

# Analiza širenja treperenja napona u elektroenergetskom sustavu

---

Jurič, Jure

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:763618>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-12**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**ANALIZA ŠIRENJA TREPERENJA NAPONA U  
ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU**

Rijeka, studeni 2022.

Jure Jurič  
0069082076

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**ANALIZA ŠIRENJA TREPERENJA NAPONA U  
ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU**

Mentor: prof. dr. sc. Dubravko Franković

Komentor: prof. dr. sc. Saša Vlahinić

Rijeka, studeni 2022.

Jure Jurič

0069082076

Rijeka, 21. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Vođenje elektroenergetskog sustava**  
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Jure Jurič (0069082076)**  
Studij: **Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike**  
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **Analiza širenja treperenja napona u elektroenergetskom sustavu / Flicker propagation analysis in electric power system**

### Opis zadatka:

Definirati pojam treperenja napona (flicker) te opisati moguće izvore poremećaja te utjecaj na rad opreme i sustava. Analizirati veličine koje utječu na širenje treperenja napona u elektroenergetskom sustavu. Analizirati tri stupnja procjene utjecaja postrojenja na razine treperenja napona prema normi IEC 61000-3-7. Modelirati dio elektroenergetskog sustava te simulacijom procijeniti utjecajne faktore među čvorištima mreže.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

Prof. dr. sc. Dubravko Franković

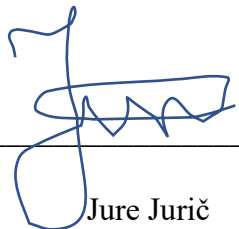
Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

Prof. dr. sc. Viktor Sučić

# IZJAVA

Sukladno članku 8. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci od 1. veljače 2020., izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad prema zadatku preuzetom dana 21. ožujka 2022.

Rijeka, 15.studeni 2022.



Jure Jurič



# SADRŽAJ

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. DEFINICIJA, IZVORI I UTJECAJ TREPERENJA NAPONA .....</b>	<b>3</b>
2.1 Definicija treperenja napona.....	3
2.2 Izvori treperenja napona .....	5
2.2.1 <i>Naponski međuharmonici.....</i>	<i>6</i>
2.2.2 <i>Distribuirani izvori električne energije.....</i>	<i>9</i>
2.2.3 <i>Električne lučne peći .....</i>	<i>15</i>
2.2.4 <i>Uređaji za zavarivanje .....</i>	<i>17</i>
2.2.5 <i>Kondenzatorske baterije.....</i>	<i>18</i>
2.2.6 <i>Asinkroni motori.....</i>	<i>19</i>
2.3 Utjecaj treperenja napona na elektroenergetski sustav .....	20
2.3.1 <i>Utjecaj treperenja napona na izvore svjetla .....</i>	<i>20</i>
2.3.2 <i>Utjecaj treperenja napona na statičke pretvarače.....</i>	<i>23</i>
2.3.3 <i>Utjecaj treperenja napona na električne strojeve.....</i>	<i>24</i>
<b>3. ŠIRENJE TREPERENJA NAPONA U MREŽI .....</b>	<b>25</b>
3.1 Širenje treperenja napona stvoreno jednim promjenjivim opterećenjem .....	26
3.2 Širenje treperenja napona stvoreno iz više izvora .....	28
3.3 Širenje treperenja napona u zamkastoj umreži .....	30
3.4 Metode za ublažavanja treperenja napona.....	31
<b>4. NORMA IEC 61000 – 3 – 7 .....</b>	<b>34</b>
4.1 Uvod u normu IEC 61000 – 3 – 7 .....	35
4.2 Osnovni principi norme .....	37
4.3 Ograničenja emisija za fluktuirajuće instalacije spojene na SN sustave .....	38
4.4 Ograničenja emisija za fluktuirajuće instalacije spojene na VN i VVN sustave.....	41
4.5 Brze promjene vrijednosti napona .....	41

<b>5. ANALIZA TREPERENJA NAPONA NA PRIMJERU ELEKTROENERGETSKE MREŽE .....</b>	<b>43</b>
5.1 O programskom paketu Powerfactory .....	43
5.2 Modeliranje mreže u PowerFactory-u .....	44
5.2.1 Parametri elemenata mreže .....	45
5.2.2 Model elektrolučne peći .....	46
5.2.3 Proračun tokova snage mreže.....	50
5.3 Proračun flickera na sabirnicama .....	51
5.3.1 Postupak izvršavanja proračuna .....	51
5.3.2 Rezultati proračuna flicker-a u mreži .....	52
5.4 Koeficijent prijenosa između sabirnica .....	55
<b>6. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>57</b>
<b>7. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLESKOM JEZIKU .....</b>	<b>58</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>59</b>



# 1. UVOD

U današnje vrijeme su postali aktualni pojmovi kvaliteta električne energije, koji predstavlja parametar električne mreže koji je od velike važnosti. Pojam kvalitete električne energije u prošlosti se najčešće zamjenjivao sa neprekinutim to jest stalnim napajanjem potrošača električnom energijom. Pojam neprekinutost napajanja je svima nama poznat, te znamo da on utječe na to kakva je kvaliteta električne energije. Ako u mreži imamo broj prekida u određenom vremenskom intervalu relativno malen, ili pak nemamo prekida, kažemo da je kvaliteta električne energije dobra, no i dalje nailazimo na promjene kvalitete električne energije. Kvaliteta električne energije, na svim naponskim razinama, strogo je definirana međunarodnim normama. Stoga je vlada RH donijela niz zakona, koji se tiču kvalitete, normi i tržišta električne energije. Razlog promjene kvalitete električne energije je velika uporaba električnih aparata s nelinearnim djelovanjem, kako u kućanstvu, tako i u industriji. Upravo zbog toga nužno je vršiti analizu kvalitete električne energije, te analizu vršimo uz pomoć dvije temeljne komponente, a to su: neprekinutost napona, i razina napona.

Razina napona odnosi se na specificirani opseg unutar kojeg moramo održavati vrijednost napona mreže u svakom trenutku, te samo analiziranje razine napona odnosi se na analiziranje frekvencije, amplitude, simetrije napona te valnog oblika napona. Uz razinu napona bitna je i neprekinutost napona koja je definirana raspoloživosti električne energije do krajnjeg korisnika tijekom vremena, za što kvalitetniju električnu energiju. Prilikom održavanja kvalitete električne energije mi se susrećemo s nizom problema kao što su: naponski propadi i prekidi, razne vrste prenapona ( tranzitni, prijelazni..), naponska nesimetrija, promjene osnovne frekvencije, prisutnost istosmjernog napona u izmjenični, te na kraju problem kojeg ćemo obraditi u ovome radu, a to je naponsko treperenje.

Kao što smo već i spomenuli u ovome radu ćemo reći nešto više o problemu naponskog treperenja, tako zvanih flickera, prije svega ćemo reći nešto o definiciji flickera, zatim ćemo se upoznati s izvorima naponskog treperenja, te s njihovim utjecajem na rad opreme i sustava. Nakon toga ćemo se osvrnuti na veličine koje utječu na širenje treperenja napona u elektroenergetskom sustavu, te reći nešto o metodama ublažavanja širenja naponskog treperenja u sustavu.

U drugom dijelu ćemo obraditi normu IEC 61000-3-7, te analizirati osnovna tri stupnja procjene utjecaja postrojenja na razine treperenja napona. Ova norma još ima naziv EMC, te nam

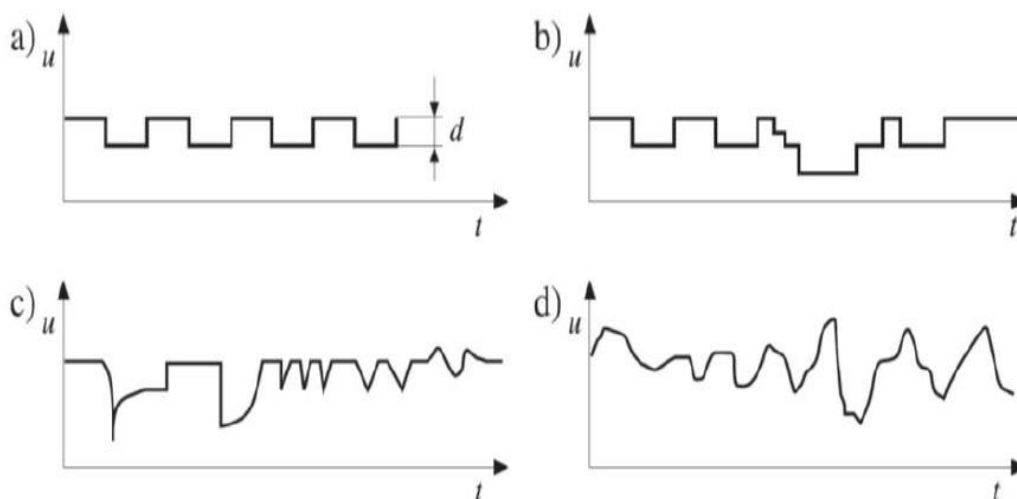
ona određuje uvjete za priključak uređaja na mrežu. Na kraju ovoga rada ćemo u programskom paketu DIgSilent Powerfactory odraditi jedan primjere simulacije na mreži. Na zadanoj mreži ćemo uz pomoć programskog paketa odrediti razine flickera u svim čvorovima u mreži, te odrediti prijenosni koeficijent između pojedinih sabirnica. Na kraju ćemo dobivene rezultate usporediti s onima koji su nam zadani u već spomenutom standardu, te na osnovu toga ćemo donijeti zaključak.

## 2. DEFINICIJA, IZVORI I UTJECAJ TREPERENJA NAPONA

U ovom poglavlju pobliže ćemo se upoznat sa nastankom te utjecajem treperenja napona (flickera) u elektroenergetskoj mreži. Započet ćemo s samom definicijom treperenja napona, zatim izvorima spomenutog treperenja, kao što su: lučne peći, uređaji za lučno zavarivanje, kondenzatorske baterije, naponski međuharmonici, vjetroelektrane, te asinkroni motori. Nakon izvora flickera, obradit ćemo utjecaj flickera na elektroenergetski sustav te njegovu opremu, kao na primjer utjecaj na: promjenu svjetlosnog toka žarulje, generiranje ne karakterističnih međuharmonika i harmonika kod statični pretvarača, te promjenu momenta i klizanja električnih strojeva i smanjenje faktora snage.

### 2.1 Definicija treperenja napona

Na samom početku definirat ćemo treperenje napona, te osnovni razlog njegovog nastanka, zatim ćemo pogledati izvore, a zatim utjecaj na mrežu, te smanjenje istog utjecaja. Glavni razlog treperenja napona pronalazimo u promjeni amplitude napona na nekom određenom vremenskom razdoblju, te to zovemo kolebanje napona. Do kolebanja napona može doći u raznim vremenskim trenucima, te trajati određeni dio vremena, te također može doći do ponavljanja promjene amplitude. Na slici ispod imamo prikazane neke vrste kolebanja napona. [1]



Slika 2.1. Vrste kolebanja napona [1]

Na slici 2.1. imamo prikazane 4 vrste kolebanja napona, te svaka vrsta ima svoje specifične karakteristike. Pod a, možemo vidjeti pravokutno kolebanje napona, dok se pod b nalazi naponsko kolebanje s konstantnim razdobljem. U dijelu slike pod c vidimo nepravilno kolebanje napona, a pak na dijelu slike pod d vidimo stohastičko, ili drugim riječima stalno kolebanje napona, kao što je i vidljivo na slici. S promjenom vrijednosti amplitude kao što smo već spomenuli možemo se susresti jednom ili više puta na nekom promatranom vremenskom intervalu. Razlog promjene amplitude su upravo spomenuti ne simetrični uređaji uz pomoću kojih ćemo i dati glavnu definiciju naponskog treperenja. Prilikom održavanja napona konstantnim, dolazi do uključivanja električnog uređaja velike snage u mrežu, što će rezultirati opadanjem vrijednosti napona. Generatori u mreži u ovom slučaju povećavaju svoj intenzitet rada, te nastoje vratiti vrijednost napona na početnu vrijednost, te u ovome trenutku može doći do rasta napona iznad željene vrijednosti. I prilikom ove regulacije i održavanja napona konstantnim dolazi do brzih promjena napona, koje nazivamo treperenje napona. Na vrstu naponskog treperenja utječe mnogo utjecaja, jedan od važnijih je frekvencija kolebanja napona. Ako do kolebanja napona dolazi na rasponu frekvencije od 0.005 Hz pa do oko 35 Hz, rezultat koji ovisi o amplitudi najčešće rezultira tako da dolazi do treperenja svijetla. Osim frekvencije pri kojoj se to događa treperenje svijetlosti, intenzitet treperenja ovisi još o razini naponskog kolebanja, te o vrsti žarulje. Intenzitet spomenutog treperenja je jako složena radnja, pa osim spomenutih fizičkih čimbenika na nju utječu mnogi drugi kao što su uvjeti okoliša gdje se odvija treperenje. Kod definicije treperenja ljudski faktor je od velike važnosti, a razlog toga je taj što ne vidi svaka osoba isto određeno treperenje napona, na to uvelike utječu psihičko i fizičko stanje osobe koja promatra naponsko treperenje. Za naponsko treperenje se kaže da ima intenzitet 1, u onome slučaju kako je 100 ljudi pod istim uvjetima izloženo naponskom treperenje, a pri tome samo 50 ljudi od 100 prisutnih uvidi treperenje. [7]

Naponsko treperenje možemo prikazati pomoću dvije veličine pomoću kojih mjerimo razinu flickera, a to su:

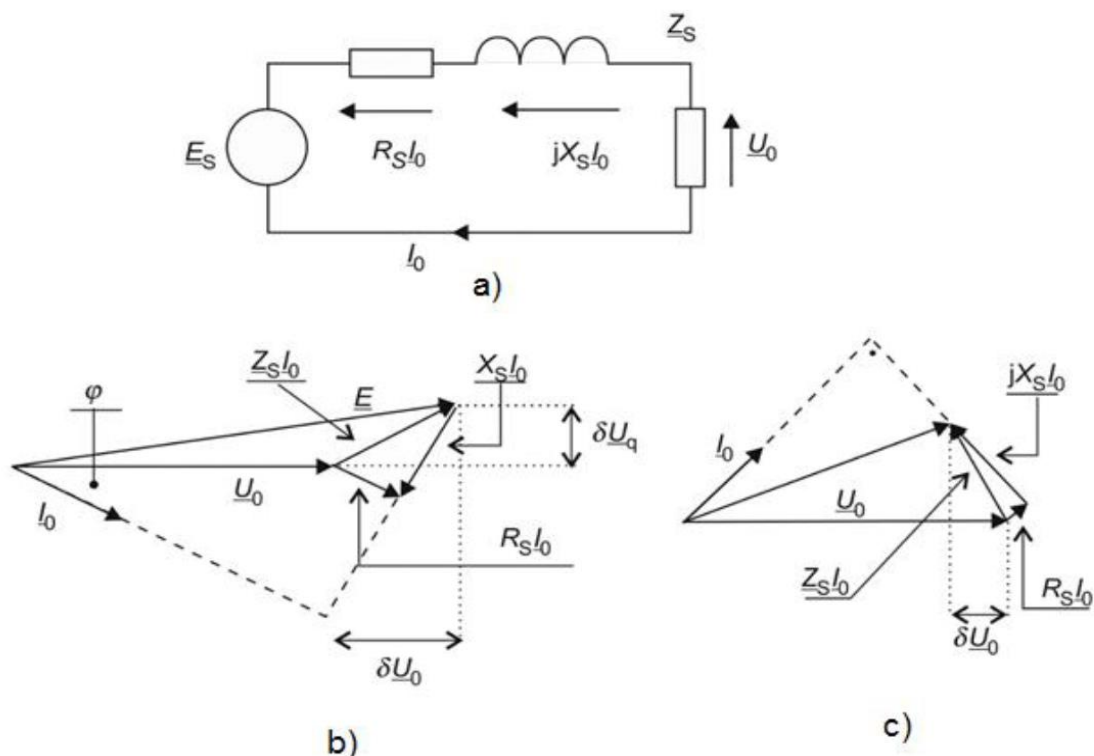
- Kratkotrajno treperenje  $P_{st}$  (Short time) – predstavlja osnovni parametar mjerenja naponskog treperenja, te se mjeri unutar intervala 10 minuta. Vrijednost kratkotrajnog treperenja predstavlja granicu, koju u slučaju da se prekorači dolazi do slabosti promatrača, te ovu veličinu još nazivamo pragom razdražljivosti.

- Dugotrajno treperenje  $P_{lt}$  (Long time) – ova veličina temelji se na dužem promatranje kratkotrajnog treperenja, točnije definirana je kao 12 uzastopnih veličina  $P_{sti}$ , te dugotrajno treperenje dobijemo po formuli:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}}{12}} \quad (2.1)$$

## 2.2 Izvori treperenja napona

U elektroenergetskoj mreži nailazimo na velik broj izvora naponskog treperenja, te svaki izvor ima svoja osnovna svojstva i uz to svaki izvor ima svoj način na koji izaziva kolebanje napona. Neke od glavnih izvora treperenja te njihov način rada ćemo obraditi u ovom dijelu rada. Iz očito primjera promjene napona na kraju dalekovoda možemo uvidjeti da je primaran uzrok naponskih promjena ovisan o promjeni snage opterećenja. Razlika napona na početku i na kraju voda možemo prikazati pomoću jednostavnog jednofaznog dijagrama koji je prikazan na slici ispod.



Slika 2.2. Jednofazna nadomjesna mreža [2]

Na slici 2.2. je prikazan simetričan trofazni sustav, te je uz pomoć njega prikazana razlika napona na početku i na kraju voda, uz to da vrijedi da  $U_0$  i  $I_0$  predstavljaju napona i struju na trošilu, dok je  $E_s$  napon izvora. Ekvivalentna impedancija označena je sa  $Z_s$  te nju čine reaktancija

$X_s$  i otpornost  $R_s$ . Uz pomoć Ohmovog zakona u shemi na dijelu slike pod a, dobijemo fazne dijagrame pod b i c, te jednadžbu:

$$\frac{E_s - U_0}{U_0} \approx \frac{\Delta U_0}{U_0} = R_s \frac{P_0}{U_0^2} + X_s \frac{Q_0}{U_0^2} \cong R_s \frac{P_0}{U_0^2} + \frac{Q_0}{S_{SC}} \quad (2.2)$$

S obzirom da se ovo odnosi na visokonaponsko napajanje sustava, te uz pretpostavku da je otpor dalekovoda zanemariti u odnosu na reaktanciju, u jednadžbi možemo zanemariti dio uz otpor  $R_s$ , te iz toga dobijemo pojednostavljenu formulu koja opisuje promjenu napona na kraju voda, ne ovisnu o otporu i radnoj snazi, nego o jalovoj snazi  $Q_0$  i snazi kratkog spoja  $S_{SC}$ .

$$\frac{\Delta U_0}{U_0} \cong \frac{Q_0}{S_{SC}} \quad (2.3)$$

Kao što smo već spomenuli primaran uzrok treperenja je promjena napona, a sada iz jednadžbe vidimo da ovisi o snazi opterećenja. Promjena opterećenja u elektroenergetskom sustavu dešavaju se ovisno o raznim uređajima, no neki od glavnih uređaja i izvora promjene opterećenja su industrijska opterećenja, kao što su: veliki industrijski motori s promjenjivim opterećenjima, lučne peći, električni čekići i tako dalje. Uz veliku snagu uređaja i postrojenja, koji izazivaju promjenu opterećenja, važnu ulogu ima odnos snage kratkog spoja na mjestu priključenja naprema snazi uređaja i postrojenja. Kada govorimo o izvorima u komercijalnim granama, susrećemo se s rendgenskim uređajima ili fotokopirnim uređajima koji imaju jako sličan utjecaj na mrežu kao i već spomenuta industrijska opterećenja. Cikličko uključivanje i isključivanje, to jest opterećenje u određenim vremenskim periodima, kao na primjer perilica rublja, hladnjaci, klima uređaji, također predstavljaju izvore naponskog treperenja od strane stambenih zgrada, no zbog malih pojedinačnih snaga najčešće su ograničeni na određen broj potrošača. Uz spomenute izvore treperenja, treba spomenuti i da određeni procesi u elektroenergetskom sustavu mogu izazvati flickere, a neki od njih su nepravilan rad preklopke prijenosnog omjera transformatora, te uz to također na naponsko treperenje utječu i distribuirani izvori energije. Distribuirani izvori su izvori električne energije koji se priključuju na distribucijski sustav, a to su uglavnom vjetroelektrane, te ćemo pogledati i njihov utjecaj na treperenje napona u elektroenergetskom sustavu. [2]

### 2.2.1 Naponski međuharmonici

Jedan od najsloženijih čimbenika koji utječu na treperenje napona su naponski harmonici. Kako bi obradili ovaj dio koji se odnosi na naponske spektralne komponente, ponajprije trebamo

prikazati napon napajanja preko određenih komponenti uz pomoć relacije gdje ćemo uz pomoć indeksa 1 označavati temeljnu komponentu s frekvencijom  $\omega$  i amplitudom  $U_m$ , sa indeksom  $h$  označavamo red harmonika, dok indeks  $I_n$  koristimo za označavanje međuharmonika.

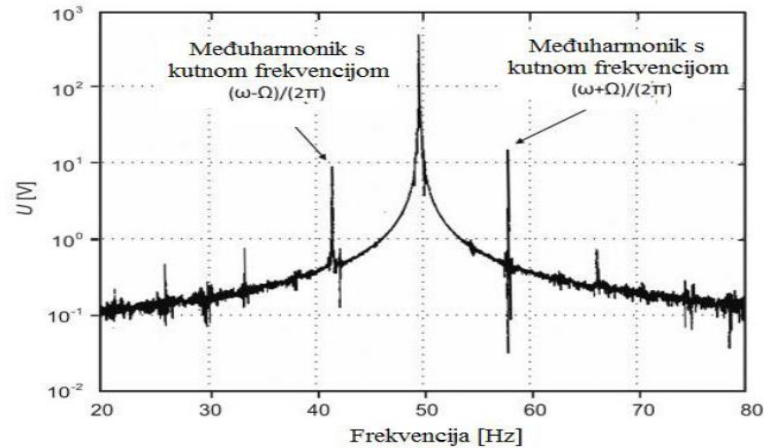
$$u(t) = u_1(t) + u_h(t) + u_{I_n}(t) \quad (2.4)$$

$$u(t) = U_m \cos \omega t + \sum_h m_h \cos(h\omega t + \varphi_h) + \sum_{I_n} m_{I_n} \cos(\omega t + \varphi_{I_n}) \quad (2.5)$$

Uz pretpostavku da je otpor žarulje konstantan, snaga žarulje sa žarnom niti je proporcionalna kvadratu napona kojeg smo prikazali iznad, te formula za snagu žarulje glasi:

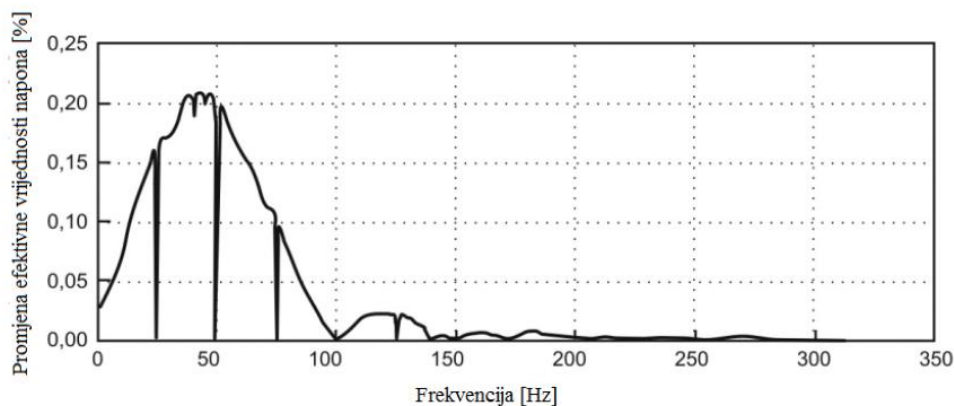
$$u^2(t) = u_1^2(t) + u_h^2(t) + u_{I_n}^2(t) + 2u_1(t)u_h(t) + 2u_1(t)u_{I_n}(t) + 2u_h(t)u_{I_n}(t) \quad (2.6)$$

U jednadžbi iznad ne doprinose svi parametri jednadžbe titranju napona, pa ćemo reći kakav utjecaj ima svaki član. Član  $u_1^2(t)$  nema doprinosa kao uzrok titranja napona, ovaj izraz daje dvostruku komponentu frekvencije, te uz to daje također istosmjernu komponentu snage. Učestalost ove komponente je izvan izvan vizualnog dometa i upravo zbog toga nije rezultat titranja. Isto to vrijedi također i za komponentu  $u_h^2(t)$ , no u slučaju kada je konstantna vrijednost harmonika napona. Čije frekvencije nisu manje od standardnih 50 Hz. Ako pak imamo slučaj da imamo promjene kod vrijednosti harmonika, dolazi do stvaranja međuharmonika, te njihova frekvencija može biti unutar raspona koje je vidljivo ljudskom oku. U praksi izrazi s indeksom  $I_n$  se zanemaruju, pa ćemo tako i u nađem slučaju zanemariti izraz  $u_{I_n}^2(t)$  koji nema utjecaj na titranje napona. Iako parametri do sada nemaju neki značajan utjecaj na titranje, rezultati množenja utječu na titranje. Pa tako izraz  $2u_1(t)u_h(t)$  je izraz s prisutnom kutnom frekvencijom  $(h \pm 1)\omega$ , gdje najniža vrijednost frekvencije koja se nalazi izvan vidljivog raspona treperenja  $\omega$ . Istu stvar susrećemo i kod preostala dva člana množenja, gdje je kod člana  $2u_1(t)u_{I_n}(t)$  kutna frekvencija  $\omega + \omega_{I_n}$  te  $\omega - \omega_{I_n}$  od kojih samo ona može biti potencijalni izvor smetnje  $\omega_{I_n} \in (15 - 85)Hz$ . Kod rezultata množenja  $2u_h(t)u_{I_n}(t)$  su također dijelovi s kutnim frekvencijama  $\omega + \omega_{I_n}$  i  $\omega - \omega_{I_n}$ , za potencijalni izvor titranja  $h\omega - \omega_{max} \leq \omega_{I_n} \leq h\omega + \omega_{max}$ , uz to da je  $\omega_{max} = 35 Hz$ . [2]



Slika 2.3 Grafički prikaz frekvencijskog spektra amplitude moduliranog napona [2]

Na slici 2.3 imamo prikazana dva međuharmonika s dvije različite kutne frekvencije, jedan s kutnom frekvencijom  $(\omega - \Omega)$  te  $(\omega + \Omega)$  koje su simetrične. Ukoliko izvršimo superpoziciju dviju komponenta napona dobijemo valni oblik čija frekvencija iznosi  $f = |f_{inh} - f_0|$ , gdje nam  $f_0$  predstavlja najbližu komponentu frekvencije cjelobrojnog umnošku temeljne početne frekvencije, dok nam  $f_{inh}$  predstavlja međuharmoničku komponentu frekvencije. Međuharmonici koji imaju frekvenciju veću od 100 Hz utječu uvelike na modulacijske vršne vrijednosti, dok oni međuharmonici koji imaju frekvencije manje od 100 Hz najčešće utječu na efektivnu vrijednost napona. Primjer, za međuharmonik reda  $n = 3.1$ , modulacijska frekvencija iznosi  $(3.1 - 3) = 0.1$ , ili na primjer  $155 - 150 = 5$  Hz. Slika 2.4 prikazuje promjenu efektivne vrijednosti napona koja je uzrokovana međuharmonikom uz frekvenciju koja je promjenjiva, a pri tome je amplituda konstantna. ( $m = 0.2\%$ )



Slika 2.4 Promjena vrijednosti napona uzrovanu međuharmonikom [2]

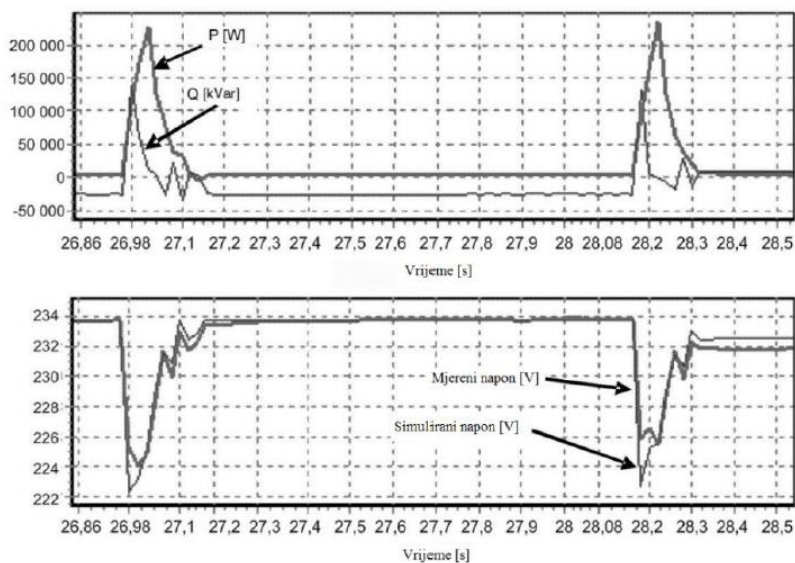
Specifične izvore naponskog treperenja možemo susresti također kod upravljačkih daljinskih signala za sklopke, zaštitu, prienos podataka i slično, iako kod ovakvih uređaja se susrećemo s



malim veličinama signali mogu izazvati flickere, koji će remetiti izvor svjetlosti. Kao što smo na početku spomenuli opis treperenja napona preko frekvencijske domene je jako složen. Kroz aj dio rada smo uvidjeli da je treperenje napona usko povezano za naponske međuharmonike, te da metode koje se temelje samo na Fourierovoj analizi neće biti sasvim jasni prilikom opisivanja ne stacionarnih signala, gdje vrijeme i frekvencija imaju bitnu ulogu. Upravo zbog toga za opisivanje naponskih međuharmonika, i rješenje problema treba tražiti druge metode, koje se baziraju na obradi signala a uz to su povezani sa analizom spektralne gustoće i linearne transformacije. [2]

### 2.2.2 Distribuirani izvori električne energije

Kako bi se upoznali s načinom utjecaja distribuiranih utjecaja na mrežu, prvo ćemo definirati o kakvim je izvorima riječ. Distribuirani izvori su izvori električne energije koji su spojeni na distribucijsku mrežu, te se najčešće radi o izvorima ne tako velikih snaga, te se spajaju na napone distribucijske mreže, a to su srednji naponi od 35 kV, 20(10) kV, te niski napon od 0.4 kV. Izvori koji se spajaju na distribucijsku mrežu su uglavnom, a pogotovo u zadnje vrijeme izvori električne energije iz obnovljivih izvora, razlog toga je smanjenje CO<sub>2</sub>, koji je rezultat stvaranja efekta staklenika, a naposljetku i globalnog zagrijavanja. Spomenuti izvori koji imaju veliku snagu kratkog spona mjestu gdje su spojeni na mrežu mogu biti jedan od uzroka treperenja napona ili pojave flickera. Uzroci pojave naponskog treperenja s ove strane su rezultat uključivanja i isključivanja izvora, ili nagle promjene njihove izlazne snage, no ako su promjene izlazne snage spore, kao što susrećemo kod fotonaponskih izvora električne energije najčešće nisu uzrok treperenja napona. [2]



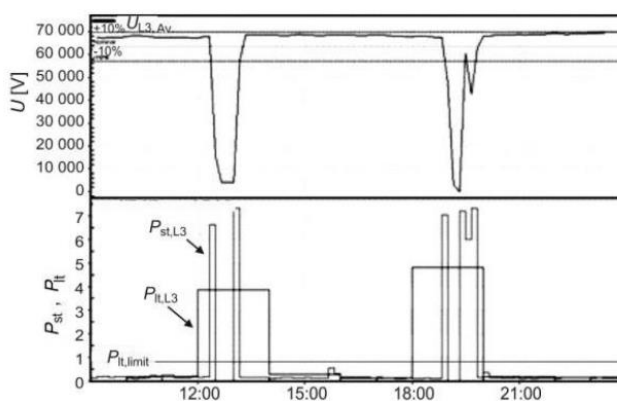
Slika 2.5 Primjer nagle promjene snage i napona [2]

Na slici 2.5 imamo prikazan slučaj u kojem dolazi do nagle promjene u snazi izvora u mreži, te imamo također graf, koji nam prikazuje utjecaj promjene snage na napon, točnije prikaz primjera flickera. U vremenu 27 sekunde, dolazi do naglog porasta kako radne, tako i jalove snage u mreži, što vidimo na gornjem grafu. Kao rezultat te promjene snage na grafu ispod možemo vidjeti da dolazi do oscilacija u vrijednosti napona, te dolazi do naglog pada napona, koji se s vremenom uz pomoć regulatora i drugih uređaja vraća na konstantu vrijednost. Napon se održava konstantnim sve do 28 sekunde na grafu kada dolazi do iste situacije, odnosno ponovni oscilacija kako u energiji tako i kod napona. Osim promjena snage, u distribucijskoj mreži nailazimo na mnogo faktora koji mogu biti razlog nastanka treperenja napona. Pa tako kod simetričnog generatora s konstantnim opterećenje, brzinom vrtnje, te ne promjenjivom strujom uzbude na izlazu daje konstantan ne promjenjiv napon, bez kolebanja. Uslijed promjene bilo kojeg od spomenutih konstantnih parametara može doći do promjena u naponu, gdje nam je dominantna veličina brzina vrtnje, zbog toga jer generatorski tok smanjuje uglavnom vremenska konstanta uzbude. Također uslijed pojave nejednakosti kod zračnog rasporeda između statora i rotora dolazi do pojave kolebanja u izlaznim vrijednostima napona, no u današnje vrijeme ovakvi slučajevi su sve manji, te ih rijetko susrećemo. Gorivo pomoću kojeg se pokreće motor također može biti rezultat naponskih promjena, ukoliko dođe do pojave loše kvalitetnog goriva, ili problema prilikom održavanja, koje rezultira promjenom izlazne snage. [2]

Osim u spomenutim slučajevima kada dolazi do nastanka naponskog treperenja, do treperenja napona može doći također u slučaju kod normalnog rada motora, i to susrećemo najčešće kod vrlo velikih nisko brzinskih motora. U tome slučaju frekvenciju izlazne snage računamo uz pomoć formule:  $f_F = \frac{N \cdot n}{25 \cdot k}$  (Hz), gdje nam  $N$  predstavlja broj cilindara motora,  $n$  broj okretaja generatora u minuti, te uz to imamo koeficijent  $k$ , koji se množi s 25, a ima vrijednost 2 za dvotaktne ili 4 za četverotaktne motore. Recimo, u slučaju da dođe do zatajenja prilikom izgaranja goriva u cilindru, dolazi do promjene napona, i to po frekvenciji koju računamo formulom:  $f_F = \frac{n}{25 \cdot k}$ , gdje dolazi do pojave učestalosti promjena u vrijednosti napona. Na primjeru, 900 okretaja u motoru proizvodi treperenje frekvencije 7,5 Hz, no ako se radi o 1800 okretaja tada se stanje poboljšava i imamo frekvenciju od 15 Hz, te je u tome području znatno manje osjetljivo ljudsko oko na treperenje. Ovaj način stvaranje treperenja može se spriječiti samo uz kontrolu kvalitete goriva, te uz konstantno i pravilno održavanje motora. [2]

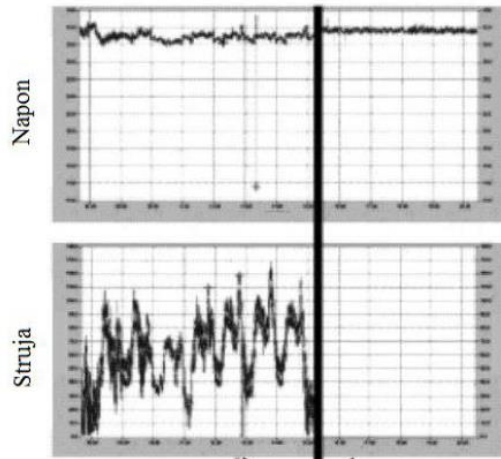
Kao što smo već spomenuli, uglavnom su distribucijski izvori bazirani u zadnje vrijeme na obnovljive izvore električne energije. Najveći utjecaj na titranje napona od obnovljivih izvora energije imaju vjetroelektrane, pa njihov rad i utjecaj na mrežu pogledati malo detaljnije. Utjecaj

vjetroelektrana na elektroenergetsku mrežu ima velik broj utjecaja, to jest ovise o načinu konstruiranja vjetroelektrana, zatim o njihovom načinu spajanje na mrežu i tako dalje. Vjetroturbine su postavljene na postolju vjetroelektrane, na mjestima na kojem imamo veliku raspoloživost vjetra. Vjetar pokreće turbine te se uz pomoć toga stvara električna energija, s obzirom da prilikom naleta vjetra imamo razne jačine vjetra, te oscilacije u snazi, upravo zbog toga nam se javljaju i oscilacije u naponu koji je rezultat toga vjetra. Vjetroelektrane se najčešće postavljaju u mjestima gdje su slabe mreže, te upravo zbog toga treba dobro sagledati mrežne parametre i strukturu koji mogu utjecati na rad vjetroelektrane, te sami opseg njegovog štetnog utjecaja na mrežu.



Slika 2.6 Utjecaj uključivanja vjetroelektrane na napon u mreži [2]

Na slici 2.6 imam prikazane grafove ponašanja napona i snage prilikom uključivanja vjetroelektrane. U trenutku kada dođe do uključivanja vjetroelektrane, dolazi do porasta snage u mreži, no upravo zbog toga dolazi do opadanja napona u tome trenutku što rezultira nastankom titranja napona. Naponsko treperenje kod vjetroelektrana može se javiti i u slučaju ekstremni uvjeta, kada imamo velike količine vjetra, i to na način da je na jednom dijelu rotora turbine vjetar jači nego na drugom dijelu. Osim ovog slučaja svake oscilacije i vibracije na kulu vjetroelektrane mogu utjecati na rad turbine, što će rezultirati nastankom naponskog treperenja. Uz sve to spomenuto, također treba spomenuti da je potrebno prije priključivanja vjetroelektrane na mrežu sagledati sve tehničke uvjete, te analizirati njihov utjecaj sa strane treperenja na mjestu priključka.



Slika 2.7 Napon i struja u slučaju uključenja i isključenja vjetroelektrane [2]

Na slici 2.7 možemo pogledati ponašanje napona i struje uslijed slučaja uključene i isključene vjetroelektrane. U periodu kada je vjetroelektrana uključena (lijeva strana grafa), vidimo da imamo prisutnu vrijednost struje, te velik broj oscilacija, to jest flicker kod napona. U drugom slučaju kada imamo isključenu vjetroelektranu, vidimo da nemamo prisutnu vrijednost struje, no uz to imamo konstantnu vrijednost napona bez oscilacija. Kada govorimo o količini oscilacija koje se javljaju kod slučaja vjetroelektrana, emisiju treperenja treba održavati u određenom rasponu. Taj raspon treba ograničiti promjenu napona, te to postizemo uz pomoć formule koja definira to da najveća dopuštena promjena napona ( $\Delta U_{dyn}/U_N$ ), treba biti manja od relativne promjene napona zbog uključivanja vjetroturbine ( $d$ ), to jest:  $d \leq (\Delta U_{dyn}/U_N)$ . [2]

Kako bi izbjegli prevelik utjecaj vjetroelektrane na titranje napona, postoji normalno stanje rada vjetroelektrane, a to je njezin kontinuiran rad, koji nema isključivanje i uključivanje, pa time ne dolazi do pada i porasta napona. Naponsko treperenje određeno je uz pomoć koeficijenta  $c$ , koji ovisi o snazi mreže nadomjesne impedancije faznog kuta  $\Psi_k$ , te o prosječnoj godišnjoj brzini vjetra  $v_a$ , te ga računamo po formuli:

$$c(\Psi_k) = P_{st,pc} \cdot \frac{S_{SC}}{S_N} \quad (2.7)$$

$$\Psi_k = \tan^{-1} \left( \frac{X}{R} \right) \quad (2.8)$$

Gdje nam  $P_{st,pc}$  predstavlja emisiju treperenja iz vjetroelektrane tijekom kontinuiranog rada, a  $S_N$  nam predstavlja procijenjenu prividnu snagu vjetroelektrane, dok  $S_{SC}$  označava snagu kratkog spoja. Fazni kut mreže ovisi o otporu i reaktanciji mreže, te je približno vezan za vrijednost snage mreže koju imamo u izrazu za koeficijent  $c$ , a fazni kut računamo izrazom (2.8). S obzirom da imamo kratak i dug vremenski period, to je 10 minuta i 120 minuta, koeficijent treperenja je

identičan. Svaka vjetroturbina ima svoj karakterističan koeficijent naponskog treperenja, pa tako kod vjetroelektrana s fiksnom brzinom varira od srednje do visoke propisane vrijednosti, dok je kod vjetroturbina s promjenjivom brzinom vrijednosti treperenja uglavnom male. Procjenu globalne emisije iz  $N$  vjetroturbina koje se nalaze u istom vjetroparku računamo uz pomoć izraza:

$$P_{st} = P_{lt} = \frac{1}{S_{SC}} \sqrt{\sum_{i=1}^N (c(\Psi_k, v_a) \cdot S_{n,i})^2} \quad (2.9)$$

S obzirom na to da se naponsko treperenje dešava u vrijeme uključivanja vjetroelektrane, malo ćemo se pobliže upoznati s tim. Tijekom uključivanja vjetroelektrane nailazimo na određene analizirane karakteristike, a to su: vjetroelektrana se uključuje na promjenjivoj brzini vjetra, te na nazivnoj brzini vjetra, i tu nailazimo također na prebacivanje generatora, koje susrećemo kod vjetroelektrana koje imaju generator s više namota, ili imaju više generatora. Tijekom uključivanja vjetroelektrane koje spada u sklopne operacije, trebaju biti poznati određeni parametri a to su: maksimalan broj sklopnih operacija u dva roka, to jest kraćem od 10 minuta ( $N_{10}$ ), i dužem roku od 120 minuta ( $N_{120}$ ). Uz to također treba poznavati vrijednosti faktora koraka treperenja  $k_f(\Psi_k)$ , za određene fazne kutove impedancije mreže, a to su:  $\Psi_k = 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$  i  $85^\circ$ , i vrijednosti faktora promjene napona  $k_U(\Psi_k)$ , za iste kutove kao i kod faktora koraka treperenja. Normirani faktor koraka treperenja računamo uz pomoć formule:

$$k_f(\Psi_k) = \frac{1}{130} \cdot \frac{S_{SC}}{S_N} \cdot P_{stpc} \cdot T_p^{0,31} \quad (2.10)$$

U formuli nalazimo na sve spomenute i poznate oznake, osim oznake  $T_p$  koje predstavlja razdoblje mjerenja, koje mora biti dovoljno dugo toliko da bi se osigurala prolazak vremena uključivanja vjetroelektrane, nakon čega su moguće promjene ograničene na jako male vrijednosti te uz to oznaka  $P_{stpc}$  koja nam predstavlja emisiju treperenja vjetroelektrane tijekom kontinuiranog rada. Svaki vjetroagregat izaziva emisiju treperenja napona, a ta emisija se također može izračunat za svaki agregat posebno, i to za dugi i kratki rok, gdje za kratki od 10 minuta odgovara formula:

$$P_{st} = 18 \cdot N_{10}^{0,31} \cdot k_f(\Psi_k) \cdot \frac{S_N}{S_{SC}} \quad (2.11)$$

,a pak za duži period od 120 minuta vrijedi relacija:

$$P_{st} = 8 \cdot N_{120}^{0,31} \cdot k_f(\Psi_k) \cdot \frac{S_N}{S_{SC}} \quad (2.12)$$

Globalne emisije naponskog titranja na mjestima gdje je povezano više vjetroturbina, također možemo izračunati za kraći i duži rok i to uz pomoć relacija ispod:

$$P_{st} = \frac{18}{S_{SC}} \left( \sum_{i=1}^N N_{10,i} (k_{f,i}(\Psi_k) S_{N,i})^{3,2} \right)^{\frac{1}{3,2}} \quad \text{kratki rok} \quad (2.13)$$

$$P_{st} = \frac{8}{S_{SC}} \left( \sum_{i=1}^N N_{120,i} (k_{f,i}(\Psi_k) S_{N,i})^{3,2} \right)^{\frac{1}{3,2}} \quad \text{duži rok} \quad (2.14)$$

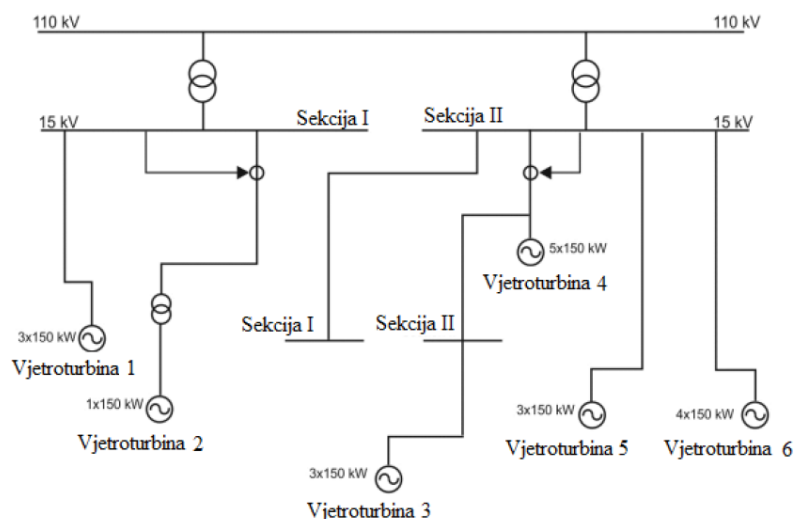
U formuli iznad  $N$  nam označava broj generatora koji su spojeni paralelno, zatim  $k_{f,i}(\Psi_k)$  označava faktor treperenja za  $i$  – ti uređaj,  $N_{10,i}$  i  $N_{120,i}$  označavaju maksimalni broj sklopnih operacija koje se pojavljuju u 10 i 120 minuta, te simbol  $S_N$  koji označava nazivnu snagu. Spomenuti parametri trebaju biti osigurani od strane proizvođača turbine, a vrijednost za parametre  $k_f(\Psi_k)$  i  $k_U(\Psi_k)$  mogu se izračunati i izmjeriti. Nakon što smo pobliže definirali  $k_f(\Psi_k)$ , to jest faktor koraka treperenja, definirat ćemo i faktor promjene napona  $k_U(\Psi_k)$ . Također ćemo i vrijednost ovog faktora definirati preko formule u normaliziranim mjerenjem zbog sklopnih procesa jedne vjetroelektrane. Faktor promjene napona je definiran kao omjer maksimalne uklopive vrijednosti struje i vrijednosti nazivne struje, te uz to i funkcijom kuta mrežne impedancije. Oprema uvelike ima utjecaj na vrijednost faktora promjene napona. Faktor računamo uz pomoć formule ispod, gdje nam  $U_{min}$  i  $U_{max}$  označavaju minimalnu i maksimalnu efektivnu vrijednost napona, a  $U_N$  označava nazivnu vrijednost napona. Formula glasi:

$$k_U(\Psi_k) = \sqrt{3} \cdot \frac{U_{max} - U_{min}}{U_N} \cdot \frac{S_{SC}}{S_N} \quad (2.15)$$

S obzirom da je vrlo mala vjerojatnost da će se u isto vrijeme uključiti velik broj turbina, izraz ispod pomoću kojeg računamo očekivanu promjenu napona nije funkcija broja turbina, a zbog sklopnih procesa jedne vjetroelektrane, očekivanu promjenu napona računamo formulom:

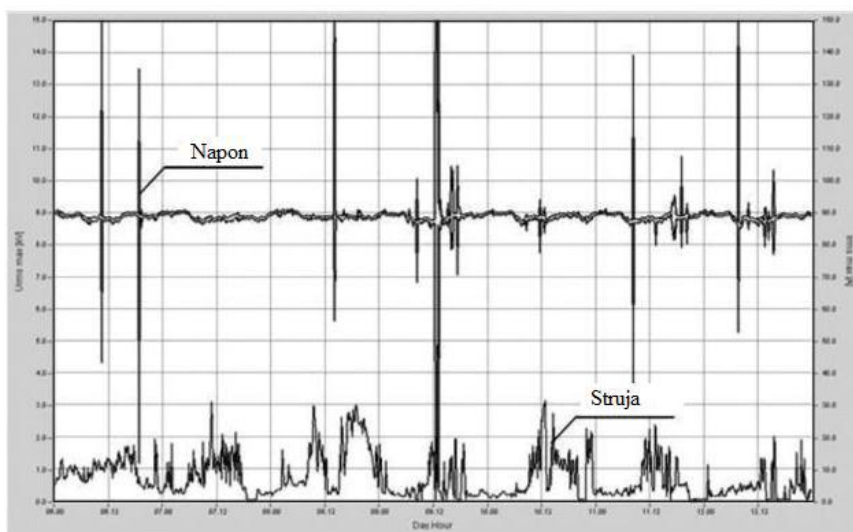
$$d = 100 \cdot k_U(\Psi_k) \frac{S_N}{S_{SC}} \quad (2.16)$$

Nakon što smo se pobliže upoznali s tim kako vjetroelektrane kao distributivni izvori utječu na treperenje napona, pogledat ćemo jedan primjer vjetroparka, te ćemo na mjestima priključka u mrežu promatrat napon i uvidjeti ponašanje napona i struje u raznim uvjetima. [2]



Slika 2.8 Primjer vjetroparka za analizu treperenja [2]

Na slici nam je prikazan spoj vjetroparka, koji se sastoji od dvije sekcije, te 6 vjetroturbina, koje su preko transformatora spojene prvo na 15 kV, a zatim s 15kV dignute na napon prijenosa od 110 kV. Mjerit ćemo napon i struju na mjestu gdje dolazi do povezivanja na sabirnicama 15 i 110 kV, te su uzastopna mjerenja pokazala da dolazi do naponskog treperenja, što možemo vidjeti na slici 2.9.



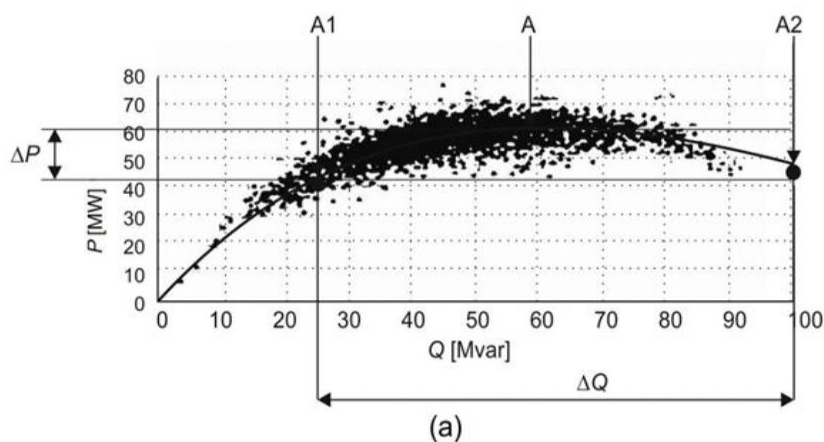
Slika 2.9 Vrijednosti napona i struje snimljene u vjetroelektrani 4. [2]

Na slici vidimo da dolazi do velikih promjena u vrijednostima maksimalne i minimalne struje, no ipak je prosječna vrijednost ne prelazi razinu od  $\pm 10\%$  . [2]

### 2.2.3 Električne lučne peći

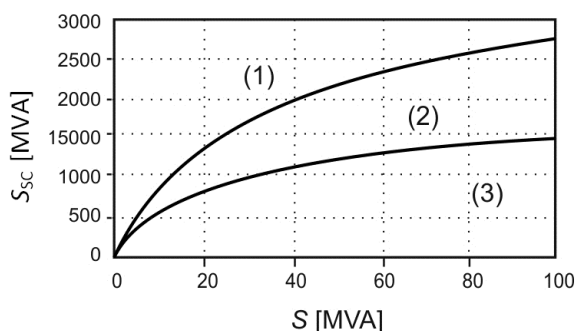
Lučne peći su uređaji uz pomoću kojih se zagrijava materijal uz pomoću električnog luka, danas imamo mnogo vrsta lučnih peći u industriji od onih malih do jedne tone, pa sve do onih od

oko 400 tona koje se koriste za proizvodnju čelika. Upravo zbog toga to su industrijski uređaji velikih snaga te vuku velike količine električne energije te su jedan od uzroka naponskog treperenja.



Slika 2.10 Kružni dijagram lučne peći [2]

Na slici 2.10 imamo prikazan kružni dijagram lučne peći, te ćemo ga proučiti kroz ovaj odlomak. Kada faktor snage poprimi vrijednost 0.7 tada se raspoložive maksimalne vrijednosti peći, što je na slici prikazano točkom  $A$ , i u toj točki dolazi do maksimalne učinkovitosti metalurškog procesa, to jest vrijednosti radne i jalove snage su jednake. Ukoliko dođe do promjene otpora u radu lučne peći, dolazi do promjene mjesta radne točke te se ona više ne nalazi u točki  $A$ , nego je radna točka na rasponu između  $A1$  i  $A2$ . U slučaju kada je radna točka na tom rasponu dolazi do nekoliko puta veće promjene kod jalove snage nego kod djelatne snage, i upravo te reaktivne promjene snage će rezultirati glavnim uzrocima naponskih prilika na samim sabirnicama električnih željezara sa lučnim pećima. S obzirom na to da su ove peći velikih snaga one se spajaju na visokonaponske napone, a taj dio mreže ima gotovo induktivan karakter. S obzirom na to zaključujemo da je promjena razine napona proporcionalno jednaka promjeni jalove snage, te obrnuto proporcionalna mjestu gdje dolazi do kratkog spoja između mreže i peći. [2]



Slika 2.11 Područja rada s obzirom na emisiju naponskog treperenja [2]

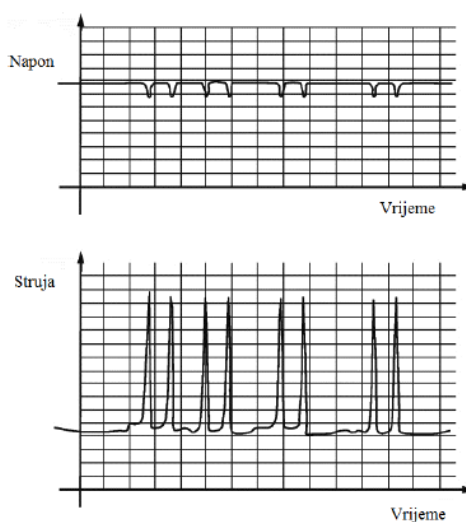


Kod lučnih peći također se susrećemo s tri područja rada, s obzirom na intenzitet naponskog treperenja uzrokovanog lučnom peći. To prikazujemo u koordinatnom sustavu gdje imamo sa os ordinatu snagu kratkog sja na mjestu priključka, a na os apscise imamo snagu transformatora peći, te to vidimo na slici 2.11, a osnovna tri područja rada su:

- Područje rada 1 – je područje u kojem lučna peć ne izaziva značajnije promjene
- Područje rada 2 – je područje u kojem lučna peć stvara minimalne promjene, koja izaziva potrebu za uporabom stabilizatora, ili kondenzatora
- Područje rada 3 – je područje rada u kojem lučna peć izaziva veliku promjenu napona, i rezultira potrebom za korištenje kompenzatora ili pak drugih uređaja za ublažavanje kolebanja napona koje ćemo spomenuti kasnije. [2]

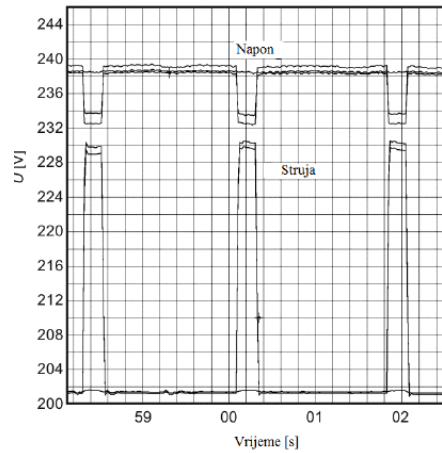
#### 2.2.4 Uređaji za zavarivanje

Kada govorimo o uređajima za zavarivanje koji utječu na stvaranje flickera, tada govorimo o lučnom i točkastom zavarivanju. S obzirom na to da zavarivanje nije konstanta radnja tako ni opterećenje koje stvaraju aparati za zavarivanje nije konstantno. Upravo zbog toga tijekom lučnog zavarivanja uslijed rada dolazi do naglog porasta struje, što će rezultirati padom napona i naposljetku kolebanjem. Primjer odziva prilikom lučnog zavarivanja vidimo na slici 2.12.



*Slika 2.12 Napon i struja kod lučnog zavarivanja [2]*

Kod točkastog zavarivanja imamo sličnu situaciju, jer prilikom pauza između zavara imamo konstantan napon, uslijed varenja napona pada, to isto vidimo na slici ispod (Slika 2.13) [2]



*Slika 2.13 Napon i struja kod točkastog zavarivanja [2]*

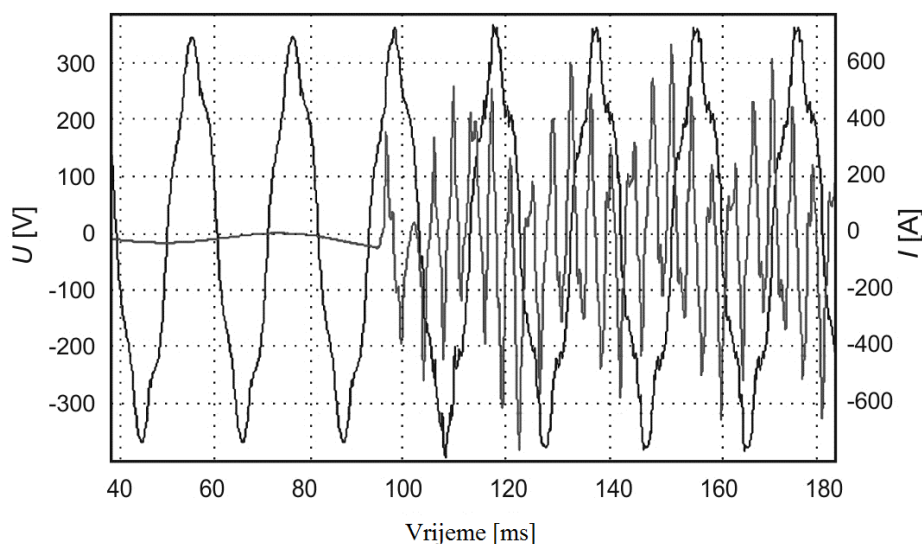
### 2.2.5 Kondenzatorske baterije

Kondenzatorske baterije služe za kompenzaciju jalove snage na način da na mjestu priključenja generiraju jalovu snagu i time doprinose povišenju iznosa napona na mjestu priključenja. Snage visokonaponskih kondenzatorskih baterija kreću se od nekoliko desetaka Var-a do nekoliko stotina MVar-a. Koriste se u mrežama niskog, srednjeg i visokog napona. Na slici 2.14 prikazane su kondenzatorske baterije. [2]



*Slika 2.14 Kondenzatorske baterije*

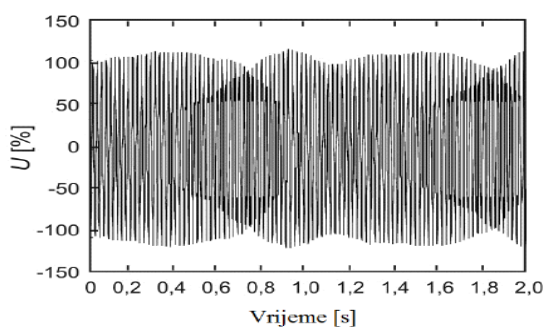
Uslijed uključivanja kondenzatorskih baterija radi kompenzacije jalove snage, javlja se slučaj kao i kod uključivanja i isključivanja vjetroelektrana, te kao rezultat uključivanja na svim naponskim razinama dolazi do kolebanja i treperenja napona. Na slici 2.15 možemo vidjeti odziv napona i struje uslijed uključivanja kondenzatorske baterije u vremenu od 100 ms. [2]



Slika 2.15 Odziv napona i struje uslijed uključenja kondenzatorske baterije [2]

## 2.2.6 Asinkroni motori

Asinkroni motori su jedan od najzastupljenijih elemenata u mreži te ćemo u ovome dijelu objasniti kako oni utječu na stvaranje treperenja napona, to jest flickera. To se odnosi na asinkrone motore koji imaju ponavljajuće pokretanje motora, odnosno rad električnih pogona s promjenjivim momentom opterećenja. Kao primjer uzmimo klimu koja održava temperaturu te radi samo u slučaju kad je temperatura veća od dozvoljene što će rezultirati paljenjem i gašenjem klima uređaja, kao drugi primjer navodimo električnu pilu koja se vrti lakše i većom brzinom u slučaju kada nije opterećenja, kada ju opteretimo drvenom masom ona se usporava i vuče veću struju što rezultira padom napona. Uz dva navedena primjera tu je još i električna preša, pumpe, kompresori, i tako dalje. Sve spomenuto isto vrijedi i za regulatore brzine koji nastoje održati brzinu konstantnom, i oni koji su opremljeni energetsom elektronikom tipa AC/CD i DC/AC pretvaračem. Na slici 2.16 možemo vidjeti kolebanje napona na priključcima na mjestima s promjenjivim opterećenjem. [2]



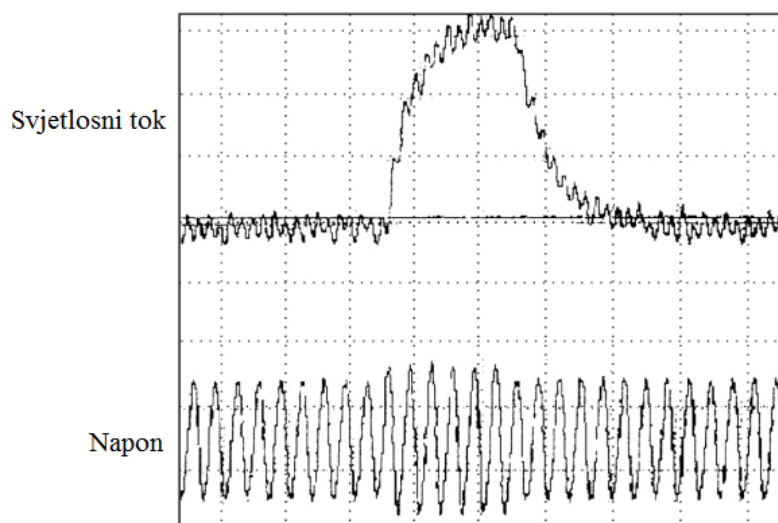
Slika 2.16 Odziv asinkronog motora s kolebanjem napon [2]

## 2.3 Utjecaj treperenja napona na elektroenergetski sustav

Utjecaj treperenja napona u elektroenergetskom sustavu ima veliku važnost kada govorimo o stabilnosti sustava, te samoj kvaliteti električne energije. Prije svega treba napomenuti da naponsko treperenje izaziva mnogi broj negativnih učinaka tehničke i ergonomske prirode na elektroenergetski sustav. Upravo zbog toga mi u proizvodni nastojimo ostvariti elemente i opremu sustava na koju neće utjecati treperenje napona, pa zbog toga imamo dodatne troškove prilikom proizvodnje koje je jako teško odrediti. Nadalje, kako bi smo osigurali što bolju i kvalitetniju električnu energiju u elektroenergetskom sustavu mi nastojimo što više smanjiti treperenje napona, te izazivanje tih negativnih učinaka. U ovome dijelu rada ćemo obraditi posljedice naponskog treperenja na mrežu, točnije obradit ćemo utjecaj naponskog treperenja na rad opreme i sustava. Jedna od najznačajnijih utjecaja flicker na mrežu, koja je također okom vidljiva je utjecaj na izvor svijeta, a kada govorimo o opremi, utjecaj je najznačajniji kod električnih strojeva i električnih pretvarača. Naravno, tu nam se javlja mnogo utjecaja na mrežu rezultirani treperenjem napona, no ovo su neki od najznačajnijih. [2]

### 2.3.1 Utjecaj treperenja napona na izvore svjetla

Kada govorimo o utjecaju naponskog treperenja na izvore svjetla to se odnosi uglavnom na vizualni utjecaj, gdje prilikom povećanja napona dolazi do promjene u svjetlosnom toku, te dolazi do povećanja emitiranja ili u nekim slučajevima i smanjenja emitiranja svjetlosti. Usljed nestabilnosti toka svjetlosti dolazi do promjene svjetline, ili promjene spektralne distribucije s vremenom. Ovu pojavu možemo susresti kod fluorescentnim svjetiljkama, žaruljama sa žarnom niti, LED svjetlu, pa tako i kod drugih energetske izvora svjetlosti, te svaki izvor svjetlosti ima posebno emitiranje, te posebna svojstva na utjecaj treperenja.



Slika 2.17 Promjena svjetlosnog toka u ovisnosti o naponu [2]

Utjecaj na izvor svjetlosti usko je vezan za jakost treperenja i raspon frekvencije, te kao što vidimo na slici 2.17, velik utjecaj na svjetlosni tok također ima opskrbeni napon. Kada promatramo klasične žarulje sa žarnom niti vidimo da svjetlost koju emitira ovisi o temperaturi žarne niti koja izravno utječe na snagu. Kada je opskrbeni napon sinusoidnog oblika, svjetlost možemo definirati kao zbroj prosječne komponente te promjenjivog dijela sa dvostrukom mrežnom frekvencijom koja u ovom slučaju nije uočljiva ljudskom oku. U fluorescentnim žaruljama imamo drugi primjer svjetlosnog toka koji ovisi o kutu paljenja nula, drugim riječima, moramo imati prisutno kašnjenje napona kako bi postigli razinu paljenja, što također ovisi o fizikalnim svojstvima plazme te o geometriji žarulje. Jednom kada primijetite treperenje fluorescentne žarulje, može biti teško zanemariti ponekad izluđujući učinak. Nekoliko je čimbenika koji mogu uzrokovati treperenje fluorescentne žarulje, a ovisno o problemu. Nekoliko čimbenika, uključujući neispravne prigušnice i startere, labave žarulje ili čak probleme s ožičenjem, mogu dovesti do treperenja fluorescentnih rasvjetnih tijela. Uz spomenute razloge, treperenje kod ovih žarulja može se javiti i zbog velikih hladnoća ili u klimavim spojevima na kraju žarulja. Uzrok treperenja napona kod LED svjetla je najčešće problem u ožičenju doma, to jest na nekom određenom mjestu dolazi do pada napona i upravo zbog toga dolazi do promjene u svjetlosti led lampe. Bitan faktor je također frekvencijska karakteristika kada govorimo o flickerima, karakteristika svjetlosti uglavnom ovisi o snazi, vrsti i iznosu nazivnog napona žarulje. Kod žarne niti, frekvencijsku karakteristiku možemo opisati i u matematičkom obliku, i to pomoću funkcije prvog reda, gdje kao ulazni signal koristimo promjenu napona, a pak izlazni signal imamo promjenu svjetlosnog toka. Jednadžba glasi:

$$G_{lamp}(s) = \frac{\frac{\Delta L(s)}{L_N}}{\frac{\Delta U(s)}{U_N}} = \frac{k}{1+sT} \quad (2.17)$$

Gdje nam  $k$  i  $T$  označavaju faktor pojačanja i toplinsku vremensku konstantu,  $U_N$  i  $L_N$  nam služe kao oznaka za nazivni napon žarulje, te nazivno osvjetljenje žarulje. Promjene napona i svjetline označene su nam sa  $\Delta U(s)$  i  $\Delta L(s)$ . Jednadžbu imamo prikazanu u Laplaceov domeni, gdje nam  $s$  označava  $j2\pi f_n$ . Uz pomoć nominalne točke izvora napajanja možemo linearizirati korelaciju između napona napajanja i osvjetljenja, koja je inače nelinearna. Faktor pojačanja  $k$  odredimo kao funkciju svjetlosti o naponu, pa derivacijom u nominalnoj točki dobijemo:

$$k = \frac{d\left(\frac{L}{L_N}\right)}{d\left(\frac{U}{U_N}\right)}, \text{ vrijedi da je } U = U_N \quad (2.18)$$

No u praksi je to mnogo kompliciranije, pa je s tim i jednađbe koje služe za određivanje faktora pojačanja kompliciranije, te one glase:

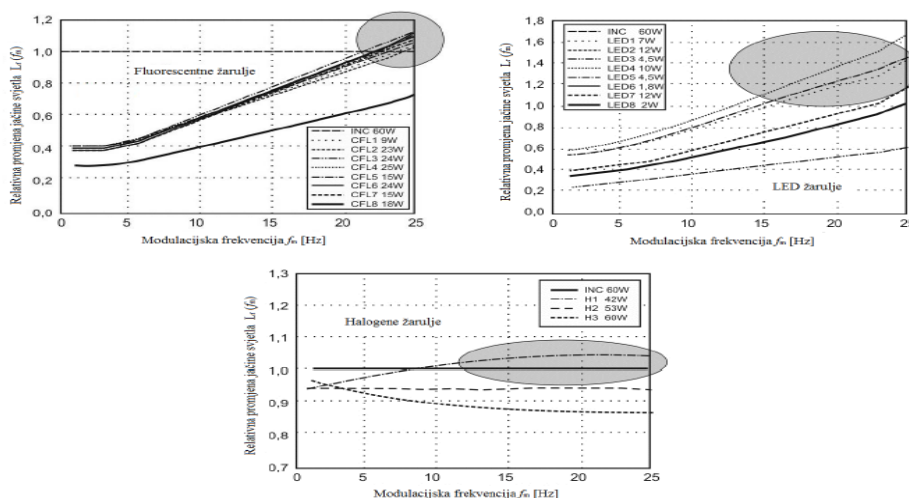
$$k_{N-\Delta U} = \frac{1 - \frac{L U_{N-\Delta U}}{U_N}}{1 - \frac{L U_N}{U_N}} \quad (2.19)$$

$$k_{N+\Delta U} = \frac{1 - \frac{L U_{N-\Delta U}}{U_N}}{1 - \frac{L U_{N+\Delta U}}{U_N}} \cdot k_{U_N} = \frac{k_{U_{N-\Delta U}} + k_{U_{N+\Delta U}}}{2} \quad (2.20)$$

Nakon što smo prikazali sve jednađbe vezane za faktor pojačanja  $k$ , te izraz za frekvencijsku karakteristiku, pogledat ćemo što bi napravili kada bi trebali odrediti približnu vrijednost vremenske konstantne  $T$ . Taj problem riješit ćemo uz pomoć obrnute inverzne Laplaceove transformacije, koja se temelji na promjeni svjetlosnog toka zbog promjene napona. Inverzna Laplaceova transformacija od  $G_{lamp}$  glasi:

$$G_{lamp}(t) = \frac{k}{T} e^{-\frac{t}{T}} u(t) \quad (2.21)$$

Iz gore navedene formule promatrat ćemo vrijeme  $t$ , te pogledati ponašanje za neke određene vrijednosti, pa tako u slučaju kada imamo vrijednost  $t = T$ , izlazna vrijednost signala će pasti s početne vrijednosti na 36.79% te iste vrijednosti. Sama vrijednost vremenske konstante  $t$  najviše ovisi o svojstvima lampe koji se odnosi na karakteristiku toplinskih gubitaka. Upravo zbog spomenutih toplinskih gubitaka, žarulje koje su punjene plinom sa ravnom žarnom niti imaju manju vremensku konstantu nego li pak žarulje sa spiralnom žarnom niti. Na primjer, ako imamo vrijednost napona 230 V, nazivnu snagu žarulje 60 W, vremenska konstanta u tom slučaju iznosi od 10 ms do 30 ms, dok je vrijednost faktor pojačanja od 3.4 pa do 3.84. [2]



Slika 2.18 Odnos promjene jačine svjetlosti ovisno o frekvenciji [2]

Na slici 2.18 imamo prikazano za posebne vrste žarulja utjecaj promjene svjetlosti s obzirom na promjenu frekvencije. Imamo grafove za fluorescentnu žarulju, LED žarulju, i zatim Halogene žarulje, sve tri su izložene istim modulacijama frekvencije, a vidimo da svaka žarulja ima svoje vlastite odzive, što ovisi o njezinim svojstvima te parametrima. Fluorescentne žarulje kao i štedne žarulje opremljene su elektroničkim sklopovima i upravo zbog toga su manje osjetljive na treperenje napona, no u svim slučajevima nije tako. Vršnu vrijednost napona napajanja kod fluorescentnih i štednih žarulja utječe na promjenu toka u mjeri većoj nego kod efektivne vrijednosti napona. Naponska karakteristika kod žarulja sa žarnom niti je linearna što vidimo na slici 2.18, što im daje karakteristiku linearnih trošila, za razliku od fluorescentnih žarulja koje su nelinearne. Promjena jačine svjetla kod žarulja u odnosu na moduliran napon frekvencije  $f_m$  računa se prema jednadžbi:

$$L_r(f_m) = \frac{L_x(f_m)}{L_{IL}(f_m)} \quad (2.22)$$

Kod mjerenja smetnji zbog naponskog treperenja dolazimo do zaključka da na postoji poveznica između razine smetnji i pritužbi potrošača. Tri mogućnosti koje postoje za ovu situaciju su:

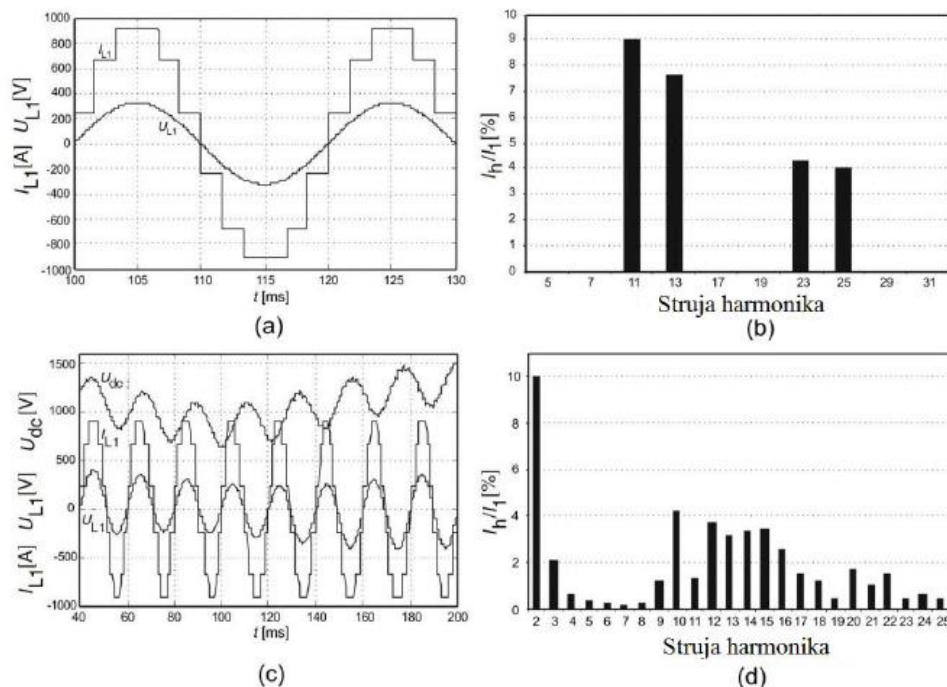
- Naponsko treperenje je vidljivo tek na niskonaponskoj razini, dok se mjerenje odvija na visokonaponskoj i srednjenaponskoj razini.
- Prilikom korištenja suvremenih učinkovitijih žarulja koje su manje osjetljive na treperenje napona.
- Velik udio u mjerenjima razine smetnje imaju brze promjene napona.

Kod spomenute tri vrste žarulja, halogenih, fluorescentnih i štednih žarulja, konstantom promjenom dubine modulacije konstantne frekvencije na rasponu od 0,5 Hz pa do oko 25 Hz, svjetlosni tok se povećava linearno, ali u različitoj mjeri. Ako se nalazimo u slučaju kada je ista dubina modulacije, ali s različitom i većom frekvencijom ne znači smanjenje promjene svjetlosnog toka, no kod fluorescentnih žarulja s magnetskim prigušnicama nije tako. Treperenje svjetla koje se uzrokuje zbog flickera utječe na čovjeka, i to tako da izaziva nelagodu i umor, ta također pogoršava kvalitetu tokom rada, te otežava čitanje i gledanje televizije. Također treperenje svjetlosti velikih intenziteta može biti rezultat epileptičnih napada, te ostaviti posljedice na ljudsko tijelo, i izazvati nesreće na radu. [2]

### 2.3.2 Utjecaj treperenja napona na statičke pretvarače

Statički pretvarači su električni uređaji koji služe za upravljanje brzinom kod trofaznih motora, a pri tome pretvaraju napon i frekvenciju na potrebne vrijednosti, a da pri tome ne dođe do smetnji

tijekom rada motora. U zadnje vrijeme sve je veća potreba za automatikom u industriji te se s tim povećava korištenje ovih pretvarača. Posljedice koje nastaju uslijed djelovanja treperenja napona na statičke pretvarače rezultira smanjenjem faktora snage te generiranjem nekarakterističnih međuharmonika i harmonika.



Slika 2.19 Valni oblici napona i struje statičnog pretvarača [2]

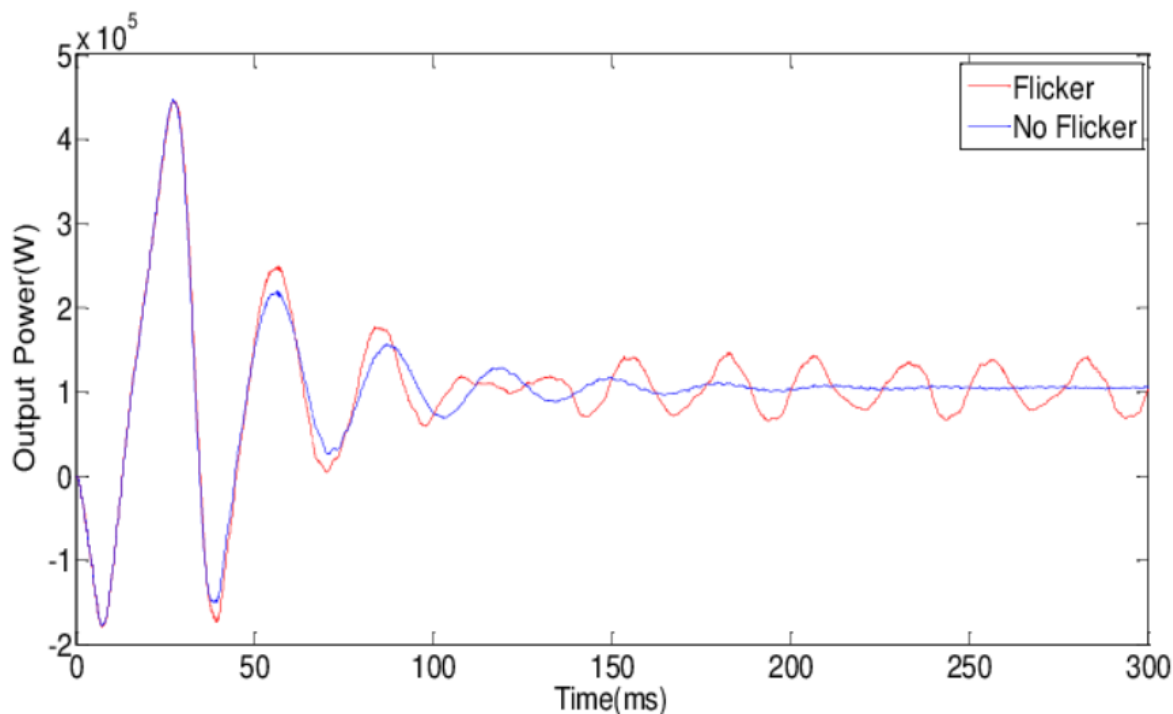
Na slici 2.19 prikazani su valni oblici ulaza u pretvarač, te je prikazano također modulirani izlazni napon. Na slici se nalazi valni oblici 12-pulsnog ispravljača sa kutovima upravljanja od 0, te konstantom istosmjernom strujom  $I_d = const$ . Na slici se pod a i b nalaze ulazni sinusoidni naponi, a pak pod c i d imamo prikazane modulirane izlazne napone, gdje je  $U_{DC}$  izlazni napon na istosmjernoj strani. Na mjestima gdje dolazi do pojave ne karakterističnih harmonika koji inače nisu prisutni u 12-pulsnom pretvaraču si izvori treperenja napona koje ostavlja utjecaj na statičke pretvarače. [2]

### 2.3.3 Utjecaj treperenja napona na električne strojeve

Električni strojevi koji su spojeni na mrežu uvelike osjećaju utjecaj naponskog treperenja, razlog toga je jer uslijed rada trebaju imati konstanto napajanje kako ne bi došlo do ispada iz sinkronizma i slično. Prilikom kolebanja napona na stezaljkama motora dolazi do promjene krajnje vrijednosti napona, te je to dovoljan razlog kako bi došlo do promjene momenta te klizanja motora, a to utječe na cijeli proizvodni proces, tako da ga usporava, i izaziva financijske gubitke. No, ipak to su blagi oblici utjecaja treperenja, također postoje slučajevi kada flicker kod električnih strojeva mogu izazvati prekomjerne vibracije, te pri tome dovesti do smanjenja mehaničke čvrstoće i vijeka



trajanja motora, što izaziva velike gubitke. Kod sinkronih motora i generatora, naponsko treperenje dovodi do opterećenja na rotoru, što će rezultirati preranim trošenjem rotora. Uz spomenuto treperenje napona također može dovesti do promjene okretnog momenta i povećavanje gubitaka električnog stroja. [2]



Slika 2.20 Izlazna snaga motora sa i bez flickera [4]

### 3. ŠIRENJE TREPERENJA NAPONA U MREŽI

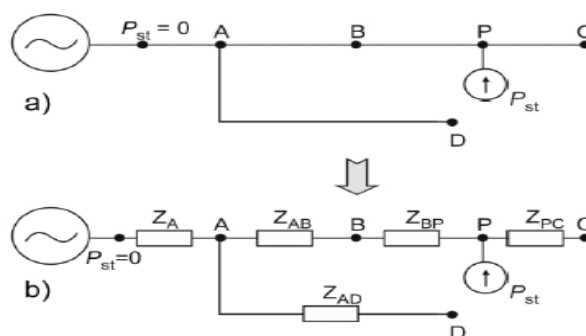
U ovome dijelu diplomskog rada ćemo pogledati kako se naponsko treperenje širi u elektroenergetskom sustavu, te njihov međusoban utjecaj, te ćemo pogledati i obraditi veličine koje utječu na širenje naponskog treperenja. Kada određujemo širenje naponskog treperenja u nekoj točki naše mreže koje je kao što smo već spomenuli najčešće uzrokovano promjenjivim opterećenjem u mreži, razlikovat ćemo dva slučaja s obzirom na položaj promatrane točke. Prvi slučaj odnosi se na točku koja se nalazi na vrlo velikoj udaljenosti od nekog drugog izvora naponskog treperenja, te se može pretpostaviti da u tom trenutku nema ovisnosti naponskog treperenja jedno o drugome, te to nazivamo širenje naponskog treperenja stvoreno jednim promjenjivim opterećenjem. Uz prvi, tu nailazimo i na drugi slučaj, odnosno kada na jačinu naponskog treperenja predstavlja zbroj smetnji iz nekoliko različitih promjenjivih opterećenja, koji se nalaze na kratkim udaljenostima.

### 3.1 Širenje treperenja napona stvoreno jednim promjenjivim opterećenjem

Naponsko treperenje izaziva mnoge ne željene situacije u sustavu, dolazi do poremećaja u normalnom radu i funkcioniranju sustava. S obzirom da mi želimo što manje treperenja u sustavu u ovom dijelu ćemo opisati pored načina širenja i načine pomoću kojih ćemo to ublažiti. Širenje treperenja prisutno je u svakom dijelu sustava, a način širenja i brzina ovisi o sposobnosti sustava za širenje koje ćemo opisati uz pomoć veličine koju nazivamo koeficijent prijenosa treperenja  $T_{P_{st}}$ , koji ćemo definirati u odnosu na dvije udaljene točke u mreži, i to izrazom koji glasi:

$$T_{P_{st}PA} = \frac{P_{st}(A)}{P_{st}(P)} \quad (3.1)$$

Za bolji pregled i objašnjenje formule pogledajmo nadomjesnu shemu za širenje treperenja u radijalnoj mreži. Na slici ispod 4.1, prikazana je osnova za procjenu širenja treperenja, i važno je napomenuti da se za vrijednost impedancije uzima konstantna vrijednost. [2]



Slika 3.1 Kolebanje i treperenje napona u mreži [2]

Shema se sastoji od radijalne mreže što znači da se napaja s jedne strane što vidimo na slici, napaja se iz jednog generatora. U točkama A, B, C, P, te C i D, nalaze se opterećenja mreže. U točki P nalazi se opterećenje koje je promjenjivo s vremenom, te izaziva naponsko kratkotrajno treperenje  $P_{st}$ , dok u ostalim točkama imamo stalno konstanto opterećenje, te je  $P_{st} = 0$ . Kako bi smanjili razinu naponskog treperenja u mreži nastojimo smanjiti nadomjesnu impedanciju u mreži, računajući od mjesta izvora treperenja, dakle do točke P, pa prema izvoru napajanja to jest generatoru. Razinu naponskog treperenja u nekoj točki računamo uz pomoć formule koju smo već spomenuli, a ona za točku A glasi:

$$P_{st}(A) = P_{st}(P) \left| \frac{Z_A}{Z_A + Z_{AB} + Z_{BP}} \right| \approx P_{st}(P) \frac{S_{SC}(P)}{S_{SC}(A)} \quad (3.2)$$

Zatim iz vrijednosti razine treperenja možemo izračunati koeficijent prijenosa treperenja koji se odnosi na širenje treperenja, a on glasi:

$$T_{P_{st}PA} = \frac{P_{st}(A)}{P_{st}(P)} = \left| \frac{Z_A}{Z_A + Z_{AB} + Z_{BP}} \right| \quad (3.3)$$

Kao što smo dobili vrijednosti za točku A, tako u svim točkama možemo izračunati promjene koje se dešavaju kao rezultat treperenja napona u točki P. Pa tako u točki B dolazi do promjena u vrijednostima napona, te to također možemo prikazati uz pomoć jednakosti, a zatim i izračunati razinu širenje naponskog treperenja, to jest koeficijent prijenosa u točki B. Pa iz toga dobijemo jednakosti:

$$P_{st}(B) = P_{st}(P) \left| \frac{Z_A + Z_{AB}}{Z_A + Z_{AB} + Z_{BP}} \right| \quad (3.4)$$

$$T_{P_{st}PB} = \frac{P_{st}(B)}{P_{st}(P)} = \left| \frac{Z_A + Z_{AB}}{Z_A + Z_{AB} + Z_{BP}} \right| \quad (3.5)$$

Zatim pogledajmo dešavanje u točki D, koja se nalazi na drugomvodu. Iako se nalazi na drugomvodu i u točki D se osjete posljedice naponskog treperenja, isto onako kao da se nalazi u točki A. Pa prema tome zaključujemo da je vrijednost razine naponskog treperenja  $P_{stDA}$  jednaka 1. Iz spomenutog dobijemo jednakosti za koeficijent prijenosa u točki D, koji glasi:

$$T_{P_{st}PD} = \frac{P_{st}(D)}{P_{st}(P)} = \frac{P_{st}(A)}{P_{st}(P)} \cdot \frac{P_{st}(D)}{P_{st}(A)} = T_{P_{st}PA} \cdot T_{P_{st}DA} = T_{P_{st}PA} \quad (3.6)$$

Zadnji potrošač koji se nalazi na shemi je opterećenje u točki C. Ona se nalazi desno od izvora treperenja, te ona također osjeća utjecaj promjenjivog opterećenja u točki P. Najgora situacija koja se može javiti u točki C je da ima isto naponsko treperenje kao u izvoru treperenja to jest točki P. Pa s obzirom na to u točki C koeficijent prijenosa treperenja ima vrijednost koju izražavamo jednakosti koja glasi:

$$T_{P_{st}PC} = \frac{P_{st}(C)}{P_{st}(P)} = \frac{P_{st}(P)}{P_{st}(P)} = 1 \quad (3.7)$$

Prilikom opadanja vrijednosti napona tako dolazi i do opadanja naponskog treperenja, a prigušenje ovisi najviše o prisutnosti rotirajućih opterećenja u elektroenergetskim mrežama. U suprotnom povećanje naponskog treperenja javlja se ukoliko dođe do povećanja frekvencije napona, što je usko vezano za prigušenje kod međuharmonika, odnosno što je veća udaljenost između međuharmonika i frekvencije napona stupanj prigušenja u mreži je veći. Kada govorimo o

promjeni naponske razine ne postoje analitičke metode za procjenu koeficijenta širenja prilikom promjene napona no postoje empirijske vrijednosti koje su prikazane u tablici 4.1. [2]

Naponska razina	$T_{P_{st}}$
220 kV/70 kV	0,82
70 kV/15 kV	0,91
15 kV/230 V	0,99

Tablica 3.1 Vrijednost koeficijenta prijenosa treperenja kod promjene napona[2]

### 3.2 Širenje treperenja napona stvoreno iz više izvora

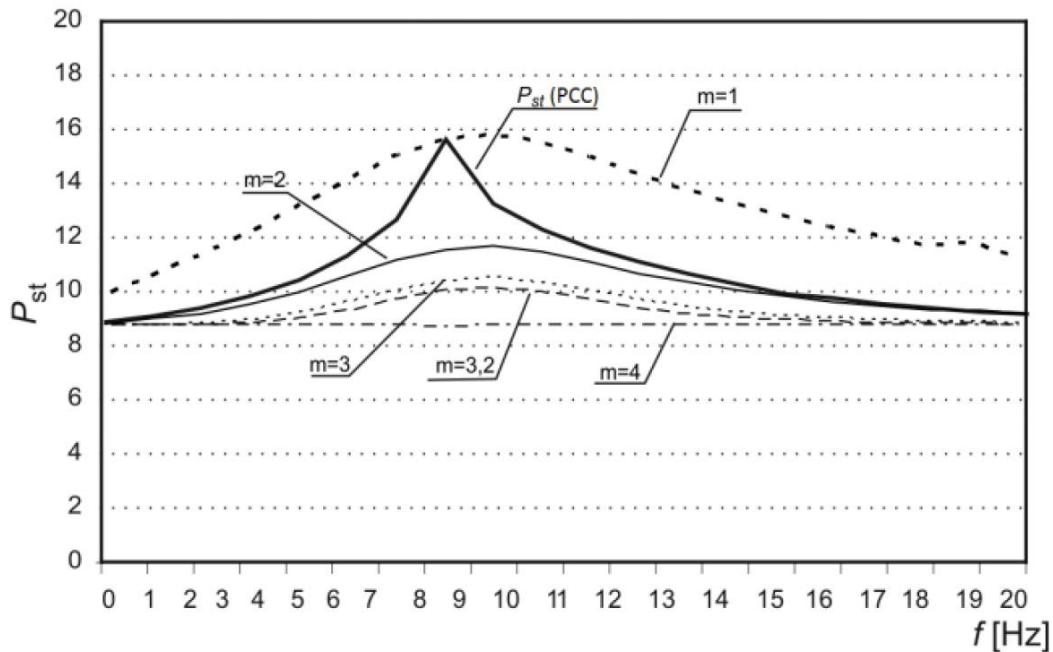
Do sada smo naveli relacije kratkotrajno i dugotrajnog naponskog treperenja u slučaju kada u mreži imamo jedan izvor promjenjivog opterećenja, no kada se radi o više izvora naponskog treperenja u mreži tada vrijede sljedeće relacije:

$$P_{st} = \sqrt[m]{\sum_j P_{stj}^m} \quad \text{kratkotrajno naponsko treperenje} \quad (3.8)$$

$$P_{lt} = \sqrt[m]{\sum_j P_{ltj}^m} \quad \text{dugotrajno naponsko treperenje} \quad (3.9)$$

Gdje nam  $st$  i  $lt$  predstavljaju short time i long time za jedan izvor naponskog treperenja, a oznaka  $m$  nam predstavlja faktor za određenu vrstu treperenja. [2]

Faktor  $m$  uzima vrijednost ovisno o tome o kakvom se izvoru trenja radi, pa tako imamo vrijednosti od 1- 4. Kada  $m$  ima vrijednost 1, koristi se za zbrajanje naponskih treperenja koji se poklapaju, gdje imamo veliku vjerojatnost da rad promjenjivih opterećenja bude simultantan. Vrijednost  $m=2$  imamo za vrijeme kada je izvor naponskog treperenja više vjetroelektrana ili lučnih peći koje rade kontinuirano na malim udaljenostima, a vrijednost 2-3 koristimo kada nam je krivulja  $P_{st}$  linearna, to jest vrijednost  $P_{st} = 1$ . Kada  $m$  ima vrijednost 3 obično se radi o tipu naponskog treperenja gdje je vjerojatnost istodobnog postupka ograničena. Najviša vrijednost  $m = 4$  koristimo kada se zbrajaju treperenja napona kojima je izvor iz peći koje rade tako da sprječavaju simultano topljenje. Kako bi bolje razumjeli vrijednosti faktora  $m$  u ovisnosti o veličini  $P_{st}$  prikazat ćemo sve na grafu koji možemo vidjeti na slici 4.2 ispod, gdje nam je prikaza ovisnost frekvencije i  $P_{st}$ . [2]



Slika 3.2 Vrijednost jačine treperenja za različite vrijednosti faktora  $m$ [2]

U nekim slučajevima je prikladno zamijeniti kratkotrajna treperenja sa ekvivalentnim treperenjem  $A_{st}$  koje je definiran kao  $A_{st} = P_{st}^m$ . Razlog zamjene je taj kako bi pojednostavnili izračun u slučaju kada imamo velik broj izvora treperenja. Ova metoda donosi linearan odnos za procjenu treperenja koji su generirani iz više izvora:

$$A_{st} = \sum_i A_{sti} \quad (3.10)$$

Kod dugotrajnog treperenja koji se dobije kao korijen sume pokazatelja  $P_{lt}$ , također možemo izračunati vrijednost treperenja  $A_{lt}$ , kojeg ćemo dobiti iz indikatora jačine za kratkotrajno treperenje.

To dobijemo pomoću formule koja glasi:

$$A_{lt} = P_{lt}^3 = \frac{1}{N} \sum_i P_{sti} = \frac{1}{N} \sum_i A_{sti} \quad (3.11)$$

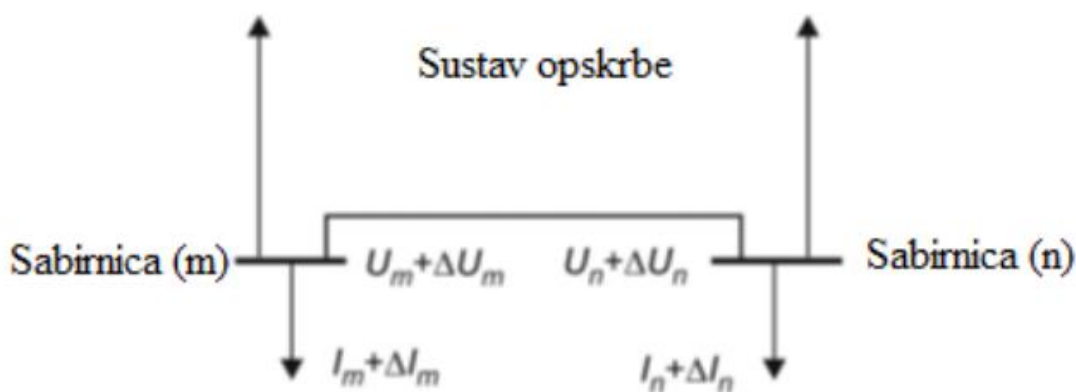
Uz sve to linearno zbrajanje također možemo koristiti kao ekvivalent za procjenu treperenja  $A_{lt}$  koje je uzrokovano radom iz nekoliko izvora treperenja, a izraz za to glasi:

$$A_{lt} = \sum_i A_{lti} \quad (3.12)$$

Također na umu treba imati to da vrijednost  $A_{st}$  ovisi o relativnim promjenama napona kao kod slučaja sa  $P_{st}$ , te da ona nije linearno ovisna. [2]

### 3.3 Širenje treperenja napona u zamkastoj umreži

Kada govorimo o zamkastim mrežama, za razliku od radijalnih, imamo utjecaja s dvije strane, to jest imamo djelovanje s obje strane sabirnica. Metodu koju smo koristili za procjenu naponskog treperenja kod radijalnih mreža, nećemo moći koristiti kod zamkastih mreža, a razlog je problem međusobne interakcije kod dva promjenjiva opterećenja koja su pritom vezane na dvije strane, za dvije sabirnice. Prikaz zamkaste mreže imamo na slici 4.3, zajedno sa spomenuta dva opterećenja spojena na dvije sabirnice, koje ćemo označiti sa m i n.



Slika 3.3 Zamkasta mreža sa dva opterećenja između dvije sabirnice

Tehnika koja se koristi za računanje kratkog spoja temeljena je na impedanciji elektroenergetskog sustava, koju ćemo u ovome slučaju koristiti za određivanje strujnih i naponskih odnosa između sabirnica m i n. Pa ćemo te naponske i strujne prilike sustava prikazati pomoću matrice, i pogledati međusobnu ovisnost parametara jedan o drugom, te kako utječu međusobno jedan na drugi.

$$\begin{bmatrix} U_m + \Delta U_m \\ U_n + \Delta U_n \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & Z_{mm} & Z_{mn} & \dots \\ \dots & Z_{nm} & Z_{nn} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_m + \Delta I_m \\ I_n + \Delta I_n \\ \dots \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Iz napisanih matrica vidimo, da je promjena napona jednaka umnošku impedancije i struje koja kroz nju prolazi. Iz priložene matrice vidimo ovisnost m sabirnice o n sabirnici i obrnuto. Promjena napona na m sabirnici uzrokovana je strujom te sabirnice  $I_m$  koja ovisi o vrijednosti impedancije  $Z_{mm}$ . Nadalje pogledajmo ovisnost m o n sabirnici. Promjena struje  $I_m$ , određena je također i impedancijom  $Z_{mn}$ . Upravo zbog te ovisnosti, može doći do poremećaja u naponskom treperenju, kada treperenje napona može prijeći s m sabirnice na n sabirnicu, te se to odnosi na već spomenuto kratkotrajno treperenje napona, te to vršimo jednadžbom koja glasi:

$$P_{st,n} = P_{st,m} \cdot \left( \frac{Z_{mn}}{Z_{mm}} \right) \quad (3.14)$$

Prelazak s m na n sabirnicu ovisi o jačini titranja napona na sabirnicama, te impedanciji sabirnica. Ovaj dio koji se odnosi na zamkastu mrežu je pojednostavljen, te se temelji kao što smo već spomenuli na analizi kratkog spoja, i vrijednostima  $X/R$ . [2]

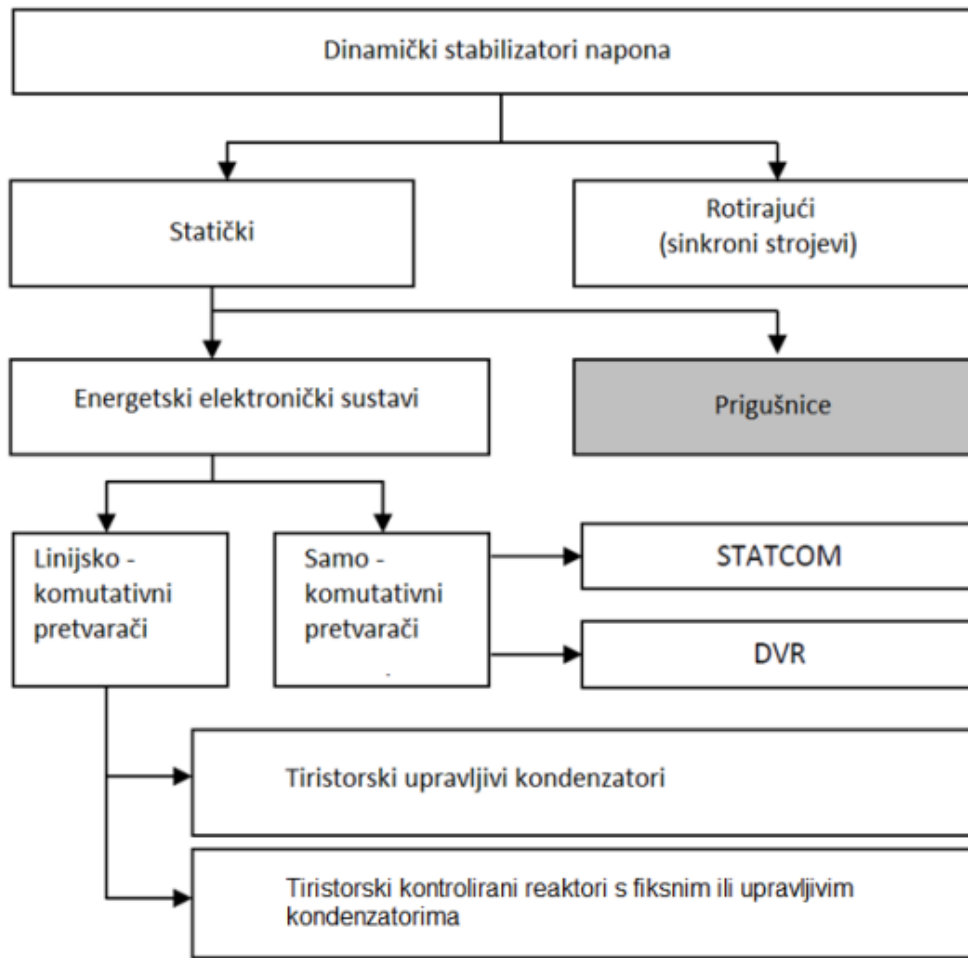
### 3.4 Metode za ublažavanja treperenja napona

Kako bi osigurali što bolji i kvalitetniji sustav nastojimo što je više moguće ublažiti i smanjiti utjecaj naponskog treperenja. S obzirom na to da je glavni razlog treperenja napona, njegovo kolebanje, nastojimo ublažiti kolebanje napona, a za to imamo dvije metode u sustavu:

- Metoda snižavanja promjene snage opterećenja
- Metoda povećanja snage kratkog spoja

Najčešće ublažavanje treperenja napona provodimo uz pomoć prve metode, dok se druga uglavnom provodi u fazi projektiranja. A često se koristi kombinacija više metoda za ostvarivanje smanjenja kolebanja napona. [5]

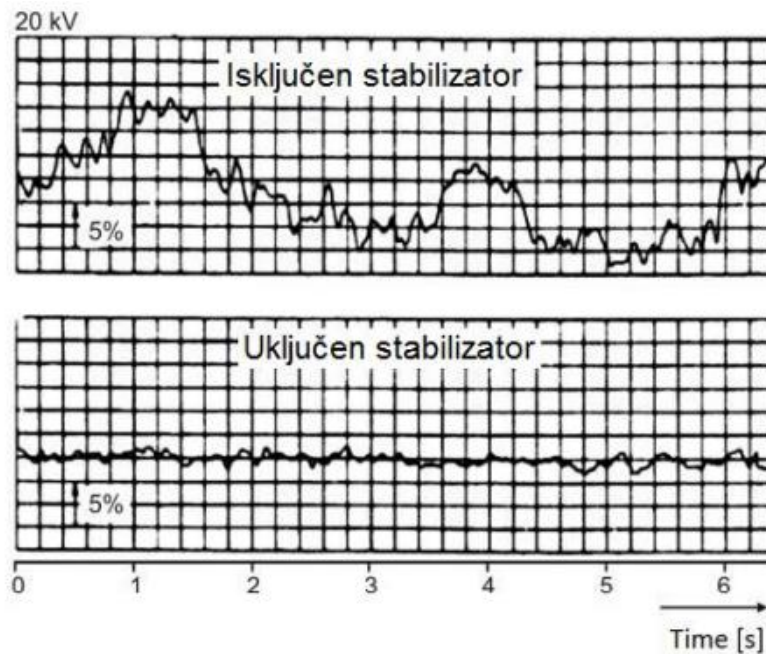
Metoda snižavanja promjene snage uglavnom se odnosi na smanjenje promjena jalove snage u mreži, a to vršimo uz pomoć dinamičkih stabilizatora napona. Dinamički stabilizatori također doprinose poboljšanju učinkovitosti procesa, tako što stvaraju jalovu energiju koja se nalazi u domeni temeljnih harmonika. Ovisno o tome kakvu jalovu energiju imamo u mreži, bila ona kapacitivnog ili induktivnog karaktera na mjestu veze možemo ju povećati ili smanjiti ovisno o potrebi. Parametri dinamičkih stabilizatora su nazivna snaga i brzina reakcije, a o tome ovisi i njihova učinkovitost. Stabilizatori se uglavnom koriste za velike nazivne snage, a dizajnirani su za stabilizaciju napona u distribucijskim sustavima, ili stabilizaciju opterećenja u čvoru mreže. Na slici 4.4 imamo prikazanu osnovnu podjelu stabilizatora, koju ćemo u ovom potpoglavlju pogledati.



Slika 3.4 Podjela dinamičkih stabilizatora napona[2]

Dinamičke stabilizatore napona dijelimo na rotirajuće i statičke stabilizatore, gdje nam rotirajuće predstavljaju sinkroni strojevi. Sinkroni strojevi su jedni od prvih stabilizatora napona, no ipak danas s razvojem tehnologije i raznih tehničkih rješenja, imamo mnoge načine za stabiliziranje napona. Posebnu skupinu kod statičkih čine prigušnice, dok na drugu stranu imamo energetske elektroničke sustave, kao što su: STATCOM, DVR, kondenzatori i tako dalje. Svaki spomenuti stabilizator ima svoju učinkovitost, koju u ovome slučaju izražavamo uz pomoć faktora smanjenja treperenja. Uz što više kontinuiranog smanjenja kolebanja dobijemo bolje smanjenje naponskog treperenja. Tako u slučaju promjene opterećenja jalove snage jamče 40% smanjenju ublažavanja treperenja napona, ako uz to još dodamo kompenzator koji obavlja funkciju symetrizatora, dobijemo ublaživanje od 50%, a pak uz sve to ako dodamo filtriranje harmonika omogućujemo smanjenje naponskog treperenja čak od 90% do 95%. Na slici ispod možemo vidjeti utjecaj stabilizatora na mrežu, to jest na odziv napona 20 kv mreže. [2]





Slika 3.5. Prikaz djelovanja stabilizatora na odziv napona[2]

Druga metoda koju smo spomenuli za ublažavanje treperenja napona je metoda povećanja snage kratkog spoja, uslijed toga treperenje se dijeli prema omjeru:

$$\frac{S_{SCafter}}{S_{SCbefore}} \quad (3.15)$$

Gdje nam  $S_{SCafter}$  i  $S_{SCbefore}$  predstavljaju snagu kratkog spoja poslije i prije procesa povećanja, te s obzirom na to da je jačina treperenja linearna s obzirom na korak promjene, očekuje se da će doći do smanjenja treperenja napona. Povećanje snage kratkog spoja vršimo dodavanjem još jednog dalekovoda koji služi za pojačanje distribucijskih dalekovoda, da se priključimo na mrežu više naponske razine, te paralelan spoj transformatora kod kojeg se smetnje potpuno prenose na sabirnice. Osim dvije spomenute metode, danas susrećemo mnogo metoda za regulaciju titranja napona, kao što su odvajanje izoliranim transformatorom, promjene u dizajnu opreme, kod motora smanjenje uklopne struje i tako dalje. [5]

#### 4. NORMA IEC 61000 – 3 – 7

The International Electrotechnical Commission (IEC) je međunarodna organizacija za standardizaciju koja se sastoji od svih nacionalnih elektrotehničkih odbora, te je glavni cilj IEC organizacije međunarodna suradnja na svim dijelovima koji se tiču električnih i elektroničkih područja. U svrhu toga organizacija objavljuje međunarodne standarde koji vrijede za sve države, te uz to još i tehničke specifikacije, te tehnička izvješća. Na radu spomenutih izvješća i standarda radi mnogobrojne nacionalne organizacije i ne nacionalne organizacije koje su povezane sa IEC – om. IEC ima vrlo blisku suradnju s međunarodnom organizacijom za normizaciju (ISO) te među njima postoji sporazum između dvije organizacije. IEC norme te standardi dolaze kao preporuke za korištenje, te u slučaju pogrešnog tumačenja ili krivog načina korištenja IEC sustav nije odgovoran. Svaki korisnik IEC standarda treba osigurati da ima zadnju izdanu verziju publikacije IEC standarda. U ovome završnom radu pozabavit ćemo se IEC standardom, to jest normom 61000 – 3 – 7. Spomenutu normu podijelit ćemo u nekoliko cjelina, te ćemo detaljno kroz te cjeline opisati zahtjeve, i dijelove spomenute norme. Norma IEC 61000 koristi se kao podloga koja služi za fluktuirajuće instalacije, to jest one instalacije kod koji dolazi do promjene opterećenja. Ovaj standard odnosi se na srednjonaponske, visokonaponske, te mreže vrlo visokog napona, dok su niskonaponske mreže pokrivene u drugim IEC standardima. S obzirom na iznos napona dijelimo ga ovako:

- Low voltage (LV) – mreže niskog napona, odnosi se na mreže nazivnog napona manji od 1 kV
- Medium voltage (MV) – mreže srednjeg napona, odnosi se na mreže čiji je nazivni napon veći od 1 kV, a manji od 35 kV.
- High voltage (HV) – mreže visokog napona, odnosi se na mreže čiji je nazivni napon veći od 35 kV, a manji od 230 kV
- Extra high voltage (EHV) – mreže vrlo visokog napona, odnosi se na mreže čiji je nazivni napon veći od 230 kV.

Uzrok fluktuirajućih mreža je u slučaju ovog standarda treperenje napona ili naglo povećanje napona, ili oboje u isto vrijeme. Primarni cilj ovog standarda je u tome da pruži smjernice za priključene kupce na mrežu kako bi dobili što kvalitetniju uslugu. Ova norma se bavi preraspodjelom kapaciteta sustava za apsorpiranje smetnji, te se ne bavi načinom kako ublažiti spomenute smetnje. Ovo izvješće temelji se uglavnom na pretpostavkama, što znači da pristup spomenut u ovome standardu neće uvjet riješiti probleme naponskog treperenja. Operatori sustava odgovorni su prilikom priključenja fluktuirajućih instalacija u sustav. [8]

Najčešći problemi na koje nailazimo rezultirani treperenjem napona su:

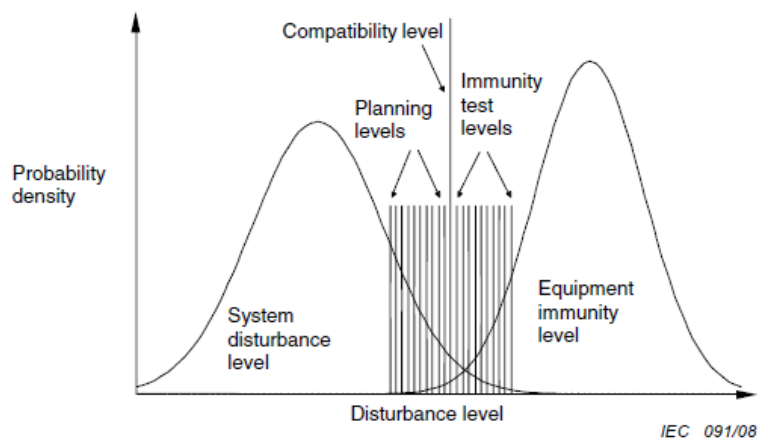
- Efekt treperenja izvora svjetlosti kao rezultat fluktuacije napona
- Brza promjena napona, koje su čak i unutar normalnih tolerancija radnog napona uznemirujuća pojava

Norma 61000 ima također i naziv elektromagnetska kompatibilnost (*Electromagnetic compatibility*), te označavamo sa EMC, jer su flickeri usko vezani za elektromagnetsku kompatibilnost. A kada govorimo o elektromagnetskoj kompatibilnosti, govorimo o sposobnosti opreme ili sustava da zadovoljavajuće funkcionira u svom elektromagnetskom okruženju bez unošenja nepodnošljivih elektromagnetskih smetnji bilo čemu u tom okruženju. Elektromagnetska kompatibilnost je uvjet elektromagnetskog okruženja tako da za svaki fenomen, razina emisije smetnji bude dovoljno niska i razina otpornosti bude dovoljno visoka, tako da svi uređaji, oprema i sustavi rade kako je predviđeno, te se EMC postiže samo u slučaju kontroliranja otpornosti i razine emisije, te se također koristi za opisivanje područja u kojima imamo prisutne elektromagnetne učinke kojima podliježu oprema i uređaji. [8]

#### **4.1 Uvod u normu IEC 61000 – 3 – 7**

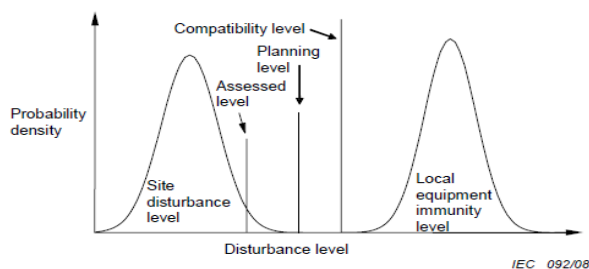
Prije nego što krenemo na neke osnovne parametre, te podjelu na stupnjeve ove norme prvo ćemo nešto reći o samim flickerima, načinu mjerenja, nešto o elektromagnetnoj kompatibilnosti, te razini emisije određenih uređaja. Flickere mjerimo uz pomoć flickermetra, te imamo kao što smo već spomenuli kratko mjerenje i dugo mjerenje, te za njih imamo spomenute već prikladne formule. Razina emisije naponskog treperenja mjeri se na mjestu kojeg nazivamo POE (*the point of evaluation*). Naravno shvaćamo da je moguća smetnja kod kupca na niskom naponu, pa zbog toga nastojimo razotkriti zagušenja između visokih, srednjih, te vrlo visokih napona. Kao primjer i orijentaciju navodimo da su žarulje od 120 V manje osjetljive na treperenje napona nego li žarulje na 230 V. Za procjenu kvalitete napona koriste se neki osnovni pojmovi, a definirani su prema tome gdje se primjenjuju, kako se mjere, zatim i kako se izračunavaju., no o tome više u nastavku. Razine kompatibilnosti općenito su temeljene na razinama vjerojatnosti od 95 % cijelih sustava, koristeći statističke distribucije koje predstavljaju i vremenske i prostorne varijacije poremećaja. Postoji dopuštenje za činjenicu da operater sustava ne može u svakom trenutku kontrolirati sve točke sustava. Stoga, procjena s obzirom na razine kompatibilnosti treba se izvršiti na razini cijelog sustava. Osim razina kompatibilnost tu također susrećemo i razine planiranja, koje se mogu koristiti u svrhu određivanja emisije ograničenja, uzimajući u obzir sve fluktuirajuće instalacije. Razine planiranja određene su prema operatora sustava za sve naponske razine sustava i mogu se smatrati internim ciljevima kvalitete operatora ili vlasnika sustava i mogu se staviti na raspolaganje

pojedini kupaca na zahtjev. Razine planiranja trebaju omogućiti koordinaciju fluktuacija napona između različitih naponskih razina. Metode mjerenja koje će se koristiti za treperenje su metode klase A navedene u IEC 61000-4-30 te također srodni sa IEC 61000-4-15. Minimalno razdoblje mjerenja je tjedan dana uz normalne poslovne aktivnosti. Praćenje razdoblje treba uključivati dio razdoblja očekivanih maksimalnih razina treperenja. [8]



*Slika 4.1 Ilustracija osnovnih koncepata kvalitete napona s vremenom/ statistika lokacije koja pokriva cijeli sustav[8]*

Na slici 4.1 imamo prikazane koncepte planiranja, te se uz pomoć njih i koncepta razine kompatibilnosti koji je prikazan na slici 4.2 želi naglasiti najvažnije odnose između osnovnih varijabli. Unutar cijelog elektroenergetskog sustava neizbježno je da će doći do određene razine smetnji u nekim slučajevima, stoga postoji rizik od preklapanja između distribucija poremećaja razine i razine imuniteta, što vidimo na slici 4.1.



*Slika 4.2 Ilustracija osnovnih koncepata kvalitete napona s vremenom statistike relevantne za jedno mjesto unutar cijelog sustava[8]*

Kako bismo usporedili razinu emisije treperenja iz korisnikove instalacije s ograničenjem emisije, minimalno razdoblje mjerenja treba biti tjedan dana. Međutim, kraće razdoblja mjerenja mogu biti potrebna za procjenu emisija pod određenim uvjetima. U svakom slučaju, razdoblje

mjerenja mora biti dovoljno dugo da uhvati najvišu razinu emisije treperenja koja se očekuje da će se pojaviti. Prilikom mjerenja emisija treperenja treba uzeti sve izvore u obzir, a njih smo obradili u prošlom poglavlju. [8]

## 4.2 Osnovni principi norme

U sustavima imamo granične vrijednosti emisija fluktuirajućih postrojenja koje ne smiju biti premašene, a one ovise o snazi opreme za generiranje treperenja, te je sami cilj svega ograničiti to ubrizgavanje tako reći treperenja napona u sustav, i smanjiti ukupan broj fluktuacija. S obzirom na glavne principe imamo tri osnovna stupnja utjecaja na razine treperenja napona u mreži, te za svaku naponsku razinu imamo posebne uvjete. Tri osnovna stupnja su :

- Stupanj 1 – odnosi se na pojednostavljenu procjenu emisija smetnji. Općenito je prihvatljivo da kupci ugrađuju male kućanske aparate bez posebne procjene emitiranja flickera od strane operatera sustava. Proizvođači takvih aparata su općenito odgovorni za ograničavanje emisija.
- Stupanj 2 – odnosi se na ograničavanje emisije u odnosu na stvarne karakteristike sustava. Ako instalacija ne ispunjava kriterije faze 1, specifične karakteristike treperenja opremu za proizvodnju unutar kupčeve instalacije treba ocijeniti zajedno s apsorpcijski kapacitet sustava. Kapacitet apsorpcije sustava proizlazi iz razina planiranja i raspodjeljuje se pojedinačnim kupcima prema njihovoj potražnji s u odnosu na ukupni opskrbni kapacitet sustava. Načelo ovog pristupa je da, ako je sustav u potpunosti iskorišten do projektiranog kapaciteta i svi kupci ubrizgavaju do svojih pojedinačnih ograničenja, ukupna razina poremećaja bit će jednaka razinama planiranja uzimajući u obzir faktore prijenosa između različitih napona razine i učinak zbrajanja različite opreme za proizvodnju treperenja.
- Stupanj 3 – odnosi se na prihvaćanju viših razina emisije na temelju određenih uvjeta. Pod nekim okolnostima, kupac može zahtijevati pristanak za emitiranje smetnji izvan njega osnovna ograničenja dopuštena u fazi 2. U takvoj situaciji korisnik i operator sustava može dogovoriti posebne uvjete koji olakšavaju povezivanje fluktuirajućeg montaža. [8]

U sljedećem dijelu rada ćemo pogledati karakteristike sva tri stupnja za sredjonaponske mreže te za visokonaponske mreže, te odrediti uvjete. Za cjelokupnu emisiju u sustavu odgovoran je operator sustava.

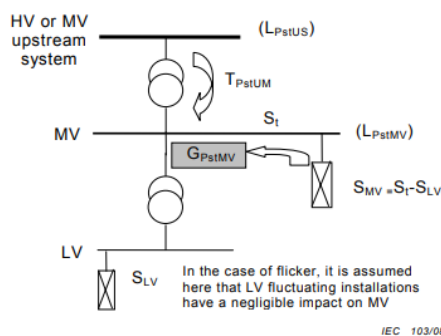
### 4.3 Ograničenja emisija za fluktuirajuće instalacije spojene na SN sustave

Kod instalacija koje su spojene na srednjonaponsku mrežu također imamo podjelu na osnovna tri stupnja koje treba zadovoljavati kako bi sve odgovaralo onako kako to zahtjeva naš standard to jest norma IEC 61000. Kada govorimo o stupnju 1 omogućuje se spajanje malih instalacija, no sa ograničenom količinom promjenjive snage koju emitira u mrežu. Spomenute male instalacije mogu se uključiti u sustav bez detaljne procjene karakteristika emisije ili utjecaja na sustav. Prihvaćanje bez daljnje analize provodi se u slučaju kada je omjer promjene snage  $\Delta S$  i snage kratkog spoja sustava  $S_{SC}$  izraženu u postocima nalazi unutar odgovarajućih granica, a te granice ovise o broju  $r$  koja predstavlja promjenu napona u minuti. ( Pad napona nakon čega slijedi oporavak). Vrijednosti prividne promjene snage mogu biti veće, manje, ili pak jednake nazivnoj vrijednosti snage. Vrijednost snage kratkog spoja računamo za određenu točku ili procijenimo za tipičan ustav sa sličnim karakteristikama. U tablici 4.1 ispod prikazane su granice prvog stupnja kod SN sustava, u ovisnosti o vrijednosti  $r$  varijable.

$c$	$K=(\Delta S/S_{SC})_{max}$ (%)
$r > 200$	0,1
$10 \leq r \leq 200$	0,2
$r < 10$	0,4

Tablica 4.1 Granice za prvi stupanj kod SN[8]

Nadalje kada govorimo o stupnju 2 koji se odnosi za instalacije koje su povezane na srednju vrijednost napona, on nam se takoreći nadograđuje na stupanj 1, kojeg smo već obradili. Naime u stupnju 2 razmatramo kolika ograničenja emisije treba uvesti s obzirom na stvarne karakteristike sustava. U ovom stupnju, dopušteni globalni doprinos ukupnoj razini poremećaja je raspodijeljen svakom pojedinom postrojenju u skladu s njegovim udjelom u ukupnom kapacitetu sustava opskrbe na koji je ova instalacija povezana. Ovo osigurava da razina smetnji zbog emisija svih kupaca priključenih na sustav neće premašiti razinu planiranja.



Slika 4.3 Prikaz prijelaza sa srednjonaponske mreže na niskonaponsku[8]

Na slici 4.3 možemo vidjeti primjer sustava srednjeg napona, te prijelaz sa visokog ili srednjeg napona, na niski napon. Prilikom prijelaza na srednjeg napona na niski mi nastojimo ograničiti emisije treperenja napona, to jest prijelaz treperenja sa srednjeg napona ka niskom naponu, to jest potrošačima. Pa tako flicker ne bi trebali prijeći planiranu vrijednost koja je određena formulom:

$$L_{PstMV} = \sqrt[a]{G_{PstMV}^a + T_{PstUM}^a + L_{PstUS}^a} \quad (4.1)$$

Gdje nam:

$G_{PstMV}^a$  - predstavlja globalni doprinos razini treperenja svih instalacija koje su spojene na srednjonaponsku mrežu, te je izraženo preko  $P_{st}$  i  $P_{lt}$ .

$T_{PstUM}^a$  - predstavlja koeficijent prijenosa flicker u mreži do srednjeg napona, te ga određujemo simulacijom ili mjerenjima.

$L_{PstUS}^a$  - predstavlja razinu planiranja za treperenje u uzvodnom sustavu, gdje nam različite razine mogu biti potrebne za određene međunaponske razine.

$L_{PstMV}$  - predstavlja razinu planiranja za flickere u SN sustavu.

U ovoj normi susrećemo još jedan pojam, a to je pojam individualne dopuštenosti emitiranja treperenja. Drugim riječima rečeno, svaki korisnik sustava ima dopuštenu određenu količinu emitiranja treperenja u mrežu, a ta količina ovisi o njihovoj snazi, te o udjelu investicijskih troškova u sustav za određenog korisnika. Individualne emisije treperenja za korisnike računamo prema relaciji:

$$E_{Psti} = G_{PstMV} \cdot \sqrt[a]{\frac{S_i}{(S_t - S_{LV})}} \quad (4.2)$$

$$E_{Plti} = G_{PltMV} \cdot \sqrt[a]{\frac{S_i}{(S_t - S_{LV})}} \quad (4.3)$$

Gdje nam:

$E_{Psti}$  i  $E_{Plti}$  - predstavljaju emisijska treperenja za instalaciju kupca

$S_i$  - dogovorena snaga koju će imat kupčeva instalacija, ili nazivna vrijednost u MVA

$S_t$  - predstavlja ukupni opskrbeni kapacitet promatranog sustava, te pritom uključuje i budući rast opterećenja

$S_{LV}$  - predstavlja ukupnu snagu instalacija napajanih izravno prema NN naponu mreže.

Na nekim se mjestima može dogoditi da je prethodna razina treperenja viša od normalnog udjela za postojeće instalacije. U ovom slučaju, ograničenja emisija za nova postrojenja možemo razmotriti preraspodjelu planiranih razina između različitih naponskih razina ili se može povećati kapacitet apsorpcije treperenja sustava. U tablici 4.2 imamo prikazane minimalne vrijednosti emisija za srednji napon mreže. [8]

$E_{Psti}$	$E_{Pti}$
0,35	0,25

*Tablica 4.2 Minimalne vrijednosti emisija MV sustava*

Nadalje imamo obradu trećeg stupnja za MV sustave, koje se temelje na prihvaćanju viših razina emitiranja naponskog treperenja, to jest višim emisijama. U posebnim slučajevima operator sustava može dopustiti treperenje napona određene instalacije više nego što je to dozvoljeno u stupnju 2, no to se dešava kada su ograničenja donesena u drugom stupnju izvedena pomoću tipičnog i konzervativnog sustava. U nastavku ćemo navesti neke od faktora koji utječu na dopuštanje više emisije treperenja:

- Neke korisničke instalacije ne proizvode značajno treperenje jer nemaju fluktuirajuću opremu značajne veličine. Stoga se neki od dostupnih kapaciteta apsorpcije treperenja sustava neće iskoristiti.
- Opći zakon zbrajanja može biti previše konzervativan, na primjer, može se dogoditi da neke fluktuirajuće instalacije nikada ne rade istovremeno, zbog ograničenja sustava ili opterećenja.
- U nekim slučajevima, instalacija koja izaziva treperenje može biti u skladu sa svojim ograničenjima emisija u normalnim konfiguracijama sustava, dok premašuje ograničenja emisija stupnja 2 samo povremeno u degradiranim konfiguracijama (npr. kada obližnje proizvodno postrojenje nije u funkciji).

Sve dok svi korisnici u sustavu ne iskoriste svoja dopuštenja drugog stupnja za emisiju naponskog treperenja u sustav, prisutni su rezervni kapaciteti. Na kraju treba dodati još ograničenja u ovome naponskom nivou kada govorimo o vrijednostima kratkotrajnih i dugotrajnih flickera, te su prikazani u tablici ispod. [8]

$P_{st}$	$P_{lt}$
0,9	0,7

*Tablica 4.3 Ograničenja vrijednosti flicker u SN mreži*



#### 4.4 Ograničenja emisija za fluktuirajuće instalacije spojene na VN i VVN sustave

U ovome dijelu rada odradit ćemo utjecaj postrojenja sa strane naponskog treperenja na visokom i vrlo visokom naponu. U ovome slučaju također imamo tri stupnja, no prvi stupnja kao i treći stupanj odgovaraju stupnjevima kod srednjeg napona, tako da njih nećemo ponovo obrađivati. S toga ćemo odmah krenuti na drugi stupanj kod mreža s VN.

Pristup stupnju dva je sličan kao i kod srednjeg napona, no u slučaju od visokog i vrlo visokog fluktuirajućih instalacija udio globalne razine emitiranja temelji se na ukupnoj snazi koja je dostupna za sve instalacije na tom naponu, a ne na ukupnom opskrbnom kapacitetu sustava. Kada promatramo visoki napon, treperenje napona koje se dešava na SN i NN nema utjecaj na visoki napon, pa prema tome to možemo zanemariti. Upravo zbog toga imamo nove vrijednosti, te nove izraze za zasebna dopuštenja emitiranja treperenja za svakog korisnika, koje smo već spominjali kod srednjeg napona. Dopuštene misije na vrlo visokom (EHV) naponu i visokom naponu (HV) za svakog korisnika računamo prema relaciji:

$$E_{Psti} = G_{PstHV} \cdot \sqrt[a]{\frac{S_i}{S_{tHV}}} \quad (4.4)$$

$$E_{Psti} = G_{PstEHV} \cdot \sqrt[a]{\frac{S_i}{S_{tEHV}}} \quad (4.5)$$

$$E_{Plti} = G_{PltHV} \cdot \sqrt[a]{\frac{S_i}{S_{tHV}}} \quad (4.6)$$

$$E_{Plti} = G_{PltEHV} \cdot \sqrt[a]{\frac{S_i}{S_{tEHV}}} \quad (4.7)$$

Minimalne vrijednosti emisije emitiranja za HV i EHV su jednaka onima za MV, te su prikazane u tablici 4.2. Kod visokog napona ćemo također istaknuti planirana ograničenja kratkotrajnih i dugotrajnih treperenje napona u mreži te su prikazani u tablici ispod. [8]

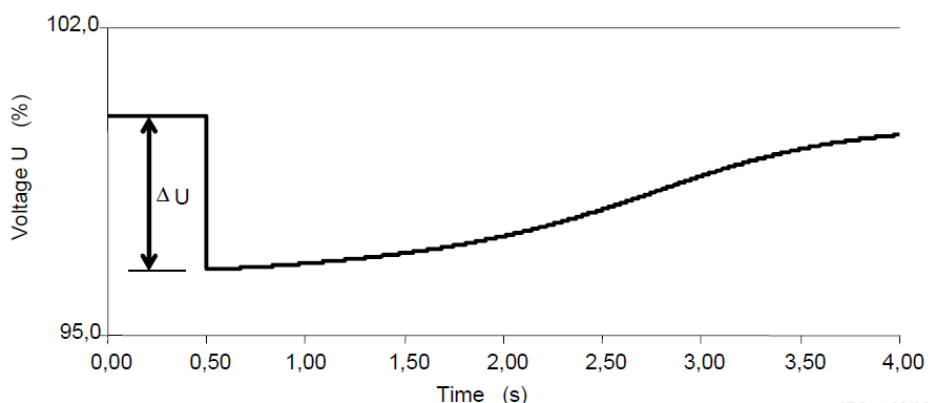
$P_{st}$	$P_{lt}$
0,8	0,6

Tablica 4.4 Ograničenja vrijednosti flicker u VN mreži

#### 4.5 Brze promjene vrijednosti napona

Vizualna nelagoda zbog treperenja svjetla je najčešći razlog za ograničavanje promjena napona zbog fluktuirajućih instalacija. Međutim, operateri ili vlasnici sustava moraju održavati veličina napona unutar uskih granica te pojedinačni kupci ne bi trebali proizvesti značajne promjene u

napona čak i ako su podnošljive sa stajališta treperenja. Na slici 4.4 ispod možemo vidjeti primjer brze promjene napona.



Slika 4.4 Brze promjene vrijednosti napona[8]

Pod normalnim okolnostima, vrijednost brzih promjena napona ograničena je na 3 % nominalnog napona napajanja u SN sustavima. Međutim, brze promjene napona koje prelaze 3 % mogu se rijetko dogoditi u SN javnim opskrbnim sustavima. Ovo su razine smetnji koje se mogu koristiti u svrhu određivanja graničnih vrijednosti emisije, uzimajući u obzir sve instalacije koje mogu uzrokovati brze promjene napona. Planiranje razine specificira operator ili vlasnik sustava za sve naponske razine sustava i mogu se smatrati internim ciljevima kvalitete operatora ili vlasnika sustava i mogu biti dostupni pojedinačnim kupcima na zahtjev. Mogu se dati samo indikativne vrijednosti jer će se razine planiranja razlikovati od slučaja do slučaja, ovisno o strukturi sustava i okolnostima. U tablici ispod prikazane su vrijednosti planiranja za brze promjene napona za rijetke događaje, te su izražene u postocima. Takva ograničenja ovise o promjena u određenom vremenskom razdoblju

Broj promjena $n$	$\Delta U/U_N$	
	MV	HV/EHV
$n < 4$ po danu	5-6	3-5
$n \leq 2$ po satu $> 4$ po danu	4	3
$2 < n \leq 10$ po satu	3	2,5

Tablica 4.4 Planirane promjene napona s obzirom na broj ponavljanja[8]

Ne postoji standardizirana metoda mjerenja za brze promjene napona. Iz tog razloga, preporučuje se da se korišteni postupak procjene temelji na izmjerenim promjenama u r.m.s. napon uzimajući u obzir samo komponentu frekvencije napajanja s uklonjenim prijelaznim pojavama. [8]

## **5. ANALIZA TREPERENJA NAPONA NA PRIMJERU ELEKTROENERGETSKE MREŽE**

U zadnje poglavlju ovog diplomskog rada obradit ćemo jedan primjer mreže, te ćemo na tom primjeru izračunati međusobni utjecaj među čvorovima, te razine flickera na svim čvorovima u mreži, i na kraju koeficijent prijenosa između čvora 2 i ostalih čvorova. Simulaciju ćemo vršiti u programskom paketu DigSILENT-a, pod nazivom Powerfactory. U prvom dijelu ovog poglavlja ćemo analizirati cijelu mrežu te međusoban utjecaj elemenata u mreži, a zatim ćemo prijeći na modeliranje mreže u Powerfactory-u, nakon čega ćemo izvršiti proračun i na kraju sagledati rezultate, te usporediti ih sa dopuštenim vrijednostima razine flickera prema standardu kojeg smo već obradili a to je IEC 61000 – 3 – 7.

### **5.1 O programskom paketu Powerfactory**

Programski paket Powerfactory je program njemačke grupacije DIgSILENT, koja se bavi rješenjima za elektroenergetske sisteme, te sustave općenito koji se odnose na energiju. U ovome diplomskom radu koristi ćemo PowerFactory, pa ćemo reći nešto malo više o njemu. PowerFactory je softverska aplikacija za analizu elektroenergetskog sustava za analizu proizvodnje, prijenosa, distribucije i industrijskih sustava. Pokriva cijeli raspon funkcionalnosti od standardnih značajki do sofisticiranih i naprednih aplikacija uključujući energiju vjetra, distribuiranu proizvodnju, simulaciju u stvarnom vremenu i praćenje performansi za testiranje i nadzor sustava, što nam omogućuje mnoge vrste proračun, te njegovu široku upotrebu.. PowerFactory se sastoji od osnovnog paketa koji u sebi sadrži funkcije kao što su: proračun tokova snaga, proračun kratkog spoja, osnovne SN/NN analize, osnovne modele opreme, rezultate uz izvješća, osnovne informacije o softveru i tako dalje. Osnovni dio programa nam je dovoljan u slučaju kada su nam potrebne neke osnovne vrijednosti i rezultati iz mreže, no za nešto više i detaljnije potrebno je uključiti dodatne pakete. Rezultate dobivenih proračuna moguće je dobiti iz sustava na nekoliko različitih načina. Uz osnovni paket napredne funkcije sustava koje možemo nadograditi osnovnom paketu su: zaštitne funkcije, Analiza kabela, alati za distribucijsku mrežu, elektromagnetski prijelazi, Kvazi – dinamička simulacija, procjena zahtjeva za povezivanje, planiranje prekida rada, optimalni protok snage i tako dalje. Sve te dodatne funkcije su zadužene za određenih dio proračuna koji se odnose na mrežu. Jedan od najvažnijih dodatnih opcija koja je nama vrlo važna u ovome radu je funkcija Kvalitete električne energije i harmonijska analiza uz

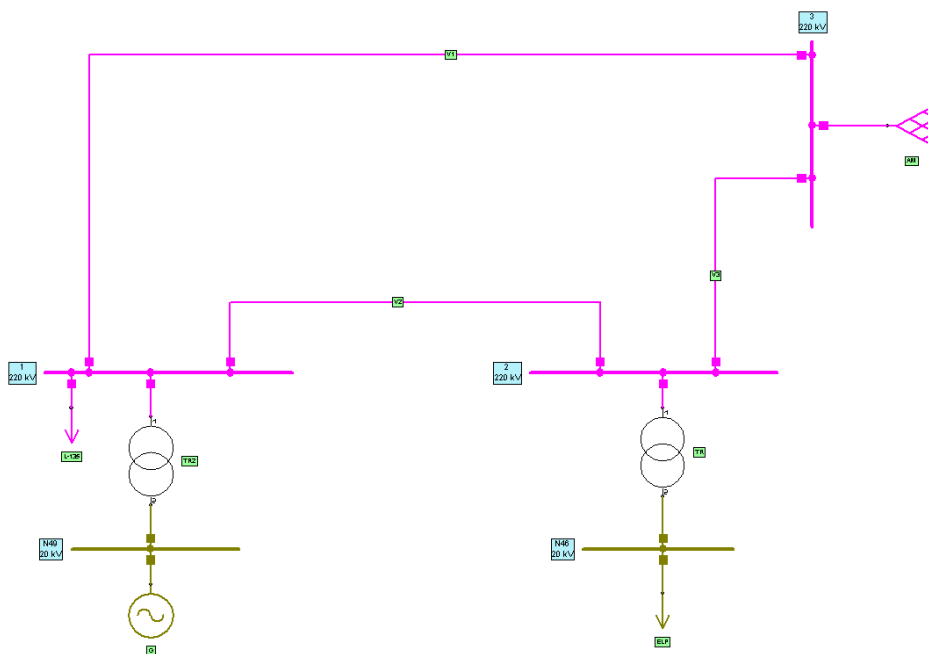
pomoć koje ćemo izračunati željene vrijednosti razine flickera, za postojeću mrežu, te se detaljnije upoznati sa tim dodatnim dijelom programa. Uz taj dio također u ovom radu nam je potreban dio EMT simulacije, uz pomoć kojeg dobijemo rezultate simulacija.[11]



Slika 5.1 DlgSILENT logo [11]

## 5.2 Modeliranje mreže u PowerFactory-u

Prije nego krenemo na modeliranje mreže u programskom paketu, najprije ćemo se upoznati s izgledom mreže, njezinim elementima, te i parametrima elemenata mreže. Za simulaciju imamo zadanu 220 kV mrežu, u kojoj moramo izračunati utjecaje među čvorovima, sa strane flicker, te analizirati rezultate i donijeti zaključak.



Slika 5.2 Zadana mreža za simulaciju

Na slici 5.2 imamo prikazanu zadanu mrežu koju trebamo modelirati u Powerfactory-u. Riječ je o mreži napona 220 kV, koja se sastoji od tri sabirnice 220 kV napona. Na sabirnicu 1

imamo priključen transformator 1 220/13,8 kV zajedno sa potrošačem P1 na naponu 220 kV, dok je na drugoj strani spojen generator snage 245 MVA. Nadalje na sabirnici 2 imamo priključen transformator 2 220/20 kV, na čijem je drugom kraju priključen potrošač elektrolučna peć, snage 40 MW, te nam upravo ona rezultira pojavom flickera u mreži. Na sabirnicu 3 priključena nam je aktivna mreža snage  $S_{k3} = 8000$  MVA. Sabirnice su povezane s 3 voda, tako da imamo vod V1, koji povezuje sabirnicu 3 i 1, zatim vod V2 koji povezuje sabirnice 1 i 2, te treći vod V3 koji povezuje sabirnice 2 i 3.

### 5.2.1 Parametri elemenata mreže

Parametri koji su korišteni za modeliranje mreže u programskom paketu PowerFactory nalaze se u tablicama ispod.

Ime	Faktor opterećenja	Napon kratkog spoja (%)	Snaga (MVA)
<b>T-1</b>	1	12,6	245
<b>T-2</b>	1	12	40

Tablica 5.1 Parametri transformatora

Ime	Djelatna snaga (MW)	Faktor snage
<b>P1</b>	250	0.85
<b>ELP</b>	40	1

Tablica 5.2 Parametri potrošača

Ime	Faktor snage	Reaktancija generatora (%)	Snaga (MVA)
<b>G1</b>	0,85	237	247

Tablica 5.3 Parametri generatora

Ime	R/X	Napon (kV)	$S_{k3}$ (MVA)
<b>Aktivna mreža</b>	1	220	8000

Tablica 5.4 Parametri aktivne mreže

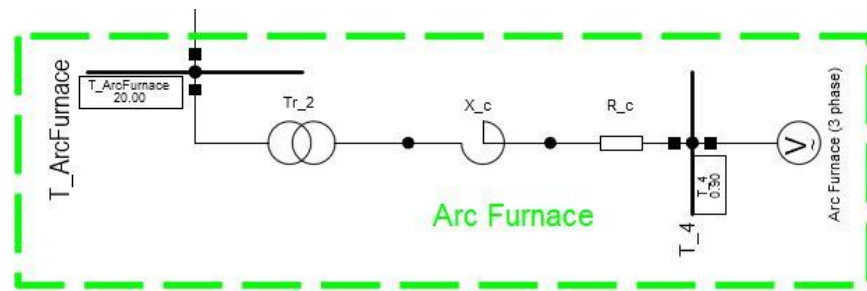
Ime	Duljina (km)	$R(\Omega /km)$	$X_d (\Omega /km)$	$B_d (\mu S/km)$
V1	65	0.06	0.41	2.8
V2	10	0.06	0.41	2.8
V3	36	0.06	0.41	2.8

Tablica 5.5 Parametri vodova

Nakon unesenih svih parametara pomoću programa PowerFactory smo modelirali mrežu unutar programa. Za sve elemente mreže smo koristili postojeće modele unutar sustava, te samo unosili svoje vrijednosti elemenata. Za potrošača, elektrolučnu peć smo koristili gotov model elektrolučne peći dostupna na službenim stranicama DIGSILENT-a, te smo ju prilagodili tako da ona iz mreže uzima onoliko radne snage koliko je i predviđeno, a to je 40 MW.

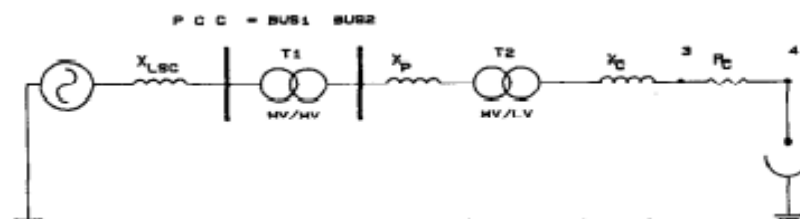
### 5.2.2 Model elektrolučne peći

Dok smo za sve ostale parametre samo upisivali parametre te koristili gotove tipove transformatora, vodova i tako dalje, za model elektrolučne peći smo uzeli gotov model koji smo pronašli na službenoj stranici od programskog paketa DIGSilent-a, te je model prikazan na slici ispod.



Slika 5.3. Model elektrolučne peći

Model elektrolučne peći je rađen prema [14] koji nama i odgovara, pa tako nismo radili neke velike promjene u strukturi, nego smo ga samo prilagodili na napon mreže, te podesili parametre ulaznog transformatora u elektrolučnu peć. Elektrolučna peć je rađena prema osnovnoj shemi koja je prikazana na slici ispod.



Slika 5.4 Osnovna shema za izradu modela elektrolučne peći

Elektrolučna peć je spojena na sabirnicu 1 (BUS 1) pomoću HV/MV transformatora, i napaja se preko MV/LV transformatora. Na strani peći se nalazi podesivi izvor napona pomoću kojeg mijenjamo snagu peći, te  $X_{LSC}$  koji predstavlja reaktanciju kratkog spoja na PCC, dok se na drugoj strani nalaze reaktancija  $X_C$  i otpor  $R_C$  koji predstavljaju vezu između elektrolučne peći i MV/LV transformatora. Simulacija električnog luka izvedena je s nelinearnim modelom opisana jednadžbom ispod.

$$V_a = V_{at} + \frac{C}{D + I_a} \quad (5.1)$$

U jednadžbi (5.1),  $V_a$  nam predstavlja napon luka, dok  $I_a$  predstavlja struju električnog luka. Veličina  $V_{at}$  nam predstavlja vrijednost napona kojoj se teži prilikom smanjenja ili povećanja vrijednosti struje., te je to usko povezano uz konstante  $C$  i  $D$ , koje spadaju u parametre elektrolučne peći prikazane na slici 5.5, kao i veličina  $V_{at}$ . Kako bi se stacionarni model luka doveo do nastanka fluktuacije napona, uzrok treperenja, strujno-naponska karakteristika mora sadržavati i vremenske varijacije koje odgovaraju vremenskoj ovisnosti duljine luka. To ćemo opisati formulom ispod.

$$V_a = kV_{a0}(I_a) \quad (5.2)$$

Gdje nam,  $V_{a0}$  predstavlja napon električnog luka za određenu referentnu duljinu luka  $l_0$ , koju zadajemo također u parametrima prikazanim na slici 5.5 Također odnos između duljine luka i napona možemo objasniti formulom 5.3. gdje nam  $l$  predstavlja duljinu luka, konstanta  $A$  pad napona na anodi i katodi, a pak konstanta  $B$  pad napona po jedinici duljine luka. Vrijednosti  $A$  i  $B$  također unosimo u parametre na slici 5.6.

$$V_{at} = A + Bl \quad (5.3)$$

Vremenske varijacije električnog luka kod modela elektrolučne peći imamo izražene pomoću formula na dva načina. Na prvi način vremenske varijacije su izražene preko sinusnog zakona, te ih prikazujemo pomoću formule 5.4.

$$l(t) = l_0 - \left(\frac{Dl}{2}\right) \cdot (l + \sin\omega t) \quad (5.4)$$

Gdje nam  $Dl$  maksimalne dopuštene varijacije duljine električnog luka, pa iz toga dobijemo vrijednost  $k$  koji je postavljen kao ulazna varijabla koja omogućuje realizaciju simulacija s duljinom luka bilo konstantnom ili vremenskom varijablom, te je dobijemo formulom 5.5.

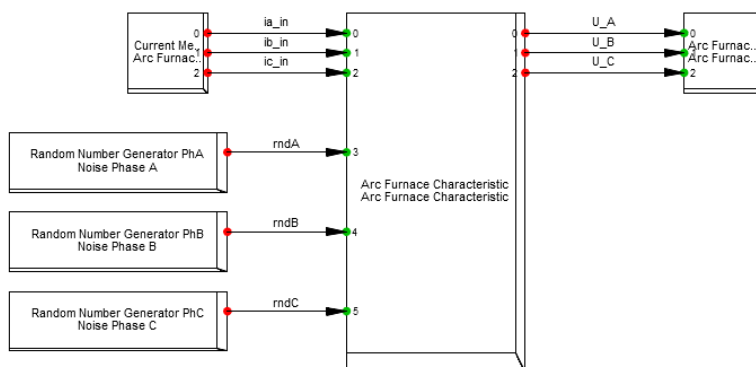
$$k(t) = l_0 - \frac{\left(\frac{BDl}{2}\right) \cdot (1 + \sin \omega t)}{A + B l_0} \quad (5.5)$$

Drugi način preko kojeg dobijemo vremenske varijacije električnog luka je korištenje slučajnih varijabli te su one izražene formulama 5.6 i 5.7, gdje nam  $l_0$  predstavlja maksimalnu dužinu električnog luka kompatibilna s kontinuiranim provođenjem i  $r(t)$  je zakon duljine luka varijacija u odnosu na referentni uvjet  $l_0$ . Signal  $r(t)$  je šum s pojasom u frekvencijskom području gdje fluktuacije napona proizvode treperenje.

$$l(t) = l_0 - r(t) \quad (5.6)$$

$$k(t) = l - \frac{B \cdot r(t)}{A + B l_0} \quad (5.7)$$

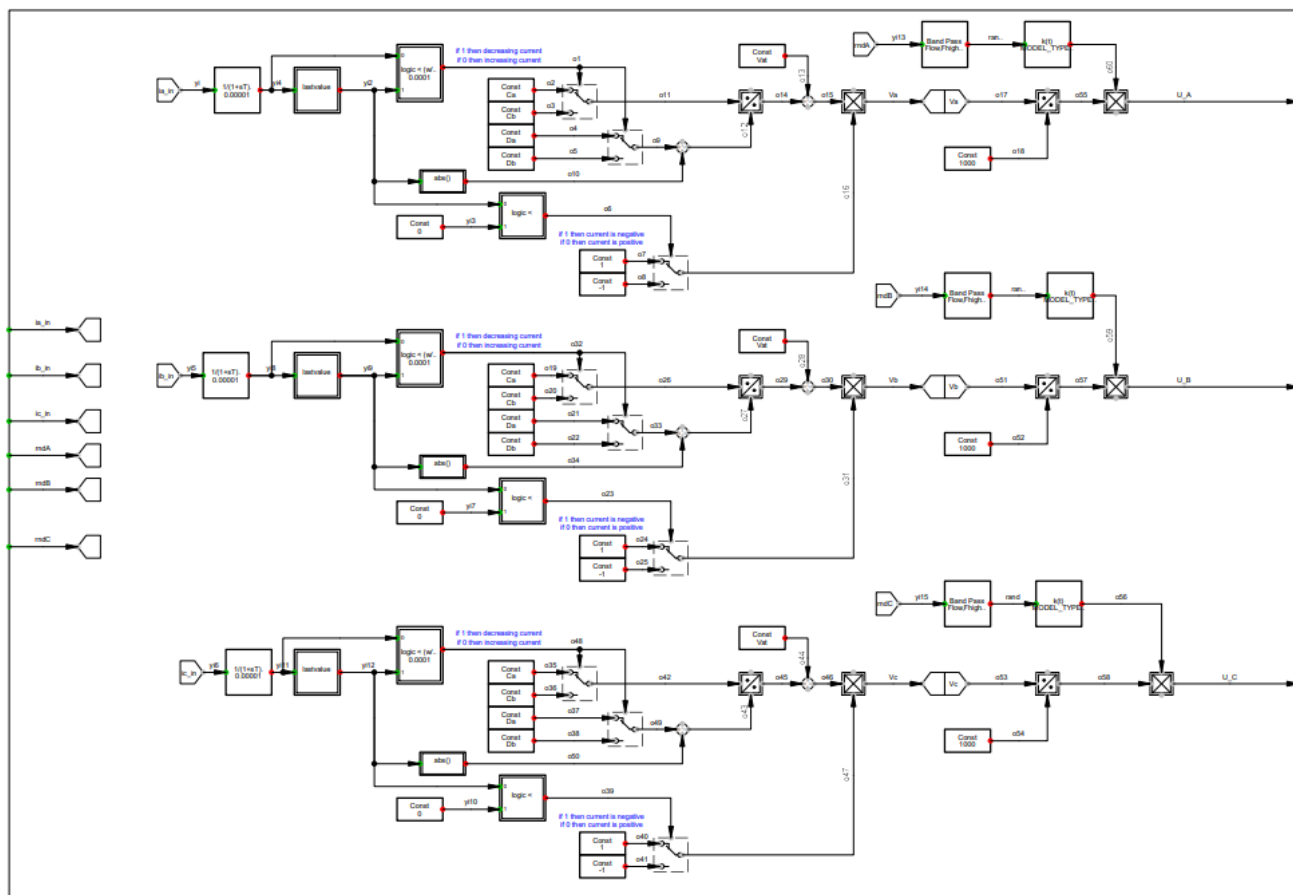
Model elektrolučne peći kojeg smo mi obradili koristi slučajne varijacije kao izvor flicker, te to također podešavamo u parametrima stroja kao prvu stavku (*MODEL TYPE*) gdje možemo izabrati da li će to biti sinusni zakon ili zakon slučajnih varijabli. Također smo proveli simulaciju i u slučaju sinusnog zakona, no ne dolazi do nekih značajnih promjena te su rezultati skoro identični. Elektrolučna peć je modelirana tako da mjeri vrijednosti struja na sve tri faze, te na osnovu toga regulira ulazne vrijednosti napona, to jest upravlja naponskim izvorom. Pa tako u osnovnoj konstrukciji imamo strujna mjerenja, ulazne vrijednosti generirane nasumičnim izborom broja, za sve tri faze, te karakteristike elektrolučne peći uz naponski izmjenični trofazni izvor napona, te to predstavlja osnovne dijelove ovog modela elektrolučne peći, a model same peći vidimo u blokovskom prikazu na slici ispod. [14]



Slika 5.5. Blokovski prikaz modela elektrolučne peći



Od ulaznih vrijednosti vidimo vrijednosti generirane nasumičnim izborom za sve tri faze prikazane pomoću *Random Number Generator*, rezultate strujnih mjerenja kao ulaz *Current measurement*, te vrijednosti idu u blok *Arc Furnace Characteristic*, gdje se obrađuju po blokovskoj shemi na slici 5.6, i daju izlazne vrijednosti u obliku napona za sve 3 faze.



Slika 5.6 Blokovski prikaz za Arc Furnace Characteristic

Slots	BlkSlot	Net Elements Elm*,Sta*,IntRef,IntVecobj
1	Arc Furnace Element	✓  Arc Furnace (3 phase)
2	Random Number Generator PhA	✓  Noise Phase A
3	Random Number Generator PhB	✓  Noise Phase B
4	Random Number Generator PhC	✓  Noise Phase C
5	Arc Furnace Characteristic	✓  Arc Furnace Characteristic
6	Current Measurement	✓  Arc Furnace Current

Slika 5.7. Dijelovi modela elektrolučne peći

Dijelovi ovog modela uglavnom su nepromjenjivi, jedini dio koji mi možemo mijenjati je dio gdje se unose karakteristike elektrolučne peći. Prilikom promjena karakteristika peći također dolazi i do

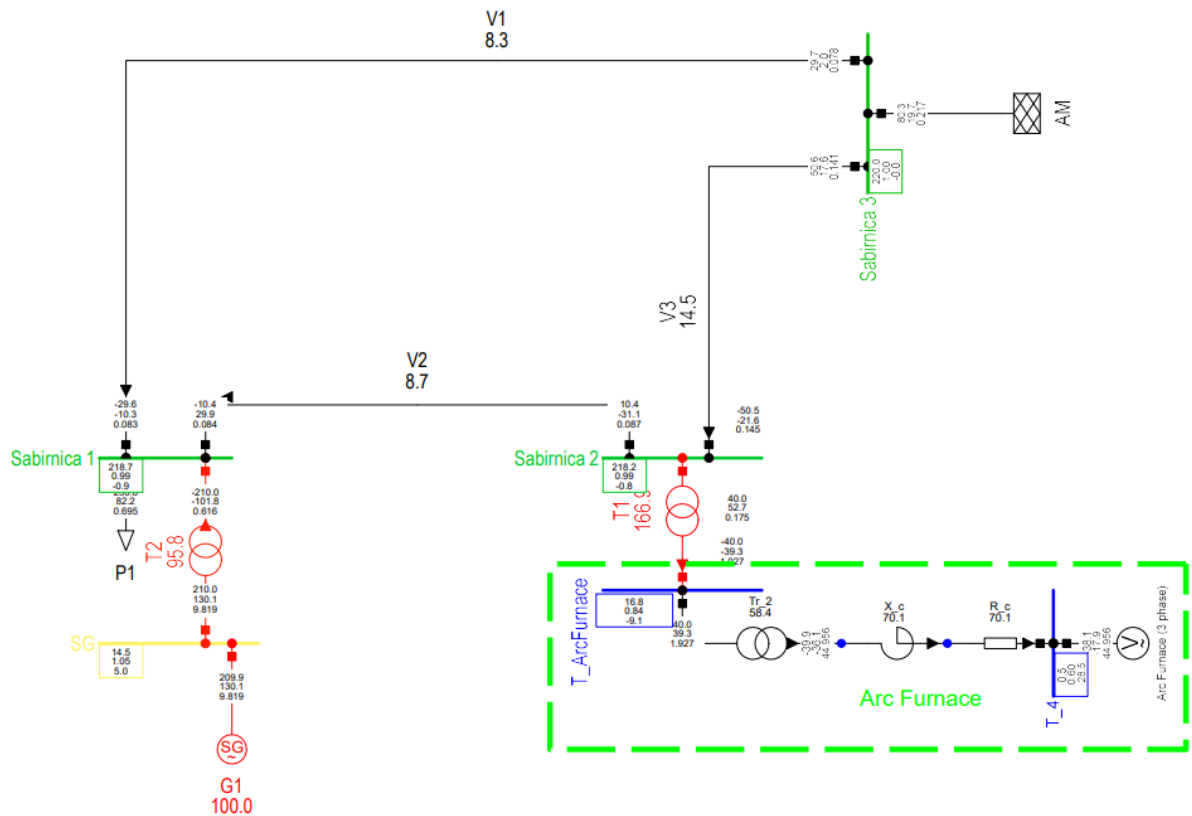
promjene flickera, no ne značajne promjene. Sve parametre koje je moguće mijenjat imamo prikazane na slici ispod, na kojoj se također nalaze vrijednosti tih parametara koje smo mi koristili u našem modelu.[13]

	Parameter
MODEL_TYPE Sinusoidal/Noise/Constant [0/1/2]	1.
A Anode-Cathode Voltage drop sum [V]	40.
B Voltage drop / unit arc length [V/cm]	10.
DI Maximum arc length variation [cm]	8.
I0 Reference arc length [cm]	10.
f_flicker Sinusoidal variation: Main Frequency [Hz]	10.
phi Sinusoidal variation: Phase shift [rad]	0.
Ca Constant C (increasing current) [W]	190000.
Cb Constant C (decreasing current) [W]	39000.
Da Constant D (increasing current) [A]	5000.
Db Constant D (decreasing current) [A]	5000.
Vat Threshold voltage value upon current increase (>0) [V]	200.
Flow Random Generator - Band Pass Low Freq. [Hz]	4.
Fhigh Random Generator - Band Pass High Freq. [Hz]	14.
H0 Random Generator - Band Pass Gain [p.u.]	10.

*Slika 5.8. Parametri elektrolučne peći*

### 5.2.3 Proračun tokova snage mreže

Kako bi bili sigurni da je sve pravilno spojeno proveli smo provjeru protoka snaga, uz pomoć *Load flow* funkcije programa Power factory, te pregledali sve rezultate, i prilagodili snagu elektrolučne peći. Proračun tokova snaga na našoj mreži možemo vidjeti na slici ispod, te uvidom na sliku zaključujemo da su sve vrijednosti protok snaga u redu, te da je aktivna snaga koju uzima elektrolučna peć 40 MW.



Slika 5.9 Load flow na zadanoj mreži

### 5.3 Proračun flickera na sabirnicama

Daljnje proračuni u programskom paketu Powerfactory obavljat ćemo u dijelovima programa pod nazivom *Power Quality* i *EMT simulation*. U dijelu *Power Quality* ćemo uz pomoć opcije flickermetra izračunati razine flicker-a pojedinih sabirnica. Izračun uz pomoć flickermetra temelji se na naponu jedne faze, čije rezultate povlačimo iz dokumenta koji nastaje uz pomoć EMT simulacije.

#### 5.3.1 Postupak izvršavanja proračuna

Prije nego krenemo na EMT simulaciju potrebno je podesiti flickermetar te odrediti intervale na kojima će određivati kratkotrajne, te dugotrajne vrijednosti flickera. U našem slučaju izabiremo da svakih 60 sekundi računa vrijednost kratkotrajne vrijednosti flicker, na na osnovu pet vrijednosti flickera izračunava vrijednost dugotrajnog flickera, to jest da dugotrajne flickere računa u razmaku od 5 minuta, ili 300 sekundi. Nakon podešenja flickermetra prelazimo na izradu rezultata, to jest na EMT simulaciju.

Prilikom pokretanja EMT simulacije također je potrebno unijeti te podesiti neke određene parametre. Prije svega određujem vrijeme trajanja simulaciju koje mora biti ekvivalentno sa vremenom koje je potrebno da flickermetar izračuna vrijednosti. U našem slučaju to vrijeme je 300 sekundi, te je tu potrebno dodati odstupanje u obliku dodatnog vremena od 5 sekundi, tako da će nam trajanje simulacije u našem slučaju iznositi 305 sekundi. Nadalje prije samog pokretanja simulacije potrebno je odrediti koje će parametre zapisivati, te na kojem mjestu će ih pohraniti. Pa prema tome određujemo lokaciju za *Result file*, a uz to i varijable koje će promatrati te pohraniti. Pa tako za unos varijabli uzimamo određenu potrebnu sabirnicu na kojoj želimo odrediti flickere, a parametar koji će mjeriti odabiremo  $m:U:A$ . Na osnovu spomenutog parametra flickermetar određuje vrijednosti kratkotrajnih te dugotrajnih vrijednosti flickera. Parametar  $m:U:A$ , možemo rastaviti na tri člana. Gdje na slovo m predstavlja riječ *Mesured* koja nam govori da je ta vrijednost mjerenja, slovo U govori da mjerimo napon, a pak A predstavlja fazu A. Pa tako mjerimo napon u fazi A na mjestu određene sabirnice. Nakon toga pokrenemo simulaciju, te čekamo da protekne vrijeme simulacije od 305 sekundi.

Nakon završetka simulacije, vraćamo se u dio programa pod nazivom Power Quality. Pokretanjem flickermetra određujemo datoteku iz koje flickermetar uzima rezultate, te odabiremo varijablu koju koristi u izračunu koja se nalazi u spomenutoj datoteci rezultata. Nakon toga izvršavamo izračun pomoć flickermetra, koji nam daje rezultate za određenu sabirnicu u izlaznom prozoru programa, to jest u *Output window*-u. Dobivene rezultate uspoređujemo sa dopuštenim vrijednostima kratkotrajnih i dugotrajnih flickera, te na osnovu toga donosimo zaključak. .[13]

### 5.3.2 Rezultati proračuna flicker-a u mreži

Za svaku sabirnicu proveli smo simulaciju u dužini od 305 sekundi te na osnovu toga pomoću flickermetra rađenog po standardu IEC dobili određene rezultate koje ćemo prikazati u sljedećim tablicama. Rješenja nakon proračuna preuzimamo iz output window-a, te analiziramo, imamo prikazane vrijednosti kratkotrajnih flickera na pet različitih vremenskih intervala, te se na osnovu tih intervala program računa vrijednost dugotrajnih flickera.

Mjesto proračuna:		Sabirnica 1 (220 kV)
Mjerenje broj:	Vrijeme mjerenja(s):	$P_{st}$ :
1	5.001 – 65.000	0.35
2	65.001 – 125.000	0.34
3	125.001 – 185.000	0.35
4	185.001 – 245.000	0.34
5	245.001 – 305.000	0.34
$P_{it}$ :		0.34

Tablica 5.6. Proračun flicker na sabirnici 1

Sabirnica 1 se nalazi na naponskom nivou od 220 kV što predstavlja visoki napon, a prema standardu na visokom naponu dopuštene emisije flicker prikazane su u tablici 4.4. Najveća vrijednost kratkotrajnih flickera koju susrećemo na sabirnici 1 je 0.35, te se ona nalazi ispod dopuštene granice od 0.8 prema standardu. Također kako pogledamo dugotrajne vrijednost flickera koji iznosi 0.34 također zadovoljava standard koji zahtjeva vrijednost manju od 0.6.

Mjesto proračuna:		Sabirnica 2 (220 kV)
Mjerenje broj:	Vrijeme mjerenja(s):	$P_{st}$ :
1	5.001 – 65.000	0.41
2	65.001 – 125.000	0.41
3	125.001 – 185.000	0.41
4	185.001 – 245.000	0.40
5	245.001 – 305.000	0.41
$P_{it}$ :		0.41

Tablica 5.7 Proračun flicker na sabirnici 2

Sabirnica 2 se također nalazi na naponu od 220 kV, te za kratkotrajne i dugotrajne vrijednosti vrijede pravili kao i za sabirnicu 1. Najveća vrijednost kratkotrajnih flickera na sabirnici 2 iznosi 0.41 što ulazi u okvir dopuštenih vrijednosti prema standardu. Nadalje vrijednost dugotrajnih flickera iznosi 0.41 što također zadovoljava standard IEC 61000 – 3 –7.

Mjesto proračuna:		Sabirnica 3 (220 kV)
Mjerenje broj:	Vrijeme mjerenja(s):	$P_{st}$ :
1	5.001 – 65.000	0.16
2	65.001 – 125.000	0.16
3	125.001 – 185.000	0.16
4	185.001 – 245.000	0.15
5	245.001 – 305.000	0.16
$P_{it}$ :		0.16

Tablica 5.8 Proračun flicker na sabirnici 3

Vrijednost flicker na Sabirnici 3 koja se nalazi na 220 kV, kao i sabirnice 1 i 2, ima puno niže vrijednosti flickera koje izaziva elektrolučna peć. Razlog toga je što je sabirnica 3 više udaljena od izvora treperenja, u usporedbi sa S1 i S2, pa možemo zaključiti da s povećanjem udaljenosti od izvora treperenja dolazi do opadanja vrijednosti flickera.

Mjesto proračuna:		Sabirnica T_ArcFurnance (20 kV)
Mjerenje broj:	Vrijeme mjerenja(s):	$P_{st}$ :
1	5.001 – 65.000	6.31
2	65.001 – 125.000	6.23
3	125.001 – 185.000	6.32
4	185.001 – 245.000	6.08
5	245.001 – 305.000	6.18
$P_{it}$ :		6.22

Tablica 5.9 Proračun flicker na sabirnici T\_ArcFurnance

Sabirnica T\_ArcFurnance se nalazi na naponskom nivou nižem nego li sabirnice koje smo prošli do sada. Naponski nivo ove sabirnice je 20 kV, te za taj naponski nivo postoje druge vrijednosti ograničenja za emitiranje flicker u mrežu. Vrijednosti 20 kV mreže ograničene su vrijednostima u tablici 4.3, to jest moraju bit manje od navedenih vrijednosti. Vrijednosti koje smo dobili su realne i vrlo visoke upravo zbog toga što je na tom mjestu spojena elektrolučna peć te imamo niži napon, pa prema tome i očekujemo velike vrijednosti flickera. Tim zaključujemo da smanjenjem udaljenosti između izvora treperenja i mjesta mjerenja dolazi do porasta vrijednosti flicker. Promjenjiva struja i prisutnost harmonika stvaraju pad napona na impedanciji

transformatora, te je upravo taj pad napona glavni uzrok flickera, te je on najviše vidljiv na sekundaru transformatora, te nije problematičan za ostatak mreže. Upravo zbog navedenog najveća vrijednost na sabirnici T\_ArcFurnance iznosi 6.32 što je puno veće od dopuštenih 0.9, prema tome taj dio mreže ne zadovoljava standard. Također i kada pogledamo dugotrajne vrijednosti flicker koji iznosi 6.22 puno je veći od dopuštenih 0.7, pa i po tom pitanju imamo odudaranje od standarda.

Tijekom izrade proračuna vršili smo simulacije za razne snage elektrolučne peći, to jest simulirali smo slučajeve kada elektrolučna peć ne uzima iz mreže svoju punu radnu snagu od 40 MW, nego pak recimo na pola snage to jest da uzima 20 MW iz mreže. U takvim slučajevima dolazi do promjene u vrijednostima flickera, no tek na 3 ili 4 decimalnom mjestu, te to ne predstavlja značajnije promjene kada govorimo o flickerima.

Zaključno iz rezultata mjerenja u usporedbi sa vrijednostima iz standarda naša mreža ne zadovoljava standarde u svim pogledima. Naime, na niskom naponu od 20 kV, gdje dolazi do priključka elektrolučne peći na mrežu imam prevelike vrijednosti flickera, razlog toga je sama elektrolučna peć, a uz to nemamo uređaja koji bi regulirao flickere, te smanjio njihovu vrijednost. U našoj mreži na naponu od 220 kV imamo prihvatljive vrijednosti flickera, te one ulaze u okvir standardnih vrijednosti, te nam u tom pogledu zadovoljava.

#### 5.4 Koeficijent prijenosa između sabirnica

Drugi dio našeg praktičnog rada je izračunati prijenosni koeficijent između pojedinih sabirnica, točnije odredit ćemo prijenosni koeficijent između sabirnica koje se nalaze na naponskom nivou od 220 kV. Kao što smo već obradili u teorijskom dijelu prijenosni koeficijent računamo uz pomoć formule ispod:

$$T_{PstAB} = \frac{Pst_A}{Pst_B} \quad (5.1)$$

Prijenosni koeficijent računamo uz pomoć formule 5.1, i označavamo ga sa  $T_{Pst}$ . Formula 5.1. prikazana je za prijenosni faktor između sabirnice A i sabirnice B. Po formuli vidimo da je prijenosni koeficijent jednak omjeru količine kratkotrajnih flickera u točki A, i količini kratkotrajnih flickera u točki B. Na osnovu ovog ćemo uz pomoć vrijednosti kratkotrajnih flickera koje smo dobili iz simulacije odrediti vrijednosti između sabirnica 1 i 2, 2 i 3 te naposljetku između 3 i 1. Rezultati su prikazani u sljedećoj tablici.

	<b>Napon</b>	<b>Sabirnica A</b>	$P_{stA}$	<b>Sabirnica B</b>	$P_{stB}$	$T_{PstAB}$
<b>Vod 2 (V2)</b>	220 kV	Sabirnica 1	0.34	Sabirnica 2	0.41	0.84
<b>Vod 3 (V3)</b>	220 kV	Sabirnica 3	0.16	Sabirnica 2	0.41	0.38

*Tablica 5.10. Koeficijent prijenosa između sabirnica na 220 kV*

Iz tablice vidimo vrijednosti prijenosa između pojedinih sabirnica kada govorimo o prijenosu flickera. Najveći prijenos susrećemo na prijenosu između sabirnice 2 i sabirnice 1 upravo zbog toga jer je preko sabirnice dva uključena elektrolučna peć. Kada govorimo o sabirnici 3 ona ima manji prijenosni faktor upravo zbog toga što je udaljenija od izvora flickera to jest elektrolučne peći, te glavni razlog zbog toga što je na sabirnicu 3 spojena aktivna mreža što rezultira manjom vrijednosti impedancije tog čvora prema masi.. Usporedbom sa vrijednostima u standardima kada je riječ o prijenosnom koeficijentu zaključujemo da su vrijednosti koeficijenta u skladu sa standardom.



## 6. ZAKLJUČAK

Pojam treperenja očituje se u tome da ljudsko oko uviđa titranje svjetlosti, to jest promjenu u intenzitetu svjetlosti. S električnog stajališta titranje napona je izazvano kolebanjem napona, to jest promjenom vrijednosti amplitude napona u nekom određenom vremenu. Neki od glavnih izvora titranja napona su elektrolučne peći, naponski među harmonici, vjetroelektrane i tako dalje. Upravo ti izvori izazivaju smanjenje faktora snage te generiranje harmonika i među harmonika, također uzrokuju promjenu momenta te klizanje električnih strojeva, te su to jedni od glavnih uzroka treperenja napona. Tijekom ovog rada obradili smo više vrsta izvora te načine na koje oni utječu na mrežu. Nadalje smo obradili i širenje mrežom treperenja, te metode uz koje možemo ublažiti to širenje. Upoznali smo se sa standardom IEC 61000–3–7, te njegovim zahtjevima kada govorimo o utjecaju postrojenja na pojavu flickera. Na kraju rada smo cijelu teoriju poduprli jednim primjerom, te u programskom paketu PowerFactory simulirali zadanu mrežu te dobivene rezultate usporedili sa uvjetima koje smo dobili iz standarda IEC 61000–3–7. Model smo napravili prema zadanoj mreži, te sa zadanim parametrima, dok smo za elektrolučnu peć koristili gotov model dostupan na DigSilent stranici. Simulaciju smo odradili s u dva dijela i to prvo dobili rezultate promjena napona pomoću EMT simulacije, a zatim uz pomoć *Power Quality* dijela programa uz pomoć flickermetra dobili vrijednosti flicker na pojedinim sabirnicama u mreži.

U današnjem svijetu, kada je ne zamisliv život bez električne energije, te gdje svaki pojedinac troši električnu energiju jako je teško dobiti kvalitetnu električnu energiju. Kada kažemo kvalitetna električna energija, to se odnosi na energiju gdje nećemo imati treperenja napona, te će se napon uvijek održavati na konstantnim razinama, uz to kao glavni faktor kvalitete električne energije, tu imamo i ostale faktore koji utječu na kvalitetu električne energije, a to su sama konstrukcija mreže, opterećenje i tako dalje. Iako zvuči ne moguće i jako teško uz razvoj tehnologije, te povećanim brojem istraživanja na temu kvalitete električne energije, dobiveni su rezultati čijom primjenom ostvarujemo kvalitetniju električnu energiju, pa s tim vjerujem da je moguće u budućnosti postići mrežu s jako kvalitetnom električnom energijom. Na kraju treba spomenuti i to da mi kao svaki pojedinac utječemo na kvalitetu električne energije, pa s tim gledano, uz osviještenost ljudi da treba smanjiti promjene opterećenja koje stvaraju u mreži, već smo korak bliže kvaliteti kakvu želimo.

## **7. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLESKOM JEZIKU**

U ovom diplomskom rada smo definirati pojam treperenja napona ili takozvanih flickera u mreži, koji dovode do treperenja svijetlosti izazvani uslijed promjena napona u određenim vremenskim razmacima, čija posljedice mogu biti uslijed promjena u opterećenju i porastom izlazne snage generatora. Nakon što smo obradili osnovne pojmove upoznali smo se s izvorima spomenutih flickera. Zatim smo matematički i uz pomoć fizikalnih veličina prikazali treperenja, dopuštene razine treperenja i mogućnost smanjenja utjecaja treperenja na mrežu. U drugom dijelu rada smo analizirali utjecaj postrojenja na razine treperenja napona prema normi IEC 61000 – 3 – 7. U praktičnom dijelu rada smo u programskom paketu DIgSilent PowerFactory simulirali zadanu mrežu kojoj smo izračunali razine treperenja na određenim mjestima. Uz pomoć EMT simulacije smo dobili vrijednosti promjene napona na određenim sabirnicama, te uz pomoć flickermetra izračunali dugotrajne i kratkotrajne vrijednosti flickera, koje smo usporedili s dopuštenim vrijednostima iz standarda, i donijeli zaključak na osnovu usporedbe.

Ključne riječi: treperenje napona, flickeri, elektrolučne peći, kolebanje napona, harmonici, IEC 61000 – 3 – 7, širenje treperenja, utjecaj treperenja, emisije.

In this masters thesis, we defined the concept of voltage flickering or so-called flickers in the network, which lead to flickering of light caused by changes in voltage in certain time intervals, the consequences of which can be due to changes in the load and an increase in the output power of the generator. After dealing with the basic terms, we got acquainted with the sources of the mentioned flickers. Then, mathematically and with the help of physical quantities, we presented the flickering, the permitted levels of flickering and the possibility of reducing the impact of flickering on the network. In the second part of the work, we analyzed the influence of the plant on voltage flicker levels according to the IEC 61000 – 3 – 7 standard. In the practical part of the work, we simulated the default network in the DIgSilent PowerFactory program package, which we calculated the flicker levels at certain places. With the help of EMT simulation, we obtained the voltage change values on certain buses, and with the help of a flickermeter, we calculated the long-term and short-term flicker values, which we compared with the permitted values from the standard, and reached a conclusion based on the comparison.

Key words: voltage flicker, flickers, electric arc furnaces, voltage fluctuations, harmonics, IEC 61000 – 3 – 7, flicker propagation, flicker influence, emissions.

## LITERATURA

- [1] J. Schlabbach, D. Blume i T. Stephanblome, Voltage Quality in Electrical Power Systems, IET, Power and Energy Series 36, London, 2000.
- [2] Z. Hanzelka, Application note voltage fluctuations in power networks („Flicker“), 2014.
- [3] I.Ivšinović, Diplomski rad - Kvaliteta električne energije, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2003.
- [4] Ž. Novinc, Priručnik – Kvaliteta električne energije, Elektrotehnički fakultet, Osijek, 2006.
- [5] A. Baggini, Handbook of power quality, University of Bergamo, Italy, 2008.
- [6] Lasić, M. , Nekić, S. , Šimić, J. , Tomasović, A. , Veža, M. , Škrlec, D.: Utjecaj vjetroagregata s promjenjivom brzinom vrtnje na kvalitetu napona. HO CIRED, Šibenik, 2008.
- [7] K. Krejča, Diplomski rad – Kvaliteta električne energije – naponsko treperenje, Elektrotehnički fakultet Osijek, 2015
- [8] IEEE – IEC 61000-3-7 Electromagnetic compatibility EMC – Limits – Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems, 2012.
- [9] T. Pirić – Utjecaj vjetroelektrane na naponsko treperenje u elektroenergetskom sustavu, Osijek, 2017.
- [10] Predavanje Razdjelne mreže i distribuirana proizvodnja – Kvaliteta električne energije, FER ZG, 2020.
- [11] Internet stranica DIgSILENT: <https://www.digsilent.de/en/features.html> (Datum: 04.09.2022)
- [12] T. Varga, Diplomski rad – Modeliranje i analiza flikera u simulacijskom sučelju, Osijek, 2017.
- [13] <https://www.digsilent.de/en/faq-reader-powerfactory/do-you-have-an-example-of-an-arc-furnace-model-and-a-statcom-that-mitigates-the-generated-flicker.html> Datum:3.10.2022

- [14] G. C. Montanari, M. Loggini, A. Cavallini, L. Pitti, D. Zaninelli : ARC-FURNACE MODEL FOR THE STUDY OF FLICKER COMPENSATION IN ELECTRICAL NETWORKS, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol.9