

PROCJENA PREOSTALOG ŽIVOTNOG VIJEKA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA U MREŽI PRIJENOSNOG PODRUČJA OSIJEK

Nikola J a m a n, Osijek

UDK 621.314.21.005:620.169.3
STRUČNI ČLANAK

Svaki korisnik energetskih transformatora srednjih i velikih snaga treba imati informacije o preostalom životnom vijeku svojih jedinica, kako bi tijekom eksploatacije donosio valjane i optimalne odluke.

Na većini energetskih transformatora u mreži Prijenosnog područja Osijek izvršena su ispitivanja stupnja polimerizacije papira (DP) s ciljem procjene preostalog životnog vijeka, što dugoročno određuje i potrebe nabavke novih jedinica.

Izvršena su i ispitivanja sadržaja furana, ali nije utvrđena povezanost između furana i stupnja polimerizacije papira.

Ključne riječi: energetski transformator, preostali životni vijek, stupanj polimerizacije papira (DP), furani.

1. UVOD

Za korisnika visokonaponskih postrojenja važno je saznanje koliki je životni vijek pojedinih elemenata postrojenja. Posebno je to važno za energetski transformator, koji je najskuplji, najosjetljiviji i funkcionalno najvažniji dio postrojenja.

Životni vijek transformatora ovisan je o životnom vijeku njegove izolacije, koja se sastoji od tekućih i krutih spojeva organskog podrijetla: od transformatorskog ulja i izolacijskog papira. Obje izolacije su podložne fizikalno-kemijskim procesima koji uzrokuju gubljenje početnih svojstava, pa kažemo da izolacija stari.

Uzimanje uzoraka i ispitivanje svojstava transformatorskog ulja je relativno jednostavno, a nakon gubljenja svojstava, na terenu je moguće izvršiti relativno jednostavan tehnološki postupak s ciljem poboljšanja karakteristika (sušenje, regeneracija ili zamjena ulja). Cijena tih postupaka može iznositi do 15% vrijednosti transformatora, i prihvatljiva je korisniku.

Naprotiv, papirna izolacija, koja se sastoji od natron i krep papira, ima potpuno drugačije karakteristike.

Uzimanje uzoraka papira na transformatoru nije jednostavno, zahtijeva više radova, vremena i znanja, a reprezentativnost uzorka nije jednoznačna kao kod ulja.

Zamjena papirne izolacije je teoretski moguća, no cijena tog postupka može se procijeniti da iznosi 60 do 80% cijene novog transformatora. U tom slučaju korisniku su upitni gubici u transformatoru, stanje

opreme, brtvenog sustava i sl., tako da kratka računica pokazuje da je tada opravdano izvršiti rashod i nabaviti novu zamjensku jedinicu.

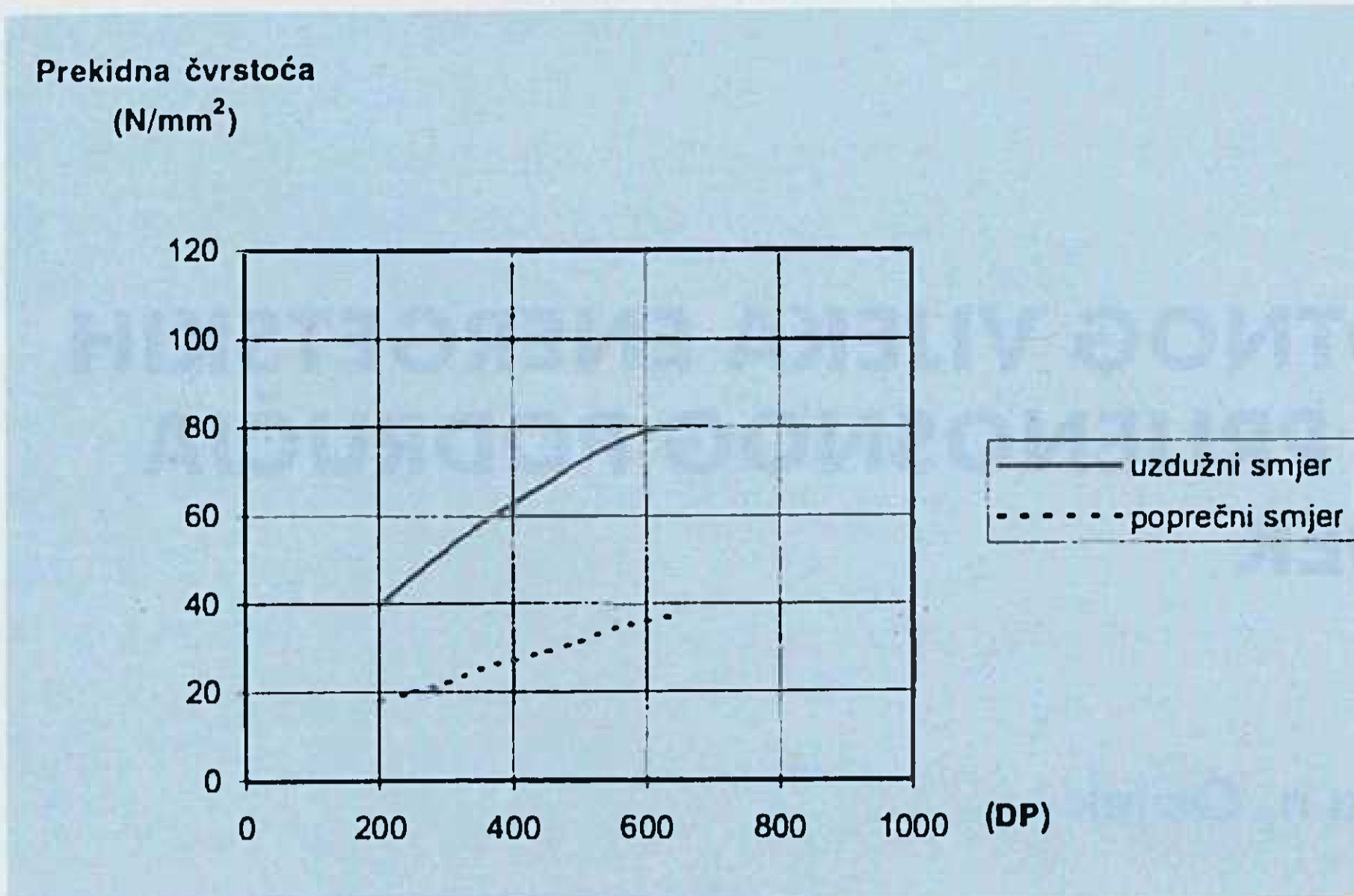
Životni vijek transformatora određuje dakle u izolacijskom sustavu ulje-papir stanje papira, i za procjenu preostalog životnog vijeka transformatora nužno je utvrditi stanje papirne izolacije.

2. STARENJE PAPIRNE IZOLACIJE

Elektrotehnički papir na bazi čiste celuloze je prirodni ugljikovodik, čije su visokopolimerne molekule povezane međusobno u lance. Mehanička svojstva papira proizlaze iz prosječne duljine molekulskog lanca u strukturi papira, a broj jedinica glukoze u lančanim molekulama može iznositi do 2000. Starenje papira u pogonskim uvjetima pod utjecajem temperature, vlage i kisika uzrokuje oksidaciju i hidrolizu, uz posljedicu pucanja lančanih molekula, te razvijanje plinova CO i CO₂ i više spojeva furana.

Skraćenjem lančanih molekula pogoršavaju se mehanička svojstva papira, posebno prekidne čvrstoće, što je prema [2] prikazano na slici 1.

Starenje papira nije linearni proces. U nestarenoj celulozi nalaze se vrlo dugi, ali zbog toga i temperaturno nestabilni molekulski lanci, koji u početnoj "životnoj" fazi lako pucaju. To uzrokuje brzi pad stupnja polimerizacije, a nakon određene stabilizacije daljnji tijek pucanja lanaca je u većem skladu s normalnim gradijentom starenja.



Slika 1. Ovisnost prekidne čvrstoće i stupnja polimerizacije (DP)

U pogonskim uvjetima namoti transformatora su izloženi mehaničkim naprezanjima zbog kratkih spojeva u mreži ili iznenadnih preopterećenja, a prisutna je i pojava vibracija uslijed magnetostrikcije. U takvim uvjetima kruti papir se lomi, puca i nestaje, a otpornost namota na sile kratkog spoja znatno se smanjuje, što dovodi pogon transformatora u rizično područje.

3. UZIMANJE UZORAKA PAPIRA

Uzimanje uzoraka papira na terenu je osjetljiv, nekada i kompliciran posao, a pokazalo se da je to na nekim konstrukcijskim rješenjima i nemoguće izvesti (u tablici 1. na objektu br. 20 nismo mogli uzeti uzorak na terenu, nego tek u tvornici gdje je transformator rashodovan).

Tablica 1. Rezultati ispitivanja i procjena preostalog životnog vijeka

Red. br.	LOKACIJA	Transf. br.	Snaga (MVA)	God. proiz.	Godina u pogonu	Izmjereni DP	Furan 2 FAL (ppm)	Procjena preostalog životnog vijeka n_r (%)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	TS ĐAKOVO	1	150	1965.	32	373*	0,0	39
2.	TS ĐAKOVO	2	150	1965.	30	193	0,005	KRITIČNO OSTARJELO
3.	TS 1505/2		150	69/86.	9	692	0,0	78
4.	TS OSIJEK 1	1	31,5	1965.	30	670*	0,0	75
5.	TS OSIJEK 1	2	31,5	1977.	19	916	0,0	NEDEGRADIRANO
6.	TS OSIJEK 2	1	40	1970.	26	813	0,0	NEDEGRADIRANO
7.	TS OSIJEK 2	2	40	1971.	25	854	0,0	NEDEGRADIRANO
8.	TS 505		22	1970.	26	775*	0,0	NEDEGRADIRANO
9.	TS OSIJEK 3	2	40	1986.	11	872*	0,0	NEDEGRADIRANO
10.	TS ĐAKOVO 2	1	20	1973.	23	675*	0,0	76
11.	TS ĐAKOVO 2	2	22	1970.	26	739*	0,0	NEDEGRADIRANO
12.	TS NAŠICE	1	20	1959.	36	181	0,0	KRITIČNO OSTARJELO
13.	TS NAŠICE	2	20	1960.	33	304*	0,0	KRITIČNO OSTARJELO
14.	TS VINKOVCI	1	30	1953.	40	495	0,0	57
15.	TS VINKOVCI	2	40	1979.	14	519*	0,0	60
16.	TS SLATINA	1	20	1962.	34	303*	0,0	KRITIČNO OSTARJELO
17.	TS SLATINA	2	20	1967.	29	593*	0,0	68
18.	TS POŽEGA	1	40	1981.	14	640*	0,0	73
19.	TS POŽEGA	2	40	1981.	15	745*	0,0	NEDEGRADIRANO
20.	TS VALPOVO	1	30	1954.	44	128	0,0	KRITIČNO OSTARJELO
21.	TS VALPOVO	2	22	1970.	26	704*	0,0	79
22.	TS SL. BROD 1	1	40	1977.	19	923	0,0	NEDEGRADIRANO
23.	TS SL. BROD 1	2	40	1977.	19	665	0,0	75
24.	TS SL. BROD 2		40	1989.	7	808*	0,0	NEDEGRADIRANO
25.	TS ŽUPANJA	1	20	1963.	32	518*	0,0	60
26.	TS ŽUPANJA	2	20	1966.	29	333*	0,0	32

Ako se ukaže potreba radova većih zahvata na transformatoru s ispuštanjem ulja i ulaskom u transformator, to je izuzetna prilika za uzimanje uzorka papira i ne smije ju se propustiti.

U većini slučajeva, uzorci papira su uzeti prilikom godišnjih radova na transformatoru (godišnje revizije), postupkom koji je opisan u nastavku.

Gornji dio transformatora potrebno je osloboditi od ulja, što se postiže zatvaranjem ventila na cjevovodu konzervator - kotao i prepumpavanjem ulja iz transformatora u konzervator. Demontira se jedan ili dva fazna SN izolatora, a ako papir na izvodu namota nikako nije dostupan, demontira se VN izolator. Kroz otvor demontiranog izolatora rukom se treba doći do papirne izolacije, jer je u većini slučajeva gornji dio izvoda izvana zaštićen keperom. Potrebno je noktom zakinuti traku natrona ili krep-papira, otkinuti traku oko 3-4 cm dužine, a ako se ostatak trake odmota jednostavno ju treba zavezati u čvor oko izvoda. Demontirani izolator se ponovo postavi i pusti ulje iz konzervatora, te je tako postupak uzorkovanja završen.

Ako na poklopcu postoje otvori za montažu izolatora, što je uobičajeno na većim jedinicama, tada nije potrebna demontaža izolatora nego se uzorak uzima kroz te otvore.

Ne preporučuje se uzimanje uzoraka papira u terenskim uvjetima direktno sa namota, čak i kada je moguć ulazak u transformator. Najbolje je uzeti uzorak s mjesta gdje postoji višeslojna papirna zaštita, a to su izvodi namota, unutrašnje međuveze, odcjepi regulacijskih izvoda i sl.

Ako je moguće, poželjno je uzeti uzorke s dva mjesta (npr. s dva fazna izvoda), kako bi se izbjegla vjerojatnost da se uzme papir s izvoda na kojem se tijekom eksploatacije vršio popravak i stavio novi papir.

Velika je prednost što je za ispitivanje potreban vrlo mali uzorak, mase 0,03 do 0,1 gram. Uzorak se stavi u plastičnu vrećicu i naznače osnovne karakteristike transformatora, te mjesto s kojega je uzorak uzet.

Nije potrebna nikakva posebna pažnja u dostavi uzorka do laboratorija.

Reprezentativnost tako uzetih uzoraka može biti upitna, ali u terenskim uvjetima nemamo mogućnost izbora. Prema dosadašnjem iskustvu, uzorci papira s izvoda su upotrebljivi za približnu procjenu preostalog životnog vijeka transformatora.

Za potrebe ovih ispitivanja, uzimanje uzoraka papira na svih 26 jedinica izvršila je ekipa za transformatore Prijenosnog područja Osijek.

4. METODA MJERENJA STUPNJA POLIMERIZACIJE PAPIRA (DP)

Mjerenje prosječnog stupnja polimerizacije papira izvodi se prema IEC publikaciji 450 [1].

Nauljeni uzorak papira se odmašćuje pranjem u otapalu ili ekstrakcijom ulja iz papira u aparatu za ekstrak-

ciju. Odmašćeni papir se mehanički usitnjava u što je moguće homogeniju masu, i zatim otapa u specijalnom otapalu (bakarnom etilen diaminu). Iz razlika izmjerenih viskoznih otapala i otopine papira izračunava se prema IEC 450 stupanj polimerizacije papira (DP).

5. IZRAČUNAVANJE I PROCJENA PREOSTALOG ŽIVOTNOG VIJEKA TRANSFORMATORA

Prema [2], preostali životni vijek transformatora računa se prema jednadžbi:

$$n_{r\%} = \frac{\ln DP - \ln DP_K}{\ln DP_O - \ln DP_K} 100(\%)$$

gdje je: $n_{r\%}$ - preostali životni vijek u %

DP_O - odabrana početna vrijednost stupnja polimerizacije

DP_K - odabrana kritična vrijednost stupnja polimerizacije

DP - izmjerena vrijednost stupnja polimerizacije.

Iz jednadžbe je vidljivo da na rezultat znatno utječu veličine početne (DP_O) i kritične vrijednosti (DP_K) stupnja polimerizacije.

Mjerenja stupnja polimerizacije provode se u zadnjih desetak godina, tako da za gotovo sve promatrane transformatore nemamo izmjerene vrijednosti DP_O nego ih treba procijeniti.

Uobičajene vrijednosti DP_O za nove transformatore iznose od 1200 do 800, a za proračun je odabrana srednja vrijednost koja iznosi 1000.

Također, niti kritična vrijednost DP_K nije u literaturi uvijek ista. Uobičajeno se korištene vrijednosti kreću od 150 do 250, a za ovaj proračun odobrena je srednja vrijednost 200.

U literaturi [2] su prikazane ovisnosti izračunatog životnog vijeka o odabranim početnim i kritičnim vrijednostima stupnja polimerizacije, a razlike mogu biti značajne. Međutim, proračun će svakako dobro poslužiti za dugoročniju procjenu stanja promatrane populacije transformatora.

U tablici 1. pregledno su prikazani rezultati ispitivanja. Podaci o 26 ispitivanih transformatora prikazani su u kolonama 2, 3, 4 i 5 (lokacija, pozicija, snaga, godina proizvodnje).

U koloni 6 označeno je koliko godina je pojedini transformator bio u pogonu prije uzimanja uzoraka papira. Kolona 7 prikazuje rezultate izmjerenog stupnja polimerizacije uzoraka papira. Zvijezdicom su označeni prosječni stupnjevi polimerizacije, u slučajevima gdje se iz transformatora uzimalo dva ili više uzoraka.

Kolona 8 prikazuje izmjerene koncentracije furana 2 FAL, što će se analizirati kasnije.

U koloni 9 nalazi se procjena preostalog životnog vijeka svakog transformatora, koja se izvršila na temelju rezultata ispitivanja stupnja polimerizacije jednog ili više uzoraka.

Zbog karakteristične degradacije celuloze, prema [2] nema smisla proračunavati preostali životni vijek za *DP* veće od 700 i manje od 300, već takve sustave treba ocijeniti kao **nedegradirane** (početno stanje), odnosno kao kritično ostarjele.

Od 26 promatranih jedinica, na devet jedinica (34,6%) je procijenjeno da je izolacijski sustav **nedegradiran**, tj. da odgovara početnom stanju. Te su jedinice u pogonu u prosjeku 19,3 godine, u rasponu od 7 do 26 godina.

Na 12 transformatora (46%) izmjereni *DP* papira je između 700 i 300, što je pogodno za izračunavanje preostalog životnog vijeka. Prosječno izračunati preostali životni vijek tih jedinica iznosi 64,3%, u pogonu su od 9 do 40 godina, prosječno u pogonu 24,8 godina.

Za pet jedinica (19,4%) je procijenjeno da je izolacijski sustav **kritično ostario**. Ti transformatori su u pogonu od 30 do 44 godine, prosječno 35,4 godine.

Transformator br. 20 je već rashodovan, budući da su mu u međuvremenu i karakteristike ulja bile ispod dozvoljenih vrijednosti, pa se procijenilo da je cijeli izolacijski sustav takav da nije isplativa njegova obnova. Prilikom rastavljanja namota u tvornici papirna izolacija je bila krta i raspadala se u rukama, te je i bez ispitivanja bilo očito da je životni vijek te jedinice u potpunosti bio potrošen.

Rezultati ispitivanja papira i furana za transformator br. 2 ukazuju na prisutnost degradacije izolacije. Prema stupnju polimerizacije papira (*DP*=193) ocijenjeno je, da je izolacija kritično ostarjela, dok je to istovremeno jedina jedinica na kojoj su utvrđene manje koncentracije furana (2FAL=0,005 ppm). Budući da po svim karakteristikama i uvjetima pogona navedena jedinica odgovara transformatoru br. 1, kojemu procijenjeni preostali životni vijek iznosi 39%, za konačnu ocjenu uzet će se još nekoliko uzoraka papira prvom prigodom.

Za transformatore pod br. 12, 13 i 16 smatra se da je procjena stanja izolacijskog sustava ispravna, pa je u slijedećim godinama potrebno planirati njihov rashod i nabavku novih zamjenskih jedinica.

6. REZULTATI ANALIZE FURANA

Posljedica razgradnje celuloze je niz međuprodukata, među kojima se zadnjih nekoliko godina posebno intenzivno promatraju furani.

Prema IEC 1198 [3] korištenjem visokoučinske tekućinske kromatografije (HPLC) normizirano je za analizu pet karakterističnih spojeva furana, na temelju kojih se procjenjuje veličina termičke degradacije papirne izolacije.

Ova metoda je posebno zanimljiva, budući da su furani otopljeni u lako dostupnom uzorku transformatorskog ulja, a uzorak se uzima u šprice kao i za kromatografsku analizu.

Od pet spojeva furana, posebno je zanimljiv sadržaj 2-furfurala (2FAL), i trenutno radna grupa CIGRÉ/IEC razrađuje korelaciju između tog spoja i stupnja polimerizacije papira.

Na svih 26 promatranih transformatora izvršene su i analize furana, a izmjerene koncentracije spoja 2FAL prikazane su u Tablici 1, kolona 8.

Gotovo na svim promatranim jedinicama nije izmjerena prisutnost 2FAL-a, što vrijedi i za pet transformatora na kojima je utvrđeno da je papirna izolacija kritično ostarjela.

Iz gornjega se čini da analiza furana neće moći u budućnosti zamijeniti ispitivanje stupnja polimerizacije papira, nego će biti metode koje se nadopunjuju, posebno u procesu starenja papira koji je slabog intenziteta i vremenski dugog razdoblja.

7. ZAKLJUČAK

Na većini energetskih transformatora u mreži Prijenosnog područja Osijek izvršena je procjena preostalog životnog vijeka.

Procjene preostalog životnog vijeka izvršene su na temelju ispitivanja stupnja polimerizacije papira (*DP*).

Za devet jedinica (34,6%) prosječne starosti 19,3 godine je procijenjeno da je izolacijski sustav **nedegradiran**.

Za dvanaest jedinica (46%) prosječne starosti 24,8 godina je izračunat preostali životni vijek, koji u prosjeku iznosi 64,3%.

Za pet jedinica (19,4%) prosječne starosti 35,4 godine je procijenjeno da je životni vijek potrošen, tj. da je izolacijski sustav **kritično ostario**. Jedan od tih transformatora je već rashodovan, a za jednu jedinicu postoji sumnja da uzorak papira nije bio reprezentativan, te će se ispitivanje ponoviti. Preostale tri jedinice potrebno je u dogledno vrijeme rashodovati i planirati nabavku zamjenskih novih jedinica.

Ispitivanjem spojeva furana, koja su također izvršena na svim jedinicama, nije se utvrdila prisutnost tih spojeva niti na jedinicama na kojima je životni vijek potrošen.

LITERATURA

- [1] IEC Publication 450: Measurement of the Average Degree of Polymerization of New and Aged Electrical Papers (1974).
- [2] V. FIRINGER, S. ČABRAJAC: "Ovisnost procjene preostalog vijeka trajanja transformatora o početnim i konačnim vrijednostima stupnja polimerizacije papira", Treće savjetovanje HK CIGRÉ, Cavtat, 26.-30. 10. 1997., R 15-03
- [3] IEC Publication 1198: Furanic compound analysis in mineral insulating oils, 1993.

[4] A. HADŽI-SKERLEV, S. ČABRAJAC: "Određivanje degradacije celuloze analizom furana", Treće savjetovanje HK CIGRÉ, Cavtat, 26.-30. 10. 1997., R15-02

ESTIMATION OF THE REMAINING LIFETIME OF THE OSIJEK NETWORK POWER TRANSFORMERS

Each user of medium or great power transformers should be informed about the remaining life time of the units, in order to make good and optimal decisions during their operation.

Most power transformers in the Osijek network have been tested on paper polymerisation degree (DP) so as to estimate the remaining lifetime, which determines the long-term need for new units.

Furanics have been tested too, but no connection was determined between the furanic and the paper polymerisation degree.

DIE BEURTEILUNG DER RESTLEBENSDAUER VON UMSPANNERN IM NETZ DES ÜBERTRAGUNGSGEBIETES DER STADT OSIJEK

Ein jeder Benutzer der Umspanner mittlerer und großer Leistungen soll bezüglich der Restlebensdauer seiner Einheiten in Kenntniss sein, um im Laufe des Betriebes zuverlässig beste Lösungen zu erbringen.

An den meisten Umspannern im Netz des Übertragungsgebietes der Stadt Osijek sind die Prüfungen des Polarisationsgrades von Papier (DP) mit dem Ziel der Abschätzung der Restlebensdauer durchgeführt worden; damit wurde langfristig auch der Bedarf der Anschaffung neuer Einheiten bestimmt .

Durchgeführt wurden auch die Prüfungen des Furaninhaltes, jedoch ist zwischen Furaninhalt und Polarisationsgrad von Papier kein Verbundensein festgestellt worden.

Naslov pisca:

**Nikola Jaman, dipl. ing.
HEP, Prijenosno područje Osijek
Šetalište kardinala Šepera 1a
31000 Osijek, Hrvatska**

Uredništvo primilo rukopis:
2000-03-02.