

Lucija Andabak
Hrvatski operator prijenosnog sustava d.d.
lucija.andabak@hops.hr

Petar Tuškan
Hrvatski operator prijenosnog sustava d.d.
petar.tuskan@hops.hr

Tonko Garma
Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje
garma@fesb.hr

Denisa Galzina
Hrvatski operator prijenosnog sustava d.d.
denisa.galzina@hops.hr

ANALIZA ISPITIVANJA IMPEDANCIJE OLOVNIH AKUMULATORSKIH BATERIJA

SAŽETAK

Istosmjerni sustavi besprekidnog napajanja u objektima operatora prijenosnog sustava osiguravaju napajanje i pouzdan rad uređaja za upravljanje, signalizaciju, zaštitu, mjerenje i regulaciju te informatičke i telekomunikacijske opreme. Jednu od glavnih uloga u osiguravanju besprekidnosti napajanja navedene opreme i uređaja imaju stacionarne olovne akumulatorske baterije koje su sastavni dio istosmjernog sustava. Stoga, pravilnim i redovitim održavanjem, odnosno ispitivanjem akumulatorskih baterija teži se sigurnijem i pouzdanijem radu napajane opreme, a time sustava u cjelini.

Kao metode ispitivanja akumulatorskih baterija koriste se ispitivanje kapaciteta (kapacitivna proba) i impedancije baterije. U radu je prikazana analiza i usporedba podataka prilikom mjerenja impedancije za dvije akumulatorske baterije istog tipa i različite starosti. Mjerenje impedancije u usporedbi s ispitivanjem kapaciteta baterije je neinvazivna metoda pomoću koje je moguće odrediti stanje baterije, a temeljem čega se mogu donijeti odluke u vezi s održavanjem i zamjenom baterije. Kroz ovaj rad iznijet će se prednosti metode mjerenja impedancije baterije u odnosu na kapacitivnu probu te na taj način pokušati utjecati na unaprjeđenje postojeće prakse održavanja sustava DC razvoda.

Ključne riječi: olovna akumulatorska baterija, ispitivanje kapaciteta, ispitivanje impedancije, besprekidno napajanje

ANALYSIS OF THE IMPEDANCE TEST OF LEAD-ACID BATTERIES

SUMMARY

Direct current systems of uninterrupted power supply in the facilities of the transmission system operator ensure power supply and reliable operation of devices for control, signaling, protection, measurement, and regulation, as well as IT and telecommunications equipment. Stationary lead-acid batteries, which are an integral part of the direct current system, play one of the main roles in ensuring the uninterrupted power supply of the mentioned equipment and devices. Therefore, proper and regular maintenance, i.e. battery testing, strives for safer and more reliable operation of energized equipment, thus the system as a whole.

Battery capacity and impedance tests are used as battery testing methods. The paper analyzes and compares data when measuring impedance for two stationary lead-acid batteries of the same type but different ages. Impedance tests, compared to battery capacity tests, are noninvasive methods to determine the condition of the battery, based on which decisions can be made regarding battery maintenance and replacement. Through this paper, the advantages of the battery impedance measurement method in comparison to the capacitive test will be presented, and in this way, an attempt will be made to improve of the existing practice of maintaining the substation DC system.

Key words: lead-acid battery, capacity test, impedance test, uninterruptible power supply

1. UVOD

Sustavi istosmjernog besprekidnog napajanja predstavljaju najpouzdanije izvore električne energije u elektroenergetskim postrojenjima, zbog čega imaju ključnu ulogu u osiguravanju pouzdanog rada najvažnijih uređaja i opreme kao što su uređaji za upravljanje, signalizaciju, zaštitu, mjerenje i regulaciju te informatička i telekomunikacijska oprema [1].

Glavna funkcija sustava istosmjernog napajanja je ispravljanje napona iz niskonaponske izmjenične mreže, napajanje istosmjernih potrošača odgovarajućim naponom te dopunjavanje akumulatorskih baterija. U slučaju nestanka mrežnog napona, potrošači se kontinuirano napajaju iz akumulatorskih baterija, i to bez prekida u radu. Kada se mrežni napon ponovno uspostavi, potrošači nastavljaju s napajanjem iz mreže, dok se baterije istovremeno nadopunjavaju.

Olovne akumulatorske baterije u objektima Hrvatskog operatora prijenosnog sustava (u daljnjem tekstu HOPS) koriste se kao rezervni izvor napajanja važnih trošila u slučaju nestanka niskonaponske mreže ili kvara ispravljača te time osiguravaju besprekidnost napajanja. U elektroenergetskim postrojenjima najčešća autonomija baterije je tri do pet sati što je u većini slučajeva dovoljno vremena za otklanjanje kvara.

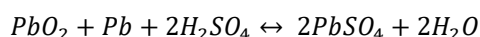
Funkcionalnost akumulatorske baterije mora se zadržati tokom cijelog životnog vijeka i u svim predviđenim uvjetima. Kraj životnog vijeka definira se kao 80% nazivnog kapaciteta te i u tom slučaju moraju se ispuniti zahtjevi za autonomijom [2], [3]. Na životni vijek baterije, odnosno smanjenje istog utječe porast temperature zraka iznad 25 °C, dok se smanjenjem temperature zraka privremeno smanjuje kapacitet baterije [4]. Preporuka je zamjena baterije kada ispitivanja pokažu kapacitet ispod 80%.

2. PRINCIP RADA OLOVNIH AKUMULATORSKIH BATERIJA

2.1. Glavne komponente olovni akumulatorskih baterija

Baterije su elektrokemijski uređaji koji pretvaraju kemijsku energiju u električnu energiju putem elektrokemijskih oksidacijskih i redukcijskih reakcija koje se odvijaju na elektrodama. Čelija se sastoji od anode na kojoj se odvija oksidacija tijekom pražnjenja, katode na kojoj se odvija redukcija te elektrolita koji provodi elektrone (putem iona) unutar čelije [5].

Za olovne akumulatorske baterije komponente su sljedeće: pozitivna elektroda je napravljena od olovnog dioksida (PbO_2), a negativna od olova (Pb). Kao elektrolit koristi se razrijeđena sumporna kiselina (H_2SO_4) koja služi kao medij za provođenje iona između elektroda tijekom punjenja i pražnjenja. Pojednostavljena jednačina reakcije za čeliju baterije u napunjenom, odnosno ispražnjenom stanju je sljedeća [6]:



Olovna akumulatorska baterija koristi reakcije olova i olovnog oksida u prisutnosti sumporne kiseline kako bi skladištila i oslobodila energiju. Čitajući jednačinu s lijeva na desno, prikazan je proces pražnjenja baterije, što je označeno strelicom udesno. U tom procesu, olovo i olovni oksid, uz pomoć sumporne kiseline, reagiraju i stvaraju olovni sulfat ($PbSO_4$) i vodu (H_2O). S druge strane, tijekom punjenja, što je označeno strelicom ulijevo u jednačini, olovo i olovni oksid se obnavljaju u svoju izvornu formu.

2.2. Tipovi olovni akumulatorskih baterija

Pouzdanost i funkcionalnost akumulatorskih baterija najviše ovisi o tipu baterije te o atmosferskim prilikama prostorije u kojoj se nalaze (temperatura zraka, ventilacija zraka). Tipovi olovni baterija su otvorene (ventilirane) i zatvorene (VRLA – Valve Regulated Lead-Acid) baterije, među kojima postoje određene razlike u konstrukciji i načinu rada [7], [8].

Otvorene olovne akumulatorske baterije (ventilirane baterije) imaju tekući elektrolit, sumpornu kiselinu, što omogućava dolijevanje destilirane vode zbog gubitka tekućine isparavanjem. Opremljene su ventilacijskim otvorima koji omogućuju ispuštanje plinova (vodik i kisik) nastalih tijekom punjenja.

Zatvorene olovne akumulatorske baterije (VRLA) imaju izvedbu elektrolita koji je apsorbiran u separatorima (AGM – Absorbed Glass Mat) ili je u obliku gela (GEL baterije), što onemogućava curenje. VRLA baterije imaju ventile za regulaciju tlaka, koji sprječavaju gubitak vode i minimaliziraju ispuštanje plinova.

U praksi, akumulatorske baterije otvorenog tipa u principu su se pokazale pouzdanijima, dok su hermetički zatvoreni tipovi kompaktnijih dimenzija ipak manje pouzdani.

3. ODRŽAVANJE I ISPITIVANJE OLOVNIH AKUMULATORSKIH BATERIJA

Održavanje olovnih akumulatorskih baterija u HOPS-u obavlja se prema važećim zakonskim i podzakonskim aktima, preporukama proizvođača i vlastitom iskustvu [9]. Za ispravnu funkcionalnost i dugi životni vijek baterija potrebno je održavati adekvatni konstantni napon punjenja. Smanjenje pouzdanosti i raspoloživosti akumulatorskih baterija najčešće se očituje kroz starenje baterije, tj. smanjenjem kapaciteta što se može uočiti kao nagli propad napona članaka baterije tijekom opterećenja.

Redovitim provjerama kapaciteta, unutarnjeg otpora, impedancije te vizualnim pregledima mogu se uočiti lošiji članci u akumulatorskoj bateriji. Isto tako se može na vrijeme uočiti zagrijavanje ili korozija spojnica te adekvatnom intervencijom vratiti pouzdanost baterije.

Izvanredno održavanje najčešće se odnosi na sanaciju i zamjenu spojnica uslijed korozije zbog djelovanja kiseline te zamjenu pojedinih članaka akumulatorske baterije zbog lošeg otpora, malog kapaciteta ili korozije polova.

Ispitivanja koja se provode da bi se utvrdila funkcionalnost baterije su kapacitivno pražnjenje baterije (mjerenje kapaciteta, kapacitivna proba) te mjerenje impedancije članaka baterije i otpora spojnica između članaka baterije čime se može otkriti pojedini loš članak i loša međuveza. U nastavku su ta ispitivanja pobliže objašnjena.

3.1. Ispitivanje kapaciteta olovnih akumulatorskih baterija

Ispitivanje kapaciteta baterije je postupak kojim se provjerava koliko električne energije (Ah – amper-sati) baterija može pohraniti i isporučiti pri određenim uvjetima pražnjenja. Cilj ispitivanja je osigurati da baterija može zadovoljiti zahtjeve sustava u kojem se koristi, kao i otkriti moguće degradacije performansi.

Kapacitivna proba smatra se najpouzdanijom metodom za određivanje preostalog kapaciteta baterije i procjenu njenog stvarnog stanja [11]. Ova metoda podrazumijeva **potpuno pražnjenje baterije** pod kontroliranim uvjetima do unaprijed određenog graničnog napona, u određenom vremenu pražnjenja te usporedbom s nominalnim kapacitetom, a što je definirano od proizvođača baterija. Taj granični, odnosno krajnji napon pražnjenja je napon do kojeg se može dugotrajno isprazniti olovna akumulatorska baterija, a da ne započne degradacija same baterije.

U praksi HOPS-a vrijeme ispitnog pražnjenja baterije konstantnom strujom do definiranog krajnjeg napona je minimalno pet sati, dok se navedeno vrijeme može povećati i na deset sati, a ispitna struja odabire se prema tablicama proizvođača za pražnjenje konstantnom strujom do definiranog graničnog napona pražnjenja i prema odabranom vremenu pražnjenja [10].

Postupak provođenja kapacitivne probe akumulatorskih baterija je takav da prije početka ispitivanja, baterija mora biti neprekidno priključena na napon održavanja u zadnjih 96 sati. Potrebno je izmjeriti napon svakog članka uz priključen ispravljač. Potom, na sustav istosmjernog napajanja se spaja prijenosna baterija, a stacionarna baterija koja se ispituje se isključuje iz pogona.

Ispitna akumulatorska baterija se zatim spaja na otpornik za pražnjenje na kojem se podesi struja tereta po tablicama proizvođača za režim 5-satnog ili 10-satnog pražnjenja. Baterija se prazni konstantnom strujom do graničnog napona pražnjenja. Svakih 60 minuta zabilježi se napon svakog članka baterije te ukupni napon baterije.

Pražnjenje je potrebno prekinuti u slučaju isteka vremena pražnjenja (5 ili 10 sati) ili kada ukupni napon padne na vrijednost graničnog napona pražnjenja. Tada je potrebno zabilježiti proteklo vrijeme pražnjenja radi izračuna raspoloživog kapaciteta. Treba pripaziti na to da se dubokim pražnjenjem te čestim pražnjenjima akumulatorske baterije također smanjuje pouzdanost i životni vijek.

3.2. Ispitivanje impedancije olovnih akumulatorskih baterija

Ispitivanje impedancije olovnih akumulatorskih baterija je neinvazivna metoda ispitivanja koja omogućava brzo i sigurno određivanje stanja zdravlja bez potrebe za dubokim pražnjenjem baterije. Budući da se prilikom ispitivanja impedancije testira cijeli električni put baterije, od terminalne ploče do terminalne ploče, može se lako i pouzdano otkriti slabosti u ćelijama i međučlanskim konektorima [11].

Osnovni princip ispitivanja impedancije baterije je takav da se uređaj za ispitivanje impedancije poveže na početni i krajnji priključak akumulatorske baterije, dok je ona i dalje povezana na punjačima. Drugačije rečeno, nije potrebno odspajanje baterije s istosmjernog sustava kako bi se obavilo mjerenje. Potom se primjeni ispitna izmjenična struja na akumulatorsku bateriju i mjeri se pada napona na svakom pojedinom članku baterije te međučlanskim konektorima. Na temelju ispitne struje te pada napona, uređaj za ispitivanje impedancije prikazuje iznos impedancije članaka baterije te otpora spojnih veza, primjenom Ohmovog zakona [11]. U praksi se ne mjeri samo pad napona, već i izmjenična struja, jer u baterijama mogu postojati i drugi utjecaji koji mogu povećati ili smanjiti ukupnu vrijednost mjerenja. Ove dodatne izmjenične struje mogu potjecati iz sustava punjača te time dodatno narušiti kapacitet baterije. Postojanje takvih struja ukazuje i na kvalitetu i rad punjača.

Kako je poznato da baterije s vremenom prirodno stare i gube svoju učinkovitost, kroz mjerenje impedancije, može se pratiti kako se baterija ponaša tijekom svog životnog ciklusa. Povećanje impedancije obično je indikator smanjenja kapaciteta, što znači da baterija nije u stanju isporučiti energiju u istoj mjeri kao prije.

4. REZULTATI MJERENJA IMPEDANCIJE OLOVNIH AKUMULATORSKIH BATERIJA

Za potrebe ovoga rada napravljeno je ispitivanje impedancije dvije akumulatorske baterije istog tipa, a različite godine proizvodnje. Tip baterija na kojima je provedeno ispitivanje su VRLA AGM baterije nazivnog kapaciteta od 220 Ah. Baterije se nalaze na istoj lokaciji, točnije u istoj prostoriji, a kako je ispitivanje provedeno u jednom danu, unutar nekoliko sati, time su atmosferske prilike u prostoriji iste za obje ispitane baterije.

Za potrebe analiziranja dobivenih rezultata olovne akumulatorske baterije koje su ispitivane nazovimo po redu ispitivanja akumulatorska baterija broj 1 i akumulatorska baterija broj 2. Na Slici 1. prikazane su baterije na kojima je izvršeno ispitivanje impedancije. Na lijevoj strani Slike 1. je prikazana akumulatorska baterija broj 1, a na desnoj strani slike akumulatorska baterija broj 2.



Slika 1. Predmet ispitivanja - olovne akumulatorske baterije, broj 1 (lijevo) i broj 2 (desno)

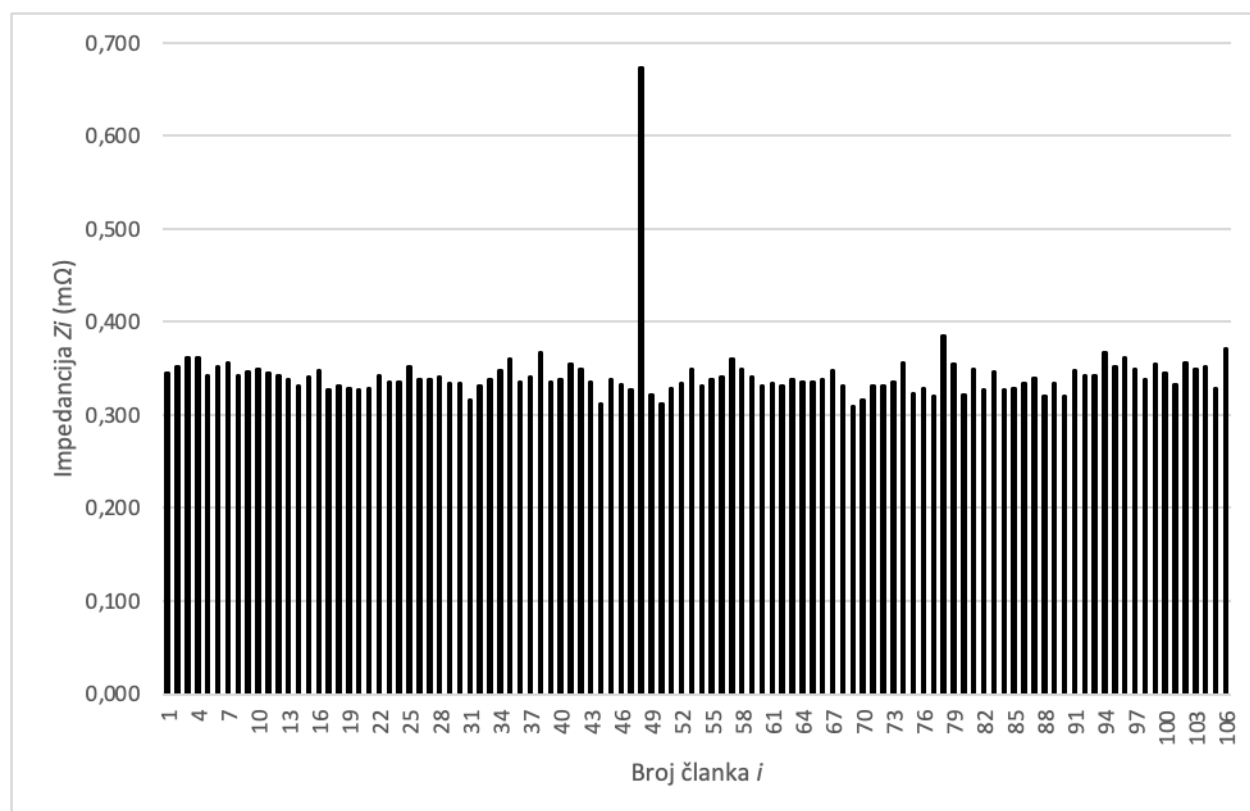
4.1. Analiza rezultata mjerenja akumulatorske baterije br. 1

Akumulatorska baterija broj 1 na kojoj se provodilo ispitivanje je proizvedena 2021. godine. Sastoji se od 106 članaka spojenih u seriju. Testna izmjenična struja uređaja za mjerenje iznosila je 5,20 A, dok je valovitost struje koju daju punjači iznosila 0 A. U Tablici I. prikazani su rezultati mjerenja impedancije.

Tablica I. Rezultati mjerenja impedancije akumulatorske baterije br. 1

Broj članka i	Impedancija Z_i (m Ω)	Napon članka U_i (V)	Otpor spojne veze $R_{i,i+1}$ ($\mu\Omega$)	Broj članka i	Impedancija Z_i (m Ω)	Napon članka U_i (V)	Otpor spojne veze $R_{i,i+1}$ ($\mu\Omega$)
1	0,345	2,270	26	54	0,331	2,263	23
2	0,352	2,268	24	55	0,338	2,265	26
3	0,362	2,270	24	56	0,341	2,263	266
4	0,362	2,268	29	57	0,360	2,263	26
5	0,343	2,270	29	58	0,350	2,265	26
6	0,352	2,273	34	59	0,341	2,265	23
7	0,357	2,263	29	60	0,331	2,263	26
8	0,343	2,270	29	61	0,334	2,263	23
9	0,347	2,270	31	62	0,331	2,263	23
10	0,350	2,263	38	63	0,338	2,263	28
11	0,345	2,268	38	64	0,336	2,263	21
12	0,343	2,270	41	65	0,336	2,263	26
13	0,338	2,268	29	66	0,338	2,263	23
14	0,331	2,270	31	67	0,348	2,263	19
15	0,341	2,270	14	68	0,331	2,261	26
16	0,348	2,270	14	69	0,310	2,261	33
17	0,327	2,273	12	70	0,317	2,263	31
18	0,331	2,268	7	71	0,331	2,265	33
19	0,329	2,268	17	72	0,331	2,258	42
20	0,327	2,268	26	73	0,336	2,261	33
21	0,329	2,270	19	74	0,357	2,263	31
22	0,343	2,268	14	75	0,324	2,263	31
23	0,336	2,268	14	76	0,329	2,268	35
24	0,336	2,270	14	77	0,320	2,265	28
25	0,352	2,270	17	78	0,385	2,263	31
26	0,338	2,270	19	79	0,355	2,265	28
27	0,338	2,261	17	80	0,322	2,258	174
28	0,341	2,270	122	81	0,350	2,258	24
29	0,334	2,265	31	82	0,327	2,261	26
30	0,334	2,268	33	83	0,347	2,261	24
31	0,317	2,263	33	84	0,328	2,261	23
32	0,331	2,268	35	85	0,329	2,263	28
33	0,338	2,270	38	86	0,334	2,263	26
34	0,348	2,270	28	87	0,340	2,261	24
35	0,360	2,270	19	88	0,320	2,270	31
36	0,336	2,268	26	89	0,334	2,261	26
37	0,341	2,265	23	90	0,320	2,261	33
38	0,367	2,261	23	91	0,348	2,263	26
39	0,336	2,270	23	92	0,343	2,263	24
40	0,338	2,270	29	93	0,343	2,263	31
41	0,355	2,263	33	94	0,367	2,258	10
42	0,350	2,268	59	95	0,352	2,261	19
43	0,336	2,263	17	96	0,362	2,273	22
44	0,313	2,265	23	97	0,350	2,258	22
45	0,338	2,265	21	98	0,338	2,265	19
46	0,333	2,268	22	99	0,355	2,258	17
47	0,327	2,263	19	100	0,345	2,261	10
48	0,674	2,263	24	101	0,333	2,263	19
49	0,322	2,263	23	102	0,357	2,258	17
50	0,313	2,268	19	103	0,350	2,263	17
51	0,329	2,265	19	104	0,352	2,256	19
52	0,334	2,265	23	105	0,329	2,261	26
53	0,350	2,263	26	106	0,371	2,258	2

Na temelju dobivenih rezultata može se grafički prikazati impedancija za svaki ispitani članak baterije broj 1. Takav grafički prikaz nalazi se na Slici 2.



Slika 2. Grafički prikaz rezultata ispitivanja impedancije baterije broj 1

Promatranjem histograma impedancije baterije broj 1 može se zaključiti sljedeće:

- Većina članaka ima sličnu impedanciju, tj. većina vrijednosti impedancije kreće se oko 0,34 mΩ, što ukazuje na relativno konzistentne karakteristike ćelija u bateriji.
- Jedan članak ima značajno veću impedanciju, članak br. 48, čija impedancija dostiže gotovo 0,7 mΩ. To može ukazivati na oštećeni ili degradirani članak unutar baterije.
- Postoje mala varijabilnost među ostalim člancima, ali su ta odstupanja unutar prihvatljivog raspona od $\pm 10\%$ od prosjeka kako je definirano prema [11].

Iz Tablice I. te grafičkog prikaza sa Slike 2. može se izvući sažetak ispitivanja impedancije, odnosno minimalna, prosječna i maksimalna vrijednost impedancije koja se pojavila prilikom ispitivanja. Sve navedeno prikazano je u Tablici II.

Tablica II. Sažetak mjerenja impedancije akumulatorske baterije broj 1

Sažetak mjerenja impedancije Z_i (mΩ)	
Minimum	0,310
Prosjek	0,343
Maksimum	0,674

Analizom rezultata može se zaključiti da je većina članaka u dobrom stanju, ali postoji jedan članak s bitno većom impedancijom. Taj članak bi mogao predstavljati problem jer bi mogao ograničiti ukupne performanse baterije, dovesti do neravnomjernog punjenja/praznjenja i potencijalno povećati rizik od pregrijavanja ili prekida strujnog kruga baterije. Preporučuje se daljnja analiza tog specifičnog članka i , ako je potrebno, njegova zamjena.

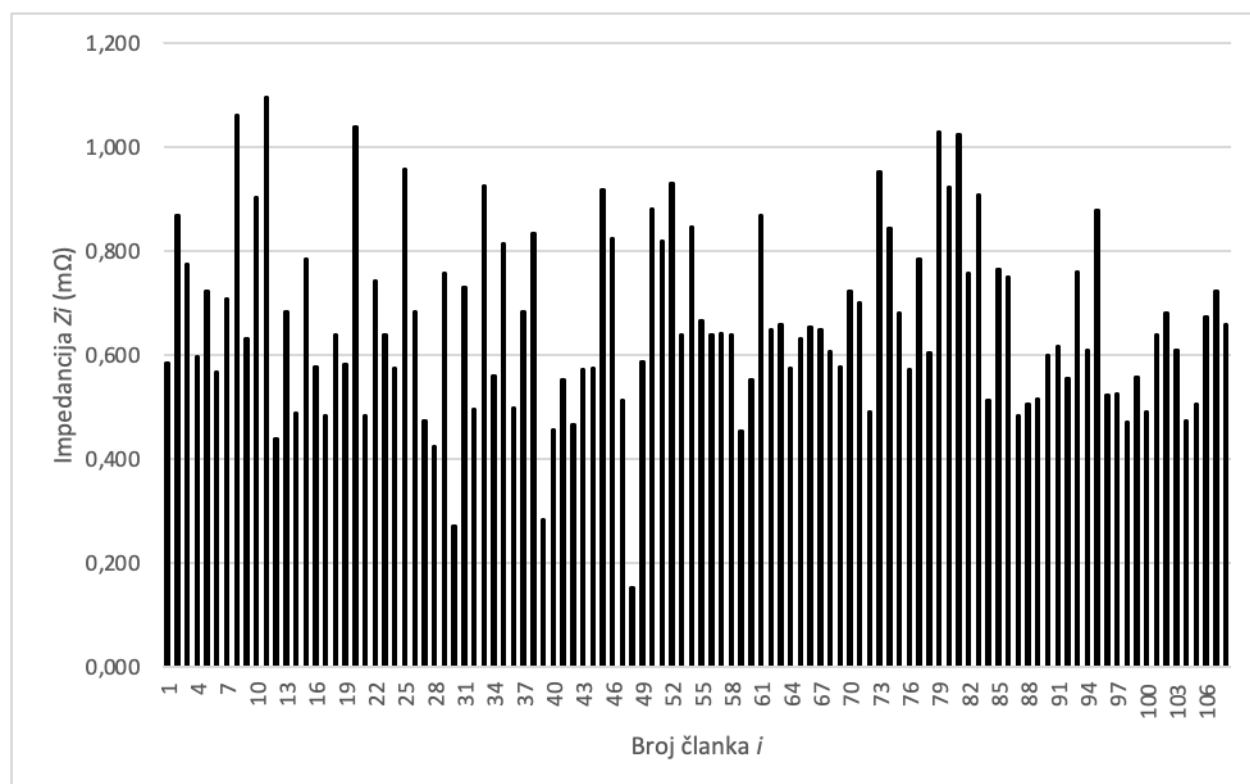
4.2. Analiza rezultata mjerenja akumulatorske baterije br. 2

Akumulatorska baterija broj 2, nešto je starija od baterije broj 1. Njena godina proizvodnje je 2016. Ukupan broj članaka spojenih u seriju koji čine bateriju broj 2 je 108. Prilikom provođenja ispitivanja impedancije testna izmjenična struja uređaja za mjerenje iznosila je 3,40 A, dok je valovitost struje koju daju punjači iznosila 0,70 A. Tablica III. sadrži rezultate mjerenja impedancije baterije broj 2.

Tablica III. Rezultati mjerenja impedancije akumulatorske baterije br. 2

Broj članka i	Impedancija Z_i (mΩ)	Napon članka U_i (V)	Otpor spojne veze $R_{i,i+1}$ (μΩ)	Broj članka i	Impedancija Z_i (mΩ)	Napon članka U_i (V)	Otpor spojne veze $R_{i,i+1}$ (μΩ)
1	0,586	2,290	14	55	0,667	2,285	17
2	0,869	2,390	35	56	0,640	2,380	331
3	0,775	2,397	21	57	0,642	2,270	25
4	0,597	2,378	21	58	0,639	2,312	21
5	0,723	2,392	17	59	0,454	2,234	25
6	0,569	2,283	17	60	0,552	2,239	25
7	0,709	2,385	31	61	0,869	2,385	21
8	1,061	2,180	21	62	0,649	2,290	18
9	0,632	2,380	18	63	0,660	2,287	28
10	0,904	2,405	14	64	0,576	2,239	21
11	1,096	2,402	14	65	0,632	2,258	25
12	0,440	2,221	14	66	0,654	2,248	25
13	0,684	2,397	17	67	0,649	2,273	21
14	0,489	2,363	42	68	0,607	2,253	25
15	0,784	2,353	28	69	0,579	2,182	25
16	0,579	2,246	25	70	0,723	2,270	14
17	0,485	2,251	25	71	0,702	2,219	14
18	0,639	2,226	25	72	0,492	2,231	17
19	0,583	2,219	21	73	0,953	2,395	11
20	1,040	2,407	45	74	0,844	2,283	14
21	0,485	2,268	25	75	0,681	2,231	17
22	0,744	2,375	25	76	0,573	2,234	14
23	0,639	2,307	21	77	0,785	2,395	11
24	0,576	2,273	25	78	0,604	2,273	14
25	0,957	2,405	21	79	1,030	2,400	14
26	0,684	2,368	25	80	0,924	2,290	14
27	0,475	2,239	25	81	1,024	2,400	14
28	0,426	2,239	2241	82	0,758	2,229	4223
29	0,758	2,290	28	83	0,908	2,180	21
30	0,272	2,305	21	84	0,513	2,234	21
31	0,730	2,280	28	85	0,765	2,287	25
32	0,496	2,356	17	86	0,751	2,368	21
33	0,925	2,405	17	87	0,485	2,224	25
34	0,561	2,234	14	88	0,506	2,165	25
35	0,816	2,229	29	89	0,517	2,224	28
36	0,499	2,241	11	90	0,601	2,236	25
37	0,684	2,373	14	91	0,618	2,224	28
38	0,834	2,402	14	92	0,555	2,290	28
39	0,283	2,305	11	93	0,761	2,278	21
40	0,456	2,243	17	94	0,611	2,270	25
41	0,554	2,253	14	95	0,880	2,375	21
42	0,468	2,326	31	96	0,524	2,263	14
43	0,573	2,380	25	97	0,527	2,234	17
44	0,575	2,280	17	98	0,471	2,221	17
45	0,918	2,405	14	99	0,557	2,226	18
46	0,824	2,219	14	100	0,492	2,219	17
47	0,513	2,336	11	101	0,639	2,263	21
48	0,154	2,067	31	102	0,681	2,258	14
49	0,587	2,385	25	103	0,611	2,236	18
50	0,881	2,402	14	104	0,474	2,231	25
51	0,820	2,199	25	105	0,506	2,280	21
52	0,932	2,373	29	106	0,674	2,268	21
53	0,639	2,395	17	107	0,723	2,363	21
54	0,848	2,405	29	108	0,66	2,234	4

Također kao i za bateriju broj 1, može se grafički prikazati iznos impedancije za svaki ispitani članak baterije broj 2, a sve na temelju dobivenih rezultata prema Tablici III. Navedeno je prikazano na Slici 3.



Slika 3. Grafički prikaz rezultata ispitivanja impedancije baterije broj 2

Iz Tablice III. te grafičkog prikaza na Slici 3. dobivamo sažetak ispitivanja impedancije, tj. minimalnu, prosječnu i maksimalnu vrijednost impedancije koja se pojavila prilikom ispitivanja što je navedeno u Tablici IV.

Tablica IV. Sažetak mjerenja impedancije akumulatorske baterije broj 2

Sažetak mjerenja impedancije Z_i (mΩ)	
Minimum	0,154
Prosjek	0,661
Maksimum	1,096

Uspoređujući rezultate ispitivanja, grafički prikaz te sažetak mjerenja baterije broj 2 s rezultatima ispitivanja, grafičkim prikazom te sažetkom mjerenja baterije broj 1, možemo primijetiti nekoliko ključnih razlika i zaključaka:

- Dok je u prvom histogramu impedancija bila prilično ravnomjerno raspoređena, ovdje, u slučaju baterije broj 2, postoje značajnija odstupanja među člancima, što ukazuje na veće razlike u njihovom stanju. Prisutna je neravnomjerna raspodjela, odnosno raspon vrijednosti impedancije je znatno veći.
- Prisutno je višestruko odstupanje. Naime ovaj grafikon prikazuje više članaka s impedancijom iznad 0,8 mΩ, pa čak i blizu 1,0 mΩ. To sugerira da postoji više problematičnih članaka u bateriji.

Mogući zaključci koji proizlaze iz ispitivanja su ti da akumulatorska baterija broj 2 pokazuje veće znakove degradacije nego akumulatorska baterija broj 1. Postoji više članaka s visokom impedancijom, što može dovesti do smanjenja ukupne učinkovitosti baterije, neujednačenog rada i potencijalnih problema s pregrijavanjem. U budućim analizama, detaljno će se proučiti odstupanja svakog članka u bateriji od prosjeka, kako bi se pokušale definirati prihvatljive granice za zamjenu članaka baterije i osigurao pouzdan rad baterije.

5. ZAKLJUČAK

Ispitivanje impedancije olovnih akumulatorskih baterija pokazalo je važnost redovnog održavanja i praćenja stanja baterija u sustavima besprekidnog napajanja. Analizom rezultata mjerenja impedancije za dvije baterije različite starosti (akumulatorska baterija broj 1 i akumulatorska baterija broj 2), utvrđeno je nekoliko ključnih informacija:

Akumulatorska baterija broj 1 (2021. godina proizvodnje) pokazala je vrlo stabilne rezultate impedancije, s većinom članaka u dobrom stanju. Međutim, jedan članak (broj 48) imao je značajno veću impedanciju, što ukazuje na moguću degradaciju ili oštećenje tog članka. Preporučuje se daljnja analiza i eventualna zamjena tog članka kako bi se očuvala ukupna funkcionalnost baterije.

Akumulatorska baterija broj 2 (2016. godina proizvodnje) iako starija, također je pokazala stabilnost u većini članaka, međutim, s nešto višim vrijednostima impedancije u odnosu na bateriju broj 1. S obzirom na starost, rezultati ukazuju na postupno starenje i gubitak kapaciteta, što je tipično za baterije starije od 5 godina. Ovdje je preporučljivo redovito pratiti stanje svih članaka i razmotriti zamjenu baterije ako se simptomi degradacije nastave.

Prednosti metode mjerenja impedancije u odnosu na kapacitivnu probu su očite. Ispitivanje impedancije je neinvazivna metoda, koja ne zahtijeva pražnjenje baterije, čime se štedi životni vijek baterije i omogućuje brza dijagnostika. Također, omogućava se precizno praćenje stanja svakog članka unutar baterije, što može pomoći u prevenciji potencijalnih kvarova ili smanjenja kapaciteta, a time i smanjenja rizika od iznenadnih kvarova u sustavu napajanja.

U budućnosti, preporučuje se daljnje korištenje metode ispitivanja impedancije u redovitom održavanju baterija u sustavima besprekidnog napajanja, čime će se omogućiti pravovremeno otkrivanje problema i poduzimanje potrebnih mjera održavanja ili zamjene, čime će se povećati pouzdanost i dugovječnost sustava.

6. LITERATURA

- [1] J. Škare, „Dinamika sustava istosmjernih napajanja u elektroenergetskim postrojenjima“, doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2009.
- [2] IEEE 1188-2005 – IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing, and Replacement of Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA) Batteries for Stationary Applications, veljača 2006.
- [3] IEEE 450-2020 – IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing, and Replacement of Vented Lead-Acid Batteries for Stationary Applications, prosinac 2020.
- [4] S. Skok, „Besprekidni izvori napajanja“, Kigen, listopad 2002.
- [5] D. Linden, T. B. Reddy, „Handbook of Batteries“, third edition, McGraw-Hill, kolovoz 2001.
- [6] HRN EN IEC 62485-1 Sigurnosni zahtjevi za sekundarne baterije i baterijske instalacije – 1. dio: Opće sigurnosne informacije, svibanj 2018.
- [7] HRN EN 60896-21 Nepomični olovni akumulatori - 21. dio: Tipovi regulirani ventilom - Metode ispitivanja, listopad 2008.
- [8] HRN EN 60896-22 Nepomični olovni akumulatori - 22. dio: Tipovi regulirani ventilom -Zahtjevi, listopad 2008.
- [9] HOPS, „Pravila o održavanju postrojenja i opreme elektroenergetskih građevina prijenosne mreže“, Glasnik broj 5, Zagreb, svibanj 2016.
- [10] HEP-Prijenos, „Upute za kapacitivnu probu akumulatorskih baterija u pogonu“, Zagreb, svibanj 2004.
- [11] Megger, „Battery testing guide“, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2021.