

Branko Posedel, dipl.ing.el.  
HEP-ODS d.o.o. Elektroistra Pula, Pogon Buje  
[branko.posedel@hep.hr](mailto:branko.posedel@hep.hr)

Mr.sc. Davor Mišković, dipl.ing.el.  
HEP-ODS d.o.o. Elektroistra Pula  
[davor.miskovic@hep.hr](mailto:davor.miskovic@hep.hr)

Doc. dr. sc. Srđan Žutobradić  
Hrvatska energetska regulatorna agencija, Zagreb  
[szutobradic@hera.hr](mailto:szutobradic@hera.hr)

## MODEL ZA PROCJENU EMISIJA VIŠIH HARMONIKA U OPSKRBNU MREŽU KOD PRIKLJUČENJA NOVIH KUPACA

### SAŽETAK

Instalacije i postrojenja budućih korisnika mreže moraju se projektirati i graditi tako da pri pogonu njihovo povratno djelovanje na mrežu ne prelazi planirane i propisane razine. U ovom radu prikazan je matematički model izračuna dopuštene razine emisije strujnih harmonika (eng. emission limit) u opskrbnu mrežu i dopuštenog udjela nelinearnog opterećenja u ukupnom opterećenju projektiranog objekta budućeg korisnika mreže. Planirane razine strujnih harmonika i način računanja njihove dopuštene emisije određuju operateri mreže koje objavljuju u svojim direktivama, tehničkim uvjetima i raznim pravilima struke. Na osnovu poznatih parametara mreže u točki priključka i priključne snage objekta, prikazana je primjena te metode za slučaj priključka jedne poslovne banke na NN mrežu operatera.

**Ključne riječi:** struje viših harmonika, nelinearno opterećenje, povratno djelovanje, faktori harmonijskog izobličenja, razine emisije, snaga izobličenja, snaga trolnog kratkog spoja

## AN EVALUATION MODEL FOR THE EMISSION OF HIGHER HARMONICS IN THE SUPPLY DISTRIBUTION NETWORK AT THE CONNECTION OF NEW CUSTOMERS

### ABSTRACT

Facilities and installations of future users have to be designed and constructed in the way that during operation their return effect on the network does not exceed the planned and prescribed levels. This work presents a mathematical model for both computing the emission limit of current harmonics in the supply distribution network and for the allowed share of the nonlinear load in the total load of the designed object for a future network user. The planned levels of current harmonics and the way of calculating their emission are determined by network operators who publish them in their directives, technical conditions and professional rules of different kinds. Based on the known network parameters in the connection point and the object's connecting power, an application of the method in the case of connecting one commercial bank to the LW operator's network is shown.

**Keywords:** electricity of higher harmonics, nonlinear load, return effect, factor of harmonic distortion, emission level, distortion power, short circuit power

## 1. UVOD

Generirani harmonici struja  $I_h$  novog korisnika mreže na frekvencijski ovisnom impedancijom mreže  $Z_h$  stvaraju padove napona viših harmonika koji se superponiraju na opskrbi napon i tako ga izobličuju. Zbog sve veće zastupljenosti tih nelinearnih trošila u odnosu na ukupnu snagu priključenog korisnika, za očekivati je sve veće izobličenje opskrbnog napona. To povratno djelovanje na izobličenje napona ovisi o više parametara i definirano je relacijom:

$$\Delta THD_U = f(I, THD_I, Z) \quad (1)$$

gdje je:

- $\Delta THD_U$  - dodatno izobličenje napona na mjestu priključka
- $I$  - ukupna struja priključenog korisnika mreže
- $THD_I$  - vrijednost faktora strujnog izobličenja izazvanog nelinearnim trošilima u instalaciji kupca
- $Z$  - nadomjesna impedancija mreže u točki priključka

Mrežni operator koji osigurava kompatibilnost svoje mreže mora dobiti na uvid procjenu veličine povratnog utjecaja na mrežu svakog novog priključenog korisnika mreže koji ne zadovoljava uvjet:

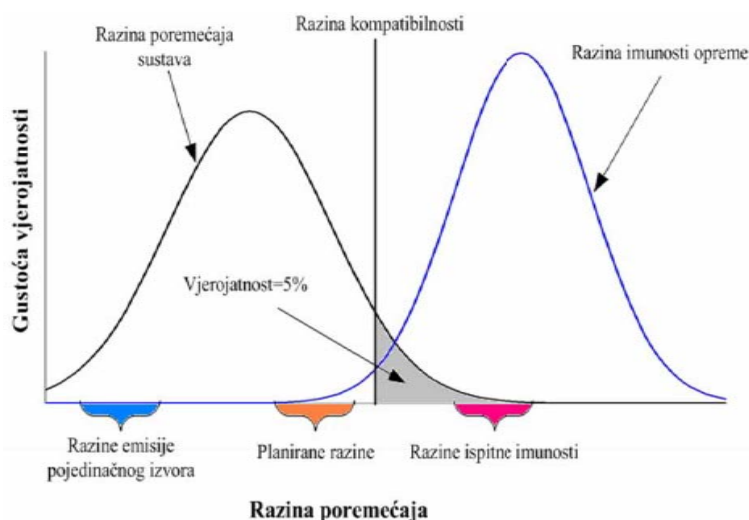
$$\frac{S_K}{S} \leq 1000 \quad \text{za srednji napon}$$
$$\frac{S_K}{S} \leq 150 \quad \text{za niski napon}$$

gdje je:

- $S_K$  - snaga trolnog kratkog spoja na mjestu priključenja (MVA)
- $S$  - ukupna snaga korisnika mreže (MW)

## 2. NORME IZ ELEKTROMAGNETSKE KOMPATIBILNOSTI

Međunarodna elektrotehnička komisija (IEC) i Europski komitet za elektrotehničku normizaciju (CENELEC) donijeli su općenit pristup normizaciji u elektromagnetskoj kompatibilnosti. U normama se uvodi stohastički pristup gdje ne postoji strogo određen limit pojedinog harmonika, već se propisuje da u normalnim pogonskim uvjetima, tijekom perioda od jednog tjedna, 95% 10-minutnih srednjih efektivnih vrijednosti svakog pojedinog harmonika napona mora biti manje ili jednako zadanim vrijednostima. Na slici 1. prikazana je gustoća vjerojatnosti poremećaja i imunosti opreme. Razina kompatibilnosti mreže, razine ispitne imunosti opreme i aparata te razine emisije pojedinog uređaja određuju se normama, dok planiranu razinu poremećaja u nekom čvorištu mreže određuje operator mreže. Norme koje određuju navedene razine su:



Slika 1. Gustoća vjerojatnosti poremećaja i imunosti opreme

**a. Norme za razine kompatibilnosti mreže**

- IEC 61000-2-2, za niskonaponske mreže
- IEC 61000-2-12, za srednjenaponske mreže
- IEC 61000-2-4, za industrijske mreže
- EN 50160, za distribucijske mreže niskog i srednjeg napona

**b. Norme za ograničenja emisije harmonika**

- IEC 61000-3-2, ograničenje emisije harmoničkih struja za opremu (do 16 A)
- IEC 61000-3-12, ograničenje emisije harmoničkih struja za opremu (> 16 A)
- IEEE 519, ograničenja harmoničkih struja i napona u točki priključka (mjerjenja)

**c. Norma za razinu imunosti**

- IEC 61000-4-13, razina imunosti sukladno različitim kriterijima izvedbe električne opreme

**3. PRORAČUN DOZVOLJENE EMISIJE STRUJNIH HARMONIKA U OPSKRBNU MREŽU**

Razina kompatibilnosti za ukupno izobličenje napona  $THD_U$  i vrijednosti pojedinih viših harmonika napona  $U_h$  određena je normom HRN EN 50160:2008. Razina kompatibilnosti mreže služi i kao podloga pomoću koje operator mreže određuje planiranu razinu smetnji koja mora biti niža od razine kompatibilnosti. Novi korisnik mreže može biti priključen u zadano čvorište samo ako proizvodi količinu smetnji u zadanim razinama određenim od operatora mreže. HEP ODS je tu razinu smetnji za priključak na 0,4 kV, definirao tako da vrijednost dodatnog faktora izobličenja napona  $\Delta THD_U$  na mjestu priključenja, uzrokovanog emisijom strujnih harmonika priključenog korisnika mreže mora biti manje od 2,5 %. Ta razina smetnji navedena je u elektroenergetskoj suglasnosti budućeg korisnika mreže. Ovaj način definiranja razine smetnji koji je na prvi pogled jednostavan može stvoriti dosta problema projektantu koji provodi tu računsku analizu. Naime da bi se mogao izračunati faktor izobličenja napona potrebno je poznavati amplitudni i fazni harmonijski spektar struja pojedinih nelinearnih uređaja i impedanciju mreže. To je kod velike većine projektiranih objekata sa puno nelinearnih trošila malih snaga gotovo nemoguće.

Austrijska regulatorna agencija E-CONTROL u "Direktivi o procjeni utjecaja na mrežu" pod nazivom TOR D2, prikazala je metodu proračuna koja "zaobilazi" navedeni problem. Tu metodu koja je ovdje prikazana zbog svoje jednostavnosti koriste neki od operatora sustava u EU, a primjenjiva je za priključak nelinearnih trošila na niskom i srednjem naponu.

**3.1. Dozvoljena razina strujnih harmonika i faktora ukupnog strujnog izobličenja**

Za izračun dozvoljene emisije strujnih harmonika u mrežu operatora sustava, potrebno je poznavati snagu trolnog kratkog spoja na mjestu priključka i ukupnu snagu budućeg korisnika mreže. Dozvoljeni iznos struje pojedinog harmonika iznosi:

$$I_h \leq I_n \frac{P_n}{1000} \cdot \sqrt{\frac{S_K}{S}} \quad (2)$$

gdje je:

$I_h$  -vrijednost struje pojedinog harmonika (A)

$I_n$  - ukupna struja priključenog korisnika (A)

$P_n$  - koeficijent

$S_K$  - snaga trolnog kratkog spoja na mjestu priključenja (MVA)

Preporučene vrijednosti koeficijenta  $P_n$  za sve neparne harmonike prikazane su u tablici III.

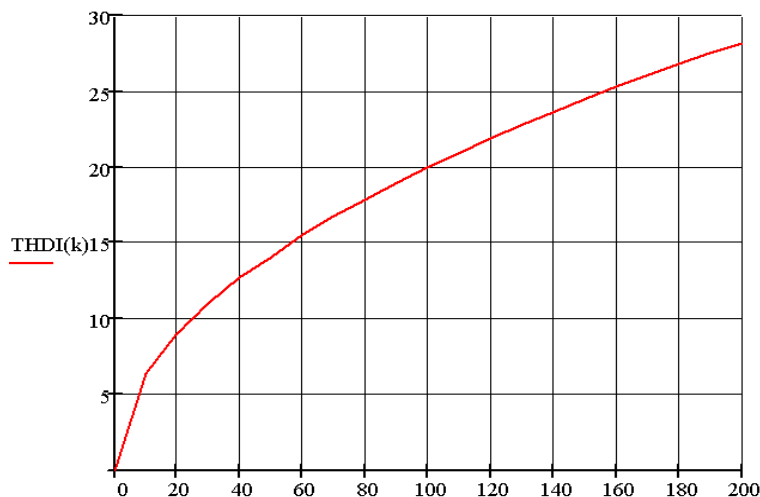
Tablica I. Preporučene vrijednosti koeficijenta  $P_n$  za neparni red harmonika

$h$	3	5	7	11	13	17	19	>19
$P_n$	6	15	10	5	4	2	1.5	1

Ukupni dozvoljeni iznos faktora izobličenja struje  $THD_I$  mora biti:

$$THD_I \leq \frac{20}{1000} \cdot \sqrt{\frac{S_K}{S}} \cdot 100 \quad (3)$$

Na slici 2. prikazan je graf dozvoljenih vrijednosti  $THD_I$  u ovisnosti o omjeru  $S_K/S$  na mjestu priključenja.



Slika 2.  $THD_I$  (%) kao funkcija omjera  $S_K/S$

Stvarna emisija strujnih harmonika budućeg korisnika ovisi o snazi nelinearnih trošila instaliranih u postrojenju. Nelinearna trošila podijeljena su u dvije grupe u odnosu na intenzitet emisije harmonika i to:

- **Grupa 1:** nelinearna trošila s niskim intenzitetom emisije harmonika snage  $S_{o1}$ , čiji je  $THD_I$  između 10 i 25 % (12-pulsni ispravljači, fluorescentna rasvjeta s magnetskom prigušnicom)
- **Grupa 2:** nelinearna trošila s srednjim i visokim intenzitetom emisije harmonika snage  $S_{o2}$  čiji je  $THD_I \geq 25\%$  (6-pulsni ispravljači, trofazni regulatori brzine AM, aparati za zavarivanje, televizori, računala, zabavna elektronika, fluorescentna rasvjeta s elektronskom prigušnicom)

Ukupnu snagu istovremeno priključenih nelinearnih trošila u projektiranom postrojenju računamo:

$$S_o = 0.5 \cdot S_{o1} + S_{o2} \quad (4)$$

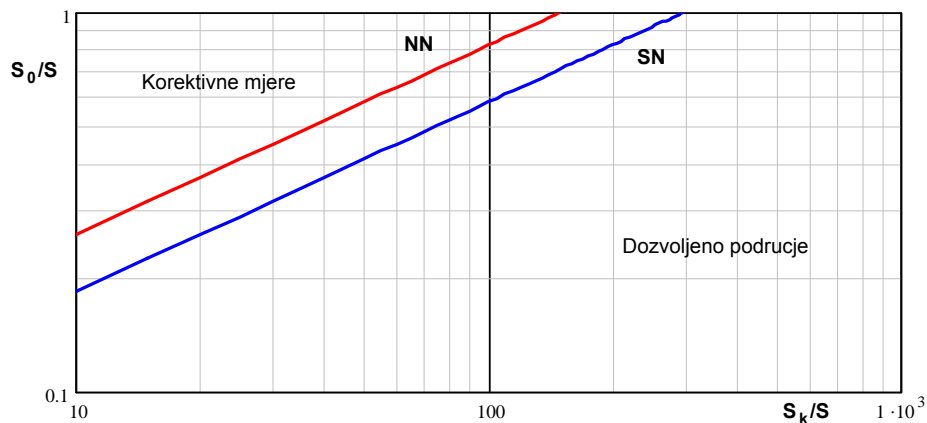
Dozvoljeni udio istovremeno priključenih nelinearnih opterećenja u ukupnoj snazi budućeg korisnika mreže mora biti:

$$S_o \leq S \cdot b \cdot \sqrt{\frac{S_K}{S}} \quad (5)$$

gdje je:

$b$  - faktor procjene  
 za niskonaponske mreže  $b = 0,082$   
 za srednjenaponske mreže  $b = 0,058$

Nejednadžbu (5) podijeljenu sa ukupnom snagom  $S$  prikazuje slika 3. Ukoliko se sjecište pravaca zadanih omjera  $S_K/S$  i  $S_o/S$  nalazi ispod zadanog pravca tada se postrojenje može bez posebnih mjera priključiti na mrežu operatora jer je tada emisija strujnih harmonika u dozvoljenim granicama. Ukoliko je točka sjecišta iznad pravca tada se budućeg korisnika mreže ne može priključiti na mrežu bez dodatnih mjera, kao što su ugradnja adekvatnih pasivnih ili aktivnih filtera.



Slika 3. Dijagram dozvoljenog nelinearnog opterećenja za NN i SN mreže

### 3.2. Praktičan primjer proračuna

Prikazane su dvije varijante priključka jedne poslovne banke i primjeri proračuna dozvoljenih emisija strujnih harmonika za oba slučaja i to:

- priključak direktno na sabirnice NN u TS SN/NN.
- priključak kabelom PPOO - A (4 x 150 mm<sup>2</sup>), dužine 150 m

Parametri koji su potrebni za proračun dozvoljene emisije harmonika su:

- priključna snaga poslovne zgrade:  $S = 100 \text{ kVA}$
- podaci transformatora u TS SN/NN:  $S_T = 400 \text{ kVA}$ ,  $u_K = 4\%$
- impedancija kabela PPOO - A (4 x 150 mm<sup>2</sup>):  $Z_K \approx 0,2 \Omega / \text{km}$
- podaci nelinearnih trošila koji istovremeno rade prikazani su tabelarno u tablici II.

Tablica II. Podaci nelinearnih trošila u zgradi poslovne banke

Nelinearno trošilo	Grupa 1	Grupa 2
10 osobnih računala		9 kVA
30 monitora		6 kVA
15 terminala		4,5 kVA
5 printera		4 kVA
Fax		0,5 kVA
UPS – sistem		10 kVA
Lift		5 kVA
Fluorescentna rasvjeta	10 kVA	
Klima uređaji		9 kVA
<b>Sveukupno</b>	<b><math>S_{01} = 10 \text{ kVA}</math></b>	<b><math>S_{02} = 48 \text{ kVA}</math></b>

Ukupno nelinearno opterećenje iznosi:

$$S_0 = 0,5 \cdot S_{01} + S_{02} = 53 \text{ kVA}$$

### 3.3. Priključak neposredno na sabirnice NN u TS SN/NN

Projektirana nominalna struja budućeg objekta poslovne banke:

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_n} = 144 \text{ A}$$

Dozvoljena razina strujnih harmonika izračunata po nejednadžbi (2) prikazana je u tablici III.

Tablica III. Dozvoljene vrijednosti strujnih harmonika

<b><i>h</i></b>	3	5	7	11	13	17	19	>19
<b><i>P<sub>n</sub></i></b>	6	15	10	5	4	2	1.5	1
<b><i>I<sub>h</sub>(A)</i></b>	8.6	22	14	7.2	5.8	2.9	2.2	1.4

Dozvoljena vrijednost faktora ukupnog strujnog izobličenja je:

$$THD_I = \frac{20}{1000} \cdot \sqrt{\frac{S_{K1}}{S}} = 0,2 = 20\%$$

Provjera dozvoljenog udjela nelinearnih uređaja u ukupnoj snazi novog korisnika mreže:

- Snaga trofaznog kratkog spoja na NN sabirnicama transformatora iznosi:

$$S_{K1} = \frac{S_T}{u_K} \cdot 100 = 10MVA$$

- Omjeri između  $S_{K1}$  i  $S$  te  $S_o$  i  $S$  iznose:

$$\frac{S_o}{S} = 0,53 \quad ; \quad \frac{S_{K1}}{S} = \frac{10}{0,1} = 100$$

$$S_o \leq b \cdot S \cdot \sqrt{\frac{S_{K1}}{S}}$$

$$0,053 < 0,082$$

Uvjet iz nejednadžbe (5) je zadovoljen što znači da se točka na dijagramu ( $S_o/S$  ;  $S_{K1}/S$ ) nalazi u dozvoljenom području, tj. ispod krivulje koja se primjenjuje za priključak na NN. Operator će dozvoliti priključak novog korisnika mreže bez posebnih uvjeta. Naravno da operator zadržava pravo (koje unosi u Ugovor o korištenje mreže) mjerenja razine emisije harmonika u opskrbnu mrežu nakon priključenja.

### 3.4. Priključak kabelom PPOO-A (4x150 mm<sup>2</sup>), dužine 150 m

Priključak kabelom iz TS SN/NN na navedenu udaljenost na kojoj se nalazi objekt, uzrokuje promjenu impedancije i snage trofaznog kratkog spoja  $S_K$  u točki priključka, a time i dozvoljene razine strujnih harmonika  $I_h$  i faktora ukupnog strujnog izobličenja  $THD_I$ . Zbog povećanja impedancije u točki priključka mijenjaju se i parametri koji određuju dozvoljenu razinu emisije strujnih harmonika u mrežu.

$$Z_K \approx 0,2\Omega/km \cdot l = 0,03\Omega$$

$$S_{K2} \approx \frac{U_n^2}{Z_T + Z_K} = 3,5MVA \quad \frac{S_{K2}}{S} = \frac{3,5}{0,1} = 35$$

Dozvoljene vrijednosti strujnih harmonika izračunate pomoću nejednadžbe (2) prikazane su u tablici IV.

Tablica IV. Dozvoljene vrijednosti strujnih harmonika

<b><i>h</i></b>	3	5	7	11	13	17	19	>19
<b><i>P<sub>n</sub></i></b>	6	15	10	5	4	2	1.5	1
<b><i>I<sub>h</sub>(A)</i></b>	5.11	12.8	8.6	4.3	3.4	1.7	1.28	0.85

Dozvoljena vrijednost faktora ukupnog strujnog izobličenja je:

$$THD_I = \frac{20}{1000} \cdot \sqrt{\frac{S_{K2}}{S}} = 0,12 = 12\%$$

Dozvoljeni iznos snage nelinearnih uređaja  $S_o$  u ukupnom opterećenju mora biti:

$$S_o \leq b \cdot S \cdot \sqrt{\frac{S_{K2}}{S}} \quad 0,053 > 0,049$$

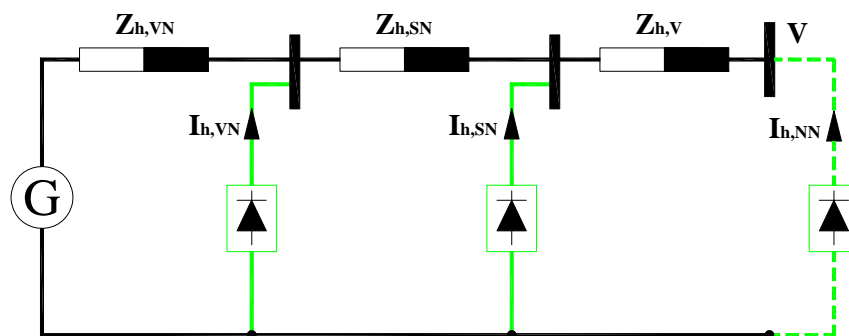
Zbog smanjenog omjera  $S_{K2}/S$  uvjet iz nejednadžbe (5) nije zadovoljen. Točka na dijagramu ( $S_o/S$ ;  $S_{K2}/S$ ) je u nedozvoljenom području iznad pravca. Operator neće dozvoliti priključak novog korisnika mreže bez korektivnih mjera smanjenja strujnih harmonika. Naravno da u tom slučaju operator obavezno zadržava pravo (koje također unosi u Ugovor o korištenje mreže) mjerenja strujnih harmonika nakon primijenjenih korektivnih mjera.

#### 4. PRORAČUN PLANIRANE RAZINE STRUJNIH HARMONIKA

U ovom radu prikazan je način izračuna planiranih razina strujnih harmonika koje utiskuju svi nelinearni uređaji priključeni na niskonaponske sabirnice jedne gradske TS 10(20)/0,4 kV, nominalne snage 1000 kVA. Jednofazni izvori strujnih harmonika, koji su priključeni na niskonaponsku mrežu, zbog velikog broja, na razini TS 10(20)/0,4 kV statistički se mogu promatrati kao simetričan izvor strujnih harmonika. Za izračun planiranih razina strujnih harmonika potrebno je odrediti planiranu razinu harmonika napona, impedancije u frekvencijskom području ekvivalentne SN mreže i Theveninovu impedanciju čvora na niskonaponskoj strani transformatora. Nakon određivanja planiranih razina pojedinog višeg harmonika napona i frekvencijski ovisne Theveninove impedancije u čvoru „V“ za određeni harmonik, računaju se planirane razine strujnih harmonika utisnute u niskonaponske sabirnice TS SN/NN.

##### 4.1. Faktor naponske razine mreže

Pored harmonijskih struja „ $I_{h,NN}$ “ utisnutih na niskonaponske sabirnice u TS SN/NN (čvor „V“) na harmonijske padove napona na impedanciji „ $Z_{h,V}$ “ doprinose i harmonijske struje nelinearnih tereta priključenih na visokom naponu ( $I_{h,VN}$ ) i srednjem naponu ( $I_{h,SN}$ ). Raspodjela utisnutih harmonijskih struja po naponskim nivoima prikazuje slika 6.



Slika 6. Raspodjela utisnutih harmonijskih struja po naponskim nivoima

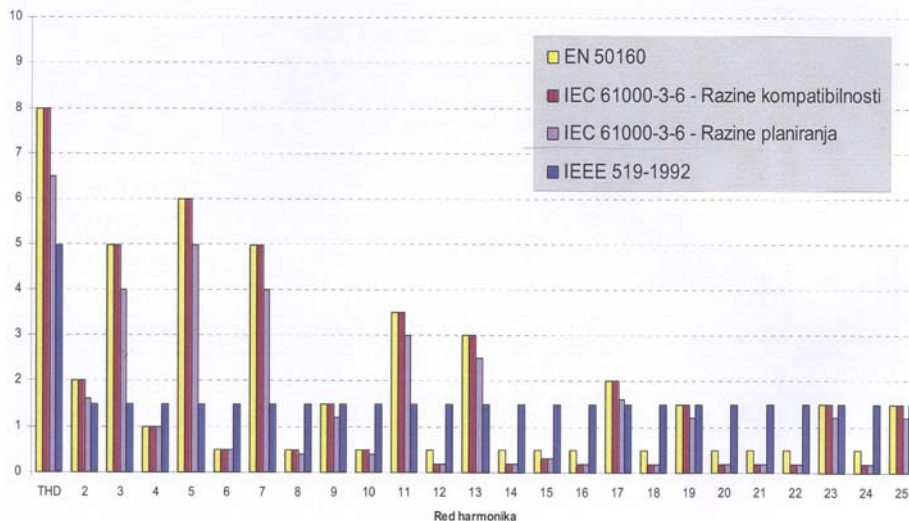
Sumarna harmonijska struja ( $I_{h,VN} + I_{h,SN} + I_{h,NN}$ ) na impedanciji „ $Z_{h,V}$ “ stvara harmonijske napone čiji iznos mora biti manji od iznosa definiran normom EN 50160:1999. Udio pojedinih harmonijskih struja na vrijednost harmonijskih napona na impedanciji „ $Z_{h,V}$ “ određujemo pomoću faktora naponske razine mreže. Približne vrijednosti faktora razine mreže [5] iznose:

- VN mreža:  $k_{N,VN} = 0,1 \dots 0,3$
- SN mreža:  $k_{N,SN} = 0,4 \dots 0,7$
- NN mreža:  $k_{N,NN} = 0,2 \dots 0,3$

Suma faktora naponske razine mreže mora biti jedan (1). Za proračun planirane razine harmonijskih struja na niskonaponskoj strani TS SN/NN korištena je vrijednost 0,3. Faktor naponske razine niskonaponske mreže za harmonike reda 3h je jedan (1) jer se zbog spoja primarnog namotaja transformatora u trokut, harmonici struje tog reda ne prenose na niskonaponsku stranu.

## 4.2. Određivanje planirane razine naponskih harmonika

Za određivanje planirane razine naponskih harmonika korišten je tehnički izvještaj IEC 61000-3-6 (1996). Usporedba graničnih vrijednosti viših harmonika napona prikazuje slika 7.



Slika 7. Usporedba graničnih vrijednosti viših harmonika napona (%)

Planirane razine naponskih harmonika „ $U_{h,p}$ “ iz tehničkog izvještaja IEC 61000-3-6 (1996) za SN energetske sustav prikazanih na slici 7. su 20% manje od razine kompatibilnosti određene normom EN 50160:1999. Tako određena vrijednost planirane razine naponskih harmonika reducirana za faktor naponske razine mreže (osim za red harmonika 3h) korištena je za proračun planirane razine strujnih harmonika u niskonaponskom transformatorskom čvorištu. Iznosi reduciranih vrijednosti planiranih naponskih harmonika prikazani su u tablici V. Reducirane veličine planiranih naponskih harmonika su:

- harmonici reda  $3h+1$  i  $3h-1$   $U_h = 0,3 \cdot U_{h,p}$

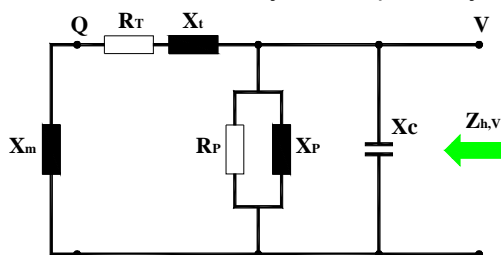
- harmonici reda  $3h$   $U_h = 1 \cdot U_{h,p}$

Tablica V. Vrijednosti planiranih naponskih harmonika

h	3	5	7	9	11	13	15	17
$U_{h,p}$ (%)	4	5	4	1,2	3	2,5	0,3	1,6
$U_{h,p}$ (V)	9,2	11,5	9,2	2,76	6,9	5,75	0,69	3,47
$U_h$ (V)	9,2	3,45	2,76	2,76	2,07	1,725	0,69	1,04

## 4.3. Model mreže u frekvenzijskom području

Za proračun harmonijskih struja u frekvenzijskom području komponente elektroenergetske mreže nadomještaju se faznim modelom mreže (slika 8), uvažavajući frekvenzijsku ovisnost skupnog opterećenja trafostanice te kapacitivnih i induktivnih dijelova impedancije mreže



Slika 8. Nadomjesna shema faznog modela mreže



#### 4.3.1. Model ekvivalentne SN kabela mreže

Kabelska SN mreža modelirana je frekvencijski ovisnom uzdužnom reaktancijom. Gradska kabelska 10(20) kV mreža napaja se iz TS 110/10(20) kV. Snage trolnog kratkog spoja SN mreže 10(20) kV u priključnim točkama TS 10(20)/0,4 kV imaju vrijednost od 53 do 100 MVA. Za proračun uzeta je najnepovoljnija vrijednost od 53 MVA. Na frekvencijski višim razinama reducirana reaktancija i admitancija mreže na naponu 0,4 kV je:

$$X_{h,m} = jh \cdot \frac{U_{n,1}^2}{S_K} \cdot \left( \frac{U_{n,2}}{U_{n,1}} \right)^2 \quad Y_{h,m} = \frac{1}{X_{h,m}}$$

Gdje je:

$j$  – imaginarna jedinica

$X_{h,m}$  – reducirana vrijednost reaktancije 10(20) kV mreže reducirane na napon 0,4 kV, (Ω)

$Y_{h,m}$  – induktivna vodljivost 10(20) kV mreže reducirane na napon 0,4, (S)

$h$  – red višeg harmonika

$U_{n,1}$  – napon SN mreže, (kV)

$U_{n,2}$  – napon NN mreže, (kV)

#### 4.3.2. Model dvonamotnog transformatora

Dvonamotni transformator zbog malog utjecaja poprečne admitancije modeliramo uzdužnom impedancijom. Apsolutna vrijednost uzdužne impedancije je:

$$Z_T = \frac{u_K \cdot U_{n,2}^2}{100 \cdot S_n} (\Omega)$$

gdje je:

$u_K$  – napon kratkog spoja transformatora, (%)

$S_n$  – nazivna snaga transformatora, (MVA)

Uz zanemareni skin efekt, djelatna komponenta uzdužne impedancije nadomjesne sheme transformatora ne ovisi o frekvenciji i iznosi:

$$R_T = \frac{P_{cu} \cdot U_{n,2}^2}{S_n^2} \cdot 10^{-3} (\Omega)$$

$P_{cu}$  – gubici u bakru namota transformatora (kW)

$S_n$  – nominalna snaga transformatora (MVA)

Vrijednost frekvencijski ovisne reaktancije transformatora je:

$$X_{h,T} = jh \cdot \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

#### 4.3.3. Model kondenzatorske baterije bazne kompenzacije transformatora

Snaga kondenzatorske baterije  $Q_c$  za baznu kompenzaciju jalove snage transformatora iznosi 10% nominalne snage transformatora [6]. Za proračun modelira se frekvencijski ovisnom kapacitivnom admitancijom koja iznosi:

$$Y_{h,c} = \frac{jh \cdot Q_c}{U_n^2}$$

#### 4.3.4. Model skupnog opterećenja transformatora

Skupno opterećenje trafostanice u nadomjesnoj shemi mreže modelira se kao poprečna, frekvencijski ovisna impedancija paralelno spojenih otpora ( $R_p$ ) i reaktancije ( $X_p$ ) (slika 8.), čija vrijednost opada s porastom opterećenja. Skupno opterećenje promatra se kao jedna komponenta u proračunu planirane razine strujnih harmonika. Zbog utjecaja veličine opterećenja na Theveninovu impedanciju, izračunate su poprečne vodljivosti za minimalno i maksimalno opterećenje transformatora. Poprečne admitancije za minimalno i maksimalno opterećenje transformatora iznose:

$$\text{minimalno} \quad Y_{h,\min} = \frac{P_{\min}}{U_{n2}^2} - j \frac{Q_{\min}}{h \cdot U_{n2}^2} \quad \text{maksimalno} \quad Y_{h,\max} = \frac{P_{\max}}{U_{n2}^2} - j \frac{Q_{\max}}{h \cdot U_{n2}^2}$$

Gdje je:

$P_{\min}; Q_{\min}$  - minimalno opterećenje transformatora, (MW ; MVar)

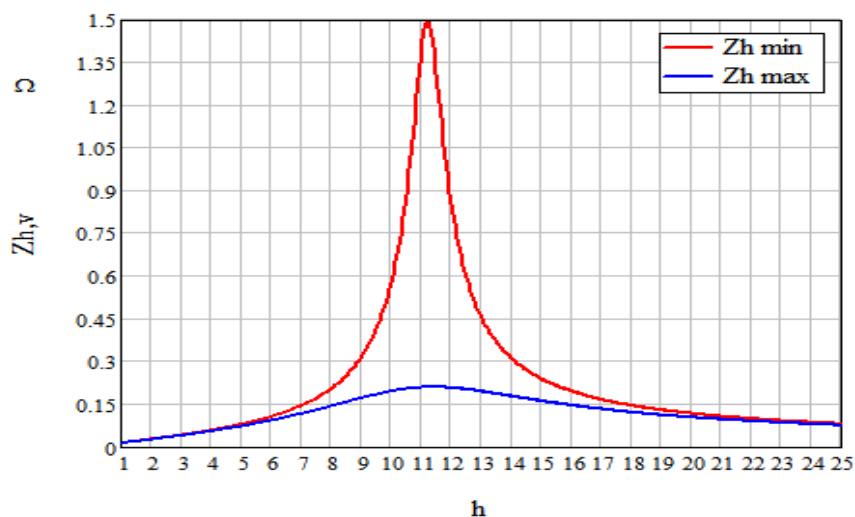
$P_{\max}; Q_{\max}$  - maksimalno opterećenje transformatora, (MW ; MVar)

#### 4.3.5 Theveninova impedancija u čvoru „V“

Kompleksna vrijednost frekvencijski ovisne Theveninove impedancije u čvoru „V“ za jednopolno modeliranu mrežu prikazanu na slici 8. je:

$$\begin{aligned} - \text{ minimalno opterećenje} \quad Z_{h,\min} &= \frac{1}{\frac{1}{X_{h,m} + (X_{h,T} + R_T)} + Y_{h,\min} + Y_{h,c}} \\ - \text{ maksimalno opterećenje} \quad Z_{h,\max} &= \frac{1}{\frac{1}{X_{h,m} + (X_{h,T} + R_T)} + Y_{h,\max} + Y_{h,c}} \end{aligned}$$

Na slici 9. prikazane su apsolutne vrijednosti Theveninove impedancije u čvoru „V“ za minimalno i maksimalno opterećenje transformatora.



Slika 9. Apsolutne vrijednosti Theveninove impedancije u čvoru „V“

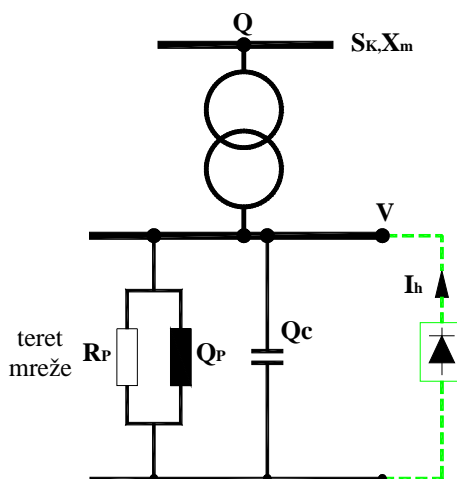
#### 4.3.6 Vrijednosti planiranih razina strujnih harmonika

Izračun planiranih razina strujnih harmonika izvršen je programskim paketom Mathcad. Dijeljenjem reducirane veličine planiranih naponskih harmonika „ $U_h$ “ sa frekvencijski ovisnom Theveninovom impedancijom ( $Z_{h,\min}$  i  $Z_{h,\max}$ ) dobijemo planirane razine strujnih harmonika, koje emitiraju svi nelinearni uređaji u niskonaponske sabirnice jedne TS 10(20)/0,4 kV.

## 5. PRORAČUN PLANIRANE RAZINE STRUJNIH HARMONIKA

Jednofazni mali izvori strujnih harmonika koji su priključeni na niskonaponsku mrežu, zbog velikog broja na razini TS 10(20)/0,4 kV, statistički se mogu promatrati kao simetričan izvor strujnih harmonika. Slika 10. prikazuje model mreže za proračun. Podaci potrebni za proračun su:

- snaga trolnog kratkog spoja u čvoru „Q“ je  $S_K = 53$  MVA
- podaci transformatora:  $S_n = 1$  MVA,  $U_k = 6\%$ ,  $P_{CU} = 10,5$  kW,  $U_{n1}/U_{n2} = 10/0,4$  kV
- snaga kondenzatorske baterije temeljne kompenzacije:  $Q_C = 100$  kvar
- opterećenje transformatora:  $P_{min} = 0,1S_n \cos(\phi)$ ;  $Q_{min} = 0,1S_n \sin(\phi)$ ;  $P_{max} = 0,8S_n \cos(\phi)$ ;  $Q_{max} = 0,8S_n \sin(\phi)$ ;  $\cos(\phi) = 0,94$ ;  $\sin(\phi) = 0,34$



Slika 10. Prikaz mreže za primjer iz proračuna

Rezultati proračuna planiranih razina strujnih i naponskih harmonika prikazani su u tablici VI.

Tablica VI. Vrijednosti rezultata proračuna

h	Pmin, Qmin				Pmax, Qmax			
	Zh,v	Uh (V)	Ih,p (A)	Ih,p/In x 100	Zh,v	Uh (V)	Ih,p (A)	Ih,p/In x 100
3	0,041	9,2	225,7	15,6	0,039	9,2	235,9	16,4
5	0,079	3,45	43,9	3	0,072	3,45	48,2	3,3
7	0,144	2,76	19,2	1,33	0,115	2,76	23,9	1,6
9	0,308	2,76	8,9	0,62	0,171	2,76	16,2	1,12
11	1,345	2,07	1,54	0,1	0,208	2,07	9,95	0,7
13	0,467	1,725	3,69	0,25	0,195	1,725	8,86	0,6
15	0,241	0,69	2,86	0,22	0,161	0,69	4,28	0,32
17	0,167	1,104	10,36	0,48	0,131	1,104	7,85	0,45

Za izračunate planirane veličine harmonijskih napona i struja, ukupno harmonijsko izobličenje napona i struje transformatora za minimalno opterećenje iznosi:

$$THD_U(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{17} U_h^2}}{U_1} \cdot 100 = 4,75$$

$$THD_I(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{17} I_{h,p}^2}}{I_1} \cdot 100 = 23,214$$

## 6. ZAKLJUČAK

U referatu su prikazani izračuni dozvoljene razine strujnih harmonika koje novi korisnik mreže utiskuje u priključno mjesto i planirane razine strujnih harmonika koje utiskuju svi nelinearni uređaji na niskonaponske sabirnice gradske TS 10(20)/0,4 kV snage 1000 kVA. Za proračun dozvoljene razine strujnih harmonika novog korisnika mreže nije potrebno poznavati amplitudni strujni harmonijski spektar nelinearnih uređaja što čini proračun jednostavnijim. Navedenu metodu primjenjuje nekoliko europskih mrežnih operatora.

Predložena je i metoda izračuna planirane razine strujnih harmonika na nivou jedne TS 10(20)/0,4 kV snage 1000 kVA. Planirane razine harmonika napona na niskonaponskoj strani TS 10(20)/0,4 kV operator sustava najlakše održava periodičnom kontrolom planiranih razina strujnih harmonika utisnutih u to čvorište.

## 7. LITERATURA

- [1] B. Posedel, M. Jerman, "Fluorescentna rasvjeta kao izvor viših harmonika u poslovnim zgradama", HO-CIRED, svibanj 2008.
- [2] J.R. Ramos, "Introduzione alle armoniche", Università degli Studi di Bologna, Bologna, Italia.
- [3] prof. Max Grady, "Understanding Power System Harmonics" University of Texas at Austin September 2000
- [4] Lahorko Wagman, "Stohastički proračun strujnih harmonika u razdjelnim mrežama", Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu FER, Zagreb 2010.
- [5] VEO, Verband Der Elektrizitätsunternehmen Österreichs, "Technical Rules for the Assessment of Network Disturbances", 2007.
- [6] B. Posedel, P. Posedel, "Tehno-ekonomska kompenzacija jalove snage distributivnih transformatora SNN/NN", HRO-CIGRE, studeni 2013.