

Određivanje unutarnjeg otpora zrakoplovnog akumulatora

Miser, David

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:119:875201>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-17**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

David Miser

**ODREĐIVANJE UNUTARNJEG OTPORA ZRAKOPLOVNOG
AKUMULATORA**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 15. svibnja 2023.

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

ZAVRŠNI ZADATAK br. 7055

Pristupnik: **David Miser (0135256395)**
Studij: **Aeronautika**
Smjer: **Pilot**
Usmjerenje: **Civilni pilot**

Zadatak: **Određivanje unutarnjeg otpora zrakoplovnog akumulatora**

Opis zadatka:

Analizirati ulogu i namjenu, princip rada, konstrukcijske zahtjeve i vrste zrakoplovnih akumulatora. Objasniti način određivanja unutarnjeg otpora akumulatora. Izmjeriti unutarnji otpor akumulatora zrakoplova Cessna 172 i zrakoplova Diamond DV20. Komentirati i analizirati rezultate mjerenja.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

doc. dr. sc. Jurica Ivošević

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

ODREĐIVANJE UNUTARNJEG OTPORA ZRAKOPLOVNOG AKUMULATORA

AVIATION BATTERY INTERNAL RESISTANCE TEST

Mentor: doc. dr. sc. Jurica Ivošević

Student: David Miser

JMBAG: 0135256395

Zagreb, rujan 2023.

SAŽETAK

U ovom radu analiziran je princip rada akumulatora. Detaljno su razrađene najčešće izvedbe akumulatora u zrakoplovu te su objašnjena konstrukcijska rješenja. Mjerenja unutarnjeg otpora su prikazana na primjeru olovnih akumulatora koji se koriste u zrakoplovu Cessna 172 i Diamond DV20. Rezultati su pokazali da Cessnin akumulator ima manji unutarnji otpor, točnije 0,015 Ω , a Diamondov 0,051 Ω . Analizom je utvrđeno da akumulator zrakoplova Diamond DV20 ima veću sklonost samopražnjenju.

KLJUČNE RIJEČI

Zrakoplovni akumulator; unutarnji otpor; elektromotorna sila; napon akumulatora pod opterećenjem; Cessna 172; Diamond DV20.

SUMMARY

This paper examines the operating principle of batteries. The most common aircraft battery designs are thoroughly discussed, and their structural solutions are explained. Measurements of internal resistance are demonstrated using the example of lead-acid batteries used in the Cessna 172 and Diamond DV20 aircraft. The results indicate that the Cessna battery has significantly lower internal resistance. It has a resistance of 0,015 Ω and the Diamond battery has 0,051 Ω . The analysis revealed that the battery from the Diamond DV20 aircraft exhibits higher self-discharge tendency.

KEYWORDS

Aviation battery; internal resistance; electromotive force; battery voltage under load; Cessna 172; Diamond DV20.

SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Zrakoplovni akumulatori.....	2
2.1. Uloga i namjena akumulatora.....	3
2.2. Načelo rada akumulatora.....	4
2.3. Konstrukcijski zahtjevi akumulatora.....	5
2.4. Smještaj akumulatora.....	7
2.5. Vrste zrakoplovnih akumulatora.....	8
2.5.1. Olovni akumulator.....	8
2.5.2. Nikal-kadmij akumulator.....	12
2.5.3. Srebro-cink akumulator.....	16
2.5.4. Čelični (nikal-željezo) akumulator.....	19
2.5.5. Litij-ionski akumulatori.....	19
3. Unutarnji otpor akumulatora.....	21
4. Određivanje unutarnjeg otpora akumulatora zrakoplova <i>Cessna 172</i>	23
4.1. Općenito o zrakoplovu <i>Cessna 172</i> i električnom sustavu istog.....	23
4.2. Određivanje unutarnjeg otpora akumulatora zrakoplova <i>Cessna 172</i>	25
5. Određivanje unutarnjeg otpora akumulatora zrakoplova <i>Diamond DV20</i>	26
5.1. Općenito o zrakoplovu <i>Diamond DV20</i> i o električnom sustavu istog.....	26
5.2. Određivanje unutarnjeg otpora akumulatora zrakoplova <i>Diamond DV20</i>	27
6. Analiza rezultata.....	28
7. Zaključak.....	29
Literatura.....	30

1. Uvod

Ovaj završni rad obrađuje temu mjerenja unutarnjeg otpora zrakoplovnog akumulatora. Objašnjen je pojam te postupak mjerenja unutarnjeg otpora zrakoplovnog akumulatora i pokrijepljen je na stvarnim mjerenjima na akumulatorima zrakoplova *Cessna 172* i *Diamond DV20*.

Prije toga analizirana je namjena i upotreba, princip rada, konstrukcijski zahtjevi te smještaj zrakoplovnih akumulatora.

Nadalje, obrađena je tema zrakoplovnih akumulatora na primjeru najčešće korištenih vrsta zrakoplovnih akumulatora (olovni, nikal-kadmij, srebro-cink, nikal-željezo) te najnovije vrste (litij-ionski akumulator) koji polako ulazi u upotrebu i predstavlja najizgledniju izvedbu zrakoplovnog akumulatora u budućnosti. Svaka od pojedinih spomenutih izvedbi zrakoplovnih akumulatora je pobliže analizirana.

Cilj završnog rada je analizirati ulogu i namjenu, objasniti princip rada svih vrsta akumulatora koji se koriste u zrakoplovu. Pojasniti konstrukcijska rješenja i izračun unutarnjeg otpora akumulatora zrakoplova *Cessna 172* i *Diamond DV20*. Analizirati izmjerene podatke.

Naziv završnog rada je *Određivanje unutarnjeg otpora zrakoplovnog akumulatora* i podijeljen je u sedam cjelina:

1. Uvod,
2. Zrakoplovni akumulatori,
3. Unutarnji otpor akumulatora,
4. Određivanje unutarnjeg otpora akumulatora zrakoplova *Cessna 172*,
5. Određivanje unutarnjeg otpora akumulatora zrakoplova *Diamond DV20*,
6. Analiza podataka,
7. Zaključak.

2. Zrakoplovni akumulatori

Izvori električne energije opskrbljuju električne potrošače neophodnom energijom, a prema načinu generiranja mogu biti kemijski izvori (galvanski izvori, akumulatori, gorivi članci, termičke baterije) ili generatori (generatori izmjenične struje- AC generatori, generatori istosmjerne struje- DC generatori) koji predstavljaju glavni izvor električne energije za potrošače. Na današnjim zrakoplovima se kao pomoćni izvori električne energije koriste zrakoplovni akumulatori, [1].

Zahtjevi potrošača električne energije, uključujući vrstu struje (DC ili AC) i specifične strujne parametre, ključni su za dizajn sustava izvora. Ovisno o različitim potrebama, sustav mora biti konfiguriran da pruži odgovarajuće napajanje i osigura da se energetske potrebe različitih sustava i uređaja zadovoljavaju.

Kemijski izvori električne energije su sustavi u kojima se kemijskom reakcijom neposredno dobiva električna energija, a općenito se dijele prema načelu rada i to na primarne izvore (galvanski članci), sekundarne izvore (akumulatori) i ostale izvore. Primarni izvori nemaju značajnu ulogu u zrakoplovstvu jer su ireverzibilni i ne omogućavaju ponovno punjenje energijom, a u zrakoplovstvu se mogu pronaći u prijenosnim pilotskim svjetiljkama te kao pričuvne, *back-up* baterije računarskih sustava, najčešće kao litij-ionske baterije, [1].

Primarni kemijski izvori, kao što su galvanski članci, proizvode električnu energiju kroz nepovratne kemijske reakcije. To znači da jednom kad se reakcija dogodi i energija se potroši, taj izvor ne može biti ponovno napunjen. Stoga, primarni izvori nemaju značajnu ulogu u zrakoplovstvu jer zahtijevaju redovito zamjenjivanje kada se iscrpe.

Sekundarni izvori ili akumulatori, iako po građi liče galvanskim člancima, su kemijski izvori električne energije čije se načelo rada temelji na korištenju povratnih (reverzibilnih) svojstava elektrokemijskih sustava. To im omogućava višekratni ciklus punjenja i pražnjenja. Elektrokemijske sustave u akumulatoru čine aktivne mase elektroda različitog elektrokemijskog potencijala i elektrolit u koji su elektrode uronjene. Najpoznatiji akumulatori koji se koriste u zrakoplovstvu su olovni i alkalijski, a od potonjih nikal-kadmij, srebro-cink, srebro-kadmij i nikal-željezo (čelični), [1].

Pod pojmom ostali izvori pripadaju gorivi članci (*fuel cells*) i tzv. *Single-shot* termičke baterije. Gorivi članci su napredni izvori električne energije koji koriste katalitičke reakcije između goriva, poput vodika ili metilnog alkohola, i kisika kako bi direktno proizveli električnu energiju. Gorivi članci imaju visoku iskoristivost gotovo 100% i smatraju se ekološki prihvatljivima jer ne proizvode značajne emisije štetnih plinova. Ovi izvori su korisni u aplikacijama poput svemirskih letjelica gdje visoka učinkovitost i čistoća izgaranja goriva igraju važnu ulogu. Termičke baterije, s druge strane, koriste pirotehnički izvor topline za aktivaciju elektrokemijske reakcije unutar elektrolita. Ova reakcija oslobađa velike količine topline koja se zatim pretvara u električnu energiju. Termičke baterije imaju visoku gustoću

energije po jedinici težine, što znači da mogu pohraniti znatnu količinu energije u relativno malom volumenu. Međutim, ove baterije imaju ograničen rad i obično se koriste za kratkotrajne, ali snažne potrebe za energijom.

2.1. Uloga i namjena akumulatora

Glavna uloga akumulatora na zrakoplovu je napajanje kritičnih potrošača električnom energijom u slučaju otkaza glavnog izvora električne energije. Imaju funkciju pričuvnog izvora energije. Pritom potrošači *DC* struje koriste direktno napon iz akumulatora, a potrošači *AC* struje se napajaju preko invertera (*DC/AC*), [1].

Na većim zrakoplovima, uobičajeno je ugraditi dva akumulatora. "Glavni" akumulator obično ima višenamjensku funkciju, uključujući autonomiju pri pokretanju motora i napajanje kritičnih potrošača u hitnim situacijama. Dok s druge strane "pričuveni" akumulator služi isključivo za napajanje kritičnih potrošača u hitnim situacijama. Ova dva akumulatora zajedno osiguravaju redundanciju i omogućavaju održavanje sigurnosti i operativnosti zrakoplova čak i tijekom neplaniranih smetnji.

Na manjim zrakoplovima s istosmjernom (*DC*) mrežom, akumulator ima također važnu ulogu kao pričuveni izvor energije. Iako možda nije toliko kompleksan kao na većim zrakoplovima, i dalje ima ključnu funkciju osiguranja energije za vitalne sustave tijekom kritičnih trenutaka.

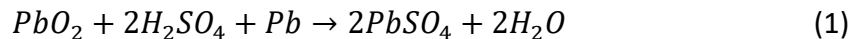
Osnovna namjena i zadaci zrakoplovnoga akumulatora su autonomno upuštanje motora zrakoplova na zemlji i u zraku te upuštanje motora *APU*-a na većim zrakoplovima. Kod manjih zrakoplova zadužen je za pokrivanje vršnih opterećenja kada generator nije u mogućnosti zadovoljiti potrebe električnih potrošača, a u slučaju otkaza generatora koristi se kao pričuveni izvor napajanja najvažnijih i za let nužnih potrošača (sustav paljenja, crpke za gorivo, motori zakrilaca, nužno osvjetljenje, reflektori za slijetanje, radijska postaja, mjerni instrumenti neelektričnih veličina). Kod velikih zrakoplova, prilikom polijetanja, kada su generatori još isključeni iz mreže, služi kao glavni izvor (ukoliko nema pomoćnih generatora i/ili *APU*-a), kao i prilikom prinudnoga slijetanja, poglavito za napajanje radio-komunikacijskih i navigacijskih uređaja te motora zakrilaca. Na kraju, koristi se u vremenski ograničenom periodu za napajanje potrošača zrakoplova na stajanki i to ukoliko ne postoji aerodromska aku-baterija ili aerodromski agregat (*EPU/GPU*) koji napaja zrakoplovnu električnu mrežu preko priključka na zrakoplov, [1].

Nagli tranzijenti, kratkotrajne smetnje i valovitost u napajanju mogu uzrokovati probleme u radu osjetljivih električnih uređaja i elektronike na zrakoplovu. Akumulatori, zbog svoje sposobnosti brzog isporučivanja energije, mogu djelovati kao svojevrsni "amortizeri" za takve tranzijente, prigušujući njihov utjecaj i osiguravajući stabilnije napajanje uređaja.

2.2. Načelo rada akumulatora

Akumulator je galvanski članak kojemu je elektrokemijsko djelovanje reverzibilno, tako da se propuštajući kroz njega istosmjernu struju u smjeru obrnutom smjeru galvanske struje može nakon „izbijanja“, „pražnjenja“, vratiti u izlazno stanje, „napuniti“, „nabiti“, i tako učiniti sposobnim za davanje galvanske struje. U akumulatoru se dakle ne akumulira (skuplja, gomila) električna energija kao takva, nego potencijalno, u obliku kemijske energije, time što se pri nabijanju izaziva razlika u sastavu dviju elektroda (polarizacija), uslijed čega nastaje galvanski članak koji može davati struju. Odatle i naziv sekundarni članci za akumulatore, [2].

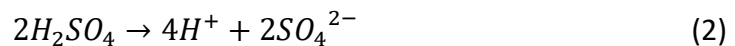
Reakcija kojom se proizvodi struja u galvanskom članku na primjeru olovnog akumulatora jest:



Napunjeni akumulator sastoji se, prema tome, od pozitivne elektrode kojoj je aktivna masa olovni dioksid PbO_2 (tamno smeđe boje), negativne elektrode kojoj je aktivna masa spužvasto olovo Pb (sive boje) i elektrolita, sumporne kiseline $2H_2SO_4$ razrijeđene čistom vodom H_2O .

Reakcije na objema elektrodama pri pražnjenju akumulatora daju olovni sulfat $2PbSO_4$ prema ovoj shemi:

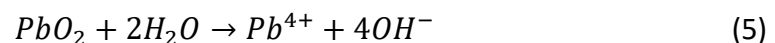
a) u elektrolitu je sumporna kiselina ionizirana:



b) na negativnoj elektrodi olovo se ionizira (oksidira) predajući dva negativna naboja i onda se taloži kao olovni sulfat:



c) na pozitivnoj elektrodi olovni dioksid ide u otopinu dajući četverovalentni ion olova, koji se reducira na dvovalentni primajući dva negativna naboja i onda se taloži kao olovni sulfat:



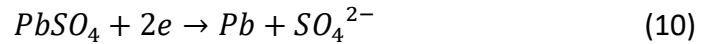
Kao rezultat, na objema elektrodama je nastao olovni sulfat, a dva električna naboja prešla su kroz članak od pozitivne na negativnu elektrodu.

Pri punjenju akumulatora zbivaju se obrnute reakcije i električni se naboji prenose u suprotnom smjeru:

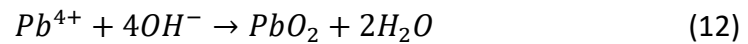
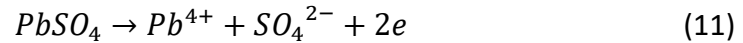
a) u elektrolitu nalaze se ioni OH^- uslijed ionizacije vode:



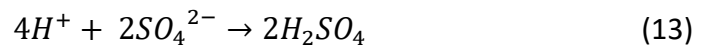
b) na negativnoj elektrodi se primljenim električnim nabojima iz olovnog sulfata reducira olovo:



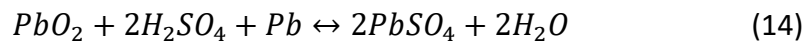
c) na pozitivnoj elektrodi se olovo oksidira u četverovalentni ion i konačno daje olovni dioksid



na objema elektrodama se stvara sumporna kiselina:



Navedene jednadžbe za punjenje i pražnjenje daju sumarno reverzibilnu jednadžbu procesa olovnog akumulatora:



Iz te se jednadžbe vidi da se pri pražnjenju akumulatora troši sumporna kiselina iz elektrolita i oslobađa se voda koja ulazi u elektrolit; stoga se elektrolit razrjeđuje, njegova gustoća za vrijeme pražnjenja stalno se smanjuje. Pri punjenju, obratno, gustoća elektrolita stalno se povećava zbog trošenja vode i oslobađanja sumporne kiseline.

Iz jednadžbi elektrodnih procesa (3) i (4) te (6) i (7) (odnosno iz reakcija oksidacije i redukcije) vidi se da se prenose dva elektrona za svaku molekulu olova, odnosno olovnog sulfata. Prema tome, na svaki mol reagiranog olova akumulator prima ili daje naboj od 2192966 C, odnosno 53,6 Ah, [2].

2.3. Konstrukcijski zahtjevi akumulatora

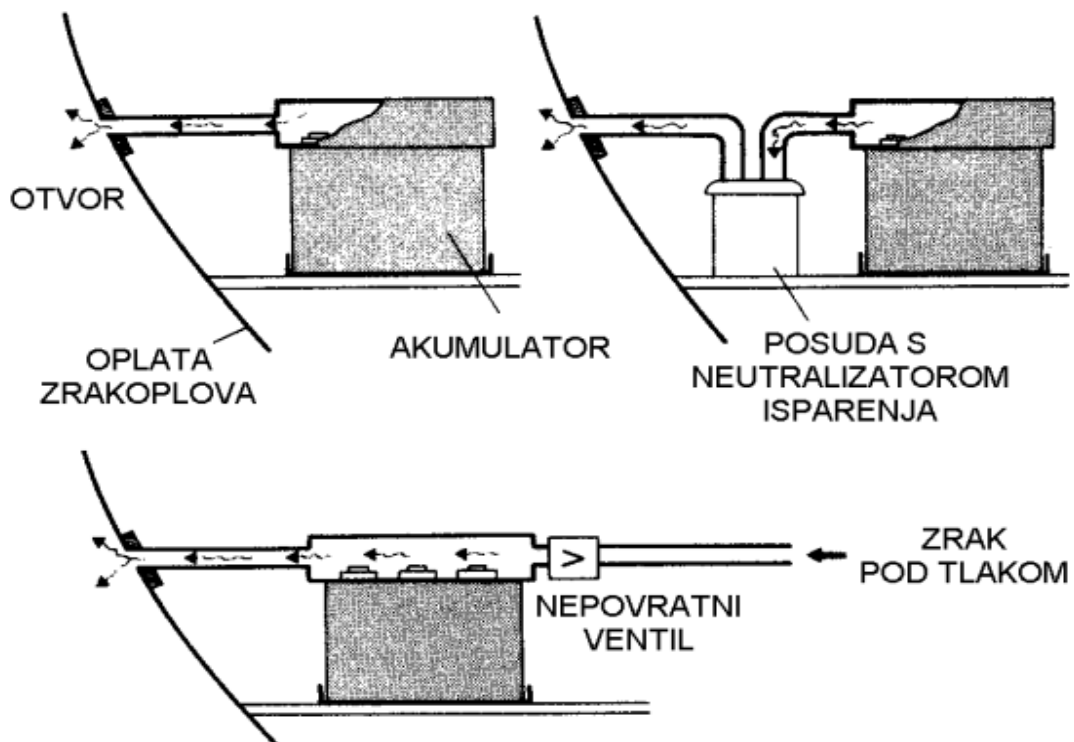
Svi akumulatori namijenjeni za korištenje kao izvor napajanja za potrošače instalirane ili rutinski nošene u zrakoplovu ne samo da moraju biti sigurni, već moraju posjedovati svojstva velike gustoće energije, moraju biti lagani, pouzdani te zahtijevati minimalno održavanje i moraju moći učinkovito raditi u raznim okolišnim uvjetima. Proizvođači baterija nastavljaju razvijati nove tehnologije u pokušaju da postignu ova svojstva, ali u mnogim su slučajevima nužni kompromisi u ciljevima koji se direktno ne tiču sigurnosti letenja. U nekim su slučajevima zanemareni sigurnosni rizici koji nastaju pri implementaciji novih dizajna, osobito u pogledu brzo rastuće upotrebe litij-ionskih akumulatora, [3].

Zbog vrlo nepovoljnih uvjeta rada i visokih zahtjeva eksploatacije, zrakoplovni akumulator mora ispunjavati stroge zahtjeve u pogledu konstrukcije. Pored optimalnog omjera težine i kapaciteta, akumulator također mora biti kompaktan, izdržljiv za visoka trenutačna opterećenja (na primjer, paljenje reflektora, pokretanje hladnog motora itd.),

sposoban izdržati velika mehanička opterećenja (potrese, udarce i vibracije) te biti upotrebljiv u širokom rasponu temperatura (-60°C do +50°C).

Nadalje, akumulator mora konstrukcijski biti izveden tako da omogući nesmetan izlazak plinovitih produkata elektrokemijske reakcije i u isto vrijeme spriječiti istjecanje elektrolita bez obzira na položaj zrakoplova u letu (osobito važno kod olovnih akumulatora).

Na Slici 1. su prikazane tri izvedbe provjetravanja akumulatorskoga prostora. U prvom slučaju je akumulatorski prostor provjetravan samo otvorom na oplati zrakoplova. U drugom slučaju je dodan neutralizator isparenja (tipično za olovni akumulator), a u trećem slučaju se prostor provjetrava zrakom pod tlakom.

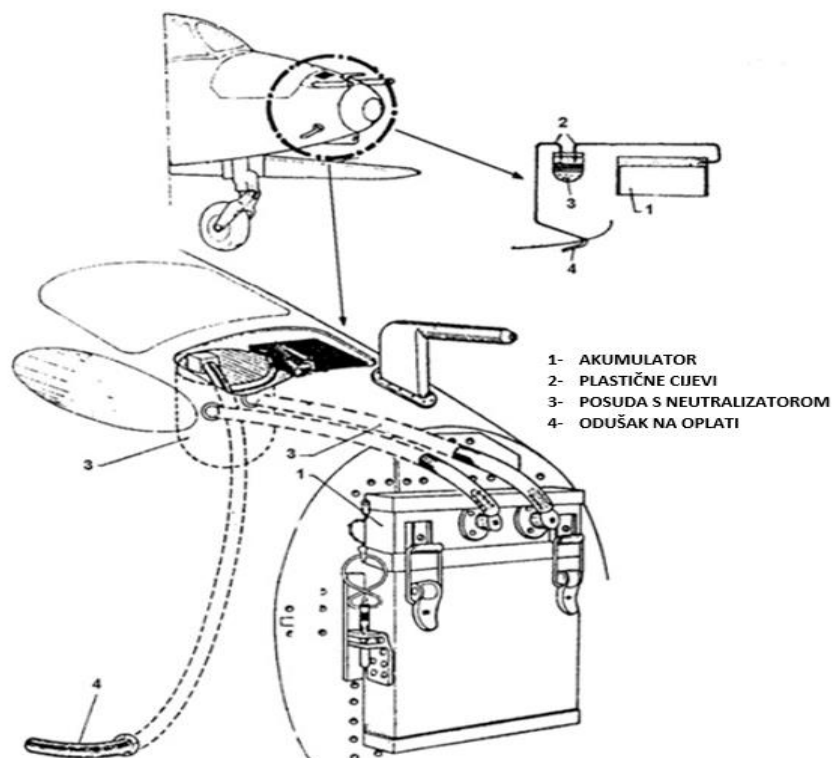


Slika 1. Načini provjetravanja akumulatorskoga prostora, [1]

Svaki zrakoplov ima konstruiran prostor za akumulator koji je lako dostupan jer akumulator podliježe redovnim pregledima koji su najčešće vizualni, provjera kapaciteta, napona te provjeru konekcije. U vizualnom pregledu provjeravamo ima li oštećenja, korozije ili sličnih vidljivih problema. Kapacitet provjeravamo pomoću aparata koji mjeri količinu energije koja se može pohraniti i mjeri se najčešće u amper-satima. Kad napon nije u dopuštenim granicama, to može ukazivati na problem s akumulatorom ili sa sustavom za punjenje akumulatora. Kod loše konekcije dolazi do velikih otpora koji uzrokuju visoke temperature koje mogu dovesti do zapaljenja zrakoplova.

2.4. Smještaj akumulatora

Smještaju akumulatora se posvećuje naročita pozornost već pri projektiranju zrakoplova, pri čemu vrijedi načelo da mjesto mora biti pristupačno za laganu ugradnju i brzu zamjenu, u dijelu zrakoplova gdje nema goriva, ulja i njihovih isparenja, te električnih i elektroničkih uređaja, [1].



Slika 2. Praktična izvedba provjetravanja akumulatorskoga prostora, [1]

Na Slici 2. je prikazana praktična izvedba provjetravanja akumulatorskog prostora kod manjeg aviona. Na slici je vidljiva izvedba provjetravanja akumulatora s neutralizatorom i oduškom na oplati. Na ovom primjeru se akumulator nalazi u nosu aviona.

Akumulator se uobičajeno smješta u posebnu kutiju s otvorima za prozračivanje kao što je vidljivo na Slici 1. i Slici 2. Za olovne se akumulatore koristi i cijevni sustav za odvođenje i neutralizaciju isparenja, obično kroz spremnik s vodenom otopinom natrij hidrogenkarbonata NaHCO_3 („sode bikarbone“).

Kod manjih zrakoplova, gdje je teže održavati stabilan unutarnji temperaturni okoliš, primjenjuje se sloj termoizolacijskog materijala oko akumulatora. Ova termoizolacija pomaže u ograničavanju učinaka naglih promjena temperature iz okoline na električne karakteristike

akumulatora. To je posebno važno jer promjene temperature mogu utjecati na kapacitet, performanse i životni vijek akumulatora.

Kod novijih i većih zrakoplova postoje dva akumulatora. Na primjeru zrakoplova *Boeing 787 Dreamliner* jedan je glavni akumulator i nalazi se u prednjem dijelu trupa, u prednjem odjeljku za električnu opremu. Drugi akumulator koji daje električnu energiju potrebnu za pokretanje *APU*-a (može se koristiti i za pokretanje glavnih motora po potrebi i napaja navigacijska svjetla) se nalazi kod stražnjih *cargo* vrata. Za ovaj zrakoplov su karakteristični litij-ionski akumulatori, [4].

2.5. Vrste zrakoplovnih akumulatora

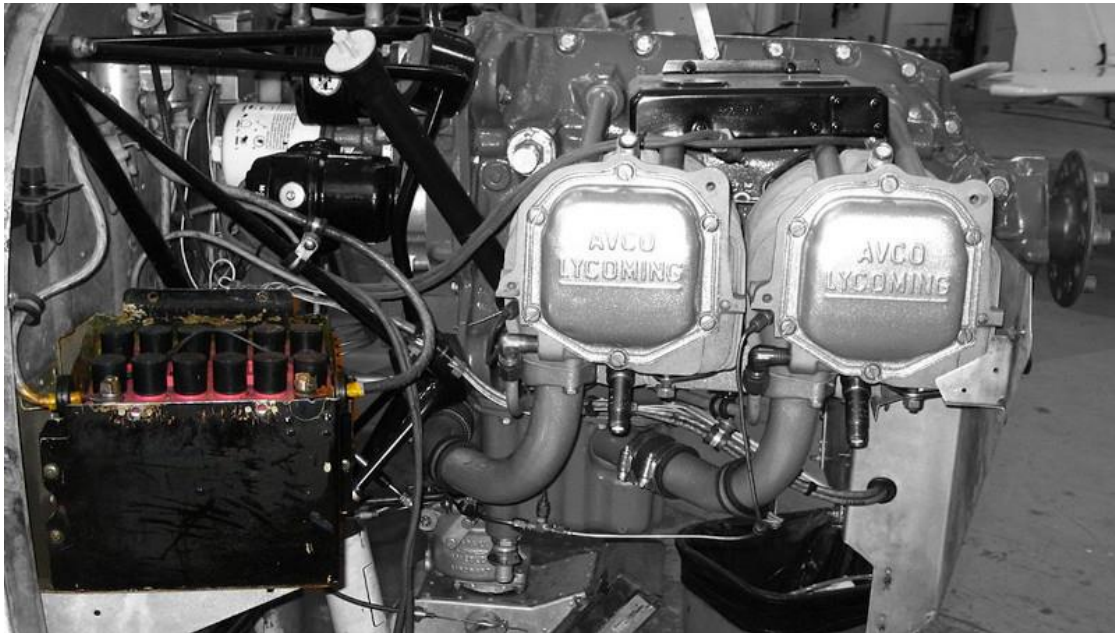
Sva tehnologija koja se ugrađuje u zrakoplov mora biti dobro poznata i iznimno pouzdana. Razlozi za to su očiti. U zrakoplovstvu se teži za najvećom razinom sigurnosti i pouzdanosti. Ovisno o zahtjevima električne mreže zrakoplova postoji nekoliko tipova zrakoplovnih akumulatora koji se koriste. Najčešći su olovni i nikal-kadmij akumulatori. U novije vrijeme se počinju koristiti litij-ionski akumulatori zbog boljih svojstava i sve veće pouzdanosti. U nekim slučajevima se koristi srebro-cink akumulator i čelični (nikal-željezo) akumulator. U narednim potpoglavljima analizirani su ovi tipovi akumulatora.

2.5.1. Olovni akumulator

Olovni akumulator se prvi put pojavio u devetnaestom stoljeću, ali je danas jedan od najčešćih u upotrebi. Najčešće se primjenjuje u vozilima sa klipnim motorima, bilo u automobilima ili zrakoplovima. 20% cijelog tržišta akumulatora čine olovni. Na drugom mjestu nakon litij-ionskih baterija koje se koriste u mobitelima i laptopima, [5].

Princip rada olovnog akumulatora je opisan u poglavlju 2.2.

Olovni akumulatori su relativno teški (mali omjer pohranjene energije i težine) i veliki (mali omjer spremljene energije i volumena kojeg zauzimaju), ali imaju mogućnost davanja velike količine električne struje u kratkom vremenu što ih čini savršenim za *starter*-a motora. Većina lakih zrakoplova ima 12 V ili 24 V električnu mrežu. Olovni akumulatori koji se nalaze u ovakvim električnim mrežama su sačinjeni od 6 ili 12 ćelija pri čemu svaki ima napon 2 V. Spajanjem u seriju se dostiže 12 V ili 24 V. Zbog ovih svojstava i relativno jeftine izvedbe česti su kod manjih zrakoplova. Na Slici 3. je vidljiv primjer olovnog akumulatora ugrađenog na vatreni zid (*firewall*) zrakoplova *Cessna 152*. Svaki zrakoplov mora imati vatreni zid koji štiti ostatak zrakoplova od vatre uzrokovane nekim kvarom motora.



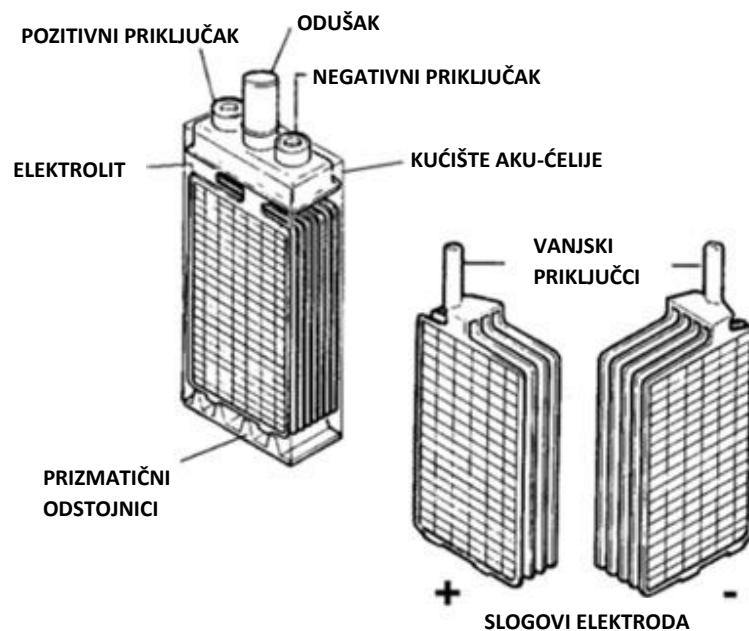
Slika 3. Olovni akumulator ugrađen na zrakoplovu Cessna 152, [5]

Glavni dijelovi olovnog akumulatora (vidljivi na Slici 4.) su aktivni elementi: elektrode i elektrolit, te pasivni elementi: kućište, separator, spojnice, čepovi i vanjski priključci.

Kućište u koje su smješteni svi ostali dijelovi akumulatora je mehanički čvrsto i kemijski inertno, uobičajeno se izrađuje od otporne plastične mase.

Elektrode su načinjene od olova (Pb) s dodatkom antimona (Sb) u obliku mrežastih ploča koje su vidljive na Slici 4. U njih se tvornički utiskuje aktivna masa. Na pozitivnoj elektrodi (anodi) aktivna masa je smjesa olovo (II)- ortoplumbata (Pb_2PbO_4), poznatog pod trgovačkim imenom minij, i razrijeđene sumporne kiseline (H_2SO_4), dok je na negativnoj elektrodi (katodi) početna aktivna masa smjesa minij, barij- suflata ($BaSO_4$) i razrijeđene sumporne kiseline. Početna aktivna masa kemijski se mijenja tijekom tvorničkog aktiviranja elektroda. Elektrode su oslonjene na elastične odstoynike prizmatičnog oblika čija je funkcija sprječavanje kratkog spoja uslijed taloženja olova koje tijekom eksploatacije otpada s elektroda na dno kućišta, [1].

Razrijeđena sumporna kiselina (10%), srednje gustoće 1285 kg/m^3 se koristi kao elektrolit. Elektrolit može biti apsorbiran u obliku želatine u međuelektrodni prostor, ali može biti i slobodan u tekućem stanju.



Slika 4. Građa ćelije olovnog akumulatora, [1]

Separator ima višestruku ulogu u akumulatoru. Njegova osnovna funkcija je sprječavanje fizičkog kontakta između pozitivne i negativne elektrode. To je ključno kako bi se spriječio direktan električni kontakt između elektroda, što bi rezultiralo kratkim spojem i neželjenom ispraznošću akumulatora. Također, separator pomaže u održavanju stvarne površinske reakcije elektroda na odgovarajućem mjestu. Separator je obično izrađen od porozne plastične mase koja omogućuje prolazak ionskih vrsta, ali sprječava električni kontakt.

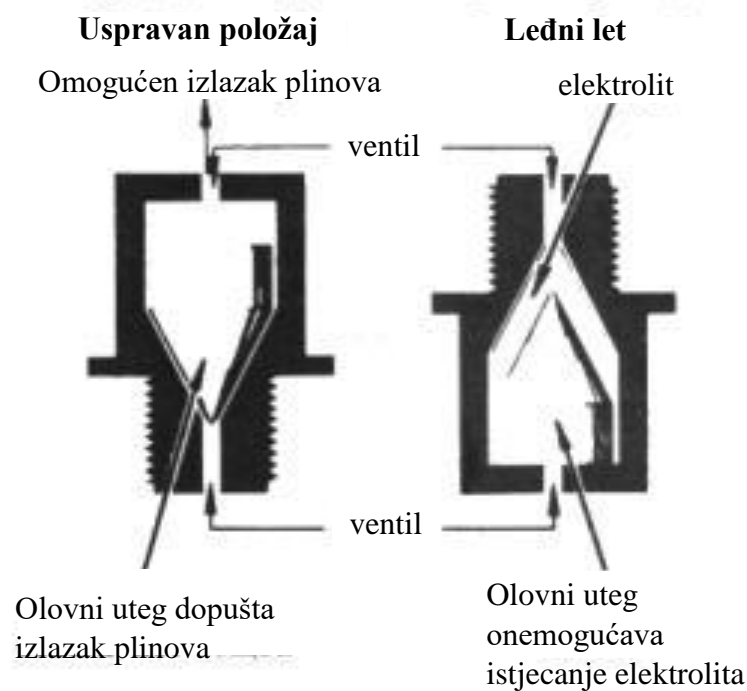
Spojnice se koriste kako bi se povezale ploče istog polariteta unutar iste ćelije. Povezivanje ploča istog polariteta paralelnim vezama omogućuje povećanje kapaciteta ćelije, jer se time povećava ukupna površina elektroda dostupna za elektrokemijske reakcije tijekom punjenja i pražnjenja. Važno je napomenuti da se spojnice izrađuju od istog materijala kao i elektrode, u ovom slučaju od olova. To je učinjeno kako bi se izbjegla galvanska korozija, koja se događa kada su različiti metali u kontaktu u prisutnosti elektrolita.

Olovno-kiselinski akumulatori proizvode plinove (posebno kisik i vodik) tijekom procesa punjenja i pražnjenja. Ti plinovi moraju biti kontrolirani i ispušteni iz akumulatora kako bi se izbjeglo povećanje unutarnjeg tlaka ili drugi potencijalni problemi. Uz to, tijekom leta zrakoplova, nagibi i promjene položaja mogu utjecati na protok elektrolita i plinova unutar akumulatora. Ako bi elektrolit istjecao, to bi moglo dovesti do oštećenja i problema s električnim sustavom ili čak korozije na zrakoplovu. Da bi se riješili ovi problemi, koriste se posebni ventili ili čepovi na olovno-kiselinskim akumulatorima. Ti ventili imaju funkciju da

omogućće kontrolirano ispuštanje plinova iz akumulatora, čime se održava unutarnji tlak na prihvatljivoj razini. Također, ti ventili mogu biti konstruirani s dodatnim mehanizmima kako bi spriječili istjecanje elektrolita, čak i pri promjenama nagiba ili letenju naopako. Važno je da se ovi ventili redovito održavaju i provjeravaju kako bi se osiguralo da ispravno obavljaju svoju funkciju i kako bi se održala sigurnost i pouzdanost akumulatora i električnih sustava u zrakoplovima. Ovakav čep je prikazan na Slici 5., [1].

Vanjski priključci služe za priključivanje akumulatora na električnu mrežu zrakoplova i također se prave od olova kako bi se izbjegla galvanska korozija.

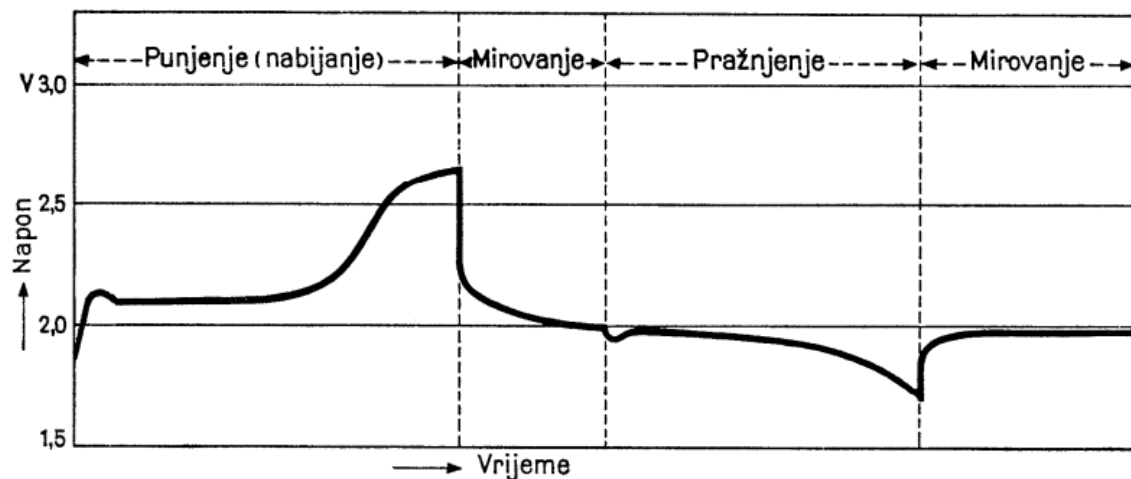
Na Slici 6. je prikazan dijagram procesa punjenja i pražnjenja olovnog akumulatora. Na samom početku punjenja, zbog povećanja gustoće elektrolita u porama elektroda dolazi do naglog porasta napona. Danji blaži porast napona posljedica je reakcije elektrolita s aktivnom masom elektroda i povećanja njegove gustoće. Pri kraju pretvorbe olovo (II)-sulfata u olovo i olovov (IV)-oksid, proces punjenja stagnira te nastupa proces elektrolize vode i napon ponovno naglo poraste. Isključenjem punjača napon trenutno pada do razine elektromotorne sile (napon otvorenih stezaljki), a zatim postupno do nominalnog napona zbog unutarnjih omskih gubitaka i uspostavljanja jednolike gustoće elektrolita unutar i izvan elektroda.



Slika 5. Princip rada čepa sa oduškom, [11]

Na istom dijagramu je vidljivo da priključenjem potrošača nastupa proces pražnjenja. Pri čemu napon odmah naglo pada zbog unutarnjih omskih gubitaka sve do nominalne vrijednosti (oko 2 V), [1].

Daljnijem tijekom pražnjenja napon je dulje vrijeme konstantan, a zatim ponovno lagano opada zbog smanjenja gustoće elektrolita u dubljim slojevima elektroda. Ponovni nagli pad napona na 1,7 V-1,8 V posljedica je povećanja debljine olovo (II)- sulfata, čime se smanjuje i površina aktivne mase. Konačno, isključenjem potrošača napon naglo poraste uslijed izjednačavanja gustoće elektrolita unutar i izvan elektroda, [1].



Slika 6. Dijagram procesa punjenja i pražnjenja olovnog akumulatora, [1]

Olovni akumulator ima jednu veliku prednost nad drugim tipovima akumulatora. Relativno je lagano odrediti stanje napunjenosti akumulatora jednostavnim mjerenjem specifične gustoće elektrolita pomoću areometra (*Bohm metra*). To je moguće jer se gustoća elektrolita mijenja tijekom procesa punjenja i pražnjenja. Osim toga stanje akumulatora se može utvrditi i mjerenjem napona stezaljki pod opterećenjem nazivnom strujom pražnjenja. Obično se koriste obje metode. Mjerenja se obično vrše na sobnoj temperaturi. U nekim slučajevima se može provjeriti stanje pojedinih ćelija ako su spojevi na pojedine ćelije dostupni, u suprotnom se može provjeriti stanje akumulatora u cjelini, [1].

2.5.2. Nikal-kadmij akumulator

Dok su olovni akumulatori češći kod manjih zrakoplova s klipnim motorima, nikal-kadmij akumulatori su češći kod mlaznih zrakoplova jer su pogodniji za pokretanje mlaznih motora.

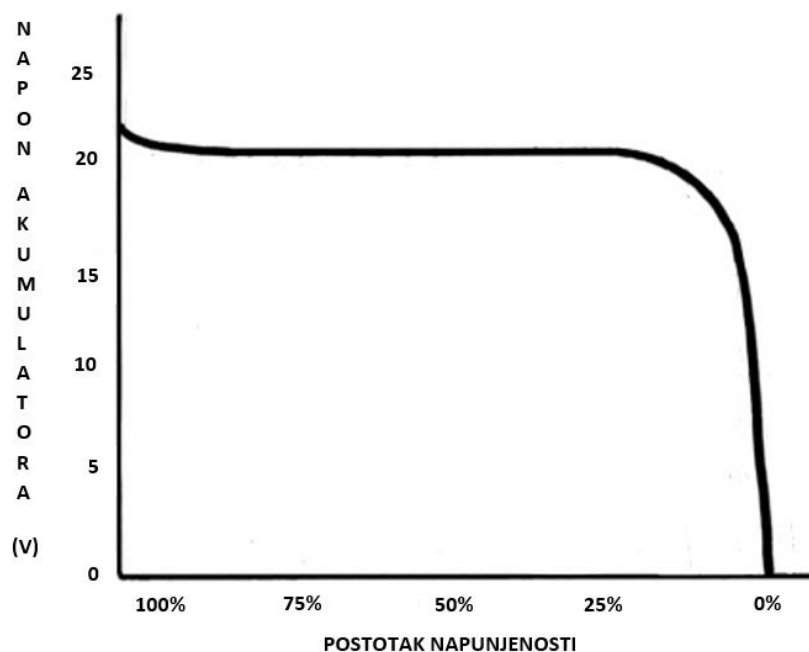
U odnosu na olovne akumulatore, nikal-kadmij akumulatori imaju niz prednosti. Tako primjerice imaju praktički konstantan napon stezaljki pri pražnjenju (1,2 V po ćeliji pri

normalnoj struji pražnjenja) i neznatan unutarnji otpor, što omogućuje veće struje pokretanja zrakoplova i do 15 puta bez negativnih učinaka na akumulator. Na Slici 7. je prikazana vrijednost napona tijekom pražnjenja.

Osim toga, otporniji su na udare, potrese i vibracije zahvaljujući sinteziranim elektrodama koje imaju dugi radni vijek preko 5 godina i praktički neograničeni rok skladištenja bez elektrolita. Pored toga, održavanje je jednostavnije i odlikuje ih mala količina plinovitih nusprodukata.

Relativno su neosjetljivi na prepunjavanje i duboko pražnjenje, a njihov životni vijek je značajno dulji. Iako je moguće pojedinačne ćelije potpuno isprazniti, potpuno pražnjenje formiranog akumulatora sa serijski spojenim ćelijama nije preporučljivo zbog moguće reverzne polarizacije ćelija koje su „slabije“ od okolnih (npr. manjeg kapaciteta ili na nižem stupnju napunjenosti), [1].

Unatoč svojim pozitivnim karakteristikama, Ni-Cd akumulatori imaju nekoliko nedostataka. Značajno su skuplji od olovnih iako u novije vrijeme njihova cijena opada. Pored toga, nije moguće obaviti neposrednu kontrolu stanja napunjenosti akumulatora, npr. mjerenjem napona stezaljki (jer je relativno konstantan tijekom pražnjenja što je vidljivo na Slici 7.) ili gustoće elektrolita kao kod olovnih akumulatora. Potreban je dijagnostički instrument pod nazivom integrirajući mjerač kapaciteta za mjerenje stanja napunjenosti, [1].



Slika 7. Dijagram pražnjenja tipičnog Ni-Cd akumulatora [1]

Međutim, jedan od najvećih izazova s Ni-Cd akumulatorima je pojava poznata kao "toplinski bijeg" ili "thermal runaway". To je ozbiljna situacija u kojoj nekontrolirano zagrijavanje pojedinih ćelija akumulatora može dovesti do nepovratnog samouništenja cijelog akumulatora, pa čak i do izbijanja požara na zrakoplovu. Ova opasnost posebno je izražena tijekom leta, kada nagibi i promjene položaja zrakoplova mogu utjecati na protok elektrolita i plinova unutar akumulatora. Kako bi se spriječili negativni učinci toplinskog bijega, ugrađuju se instrumenti za nadzor temperature ćelija i ampermetri koji prate struju punjenja akumulatora. Tijekom leta, osobito pri većim opterećenjima i čestim ciklusima polijetanja i slijetanja, temperatura unutar akumulatora može znatno porasti, često rezultirajući pozitivnom povratnom vezom koja dalje povećava temperaturu. Ovaj problem zahtijeva pažljivo praćenje i pravovremeno isključivanje akumulatora sa električne mreže prije nego što temperatura dosegne kritičnu točku. Sigurnosna edukacija osoba koje rukuju akumulatorima, kao i redovito održavanje kako bi se osiguralo ispravno stanje i funkcionalnost svih dijelova, ključni su koraci u upravljanju ovim izazovom. Šteta nastala prilikom toplinskog bijega prikazana je na Slici 8.



Slika 8. Nepovratna šteta učinjena termalnim bijegom, [12]

Konstruktivski su slični ostalim akumulatorima, glavni aktivni dijelovi su elektrode i elektrolit, a pasivni dijelovi su kućište, separator, spojnice, čep sa sigurnosnim ventilom te vanjski priključci. Uobičajena konstrukcijska izvedba Ni-Cd akumulatora je prikazana na Slici 9.

Kućište akumulatora izrađeno je od otporne plastike ili čelika, koji posjeduju dobra kemijska i mehanička svojstva. Ovo kućište štiti unutarnje komponente akumulatora od vanjskih utjecaja te pruža fizičku sigurnost.

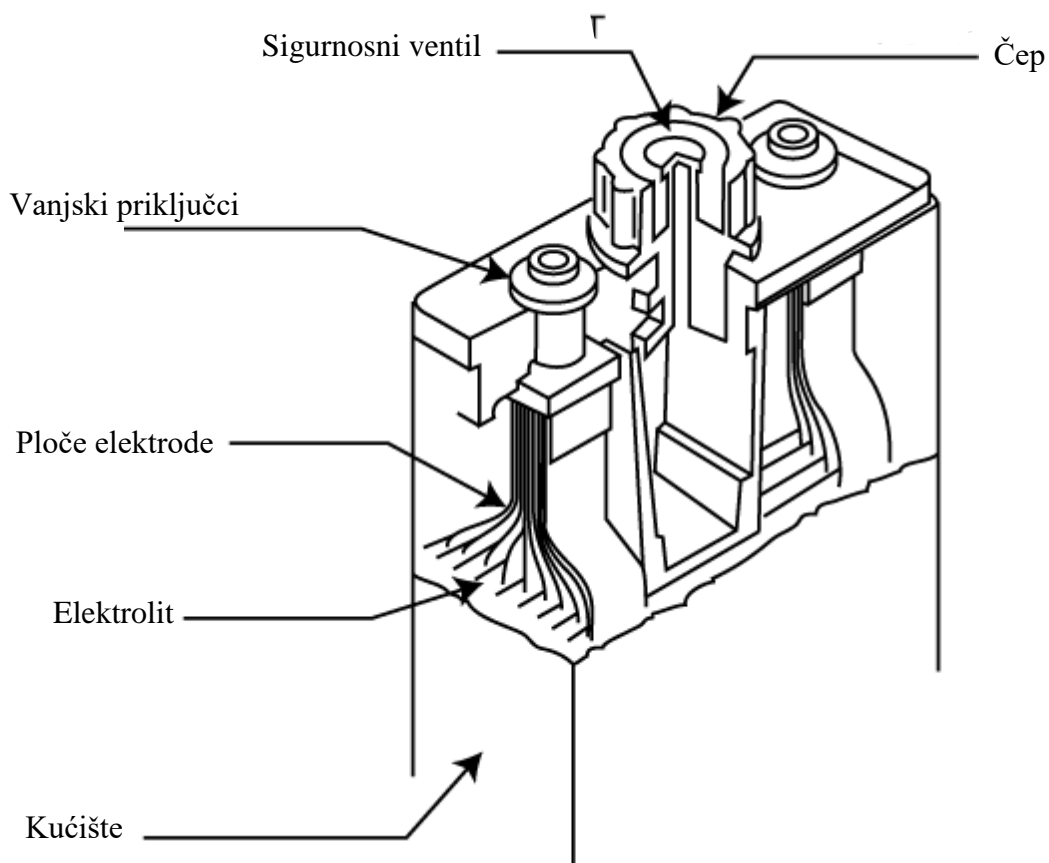
Anoda je izrađena od sinteriranog nikla impregniranog nikal (II)-hidroksidom ($\text{Ni}(\text{OH})_2$). Anoda je mjesto gdje se odvija oksidacijska reakcija tijekom procesa punjenja

akumulatora. Katoda je izrađena od sinteriranog nikla impregniranog kadmij (II)-hidroksidom ($\text{Cd}(\text{OH})_2$). Katoda je mjesto gdje se odvija redukcijska reakcija tijekom procesa punjenja akumulatora.

Elektrolit je vodena otopina kalij-hidroksida (KOH) specifične gustoće koja osigurava optimalne elektrokemijske uvjete unutar akumulatora. Ovaj elektrolit služi kao medij za prijenos iona između anode i katode.

Separator je sloj između anode i katode, izrađen od sintetičkih vlakana. Njegova glavna uloga je odvajanje elektroda kako bi se spriječili kratki spojevi, ali istovremeno i zadržavanje elektrolita. To pomaže u održavanju elektrokemijske ravnoteže i sprječava neželjene reakcije.

Spojnice s izvodima omogućuju električne veze između pojedinih slojeva elektroda i vanjskih priključaka akumulatora. Izrađene su od metala sličnog elektrokemijskog potencijala kako bi se izbjegla galvanska korozija.

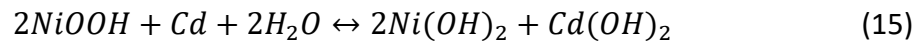


Slika 9. Uobičajena konstrukcijska izvedba Ni-Cd akumulatora, [13]

Vanjski priključci omogućuju povezivanje akumulatora s vanjskom zrakoplovnom električnom mrežom. Oni su izrađeni od istog materijala kao i spojnice, također zbog sprječavanja galvanske korozije.

Čep sa sigurnosnim ventilom brtvi ćeliju i sprječava izlazak elektrolita. Također, regulira unutarjni tlak akumulatora, posebno pri visokim strujnim opterećenjima, kako bi se spriječio rizik od toplinskog bijega ili drugih neželjenih reakcija

Proces punjenja i pražnjenja nikal-kadmij akumulatora može se sažeto napisati u obliku sljedećeg izraza:



2.5.3. Srebro-cink akumulator

Srebro-cink akumulator je imao usku primjenu i primarno je razvijen za zrakoplove, a koristio se u svemirskim letjelicama. Korišten je i u borbenom zrakoplovu *Mig 21 bis*. Srebro-cink akumulator je imao najveću gustoću energije prije nego su napredovale tehnologije litij-ionskih akumulatora. Korišteni su i u vojnoj industriji u nekim podmornicama. Ima relativno kratak radni vijek, devet do dvanaest mjeseci nakon punjenja elektrolitom. Novije inačice akumulatora s kadmijem umjesto cinka imaju dulji radni vijek i bolje električne karakteristike. Podnose ubrzanja i do 1000 g/ms.

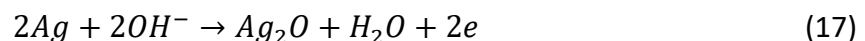
Elektrolit je vodena otopina kalij-hidroksida koja disocira na kalijev kation K^+ i hidroksidni anion OH^- prema izrazu:



Krivulja punjenja koja je prikazana na Slici 10. ima stepenasti karakter i moguće je razlikovati tri stupnja kemijskih procesa:

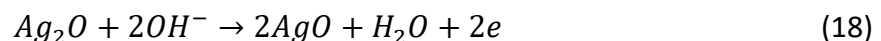
a)

prvi stupanj punjenja; napon ćelije iznosi 1.6 V:



b)

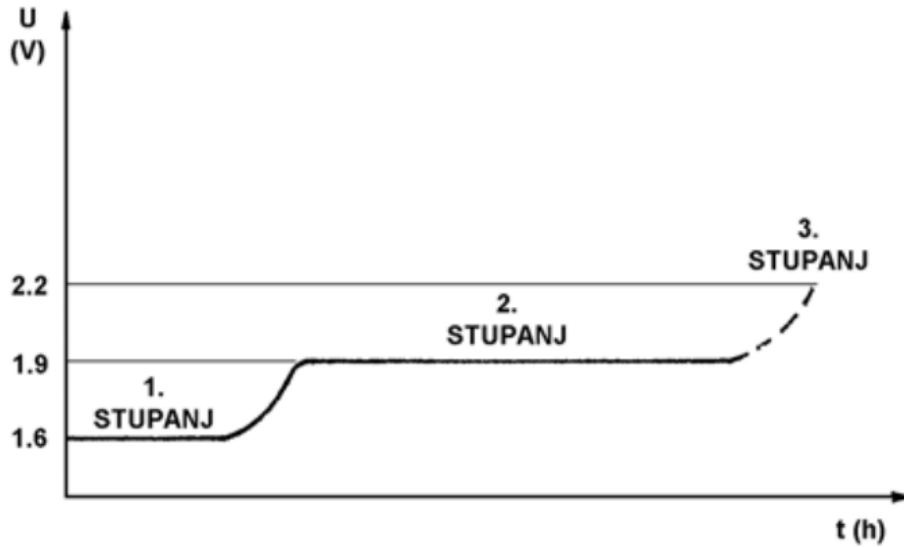
drugi stupanj punjenja; napon ćelije iznosi 1.9 V:



c)

treći (nepoželjni) stupanj punjenja; napon ćelije raste do oko 2.2 V; budući da je oksidacija srebra završena, daljnjim punjenjem započinje izdvajanje elementarnog kisika koji oštećuje celofanski separator katode:



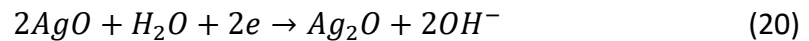


Slika 10. Dijagram punjenja srebro-cink akumulatora, [1]

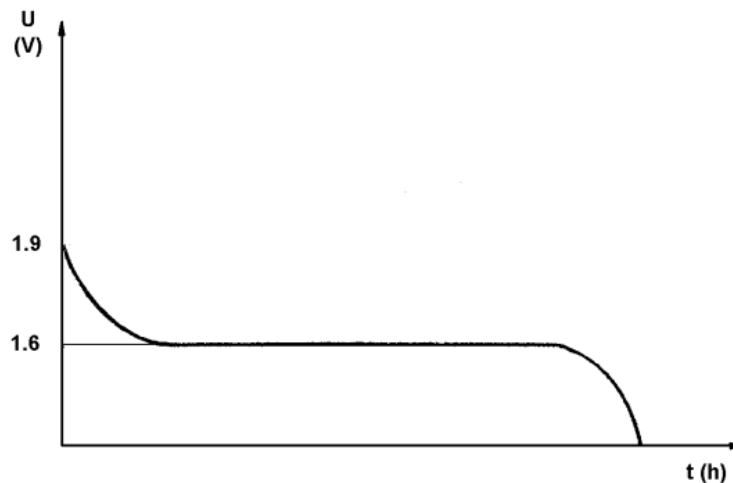
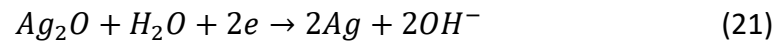
Prilikom pražnjenja odvija se obrnuti kemijski proces, a krivulja pražnjenja također je stepenasta što je vidljivo po dijagramu pražnjenja na Slici 11.

Proces pražnjenja:

a) prvi stupanj pražnjenja



b) drugi stupanj pražnjenja:



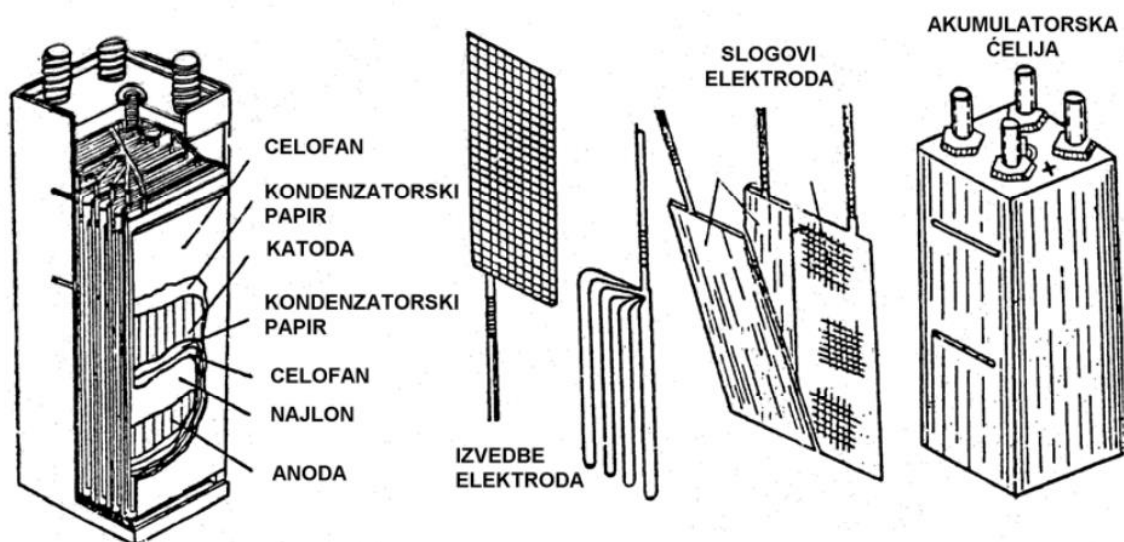
Slika 11. Dijagram pražnjenja srebro-cink akumulatora, [1]

Empirijski izraz za proces punjenja i pražnjenja srebro-cink akumulatora može se sažeto napisati u obliku:



Mehanička konstrukcija srebro-cink akumulatora slična je konstrukciji olovnog akumulatora. Glavni aktivni dijelovi su elektrode i elektrolit, a pasivni dijelovi su kućište, separatori, izvodi elektroda i čep. Izvedba srebro-cink akumulatora sa dijelovima je prikazana na Slici 12.

Kućište: Kućište akumulatora izrađeno je od otporne plastične mase ili metala. Na poklopcu svake ćelije nalazi se pet otvora: četiri služe za izvode elektroda, dok peti omogućuje nalijevanje elektrolita te eventualnu kontrolu stanja ćelije.



Slika 12. izvedba ćelije srebro-cink akumulatora, [1]

Elektrode su ključne komponente akumulatora i izvedene su od čistog srebra. Anoda je oblikovana kao rešetka ili mreža ispunjena aktivnom masom srebrovog (II)-oksida (AgO), dok je na katodi prisutan kemijski čisti cink (Zn).

Elektrolit je vodena otopina kalijevog-hidroksida (KOH) zasićena cinkom, čime se stvaraju optimalni elektrokemijski uvjeti za rad akumulatora. Specifična gustoća elektrolita iznosi 1470 kg/m^3 .

Separatori su komponente koje odvajaju anodu i katodu te istovremeno omogućuju prijenos iona. Separator anode izrađen je od plastične mase (nylon), dok je separator katode kombinacija kondenzatorskog papira i višeslojnog celofana. Ova kombinacija sprječava štetnu kemijsku interakciju između elektroda i separatora.

Izvodi elektroda omogućuju međusobno spajanje slojeva elektroda i pojedinih ćelija. Svaka ćelija ima četiri izvoda elektroda.

Čep služi za zatvaranje otvora za nalijevanje elektrolita u ćeliju. Na vrhu čepa nalazi se ventil u obliku gumenog prstena. Taj ventil regulira unutarnji tlak unutar ćelije koji može nastati oslobađanjem elementarnog kisika na elektrodama.

2.5.4. Čelični (nikal-željezo) akumulator

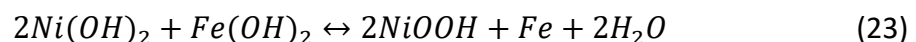
Nikal-željezo akumulator je našao primjenu u zrakoplovstvu zbog svoje robusnosti i izdržljivosti na prekomjerno punjenje, pražnjenje pa čak i na kratke spojeve. Ima relativno dugačak životni vijek. Zbog svoje niske gustoće energije i lošijih električnih performansi uglavnom su izbačeni iz upotrebe u zrakoplovstvu. Osjetljiv je na niske temperature a napon pri opterećenju varira između 1,15 V do 1,4 V što je značajan nedostatak. Nikal-željezo akumulator spada u skupinu alkalijских akumulatora, a poznat je pod nazivom Edisonov akumulator.

Konstruktivski je sličan nikal-kadmij akumulatoru, a glavni aktivni dijelovi su, kao i kod svih ostalih akumulatora, elektrode i elektrolit, smješteni u mehanički i kemijski otpornom kućištu, najčešće od poniklanoga čelika.

Elektrode su kemijski raznorodne: anoda je načinjena od nikla s aktivnom masom nikal(III)-oksid-hidrata $NiOOH$, a katoda je od željeza Fe , koje ujedno čini i aktivnu masu, [1].

Elektrolit je, kao i kod praktički svih alkalijских akumulatora, vodena otopina kalij-hidroksida KOH , kojem je dodano do 30% litij-oksida Li_2O , [1].

Za proces punjenja i pražnjenja nikal-željezo akumulatora se empirijski izraz može sažeto napisati u obliku:



2.5.5. Litij-ionski akumulatori

Uporaba litij-ionskih baterija se naglo povećala u zadnja dva desetljeća i ne pokazuje tendenciju smanjenja. Iako litij-ionska tehnologija nije uobičajena u zrakoplovnim akumulatorima, u zrakoplovima se već nalaze litij ionske baterije. Prijenosni uređaji poput laptopa, tableta i mobitela sadrže takve litij-ionske baterije i putnici ih redovito unose na zrakoplove. Osim toga ova tehnologija rapidno napreduje. Zbog svojih odličnih svojstava, litij-ionski akumulatori polako zamjenjuju nikal-kadmij akumulatore. Litij-ionski akumulatori imaju veći odnos kapaciteta i težine te prvi pokušaj njihove ugradnje na veliki zrakoplov je *Boeing 787 Dreamliner*, [4].

Rizik pri upotrebi ovih akumulatora je potencijal za termalnim bijegom što dovodi do oslobađanja zapaljivih plinova i dimova te do istjecanja zapaljivog elektrolita. U početku se vjerovalo da do termalnog bijega dolazi samo kod prekomjernog punjenja, ali je otkriveno da se do ovoga može doći i iz niza drugih razloga: vanjsko pregrijavanje, vanjski kratki spoj ili unutarnji kratki spoj, punjenje akumulatora koji je bio prekomjerno ispražnjen, jako pražnjenje te punjenje na hladnim temperaturama, [4].

Dva ozbiljna incidenta zagrijavanja litij-ionskih akumulatora na zrakoplovu *Boeing 787* unutar prvih 52000 sati naleta su dovela do privremenog prizemljenja flote. Ovakvi incidenti usporavaju uvođenje litij-ionskih akumulatora u zrakoplovstvo. Postepenim poboljšanjem tehnologije te povećanjem standarda proizvodnje i uvođenje sustava za praćenje stanja akumulatora se očekuje postepeno uvođenje u zrakoplovstvo. Moguća primjena je i u potpuno električnim zrakoplovima zbog odličnih električnih svojstava litij-ionskog akumulatora.

Prednost litij-ionskog akumulatora u odnosu na nikal-kadmij je u većoj gustoći energije (za 50% veća), u većoj voltaži od 3,7 V u usporedbi sa 1,2 V, ekološki je prihvatljiviji jer ne sadrži kadmij, olovo ili živu, velik životni vijek (80% originalnog kapaciteta nakon 400 do 500 ciklusa), malo samopražnjenje, brzo punjenje (80% kapaciteta za 60 minuta i 100% za 150 minuta), [6].

Litij je u elementarnom obliku ekstremno reaktivan te se iz tog razloga ne koristi u litij-ionskim akumulatorima. Umjesto toga, litij-ionske baterije obično sadrže litij-metalni oksid, poput litij-kobalt oksida (LiCoO_2) koji osigurava litij-ione. Litij-metalni oksidi se koriste u katodi, dok se litij-ugljikovi spojevi koriste u anodi. Prilikom pražnjenja pozitivno nabijeni litijevi ioni se kreću kroz elektrolit od negativne anode prema pozitivnoj katodi gdje se talože. U isto vrijeme negativno nabijeni slobodni elektroni kreću od anode prema katodi, [7].

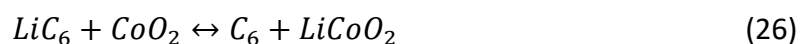
Reakcija redukcije se događa na katodi gdje kobalt-oksidi reagira s litijevim ionima i tvori litij-kobalt oksid:



Reakcija oksidacije se događa na anodi gdje grafitni spoj LiC_6 tvori grafit i litij-ione:



Potpuna reakcija je prikazana slijedećom formulom (s lijeva na desno je prikazano pražnjenje, a s desna na lijevo punjenje akumulatora):



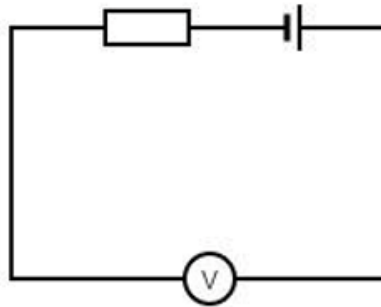
3. Unutarnji otpor akumulatora

Svi izvori električne energije pokazuju svojstvo unutarnjeg otpora do jedne razine. Akumulatori posjeduju ovo svojstvo jer elementi koji ih sačinjavaju nisu idealni vodiči te zbog toga pružaju otpor električnoj struji koja protječe kroz njih.

Realni izvor električne energije može biti prikazan kao serijski spoj idealnog izvora električne energije i otpornika. Otpornik u ovom slučaju predstavlja unutarnji otpor realnog izvora električne energije. Pad napona uslijed unutarnjeg otpora je na ovaj način prikazan padom napona na otporniku.

Unutarnji otpor akumulatora se može izvesti mjerenjem napona neopterećenog akumulatora i mjerenjem napona i jakosti električne struje opterećenog akumulatora.

Mjerenje napona neopterećenog akumulatora se može prikazati shemom na Slici 13. Napon neopterećenog akumulatora naziva se još i elektromotorna sila E , ili napon otvorenih stezaljki akumulatora, a predstavlja idealni izvor konstantnog napona bez obzira na opterećenje, što je u praksi nemoguće.



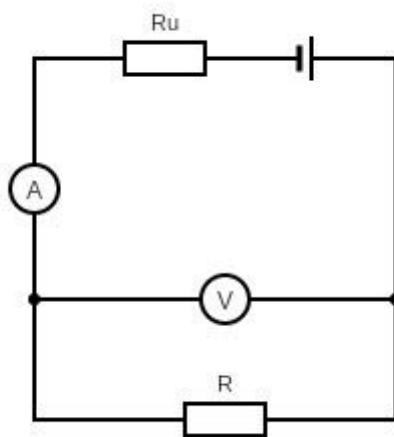
Slika 13. Shema mjerenja napona neopterećenog akumulatora, [8]

Mjerenje napona i jakosti električne struje opterećenog akumulatora se može prikazati sljedećom shemom na Slici 14. Nakon priključenja trošila krugom protječe struja, a na stezaljkama se mjeri realni napon akumulatora U , koji je prema 2. Kirchoffovom zakonu, jednak naponu neopterećenog akumulatora E , umanjenog za pad napona na unutarnjem otporu:

$$U = E - IR_u \quad (27)$$

Slijedi da je unutarnji otpor izvora:

$$R_u = \frac{E - U}{I} \text{ [}\Omega\text{]} \quad (28)$$



Slika 14. Shema za mjerenje napona i struje akumulatora pod opterećenjem, [8]

Dakle, u praksi, pri mjerenju unutarnjeg otpora akumulatora je potrebno prvo izmjeriti napon akumulatora bez opterećenja E . To se radi na jednostavan način multimetrom prema shemi na Slici 13. Jednostavno na otvorene stezaljke spojimo multimetar i očitamo vrijednost. Zatim je potrebno izmjeriti napon akumulatora pod opterećenjem U te vrijednost jakosti struje I prema Slici 14. Tijekom mjerenja svih vrijednosti je potrebno sačekati da se vrijednosti napona i struje na multimetru stabiliziraju jer će imati tendenciju opadanja prije nego se može očitati prava vrijednost. Razlog tendencije opadanja na početku je unutarnji otpor multimetra i otpor vodiča. Prije ovog mjerenja je potrebno uvjeriti se može li otpornik podnijeti struju iz akumulatora. Potrebno je očitati snagu koju može podržati otpornik i usporediti sa vrijednosti dobivene iz ove formule za snagu:

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad (29)$$

gdje R predstavlja otpor, a U napon. Dakle, snaga dobivena formulom (29) mora biti manja od deklarirane na otporniku. Kada smo izmjerili vrijednost napona akumulatora bez opterećenja E i napona pod opterećenjem U , potrebno je preko formule (28) izračunati vrijednost unutarnjeg otpora u omima.

4. Određivanje unutarnjeg otpora akumulatora zrakoplova *Cessna 172*

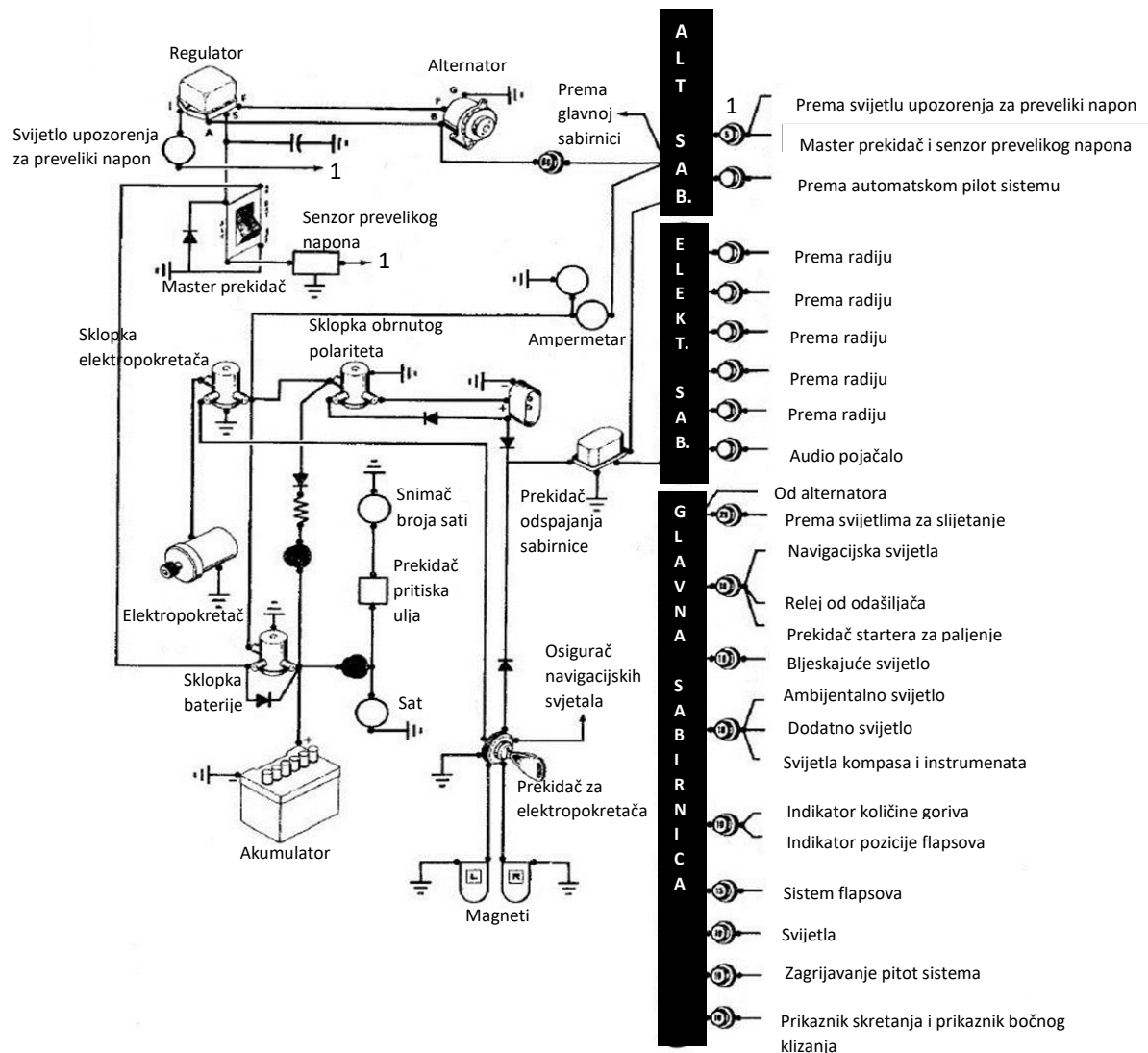
4.1. Općenito o zrakoplovu *Cessna 172* i električnom sustavu istog

Cessna model 172 je proizvod američke firme *Cessna Aircraft Company*. Proizvodi se od davne 1955. godine, a do sada ih je proizvedeno preko 44 tisuće, što je više od bilo kojeg drugog zrakoplova. *Cessna 172* je visokokrilac s dihedralnim krilom, što mu daje veliku stabilnost u letu. Stajni trap je neuvlačeći, a način izvedbe je tricikl. Zrakoplov je četverosjed prvobitno namijenjen za školovanje. Ima ugrađen jedan motor marke *Lycoming* snage 160 konjskih snaga koji je dovoljan da dignu masu od jedne tone ukupnog tereta. Maksimalni broj okretaja motora u minuti je 2700. Motor je fiksno spojen na dvokraku elisu.

Električni sustav radi na 28 V dok je sam akumulator na 24 V što je dovoljno za opskrbu električnom energijom potrošačima dok je motor ugašen ili za samo pokretanje motora. Prilikom upuštanja motora u rad, akumulator dostavlja dostatnu struju generator-pokretaču („*starter-generator*“). Glavni prekidač akumulatora i prekidač *elekropokretača*-a su 2 dvije sklopke crvene boje jedna pored druge, a poznatiji je kao *master switch*. Prekidač akumulatora povezuje akumulator s električnim sustavom dok drugi prekidač uključuje *starter*. Kad se motor upali, on pokreće generator koji pomoću promjenjivog magnetskog polja stvara izmjeničnu struju koju regulator uzima i pretvara u istosmjernu 28 V. Sabirnica glavne elektronike koja, na primjer diže zakrilca, je odvojena od avionike zrakoplova pomoću sklopke. Glavni razlog je taj što je avionika jako osjetljiva na oscilacije napona koji se stvaraju tokom pokretanja *starter*-a. Sklopka se uključuje i isključuje kad motor radi. Sva oprema je zaštićena zasebnim osiguračem koji se mjeri u amperima. Kad dođe do kratkog spoja, poveća se jakost struje koja dolazi do osigurača i on prekida protok struje i može spriječiti oštećenje instrumenta ili čak mogućeg požara, [9].

Motor koristi struju iz akumulatora samo za početno pokretanje dok je daljnji rad samostalan. Glavni razlog takve izvedbe je ostvarivanje neovisnog rada motora u slučaju otkaza električnog sustava. Motor vrti magnete i na taj način proizvodi impulse potrebne za paljenje svjeće. Njihov rad se može jedino zaustaviti uzemljenjem, a to radi na način da impulsi idu u uzemljenje umjesto u svjećicu. *Cessna* ima dvije svjeće na svakom cilindru i dvostruki sustav paljenja pa ako jedan zakaže, ostane drugi. Postoji prekidač za sustave paljenja u pozicijama *L R i Both*. Pomoću njih uključujemo sustave paljenja, ali i provjeravamo rad svakog zasebno, čak i ako su sustavi uzemljeni. Kad isključimo jedan od sustava dolazi do

pada okretaja motora, ali ako ne dođe, to znači da je uzemljenje prekinuto [9]. Na Slici 15. je prikazana shema električnog sustava zrakoplova *Cessna 172* sa svim komponentama.



Slika 15. Shema električnog sustava zrakoplova *Cessna 172*, [9]

Cessna ima akumulator od 24 V i moguće jakosti struje 14 A i 17 A. Za mjerenje je korišten akumulator od 17 A, marke *gill*, oznake *g-242*. To je olovni akumulator mase 12 kilograma. Sam akumulator ima posebnu kutiju u kojoj se nalazi u zrakoplovu koji sprječava od mogućeg izlivanja tekućine iz akumulatora po ostatku zrakoplova.

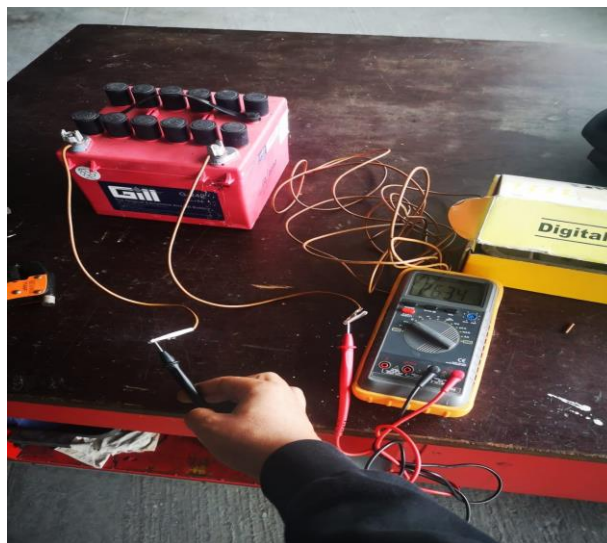
Prije samog ugrađivanja novog akumulatora potrebno je provjeriti vizualno da nema oštećenja. Također potrebno je provjeriti jesu li svi ventili na svom mjestu i jesu li pričvršćeni. Mehanička oštećenja moraju biti provjerena jer je unutar akumulatora sumporna kiselina. Kiselina ima svojstvo jakog nagrizanja i tokom kontakta s kožom dolazi do opekline. U dodiru s očima dolazi do nadraživanja ili čak osljepljivanja.

Nakon vizualne provjere, pomoću voltmetra izmjerimo napon akumulatora. Početno Punjenje se mora odrađivati u prostoru koji je dobro ventiliran i temperatura je od 18 °C do 27 °C. Akumulator mora biti spojen na punjač iz kojeg izlazi struja napona između 28,2 V i 29 V. Punjači se mogu samo razlikovati po jakosti struje koja izlazi iz punjača. Više ampera daje za rezultat kraće vrijeme punjenja. Kad se na punjaču prikaže da puni strujom manjom od pola ampera, to znači da je akumulator pun i da možemo prekinuti punjenje.

Nakon određenog vremena potrebno je izvaditi van akumulator, provjeriti ga vizualno i izmjeriti napon. Provjera se mora odrađivati na dobro ventiliranom mjestu jer akumulator proizvodi plinove koji mogu biti eksplozivni. Postoji poseban protokol kad dolazi do dubokog pražnjenja koje dolazi tokom ekstremnih situacija, a takva situacija se može prepoznati kad je na voltmetru u zrakoplovu prikazan napon ispod 21 V.

4.2. Određivanje unutarnjeg otpora akumulatora zrakoplova *Cessna 172*

Mjerenje je izvedeno u Hrvatskom zrakoplovnom nastavnom središtu gdje je jedna Cessna 172 iz flote bila na izvanrednom servisu. Iz dotičnog zrakoplova je korišten akumulator marke *Gill* oznake *G-242*. *Gill* je marka akumulatora specificirana za zrakoplove, a dio je američke kompanije *Teledyne*. Konkretno, ovaj model ima kapacitet za pohranu električne energije 24 Ah. Na početku je multimeter stavljen na opciju da mjeri napon istosmjerne struje. Spajamo akumulator i multimeter pomoću vodiča, crnu žicu na minus pol, crvenu na plus pol akumulatora. Tako dobijemo napon otvorenih stezaljki akumulatora. Kasnije se spaja otpornik u strujni krug prema shemi na Slici 14. Pomoću multimetra koji je stavljen za mjerenje istosmjerne struje, izmjerimo realni napon akumulatora. Mjerenje je prikazano na Slici 16. Nakon izmjerene napona, multimeter stavljamo na opciju mjerenja jakosti struje. Spajamo ga prema shemi na Slici 14.



Slika 16. Mjerenje napona otvorenih stezaljki

5. Određivanje unutarnjeg otpora akumulatora zrakoplova *Diamond DV20*

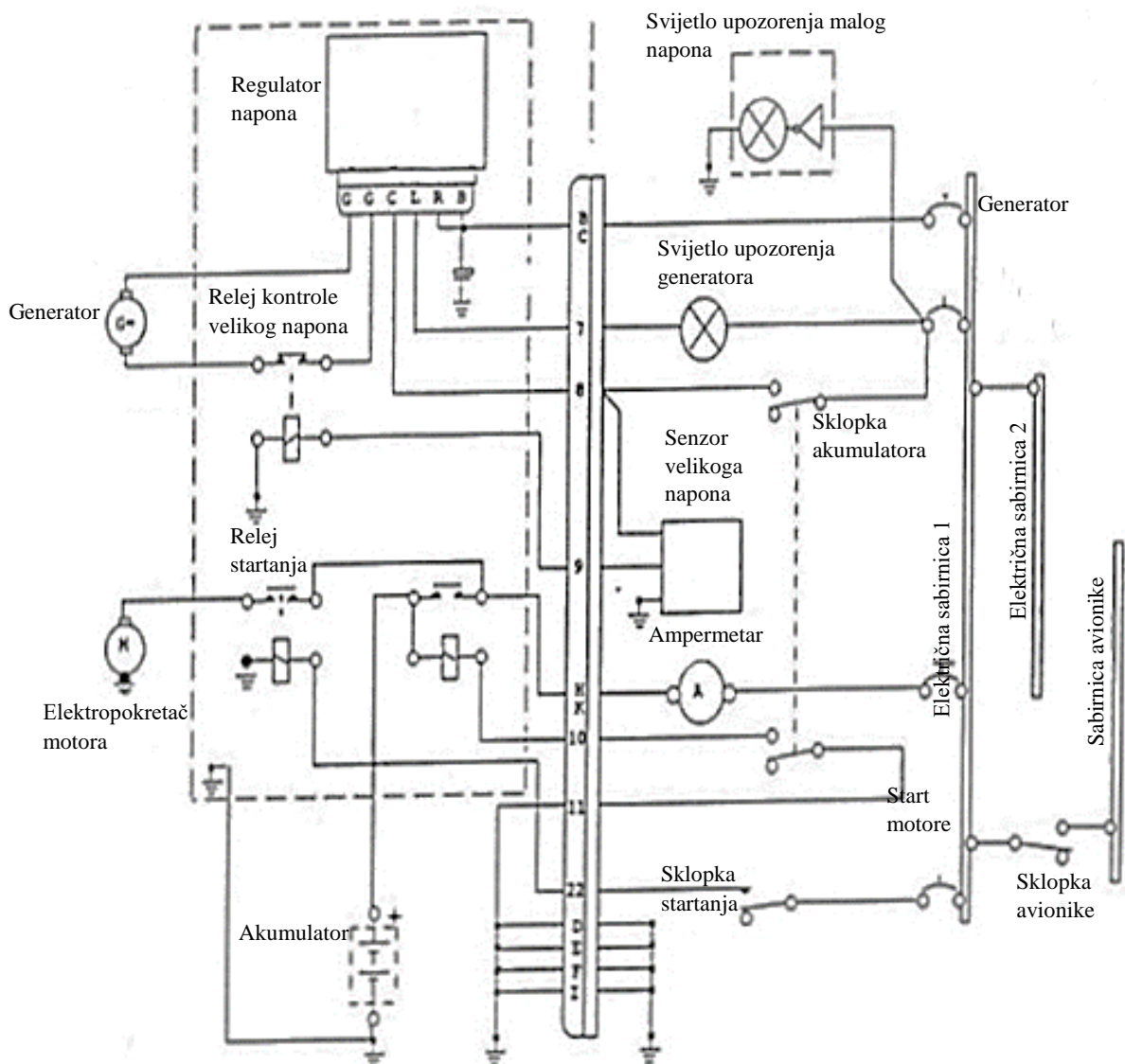
5.1. Općenito o zrakoplovu *Diamond DV20* i o električnom sustavu istog

Diamond je austrijski proizvođač jednomotornih i višemotornih zrakoplova. Model *DV20* je dosta sličan prvoj *Diamond*-ovoj motornoj jedrilici *Dimoni*, a neke od većih razlika su da *Dimona* ima veći raspon krila, bolju finesu, slabiji motor te nema flapsove. *DV20* je jednomotorni niskokrilac, dvosjed. Motor je marke *Rotax model 912* koji razvija 100 konjskih snaga. Radi sigurnosti od pregrijavanja, glava motora je hlađena tekućinom. Zanimljivo je da mu je konstrukcija napravljena od kompozita dok je na *Cessni* od aluminija što je jedan od razloga zašto *DV20* ima značajno manju masu. Način izvedbe podvozja je tricikl. Elisa nije direktno spojena na motor, već preko redukcijske kutije. Također elisa ima promjenjivi korak. Sve češće se koristi za školovanje umjesto *Cessne* jer ima manju potrošnju, promjenjivi korak elise i malo veću osjetljivost na palici. Na Slici 17. je prikazan zrakoplov *Diamond DV20*. [10]

Princip rada električnog sustava i sustava paljenja je isti kao i na *Cessni 172*, samo što *DV20* ima akumulator od 12 V, a generator proizvodi struju od 14 V. Shema električnog sustava zrakoplova *Diamond DV20* je prikazana na Slici 18.



Slika 17. Zrakoplov *Diamond DV20*



Slika 18. Električni sustav zrakoplova Diamond DV20, [10]

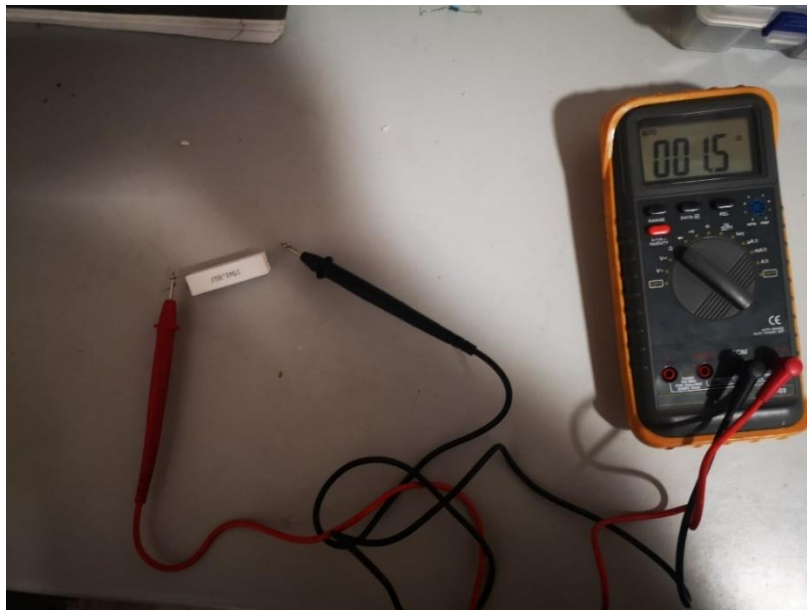
5.2. Određivanje unutarnjeg otpora akumulatora zrakoplova *Diamond DV20*

Na *Diamondu* se mora skinuti plastika koja se nalazi iznad motora da bi došli do akumulatora. Nažalost zbog okolnosti nije bilo moguće mjerenje na akumulatoru u operativnoj upotrebi, već sam morao mjerenja napraviti na dotrajalom akumulatoru koji nije više u upotrebi. Testni akumulator je bio *Yuasa*, kapaciteta 30 Ah i napona 12 V. Prvo je akumulator bio spojen na punjač koji puni konstantnim naponom od 13,4 V.

Mjerenje se izvodilo identično kao na *Cessni*, korišten je isti otpornik, vodiči i multimetar.

6. Analiza rezultata

Prema podacima koji su izmjereni, dobiveno je da je otpor otpornika 200Ω , a koristio se za oba mjerenja. Otpornik je snage 15 W , što je više nego dovoljno za eksperiment. Mjerenje otpora otpornika je prikazano na Slici 19. Kasnije je izmjereno napon otvorenih stezaljki akumulatora (E) na svakom akumulatoru zasebno. Od podataka nam je još trebao podatak napona (U) i jakosti struje (I) kad spojimo otpornik u strujni krug kao na shemi na Slici 14. Pomoću ta tri podataka i formule (28) gdje je unutarnji otpor jednak omjeru razlike napona E i jakosti struje I opterećenog akumulatora. U Tablici 1. su prikazane mjerene vrijednosti i iznos unutarnjeg otpora za pojedini akumulator.



Slika 19. Mjerenje otpora otpornika

Tablica 1. Rezultati mjerenja te izračun unutarnjeg otpora za pojedini akumulator

Tip zrakoplova	E [V]	U [V]	I [A]	R_u [Ω]
Cessna 172	26,34	26,08	0,172	0,015
DV20	12,2	11,8	0,258	0,051

Prema podacima dobivenim izračunima vidimo da Cessnim akumulator ima manji unutarnji otpor što znači da je akumulator manje sklon samopražnjenju. Akumulator iz Diamonda pokazuje tri puta veći unutarnji otpor. Taj akumulator više nije bio u upotrebi jer više nije imao dovoljnu snagu da pokrene motor zrakoplova u vrijeme kad zrakoplov nije duže letio. Jasno je da je njegova sklonost prema samopražnjenju dosegla previsoku razinu, narušavajući njegovu održivost i funkcionalnost. Oba akumulatora su stavljena u uporabu 2020. godine, ali Cessnin akumulator je još uvijek u uporabi.

7. Zaključak

Kod manjih zrakoplova sa klipnim motorima su najčešće korišteni olovni akumulatori zbog njihove male cijene i jednostavne izvedbe, dok je kod većih zrakoplova sa mlaznim motorima najčešće korišten nikal-kadmij akumulator zbog mogućnosti dostavljanja velike struje u kratkom vremenu potrebne za pokretanje mlaznih motora. Srebro-cink akumulatori su našli primjenu u nekim borbenim zrakoplovima te svemirskim letjelicama zahvaljujući najvećoj gustoći energije. Zbog svoje robusnosti nikal-željezo akumulatori su pronašli primjenu u zrakoplovstvu. Njegova primjena je sve manja zbog male gustoće energije. Naglim razvojem tehnologije, litij-ionski akumulator pokazuje veliki potencijal u primjeni u modernim zrakoplovima, ali ga koče sigurnosni problemi kod relativno nove tehnologije.

Sigurnost je apsolutni prioritet u svijetu zrakoplovstva. Zato se pri razvoju i održavanju zrakoplovnih akumulatora daje najveća pozornost na njihovu sigurnost i pouzdanost. Drugi prioritet su elektrokemijska svojstva, cijena te jednostavnost izvedbe i održavanja.

Danas su još u upotrebi česti olovni akumulatori, a za provjeru njihovog stanja je potrebno redovito mjeriti elektrokemijska svojstva, pa je tako moguće na jednostavan način izmjeriti unutarnji otpor ovog akumulatora. Za mjerenje je potreban akumulator, multimetar te jedan otpornik. Potrebno je izmjeriti elektromotornu silu akumulatora. Od podataka nam je još trebao napon i jakost struje, ali pod opterećenim akumulatorom. Zatim je moguće izračunati unutarnji otpor jednostavnom formulom. Iz izračuna smo dobili da unutarnji otpor Diamondovog akumulatora $0,051 \Omega$, a Cessninog $0,015 \Omega$. Cessnin akumulator ima manju razinu samopražnjenja i još uvijek je u uporabi. Akumulator iz zrakoplova Diamond više nije bio u funkciji jer je razina samopražnjenja bila previsoka. Ne možemo tvrditi na temelju izmjerenog unutarnjeg otpora da je Cessnin akumulator kvalitetniji jer ne znamo koliki je unutarnji otpor novih akumulatora, a ni koliki su im maksimalni otpori da bi akumulator bio ispravan.

Literatura

1. Tino Bucak. Zrakoplovni elektrosustavi. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu; 2011.
2. Tehnička enciklopedija. Zagreb: Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1963.
3. SKYbrary. Aircraft Batteries. Preuzeto s: <https://skybrary.aero/articles/aircraft-batteries>. [Pristupljeno: 26.08.2022.]
4. SKYbrary. Lithium-Ion Aircraft Batteries as a Smoke/Fire Risk. Preuzeto s: <https://skybrary.aero/articles/lithium-ion-aircraft-batteries-smokefire-risk>. [Pristupljeno: 26.08.2022.]
5. AeroToolBox. Aircraft Lead-Acid Batteries. Preuzeto s: <https://aerotoolbox.com/aircraft-lead-acid-battery/>. [Pristupljeno: 26.08.2022.]
6. Gold Peak Industries. Lithium ion technical handbook. Taiwan. Preuzeto s : https://web.archive.org/web/20071007175038/http://www.gpbatteries.com/html/pdf/Li-ion_handbook.pdf. [Pristupljeno: 26.08.2022.]
7. Let's talk science. How does lithium-ion battery work. Preuzeto s: <https://letstalkscience.ca/educational-resources/stem-in-context/how-does-a-lithium-ion-battery-work>. [Pristupljeno: 08.06.2023.]
8. Jurica Ivošević. Nastavni materijali iz predmeta zrakoplovni elektrosustavi: Izvori električne energije. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu.
9. Pilot Operating Handbook Skyhawk Cessna Model 172. Cessna 1978.
10. Airplane Flight Manual Diamond DV20. Diamond aircraft, Austria 1999.
11. Avstop. Leadacidbatteries. Preuzeto s: <http://avstop.com/ac/apgeneral/leadacidbatteries.html>. [Pristupljeno: 22.08.2023.]
12. Studyaircrafts. Aircraft-battery. Preuzeto s: <https://www.studyaircrafts.com/aircraft-battery> [Pristupljeno: 22.08.2023.]
13. Wikipedia. Nickel cadmium battery. Preuzeto s: https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93cadmium_battery [Pristupljeno: 22.08.2023.]

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je _____ završni rad
(vrsta rada)

isključivo rezultat mojega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da 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/diplomskog rada pod naslovom Određivanje unutarnjeg otpora zrakoplovnog akumulatora, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 29.08.2023

David Miser, David Miser
(ime i prezime, potpis)