

## Analiza ravni flikerja v prenosnem omrežju Slovenije

Boštjan Blažič<sup>1</sup>, Matej B. Kobav<sup>1</sup>, Tomaž Pfajfar<sup>1</sup>, Uroš Kerin<sup>1</sup>, Dejan Matvoz<sup>2</sup>, Kostja Skok<sup>3</sup>, Igor Papič<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

<sup>2</sup> Elektroinštitut Milan Vidmar, Hajdrihova 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

<sup>3</sup> Elektro Slovenija, Hajdrihova 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: bostjan.blazic@fe.uni-lj.si

**Povzetek.** Fliker predstavlja enega izmed najpomembnejših problemov v zvezi s kakovostjo električne napetosti v elektroenergetskem sistemu Slovenije. To je pripeljalo tudi do študije, ki celovito obravnava razširjanje in ravni flikerja v celotnem prenosnem omrežju Slovenije ter tudi različnih pristopov za njegovo kompenzacijo. V tem prispevku se osredotočamo na del izsledkov te študije. Predstavljeni so rezultati že izvedenih meritev flikerja, ki nam podajajo osnovno sliko o ravneh flikerja v omrežju. Opisana sta tudi simulacijska modela prenosnega omrežja Slovenije (v SINICAL in PSCAD), ki sta bila umerjena na podlagi rezultatov meritev. Simulacijska modela omogočata določitev ravni flikerja za vsa vozlišča omrežja (SINICAL) in sta podlaga za ovrednotenje različnih kompenzacijskih ukrepov za zmanjšanje flikerja v omrežju.

**Ključne besede:** kakovost električne napetosti, fliker, prenosno omrežje Slovenije, simulacijski model omrežja

## Analysis of Flicker Levels in the Slovenian Transmission Network

**Extended abstract.** With deregulation of the Slovenian electricity market power quality has become an important issue for the transmission system operator (TSO), since poor power quality is no longer tolerated by electricity consumers. One of the greatest disturbances affecting power quality in the Slovenian transmission network is voltage flicker. It is mostly caused by arc furnaces producing voltage amplitude fluctuations resulting from strongly fluctuating power consumption. Voltage variations at frequencies between 0.5 and 25 Hz are of a special concern. They give rise to flicker, reflecting itself in changes in luminosity of lamps. As these disturbances may travel over a large area of the transmission network, they affect a considerable number of unsatisfied and consequently complaining consumers connected to distribution networks.

A common equivalent circuit of arc furnace connection to the high-voltage (HV) network is shown in Fig. 1. The flicker level at the point of arc furnace connection to the transmission network is determined by the arc furnace operation and network impedances (Eq. 1). In large and complex networks, spreading of flicker distortion is influenced by many factors making analytical formulation difficult. Such networks can be analysed by means of simulation where special attention

is paid to correct representation of network topology, generators and flicker sources.

Various power quality [1] measurements have already been made in the Slovenian HV transmission network (measurement points are listed in Table 1) in parallel with some permanent measurements made by the Slovenian TSO (ELES) [2]-[7]. The measurement results confirm that the main sources of flicker are large arc-furnaces in iron works Ravne, Štore and Jesenice. The measurement results for the selected points are presented in Table 2 and geographical areas with flicker with the value above 1 are shown in Fig. 2.

Simulation models of the Slovenian transmission network were implemented in SINICAL and PSCAD. Besides the basic network elements (generators, transformers, transmission lines and linear loads), an arc furnace model [8]-[11] and IEC-based flicker-meter model [12], [13] were also developed. The arc-furnace model operation is described with equations (2)-(5). The complete network model and the arc furnaces models were calibrated to reflect as much as possible of the real network conditions and measurement results. With simulations in SINICAL, the flicker levels for the whole HV network were determined. On the other hand, the PSCAD model provides the basis for the analysis and evaluation of different flicker mitigation solutions. Flicker levels obtained with the two simulation tools are given in Table 2 allowing for a comparison with the measurement results. Table 3 shows the share of nodes in the HV network based on the flicker value. It is

evident that flicker exceeds the value of 1 in 39 % of all the nodes in 110 kV level.

**Keywords:** power quality, flicker, Slovenian transmission network, network simulation model

## 1. Uvod

V Slovenskem elektroenergetskem omrežju je flicker eden izmed večjih problemov v zvezi s kakovostjo električne energije. Kot so pokazale že številne meritve kakovosti napetosti na različnih napetostnih nivojih, so v precejšnjem delu omrežja mejne vrednosti flickerja, ki jih določa standard SIST EN 50160 [1], presežene. Na visoke vrednosti flickerja opozarjajo tudi pritožbe odjemalcev, kar upravljavce omrežij spodbuja k reševanju te problematike.

V tem članku je predstavljen del rezultatov raziskave, s katero želimo celovito proučiti stanje glede flickerja v prenosnem omrežju Slovenije in se celostno lotiti reševanja problematike. V začetku bo najprej podanih nekaj osnovnih informacij o samem flickerju in o širjenju le-tega po omrežju. V nadaljevanju bodo povzeti rezultati meritev flickerja, objavljeni v različnih študijah [2]-[7], ki so bile izvedene v delih prenosnega omrežja in nam podajo splošno sliko o ravneh flickerja v omrežju. Naslednji korak raziskave je izdelava simulacijskih modelov prenosnega omrežja Slovenije [8]-[13]. S pomočjo modelov bomo določili vrednosti flickerja v vseh vozliščih prenosnega omrežja. Modeli so tudi osnova za analizo različnih kompenzacijskih ukrepov za zmanjšanje flickerja v omrežju.

## 2. Splošno o flickerju

Flicker je definiran kot vtis nestalnosti vidnega zaznavanja zaradi svetlobnega dražljaja, katerega svetlost ali spektralna porazdelitev časovno niha. Nastopi zaradi nihanja amplitude napetosti v določenem frekvenčnem območju (nekje med 0,5 in 25 Hz), ki je posledica delovanja nekaterih nelinearnih porabnikov. Nihanje napetosti povzroča spremembe svetilnosti svetilk, kar označujemo kot flicker. Nad določenim pragom postane flicker moteč in pri določeni frekvenci ponavljanja lahko ljudi motijo že zelo majhne amplitude nihanja. Eden glavnih povzročiteljev flickerja v elektroenergetskih omrežjih so elektroobločne peči. Te so izrazito nelinearno breme, ki iz omrežja odjema nihajočo moč (tako delovno kot tudi jalovo) in s tem povzročajo nihanje amplitude napetosti. Mejne vrednosti flickerja določa tudi standard SIST EN 50160 [1], ki postavlja meje za značilnosti kakovosti električne napetosti. Opredeljuje elektromagnetne motnje v nizkonapetostnem (NN) in sredjenapetostnem (SN) omrežju na odjemnem mestu, kjer se srečujeta odjemalec in javno razdelilno omrežje. Mejna vrednost

za flicker je 1. Čeprav standard za visokonapetostna (VN) omrežja ne velja, lahko njegova določila smiselno uporabimo tudi v teh omrežjih.

V nadaljevanju bodo na primeru preprostega vezja razloženi osnovni principi širjenja flickerja po omrežju.

### 2.1. Razširjanje flickerja

Splošno nadomestno vezje obločne peči, priključene na VN omrežje, je prikazano na sliki 1. VN omrežje je ponazorjeno z napetostnim virom (toga mreža) in kratkostično impedanco  $Z_{KR}$ . Transformatorji VN/SN in SN/NN in vodi so ponazorjeni z impedancami  $Z_1$  in  $Z_2$ .

S stališča flickerja lahko obločno peč opišemo kot napetostni vir, ki generira medharmonike. V preprostem radialnem omrežju (slika 1) je flicker na posameznih mestih v vezju odvisen od impedanc sistema in od obratovanja obločne peči. Flicker na mestu VN ( $P_{st\_VN}$ ) lahko izračunamo iz znane vrednosti flickerja na mestu NN ( $P_{st\_NN}$ ), kjer je priključena obločna peč:

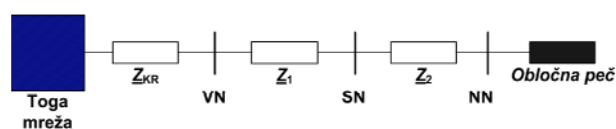
$$P_{st\_VN} = P_{st\_NN} \frac{|Z_{KR}|}{|Z_{KR} + Z_1 + Z_2|}. \quad (1)$$

Flicker od peči proti togi mreži hitro upada, relativno malo pa se zniža v smeri proti bremenom, ki so posredno priključena na VN nivo. V dejanskih omrežjih moramo poleg samih impedanc elementov omrežja upoštevati še druge dejavnike, ki vplivajo na raven flickerja. To so zlasti delovne točke in regulacijski parametri generatorjev in medsebojni vpliv različnih virov flickerja, ki so prisotni v omrežju. Vpliv posameznih virov na določenem mestu v omrežju je odvisen tako od obratovanja teh virov kot tudi od topologije in impedanc omrežja.

V kompleksnih dejanskih omrežjih je razširjanje flickerja odvisno od številnih parametrov, kar otežuje analitično formulacijo problema. Taka omrežja lahko analiziramo s pomočjo simulacijskih programov, kjer moramo posebej paziti na korektno ponazoritev topologije omrežja, generatorjev in virov flickerja.

### 2.2. Ravni načrtovanja flickerja v omrežjih

Da bi omrežje glede kakovosti napetosti lahko normalno delovalo, je treba zagotoviti takšne pogoje, da nista ogroženi varnost in funkcionalnost sistema ter priključenih porabnikov. To zagotovimo, če vnaprej postavimo dovolj jasna pravila za priključevanje porabnikov v omrežje. Raven načrtovanja je raven posamezne motnje v določenem delu omrežja, ki je



Slika 1: Nadomestno vezje priključitve peči na VN omrežje  
Figure 1: Equivalent circuit of furnace connection to the HV network

privzeta kot referenčna vrednost za meje oddanih motenj. Ravni načrtovanja morajo biti nižje ali največ enake ravnem združljivosti in nižje od tistih, ki jih postavlja SIST EN 50160 za merilo kakovosti napetosti. Standardi in tehnična poročila podajajo le okvirne številke za ravni načrtovanja, zato jih mora upravljavec omrežja določiti sam. Tehnično poročilo SIST IEC/TR3 61000-3-6 postavlja okvirne vrednosti ravni načrtovanja za kratkotrajno ( $P_{st}$ ) in dolgotrajno jakost flikerja ( $P_{lt}$ ) v SN in VN omrežjih. Za VN omrežja je vrednost za  $P_{st}$  postavljena na 0,8, za  $P_{lt}$  pa na 0,6.

### 3. Meritve flikerja v prenosnem omrežju

V tem poglavju bo predstavljen povzetek merilnih rezultatov že izvedenih meritev kakovosti napetosti v prenosnem omrežju Slovenije [2]-[7] in merilnih rezultatov permanentnega monitoringa, ki ga podjetje ELES izvaja na določenih mestih prenosnega omrežja [3]. Obravnavane meritve so bile sicer izvedene v različnih časovnih obdobjih, kar onemogoča povsem nedvoumno interpretacijo trenutnega stanja glede flikerja. Kljub temu lahko na podlagi rezultatov povzamemo nekaj pomembnih zaključkov.

#### 3.1. Merilna mesta in rezultati meritev

Podjetje ELES ima vgrajene naprave za stalni monitoring parametrov kakovosti električne energije na 110 kV daljnovidih Hudo–Gotna vas, Okroglo–Jeklarna, Okroglo–Moste, Pekre–Fala, Podlog–Lipa, na 110 kV transformatorju TR411 v Divači in na 400 kV daljnovidu Podlog–Šoštanj. Z omenjenih instrumentov smo odčitali merilne podatke za 14-dnevni interval [3]. V tabeli 1 pa so podana in opisana merilna mesta, kjer so bile izvedene meritve kakovosti napetosti v skladu s standardom SIST EN 50160. Meritve so bile opravljene v točkah, kjer so priključeni večji porabniki, ki slabo vplivajo na kakovost električne energije.

Meritve so potrdile, da je temeljni problem glede kakovosti napetosti v prenosnem omrežju Slovenije previsoka raven flikerja na določenih območjih. Glavni vir flikerja so večje obločne peči. Problematična območja, kjer raven flikerja presega vrednost 1, so grafično prikazana na sliki 2. Gre predvsem za tri območja, t.j. območje Gorenjske (ki sega tako rekoč do Ljubljane) z glavnim povzročiteljem železarno Jesenice,

območje Koroške s povzročiteljem železarno Ravne in ožje območje na Celjskem s povzročiteljem železarno Štore. Merilni rezultati na izbranih merilnih mestih so navedeni v tabeli 2.

Iz natančnejše analize vseh rezultatov meritev flikerja razberemo, da so posamezna območja z visokim flikerjem med seboj električno relativno neodvisna in je medsebojni vpliv omenjenih treh peči majhen. Tako je za fliker na območju Gorenjske odgovorna pretežno Jeklarna Jesenice, medtem ko je prispevek preostalih peči precej manjši. Prav tako je RTP Podlog mesto večje napetostne podpore na območju Štajerske in Koroške, tako da je tudi medsebojni vpliv peči v Železarni Ravne in v Železarni Štore majhen. Interakcija je sicer v veliki meri odvisna od obratovalnega stanja posameznih peči in od trenutnih razmer v omrežju.

Vsi drugi parametri kakovosti električne napetosti v prenosnem omrežju so se pri posamičnih meritvah gibali v okviru dopustnih vrednosti, ki jih določa standard SIST EN 50160.

### 4. Simulacija razširjanja flikerja

V naslednjem koraku raziskave je bil razvit simulacijski model VN prenosnega omrežja Slovenije [2], [3]. Z modelom želimo doseči predvsem dva cilja: prvi je možnost določitve ravni flikerja v vseh vozliščih prenosnega omrežja, drugi pa je možnost preizkušanja in ovrednotenja različnih kompenzacijskih ukrepov za znižanje flikerja. Model omrežja je bil izdelan v dveh programskih paketih, in sicer v SINICAL in PSCAD. Izdelani simulacijski modeli omrežja so bili umerjeni na podlagi merilnih rezultatov. V nadaljevanju bodo predstavljene podrobnosti modeliranja v obeh programih.

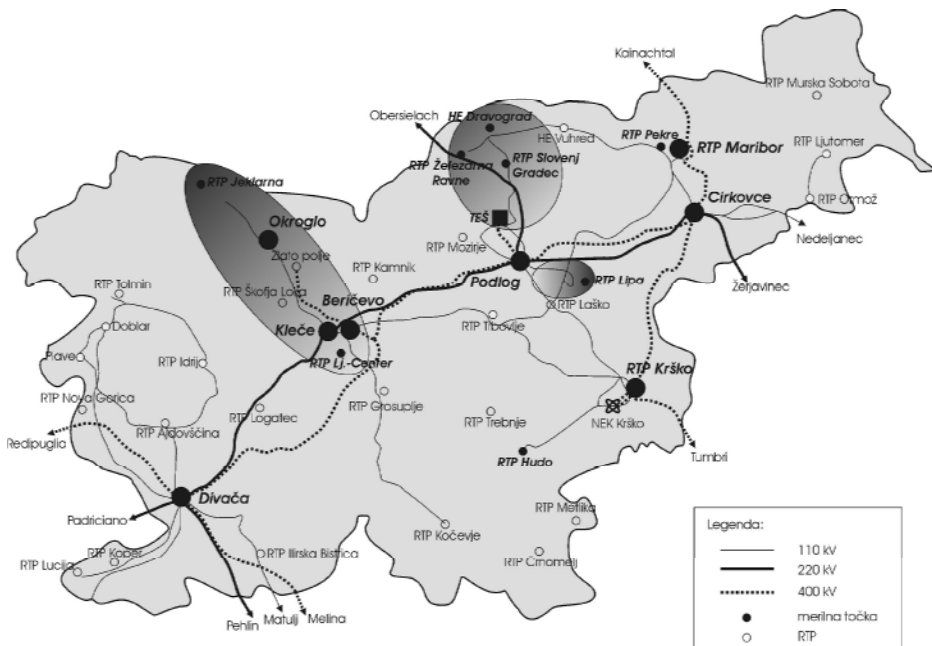
#### 4.1. SINICAL – statične simulacije

Programski paket SINICAL omogoča izračun električnih veličin v omrežju v statičnih razmerah. Zgrajen je modularno, s pomočjo posameznih modulov je mogoča izvedba različnih analiz, kot so npr. izračun pretokov moči, kratkostičnih tokov in širjenja harmonikov ter optimalen razklop omrežja, določitev tranzientnih razmer ob okvarah v omrežju ipd.

Merilno mesto	Nap. nivo (kV)	Število inst.	Izvajalec	Datum meritve
RTP Jeklarna Jesenice	110, 35	2	ELIM [7]	5.9.-12.9. 2003
RTP Okroglo	400, 110	8	EIMV [6]	28.10.-4.11. 2003
RTP Podlog	400, 220, 110	6	EIMV [4]	16.12.-23.12. 2003
RTP Beričevo	400, 220, 110	6	EIMV [5]	20.1.-27.1. 2004
Podlog–Štore–Ravne	110, 20, 35	12	FE [2]	6.5.-13.5. 2004

Tabela 1: Merilna mesta, kjer so bile izvedene meritve kakovosti napetosti v prenosnem omrežju Slovenije

Table 1: Power quality measurement points in the Slovenian transmission network



Slika 2: Prikaz območij, kjer so bile izmerjene vrednosti flikerja večje od vrednosti 1  
Figure 2: Slovenian areas with flicker levels above the value of 1

Model prenosnega omrežja, izdelan v tem programu, je bil namenjen predvsem določitvi ravni flikerja v vseh vozliščih prenosnega omrežja Slovenije [3]. S tem smo pridobili vpogled na ravni flikerja tudi na mestih, kjer meritve niso bile izvedene. Simuliran je bil vpliv posameznih obločnih peči (Jesenice, Ravne, Štore) in skupen prispevek vseh peči na fliker. Na tej podlagi je bil določen obseg omrežja, kjer so presežene s standardom SIST EN 50160 določene meje.

#### 4.2. PSCAD – dinamične simulacije

Programski paket PSCAD je namenjen dinamični analizi elektroenergetskih omrežij. Posebej je primeren za modeliranje naprav, ki temeljijo na močnostnih polprevodniških elementih. V programu je tako poleg osnovnih elementov omrežja (generatorji, vodi, transformatorji, linearna bremena) mogoče tudi natančno modeliranje nelinearnih elementov. Izdelana sta bila nelinearni model obločne peči s sinusnim spreminjanjem dolžine obloka in model flikermetra. Model omrežja v PSCAD je posebej primeren za proučevanje različnih kompenzacijskih ukrepov za zmanjševanje flikerja, zlasti aktivnih kompenzatorjev.

V nadaljevanju bosta na kratko predstavljena modela obločne peči in flikermetra, ki sta temeljna elementa za analizo flikerja v modeliranem omrežju.

##### 4.2.1. Model obločne peči

Ker je glavni predmet raziskave fliker, lahko predpostavimo, da za ponazoritev dinamike odjema zadošča ustrezno modeliranje glavnega vira flikerja, t.j.

obločne peči. Podrobnosti modela so natančneje opisane v [8]-[11].

Nelinearno  $U-I$  karakteristiko obločne peči lahko opišemo z naslednjo enačbo:

$$U_a(I_a) = k(t)U_{a0}(I_a), \quad (2)$$

kjer je  $U_a$  napetost obloka,  $I_a$  tok obloka in  $U_{a0}$  napetost obloka pri referenčni dolžini obloka  $l_0$ . Koefficient  $k(t)$  je definiran kot kvocient napetosti pri dolžini obloka  $l$  in referenčni dolžini  $l_0$ :

$$k(t) = (A + Bl(t)) / (A + Bl_0). \quad (3)$$

V zgornji enačbi pomeni konstanta  $A$  padce napetosti na anodi in katodi, konstanta  $B$  pa padec napetosti na enoto dolžine. Napetost  $U_{a0}$  podaja naslednji izraz:

$$U_{a0} = U_{at0} + C / (D + I_a), \quad (4)$$

kjer je  $U_{at0}$  mejna vrednost napetosti obloka, do katere napetost upade,  $C$  in  $D$  sta konstanti, ki določata razliko med naraščajočo in padajočo tokovno potjo na  $U-I$  karakteristiki.

Za simulacijo spreminjanja dolžine obloka (funkcija  $l(t)$ ) se lahko uporabi stohastični ali deterministični pristop. Deterministični pristop sicer ne opisuje v celoti delovanja obločne peči, omogoča pa precej lažjo simulacijo s krajšimi simulacijskimi časi in brez dodatne statistične obravnave rezultatov. Glede na [8] dobimo z determinističnim pristopom višji fliker v določeni obratovalni točki obločne peči kot s stohastičnim. Zato smo tudi v naši študiji izbrali deterministično spreminjanje dolžine obloka, ki ga podaja naslednja enačba:

$$l(t) = l_0 - (1 + \sin \omega t) \cdot D_1 / 2, \quad (5)$$

Merilno mesto	Napetostni nivo	Fliker $P_{lt}$ Meritve	Fliker $P_{lt}$ PSCAD	$P_{lt}$ PSCAD / $P_{lt}$ meritve (%)	Fliker $P_{lt}$ Sincal	$P_{lt}$ Sincal / $P_{lt}$ meritve (%)
<b>RTP Jeklarna Jesenice</b>	<b>110 kV</b>	<b>3,77 [7]</b>	<b>3,79</b>	<b>+0,5</b>	<b>3,77</b>	<b>0,0</b>
RTP Okroglo	110 kV	1,66 [3]	1,77	+6,6	1,69	+1,8
RTP Kleče	220 kV	0,62 [5]	0,65	+4,8	0,67	+8,1
RTP Kleče	110 kV	0,94 [6]	1,06	+12,8	1,00	+6,4
RTP Beričevo	400 kV	0,56 [6]	0,59	+5,4	0,50	-10,7
RTP Beričevo	110 kV	0,68 [5]	0,85	+25,0	0,67	-1,47
RTP Lj Center	110 kV	1,14 [5]	1,00	-12,3	0,81	-28,9
RTP Divača	110 kV	0,28 [3]	0,21	-25,0	0,47	+67,9
<b>RTP Železarna Ravne</b>	<b>110 kV</b>	<b>3,20 [2]</b>	<b>3,22</b>	<b>+0,63</b>	<b>3,20</b>	<b>0,0</b>
RTP Dravograd	110 kV	2,35 [2]	2,23	-5,1	2,35	0,0
RTP Šoštanj	110 kV	/	1,13	/	0,98	/
RTP Slovenj Gradec	110 kV	1,63 [2]	1,81	+11,0	1,90	+16,6
RTP Podlog	220 kV	0,45 [4]	0,52	+15,6	0,42	-6,7
RTP Podlog	110 kV	0,90 [2]	1,05	+16,7	0,99	+10,0
<b>RTP Lipa – Žel. Štore</b>	<b>110 kV</b>	<b>1,31 [2]</b>	<b>1,30</b>	<b>-0,76</b>	<b>1,30</b>	<b>-0,8</b>
RTP Maribor	110 kV	/	0,70	/	0,75	/
RTP Pekre	110 kV	0,61 [3]	0,84	+37,7	0,86	+41,0
RTP Krško	110 kV	/	0,58	/	0,42	/
RTP Hudo	110 kV	0,44 [5]	0,64	+45,5	0,47	+6,8

Tabela 2: Merilni in simulacijski rezultati na izbranih merilnih mestih in njihovo relativno odstopanje  
Table 2: Measurement and simulation results at the selected measurement points and their relative difference

kjer z  $D_1$  določimo amplitudo sinusoide. Ker je človeško najbolj občutljivo za frekvence nihanja svetilnosti okrog 8,8 Hz, smo za frekvenco nihanja obloka izbrali 9 Hz.

V simulacijskem programu je bila nelinearna oblačna peč modelirana s tremi krmiljenimi enofaznimi napetostnimi viri, ki so na omrežje priključeni prek impedance [2]. Za izračun napetosti vira  $U_a$  so bile uporabljene enačbe (2)-(5).

#### 4.2.2. Model flikermetra

Za ovrednotenje flikerja v simulacijskem modelu je bil v skladu s standardom EN 60868-0:2001 [12] razvit model flikermetra. Vhod v flikermeter tvori fazna napetost na merilnem mestu. Model je natančneje opisan v [2]. Flikermeter je bil testiran s sinusnim in kvadratnim signalom z različnimi frekvencami in amplitudami, kot določa standard EN 61000-4-15 [13]. Flikermeter je dal pravilne rezultate za frekvence od 2,2 do 22 Hz za sinusni signal in za frekvence od 4,5 do 20 Hz za kvadratni signal.

#### 4.3. Rezultati simulacij

Simulacijska modela prenosnega omrežja Slovenije sta bila umerjena na podlagi merilnih rezultatov in na podlagi razpoložljivih podatkov o obratovanju generatorjev.

Rezultati simulacij za izbrane točke omrežja so podani v tabeli 2, in sicer posebej za SINCAL in PSCAD. Podano je tudi procentualno odstopanje

simulacijskih rezultatov od merilnih. V SINCAL so bile sicer določene ravni flikerja v vseh RTP VN omrežja Slovenija. V tabeli 3 so podani procentualni deleži vozlišč glede na fliker na posameznih napetostnih nivojih. Tako je npr. na 110 kV v kar 16 % vozlišč fliker višji od 1,5, v 23 % vozlišč pa med 1,0 in 1,5. Simulacijski model v PSCAD bo predvsem podlaga za poznejšo analizo različnih ukrepov za kompenzacijo flikerja.

Kot je bilo že omenjeno, meritve flikerja niso bile izvedene sočasno, kar otežuje natančno umeritev modela omrežja. Poleg tega je fliker zelo dinamičen pojav, ki je močno odvisen od trenutnega obratovalnega stanja posameznih oblačnih peči in omrežja. Tudi interpretacija merilnih rezultatov za fliker ni trivialna, saj podajata izmerjeni vrednosti  $P_{lt}$  in  $P_{st}$  le povprečni izmerjenih vrednosti. Zaradi opisanih razlogov, prihaja med simulacijskimi rezultati in rezultati meritev do razhajanj. Odstopanja se povečujejo z oddaljevanjem od vira flikerja, kjer so rezultati najbolj odvisni od obratovalnega stanja omrežja.

Fliker	110 kV	220 kV	400 kV
$P_{lt} < 0,6$	28 %	67 %	86 %
$0,6 < P_{lt} < 1,0$	33 %	33 %	14 %
$1,0 < P_{lt} < 1,5$	23 %	0	0
$1,5 < P_{lt}$	16 %	0	0

Tabela 3: Deleži vozlišč VN omrežja Slovenije glede na vrednost flikerja (za posamezne napetostne nivoje)  
Table 3: Share of nodes of the Slovenian HV network with regard to the flicker value (for different voltage levels)

## 5. Sklep

Rezultati izvedenih meritev kakovosti napetosti potrjujejo, da je glavni problem glede kakovosti v prenosnem omrežju Slovenije fliker, kjer so glavni viri obločne peči v železarnah Ravne, Štore in Jesenice. Na podlagi simulacijskih modelov prenosnega omrežja Slovenije je bil določen fliker v vseh VN vozliščih. Rezultati so npr. pokazali, da je v 39 % vozlišč na 110 kV napetostnem nivoju fliker večji od 1.

Nadaljnji koraki raziskave so usmerjeni v ovrednotenje različnih kompenzacijskih ukrepov za zmanjšanje flikerja. Zlasti je problematično območje železarne Jesenice, kjer je vgrajena relativno velika peč, in območje železarne Ravne, kjer je kratkostična moč mreže precej manjša kot pri železarni Štore.

## 6. Literatura

- [1] SIST EN 50160:2000, "Značilnosti napetosti v javnih razdelilnih omrežjih", standard.
- [2] I. Papič, B. Blažič, et. al., "Analiza vpliva obratovanja porabnikov na ZGK železarna Ravne in ZGK železarne Štore na kakovost napetosti v prenosnem omrežju", *raziskovalna naloga*, Fakulteta za elektrotehniko, januar 2005.
- [3] I. Papič, B. Blažič, et. al., "Analiza kakovosti napetosti v prenosnem omrežju in smernice za postavitev permanentnega monitoringa", *raziskovalna naloga*, Fakulteta za elektrotehniko, marec 2005.
- [4] D. Matvoz, "Meritev in analiza kakovosti napetosti v RTP 400/220/110 kV Podlog", *strokovno poročilo*, Elektroinštitut Milan Vidmar, januar 2004.
- [5] D. Matvoz, "Meritev in analiza kakovosti napetosti v RTP 400/220/110 kV Beričevo", *strokovno poročilo*, Elektroinštitut Milan Vidmar, marec 2004.
- [6] D. Matvoz, "Meritev in analiza kakovosti napetosti v RTP 400/110 kV Okroglo", *strokovno poročilo*, Elektroinštitut Milan Vidmar, november 2003.
- [7] V. Mlakar, "Kakovost prenosne napetosti 110 kV po servisu SVC naprave", *strokovno poročilo*, ELIM d.o.o., september 2003.
- [8] G. C. Montanari, M. Loggini, A. Cavallini, L. Pitti, D. Zaninelli, "Arc-Furnace Model for the Study of Flicker Compensation in Electrical Networks", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 9, pp. 2026-2036, Oct. 1994.
- [9] O. Ozgun, A. Abur, "Flicker Study Using a Novel Arc Furnace Model", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 17, pp. 1158-1163, Oct. 2002.
- [10] R. Bellido, T. Gomez, "Identification and Modelling of a Three Phase Arc Furnace for Voltage Disturbance Simulation", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 12, pp. 1812-1817, Oct. 1997.

[11] B. Blažič, I. Papič, "Kompenzacija flikerja s statičnim kompenzatorjem", Sedma konferenca slovenskih elektroenergetikov, Velenje, *Zbornik CIGRÉ*, 2005.

[12] EN 60868-0:2001, "Flicker meter, Part 0: Evaluation of flicker severity", standard.

[13] EN 61000-4-15, "Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques, Section 15: Flicker meter - Functional and design specifications", standard.

**Boštjan Blažič** je doktoriral leta 2005 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer je tudi zaposlen kot raziskovalec. Njegovo delo zajema področji kakovosti električne energije in sodobnih kompenzacijskih naprav.

**Matej B. Kobav** je od leta 1999 zaposlen na Fakulteti za elektrotehniko kot asistent, kjer je leta 2003 magistriral. Na raziskovalnem področju se ukvarja s kakovostjo električne energije in razsvetljavo, predvsem s proučevanjem dnevne svetlobe.

**Tomaž Pfajfar** je diplomiral leta 2004 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer se je istega leta zaposlil kot mladi raziskovalec. Njegovo raziskovalno delo zajema področji distribuiranih virov in kakovosti električne energije.

**Uroš Kerin** je diplomiral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani (2004). Kot mladi raziskovalec je zaposlen v Laboratoriju za električna omrežja in naprave. Področje njegovih raziskav obsega analizo in optimizacijo omrežij, dinamiko prehodnih stanj in kakovost električne energije.

**Dejan Matvoz** je magistriral leta 2004 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je na Elektroinštitutu Milan Vidmar kot raziskovalec. Njegovo področje dela zajema kakovost električne energije, analizo dinamičnih pojavov v omrežju ter vodenje in obratovanje elektroenergetskega omrežja.

**Kostja Skok** je diplomiral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani (1970). Zaposlen je v službi za sistemske meritve podjetja ELES, od leta 1975 kot vodja službe, ki izvaja procesne meritve (obračunske in obratovalne) ter meritve za potrebe vzdrževanja primarne opreme. V letu 2004 je služba za meritve začela v prenosno omrežje sistematično vgrajevati naprave za permanentni nadzor nad kakovostjo električne energije.

**Igor Papič** je diplomiral leta 1992, magistriral leta 1995 in doktoriral leta 1998 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. V letih 1994–1996 je bil na izpopolnjevanju na Siemensovem oddelku za prenos in razdelitev električne energije v Erlangnu v Nemčiji. Od leta 2004 je izredni profesor na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. V letu 2001 je bil gostujoči profesor na University of Manitoba v Winnipegu (Kanada). Njegova raziskovalna dejavnost vključuje aktivne kompenzatorje, naprave FACTS in kakovost električne energije.