



Predrag Mijajlovi *
predrag.mijajlovic@cges.me

Željko Ivanovi
zeljko.ivanovic@cges.me

Bojan Mujovi
bojan.mujovic@cges.me
CGES AD Podgorica

FONOMETRIJA TRANSFORMATORA U POGONU

KRATAK SADRŽAJ

Sve strožiji zahtjevi u pogledu o uvanja životne sredine reflektovani su i na pristup održavanja visokonaponske opreme. Jedan od tih zahtjeva je i dozvoljeni nivo buke energetskih transformatora, posebno kada je rije o zna ajnoj naseljenosti u blizini postrojenja.

Uslovi mjerenja ja ine zvuka transformatora u realnom pogonu bitno se razlikuju od onih u ispitnim laboratorijama fabrika.

Rad razmatra tehni ke, eksploatacione i organizacione injenice koje uti u na ovu problematiku. Kompletna analiza se odnosi na primjere iz realnog pogona. Rezultati snimanja su obra eni i zbirno dati sa karakteristi nim grafi kim prikazima.

Mišljenje u kom pravcu treba djelovati u narednom periodu navedeno je u zaklju ku.

Klju ne rije i: Buka – Ekologija - Ja ina zvuka – Trafostanica - Transformator

THE PHONOMETRY OF TRANSFORMERS ON SITE

SUMMARY

Increasingly stringent environmental requirements have also been reflected in the approach to maintaining high-voltage equipment. One of these requirements is the permissible noise level of power transformers, especially when it comes to significant population in the vicinity of the plant.

The conditions for measuring the volume of transformers in real operation are significantly different from those in the testing laboratories of the factories.

The paper considers the technical, operational and organizational facts that affect this issue. The complete analysis refers to real-site examples. The recording results are processed and summarized with characteristic graphical representations.

The opinion in which direction should be acted in the following period is stated in the conclusion.

Key words: Noise – Ecology – Sound level – Substation – Power transformer

* Bulevar Svetog Petra Cetinjskog 18, Podgorica, Crna Gora

1. OSNOVNI POJMOVI

Zvuk je fizi ka pojava koja nastaje uslijed fizi ki promjenjivih mehani kih poreme aja stacionarnog stanja elasti ne sredine. Spoljašnja sila koja izaziva poreme aj elasti ne sredine naziva se izvor zvuka. Svaki neželjeni zvuk po definiciji je buka.

Intenzitet zvuka je definisan kao stopa protoka energije zvuka po jedinici površine i mjeri se u vatima po kvadratnom metru (W/m^2). To je vektorska veli ina odre ena pravcem, smjerom i amplitudom, dok je zvu ni pritisak skalarna veli ina definisana samo njegovom amplitudom (Pa). Snaga zvu nog izvora je parametar koji se koristi za ocenjivanje i upore ivanje izvora zvuka. To je osnovni deskriptor zvu nog izvora, a samim tim i apsolutno fizi ko svojstvo samog izvora, koji je nezavisan od bilo kakvih spoljnih faktora kao što su životna sredina i udaljenost do prijemnika.

Snaga zvu nog izvora može se izra unati mjerenjem zvu nog pritiska ili mjerenjem inteziteta zvuka. Mjerenje inteziteta zvuka ima prednosti u odnosu na mjerenje zvu nog pritiska. U osnovi, mjerenjem inteziteta zvuka obuhvata se samo dio zvu nog polja koji se direktno širi, bez spoljnih uticaja stoje ih talasa i/ili refleksije.

Merenja nivoa buke su razvijena kako bi se kvantifikovale promjene pritiska u vazduhu koje ljudsko uvo može otkriti. Najmanja varijacija pritiska koju zdravo ljudsko uvo može da otkrije je $20 \mu Pa$. Za nivo zvuka usvojena je konvencija da se kao referentna vrijednost uzima vrijednost koja odgovara pragu ujnosti na 1000 Hz. Na decibelskoj skali (0dB) referentna vrijednost predstavlja nulu i svaka druga vrijednost se poredi sa njom. Registrovana ja ina zvuka zavisi od osetljivosti ljudskog uva na njegov frekvencijski spektar. Dinami ki opseg ujnosti uva je od 0-120dB. Savremeni mjerni instrumenti obra uju zvu ne signale putem elektronike ija osetljivost varira sa frekvencijom na na in sli an ljudskom uvu [4].

ovjek ne e ocijeniti dva tona koji objektivno imaju istu ja inu kao da se radi o zvcima iste ja ine ako su oni razli itih frekvencija. Tako npr. ton niske frekvencije od 63 Hz bi e ocijenjen znatno slabije, ak 26dB slabije, nego ton frekvencije 1000 Hz iako oni imaju (objektivno) istu ja inu. Zbog potrebe da se odredi mjera koja e objektivizovati subjektivan ovjekov ose aj ja ine zvuka uvedena je frekvencijska ponderizacija. Pod frekvencijskom ponderizacijom podrazumijeva se postupak kojim se zavisno od frekvencije smanjuje amplituda signala, tako da on bude isto ocijenjen kao i signal u estanosti 1000 Hz. Na ovaj na in ustanovljen je postupak kojim se dobija mjera koja omogu ava da nivo zvuka (ja ina zvuka, nivo zvu nog pritiska) za dva tona razli itih frekvencija budu ocijenjeni kao jednake ja ine saglasno ovjekovoj percepciji, iako oni imaju objektivno razli itu ja inu odnosno razli ite amplitude.

Frekvencijska ponderizacija mjerila je razlika izme u nivoa signala koji prikazuje pokazni ure aj i odgovaraju eg nivoa stalnog sinusnog ulaznog signala nepromenljive amplitude, odre enog u funkciji frekvencije. Za ocenjivanje svih izvora zvuka, izuzev visokoenergetskih impulsnih zvukova ili zvukova sa jako izraženim niskofrekventnim sadržajem, obi no se koristi A-frekvencijsko ponderisanje. Za mjerenje viših nivoa zvu nog pritiska, kao i za ocjenu visokoenergetskih impulsnih zvukova, koristi se C-frekvencijsko ponderisanje.

Standardizovane vremenske ponderizacije definisane su standardom IEC 61672, a u upotrebi su: *slow*, *fast* i *impuls*. Vremenska karakteristika *fast* (125 ms) više odgovara ljudskom opažanju u odnosu na vremensku karakteristiku *slow* (1s), zato se i naj eš e koristi. Vremenska karakteristika *impulse* (35 ms pri porastu i 1500 ms pri opadanju) se koristi za ocjenu impulsnog karaktera zvuka-buke.

Kada se obra uje izvor zvuka koji se nalazi na otvorenom prostoru, u ijoj blizini nema reflektuju ih površina osim površine zemlje, zvu no polje koje on generiše naziva se slobodno zvu no polje. Mjerilo nivoa zvuka se u sluaju slobodnog zvu nog polja usmjerava direktno prema izvoru. Kada se mikروفon postavlja na udaljenosti od 0.5 do 2m ispred refleksione površine, direktni i reflektovani talas su podjednako zna ajni, a kada je posmatrani frekventni opseg dovoljno širok, reflektovanini zvuk uzrokuje udvostru avanje energije direktnog zvu nog polja i pove anje nivoa zvu nog pritiska od 3dB.

U radu su prikazani rezultati snimanja nivoa zvuka energetskih transformatora u pogonu CGES-a u periodu 2020-2021. godina. Snimanja su ura ena u svemu u skladu sa odredbama standarda IEC 60076-10, u slobodnom zvu nom polju akusti ne zone postrojenja 400 kV, 220 kV i 110 kV, sa mjernom konturom oko samih transformatora. Rezultati su predstavljeni grafi ki sa opisom uslova pod kojim su snimanja sprovedena.

2. ZAKONSKI OKVIRI I STANDARD

U postupku strateške procjene uticaja na životnu sredinu, odnosno procjene uticaja na životnu sredinu utvrđuju se uslovi i mjere za sprječavanje, smanjivanje i otklanjanje štetnih efekata buke u skladu sa zakonom. Mjerenje nivoa buke u životnoj sredini (u daljem tekstu: mjerenje buke) vrši se prema standardu MEST ISO 1996-1 i MEST ISO 1996-2. Mjerenje buke vrši se u odnosu na emisije koje potiču iz drumskih i željeznih vozila, vazduhoplova i industrijskih postrojenja, za svaku vrstu izvora buke pojedinačno [2].

Izvor buke je svaki emiter nepoželjnog ili štetnog zvuka, dok je štetni uticaj buke negativni uticaj buke na zdravlje ljudi. Indikator buke je fizička veličina kojom se izražava nivo buke u životnoj sredini u odnosu na štetni uticaj. Granica vrijednosti buke je najviša dozvoljena vrijednost buke u životnoj sredini izražena indikatorom L_{day} i $L_{evening}$. Indikatori buke izražavaju se jedinicom dB(A), gdje se nivo zvuka nog pritiska izražava u decibelima (dB) kroz skalu frekvencijske ponderizacije A, radi realnog prikazivanja subjektivnog osećaja jačine zvuka [1]. Karakteristika A filtera dobijena je pojednostavljenjem izofonske krive za 40dB, dok je za C filter dobijena aproksimacijom za 90dB.

Određivanje akustičkih zona u određenom prostoru u zavisnosti od namjene prostora (akustičko zoniranje), vrši se radi utvrđivanja granica njihovih vrijednosti indikatora buke u tim zonama, odnosno radi zaštite zdravlja ljudi od buke u životnoj sredini.

Granice vrijednosti buke u određenim akustičkim zonama, kreću se od 35 dB(A) za tihu zonu u prirodi, u stambenoj zoni do 55 dB(A) i do 65 dB(A) u zoni pod jakim uticajem buke koja potiče od željeznih vozila [2]. Maksimalno dozvoljeni nivo buke za nove energetske transformatore iznosi 74 dB [3,4].

Posljednja verzija standarda IEC 60076-10; Power transformers - Part 10: Determination of sound levels, daje jasna uputstva mjerenja jačine zvuka kod energetskih transformatora (ETR). Riječ je o „standardnim“ zahtjevima, koji kako takvi nijesu i apsolutni. Zbog realnih ograničenja u praksi se ova mjerenja izvode uz manja odstupanja, što je opet, uslovljeno različitim inicijalnim faktorima kod samog mjerenja. Iako su takva mjerenja tehnički opravdana, važno je, hipotetički, ustanoviti koliko realno rezultati odstupaju od standardom definisanih.

Standard je namijenjen za ispitna mjerenja unutar fabričke ispitne stanice, ali se može primijeniti djelimično i za mjerenja na terenu, iako je potrebno uzeti u obzir da se uslovi mogu bitno razlikovati od onih u ispitnoj stanici. Faktori koji utiču na razlike nivoa zvuka njihovih signala na terenu su najčešće: blizina drugih objekata uključujući i druge transformatore u pogonu, uticaj nivoa buke okoline, tip zvukovnog polja u prostoru gdje je ETR instalisan (slobodno zvukovno polje, difuzno zvukovno polje, blisko zvukovno polje ili daleko zvukovno polje), sam nivo opterećenja ETR, kompleksnost izrađenosti kazana ETR i dr.

3. MEHANIZMI GENERISANJE BUKE KOD TRANSFORMATORA

Aktivni materijali ETR, bakar u namotajima i željezo magnetnog kola, imaju različite koeficijente temperaturnog širenja, tako da sa porastom radne temperature ovaj koeficijent je značajno veći za namotaje nego za jezgro. U ovom slučaju raste pritisak steznog sistema namotaja na raznim elementima montiranih na magnetno kolo. Pri niženoj radnoj temperaturi namotaji se za razliku od jezgra puno brže skupljaju na svoje definisane razmjere, tako da se pritisak steznog sistema namotaja smanjuje. Pojednostavljuju se i navedeno i ne ulaze u suštinu fizičkih procesa i osobenosti konstruktivnih rješenja realnih tipova ETR, povećanje radne temperature transformatorskog ulja za jedan stepen dovodi do povećanja sile steznog sistema namotaja za jedan procenat nominalne vrijednosti.

Transformator kao osnovni sistem za transformaciju električne energije sa jednog naponskog nivoa na drugi, u fazi prenosa energije ima više izvora buke, od kojih su najznačajniji magnetno jezgro, namotaji i buka hladnjaka.

Zvuk koji emituje transformator generiše se kombinacijom magnetostriktivne deformacije jezgra (skupljanje i izduživanje limova jezgra pod utjecajem promjenjivog magnetskog polja) i elektromagnetne sile u namotajima, zidovima rezervoara i magnetnim štitovima - zaslonima.

Pobuda pri nazivnom naponu i frekvenciji je sinusni talas koji indukuje sinusnu magnetsku indukciju u jezgru koja uzrokuje magnetostrikciju u limovima jezgra. Magnetostrikcija u limovima jezgra kreće se u opsegu od 0,1 μm do 10 μm po dužnom metru. Navedeni efekt je izrazito nelinearan, naročito za veće vrijednosti indukcija blizu zasićenja. Uslijed nelinearnih harmoničkih deformacija lima javljaju se

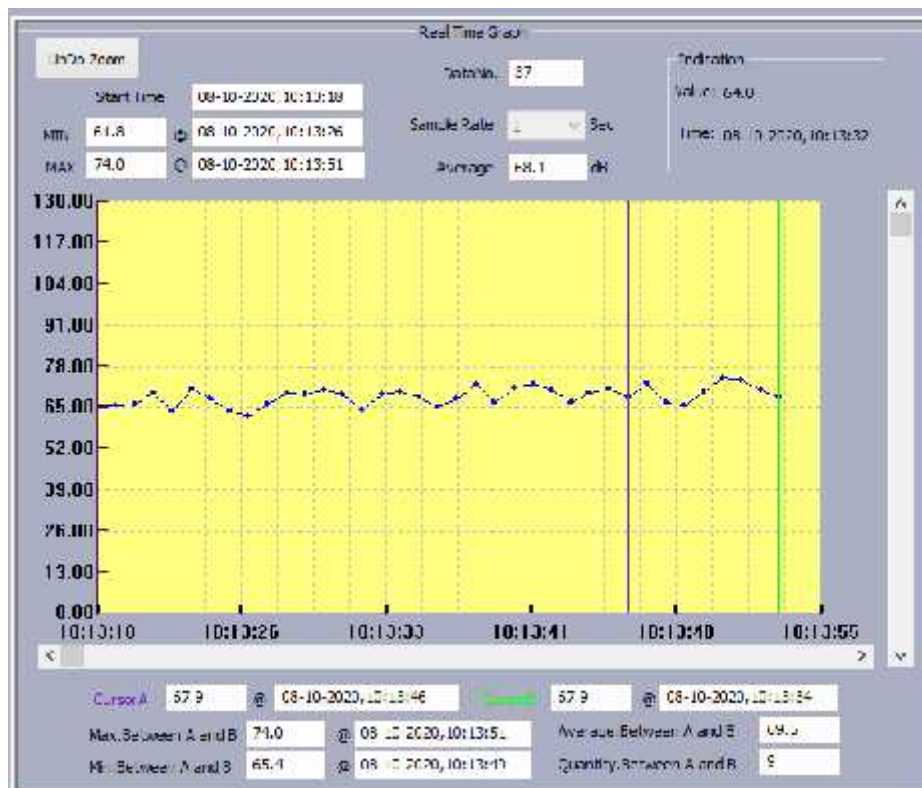
vibracije koje uzrokuju buku jezgra dominantnu na nekoliko glavnih harmonika spektra (100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 600 Hz). Tako se stvaraju vibracije koje se preko ulja prenose na kazan transformatora, koji ih emituje u okolinu u vidu buke. Buka jezgra se mjeri u ogledu praznog hoda [3] pri nazivnom naponu i nazivnoj indukciji.

Ako kroz namotaje te e struja, onda u transformatoru uz buku jezgra postoji i buka namotaja. Kako se provodnici kroz koje teku struje nalaze u rasipnom magnetskom polju, izme u njih se javljaju sile koje zatim izazivaju vibracije unutar namotaja. Kako je sila proporcionalna kvadratu struje, to e posljedno i intezitet zvuka biti proporcionalan kvadratu vibracija. Vibracije se kao i kod buke jezgra preko ulja prenose na kazan. Mjerenja su pokazala da i rasipni fluks koji prolazi kroz zidove kazana tako e može biti izvor buke. Buka namotaja se mjeri u ogledu kratkog spoja pri nazivnoj struji, pa se uz termin buka namotaja koristi i termin buka u kratkom spoju. Brzina zvuka u ulju na sobnoj temperaturi iznosi 1540 m/s, a kod elika je 6100 m/s.

Naravno, u svom radu ventilatori i uljne pumpe, kao posljedica prisilnog strujanja vazduha i ulja, stvaraju širokopojasnu buku.

4. REZULTATI SNIMANJA NIVOA ZVUKA

Kompletna snimanja nivoa zvuka u postrojenjima CGES-a na energetskim transformatorima u pogonu, izvršena su sa mjerilom u opsegu mjerenja 30dB-130dB, sa rezolucijom od 0.1dB i ta noš u od $\pm 1.4\text{dB}$ [3,5]. Dinami ki opseg snimanja je iznosio obi no 50dB. Frekventni opseg mjerenja je u dijapazonu od 31,5 Hz – 8 kHz, a u estanost uzrokovanja je bila 1s (sporo) i 150ms (brzo), u dnevnom intervalu snimanja.



Sl. 1. Grafi ki prikaz nivoa zvuka na ETR T1, 20 MVA u TS Cetinje

Akusti na zona snimanja je samo postrojenje u slobodnom zvu nom polju i mjernom konturom oko ispitivanog energetskog transformatora.

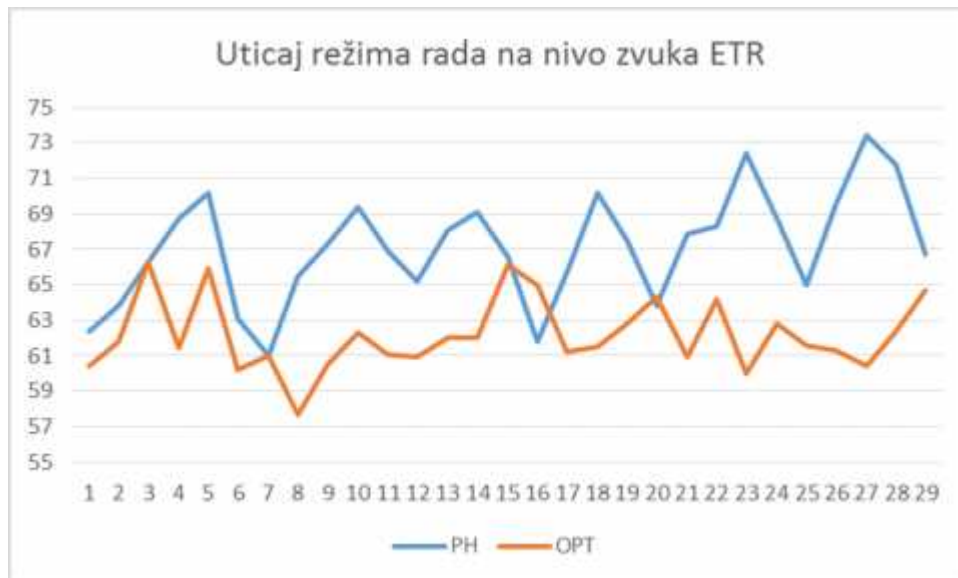
Mikrofon ovog uređaja je ½", osjetljivosti 31.6 mV/Pa, sa opsegom frekvencije: 8 Hz do 12500 Hz, dinamički opseg: 15.8 do 146 dB. Akustični kalibrator je tačnost ±0.2dB, 94dB SPL ili 114dB SPL za kalibraciju u uslovima bučnog okruženja.

Za obradu signala korištene su frekvencijske ponderizacije A i C sa sporom-slow i brzo-fast dinamičkom karakteristikom. Dužina trajanja uzorkovanja kretala se u rasponu od 30s do 150s. Uz širokopojasnu, promjenjivu karakteristiku buke, udaljenost mjerne konture je po pravilu iznosila 2m. Prilikom mjerenja nivoa buke u određenim situacijama je fonometar postavljan na držač da bi se izbjegle neželjene refleksije od tijela ispitivog objekta. U situacijama rada rashladnih grupa, kada su bili uključeni ventilatori, postavljan je zaštitni štitnik (wind shield) na mikrofon kako bi se utjecaj turbulencija vazduha na mikrofonu sveo na minimum.

Sva snimanja su izvršena metodom pomicanja mikrofona kretanjem ispitivog objekta po mjernoj konturi (walk-around) zbog brzine snimanja, mada je i metoda mjerenja tačnost po tačnosti (point-by-point) u potpunosti prihvatljiva, ali u realnom pogonu dosta nepraktična [4].

Snimanje nivoa zvuka na ETR 110/35 kV, 20 MVA koji je u pogonu od 1977. godine, pri opterećenju od 50% nazivne snage, dat je na slici 1.

Utjecaj različitih režima rada ovog ETR – rad u režimu praznog hoda i opterećenja ETR na nivou 50% nazivne snage, predstavljen je na slici 2.



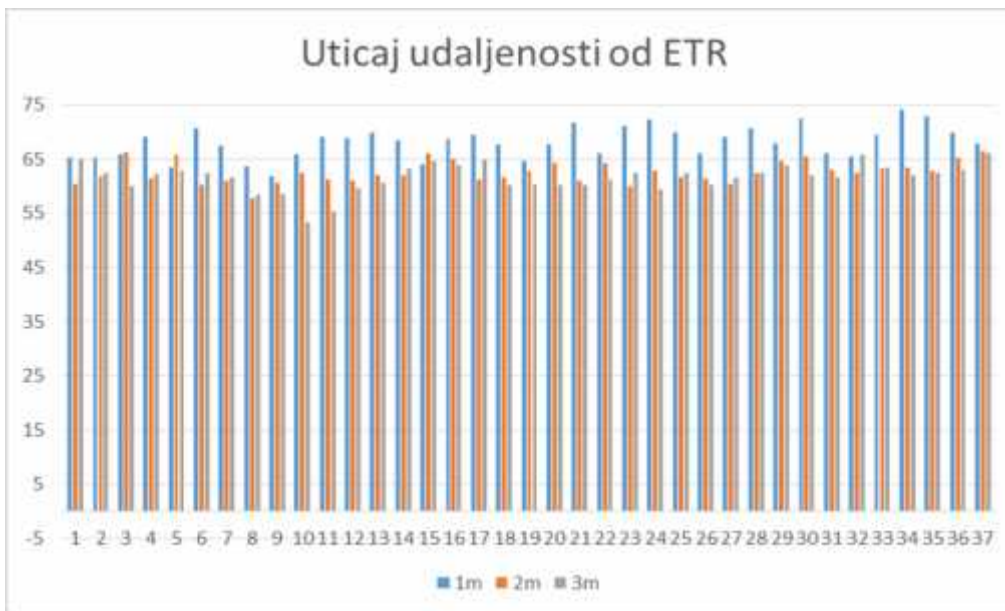
Sl. 2. Grafički prikaz nivoa zvuka na ETR T1, 20 MVA u različitim režimima rada

Srednja vrijednost nivoa zvuka u režimu praznog hoda iznosila je 67.11dB, dok je u režimu opterećenja iznosila 62.16dB, odnosno razlika u nivoima zvuka je bila 4.95dB. Maksimalna razlika u određenoj tački mjerenja iznosila je i do 13dB.

Mjerna nesigurnost u slušajevima kada se snimanje izvodi po metodi „šetnje“ i kada putanja obilaska ETR nije potpuna iznosila je do ±1dB. Prilikom primjene metode „tačnost po tačnosti“, dodatna mjerna nesigurnost iznosila je ±2dB.

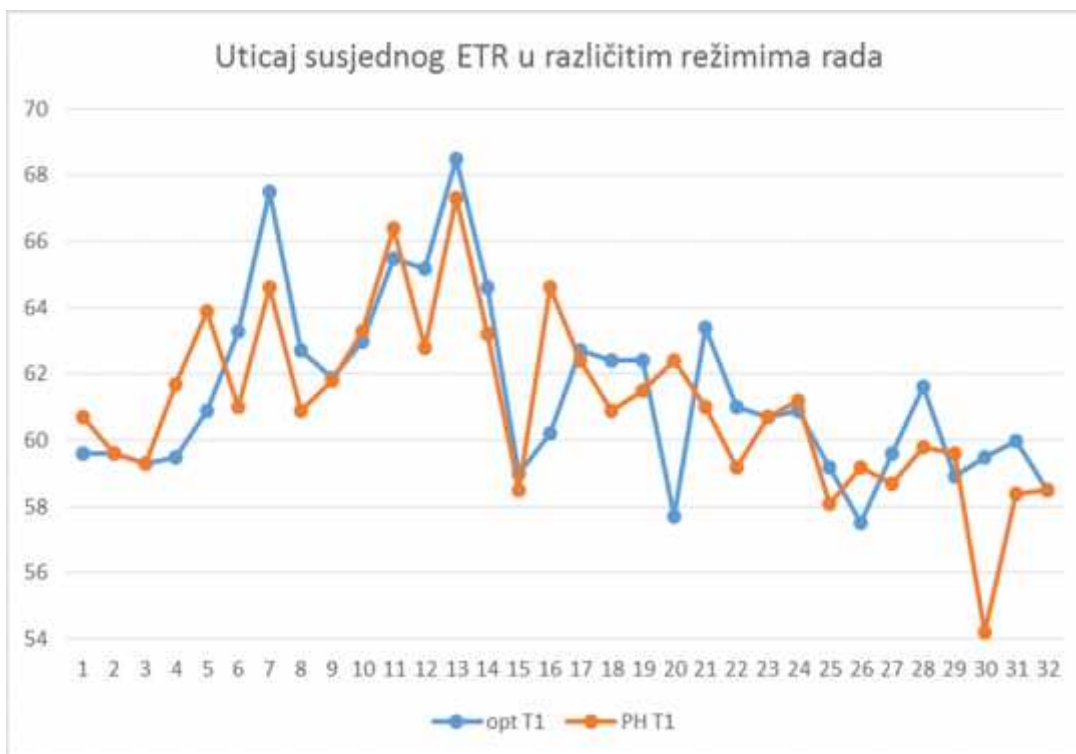
Varijacija zvučne snage na različitim rastojanjima od ETR, predstavljena je na slici 3. Snimanja nivoa zvuka su izvršena na rastojanjima 1m, 2m i 3m. Srednje vrijednosti izmjerenih nivoa zvuka respektivno su iznosile 68.07dB, 62.56dB i 61.57dB.

Treba napomenuti da iako su sva izvršena snimanja imala karakteristiku slučajnog uzorka i nijesu statistički verifikovana, jasno je da su ona ipak prilično relevantna, s obzirom na njihovu ponovljivost [6].



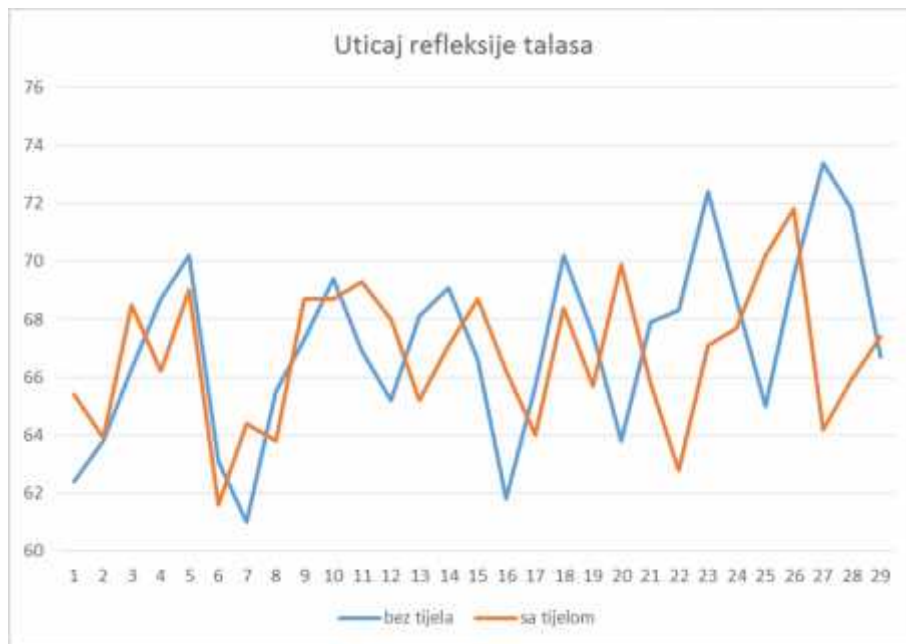
Sl. 3. Grafi ki prikaz nivoa zvuka u uslovima razli ite udaljenosti mjerne konture

Uticaj režima rada susjednog ETR na nivo ja ine zvuka predstavljen je na slici 4. Dakle, izvršena su snimanja nivoa zvuka na ETR T2 110/35 kV, 31.5 MVA u pogonu od 2002. godine, u susjednom trafo boku u slu ajevima optere enog ETR T1, odnosno u drugom slu aju kada je ETR T1 radio u praznom hodu. Srednja vrijednost izmjenog nivoa zvuka na ETR T2 kada je ETR T1 radio u PH iznosila je 61.45dB, a kada je ETR T1 bio optere en na nivo 50% nazivne snage, iznosio je 61.11dB. Dakle, razlika je gotovo neznatna.



Sl. 4. Grafi ki prikaz nivoa zvuka u uslovima razli itih režima rada susjednog ETR

Izvršena su i snimanja nivoa zvuka u slušajevima pretpostavljene refleksije talasa od tijela ispitiva a. Srednja vrijednost nivoa zvu nog signala kada je snimanje izvršeno sa direktnim uticajem tijela ispitiva a iznosila je 66.74dB, a kada je mikrofon postavljen u slobodnom prostoru, ona je iznosila 67.11dB (slika 5).



Sl. 5. Grafi ki prikaz nivoa zvuka u uslovima uticaja refleksije talasa od tijela ispitiva a

Kao ilustrativan primjer uticaja udaljenosti mjerne konture na nivo ja ine zvuka, ovoga puta kod autotransformatora 220/110/35 kV, 150 MVA dat je na slici 6. Rije je o relativno novom ATR T1, u pogonu od 2012. godine, optere en sa 30 % nazivne snage i ATR T2, u pogonu od 1972. godine, optere en sa 27% nominalne snage.

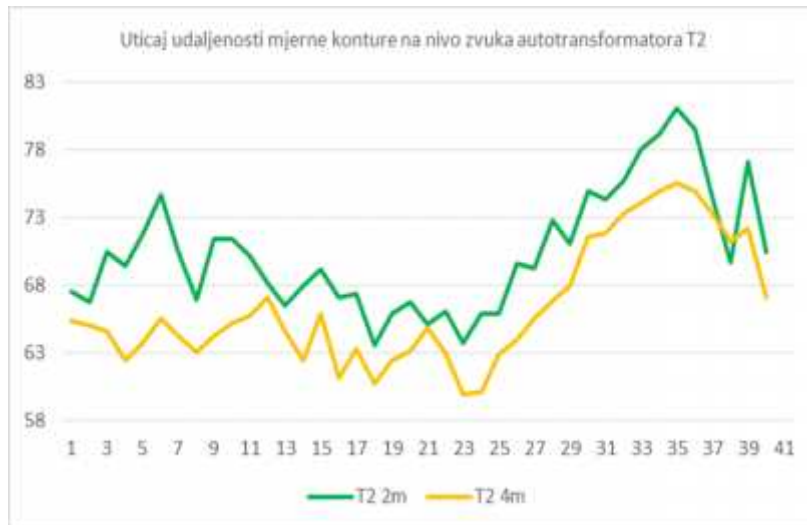


Sl. 6. Grafi ki prikaz nivoa zvuka u uslovima razli ite udaljenosti mjerne konture za ATR T1

Mjerne konture su primijenjene na udaljenosti od 2m i 4m.

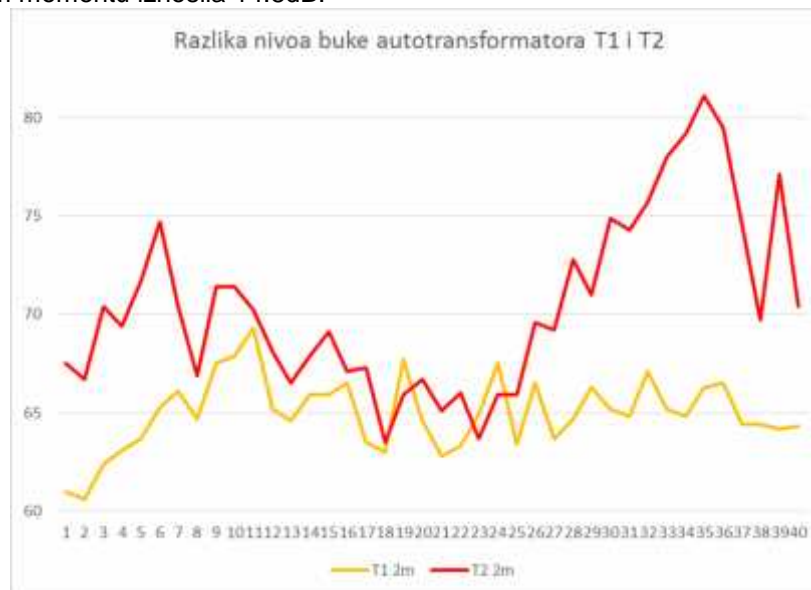
Srednja vrijednost ja ine zvuka na rastojanju 2m za ATR T1 iznosila je 60.44dB, a na rastojanju 4m je 57.16dB (sl.6). Dakle, razlika srednje izmjerenih vrijednosti u ovom slu aju je iznosila 3.27dB.

Kod ATR T2, na rastojanju 2m ja ina zvuka je iznosila 65.50dB, a na rastojanju 4m je 61.72dB (sl.7). Dakle, razlika srednje izmjerenih vrijednosti u ovom slu aju je iznosila 3.78dB.



Sl. 7. Grafi ki prikaz nivoa zvuka u uslovima razli ite udaljenosti mjerne konture za ATR T2

Kona no, razlika nivoa buke dva gore pomenuta autotransformatora predstavljena je na slici 8. Dok je kod novog ATR T1, srednja ja ina zvuka iznosila 64.97dB, kod ATR T2 koji je na kraju „životnog vijeka“, ona je iznosila 70.41dB. Treba napomenuti i to da je maksimalna razlika snimljenog nivoa za ova dva ATR u jednom momentu iznosila 14.8dB.



Sl. 8. Grafi ki prikaz razlike nivoa buke autotransformatora T1 i T2

Ne ulaze i detaljno u razlike konstruktivnih karakteristika ovih ATR i ugra ene opreme na njima, može se re i da je razlika srednjih vrijednosti nivoa buke ovih ATR u iznosu od 5.44dB sasvim o ekivana i odraz je prirodnog procesa starenja transformatora u pogonu.

5. ZAKLJU CI

U radu su prikazani rezultati snimanja nivoa zvuka na energetskim transformatorima u realnom pogonu. Određeni faktori i uticaji na izmjerene vrijednosti su odabrani za različite primjere konkretnog uzorkovanja. Snimljeni nivoi zvuka su u svim primjerima slučajne veličine i neponovljivi.

Polazeći od fizičkih karakteristika rada transformatora u realnom pogonu, željelo se da rezultati snimanja nivoa zvuka budu komparativni sa ostalim profilaktičkim ispitivanjima, te da budu njihova dopuna i potvrda. Primarno, cilj je bio da se i ova mjerenja uvedu kao jedna od obaveznih kod preventivnog održavanja energetskih transformatora.

Predmet budućeg rada mogla bi biti karakteristična ispitivanja u uslovima: određenih režimima rada zavisno od vremenskih uslova, različitih nivoa opterećenja, nivoa zvuka u gornjem dijelu mjernog kontura, uticaja konstrukcije kazana, ugrađene opreme i drugo.

6. LITERATURA

- [1] Pravilnik o metodama izračunavanja i mjerenja nivoa buke u životnoj sredini, „Službeni list Crne Gore“ br.017/17, 2017.
- [2] Pravilnik o granicama vrijednostima buke u životnoj sredini, na utvrđivanje indikatora buke i akustičnih zona i metodama ocjenjivanja štetnih efekata buke, „Službeni list Crne Gore“ br. 060/11, 2011.
- [3] IEC 60076-10; Power transformers - Part 10: Determination of sound levels (IEC 2016)
- [4] IEC 60076-10-1; Power transformers - Part 10-1: Determination of sound levels - Application guide (IEC 2016)
- [5] ISO 9614:1993 Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity, Part 1: Measurement at discrete points
- [6] Swiatkowski: Determination of Transformer Sound Power level in respect to Test methods and measurement Conditions, Euronoise, EAA-Helina, 2018.