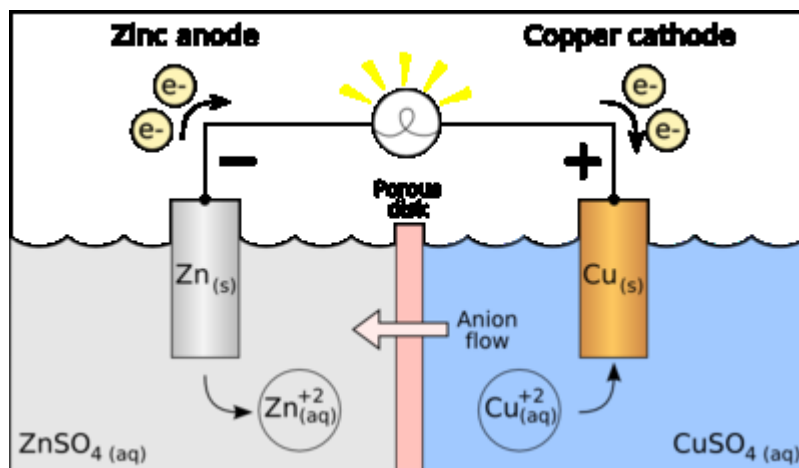


## Baterije kao izvori struje u zrakoplovima

- › Svi galvanski članci (baterije) rade na principu kemijske reakcije između krutih, najčešće metalnih (Pb, Ni, Cd, Li, Zn, Ag, ...) elektroda (anode i katode) koje su uronjene u elektrolit (koji je u principu tekući, ali može biti i u gel fazi ili apsorbiran u neakve strukture kako se ne bi prolijevao)



Slika 1 - Shematski model rada galvanskog članka (baterije)

- › Glavna podjela baterija odnosno galvanskih članaka<sup>1</sup> je na primarne i sekundarne, koje nazivamo akumulatorima

### Primarne baterije:

- › jednokratne odnosno ne punjive jer kemijska reakcija nije reverzibilna
- › pokušaj punjenja takvih baterija može dovesti do puknuća ili čak eksplozija
- › na zrakoplovima se koriste samo za ručne svjetiljke i slične ne kritične namjene
- › uglavnom su *alkalijske* - tako se zovu zbog elektrolita, kalij hidroksida (KOH), a ne zbog elektroda (u pravilu cink - Zn i mangan - Mn)

### Sekundarne baterije (akumulatori):

- › punjive jer se kemijska reakcija koja stvara razliku potencijala na elektrodama može odvijati i u suprotnom smjeru – *reverzibilna* je
- › akumulator se puni tako da kroz njega pustimo struju u suprotnom smjeru (spojimo drugi DC izvor „+“ na „+“ i „-“ na „-“ sa većim naponom nego ga akumulator generira)

<sup>1</sup> Baterija (*engl. battery*) se sastoji od jednog ili više galvanskih članaka (*engl. cell*)

- › na zrakoplovima primarno služe kao pomoćni izvori napajanja za ključne sustave u slučaju nužde, dakle u slučaju otkazivanja primarnih izvora struje (generatora), te za pokretanje motora aviona kada nije prisutno vanjsko napajanje
  - u slučaju da otkazu motor(i) ili generatori vezani na motor(e) te da zatim i APU zakaže, akumulator preuzima napajanje ključnih sustava (dok se RAT (*ram air turbine*) ne osposobi, ako postoji)
- › također zbog svojeg velikog kapaciteta glavni zrakoplovni akumulator obavlja ulogu filtra i prigušivača tranzijenata, naglih kratkotrajnih smetnji, preopterećenja i sličnih poremećaja u električnoj mreži zrakoplova (ukratko – stabilizira struju i napon samom činjenicom da je spojen u sustav)
- › zrakoplovu u pravilu ima jedan glavni akumulator za cijeli zrakoplov te jedan zasebni za APU (*auxiliary power unit*)
- › akumulatori na zrakoplovu u pravilu imaju izvedena 2 para kontakata: jedne (glavne) za spajanje na električnu sabirnicu i druge za spajanje na kontrolni sustav (najčešće barem senzori za temperaturu i pregrijavanje s mogućnosti daljinskog odspajanja akumulatora sa mreže u slučaju problema)
- › postoji više vrsta galvanskih članaka koji se upotrebljavaju za izradu zrakoplovnih akumulatora, svaki sa svojim prednostima i manama s obzirom na namjenu; najčešći odnosno najvažniji (povijesno i trenutno) su:
  - **olovni** (Pb, engl. *lead-acid*)
  - **srebro-cinčani** (AgZn, engl. *silver-zinc*)
  - **nikal-kadmijski** (NiCd, engl. *nickel-cadmium*)
  - **litij-ionski, litij-polimerski** (Li-ion, LiPO, engl. *lithium-ion, lithium-polymer*)
- › neki od osnovnih parametara za procjenu prednosti i mana akumulatora pri uporabi u zrakoplovima su:
  - volumna i masena **gustoća energije** (energija po jedinici volumena – Wh/L, odnosno mase<sup>2</sup> - Wh/kg)
  - vršna snaga (W/kg; isto što i maksimalna struja (budući da je napon poznat i konstantan) – važno za pokretanje motora)
  - stabilnost/konstantnost struje, napona i kapaciteta (u ovisnosti o temperaturi, struji itd.)
  - ispuštanje štetnih para i mogućnost izlivanja (korozivnog) elektrolita
  - mogućnost eksplozije pri nepravilnom rukovanju ili oštećenju
  - dugotrajnost (životni vijek)
  - lakoća održavanja
  - cijena (pri kupnji i u održavanju), itd.

---

2 Masena gustoća energije (engl. *energy density*) naziva se još i **specifična energija** (engl. *specific energy*)

- › neke od općih karakteristika i parametara svih akumulatora su:
  - stvaraju istosmjernu struju točno određenog napona (u idealnom slučaju; realno napon više ili manje pada s pražnjenjem akumulatora)
  - imaju određeni **kapacitet** koji se izražava u:
    - 1) Amper-satima (Ah), što odgovara naboju koji akumulator može dovesti od negativne do pozitivne elektrode kemijskim putem, odnosno koliko dugo može pružati koliku struju (npr. jedan sat struje od 1A jednako je kapacitetu od 1Ah), ili
    - 2) Watt-satima (Wh), što odgovara energiji koju akumulator može proizvesti, a što je jednako kapacitetu u amper-satima pomnoženom sa naponom<sup>3</sup> (koji bi trebao biti konstantan tijekom života akumulatora, ali kao što smo rekli – u praksi nije)
  - kapacitet ovisi o struji pražnjenja, a nominalno je dan (ono što piše na akumulatoru) za neke očekivane, normalne radne struje pražnjenja
  - pri višim strujama kapacitet se smanjuje; to drugim riječima znači da, ako bi akumulator od 10 Ah mogao davati struju od 0.1A sto sati, neće moći davati struju od 1A deset sati nego kraće, a struju od 10A će moći davati znatno kraće od 1 sata
  - doživljavaju **samopražnjenje** – gubljenje energije (kapaciteta) samim stajanjem i nekorištenjem
  - to se, ovisno o vrsti akumulatora, rješava ili skladištenjem bez elektrolita (npr. NiCd) ili spajanjem pri skladištenju na vrlo slabu struju koja će taj efekt poništiti (npr. Pb)
  - **stupanj iskorištenja** (efikasnost) akumulatora je odnos kapaciteta pražnjenja u odnosu na kapacitet punjenja, odnosno koliko energije treba da ih se napuni
  - ovaj parametar nije pretjerano važan za zrakoplovne akumulatore budući da će se akumulatori puniti na zemlji i u održavati punima pri normalnom radu motora

### Olovni akumulatori:

- › olovne elektrode umočene u tekuću sumpornu kiselinu (elektrolit) koja se pretvara u vodu i pritom elektrode prelaze u olovo-sulfat
- › olovo-sulfat se **kristalizira** na elektrode i ako ga se stvori previše (prekriva previše elektrode) onda **blokira** daljnji kemijski proces što uzrokuje smanjenje napona kojeg akumulator daje i s vremenom njegov prestanak rada
- › ograničenja, problemi i prednosti običnih (*flooded*) olovnih akumulatora sa tekućim elektrolitom:
  - 1) relativno osjetljiv na prekomjerno pražnjenje – stvara se sloj olovo-sulfata koji trajno smanjuje kapacitet (ne može se nikada ponovno do kraja „napuniti”)
  - 2) relativno velik i brz gubitak napona sa pražnjenjem (napon koji daje nije konstantan kroz cijeli ciklus pražnjenja)

---

<sup>3</sup> Podsjetnik:  $V \times A = W$  (volt puta amper jednako watt), a  $W \times s = J$  (watt puta sekunda jednako joule)

- 3) relativno mala gustoća energije (teški su)
  - 4) prekomjernim punjenjem dolazi do elektrolize vode pa nastaje plin praskavac (vodik, odnosno  $\text{H}_2$ ) koji je eksplozivan, a i povećava se koncentracija sumporne kiseline što uzrokuje ubrzano nastajanje olovo-sulfata, a što ubrzava smanjenje kapaciteta
  - 5) pri normalnom radu nastaju pare sumporne kiseline koje mogu nagrizzati materijale u avionu, a nastaju i male količine vodika; ti plinovi moraju se odvoditi van trupa aviona, a i akumulator zahtijeva je nadopunjavanje vodom s vremena na vrijeme
  - 6) elektrolit je tekuć pa se može proliti pri značajnom nagibanju ili okretanju akumulatora, odnosno zrakoplova
  - 7) relativno visoki stupanj samopražnjenja ( $\sim 1\%$  dnevno)
  - 8) mali unutarnji otpor, dakle relativno visoki stupanj iskorištenja
  - 9) daleko najjeftiniji i relativno jednostavan za zbrinuti
- › većina ovih problema riješena je napretkom tehnologije izrade olovniha akumulatora na dva načina: elektrolit u gel fazi ili elektrolit zarobljen u pločama od staklenih vlakana (AGM – *absorbed glass mat*)
- takve akumulatore zovemo zatvoreni (*sealed*), za razliku od prvih koje nazivamo potopljeni (*flooded*); također ih se naziva i VRLA (*valve-regulated lead-acid*) akumulatorima jer imaju poseban jednosmjerni ventil za ispuštanje plinova
  - **u zrakoplovima se koriste AGM VRLA akumulatori** zbog većeg kapaciteta
- › Nedostatci olovniha akumulatora koji su riješeni AGM VRLA tehnologijom:
- 1) nastaje puno manje opasnih i korozivnih plinova koji se lakše odvede
  - 2) nema više opasnosti od prolijevanja opasnog elektrolita
  - 3) održavanje je svedeno na minimum (gotovo nepostojeće)
  - 4) povećana gustoća energije, sumjerljiva nikal-kadmijskim akumulatorima ( $\sim 40 \text{ Wh/kg}$ , odnosno  $\sim 100 \text{ Wh/L}$ )
  - 5) značajno smanjeno samopražnjenje (i do  $0.1\%$  dnevno)
- › Glavne **mane** modernih (AGM VRLA) olovniha akumulatora:
- 1) i dalje su osjetljivi na prekomjerno pražnjenje (trajno gube kapacitet)
  - 2) i dalje imaju veliki pad napona kroz ciklus pražnjenja (nije konstantan)
- › Glavne **prednosti** modernih (AGM VRLA) olovniha akumulatora:
- 1) daleko najjeftiniji po jedinici kapaciteta
  - 2) gotovo nikakav trošak i potreba za održavanjem
  - 3) lako i jeftino zbrinjavanje

- › olovni akumulatori (potopljeni) koriste se masovno u autima jer su jako jeftini, a ostali nedostaci nisu toliko važni; u početku su se koristili i u zrakoplovima unatoč svim nedostacima jer nije bilo boljih; kasnije su bili relativno istisnuti nikal-kadmijskim akumulatorima, ali napretkom tehnologije olovni su gotovo u potpunosti nikal-kadmijske sustigli u performansama, a istovremeno zadržali znatno nižu cijenu i ekološki ostali puno prihvatljiviji
- › stoga se danas AGM VRLA akumulatori može naći u mnogim, pogotovo manjim i jeftinijim zrakoplovima

### Srebro-cinčani akumulatori:

- › razvijeni sredinom 20. stoljeća za potrebe letjelica, pogotovo posebne namjene poput odlaska u svemir; prvi nakon olovnih (70-80 godina kasnije)
- › glavne **prednosti** AgZn akumulatora:
  - vrlo visoka gustoća energije, podjednaka modernim Li-ion (100-150 Wh/kg; 300-500 Wh/L), za ono vrijeme deset puta veća od bilo čega drugoga
  - puno sigurnije od Li-ion i Ni-Cd, nema opasnosti od eksplozije, termalnog bijega i sličnih stvari (vidi kasnije)
  - jako konstantan (stabilan) napon pražnjenja kroz cijeli raspon kapaciteta
  - kapacitet relativno neovisan o struji pražnjenja
- › glavne **mane** AgZn akumulatora:
  - kapacitet jako pada s temperaturom, dakle akumulator mora biti grijan
  - velika osjetljivost na napon punjenja i dosta kratak vijek trajanja
  - jako skupe za izradu, a pogotovo uzevši u obzir kratki vijek trajanja
- › zbog navedenoga nisu korištene komercijalno, ali zbog odličnih svojstava koriste se za razne posebne namjene (vojska, svemir, zdravstvo)
- › mogući napredak tehnologije i kompeticija sa Li-ionskim u (bliskoj) budućnosti

### Nikal-kadmijski akumulatori:

- › razvijeni otprilike kada i srebro-cinčani
- › značajno manja gustoća energije i lošije performanse od srebro-cinčanih, ali i značajno jeftiniji, a 2-3 puta bolji od olovnih u to doba
- › sada jednaka gustoća energije kao i (najbolji) moderni olovni (~35 Wh/kg, ~100 Wh/L)
- › imaju karakteristični ventilacijski sustav za odvodnju para i za hlađenje
- › imaju približno jednako samopražnjenje kao olovni, ali se mogu skladištiti bez elektrolita (dakle elektrolit se natoči u njega prije nego se ugradi u zrakoplov)

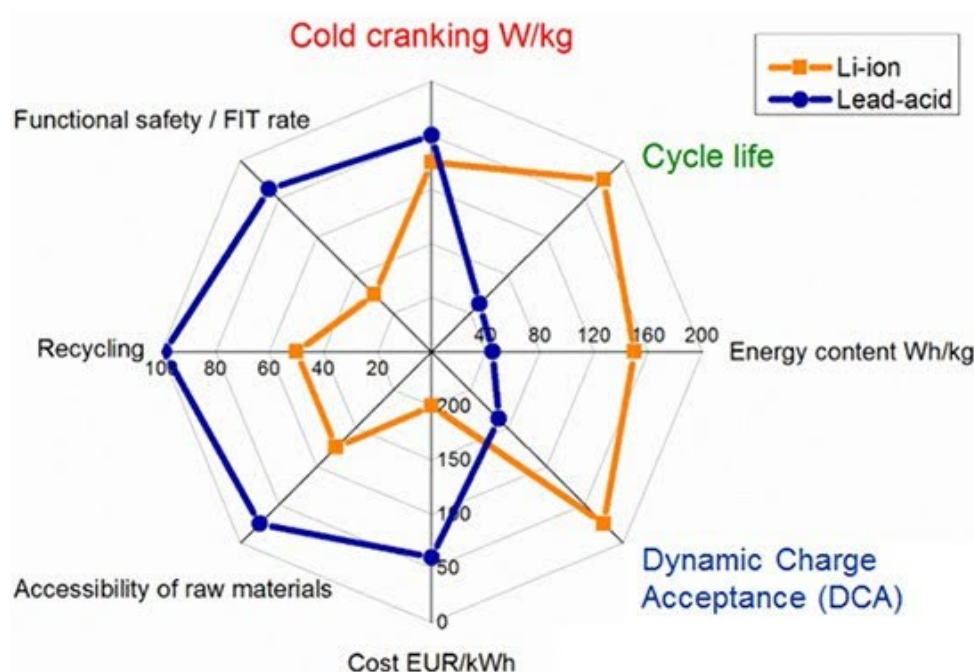
- › glavne **prednosti** NiCd akumulatora:
  - jako dobro podnose i ne oštećuje ih ni prepunjavanje ni naglo i duboko pražnjenje
  - daju stabilan napon kroz cijeli ciklus pražnjenja
  - proizvode paru, ali one nisu toliko problematične kao kod (starih) olovnih
  - zadržavaju dobre karakteristike na širokom rasponu temperatura
  - niske temperature im ne smetaju jer se normalnim radom griju (zato trebaju ventilacijski sustav)
- › glavne **mane** NiCd akumulatora:
  - **osjetljivi na visoke temperature i grijanje**
    - grijanjem dosta brzo gubi kapacitet
    - nakon neke kritične točke daljnjim grijanjem struja naglo raste što uzrokuje daljnje još veće grijanje i baterija se zapali ili eksplodira – **efekt termičkog bijega** (engl. *thermal runaway*)
    - zbog toga treba biti stalno nadgledana (senzori) i treba postojati mehanizam isključivanja iz sustava prije nego se to dogodi
    - s druge strane, s obzirom da je na visinama dok avion leti temperatura jako niska hlađenje nije toliko problem
  - postoji **efekt pamćenja** - mora se prazniti do kraja i puniti do kraja inače trajno gubi kapacitet
  - puno skuplje, štetnije za okoliš i teže za zbrinuti od olovnih
- › sve u svemu, pojavom Li-ionskih akumulatora (koji su skuplji i imaju slične probleme, ali puno bolje performanse) i napretkom tehnologije olovnih akumulatora (koji su sličnih performansi, ali puno jeftiniji), a i razvojem svijesti o ekologiji, Nikal-kadmijski akumulatori bivaju lagano istisnuti s tržišta

| Advantages of Lithium-Ion Batteries                                                                                                                                                                               | Chemistry Feature                                                             | <b>787</b> Lithium-Ion (Lithium Cobalt Oxide)                                                                                     | <b>777</b> Nickel Cadmium (Fibrous)                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• High-power capability</li> <li>• Lower weight</li> <li>• No memory degradation</li> <li>• Improved power quality</li> <li>• Improved charging characteristics</li> </ul> | Voltage (nominal)<br>Maximum weight<br>Current provided for airplane power-up | 32 V (8 cells)<br>63 lb (28.6 kg)<br>150 A<br> | 24 V (20 cells)<br>107 lb (48.5 kg)<br>16 A<br> |

*Slika 2 - usporedba NiCd iz starog 777 modela sa Li-ion iz novog 787 modela Boeinga*

### Litij-ionski (litij-ion polimerski) akumulatori:

- › puno različitih verzija (npr. Litij-kobalt-oksidi na Boeingu 787)
- › polimerske verzije imaju nešto manju gustoću energije, ali su sigurnije i imaju mnoge druge prednosti, a i dalje puno veću gustoću energije od drugih tipova akumulatora
- › glavne **prednosti** litijskih akumulatora:
  - jako visoka gustoća energija ( $\sim 200 \text{ Wh/kg}$ ,  $\sim 500 \text{ Wh/L}$ ); 5x veća od olovnih
  - jako nisko (gotovo nepostojeće) samopražnjenje
  - odsustvo degradacije i „pamćenja”, jednostavno i jeftino održavanje
  - lako se proizvede u bilo-kakvom obliku (polimerske varijante)
- › glavne **mane** litijskih akumulatora:
  - elektrolit je jako zapaljiv, pogotovo u tekućoj (ne polimerskoj) verziji
  - efekt termalnog bijega, dakle velika osjetljivost na visoku temperaturu, u kombinaciji sa grijanjem pri normalnom radu i zapaljivošću elektrolita dovodi do eksplozija
  - puno skuplje od olovnih
- › sve više se koriste u zrakoplovima i dalje razvijaju zbog svojih mnogih superiornih tehničkih karakteristika, pri čemu se računa da se mogu učiniti dovoljno sigurnima zbog sofisticiranih sustava senzora i nadgledanja i mogućnosti isključenja iz mreže u slučaju pregrijavanja i opasnosti od eksplozije



Slika 3 - grafička usporedba VRLA i Li-ion akumulatora; vidi se da su tehničke karakteristike Li-ion akumulatora višestruko bolje, ali da je VRLA akumulator značajno ekonomičniji, sigurniji i ekološkiji