstantne frekvencije)

CSD – Constant Speed Drive (hrv. konstantna brzina vrtnje)

DC – Direct Current (hrv. istosmjerna struja)

DLR – Deutsches Zentrum Für Luft (hrv. njemačka svemirska agencija)

EE – Electric Energy (hrv. električna energija)

EMS – Elektro-motorna sila

EPU – External Power Unit (hrv. vanjski izvor energije)

EPU* - Emergeny Power Unit (hrv. izvor energije u nuždi)

ETOPS – Extended-range Twin-engine Operation Performance Standards (hrv. operacijski standardi za dvomotorni dugometni zrakoplov)

G – Gravity (hrv. gravitacija)

GCU – Generator Control Unit (hrv. kontrolna jedinica generatora)

GPU – Ground Power Unit (hrv. zemaljski izvor energije)

g/cm^3 – gram per centimeter cubed (hrv. gram po centimetru kubnom)

Hz – Herz (hrv. herc)

IDG – Integrated Drive Generator (hrv. integrirana brzina vrtnje generatora)

JSF – Joint Strike Fighter (hrv. zajednički udarni lovac)

Kg – kilogram (hrv. kilogram)

Kg/m^3 – kilogram per meter cubed (hrv. kilogram po metru kubnom)

kVA – kilo Volt Amper (hrv. kilo volt amper)

kHz – kilo Hertz (hrv. kiloherc)

kW – kilo Watt (hrv. kilovat)

kWh – kilo Watt hour (hrv. kilovat sat)

MEA – More Electric Aircraft (hrv. više električni zrakoplov)

Min – minute (hrv. minuta/e)

NADC – Naval Air Development Centre (hrv. mornarički razvojni centar)

PMG – Permanent Magnet Generator (hrv. sinkroni beskontaktni AC generator)

QAD – Quick Attach/Detach (hrv. brzo pričvrstiti/odčvrstiti)

RAT – Ram Air Turbine (hrv. zračna turbina)

RPM – rotations per minute (hrv. okreti u minuti)

V – Volt (hrv. volt)

VRLA – Valve-Regulated Lead-Acid (hrv. baterija olovne kiseline sa regulacijom ventila)

VSCF – Variable Speed Constant Frequency (hrv. varijabilna brzina konstantna frekvencija)

VVVF – Variable Voltage Variable Frequency (hrv. varijablini napon varijabilna frekvencija)

Wh/kg – Watt hour per kilogram (hrv. vat sat po kilogramu)

Popis slika

Slika 1: Leclancheov suhi članak 3

Slika 2: Dijelovi olovnog akumulatora 5

Slika 3: Oštećenje nikal-kadmij ćelija uzrokovano toplinskim bijegom 7

Slika 4: Presjek samouzbudnog DC generatora 14

Slika 5: CSD za zrakoplov Boeing 727 16

Slika 6: AC PMG 17

Slika 7: Zrakoplovni GPU 19

Slika 8: Baterija B787 Dreamlinera 23

Slika 9: Smještaj baterija na B787 24

Slika 10: Prikaznik stanja napunjensoti baterija na zrakoplovu Silent 2 Electro 26

Slika 11: Smještaj gorivih ćelija u A320 DLR-a 28

Slika 12: Konstrukcija AC generatora nestabilne frekvencije 31

Slika 13: 270V DC zrakoplovni kabel 33

METAPODACI

Naslov rada: Analiza značajki suvremenih izvora električne energije na zrakoplovu

Student: Tino Kirin

Mentor: prof. dr. sc. Tino Bucak

Naslov na drugom jeziku (engleski):

Analysis of contemporary electrical energy sources on aircraft

Povjerenstvo za obranu:

- Doc. dr. sc. Anita Domitrović predsjednik
- Prof. dr. sc. Tino Bucak mentor
- Dr. sc. Jurica Ivošević član
- Izv. Prof. dr. sc. Željko Marušić zamjena

Ustanova koja je dodijelila akademski stupanj: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu

Zavod: Zavod za aeronautiku

Vrsta studija: Preddiplomski

Studij: Aeronautika (npr. Promet, ITS i logistika, Aeronautika)

Datum obrane završnog rada: 13.09.2016.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj završni rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog rada pod naslovom **Analiza značajki suvremenih izvora električne energije na zrakoplovu** na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student/ica:

U Zagrebu, 6.9.2016 Tino Kirin

(potpis)