

Energetska učinkovitost i kvaliteta električne energije

Hulak, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:589904>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH
TEHNOLOGIJA

Sveučilišni studij

ENERGETSKA UČINKOVITOST I KVALITETA
ELEKTRIČNE ENERGIJE

Diplomski rad

Josip Hulak

Osijek, 2019.

1. UVOD	1
2. ENERGETSKA UČINKOVITOST	2
2.1 STANDARDIZACIJA	2
2.2 POKAZATELJI KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE	3
2.3 RASVJETA	3
2.3.1 ENERGETSKA UČINKOVITOST U SUSTAVIMA RASVJETE	4
2.4 TEHNOLOŠKI NAPREDAK U SUSTAVIMA RASVJETE	4
2.4.1 UČINKOVITI IZVORI SVJETLOSTI	5
3. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE	14
3.1 DEFINICIJA	14
3.2 HARMONICI	18
3.3. POJEDINAČNO I UKUPNO HARMONIČKO IZOBLIČENJE	24
4. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE JAVNE RASVJETE-PRIMJER	27
5. ZAKLJUČAK	38
LITERATURA	39
SAŽETAK	40
SUMMARY	40
ŽIVOTOPIS	41

1.UVOD

Električna energija je jedan od najvažnijih temelja industrijskog društva. Pojam energetska učinkovitost i kvaliteta električne energije je pojam koji znači različite stvari različitim ljudima. Električna energija je jedinstven proizvod zbog svoje neopipljivosti i promjenjivosti.

U današnje vrijeme svjedoci smo porasta cijene električne energije, a time dolazi do potrebe za štednjom i pronalaskom novih, efikasnijih i štedljivijih načina korištenja energije, posebno što se tiče područja rasvjete. Tu dolazi do pojma energetska učinkovitost koji znači korištenje što manje količine energije za obavljanje istog posla (grijanje, rasvjeta, pogon vozila i dr.). Treba napomenuti da se energetska učinkovitost ne može promatrati samo kao štednja energije, jer učinkovita uporaba energije ne smije narušavati komfor ili kvalitetu procesa.

Svijest o učinkovitim izvorima svjetlosti gotovo je u potpunosti usmjerena u smjeru LED rasvjete. U ovom radu opisana je energetska učinkovitost u sustavima rasvjete, te je dana usporedba različitih izvora svjetlosti. Također su opisani i glavni pokazatelji kvalitete električne energije. U posljednjem poglavlju rada je obavljena analiza kvalitete električne energije u programu „Power Log 5.4.1“. Mjerene su vrijednosti za LED i visokotlačnu natrijevu rasvjetu. Cilj rada je da se analizom kvalitete električne energije utvrdi utjecaj povećanja energetske učinkovitosti pomoću LED rasvjete na kvalitetu električne energije.

2. ENERGETSKA UČINKOVITOST

2.1 STANDARDIZACIJA

Ovih dana je poboljšanje energetske učinkovitosti postalo prioritet kod svih zemalja u njihovom političkom planu jer je to ključno za rješavanje energetske sigurnosti zbog ekoloških i ekonomskih izazova. Iz tog razloga mnoge organizacije su razradile plan kako provesti energetska učinkovitost i dale su širok spektar preporuka.

Klasifikaciju tih opcija dalo je vijeće za svjetku energiju - WEC (*World Energy Council*) :

- Institucije i programi
- Regulacijske mjere
- Financijske mjere
- Fiskalne mjere
- Mjere prekogranične zaštite

Energetska učinkovitost je suočena s različitim preprekama: nedostatak svijesti o štednom potencijalu, podjela poticaja, neusredotočenost na performanse pojedinačnih komponenti umjesto prinos energije. Standardi nam mogu pomoći kako bi prevladali neke od tih prepreka. Oni mogu pružiti zajednička mjerenja i istraživanja, metode za procjenu korištenja energije, mogu pružiti vodiče na koje se može primijeniti dizajn novih sustava kao i nadogradnja postojećih itd.[1]

Pregled standardizacije o energetske učinkovitosti dan je u sljedećim odjeljcima:

- ISO: identificirali su pet područja za koje smatraju da imaju najveći potencijal za štednju energije i emisije stakleničkih plinova:
 - Metode proračuna
 - Standardi upravljanja gorivom
 - Biogoriva
 - Nadopunjavanje i obnavljanje
 - Građevine
- IEC
- CEN i CENELEC

2.2 POKAZATELJI KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Ekonomska vrijednost kvalitete energije je usko povezana s problemima koji se stvaraju na električnoj opremi i drugim opterećenjima u sustavu. U industrijskom sektoru i gospodarstvu vrijednost poremećaja raste zbog modernih, automatiziranih postrojenja u kojima se nalazi osjetljiva oprema koja je vrlo složena. Kod takvih poremećaja kvaliteta energije se može povezati s lošijom proizvodnjom te to za sobom povlači i manje prihode i dobit. Loša kvaliteta nema posljedice samo na električne sustave u nestambenim objektima, ona također može štetiti i uređajima i sustavima u domaćinstvima što dovodi do opasnosti u kućnim instalacijama. Slaba kvaliteta može povećati gubitke snage u različitim područjima energetske sustava i kod kupaca. Ovi gubici umanjuju energetske učinkovitost i povećavaju potrošačke račune. Gospodarski učinci kvalitete električne energije dijele se u tri skupine:

- Izravni ekonomski utjecaji: gubitak proizvodnje, troškovi ponovnog pokretanja procesa, financijske kazne zbog nepoštivanja ugovora, komunalni troškovi, kazne za zaštitu okoliša, oštećenja opreme
- Neizravni ekonomski utjecaji: troškovi za organizaciju prihoda/dohotka, trošak gubitka tržišnog udjela, trošak obnove tržišne marke
- Društveno-ekonomski utjecaji: nepovoljne temperature zgrade koje se očituju na smanjenju učinkovitosti rada, zdravlja i sigurnosti, osobne ozljede itd. [2]

2.3 RASVJETA

U današnje vrijeme rasvjeta ima veliki doprinos potrošnji energije i emisiji stakleničkih plinova. Kod rasvjetnih sustava ukupna potrošnja električne energije u svijetu je 5-15 % nacionalne potrošnje u industrijaliziranim zemljama, a kod zemalja u razvoju čak i više od 80%. Veliki problem predstavlja upotreba zastarjelih tehnologija rasvjete, osobito u stambenom sektoru (dvije trećine izvora svjetlosti koja su trenutno instalirani u Europi su energetske neučinkovite). Kao i sve ostale tehnologije rasvjete nastaje na tržištu te predstavlja dobar cilj kako bi se povećala energetska učinkovitost u tom području. [1]

2.3.1 ENERGETSKA UČINKOVITOST U SUSTAVIMA RASVJETE

Kod rasvjete, energetska učinkovitost je definirana kao optimizacija potrošnje energije bez da se kvari kvaliteta rasvjete. Najveći problem je kako osigurati da rasvjeta bude najbolja s minimalnim troškovima električne energije. Za rješenje tog problema mora se uzeti kombinacija nekoliko stavki:

- Točan izbor razine rasvjete
- Odgovarajući broj svjetiljki i rasvjetnih tijela
- Izbor odgovarajućeg upravljačkog sustava
- Mora se uzeti u obzir okoliš ili prostor koji ima prirodno svjetlo

Ovo su elementi koji se moraju uzeti u obzir kod svakog vizualnog zadatka kako bi se osigurala dobra vizualna percepcija: razina rasvjete, rasvjeta u vidnom polju, odsjaj, prikazivanje boje. Prema ovome najprikladnija rasvjeta za svaku okolinu varira. Postoji veliki potencijal za poboljšanje učinkovitosti starih i novih instalacija s već razvijenim tehnologijama.

Tri osnovna koraka za poboljšanje učinkovitosti su:

- Utvrđivanje potrebne količine i kvalitete svjetlosti za dobru vidljivost
- Povećanje učinkovitosti izvora svjetla ako se često koristi
- Optimizirana kontrola svjetla ako se ne koristi često [1]

2.4 TEHNOLOŠKI NAPREDAK U SUSTAVIMA RASVJETE

Sustav rasvjete čine svjetiljke, rasvjetna tijela i upravljački sklop. Za projektiranje odgovarajućeg rasvjetnog sustava uzima se u obzir niz karakteristika i performansi ne samo za kvalitetu i količinu svjetlosti već i kako to utječe na ekonomičnost, izdržljivost i ostalo. Posljednjih godina rasvjetna tijela postižu veću energetska učinkovitost, od korištenja novih tehnologija, poboljšanja optičkih performansi i visokih frekvencija do elektroničkih upravljača koji koriste malo energije za kontrolu svjetla. [1]

2.4.1 UČINKOVITI IZVORI SVJETLOSTI

Kao prvu komponentu koju treba razmotriti kod projektiranja rasvjete je svjetiljka, njezin izbor određuje količinu svjetlosti, indeks obrade boje i ostale tehničke i ekonomske karakteristike. Većina umjetne svjetlosti u današnje vrijeme se generira iz tri procesa: inkandescencija, izravna emisija ispuštanja plinova, luminiscencija. U posljednje vrijeme svjedočimo upotrebi novih tehnologija koje se temelje na emisiji svjetlosti iz poluvodičkih uređaja(LED). [1]



Slika (2.1.) *Primjer ulične rasvjete s LED tehnologijom [3]*

Najstariju tehnologiju električne rasvjete predstavljaju žarulje sa žarnom niti. One su najmanje učinkovite jer samo 5 % električne energije se pretvara u svjetlost, a ostalih 95 % energije je toplina te imaju najkraći rok trajanja. S druge strane, žarulje sa žarnom niti imaju vrlo kvalitetno svjetlo i dobro prikazivanje boja. Njihova nabavna cijena je niska te su lako dostupne pa ih stoga potrošači i preferiraju. Zbog njihove niske učinkovitosti mnoge vlade su usvojile propise kako bi zamijenile žarulje sa žarnom niti s učinkovitijim alternativama. [1]



Slika (2.2.) Žarulja sa žarnom niti [4]

Linearne fluorescentne žarulje su najčešće korištene plinske svjetiljke u komercijalnim i industrijskim okruženjima, te one danas pružaju najveći dio globalne rasvjete. Fluorescentne cijevi imaju puno veću razinu učinkovitosti i dulji radni vijek od žarulja sa žarnom niti. Zbog visokog indeksa reprodukcije boja ove žarulje mogu biti dizajnirane tako da pružaju veliku raznolikost temperatura boja, u rasponu od 2700 K do 7500 K (dnevno svjetlo). [1]

Kompaktne fluorescentne žarulje se obično sastoje od 2, 4 ili 6 malih fluorescentnih cijevi. Integrirane žarulje koriste vijčanu bazu ili bajunetni čep isto kao i žarulje sa žarnom niti. Noviji modeli su dostupni u različitim promjerima uvrtanja i predstavljaju jedno od najučinkovitijih rješenja za poboljšanje energetske učinkovitosti u stambenoj rasvjeti. Njihova tehnologija se poboljšava iz godine u godinu. Proizvodi koji su danas dostupni imaju smanjen utjecaj na okoliš, imaju veću učinkovitost, trenutno pokretanje, tihi rad, smanjeno treperenje, manja veličina i lakša težina. [1]



Slika (2.3.) *Kompaktna fluorescentna žarulja [5]*

HID je žarulja visokog intenziteta pražnjenja, proizvodi svjetlost ispuštanjem električnog luka kroz cijev koja je ispunjena plinovima pod većim tlakom nego kod fluorescentnih svjetiljki. Razvijena je za industrijsku i vanjsku primjenu, također se koristi i u trgovini, uredima i ostalim zatvorenim aplikacijama. Ove svjetiljke imaju visoku učinkovitost i dug životni vijek (5000 – 24000 sati). Nedostatak kod ovih svjetiljki je taj što im treba dugo vremena za zagrijavanje pa se ne preporuča da ih se uključuje i isključuje za kratke vremenske intervale.



Slika (2.4.) *Žarulja visokog intenziteta pražnjena [6]*

Metal halogene žarulje proizvode svjetlost na način da električni luk prolazi kroz smjesu plinova pod visokim tlakom (živa, argon i raznovrsni metalni halogenidi). Spadaju u energetske najučinkovitije izvore bijele svjetlosti koji su danas dostupni. Metal halogene žarulje se obično koriste u industrijskim objektima, sportskim arenama i ostalim prostorima kojima je potrebna dobra reprodukcija boja.



Slika (2.5.) Metal halogena žarulja [6]

Visokotlačne natrijeve žarulje (HPS) proizvode zlatno (žuto - bijelo) svjetlo i dobar je izbor s ekonomske strane za vanjske i unutarnje prostore gdje nije potreban dobar ispis boja. U današnje vrijeme HPS svjetiljke gube svoj položaj u odnosu prema izvorima bijele svjetlosti, poput metal halogenih ili fluorescentnih. Kako bi držale korak, uvedena su neka poboljšanja u HPS svjetiljke nove generacije, kao što je uklanjanje kraja životnog ciklusa (karakteristično za standardne visokotlačne natrijeve žarulje), zatim smanjen ili nikakav sadržaj žive, itd.[1]



Slika (2.6.) *Visokotlačna natrijeva žarulja [7]*

Indukcijske svjetiljke krenule su s uporabom ranih 1990-tih, one rade na bazi elektromagnetske indukcije, tj. koriste elektromagnetsko polje (proizvedeno generatorom visoke frekvencije) kojim se inducira ispuštanje plina iz plazme u žarulju koja ima presvlaku fosfora. Ove svjetiljke nemaju elektrode i imaju 5-8 puta duže djelovanje od metal halogenih i fluorescentnih sustava i otprilike četiri puta duže od HPS sustava. Imaju dobar prikaz boja i svjetlosnu učinkovitost, kratko vrijeme ponovnog udara u odnosu na HID žarulje. Glavna prednost ovih sustava je dugotrajan životni vijek i vrlo su isplative.



Slika (2.7.) Indukcijska svjetiljka [6]

SSL (*Solid state lighting*) rasvjeta predstavlja tehnologiju rasvjete koja uključuje diode koje emitiraju svjetlost (LED) i organske diode koje emitiraju svjetlost (OLED), to su poluvodički uređaji koji emitiraju svjetlost kad struja prođe kroz njih. SSL postiže značajan napredak i u početku je imao velike dobitke u nišama tržišta osvjetljenja (npr., prijenosna rasvjeta, signalne svrhe, upotreba LED-ova s fotonaponskim uređajima itd.), ali nedavno su postali dostupni i za opću rasvjetu, kako vanjsku tako i unutarnju. Proizvođači stalno razvijaju nove vrste LED žarulja za opću rasvjetu i predviđaju brzo smanjenje troškova. Uz velike prednosti (mogućnost miješanja boja, dizajn, dug vijek trajanja, fleksibilnost i mala veličina, spektar, bez sadržaja žive, lako upravljanje itd.) očekuje se da će LED rasvjeta u skorijoj budućnosti transformirati praksu rasvjete i tržište. Danas je svjetlosna učinkovitost bijelih LED svjetala pretvorenih u fosfor vrlo visoka, iznad 200 lm/W, dok je svjetlosna učinkovitost toplih bijelih LED iznad 140 lm/W. [1]

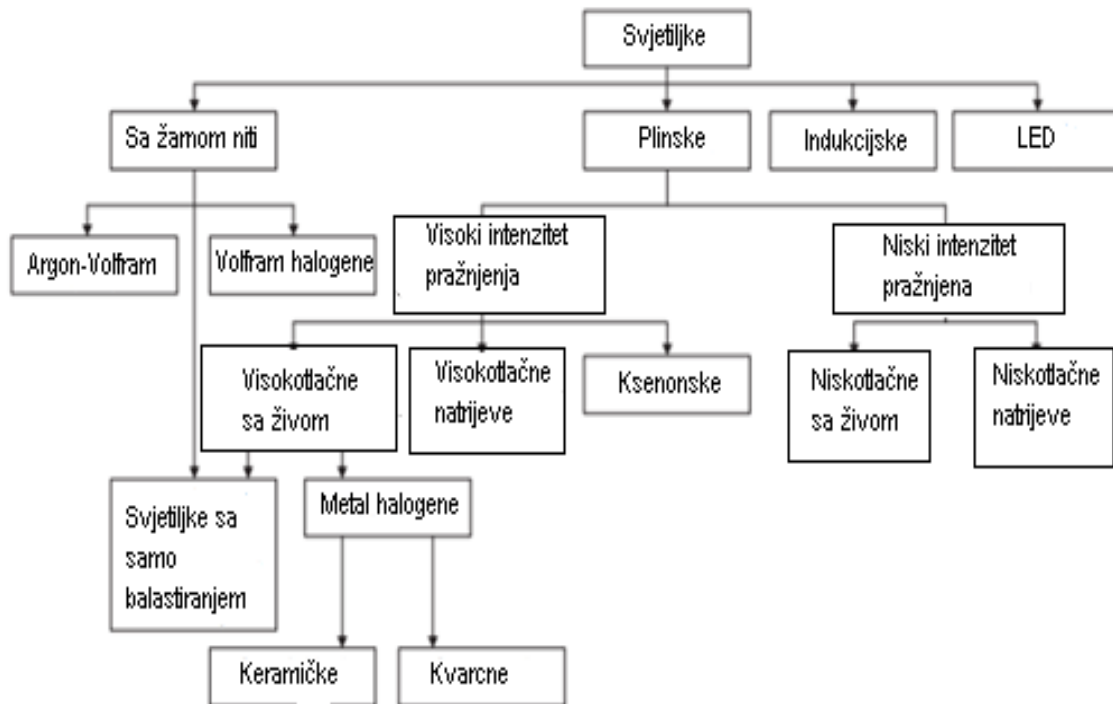


Slika (2.8.) LED svjetla [8]

OLED je još jedna obećavajuća tehnologija koja bi mogla proizvesti takve uređaje koji su znatno jeftiniji od LED, iako su OLED na neki način iza LED što se tiče sustava poboljšanja performansi.

Energetska učinkovitost LED rasvjete najviše ovisi u upravljanju rasvjetom, tome se u posljednje vrijeme pridodaje najviše pažnje i tehnologija jako brzo napreduje. Tehnologija LED rasvjete omogućuje dodatne uštede energije kao sustav inteligentne rasvjete (web upravljanje, detektori kretanja, hibridni sustav napajanja, LED rasvjeta napajana preko solarne energije itd.). [1]

Slika 2.2. prikazuje vrste električnih svjetiljki, a tablica 2.1. njihove karakteristike



Slika (2.9.) Vrste električnih svjetiljki

Tablica (2.1.) Karakteristike električnih izvora svjetlosti

Karakteristike	Sa žarnom niti		Niskog intenziteta pražnjenja		Visokog intenziteta pražnjenja			SSL
	Svjetlosni globus	Kvarcne	Fluorescentna cijev	Kompaktna fluorescentna	Živine	Metal halogene	Natrijeve	LED
Efikasnost (lm/W)	8-17	20-30	60-100	50-65	15-70	60-100	75-160	200
Životni vijek (h)	Manje od 2000	750-12000	7500-24000	10000-2000	6000-24000	1500-15000	14000-24000	
Prikaz boja	100	100	50-98	50-80	15-50	60-90	17-25	>80
Raspon snage (W)	Do 1500	Do 1500	8-220	4-40	40-1000	70-2000	70-1000	
Trošak instalacije	nizak	nizak	nizak	nizak	umjeren	Umjeren do visok	Umjeren do visok	
Tekući troškovi	veliki	Veliki	Umjereni do niski	Umjereni do niski	Veliki do umjereni	Umjereni do niski	Umjeren do visok	
Troškovi zamjene	nizak	srednji	nizak	srednji	nizak	visok	visok	
Vrijeme osvjetljenja	Neposredno	Neposredno	Neposredno	Do 3s	3-10 min	10-20 min	Manje od 1 min	Neposredno

3. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

3.1 DEFINICIJA

Kvalitetu električne energije možemo definirati kao skup električnih ograničenja koje omogućuju da jedan komad električne opreme ima očekivani životni vijek te da nema značajnih gubitaka, odnosno kvalitetu električne energije možemo definirati kao stupanj otklona od nazivne vrijednosti (amplitude, frekvencije, valnog oblika itd.) ili kao stupanj utjecaja uporabe i isporuke električne energije na performanse električne opreme.

Dvije stvari koje zahtijevamo od električnih uređaja su: performanse i životni vijek. Svi problemi povezani s napajanjem koji ugrožavaju jedan od ova dva atributa je briga o kvaliteti električne energije.

Svi električni uređaji podložni su kvaru kada su izloženi problemima s kvalitetom energije. Električni uređaj može biti transformator, električni motor, računalo, generator, kućanski aparati, komunikacijska oprema itd. Svaki od tih uređaja reagira negativno na probleme s kvalitetom napajanja.

Postoje dvije temeljne komponente kvalitete napajanja:

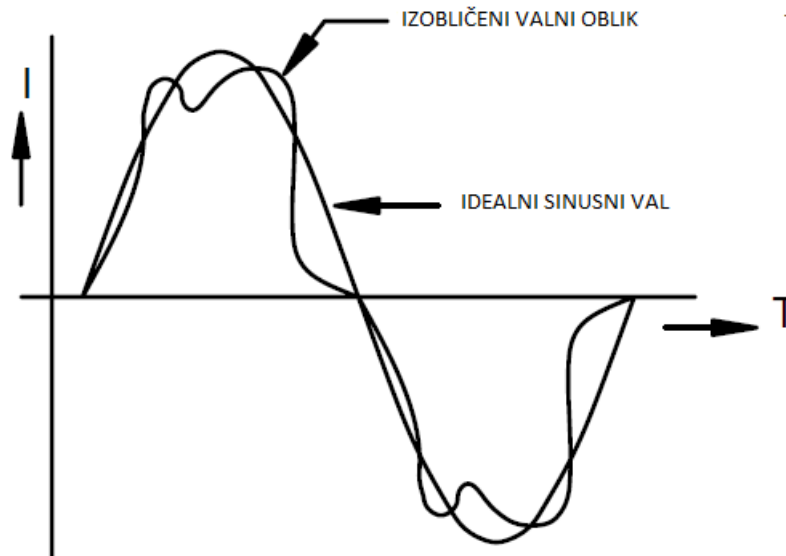
- neprekinutost: stupanj raspoloživosti el. energije krajnjem korisniku u svakom trenutku
- razina napona: određeni opseg unutar kojeg se napon održava tijekom vremena

Kako bi se bolje razumjeli pojmovi vezani uz kvalitetu električne energije u nastavku su definirani neki od uobičajenih izraza kvalitete električne energije:

Povezivanje – električno povezivanje vodljivih dijelova kako bi se osigurao zajednički potencijal između spojenih dijelova. Obavlja se isključivo iz dva razloga. Osigurava da svaka struja kvara koja je namijenjena metalnom dijelu bude sigurno preusmjerena u tlo ili druge mrežne sustave koji vode u tlo. Drugi razlog je kada su vodljivi dijelovi spojeni niskom impedancijom imaju tendenciju da budu na istom električnom potencijalu što znači da bi razlika napona između spojenih dijelova bila minimalna.

Kapacitet – svojstvo elementa kruga kojeg karakterizira da se između dva vodljiva dijela nalazi izolacijsko sredstvo. Jedinica za kapacitet je Farad (F), a njegove vrijednosti su najčešće izražene u mikrofaradima. Kapacitet je jedan od načina kojim se energija može spojiti iz jednog električnog kruga u drugi. Kapacitet između dva vodljiva dijela može biti beskonačno mali, ali ne i potpuno eliminiran.

Izobličenje – pojam koji ukazuje na odstupanje periodičnog vala od svojih karakteristika idealnog valnog oblika. Distorzija uvedena u val može deformirati valni oblik i fazni pomak. Slika (3.1.) sadrži idealan sinusni valni oblik zajedno s izobličenim valom. [9]



Slika (3.1.) Valni oblik s izobličenjem [9]

Faktor izobličenja – poznato kao ukupno harmoničko izobličenje (THD). Odnos između RMS-a harmonika periodičkog vala i RMS-a temeljnog vala izražen u postocima.

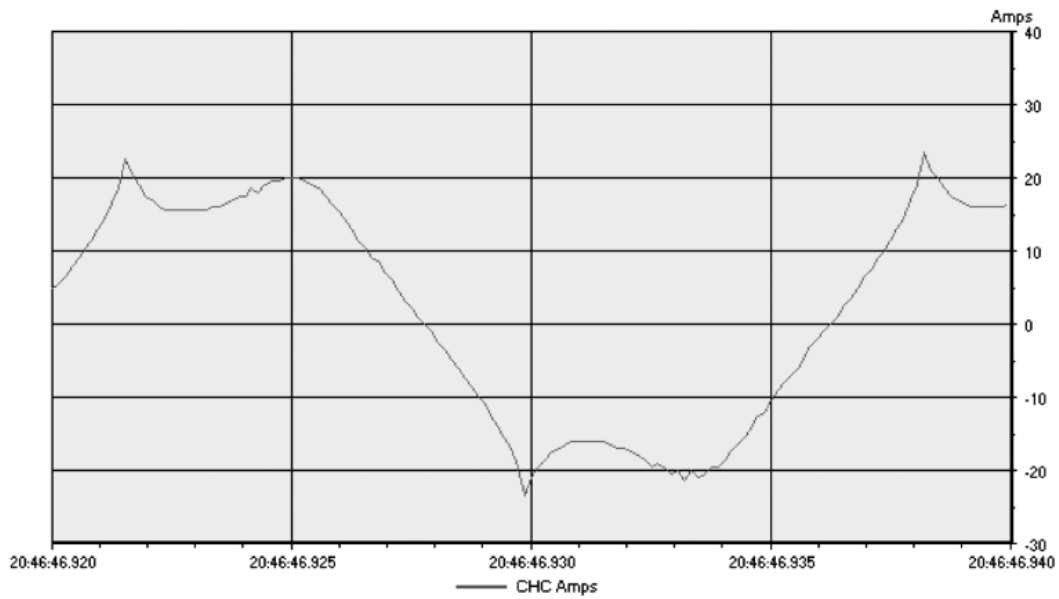
Naponsko treperenje – varijacija ulaznog napona koja dovoljno traje kako bi se omogućilo vizualno promatranje promjene intenziteta električnog izvora svjetlosti. Treperenje se može izraziti kao promjena napona iznad nominalne izražena u postocima.

Harmonici – sinusoidna komponenta periodičnog vala s frekvencijom koja je višekratnik osnovne frekvencije. Ako je temeljna frekvencija 50 Hz, a drugi harmonik je sinusoidni val 100 Hz, peti harmonik je sinusoidni val od 250 Hz itd.

Harmoničko izobličenje – kvantitativno predstavljanje distorzije od čistog sinusnog valnog oblika

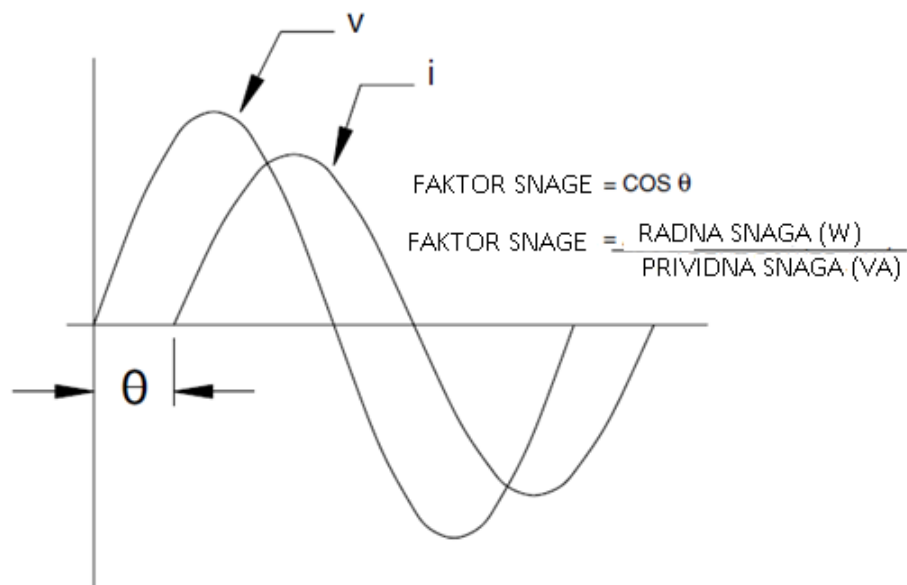
Linearna opterećenja – električno opterećenje koje u ustaljenom načinu rada predstavlja konstantnu impedanciju na izvor energije. Čisto linearno opterećenje ima samo temeljnu komponentu struje.

Nelinearno opterećenje – električno opterećenje koje prikazuje struje kao diskontinuirane ili čija se impedancija mijenja pri svakom ulazu izmjeničnog napona. Slika (3.2.) prikazuje nelinearni valni oblik struje fluorescentne rasvjete.[9]



Slika (3.2.) Nelinearni valni oblik struje fluorescentne rasvjete [9]

Faktor snage – omjer između aktivne snage osnovnog vala i prividne snage osnovnog vala. Čisti sinusoidni valni oblik mogu prikazati samo temeljne komponente. Faktor snage je kosinus kuta pomaka između napona i valnih oblika struje. Slika (3.3.) prikazuje faktor snage pomaka.[9]



Slika (3.3.) Faktor snage [9]

Analiza kvalitete električne energije obično obuhvaća sljedeće osobine napona:

- naponski propadi i prekidi,
- naponska kolebanja
- harmonici i međuharmonici,
- prijelazni prenaponi,
- valovitost,
- tranzijentni prenaponi,
- naponska nesimetrija,
- promjene osnovne frekvencije mreže,
- prisutnost DC komponente u AC komponenti,
- prisutnost signalnih napona.

Tipove poremećaja možemo podijeliti u četiri kategorije: prema amplitudi, valnom obliku, frekvenciji i simetričnosti napona.

3.2 HARMONICI

Zbog rasta uporabe nelinearnih poluvodičkih uređaja dolazi do ubrzanog rasta razine harmoničkih poremećaja. Francuski matematičar Jean Baptiste Fourier je rekao da se periodička nesinusna frekvencija od osnovne frekvencije može izraziti kao zbroj sinusoidnih funkcija frekvencija koje su višekratnici osnovne frekvencije. Dakle, harmonici su sinusni naponi ili struje s frekvencijama koje su višekratnici nazivne frekvencije.

Za periodični nesinusni valni oblik pojednostavljeni Fourierov izraz glasi:

$$v(t) = V_0 + V_1 \sin(\omega t) + V_2 \sin(2\omega t) + V_3 \sin(3\omega t) + \dots \\ + V_n \sin(n\omega t) + V_{n+1} \sin((n+1)\omega t) \dots \quad (3-1)$$

Fourierov izraz je beskonačan. V_0 predstavlja konstantu, $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ su vršne vrijednosti uzastopnih izraza.

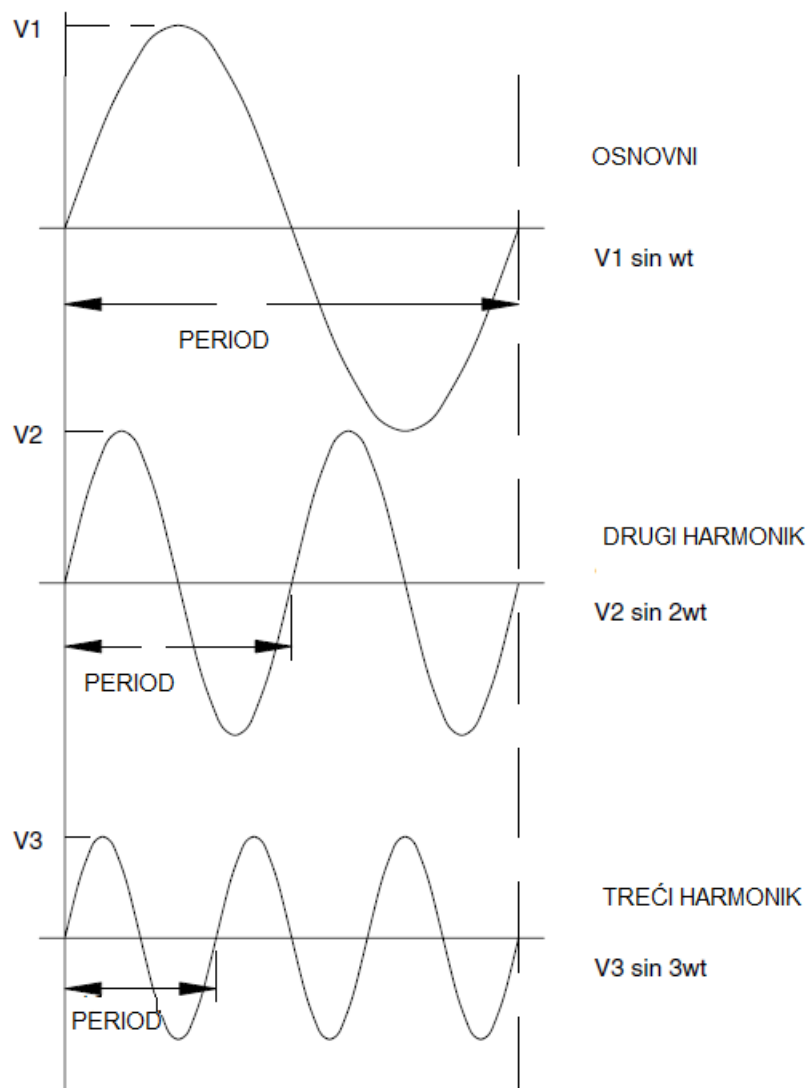
Sve periodičke funkcije mogu se rastaviti na zbroj sinusnih valnih oblika frekvencije $h \times f$. Slovo h označava red harmonika, koji se odnosi na pojedinačne elemente frekvencije koji sadrže kompozitni valni oblik. Npr., $h=3$ se odnosi na treći harmonik koji ima frekvenciju tri puta veću od osnovne. Ako je nazivna frekvencija 50 Hz, tada je frekvencija trećeg harmonika jednaka 3×50 i iznosi 150 Hz. Uporaba harmonijskih brojeva nam omogućuje da lakše izrazimo harmonike. Drugi razlog upotrebe harmonijskih brojeva je kako bi se pojednostavilo obavljanje matematičkih operacija koje uključuju harmonike.

Funkcija sinusnog napona ili struje koja ovisi o vremenu t može biti izražena:

$$v(t) = V \sin \omega t, \text{ funkcija napona} \quad (3-2)$$

$$i(t) = I \sin(\omega t \pm \emptyset), \text{ funkcija struje} \quad (3-3)$$

gdje je $\omega = 2 \times \pi \times f$ kutna brzina periodičnog valnog oblika, a \emptyset je razlika u faznom kutu između napona i valnih oblika struje. Fazni kut je pozitivan ako struja prethodi naponu i negativan ako struja zaostaje za naponom.



Slika (3.4.) Osnovni, drugi i treći harmonik [9]

Harmonijski broj h odnosi se na pojedinačne frekvencijske elemente koji obuhvaćaju valni oblik. $h = 3$ se odnosi na treću harmonijsku komponentu s frekvencijom koja je tri puta veća od osnovne frekvencije. Ako je osnovna frekvencija 50Hz, onda je frekvencija trećeg harmonika 3×50 , odnosno 150 Hz. Harmonički broj četiri je komponenta s frekvencijom od 200 Hz i tako dalje. Bavljenje harmonijskim brojevima, a ne s harmonijskim frekvencijama obavlja se iz dva razloga. Osnovna frekvencija nije jednaka u svim zemljama i aplikacijama. Osnovna frekvencija u SAD-u je 60 Hz, dok u Europi i većini azijskih zemalja ona iznosi 50 Hz. Isto tako neke aplikacije koriste različite frekvencije od 50 Hz i 60 Hz. U zrakoplovnoj industriji je uobičajena frekvencija od 400 Hz, zatim neki AC sustavi za električnu vuču

koriste frekvenciju od 25 Hz. Tako da nam upotreba harmonijskih brojeva omogućava pojednostavljeno izražavanje harmonika.

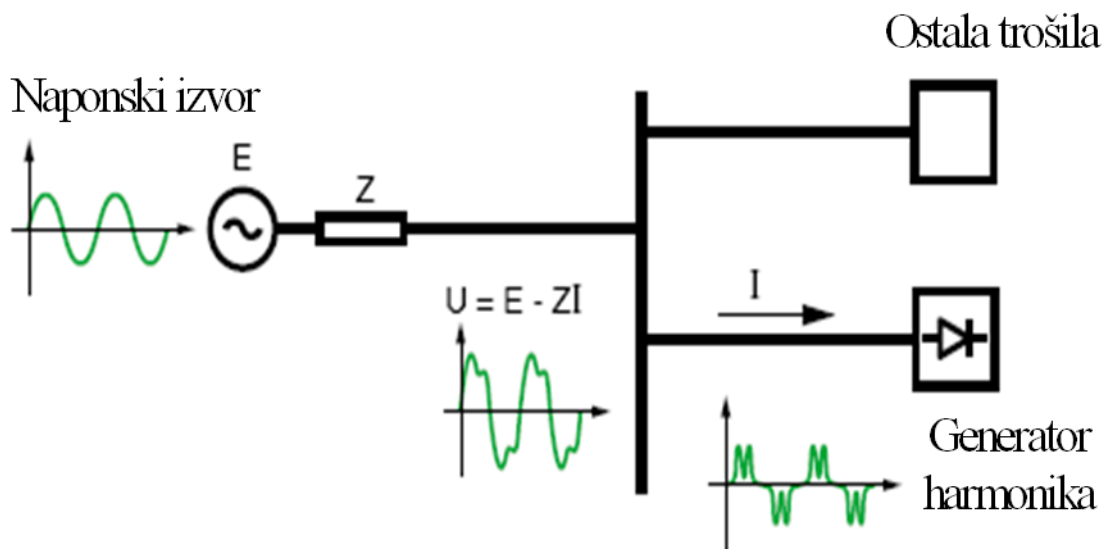
Kako njihova imena impliciraju, neparni harmonici imaju neparne brojeve (3, 5, 7, 9, ...), a parni harmonici imaju parne brojeve (2, 4, 6, 8, ...). Harmonijski broj 1 se odnosi na temeljnu frekvencijsku komponentu periodičnog vala, dok harmonijski broj 0 predstavlja konstantnu ili istosmjernu komponentu valnog oblika. Istosmjerna komponenta predstavlja neto razliku između pozitivne i negativne polovice jednog perioda valnog oblika. DC komponenta valnog oblika ima neželjene učinke, osobito na transformatore zbog zasićenja jezgre. Do zasićenja jezgre dolazi radom jezgre u magnetskom polju iznad koljena krivulje magnetiziranja. Transformatori su dizajnirani tako da rade ispod koljena krivulje magnetiziranja. Kad se na namotaju transformatora primjenjuju istosmjerni naponi ili struje, u jezgru transformatora se postavljaju velika istosmjerna magnetska polja. Zbroj AC i DC magnetskih polja mogu prebaciti rad transformatora u područje iza koljena krivulje. Rad u području zasićenja stavlja veliku snagu uzbude na elektroenergetski sustav. Gubici transformatora se povećavaju i uzrokuju porast temperature. Vibracija jezgre postaje izraženija zbog djelovanja u području zasićenja. Na harmonike većinom gledamo kao na cijele brojeve, ali postoje aplikacije koje proizvode harmonike koji nisu cijeli brojevi. Elektrolučne peći su primjer opterećenja koje proizvode harmonike koji nisu cijeli brojevi. Zavarivači lukova mogu isto tako generirati harmonike koji nisu cijeli brojevi. U oba slučaja kada se luk stabilizira harmonici koji nisu cijeli brojevi uglavnom nestanu i ostavljaju samo cijeli broj harmonika. Većina nelinearnih opterećenja proizvodi harmonike koji su neparni višekratnici od temeljne frekvencije. Međuharmonici imaju frekvencije niže od temeljne i rijetki su u elektroenergetskim sustavima. Temeljni uzrok prisustva međuharmonika je rezonancija između harmoničkih napona ili struja s kapacitetom i induktivitetom elektroenergetskog sustava. Međuharmonici se mogu generirati kada je sustav visoko induktivan (kao ložišta tijekom pokretanja) ili ako elektroenergetski sustav sadrži banke s velikim kapacitetima za korekciju faktora snage ili filtriranje. Takvi uvjeti sadrže oscilacije koje rezultiraju padom napona i svjetlosnim treperenjem. [9]

Izvori harmonika:

Harmonici nastaju kao proizvod nelinearnih trošila koja generiraju strujni valni oblik različit od napona napajanja.

Glavni izvori harmonika su opterećenja koja se mogu razlikovati prema svojoj domeni:

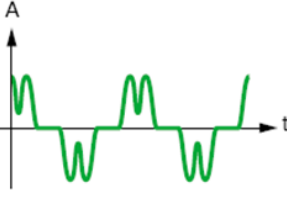
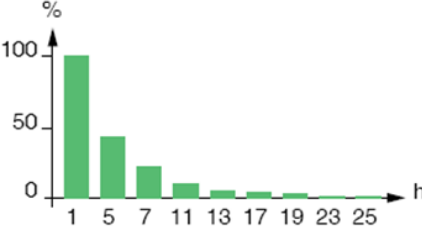
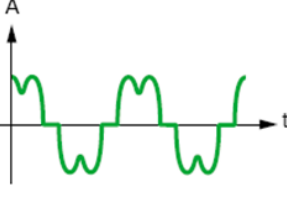
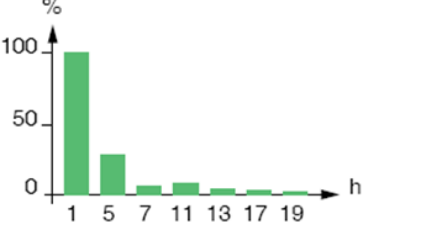

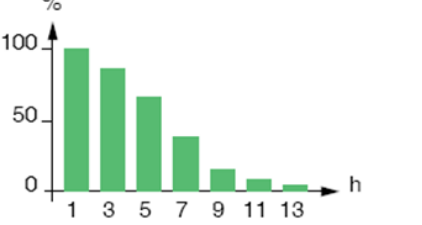
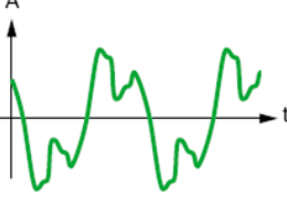
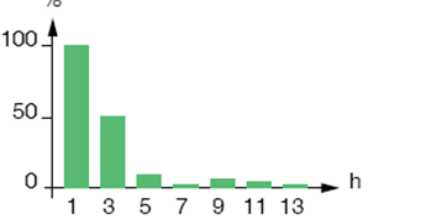
- Industrijska opterećenja
- Elektroenergetska oprema
- Opterećenja pomoću električnih lukova
- Domaća opterećenja s pretvaračima snage ili sklopnim napajanjem (TV, mikrovalna, računalo itd.)



Slika (3.6.) Izobličenje mrežnog napona utjecajem nelinearnog trošila [10]

Razine harmonika općenito ovise o načinu rada uređaja, vremenu i godišnjem dobu. Izvori najčešće generiraju neparne harmonike ali, postoje i izvori koji generiraju parne harmonike (polarizirana trošila, lučne peći, uzbuda energetskog transformatora).

Izvori kao što su uređaji za zavarivanje, lučne peći i frekvencijski pretvarači generiraju međuharmonike koji su sinusne komponente s frekvencijama koje nisu cjelobrojni višekratnici osnovne komponente. Nastaju zbog periodičnih ili slučajnih promjena snage.

Nelinearna trošila	Valni oblik struje	Spektar	THD
Pogoni s promjenjivom brzinom			44 %
Ispravljači/punjaci			28 %
Racunala			115 %
Fluorescentna rasvjeta			53 %

Slika (3.7.) Karakteristike određenih generatora harmonika [10]

Posljedice harmonika možemo podijeliti u dvije grupe:

Trenutne ili kratkotrajne posljedice

- Dolazi do uništenja kondenzatora u instalacijama zbog povećanja pogonske struje uslijed rezonancije. Ovaj efekt ima veliki utjecaj kod:
 - Industrijskih instalacija s statičkim pretvaračima
 - U uslužnom sektoru gdje je prisutna velika instalacija fluorescentne rasvjete koja ima kondenzatore za faktor snage
 - u područjima koja su značajno opterećena računalima
- imaju štetan utjecaj na zaštitne uređaje (osobito termičke)

- smetnje koje utječu na sustave s niskim strujama (TV, telekomunikacije, računalni zasloni itd.)

Dugotrajne posljedice

- zbog struja viših harmonika (pogotovo trećeg harmonika) dolazi do pregrijavanja transformatora i neutralnih vodiča
- Neutralni vodiči u instalacijama i sustavima napajanja imaju isti poprečni presjek kao i fazni vodiči. U novijim instalacijama već postoji i uporaba neutralnih vodiča s većim poprečnim presjekom zbog povećanih struja trećeg harmonika. Retrospektivna ugradnja takvih većih neutralnih vodiča u postojeće mreže mogla bi uzrokovati astronomske troškove, uključujući i značajni porast potražnje za bakrom i aluminijem.
- Loši faktori snage povezani s nelinearnim opterećenjima odgovorni su za znatno povećanje razina struja u elektroenergetskim sustavima i instalacijama potrošača te stoga i povećanjem troškova gubitaka.
- Uništenje opreme (prekidači, kondenzatori itd.)

Metode za poboljšanje:

Postoji nekoliko razloga zbog kojih je potrebno ograničiti smetnje izazvane harmonicima:

- Prvi razlog je sprječavanje interferencije, kvarova i preopterećenja opreme, a isto tako i instalacija na koje je oprema spojena u industrijskim postrojenjima
- Drugi razlog je ograničavanje emisije struje viših harmonika u mrežu napajanja

Vrlo važan je i vremenski okvir pri razmatranju metoda za otklanjanje viših harmonika. Kod već postojećih postrojenja pristup rješavanju problema je potpuno drugačiji od onoga kada se planira izgradnja novog postrojenja s novom opremom. Izvori harmonika se ponašaju kao strujni generatori. Kako bi smanjili smetnje koje uzrokuju viši harmonici na propisanu razinu, na sabirnicama gdje je spojeno osjetljivo opterećenje mogu se poduzeti sljedeće mjere:

- Zasebnim sabirnicama odvojiti ometajuća i osjetljiva opterećenja
- Povećavanjem broja okidanja pretvarača
- Ugraditi filtere na sabirnice sa izvorom harmonika [9]

3.3. POJEDINAČNO I UKUPNO HARMONIČKO IZOBLIČENJE

Pojedinačno harmoničko izobličenje (IHD) je omjer između srednje vrijednosti pojedinačnog harmonika i srednje vrijednosti osnovnog harmonika

$$IHD = I_n / I_1 \quad (3-4)$$

Na primjer, ako je srednja vrijednost struje trećeg harmonika u nelinearnom opterećenju 30 A, srednja vrijednost struje petog harmonika je 20 A, a srednja vrijednost osnovnog harmonika je 60 A, tada je pojedinačno harmoničko izobličenje trećeg harmonika:

$$IHD_3 = 30 / 60 = 0.5, \text{ ili } 50 \% \quad (3-5)$$

a pojedinačno harmoničko izobličenje petog harmonika je:

$$IHD_5 = 20 / 60 = 0.333, \text{ ili } 33,3 \% \quad (3-6)$$

Prema ovoj definiciji vrijednost IHD_1 će uvijek iznositi 100 %. Ova metoda računanja harmonika poznata je kao harmonijsko izobličenje koje se temelji na osnovnom harmoniku. To je konvencija koju koristi IEEE u SAD-u. Europska međunarodna elektrotehnička komisija (IEC) računa harmonika temeljene na ukupnoj srednjoj vrijednosti valnog oblika:

$$I_{rms} = \sqrt{60^2 + 30^2 + 20^2} = 70 \text{ A} \quad (3-7)$$

Prema IEC-u:

$$IHD_1 = 60 / 70 = 0,857, \text{ ili } 85,7 \% \quad (3-8)$$

$$IHD_3 = 30 / 70 = 0,429, \text{ ili } 42,9 \% \quad (3-9)$$

$$IHD_5 = 20 / 70 = 0,286, \text{ ili } 28,6 \% \quad (3-10)$$

Ovim primjerima je pokazano da iako su harmonijske struje jednake, postotci njihovih izobličenja su različiti zbog različitih definicija.

Ukupno harmoničko izobličenje - THD (eng. *Total Harmonic Distortion*) je izraz kojim se opisuje neto odstupanje nelinearnog valnog oblika od idealnog sinusnog valnog oblika. THD daje zbroj efektivnih vrijednosti napona svih harmoničkih frekvencija te se prikazuje relativno u odnosu na osnovni harmonik.

Ako nelinearna struja ima osnovnu komponentu I_1 i harmoničke komponente $I_2, I_3, I_4, I_5, I_6 \dots$ tada srednja vrijednost harmonika iznosi:

$$I_H = \sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + I_6^2 + \dots)} \quad (3-11)$$

A ukupno harmoničko izobličenje:

$$THD = \left(\frac{I_H}{I_1} \right) \times 100\% \quad (3-12)$$

Primjer:

Izračunajte ukupno harmoničko izobličenje (THD) valnog oblika napona ako je:

$$\text{Osnovni harmonik} = V_1 = 110 \text{ V} \quad (3-13)$$

$$\text{Treći harmonik} = V_3 = 6 \text{ V} \quad (3-14)$$

$$\text{Peti harmonik} = V_5 = 4 \text{ V} \quad (3-15)$$

$$\text{Sedmi harmonik} = V_7 = 1 \text{ V} \quad (3-16)$$

Imamo dva načina rješavanja ovog problema:

pomoću srednje vrijednosti harmonika:

$$V_H = \sqrt{6^2 + 4^2 + 1^2} = 7,28 \text{ V} \quad (3-17)$$

$$THD = (7,28/110) \times 100 = 6,62 \% \quad (3-18)$$

Ili računanjem individualnih harmoničkih izobličenja:

$$IHD_3 = 6/110 = 5,45 \% \quad (3-19)$$

$$IHD_5 = 4/110 = 3,64 \% \quad (3-20)$$

$$IHD_7 = 1/110 = 0,91 \% \quad (3-21)$$

Prema definiciji $IHD_1 = 100 \% :$

$$THD = \sqrt{IHD_3^2 + IHD_5^2 + IHD_7^2} = 6,62 \% \quad (3-22)$$

Vidljivo je da se dobiju isti rezultati pomoću oba načina. Ukupno harmoničko izobličenje opisuje neto odstupanje zbog svih harmonika, dok pojedinačno harmoničko izobličenje ukazuje na doprinos svakog harmonika na iskrivljeni valni oblik i oba parametra su bitna. Za rješavanje harmonijskih problema potrebne su informacije o sastavu pojedinačnih izobličenja tako da se svaki tretman može prilagoditi problemu. Ukupno harmoničko izobličenje, gdje se ne prenose informacije o sastavu, koristi se za opisivanje stupnja onečišćenja elektroenergetskog sustava.

Tablica (3.5.) *Maksimalne propisane vrijednosti pojedinih harmonika*

Neparni viši harmonici				Parni viši harmonici	
Koji nisu višekratnik od 3		Koji su višekratnik od 3			
Redni br. h	U_h u % U_n	Redni br. h	U_h u % U_n	Redni br. h	U_h u % U_n
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 - 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Kod normalnih pogonskih uvjeta 95% 10-minutnih srednjih vrijednosti efektivne vrijednosti napona svakog pojedinog višeg harmonika ne smije ni u jednom trenutku prelaziti vrijednosti Tablice (3.5.). [9]

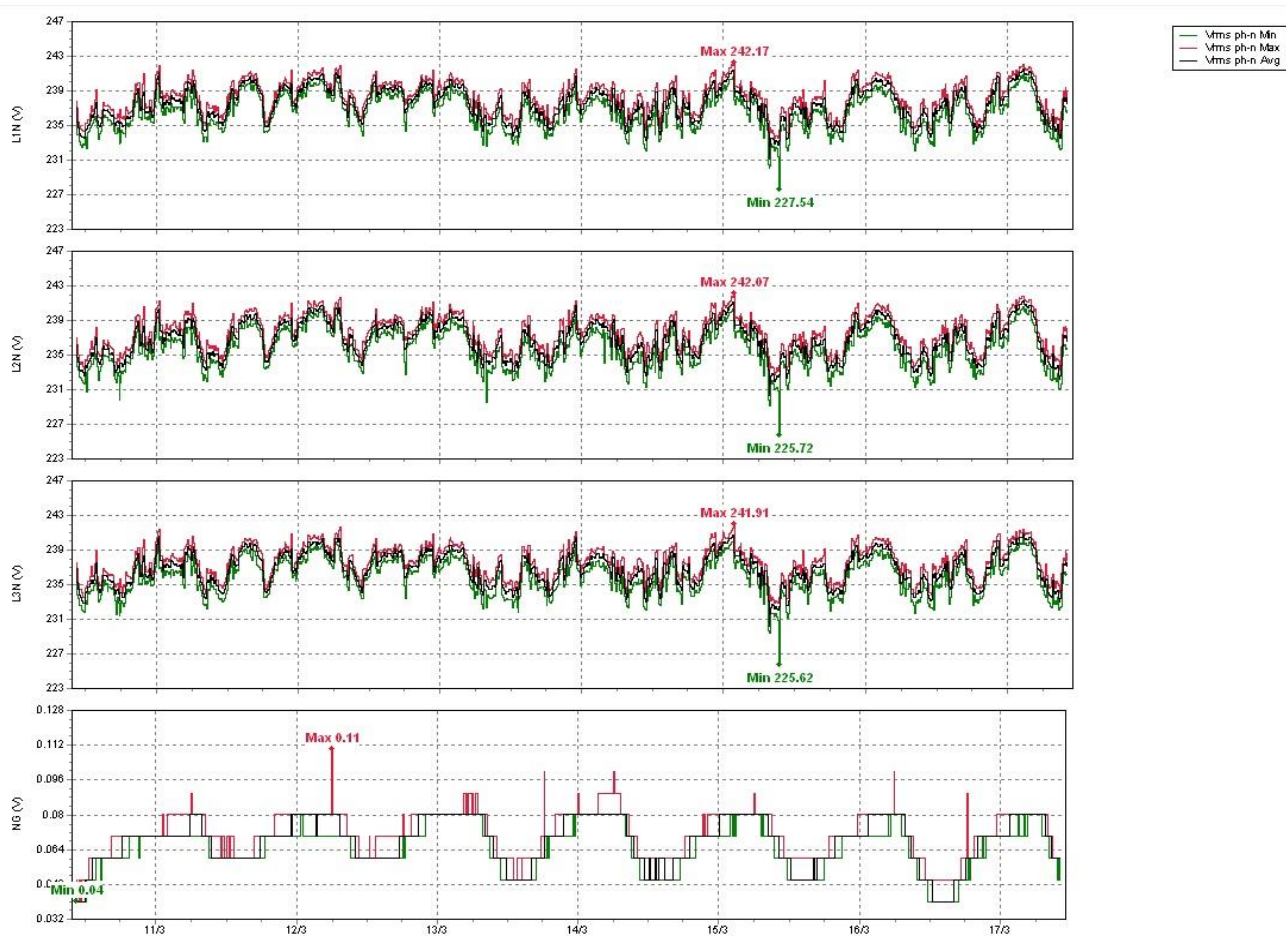
4. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE JAVNE RASVJETE- PRIMJER

Analiza rezultata električnih mjerenja obrađena je u programu „Power Log 5.4.1“. Mjerile su se vrijednosti za LED rasvjetu i rasvjetu s visokotlačnim natrijevim žaruljama. Za navedena rasvjetna tijela mjerenje je provedeno u vremenskom razdoblju od tjedan dana. Mjerenjima je prikazana usporedba napona, struje, snage i harmonika za navedena rasvjetna tijela. Treba napomenuti kako je mjerena samo druga faza te je samo nju potrebno analizirati, jer se pouzdano zna da su samo na nju spojena navedena rasvjetna tijela. Ovim mjerenjima ćemo prikazati i analizirati da li uz poboljšanu energetska učinkovitost dolazi do utjecaja na kvalitetu električne energije.

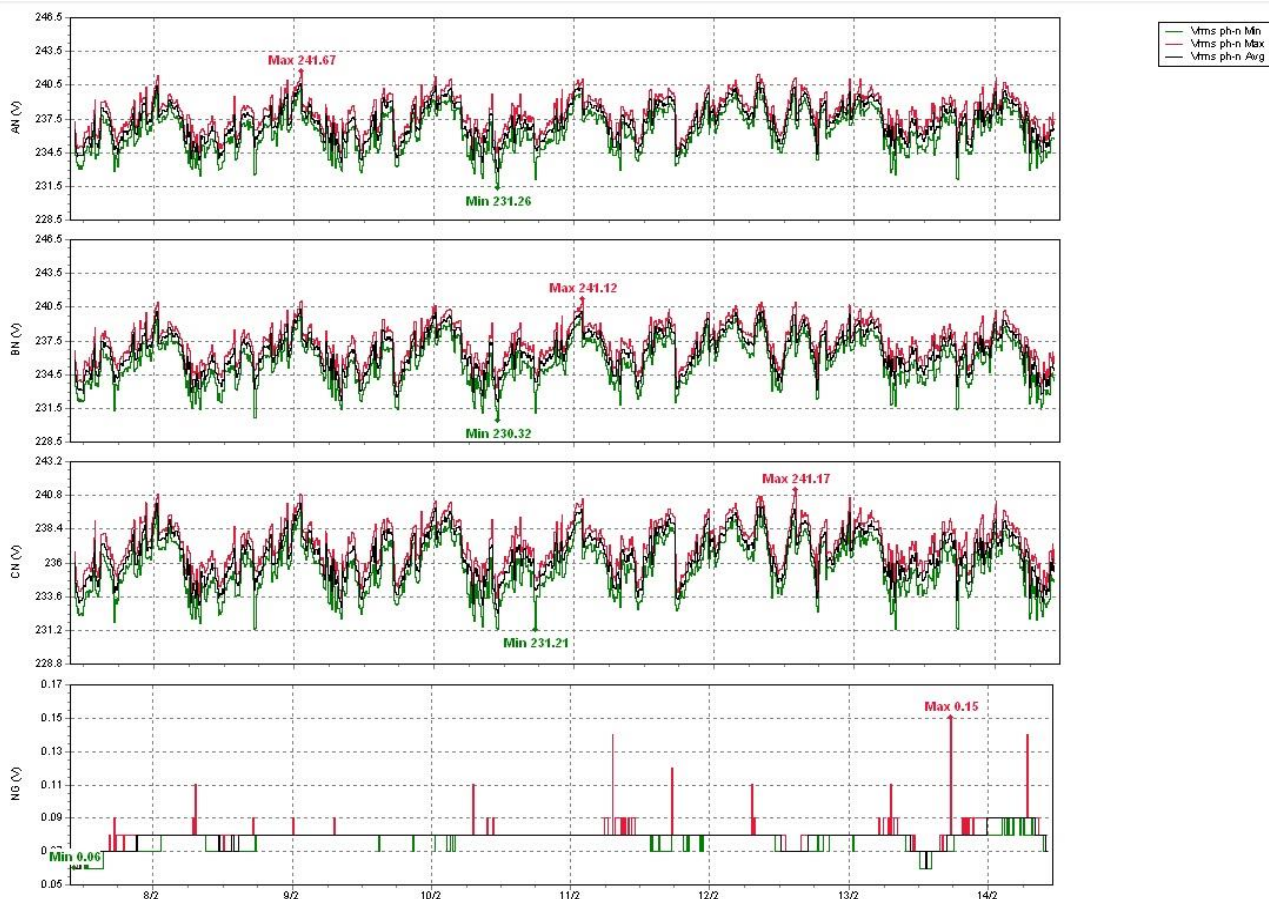
Tablica 4.1. *Potrošači i period mjerenja*

Tehnologija sustava rasvjete	Broj svjetiljki	Snaga svjetiljke [W]	Ukupna snaga izvoda [W]	Period mjerenja
VTNA	10	185	1850	7.2.2017- 14.2.2017
LED	10	17	170	10.3.2017- 17.3.2017

Slika 4.1. i 4.2. prikazuje iznose napona za LED rasvjetu i rasvjetu s visokotlačnim natrijevim žaruljama.



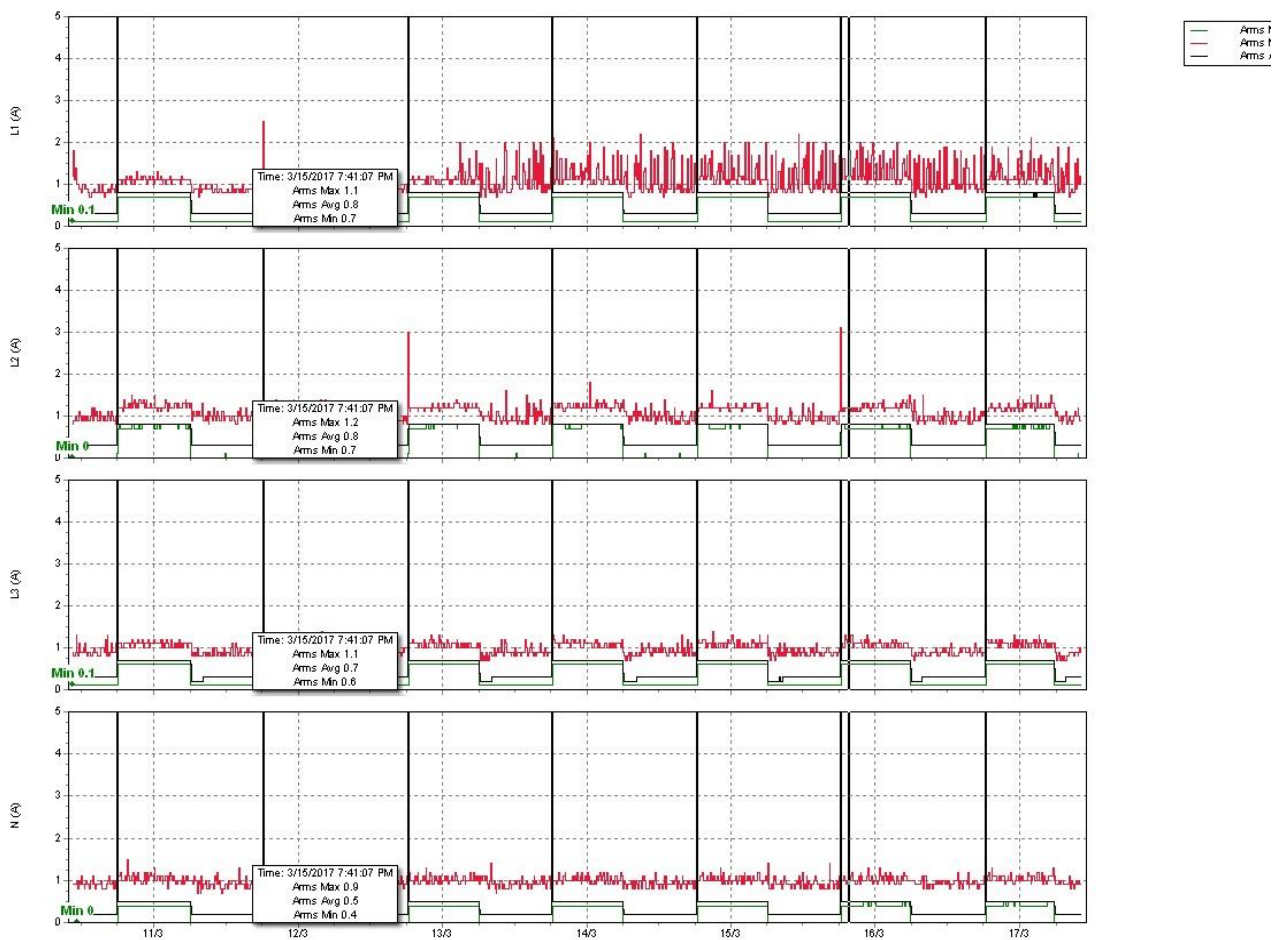
Slika 4.1 Grafovi napona za LED rasvjetu



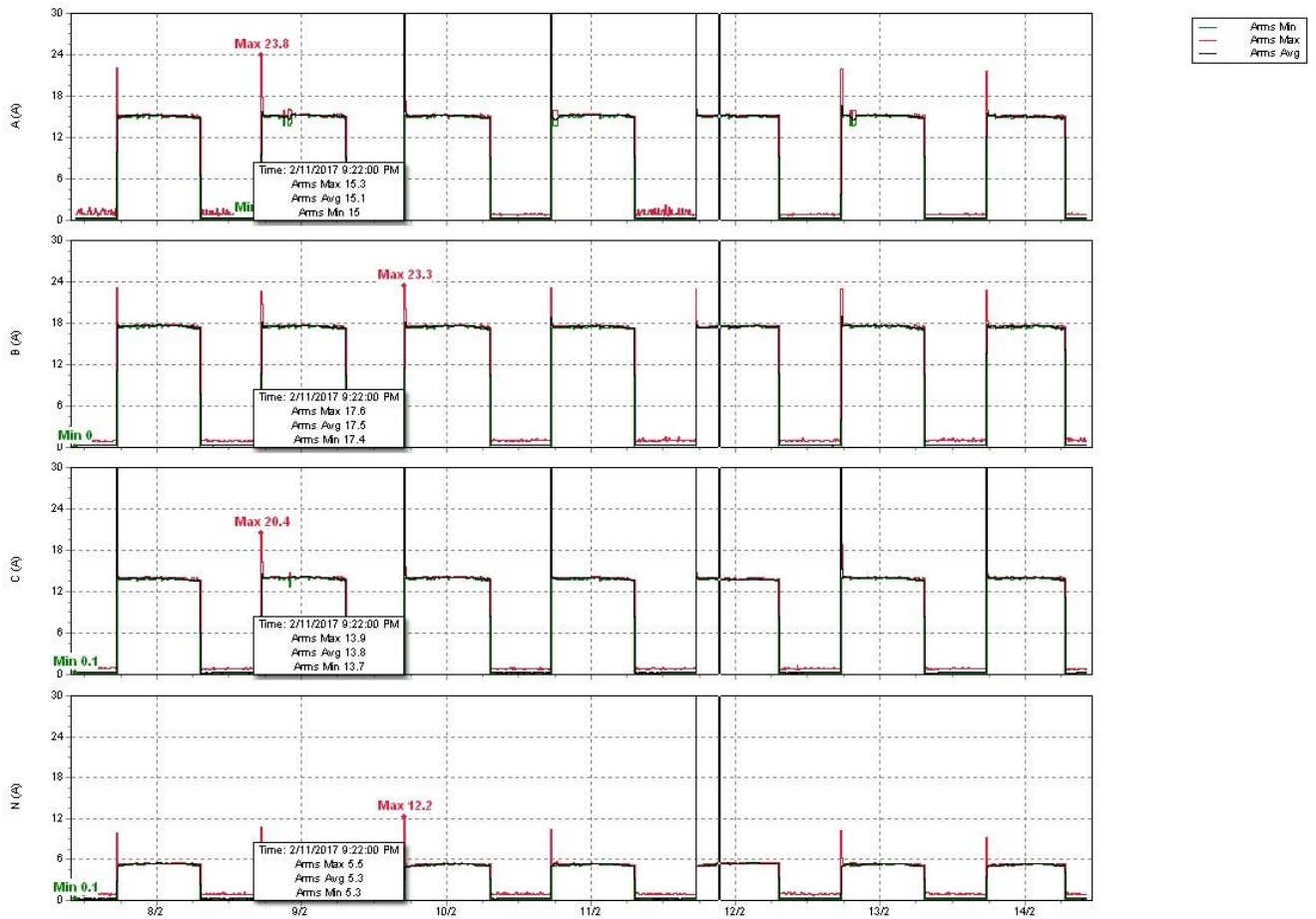
Slika 4.2 Grafovi napona za viskotlačnu natrijevu žarulju

Na slikama 4.1 i 4.2 je vidljivo da su razlike u naponima kod LED rasvjete i viskotlačnih natrijevih žarulja vrlo male (manje od 1 V), prema očekivanjima nema nekih većih odstupanja.

Slike 4.3. i 4.4. prikazuju iznose struje LED rasvjete i rasvjete s visokotlačnim natrijevima žaruljama.



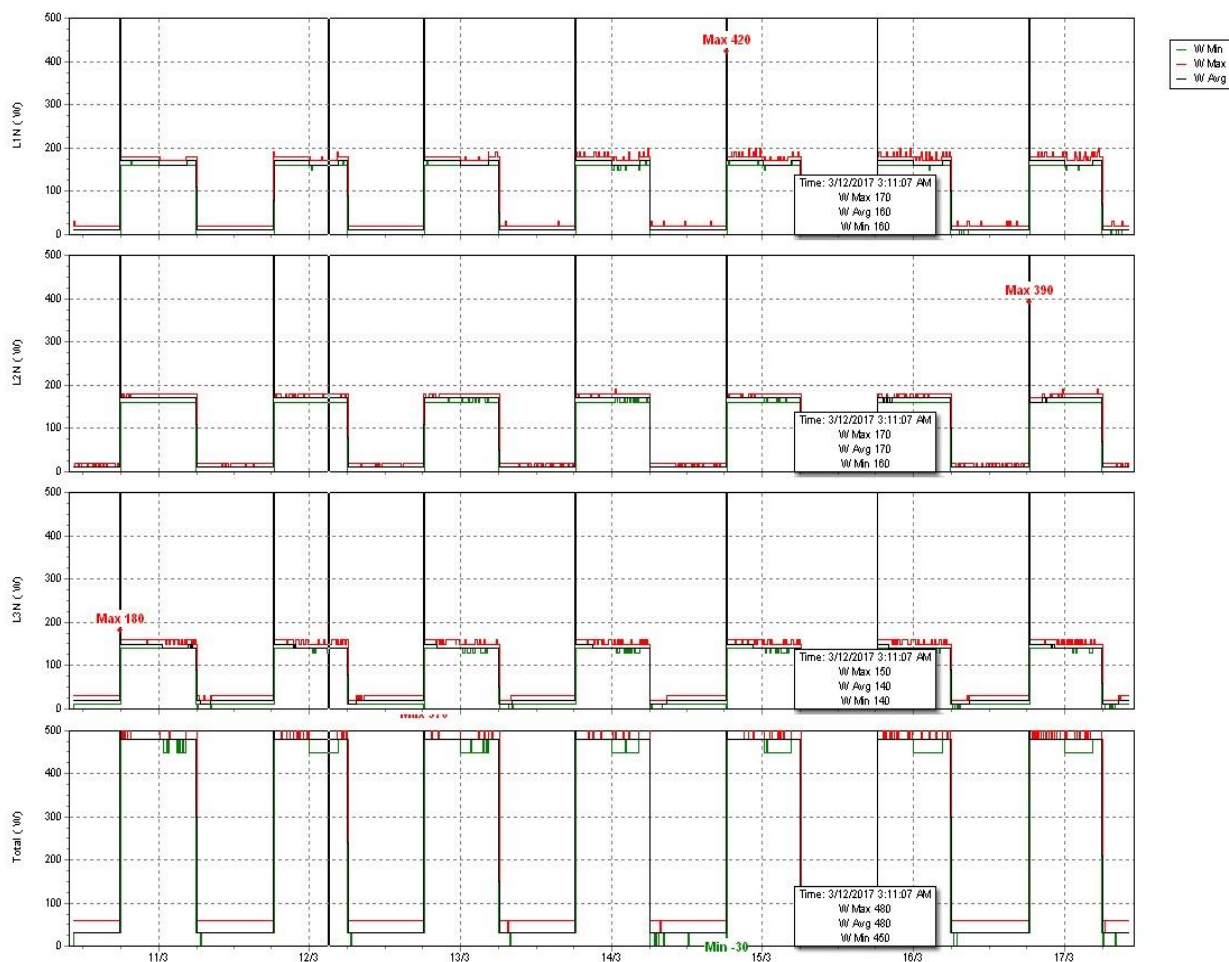
Slika 4.3 Grafovi struje kod LED rasvjete



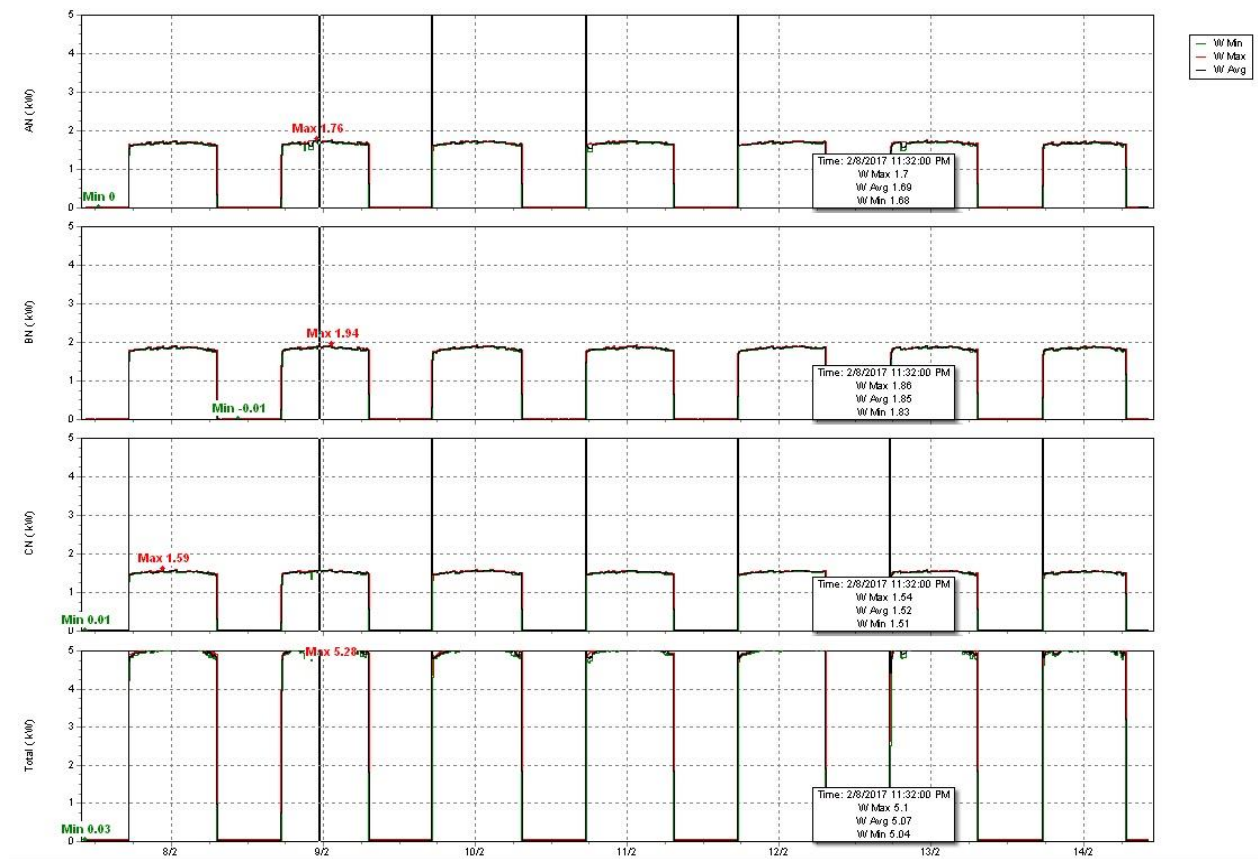
Slika 4.4 Grafovi struje visokotlačnih natrijevih žarulja

Kao što je i očekivano na slikama 4.3 i 4.4 vidi se da je razlika u strujama značajna. Kod LED rasvjete u prosjeku ona iznosi 0,8 A, dok kod viskotlačnih natrijevih žarulja ona u prosjeku iznosi 17,5 A. Na grafovima je vidljivo kako postoje strujni skokovi na prvo i trećoj fazi, ali kao što je rečeno mjerena je samo druga faza, može se utvrditi kako visokotlačne natrijeve žarulje ne uzrokuju strujne skokove.

Na slikama 4.5. i 4.6. je prikazan iznos snaga za LED rasvjetu i rasvjetu s visokotlačnim natrijevim žaruljama.



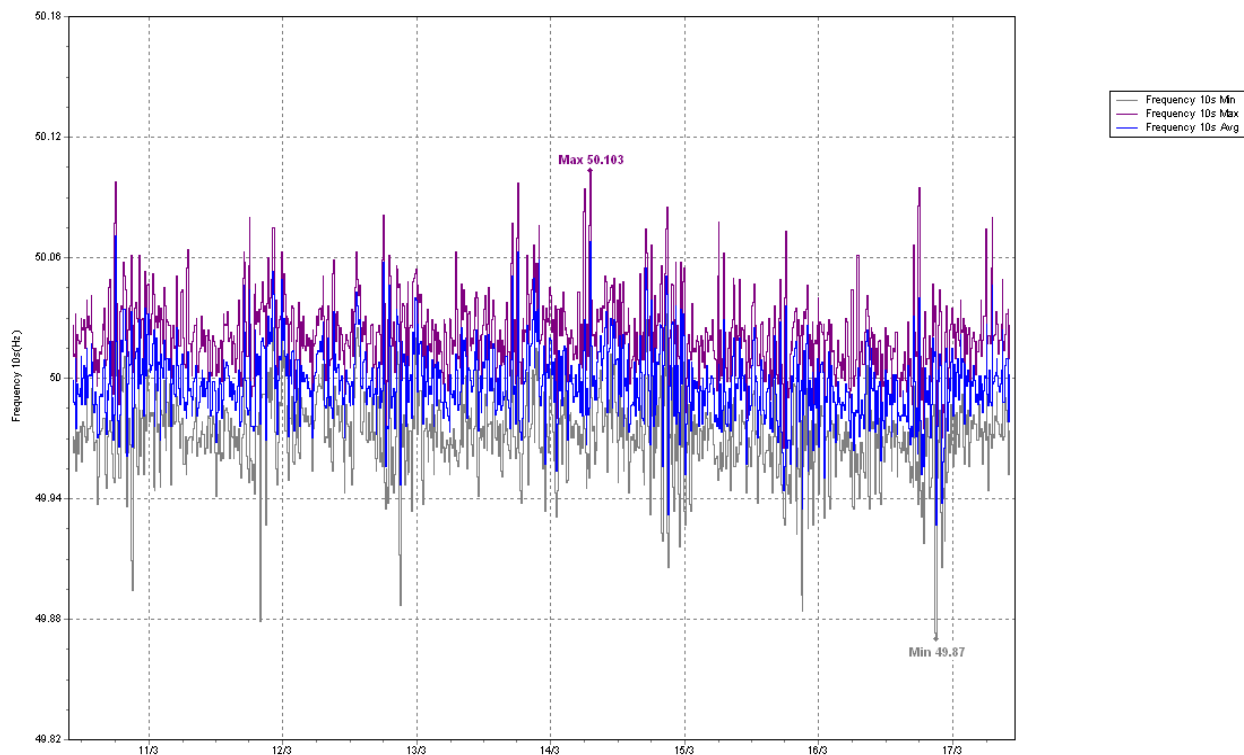
Slika 4.5 Graf snage za LED rasvjetu



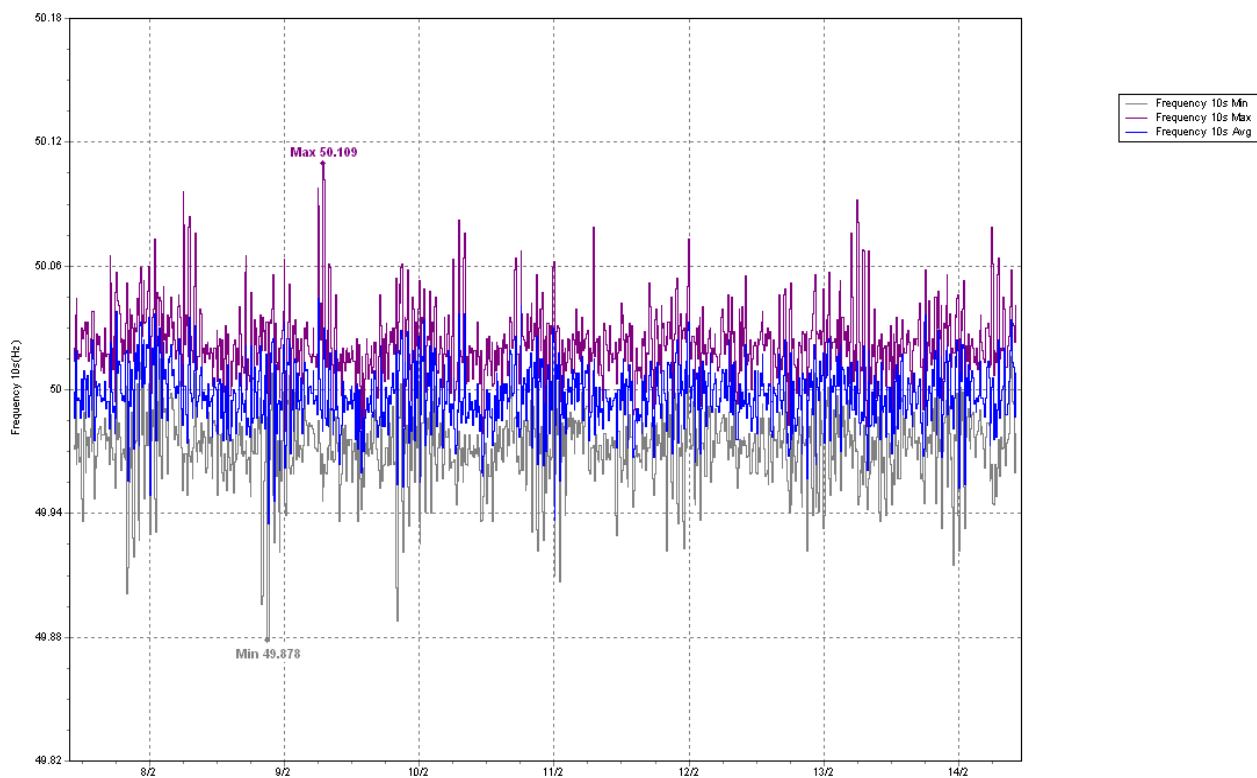
Slika 4.6 Graf snage za viskotlačnu natrijevu rasvjetu

Slike 4.5 i 4.6 nam prikazuju grafove snaga u pojedinoj fazi, a mi promatramo samo drugu fazu te vidimo da je razlika u snagama velika. Snaga LED rasvjete iznosi 170 W na drugoj fazi, dok snaga visokotlačne natrijeve rasvjete na drugoj fazi iznosi 1,85 kW. Razlog tako velike razlike je zato što LED rasvjeta ima znatno niže vrijednosti struje.

Slike 4.7. i 4.8. prikazuju vrijednost frekvencije za LED rasvjetu i rasvjetu s visokotlačnim natrijevim žaruljama.



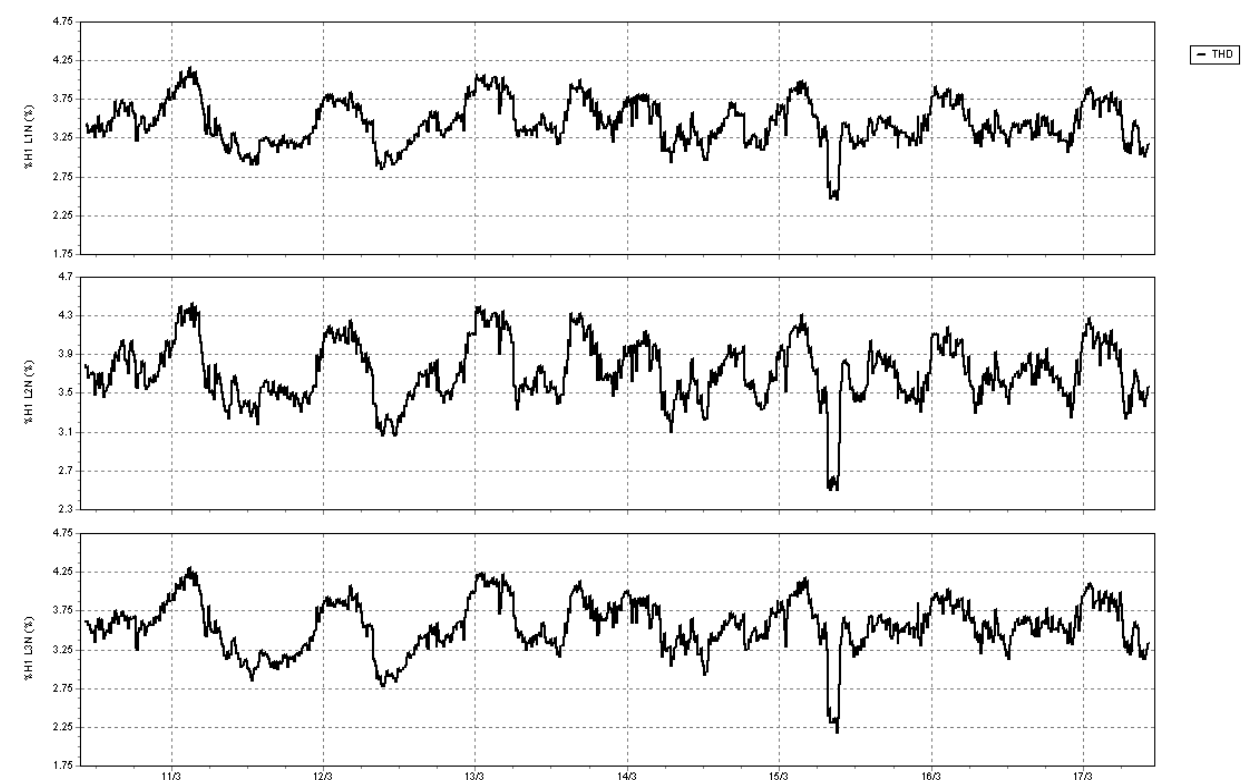
Slika 4.7 Frekvencija LED rasvjete



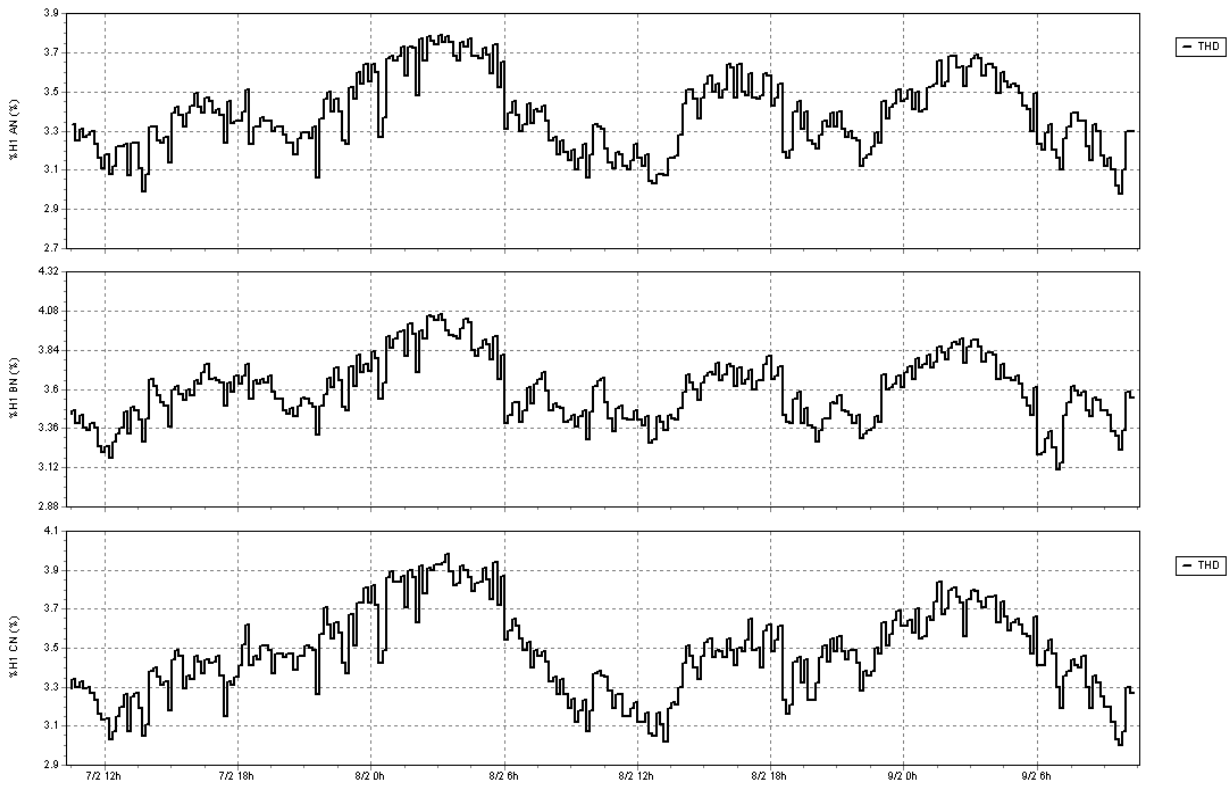
Slika 4.8 Frekvencija visokotlačne natrijeve rasvjete

Iz slika 4.7 i 4.8 prikazana je analiza frekvencije za oba tipa rasvjete, koja zadovoljava jer je u dopuštenim granicama +/- 1% granične vrijednosti tijekom 95% tjedna.

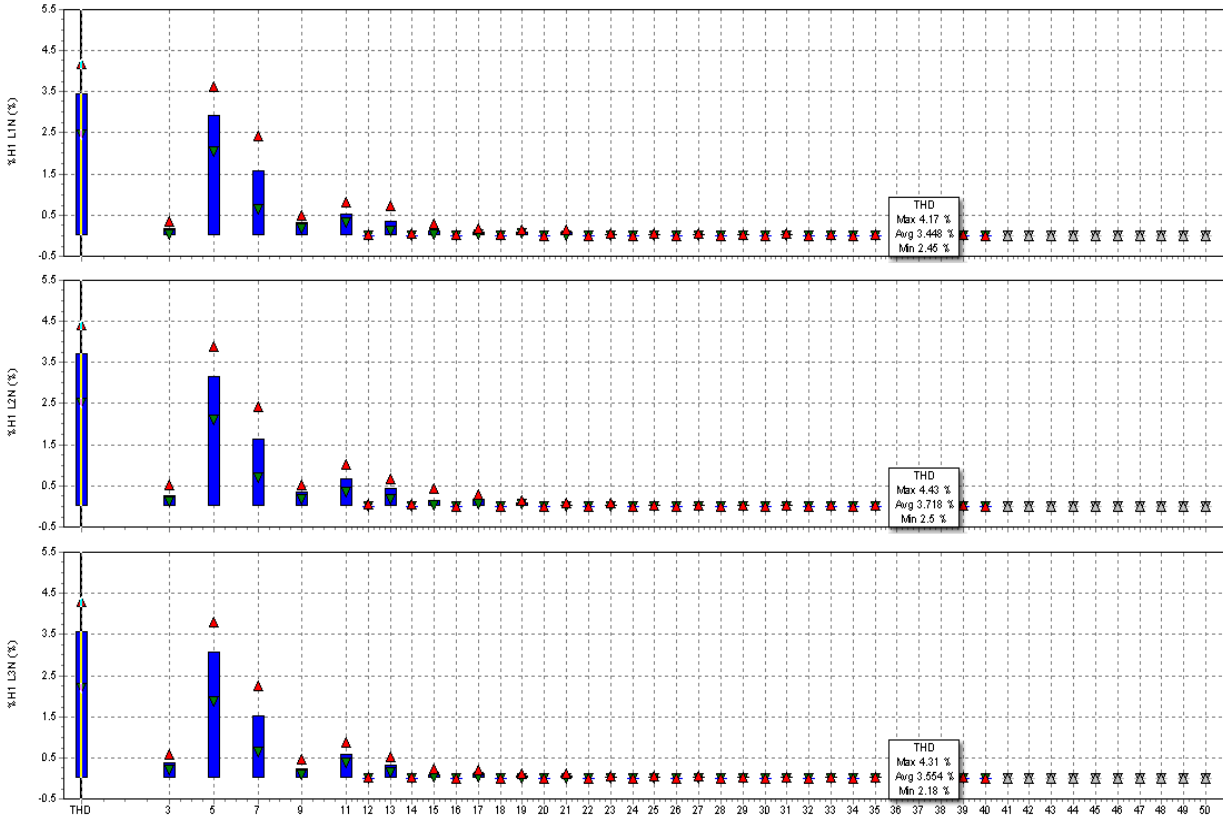
Slike 4.9. i 4.10. prikazuju iznos THD-a za vremensko razdoblje od tjedan dana, dok je na slikama 4.11. i 4.12. prikazana analiza harmonika za LED rasvjetu i rasvjetu s viskotlačnim natrijevim žaruljama.



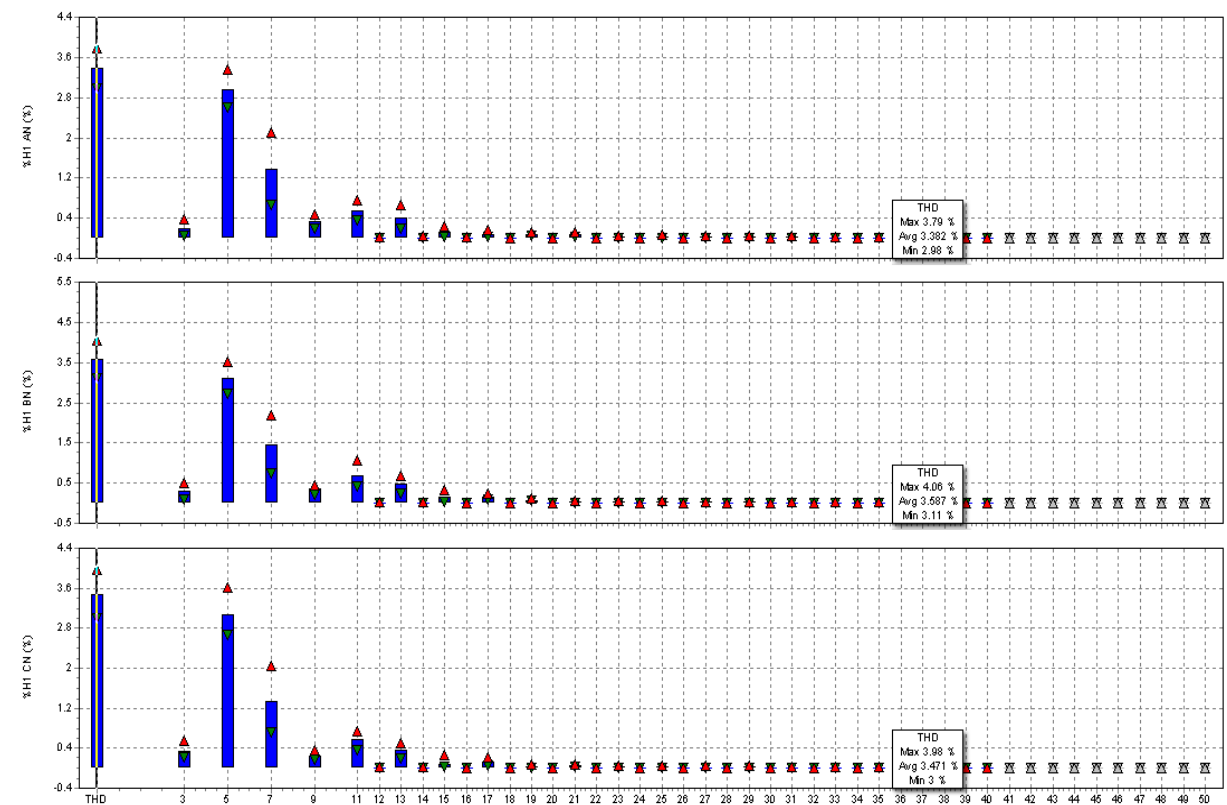
Slika 4.9 THD vrijednosti kroz tjedan dana za LED rasvjetu



Slika 4.10 THD vrijednosti kroz tjedan dana za visokotlačnu natrijevu rasvjetu



Slika 4.11 Analiza harmonika LED rasvjetu



Slika 4.12 Analiza harmonika visokotlačne natrijeve rasvjete

Slika 4.9 i 4.10 prikazuje iznos THD-a (naponski) kroz cijeli tjedan, vidljivo je iz obje slike da je vrijednost THD-a (3,72% u prosjeku za LED i 3,59% u prosjeku za visokotlačnu natrijevu rasvjetu) zadovoljavajuća jer je u dopuštenim granicama < 8% granične vrijednosti tijekom 95% tjedna. Iznos THD-a je nešto veći kod LED rasvjete, ali s obzirom da se radi o relativnom THD-u i da je snaga kod LED rasvjete manja to bi trebao biti manji utjecaj na kvalitetu električne energije. Na slikama 4.11 i 4.12 je prikazana harmonijska analiza za LED i visokotlačnu natrijevu rasvjetu, na grafovima se ističu 3., 5., 7., 9., ... harmonici koji ne prelaze vrijednosti iznad dopuštenih.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu su u teorijskom dijelu opisana energetska učinkovitost rasvjete i glavni pokazatelji kvalitete električne energije. Na kraju rada je obavljena analiza kvalitete električne energije u programu „Power Log 5.4.1“. Mjerali smo vrijednosti za LED i visokotlačnu natrijevu rasvjetu. U analizi smo prikazali usporedbu napona koja je prema očekivanjima vrlo mala, zatim su prikazani grafovi struja u kojima je razlika značajna (struja LED rasvjete ima znatno niže vrijednosti), pa je stoga i razlika u snagama velika (LED 170 W, visokotlačna natrijeva žarulja 1,85 kW). Frekvencija je za oba tipa rasvjete zadovoljavajuća, u zadnjem dijelu analize prikazani su rezultati za vrijednosti THD-a i viših harmonika, te je utvrđeno da ni jedan parametar ne prelazi maksimalnu dozvoljenu vrijednost prema normi HRN EN 50160:2012. Prema svim ovim pokazateljima može se zaključiti da LED rasvjeta zadovoljava uvjete kvalitete električne energije, te da s povećanjem energetske učinkovitosti nije narušena kvaliteta električne energije. Gledajući iz današnje perspektive dolazimo do zaključka da LED rasvjeta uspješno mijenja zastarjele sustave rasvjete.

LITERATURA

- [1] „Electrical energy efficiency:Technologies and applications“ – Andreas Sumper, Angelo Baggini
- [2] P. Caramia, G. Carpinelli and P. Verde, Power Quality Indices in Liberalized Markets, John Wiley & Sons Ltd, 2009
- [3] https://www.energyplus.hr/portfolio-dove_prelog.php (preuzeto 20.08.2019.)
- [4] https://hr.wikipedia.org/wiki/Električna_žarulja (preuzeto 20.08.2019.)
- [5] <http://e-elektro.blogspot.com/2010/11/kompaktne-fluorescentne-integrirane.html> (preuzeto 23.08.2019.)
- [6] <https://www.indiamart.com> (preuzeto 23.08.2019.)
- [7] <https://www.e-conolight.com/250-watt-hps-mogul-base-clear> (preuzeto 25.08.2019.)
- [8] <https://urenergyinc.com/indoor-outdoor-lighting/> (preuzeto 01.09.2019.)
- [9] „Power Quality“ – C.Sankaran
- [10] Z. Klaić, KvalitetaHarmonici, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek 2013, <https://loomen.carnet.hr/course/view.php?id=3665>

SAŽETAK

Zadatak rada je bio analizirati kvalitetu električne energije za LED i visokotlačnu natrijevu rasvjetu. U radu je u teorijskom dijelu obrađena energetska učinkovitost za sustave rasvjete i prikazani su glavni pokazatelji kvalitete električne energije. Mjerenje se vršilo u programskom paketu „Power Log 5.4.1“ gdje su analizirani naponi, struje, snage, frekvencije i vrijednost THD-a i harmonika za oba rasvjetna tijela.

Ključne riječi: *kvaliteta, energetska učinkovitost, snaga, struja, harmonici, THD*

SUMMARY

The task of the paper was to analyze the quality of electricity for LED and high pressure sodium lamp. The paper deals with the energy efficiency for lighting systems in the theoretical part and presents the main indicators of power quality. Measurement was done in a software „Power Log 5.4.1“ where voltage, current, power, frequency and the value of THD and harmonics were analyzed for both luminaries.

Keywords: *quality, energy efficiency, power, current, harmonics, THD*

ŽIVOTOPIS

Josip Hulak rođen je 27. Prosinca 1994. Godine u Đakovu. Osnovnu školu pohađao je u „Osnovnoj školi Josip Kozarac“ u Josipovcu Punitovačkom te je završio svih osam razreda s odličnim uspjehom. Nakon završetka osnovne škole upisuje se u 1. Gimaziju Osijek te završava sva četiri razreda s vrlo dobrim uspjehom. Po završetku srednje škole 2013. Godine upisuje preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku kojeg redovno završava. 2016. godine upisuje diplomski studij elektrotehnike, smjer elektroenergetski sustavi na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek kojeg trenutno pohađa.

Osim navedenog bavi se aktivnim igranjem nogometa, također je aktivni član Dobrovoljnog vatrogasnog društva u kojem se školovao i stekao zvanje Vatrogasni časnik. Informatički je pismen.