Metoda proračuna širenja flikera uzrokovanih priključkom elektrolučne peći na elektroenergetsku mrežu.

Tomasović Teklić, Ana

Doctoral thesis / Disertacija

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:082165

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repozitory







Sveučilište u Zagrebu
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ANA TOMASOVIĆ TEKLIĆ

METODA PRORAČUNA ŠIRENJA FLIKERA UZROKOVANIH PRIKLJUČKOM ELEKTROLUČNE PEĆI NA ELEKTROENERGETSKU MREŽU

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2019.



Sveučilište u Zagrebu
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ANA TOMASOVIĆ TEKLIĆ

METODA PRORAČUNA ŠIRENJA FLIKERA UZROKOVANIH PRIKLJUČKOM ELEKTROLUČNE PEĆI NA ELEKTROENERGETSKU MREŽU

DOKTORSKI RAD

Mentor: prof. dr. sc. Ivica Pavić

Zagreb, 2019.



University of Zagreb
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTING

ANA TOMASOVIĆ TEKLIĆ

METHOD FOR CALCULATION OF FLICKER PROPAGATION CAUSED BY ELECTRIC ARC FURNACE CONNECTION TO POWER SYSTEM NETWORK

DOCTORAL THESIS

Supervisor: Professor Ivica Pavić, Ph.D.

Zagreb, 2019

Doktorski rad izrađen je na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu elektrotehnike i računarstva, na Zavodu za visoki napon i energetiku.

Mentor: prof. dr. sc. Ivica Pavić

Doktorski rad ima: 111 stranica

Doktorski rad br.:_____

Životopis mentora

Ivica Pavić rođen je u Slavonskom Brodu 1962. godine. Diplomirao je i magistrirao u polju elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Zagrebu 1987., odnosno 1992. god., a doktorat znanosti stekao je na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu u polju elektrotehnike 1999. godine.

Početkom 1987. godine počeo je raditi u tvornici Rade Končar-Elektroueđaji, a u listopadu iste godine zaposlio se kao asistent na Zavodu za visoki napon i energetiku Elektrotehničkog fakulteta u Zagrebu. Trenutno je zaposlen na radnom mjestu redovitog profesora na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu. Sudjelovao je u 7 znanstveno-istraživačkih projekata financiranih od strane Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH, te jednom međunarodnom projektu. Objavio je preko 100 radova u znanstvenim i stručnim časopisima, te zbornicima međunarodnih i domaćih konferencija iz područja analize i vođenja pogona, te planiranja razvoja elektroenergetskog sustava. Autor je dva sveučilišna priručnika, te recenzent većeg broja znanstvenih članaka u inozemnim i domaćim časopisima. Član je Akademije tehničkih znanosti Hrvatske (HATZ), stručnih udruga IEEE i HRO Cigre, te dva Tehnička odbora Hrvatskog zavoda za norme.

Supervisor curriculum vitae

Ivica Pavić was born in Slavonski Brod in 1962. He received B.Sc. and M.Sc. degrees in electrical engineering from the University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering (ETF), Croatia, in 1987 and 1992, respectively and Ph.D. degree in electrical engineering from the University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing (FER), Croatia in 1999. In the beginning of 1987 he started working in Rade Koncar - Electric Systems and from October of the same year he is working at the Department of High Voltage and Power Systems at ETF, Zagreb. Currently he is a Full Professor at FER Zagreb. He participated in 7 scientific projects financed by the Ministry of Science, Education and Sports of the Republic of Croatia and in one international scientific project. He published more than 100 scientific and professional papers in journals and international and domestic conference proceedings in the area of power system analysis, control and planning. He is an author of two university manuals and reviewer of a large number of scientific articles in international and domestic journals. He is a member of Croatian Academy of Engineering (HATZ), IEEE society, Croatian Committee of Cigré and two technical committees of Croatian Standards Institute.

Zahvala

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Ivici Pavići i doc. dr. sc. Božidaru Filipoviću-Grčiću na pomoći, kritičkim napomenama i vrijednim sugestijama tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem svojoj obitelji na strpljenju i potpori.

Sažetak

Kvaliteta električne energije (KEE) je obilježje električne energije u određenoj točki elektroenergetskog sustava (EES) promatrano u usporedbi s referentnim tehničkim parametrima koji se određuju na temelju višegodišnjih iskustava stečenim analizama stanja u elektroenergetskim mrežama. Održavanje određene razine kvalitete napona u nekoj točki mreže je obveza operatora sustava, a nužno je zbog ispravnog rada opreme koja je priključena na elektroenergetski sustav. Ovu zadaću operator sustava provodi ograničavanjem negativnog povratnog djelovanja opreme svih korisnika mreže. Svaki korisnik mreže - kupac ili proizvođač električne energije je dužan povratna djelovanja svoje opreme na kvalitetu napona (injektiranje viših harmonika, uzimanje jalove snage, emisija flikera i nesimetrije opterećenja) svesti na propisane (unaprijed dogovorene) granične vrijednosti koje u načelu određuje nadležni operator sustava.

U ovom radu opisana je metoda za rješavanje problematika širenja flikera kroz elektroenergetsku mrežu. Pri tome je bilo važno vjerno modelirati trošila sa fluktuirajućim karakterom iznosa opterećenja kao izvor flikera (u ovom radu opisan je model elektrolučne peći), kao i elemente elektroenergetske mreže (nadzemni vodovi, kabeli, transformatori), kako bi se moglo pravilno prikazati širenje flikera po različitim naponskim razinama. Dobiveni rezultati proračuna širenja flikera kroz mrežu su uspoređeni s istovremenim mjerenjima razine flikera u više čvorišta elektroenergetskog sustava, tijekom rada elektrolučne peći, čime je napravljena verifikacija predložene metode.

Ključne riječi: kvaliteta električne energije, kvaliteta napona, negativno povratno djelovanje, nelinearno trošilo, viši harmonici, flikeri, elektrolučna peć.

METHOD FOR CALCULATION OF FLICKER PROPAGATION CAUSED BY ELECTRIC ARC FURNACE CONNECTION TO POWER SYSTEM NETWORK

Power quality (PQ) is a characteristic of electricity at a given point in the power system (PS) when compared to the reference technical parameters that are determined based on years of experience gained from the analysis of Grid Codes. Maintaining a certain level of voltage quality at some point in the network is an obligation of the system operator, and it is necessary for the proper operation of the equipment connected to the power system. The system operator performs this task by limiting the negative influence of the equipment of all network users. Each network user - buyer or producer of electricity is obliged to reduce the negative influence of his equipment on voltage quality (injection of harmonics, reactive power, flicker emission, and load asymmetry) to the prescribed (pre-agreed) values, which are generally determined by the relevant system operator.

This thesis describes a method for solving flicker propagation problems through the power grid. It is important to accurately model the fluctuating load as a flicker source (this thesis describes a model of an electric arc furnace), as well as the elements of the power grid (overhead lines, cables, transformers), so that flicker propagation through different voltage levels could be estimated. The results of the calculation of flicker propagation through the network are compared with simultaneous measurements of the flicker level in several nodes in the power system, during the operation of the arc furnace, which is used for the verification of the proposed method.

The first, introductory chapter of the thesis briefly describes the problem of the power quality in the power system, which can be disturbed by the connection of different types of devices, and significantly affect all users of the electricity network. One of the indicators of voltage quality is the rapid voltage change, which for frequencies between 0.5 Hz and 30 Hz causes a noticeable voltage oscillation called flicker. Flickers cause flickering of the light visible to the human eye, which causes a feeling of discomfort. In addition, flickers affect the life span of the equipment, especially electronics, and can cause some interference with its operation. This chapter describes the motives for the preparation of the doctoral thesis, which results in the development of a method that would allow significantly shorter and numerically more stable calculation of the short-term flicker in the nodes of the power grid of different voltage levels. The third part of the introductory chapter provides an overview of the papers

and research published so far in the subject area. The basic problem of modeling an arc furnace is its irregular and unpredictable operation, depending on several influencing factors, such as the composition and size of the batch composition, electrode type, pressure and temperature of the arc plasma, arc length and radius, etc. Several approaches are mentioned in the literature. Modeling of the arc furnace in the time or frequency domain, based on empirical formulas, U-I characteristics of the arc, models with voltage or current source and the stochastic interpretation of the arc.

The second chapter deals with the power quality, with particular emphasis on the voltage quality, which, because of its relatively simple measurability, is most commonly used to evaluate the negative influence of network users on the proper operation of the entire power system. All relevant voltage quality indicators that can be divided into persistently occurring phenomena and discrete phenomena are addressed.

The third chapter provides an overview of the technical reports and international standards regarding power quality and electromagnetic compatibility. Voltage quality can be predicted at the planning stage or controlled at the power grid operation phase. In both cases, it is necessary to determine the levels of interference that network users' equipment can generate, but also to tolerate without damage or loss of functions, which is referred to as the compatibility levels in the literature. Guidelines for assessing the impact of network users' facilities on voltage flicker or rapid voltage change in medium voltage and high voltage power grids are provided by the international standard IEC 61000-3-7: 2008 "Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3-7: Limits - Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems ". The compatibility levels defined by this standard are based on a 95% probability that a particular interference will not exceed a given limit across the entire power system.

The fourth chapter describes the functional specifications for determining the strength of a short-term flicker, defined by the international standard IEC 61000-4-15 "Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4-15: 2003 Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specification", which also describes in detail the principle of operation of a flicker measuring device, known in the literature as the flickermeter. The functional diagram of the flickermeter consists of 5 blocks, which according to the tasks they perform can be divided into two groups. The first group deals with the simulation of the lighting-eye-brain response, and the second group records the statistics of flickers and presents it.

The fifth chapter of the thesis describes the simulation model of an electric arc furnace, used in all subsequent calculations. Unlike the models mentioned in the literature, the model

developed in the conducted research is based on the dynamic U-I characteristic of the electric arc, to which a stochastic approach is applied to determine the modulation factor m, which was randomly generated in the 0-m range by uniform distribution and factor adjusting the electric arc to the power of the electric arc furnace. The change of electric arc resistance is modeled with one linear and two exponential segments, and the process of determining the modulation and adjustment factors ends when the calculated values of the short-term flicker which match the values obtained with the measurement, with satisfactory accuracy. The developed simulation model is made in the Matlab Simulink software package, and the model verification is performed for the condition of the power system network with minimum and maximum short circuit power on the connection site of the arc furnace. Comparison with actual measurements reveals a satisfactory matching between the results, confirming the first part of the scientific contribution of this thesis.

The sixth chapter deals with the processing and analysis of the measurements used in the thesis to verify the simulation model, as well as to verify the proposed method of flicker propagation through the power grid. The measurements used in the thesis were made in one real case of connection of an electric arc furnace to the transmission power system, and in addition to the location of the connection, measurements were also made at several surrounding nodes of the transmission, distribution and low-voltage power system. Since the measurements consisted of a seven-day period, which was defined by the standard for measuring voltage quality, it was possible to choose, during that time interval, periods during which the arc furnace operated in all three different characteristic phases of operation: the boring, melting and refining phase. In those phases it is possible to check the accuracy of the developed simulation model.

The seventh chapter of the thesis deals with the method of flicker propagation through the power grid. Flicker propagation and attenuation calculations on the power grid are most often performed in the time domain, due to the nonlinear, fluctuating characteristic of the electric arc furnace. Depending on the step of integrating the numerical procedure, such calculations can take a long time, and the stability of the iterative procedure itself is a common problem. Therefore, the research conducted in this doctoral thesis started from the idea of separating the dominant voltage subharmonics from the waveform obtained by the previously developed simulation model of an electric arc furnace in the time domain. Specifically, research has shown that each type of arc furnace, depending on its nominal power, batch composition, operating phase and other parameters of the electric arc, is characterized by a waveform in which the predominant voltage harmonics play a dominant role (in this case, 20 Hz and 30 Hz voltage subharmonics). By applying the fast Fourier transform procedure, these dominant

subharmonics can be isolated and injected into the power grid. By applying known harmonic analysis their values can be determined at any point in the network. Further research found that there was a correlation between the values of the dominant voltage harmonics and the short-term flicker in individual nodes of the network, which allowed the flicker to be calculated in any part of the network, thus confirming the second part of the scientific contribution. After describing and elaborating the flicker propagation method itself, a verification procedure is defined, in which it is determined that in order to evaluate the quality of the developed method, a comparison of calculated and measured short-term flicker values should be made. In this case, the power system model of the developed method corresponds to the actual switching and operating state in the real power network. By comparing the calculation results obtained with the proposed flicker propagation method and the actual measurements, a satisfactory match can be observed, thus confirming the third part of the scientific contribution. The calculated values of the short-term flicker are slightly higher than the measured values, which is to be expected given that the mathematical model does not take into account all the damping, present in the actual power grid.

Chapter 8 provides concluding considerations in which a brief overview of the work with special emphasis on the comparison of the results of short-term flicker measurement and the results of calculation, using the developed simulation model of an electric arc furnace and the method of flicker propagation through the power grid.

Based on the calculation of their emission, the attenuation of these dominant voltage subharmonics was found to be very similar to the attenuation of the short-term flicker. In this way, a correlation was established between the propagation (damping) of the dominant voltage subharmonics and the damping of the values of the short-term flicker. Therefore, it can be stated that by injecting the 20 Hz and 30 Hz frequency signals at the point of connection of the arc furnace and monitoring its attenuation through the network, short-term flicker values in all the surrounding nodes of the network can also be determined. This method of determining the attenuation values of the short-term flicker avoided long-term and unstable time-domain calculations, thus fulfilling the other scientific contribution of the paper.

The results of flicker propagation calculations based on the developed simulation model and the flicker propagation method described previously are compared with measurements in the real system. The comparison is made for two phases of operation of the arc furnace (boring and melting) in which the highest values of short-term flicker in the network are expected. Based on the comparison made, it can be concluded that there is a satisfactory match between

the results of the calculations and the measurements carried out, thus confirming the third scientific contribution of the thesis.

The short-term flicker values obtained from the calculation are slightly higher than the results obtained from the measurement, which means that the flicker propagation calculation model is on the safe side relative to the situation in the actual power grid. This is expected since the computational model does not take into account all the damping that exists in reality (eg damping of measuring signals via measuring voltage and current transformers, etc.). Therefore, it can be concluded that the developed arc furnace simulation model and flicker propagation calculation method, based on the correlation with the propagation of dominant voltage subharmonics generated by the arc furnace, can be used with satisfactory accuracy to estimate flicker attenuation in the transmission and distribution power system.

Keywords: power quality, voltage quality, negative influence, nonlinear load, harmonics, flicker, electric arc furnace.

Sadržaj

1. Uvod 1
   1.1 Uvodna razmatranja 1
   1.2 Motivacija 3
   1.3 Pregled literature 4
2. Kvaliteta električne energije 7
   2.1. Frekvencija napona 7
   2.2. Iznos napona u stacionarnom stanju 8
   2.3. Brze dinamičke promjene napona (fliker) 9
   2.4. Nesimetričnost napona 11
   2.5. Harmoničko izobličenje valnog oblika napona 11
   2.6. Međuharmonici napona 13
   2.7. Naponi signaliziranja – MTU 13
   2.8. Propadi napona 13
   2.9. Prenaponi mrežne frekvencije 14
   2.10. Tranzijentni prenaponi 14
3. Pregled tehničkih izvještaja i normi iz područja kvalitete električne energije 16
   3.1 HRN EN 61000-2-4:1997 16
   3.2 IEC 61000-3-6:2008 18
   3.3 IEC 61000-3-7:2008 19
   3.4 IEC 61000-3-13:2008 20
4. Funkcionalni opis flikermetra 23
5. Matematički model elektrolučne peći 29
   5.3.1 Rezultati proračuna za slučaj minimalne snage kratkog spoja u mreži 42
   5.3.2 Rezultati proračuna za slučaj maksimalne snage kratkog spoja u mreži 50
   5.3.3 Usporedba rezultata proračuna i mjerenja flikera elektrolučne peći 28,8 MW 58
6. Mjerenja širenja flikera u elektroenergetskoj mreži 60
   6.1 Opis i svrha mjerenja 60
   6.2 Mjesta mjerenja 61
   6.2.1 Rezultati mjerenja KN na 110 kV sabirnicama u TS 110/35(33) kV Stanica 1 64
   6.2.2 Rezultati mjerenja KN na 110 kV sabirnicama u TS 220/110 kV TE Elektrana 1 66
   6.2.3 Rezultati mjerenja KN na 110 kV sabirnicama u TS 110/35 kV Stanica 2 69
   6.2.4 Rezultati mjerenja KN na 10 kV sabirnicama u TS 110/10 kV Stanica 3 71
   6.2.5 Rezultati mjerenja KN na 0,4 kV sabirnicama u TS 10/0,4 kV Stanica 4 74
   6.2.6 Rezultati mjerenja KN na 0,4 kV sabirnicama u TS 10/0,4 kV Stanica 5 76
   6.2.7 Usporedba rezultata mjerenja flikera u više mjernih točaka 79
   6.3 Zaključno o mjerenjima 82
7. Modeliranje i verifikacija metode širenja flikera u elektroenergetskoj mreži 85
   7.1 Klasični proračun širenja flikera u vremenskoj domeni 85
   7.1 Proračun širenja flikera zasnovan na emisiji naponskih subharmonika 91
8. Zaključak 94

Literatura 97
Popis oznaka i kratica 103
Životopis 107
Popis objavljenih radova 108
Curriculum Vitae 111

1. Uvod

1.1 Uvodna razmatranja

Elektroenergetski sustav je složeni tehnički sustav koji se sastoji od proizvodnih jedinica, elektroenergetske mreže za prijenos i distribuciju električne energije i korisnika mreže. Glavne zadaće elektroenergetskog sustava su siguran i pouzdan rad, te osiguranje traženih potreba za električnom energijom svakom korisniku mreže u svakom trenutku uz zadovoljenje propisane razine kvalitete napona.

Idealan sinusni valni oblik, amplitude jednake $\sqrt{2}\cdot Un$ i frekvencije jednake 50 Hz (60 Hz u Americi) u cijeloj mreži nije ekonomski opravdano, a vrlo često ni tehnički moguće postići (električna energija se najčešće proizvodi na velikoj udaljenost od mjesta potrošnje, prenosi se elektroenergetskom mrežom od mjesta proizvodnje do mjesta potrošnje preko nekoliko stupnjeva transformacije, zahtijeva konstantnu ravnotežu između proizvodnje i potrošnje, ne može se učinkovito uskladištiti u značajnim količinama i ne može se dobiti provjera kvalitete neposredno prije upotrebe).

Kvaliteta napona u nekoj točki elektroenergetske mreže iskazuje zbirno međudjelovanje proizvodnih jedinica, prijenosnih i distribucijskih vodova i transformacija te trošila spojenih na elektroenergetski sustav, izraženim kroz nekoliko parametara:

- frekvencija napona,
- iznos napona u stacionarnom stanju (najčešće 10-min RMS prosjeci),
- brze dinamičke promjene napona (fliker),
- nesimetričnost napona,
- harmoničko izobličenje valnog oblika napona,
- međuharmonici napona,
- propadi napona,
- prenaponi mrežne frekvencije,
- tranzijentni prenaponi,
- naponi signaliziranja (MTU).

Navedeni parametri se mogu podijeliti u dvije skupine: prvih 6 parametara pripadaju u skupinu trajno prisutnih pojava, a ostala 4 parametra pripadaju u skupinu diskretnih pojava u mreži. Isto tako postoje i preporuke koje definiraju dozvoljeno odstupanje od navedenih parametara. Preporuke se donose na međunarodnoj razini i mogu, ali ne moraju, biti zakonski

obvezujuće. Međunarodne organizacije koje daju vrijednosti tehničkih parametara su: IEC, CENELEC, IEEE, UNIPEDE, CIGRE, ANSI i dr.

Za kvalitetu napona u nekoj točki mreže su odgovorni i operator sustava i korisnici mreže. Održavanje određene razine kvalitete napona (nužno zbog ispravnog rada opreme koja je priključena na elektroenergetski sustav) u nekom čvorištu mreže je obveza operatora sustava. Ovu zadaću operator sustava provodi ograničavanjem negativnog povratnog djelovanja opreme svih korisnika mreže. Svaki korisnik mreže je dužan povratna djelovanja svoje opreme na kvalitetu napona (emisija flikera, injektiranje viših harmonika, uzimanje jalove energije i nesimetrije opterećenja) svesti na propisane granične vrijednosti koje u načelu određuje operator sustava na temelju međunarodnih normi i tehničkih izvještaja.

Trošila sa fluktuirajućim karakterom iznosa opterećenja (dalje u tekstu: fluktuirajuća trošila) kao što su elektrolučne peći, aparati za zavarivanje i slično, svojim radom uzrokuju poremećaje u elektroenergetskom sustavu kao što su flikeri (tzv. brza kolebanja napona), nesimetrije napona, generiranje viših hamonika i prenapone uzrokovane čestim sklapanjima prekidača. Elektrolučna peć uzima iz mreže nesinusoidalnu struju uslijed nelinearnosti otpora električnog luka koji se iznova pali i gasi u svakoj poluperiodi. Posljedica toga su osim flikera i viši harmonici čije amplitude su stohastičke veličine i teško je odrediti pravilo po kojem se mijenjaju.

Zbog toga je vrlo važno sagledati problematiku priključenja korisnika mreže koji sadrži fluktuirajuća trošila na elektroenergetski sustav. Obzirom da razine kvalitete napona moraju biti u propisanim granicama, korisnici mreže moraju povratna djelovanja svoje opreme svesti na te granice, što se postiže ugradnjom raznih kompenzacijskih uređaja koji poskupljuju priključak i rad nekog industrijskog postrojenja.

U prethodnim istraživanjima su obavljena mjerenja kvalitete napona na mjestu priključenja korisnika mreže koji sadrži elektrolučnu peć relativno velike snage. Osim mjesta priključenja, mjerenja su istovremeno obavljena i u drugim točkama elektroenergetskog sustava zbog uvida u stanje kvalitete napona u električki relativno bliskim čvorištima. Iz navedenih mjerenja se može dobiti informacija o razinama flikera uzrokovanih radom elektrolučne peći u okolnim čvorištima mreže, udaljavajući se od izvora po dubini mreže i preko transformacija na niženaponske razine. Mjerenja su obavljena suvremenim analizatorima kvalitete napona, dok su proračuni napravljeni u programskom alatu Matlab.

1.2 Motivacija

S problemom određivanja razine kvalitete napona operatori prijenosnog i distribucijskog sustava susreću se u fazi eksploatacije, ali i u fazi planiranja priključenja novih korisnika na mrežu. Negativni povratni utjecaj različitih nelinearnih trošila na kvalitetu napona na mjestu priključka, ali i u okolnim dijelovima prijenosne i distribucijske mreže, moguće je mjeriti uređajima za ispitivanje kvalitete napona te u skladu s tim provesti odgovarajuće mjere za poboljšanje njegove kvalitete. Za razliku od toga, u fazi planiranja priključka nelinearnog trošila na prijenosnu ili distribucijsku mrežu moguće je napraviti samo procjenu negativnog povratnog djelovanja novog korisnika mreže na kvalitetu napona. Ovisno o analiziranom pokazatelju kvalitete napona (iznos, frekvencija, oblik, simetričnost, flikeri i dr.) koriste se različite metodologije za procjenu njihovog negativnog povratnog utjecaja na mrežu. Tako se npr. za određivanje utjecaja novog trošila na iznos napona u mreži, provode statički i dinamički proračuni tokova snaga, za određivanje utjecaja na nesimetričnost napona provode se trofazni proračuni tokova snaga, a za određivanje utjecaja na oblik napona, provode se harmonijske analize.

S obzirom da je pojava flikera u mreži, u pravilu uzrokovana nepravilnim, intermitirajućim radom trošila, poput elektrolučnih peći i aparata za zavarivanje, njihov utjecaj se najčešće analizira u vremenskoj domeni. Takav pristup je prihvatljiv, ako se želi utvrditi razina flikera na mjestu njegova nastanka i u njegovoj neposrednoj blizini. Međutim, ako je potrebno odrediti razinu flikera u udaljenim čvorištima prijenosne i distribucijske mreže, onda primjena proračuna u vremenskoj domeni najčešće nije zadovoljavajuća, jer sam proračun relativno dugo traje, a vrlo često se javljaju i problemi s konvegencijom. Kako bi se izbjegli navedeni problemi, u predmetnom doktorskom radu predložena je nova metoda za proračun širenja flikera utemeljena na matematičkom modelu izvora flikera u vremenskoj domeni i harmonijskoj analizi širenja naponskih harmonika, karakterističnih upravo za određeni tip nelinearnog trošila. Kako je elektrolučna peć jedan od najvećih izvora flikera u mreži, ista je odabrana kao primjer nelinearnog trošila za koju su provedena sva istraživanja provedena u okviru izrade doktorskog rada. Osim toga, model elektrolučne peći je izabran za predmet istraživanja zbog dostupnih mjerenja na temelju kojih se može verificirati predložena metoda proračuna širenja flikera.

U dosadašnjim istraživanjima, objavljenih u relevantnoj literaturi koja se bavi kvalitetom električne energije, korišteni su različiti modeli elektrolučne peći. S obzirom na nepravilan, fluktuirajući karakter napona i struje elektrolučne peći, u predmetnom doktorskom

radu težište istraživanja je stavljeno na stohastički pristup modeliranju elektrolučne peći, zasnovan na modelu električnog luka opisanog nepravilnom, nelinearnom *U-I* karakteristikom. Osim složenog modela električnog luka, posebnu pažnju treba obratiti i postupku verifikacije predloženog modela, kako bi se na temelju stvarnih mjerenja mogla ispitati kvaliteta modela elektrolučne peći i metode za proračun širenja flikera kroz elektroenergetsku mrežu.

1.3 Pregled literature

Prilikom istraživanja dostupne literature pretraživane su baze IEEE Xplore, Elsevier i Scopus, postoji veliki broj radova iz područja kvalitete električne energije i flikera. Proučen je veliki broj radova koji obrađuju utjecaj elektrolučne peći kao izvora flikera i njihovog širenja kroz elektroenergetsku mrežu.

Visoko nelinearna opterećenja koja se mijenjaju u vremenu, kao što su elektrolučne peći (ELP) primjenjuju se u cijelom svijetu u proizvodnji čelika i kao sirovina se najčešće koristi željezo. ELP predstavljaju trošila velike snage koja uzrokuju značajnije narušavanje kvalitete električne energije u EES-u kao što su harmonici i fluktuacije napona (flikeri) u okolnoj elektroenergetskoj mreži [1] tijekom pojedinih faza proizvodnje. Po načinu izvedbe EPL mogu biti izmjenične ili istosmjerne [2]. Harmonička izobličenja struje i napona mogu uzrokovati nepravilan rad uređaja, dodatne gubitke i prerano starenje opreme u prijenosnoj i distribucijskoj elektroenergetskoj mreži. Flikeri uzrokuju treperenje koje uzrokuje fiziološku nelagodu u vidu treperenja svijetlosnog toka u žaruljama sa žarnom niti. Iz tog razloga priključenje ELP na elektroenergetski sustav prolazi kroz opsežena ispitivanja kako bi se utvrdio minimalan negativni povratni utjecaj na elektroenergetski sustav [3].

U samom radu ELP kao najkritičnije faze rada su početna faza taljenja i faza taljenja. Navedeni postupci mogu značajno utjecati na kvalitetu napona u EES-u [4]. ELP kao nelinerano i vremenski promjenjivo trošilo tijekom svog rada dovodi do porasta harmonika, međuharmonika i flikera, koji se javljaju kao posljedica promjenjivog električnog luka koji nastaje prilikom faza rada ELP i njegove nelinearne U-I karakteristike [5].

Neki od postupaka smanjenja flikera pri radu ELP predstavljaju ugradnju posebnih postrojenja za smanjnje iznosa flikera kao što su statički var kompenzatori (SVC) i statički sinkroni kompenzatori (SGC). Da bi se točno utvrdio utjecaj takovog trošila u elektroenergetskom sustavu potrebno je pravilno modelirati ELP i odrediti utjecaj u vremenskoj domeni i utvrditi ispunjavanje zahtjeva propisanih standardima [6],[7].

U literaturi su predloženi su brojni modeli U-I karakteristika za statičke i dinamičke proračune. Predloženi model kontroliranog naponskog izvora za ELP opisan u [8] temelji se na parcijalno linearnoj aproksimaciji. U literaturi [9],[10] U-I karakteristika je modelirana kao vremenski promjenjivi nelinearni otpor.

U radu [11] koristio se Cassiev model vodljivosti koji koristi jednofaznu U-I karakteristiku tijekom faze taljenja. Model s promjenjivim otporom predložen je u [12] za proučavanje početne faze taljenja gdje je luk opisan kao linearna funkcija duljine luka sa slučajnim varijacijama. Nekoliko primjera koji koriste teoriju kaosa prikazano je u [13],[14] kako bi se opisalo ponašanje i dinamika pogona ELP-i. Stohastički pristupi predloženi su u [15]–[19], sa i bez modeliranja linearne aproksimacije U-I karakteristike. Jedna od najvećih problema kod stohastičnog pristupa je predviđanje ponašanja prvenstveno u početnoj fazi taljenja, gdje je potrebno istovremeno uzeti u obzir nelinearno i stohastičko ponašanje električnog luka za različite načine rada ELP-i, što je posebno važno za procjenu razine treperenja napona.

Budući da je realan i točan model ELP-i vrlo teško modelirati zbog nestabilnosti samog procesa taljenja koje ovisi o šarži, neki noviji predloženi modeli ELP-i koriste umjetne neuronske mreže. U [20] predložena je metoda za modeliranje nelinearne U–I karakteristike koja postiže dosta visoku točnost. Model zasnovan na umjetnoj neuronskoj mreži može biti učinkovito sredstvo ako se koristi za procjenu izobličenja valnog oblika, fluktuacije napona i karakteristika uređaja za kompenzaciju jalove snage u elektroenergetskom sustavu. Rezultati simulacije dobiveni korištenjem predloženog modela uspoređeni su s stvarnim izmjerenim podacima i dvije druge tradicionalne neuronske mreže. Pokazano je da predložena metoda daje povoljne rezultate, i da je primjenjivo za modeliranje sličnih tipova nelinearnih tereta.

U radu [21] autori su predviđali iznose flikera ELP-a korištenjem Grey prediktor modela. Za implementaciju modela korišteni su stvarni mjereni podaci. Rezultati dobiveni na temelju predloženog modela uspoređeni su s dvije metode temeljene na umjetnim neuronskim mrežama. Usporedba je pokazala da predložena metoda daje bolje rezultate predviđanje flikera od drugih metoda obrađenih u članku. U [20] je za modeliranje dinamičkih U-I karakteristike ELP korištena je diskretna valna transformacija (*eng. Discrete wavelet transform* ili DWT) i neuronska mreža s radijalnom baznom funkcijom (*eng. radial basis function neural network* ili RBFNN) ELP. Predložena metoda također se može primijeniti za modeliranje drugih vrlo nelinearnih tereta kako bi se procijenila učinkovitost kompenzacijskih uređaja. Kako bi preciznije modelirali više faza pogona ELP-a, autori su proširili prethodna istraživanja iz rada [22] poboljšanjem modela uključivanjem provjere konvergencije u RBFNN u fazi treninga,

uvođenjem proširene pregledne tablice za spremanje RBFNN parametara i kriterije za identifikaciju svakog od četiri stupnja djelovanja ELP-a dobivenih pomoću DWT [23]. Međutim, pristup koji koristi umjetne neuronske mreže zahtijeva značajno učenje na velikom broju pripremljenih primjera, dok pitanja kao što su brzina učenja, stabilnost i konvergencija težinskih faktora ostaju otvorena područja za istraživanje i usporedbu. Problematika negativnog povratnog djelovanja u postrojenjima s ELP i provedena istraživanja koja pregledana opisana je u [24]- [82].

2. Kvaliteta električne energije

Idealan sinusni valni oblik, amplitude jednake $\sqrt{2}\cdot U_n$ i frekvencije jednake 50 Hz (60 Hz u Americi) u cijeloj mreži nije ekonomski opravdano, a vrlo često ni tehnički moguće postići (električna energija se najčešće proizvodi na velikoj udaljenost od mjesta potrošnje, prenosi se električnom mrežom od mjesta proizvodnje do mjesta potrošnje preko nekoliko stupnjeva transformacije, zahtjeva konstantnu ravnotežu između proizvodnje i potrošnje, ne može se uskladištiti i ne može se dobiti provjera kvalitete neposredno prije upotrebe).

Kvaliteta napona u nekoj točki distribucijske elektroenergetske mreže iskazuje zbirno međudjelovanje proizvodnih jedinica, prijenosnih i distribucijskih linija i transformacija te trošila spojenih na elektroenergetski sustav, izraženim kroz nekoliko parametara:

- frekvencija napona,
- iznos napona u stacionarnom stanju (najčešće 10-min RMS prosjeci),
- brze dinamičke promjene napona (fliker),
- nesimetričnost napona,
- harmoničko izobličenje valnog oblika napona,
- međuharmonici napona,
- propadi napona,
- prenaponi mrežne frekvencije,
- tranzijentni prenaponi,
- naponi signaliziranja (MTU).

Navedeni parametri se mogu podijeliti u dvije skupine: prvih 6 parametara pripadaju u skupinu trajno prisutnih pojava, a ostala 4 parametra pripadaju u skupinu diskretnih pojava u mreži. Isto tako postoje i preporuke koje definiraju dozvoljeno odstupanje od navedenih parametara. Preporuke se donose na međunarodnoj razini i mogu, ali ne moraju, biti zakonski obvezujuće.

Međunarodne organizacije koje daju vrijednosti tehničkih parametara su: IEC, CENELEC, IEEE, UNIPEDE, CIGRE, ANSI i dr.

2.1. Frekvencija napona

Frekvencija napona je broj ponavljanja naponskog vala u sekundi. U europskim elektroenergetskim mrežama nazivna vrijednost frekvencije iznosi 50 Hz (U Americi je to 60 Hz).

Frekvencija je jedinstvena za cijeli sustav, za razliku od napona za koji se može reći da je lokalna karakteristika mreže (zbog padova napona između pojedinih čvorišta, te zbog više naponskih razina u elektroenergetskom sustavu). Zbog toga će se, ukoliko dođe do poremećaja koji uzrokuje promjenu frekvencije, promijenit frekvencija u cijelom sustavu.

Poremećaji koji uzrokuju promjenu frekvencije su oni koji uzrokuju neravnotežu između proizvodnje i potrošnje električne energije u sustavu, kao npr. ispadi tereta, generatora odnosno elektrana ili kratki spojevi u sustavu. Promjena frekvencije koju će određeni poremećaj uzrokovati ovisi o veličini poremećaja i otpornosti sustava na taj poremećaj koja raste sa veličinom sustava. Zbog toga su u velikim interkonektiranim elektroenergetskim sustavima (kao što je UCTE u kojem je i hrvatski EES od 2004. godine) značajne promjene frekvencije rijetke.

Održavanje frekvencije konstantnom, barem u prijelaznom stanju, nije niti moguće niti potrebno. Odstupanja frekvencije od nazivne vrijednosti u većini sustava su ispod ± 0.1 Hz kada se radi o normalnom pogonu. Ukoliko se radi o havarijskim situacijama i otočnom pogonu, odstupanja frekvencije mogu doseći i do 2 Hz. Konstantna frekvencija potrebna je zbog trošila koji su predviđeni za određenu frekvenciju. Frekvencija ispod 47,5 Hz predstavlja opasnost kod uobičajene izvedbe generatora, jer se javljaju mehaničke vibracije koje mogu dovesti do raspada samog generatora. Zbog toga se postavljaju podfrekvencijski i nadfrekvencijski releji koji reagiraju već na promjenu frekvencije od ± 0.1 Hz.

2.2. Iznos napona u stacionarnom stanju

Iznos napona se definira kao efektivna vrijednost napona (RMS) na mjestu predaje električne energije u određenom trenutku, mjerena u određenom vremenskom periodu. Referentna vrijednost je određena nazivnim (za NN) ili deklariranim (za ostale naponske razine SN i NN i VN) naponom mreže (U_n ili U_c), a nazivni napon predstavlja ime naponske razine za koju je proizvedena ugrađena oprema. Propisima dozvoljeno odstupanje napona, razlikuje se ovisno o naponskoj razini.

Iznos napona u normalnim pogonskim uvjetima najčešće nije stalan već varira. Uzrok tih varijacija je u promjenama opterećenja, tj. u uključivanju i isključivanju velikog broja trošila ili u kvarovima koji pogađaju EES. U NN mrežama se najčešće događa da je napon niži od nazivnog iznosa U_n. Uzrok tome su padovi napona čija je veličina proporcionalna opterećenju. Iznosi napona, također, mogu biti i viši od nazivnog do čega dolazi zbog loše koordinacije regulacije napona. Povišenja napona kao i smanjenja u odnosu na nazivni potencijalna su

opasnost za trošila, jer uzrokuju smanjenje njihovog životnog vijeka, neispravan rad te mogućnost njihova pregaranja.

Naprimjer, iznos napona dosta utječe na rasvjetu, što je i golim okom primjetno kod žarulje sa žarnom niti. Uslijed previsokih napona dolazi do smanjenja životne dobi ili pregaranja žarulje. Manje primjetan učinak je ukoliko se radi o fluo cijevima.

Velik je utjecaj iznosa napona i na asinkrone motore. Za motor u pogonu je potrebna konstantna mehanička snaga na osovini, koju vuče iz mreže, koja je linearno proporcionalna naponu i struji: Sa promjenom iznosa napona mijenja se i struja koju motor vuče iz mreže. Dakle kod 10 % povišenog napona motor vuče 10% nižu struju i obrnuto, kod 10% sniženog napona, vuče 10% višu struju, a kod više struje imamo povećano grijanje motora. O iznosu napona ovisi i prekretni moment asinkronog motora, točnije o kvadratu napona, što znači da će za 10 % veći napon prekretni moment biti 21% veći, i obrnuto. Korisnost asinkronog motora pada bez obzira radi li se o povećanju ili sniženju napona.

2.3. Brze dinamičke promjene napona (fliker)

Pod brzim promjenama napona se podrazumijevaju brze promjene iznosa napona napajanja tijekom jedne poluperiode koje traju određeni, ali nespecificirani period vremena. Najčešće su posljedica promjena opterećenja u instalacijama korisnika mreže ili sklapanja u elektroenergetskoj mreži.

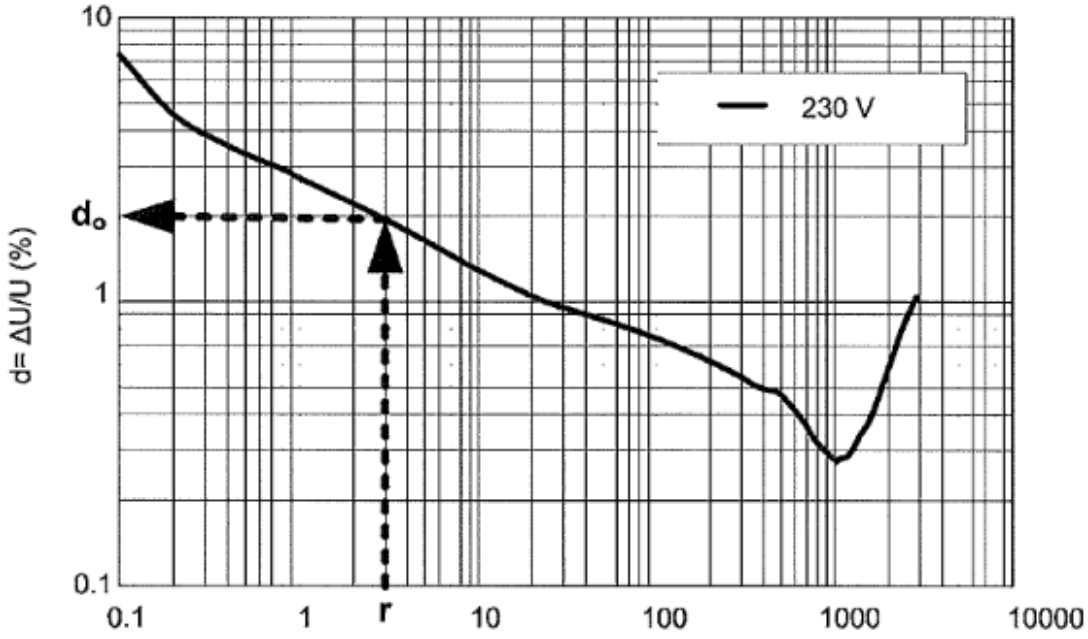
Primjer manifestacije brzih promjena napona jest treperenje napona (fliker). To su oscilacije vrijednosti napona koje se ponavljaju. Fliker je moguće definirati kao vidom zamjetljivo treperenje rasvjetnog tijela, izazvano svjetlosnim podražajem uz vremensko kolebanje svjetlosne gustoće ili spektralne razdiobe. Primjer flikera je titranje svjetla žarulje ili zaslona računala. Takvo vidom primjetno treperenje iznad određene granice predstavlja neugodu u vizualnoj percepciji (javljaju se glavobolje, nervoze, depresije, kvari se vid itd..). Kod određene frekvencije treperenje je moguće zamijetiti i pri vrlo malim amplitudama. Opseg frekvencije amplitudne modulacije koja uzrokuje primjetno treperenje je između 0,5 i 30 Hz, pri čemu je amplituda u izravnoj funkciji modulirajuće frekvencije. Uočavanje treperenja ovisi od osobe do osobe, tj. o senzibilnosti oka. Ljudskom oku najviše smetaju flikeri frekvencije od 7 do 10 Hz.

Jakost treperenja se definira na sljedeći način: ako se u prostoriji nalazi 100 ljudi pod jednakim uvjetima, i ako se intenzitet svjetla promjeni toliko da to opazi 50 od ukupno 100 nazočnih ljudi, kaže se da treperenje (fliker) ima intenzitet 1.

Uzroci treperenja su nagle učestale promjene opterećenja uzrokovane radom trošila koja vuku velike i izrazito promjenjive struje iz mreže (dakle mijenja im se prividna snaga kojom opterećuju mrežu i to najčešće u nepravilnom ritmu), kao npr. elektrolučne peći (po jediničnoj snazi i po intenzitetu smetnji su na prvom mjestu), fotokopirni strojevi, aparati za zavarivanje i slični strojevi. Čest izvor treperenja može biti i pokretanje električnih motora. Pri pokretanju oni mogu vući struju nekoliko puta veću od svoje nazivne struje, što uzrokuje padove napona. Među uzrocima treperenja napona, potrebno je spomenuti i kratki spoj.

Treperenje smeta promatrače, a osim toga može biti štetno i za opremu, smanjiti joj životni vijek i uzrokovati probleme s njezinim radom (npr. može uzrokovati loš rad sklopova za faznu sinkronizaciju, ili loš rad elektroničkih regulatora, elektroničkih računala, uređaja za zaštitu te smetnje u nekim industrijskim elektrolitičkim procesima). Također, mogu izazvati smetnje kod prijema televizijskog programa (svjetlina slike, vertikalna sinkronizacija, veličina slike), koje najčešće nisu velikog intenziteta i ovise o tipu prijemnika.

Pojednostavljena analitička metoda za procjenu jakosti flikera, temelji se na tzv. "P_{st} = 1" krivulji, a opisana je u normi [6]. Navedena krivulja za distribucijski napon 230 V prikazana je na slici 2.1, a vrijedi za pravilne pravokutne promjene efektivne vrijednosti napona. Tom krivuljom opisana je ovisnost osjetljivosti ljudskog oka na promjenu efektivne vrijednosti napona. Iz krivulje je vidljivo da je ljudsko oko najosjetljivije na promjenu efektivne vrijednosti napona pri frekvenciji 1020 promjena u minuti.



Slika 2.1 Krivulja osjetljivosti ljudskog oka na promjenu efektivne vrijednosti napona ("Pst = 1" krivulja)

Pri toj frekvenciji, većini ljudi zamjetna je promjena osvjetljenja koju izazove relativna pravokutna promjena napona u iznosu od 0.275% nazivnog napona. Toj vrijednosti intenziteta titranja napona odgovara jakost kratkotrajnog flikera $P_{st} = 1$. Pravokutnu promjenu efektivne vrijednosti napona koja se događa jednom u minuti, većina ljudi primjećuje kada je iznos te relativne promjene 2.724%, čemu također odgovara jakost kratkotrajnog flikera $P_{st} = 1$.

2.4. Nesimetričnost napona

Trofazna mreža pretpostavlja idealnu simetričnost po fazama, kako po izvedbi ugrađenih elemenata, tako i u normalnom pogonu, što se u stvarnosti ne može potpuno ispuniti. Nesimetričnost napona u trofaznoj mreži predstavlja nejednakost napona pojedinih faza po amplitudi i/ili ako kutovi faznog pomaka među susjednim faznim naponima nisu 120°. Nesimetričnost napona se određuje prema omjeru inverzne i direktne komponente napona.

Od elemenata mreže, nesimetrični su, u većoj ili manjoj mjeri, nadzemni vodovi, neke vrste kabela i transformatori. Pretpostavka je da generator proizvodi idealan, simetričan trofazni sustav napona. Putem do trošila unosi se nesimetričnost u trofazni sustav napona. U distribucijskim mrežama nesimetričnost je uzrokovana nesimetričnim trošilima, neravnomjernom raspodjelom tereta po fazama ili kvarom.

Uzroci manjih nesimetrija (do 3 %) su jednofazni ili dvofazni tereti kao što su vlakovi (dvofazna trošila), elektrolučne peći (najčešće jednofazne) spojene na SN ili VN mrežu, razlika u raspodjeli kućanstava po fazama NN mreže. Veće nesimetrije (više od 5 %) mogu biti uzrokovane prekidom jedne faze i ostalim nesimetričnim uvjetima u mreži.

Uređaji koji rade na nesimetričnom izvoru "vući" će struje stupnja nesimetrije nekoliko puta većeg od napona izvora. Rezultat toga je da će se struje triju faza dosta razlikovati te može doći do porasta temperature u stroju. Nesimetrije napona posebno smetaju generatorima i sinkronim motorima, jer dolazi do pojavljivanja inverznog okretnog magnetskog polja, pa dolazi do dodatnog zagrijavanja strojeva i smanjenja njihove životne dobi. Smanjenje nesimetrije napona bitno je jer se tako smanjuju gubici napona i energije u mreži.

2.5. Harmoničko izobličenje valnog oblika napona

Viši naponski harmonici su sinusoidalni naponi frekvencije jednake cjelobrojnom višekratniku osnovne pogonske frekvencije. Viši harmonici su nepoželjni u sustavu, jer izobličuju osnovni sinusni val, što uzrokuje probleme u napajanju osjetljivih trošila, koja zahtijevaju gotovo „čisti“ sinusni napon (npr. medicinska oprema).

Više harmonike u mrežnom naponu (tj. harmonijsko izobličenje napona) najčešće proizvode viši harmonici struja nelinearnih trošila koji su priključeni na raznim razinama distribucijske mreže. Harmonijske struje istih frekvencija iz različitih izvora pritom se zbrajaju vektorski.

Industrijska trošila kao što su uređaji energetske elektronike (npr. usmjerivači, konvertori, bilo da rade kao ispravljači ili kao izmjenjivači), motori promjenjive brzine, indukcijske elektropeći i lučne elektropeći, koja zbog svojih svojstava uzimaju izobličenu struju iz mreže predstavljaju generatore/izvore viših harmonika. Osim toga, pojavu viših harmonika, generiranih na samom izvoru, može izazvati i nazubljenost statora i raspored njegovih namota, sadrži ih i struja magnetiziranja energetskih transformatora, pogotovo ako im se željezo magnetizira preko zasićenog dijela karakteristike magnetiziranja, a stvaraju ih i statički uređaji za kompenzaciju jalove snage s tiristorskom regulacijom.

Sasvim sažeto, može se reći da izobličenja struje i napona izazivaju:

- kod generatora, transformatora, kabela, vodova i motora dodatne gubitke u vodičima u vidu Jouleove topline;
- kod transformatora još i dodatne gubitke u željezu, te mogućnost zasićenosti magnetskog kruga;
- kod kabela i kondenzatora dodatne gubitke u dielektriku;
- kod kabela dodatne dodatne gubitke u vanjskim metalnim oblogama, pogotovo ako postoje harmonici reda 3n.
- povećano zagrijavnje neutralnih vodiča uzrokovano strujama viših harmonika reda 3n, a posebno trećeg harmonika koji se u neutralnom vodiču trofaznog sustava ne poništava, već zbraja.

S ekonomskog gledišta, povećanje gubitaka u elementima mreže i aparatima predstavlja gubitak energije, umanjenje korisne instalirane snage, a kod kabela i kondenzatora još i dodatno zagrijavanje, i time ubrzano starenje dielektrika.

Viši harmonici se mogu analizirati:

- **Individualno** za svaki harmonik (U_h) pri čemu je h redni broj broj harmonika preko relativne amplitude izražene u postotku amplitude osnovnog harmonika;
- **Zajednički** prema faktoru ukupnog harmonijskog izobličenja THD_U koji se dobiva iz:

$$THD_u = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2}{U_1}} \cdot 100\% \tag{2.1}$$

Ograničenje do četrdesetog harmonika je uobičajeno.

2.6. Međuharmonici napona

Naponi međuharmonika sinusoidalni su naponi frekvencija koje nisu višekratnici osnovne frekvencije (50 Hz). Mogu se pojaviti kao diskretne vrijednosti frekvencija ili kao široki spektar frekvencija.

Međuharmonici se mogu javiti u mrežama svih naponskih razina. Osnovni izvor međuharmonika su pretvarači frekvencije, asinkroni motori i elektrolučne peći. Ponekad međuharmonici, čak i na niskom naponu, mogu prerasti u flikere ili uzrokovati smetnje na uređajima za mrežno tonfrekvencijskio upravljanje (MTU uređaji).

2.7. Naponi signaliziranja – MTU

Signalni naponi superponirani opskrbnom naponu služe za prijenos informacija u javnoj distribucijskoj mreži i u postrojenju potrošača. Razlikuju se sljedeći signalni naponi u javnim distribucijskim mrežama:

- **signali mrežnog tonfrekvencijskog upravljanja (MTU):** opskrbnom naponu superponirani sinusni signalni napon u frekvencijskom opsegu od 110 Hz do 3000 Hz.
- **signali visoko frekvencijske veze:** opskrbnom naponu superponirani sinusni signalni napon u frekvencijskom opsegu od 3 kHz do 148.5 kHz.
- **signalne oznake na opskrbnom naponu:** opskrbnom naponu superponirane kratkotrajne promjene napona u izabranim točkama krivulje napona.

U pojedinim državama javna distribucijska poduzeća koriste javnu mrežu za prijenos signala.

2.8. Propadi napona

Propad (djelomični gubitak) napona se definira kao iznenadno privremeno smanjenje napona ispod unaprijed određene granice (između 1% i 90% vrijednosti nazivnog napona) u nekoj točki sustava, nakon čega u kratkom vremenskom intervalu slijedi povratak na

dogovorenu vrijednost. Takva smanjenja napona tipično traju od 10 ms do 1 min. Dubina propada definirana je kao razlika između najniže RMS vrijednosti tijekom propada i dogovorenog naponskog nivoa. Propadi s trajanjem manjim od jedne periode smatraju se prijelaznim pojavama. Propadi napona praktično su nepredvidivi, izrazito slučajni događaji. Njihov je godišnji broj vrlo različit, ovisno o vrsti razdjelne mreže i o promatranoj točki mreže.

Uzroci svih propada napona su nagla povećanja opterećenja tj. kratkotrajna povećanja struje. Primjer može biti uključenje transformatora, zalet motora, te kvarovi u sustavu (zemljospojevi i kratki spojevi).

Glavni uzroci propada napona su kratki spojevi koji su neizbježni događaji u EES-u. Kratki spoj uzrokuje veliki porast struje koji tada uzrokuje veliki pad napona na impedancijama mreže. Većinu kratkih spojeva uzrokuju atmosferski prenaponi koji naprežu izolaciju. Takvi kratki spojevi su najčešće prolaznog karaktera. Mreža je opremljena zaštitnim uređajima kako bi se mjesto kvara moglo izolirati od izvora energije (kod kratkog spoja prolaznog karaktera nakon isteka sigurnosnog vremena dolazi do automatskog ponovnog uklopa isključenog elementa/dijela mreže).

2.9. Prenaponi mrežne frekvencije

Privremeni prenaponi mrežne frekvencije između faznih vodiča i zemlje su previsoki naponi na određenim mjestima, uobičajeno kroz nekoliko perioda mrežne frekvencije. Prenaponi se u mreži javljaju u slučaju kvara na javnoj distribucijskoj mreži ili instalaciji korisnika mreže i nestaje kada se kvar otkloni. Mogu isto tako biti uzrokovani sklopnim manipulacijama u sustavu. Njihova vrijednost uglavnom ovisi o načinu uzemljenja mreže. Prenapon često može dosegnuti iznos linijskog napona uslijed pomaka potencijala zvjezdišta u trofaznom sustavu.

2.10. Tranzijentni prenaponi

Tranzijentni (prijelazni, impulsni) prenaponi između faznih vodiča i zemlje su visokofrekvencijske promjene napona u trajanju kraćem od jedne poluperiode (10ms). Visoko su prigušeni, a mogu biti oscilatorni ili neoscilatorni. Veličina, trajanje i energija tranzijentnih prenapona varira u ovisnosti od izvora prenapona. Izvor ove smetnje su atmosferska pražnjenja i sklopne operacije u mreži (npr. prekid induktivnih struja, uklapanje kapacitivnih tereta itd…) te pregaranje osigurača. Vrijeme porasta tranzijentnih prenapona kreće se od manje od jedne μs do nekoliko ms. Oblici tranzijenata mogu biti različiti.

Atmosferska pražnjenja su najčešći uzrok kvarova na niskonaponskim uređajima, računalima, elektroničkim sklopovima i sl. Osim direktnog utjecaja na niskonaponske strujne krugove, gromovi mogu udariti i na srednjenaponske vodove i posredno ugroziti niskonaponske uređaje. Atmosferski prenaponi u SN mrežama mogu nastati zbog direktnih udara groma u fazne vodiče, te zbog indirektnih udara groma u okolini voda uslijed indukcije. Ovakvi prenaponi mogu biti izuzetno opasni radi njihove velike valne amplitude, te ih je potrebno spriječiti ugradnjom odvodnika prenapona.

Ovisno o uzroku nastajanja, energetske se vrijednosti prijelaznih prenapona mogu znatno razlikovati. Prenaponi kod atmosferskih izbijanja, općenito, imaju veću amplitudu, ali manju energetsku vrijednost od prenapona uzrokovanih sklopnim operacijama, zbog duljeg trajanja sklopnih prenapona.

3. Pregled tehničkih izvještaja i normi iz područja kvalitete električne energije

Kada se govori o kvaliteti napona u određenom čvorištu mreže, potrebno je uzeti u obzir priključena trošila, jer je kvaliteta napona usko vezana za karakteristike trošila. Dakle, normiranje samo parametara kvalitete napona nije dovoljno jer bi teško bilo zadovoljiti normirane vrijednosti tih parametara bez donošenja normi vezanih za elektromagnetsku kompatibilnost (EMC) priključene opreme. Norme vezane za EMC određuju razine smetnji koje oprema korisnika mreže može generirati te koje može podnijeti bez oštećenja ili gubitka funkcija (razine kompatibilnosti).

Prilikom planiranja mreže i kod priključenja novih korisnika mreže, uvijek treba postaviti strože granice od granica kompatibilnosti, tzv. planirane razine, što osigurava zadovoljavajući rad priključene opreme. Zbog toga postoje norme i tehnički izvještaji s područja elektromagnetske kompatibilnosti koje se odnose na karakter opterećenja.

3.1 HRN EN 61000-2-4:1997

Na području elektromagnetske kompatibilnosti elektroenergetskog sustava, te trošila i opreme priključenih na njega, razina kompatibilnosti je definirana kao razina elektromagnetskih smetnji koja se koristi kao referentna razina u određenoj okolini za koordinaciju graničnih vrijednosti emisije smetnji i otpornosti na smetnje. Norma HRN EN 61000-2-4:1997 "Razine kompatibilnosti za niskofrekvencijske provodne smetnje u industrijskim postrojenjima" donosi razine smetnji koje se mogu očekivati u elektroenergetskoj mreži za vrijeme normalnog pogona mreže. Norma razlikuje tri klase elektromagnetskih okolina:

Klasa 1

- Ova klasa se primjenjuje za posebne vrste napajanja (uobičajeno sadrži opremu koja zahtjeva određenu zaštitu u vidu besprekidnih napajanja, filtera itd) i ima razine kompatibilnosti niže od onih za javne mreže. Uobičajeno sadrži opremu vrlo osjetljivu na smetnje u napajanju npr. elektronička oprema u laboratorijima, medicinska oprema, posebna računalna oprema.

Klasa 2

- Ova klasa okoline se odnosi na sučelja industrijskih mreža s javnom elektroenergetskom mrežom i sučelja unutar samih industrijskih mreža pa su razine kompatibilnosti gotovo jednake onima za javne elektroenergetske mreže (dane u HRN EN 61000-2-2:2008 i

HRN EN 61000-2-12:2008). Oprema namjenjena za spajanje na javnu mrežu se može koristiti u ovoj klasi okoline

Klasa 3

Ova klasa okoline se odnosi isključivo na sučelja unutar samih industrijskih mreža pa ima razine kompatibilnosti više od klase 2 za određene smetnje (npr. većina tereta se napaja preko energetskih pretvarača, prisutnost uređaja za varenje, učestalo pokretanje motora velikih snaga).

Tablica 3.1, tablica 3.2 i tablica 3.3 prikazuju razine kompatibilnosti za navedene klase.

Tablica 3.1 Razine kompatibilnosti za promjene iznosa napona, nesimetričnost napona i promjene iznosa frekvencije u NN i SN energetskim sustavima prema HRN EN 61000-2-4:1997

Opis smetnje	Klasa 1	Klasa 2	Klasa 3
Promjene iznosa napona u odnosu na nazivni napona U_n $\Delta U/U_n$	±8 %	±10 %	±10 % do -15 %
Nesimetričnost napona U_{neg}/U_{pos}	2 %	2 %	3 %
Promjene iznosa frekvencije Δf	±1 Hz	±1 Hz	±1 Hz

Tablica 3.2 Razine kompatibilnosti za neparne harmonijske napone (u postotku osnovnog harmonika napona) u NN i SN energetskim sustavima prema HRN EN 61000-2-4:1997

Red harmonika	Klasa 1 U_h % U_1	Klasa 2 U_h % U_1	Klasa 3 U_h % U_1	Red harmonika	Klasa 1 U_h % U_1	Klasa 2 U_h % U_1	Klasa 3 U_h % U_1
5	3	6	8	3	3	5	6
7	3	5	7	9	1,5	1,5	2,5
11	3	3,5	5	15	0,3	0,4	2
13	3	3	4,5	21	0,2	0,3	1,75
17	2	2	4	21<h≤45	0,2	0,2	1
17<h≤49	2,27•(17/h)-0,27	2,27•(17/h)-0,27	4,5•(17/h)-0,5				

Tablica 3.3 Razine kompatibilnosti za parne harmonijske napone i THD (u postotku osnovnog harmonika napona) u NN i SN energetskim sustavima prema HRN EN 61000-2-4:1997

Red harmonika	Klasa 1 U_h % U_1	Klasa 2 U_h % U_1	Klasa 3 U_h % U_1	Red harmonika	Klasa 1 %	Klasa 2 %	Klasa 3 %
2	2	2	3	THD	5	8	10
4	1	1	1,5				
6	0,5	0,5	1				
8	0,5	0,5	1				
10	0,5	0,5	1				
10<h≤50	0,25•(10/h)-0,25	0,25•(10/h)-0,25	1				

3.2 IEC 61000-3-6:2008

Tehnički izvještaj IEC 61000-3-6:2008 "Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems" (Određivanje graničnih vrijednosti emisije kod priključenja korisnika mreže sa nelinearnim trošilima na SN i VN i VVN energetski sustav) daje smjernice operatoru sustava za procjenu utjecaja postrojenja korisnika mreže na harmoničko izobličenje napona u elektroenergetskoj mreži na koju se priključuju. (srednjenaponska i visokonaponska razina). IEC 61000-3-6:2008 je tehnički izvještaj koji se najviše bavi harmoničkim izobličenjem napona, iako se daju i indikativne vrijednosti za granice strujnih harmonika. Ovaj tehnički izvještaj je vezan za područje elektromagnetske kompatibilnosti.

Na području elektromagnetske kompatibilnosti elektroenergetskog sustava, te trošila i opreme priključenih na njega, postoje dvije razine. Jedna je razina definirana kao emisija smetnji koju trošilo smije emitirati pri svom radu, a da pri tome ne uzrokuje smetnje u radu drugih trošila. Druga je razina elektromagnetskog djelovanja koje pojedino trošilo može podnijeti, a da ga te smetnje ne ometaju u radu. Cilj ove preporuke je ograničavanje napona viših harmonika u sustavu za opskrbu električnom energijom, na mjestu priključka trošila, na razinu kompatibilnosti. Razine kompatibilnosti su temeljene na 95%-tnoj vjerojatnosti, da određena smetnja u cijelom sustavu neće prijeći određenu granicu. S obzirom da nema trošila koja su direktno priključena na prijenosnu elektroenergetsku mrežu, za prijenosnu mrežu nema definiranih razina kompatibilnosti nego se umjesto toga daju planirane razine. Planirane razine trebaju osigurati da se na nižim naponskim razinama gdje je priključena oprema korisnika mreže ne prijeđu razine kompatibilnosti. Planirane razine su uglavnom niže (ili jednake) od granica kompatibilnosti. (za usporedbu tablica 3.4 i tablica 3.5). Vrijednosti dane u tablicama se odnose na 10 minutne srednje rms vrijednosti naponskih harmonika u postocima osnovnog harmonika napona. Tablica 3.4 navodi razine kompatibilnosti za harmoničke napone (u postotku osnovnog harmonika napona) u NN i SN elektroenergetskim sustavima.

Tablica 3.4 Razine kompatibilnosti za harmoničke napone (u postotku osnovnog harmonika *napona) u NN i SN energetskim sustavima prema IEC 61000-3-6:2008*

Neparni harmonici		Neparni harmonici		Parni harmonici	
Red harmonika	Harmonički napon (%)	Red harmonika	Harmonički napon (%)	Red harmonika	Harmonički napon (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,4	6	0,5
13	3	21	0,3	8	0,5
17≤ h≤49	2,27•(17/h)-0,27	21≤ h≤45	0,2	10≤ h≤50	0,25•(10/h)+0,25
THD : 8 %					

Prilikom planiranja elektroenergetskih mreža treba pretpostaviti strože kriterije od onih koje daju preporuke, tako da bi se u slučaju prelaska planiranih razina, još uvijek smetnje nalazile ispod preporučenih razina. Planirane razine je potrebno odrediti od strane operatora sustava za sve naponske razine sustava i one se mogu smatrati kao interni ciljevi operatora sustava. U nekim državama planirane razine su definirane normama. Planirane razine tablica 3.5 daje samo kao pokazne vrijednosti, jer se one razlikuju od slučaja do slučaja ovisno o strukturi mreže i drugim okolnostima. Tablica 3.5 prikazuje indikativne vrijednosti planiranih razina za harmoničke napone (u postotku osnovnog harmonika napona) u SN, VN i VVN elektroenergetskim sustavima.

Tablica 3.5. Planirane razine za harmoničke napone u SN i VN i VVN energetskim sustavima prema IEC 61000-3-6:2008

Neparni harmonici			Neparni harmonici			Parni harmonici		
Red harmonika	Harmonički napon (%)		Red harmonika	Harmonički napon (%)		Red harmonika	Harmonički napon (%)	
	SN	VN-VVN		SN	VN-VVN		SN	VN-VVN
5	5	2	3	4	2	2	1,8	1,4
7	4	2	9	1,2	1	4	1	0,8
11	3	1,5	15	0,3	0,3	6	0,5	0,4
13	2,5	1,5	21	0,2	0,2	8	0,5	0,4
17≤ h≤49	1,9• (17/h)-0,2	1,2• (17/h)	21≤ h≤45	0,2	0,2	10≤ h≤50	0,25• (10/h)+0,22	0,19• (10/h) +0,16
THD : 6.5 % u SN sustavima ; 3 % u VN sustavima								

3.3 IEC 61000-3-7:2008

Tehnički izvještaj IEC 61000-3-7:2008 "Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3-7: Limits - Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems" (Određivanje graničnih vrijednosti emisije kod priključenja korisnika mreže sa trošilima koja imaju fluktuirajući karakter opterećenja na SN i VN i VVN energetski sustav) daje smjernice operatoru sustava za procjenu utjecaja postrojenja korisnika mreže na treperenje napona ili brze naponske promjene (fliker) u elektroenergetskoj mreži na koju se priključuju. (srednjenaponska i visokonaponska razina). IEC 61000-3-7:2008 je tehnički izvještaj koji se najviše bavi treperenjem napona (brzim naponskim promjenama) i vezan je za područje elektromagnetske kompatibilnosti.

Na području elektromagnetske kompatibilnosti elektroenergetskog sustava, te trošila i opreme priključenih na njega, postoje dvije razine. Jedna je razina definirana kao emisija smetnji koju trošilo smije emitirati pri svom radu, a da pri tome ne uzrokuje smetnje u radu drugih trošila. Druga je razina elektromagnetskog djelovanja koje pojedino trošilo može

podnijeti, a da ga te smetnje ne ometaju u radu. Cilj ove preporuke je ograničavanje flikera u sustavu za opskrbu električnom energijom, na mjestu priključka trošila, na razinu kompatibilnosti. Razine kompatibilnosti su temeljene na 95%-tnoj vjerojatnosti, da određena smetnja u cijelom sustavu neće prijeći određenu granicu. Razine kompatibilnosti su u ovom slučaju definirane jedino za NN mrežu, dok su za ostale naponske razine dane planirane razine. Planirane razine trebaju osigurati da se na nižim naponskim razinama gdje je priključena oprema korisnika mreže ne prijeđu razine kompatibilnosti. Planirane razine su uglavnom niže (ili jednake) od granica kompatibilnosti. (za usporedbu tablica 3.6 i tablica 3.7).

Tablica 3.6 prikazuje razine kompatibilnosti za treperenje napona (fliker), kratkotrajni P_{st} i dugotrajni P_{lt} u NN elektroenergetskim sustavima (vrijednosti preuzete iz IEC 61000-2-2).

Tablica 3.6. Razine kompatibilnosti za treperenje napona (fliker) u NN energetskim sustavima prema IEC 61000-3-7:2008 (preuzeto iz IEC 61000-2-2)

	Razine kompatibilnosti
P_{st}	1,0
P_{lt}	0,8

Prilikom planiranja elektroenergetskih mreža treba pretpostaviti strože kriterije od onih koje daju preporuke, tako da bi se u slučaju prelaska planiranih razina, još uvijek smetnje nalazile ispod preporučenih razina. Planirane razine je potrebno odrediti od strane operatora sustava za sve naponske razine sustava i one se mogu smatrati kao interni ciljevi operatora sustava. U nekim državama planirane razine su definirane normama. Planirane razine tablica 3.7 daje samo kao pokazne vrijednosti, jer se one razlikuju od slučaja do slučaja ovisno o strukturi mreže i drugim okolnostima.

Tablica 3.7 prikazuje indikativne vrijednosti planiranih razina za kratkotrajni i dugotrajni fliker u SN, VN i VVN elektroenergetskim sustavima.

Tablica 3.7. Planirane razine za kratkotrajni i dugotrajni fliker u SN i VN i VVN energetskim sustavima prema IEC 61000-3-7:2008

	Planirane razine	
	MV	VN i VVN
P_{st}	0,9	0,8
P_{lt}	0,7	0,6

3.4 IEC 61000-3-13:2008

Tehnički izvještaj IEC 61000-3-13:2008 "Electromagnetic compatibility (EMC), Part 3-13: Limits - Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to

MV, HV and EHV power systems" (Određivanje graničnih vrijednosti emisije kod priključenja korisnika mreže sa nesimetričnim trošilima (trofazna trošila koja uzrokuju nesimetričnost napona u sustavu) na SN i VN i VVN energetski sustav) daje smjernice operatoru sustava za procjenu utjecaja postrojenja korisnika mreže na nesimetričnost napona u elektroenergetskoj mreži na koju se priključuju. (srednjenaponska i visokonaponska razina).

IEC 61000-3-13:2008 je tehnički izvještaj koji se najviše bavi sa nesimetrijom napona i vezan je za područje elektromagnetske kompatibilnosti.

Na području elektromagnetske kompatibilnosti elektroenergetskog sustava, te trošila i opreme priključenih na njega, postoje dvije razine. Jedna je razina definirana kao emisija smetnji koju trošilo smije emitirati pri svom radu, a da pri tome ne uzrokuje smetnje u radu drugih trošila. Druga je razina elektromagnetskog djelovanja koje pojedino trošilo može podnijeti, a da ga te smetnje ne ometaju u radu. Cilj ove preporuke je ograničavanje flikera u sustavu za opskrbu električnom energijom, na mjestu priključka trošila, na razinu kompatibilnosti. Razine kompatibilnosti su temeljene na 95%-tnoj vjerojatnosti, da određena smetnja u cijelom sustavu neće prijeći određenu granicu. S obzirom da nema trošila koja su direktno priključena na prijenosnu elektroenergetsku mrežu, za prijenosnu mrežu nema definiranih razina kompatibilnosti nego se umjesto toga daju planirane razine. Planirane razine trebaju osigurati da se na nižim naponskim razinama gdje je priključena oprema korisnika mreže ne prijeđu razine kompatibilnosti. Planirane razine su uglavnom niže (ili jednake) od granica kompatibilnosti. (za usporedbu tablica 3.8 i tablica 3.9).

Tablica 3.8 prikazuje razine kompatibilnosti za nesimetričnost napona u NN i SN elektroenergetskim sustavima (vrijednosti preuzete iz IEC 61000-2-2 i IEC 61000-2-12).

Tablica 3.8. Razine kompatibilnosti za nesimetričnost napona u NN i SN energetskim sustavima prema IEC 61000-3-13:2008 (preuzeto iz IEC 61000-2-2 i IEC 61000-2-12)

Faktor nesimetričnosti napona C_{uLV} i C_{uMV} (%)
2%*
* Ukoliko u nekom dijelu mreže dominiraju jednofazna trošila do 3%

Prilikom planiranja elektroenergetskih mreža treba pretpostaviti strože kriterije od onih koje daju preporuke, tako da bi se u slučaju prelaska planiranih razina, još uvijek smetnje nalazile ispod preporučenih razina. Planirane razine je potrebno odrediti od strane operatora sustava za sve naponske razine sustava i one se mogu smatrati kao interni ciljevi operatora sustava. U nekim državama planirane razine su definirane normama. Planirane razine tablica

3.9 daje samo kao pokazne vrijednosti, jer se one razlikuju od slučaja do slučaja ovisno o strukturi mreže i drugim okolnostima.

Tablica 3.9 prikazuje indikativne vrijednosti planiranih razina za kratkotrajni za nesimetričnost napona u SN, VN i VVN elektroenergetskim sustavima.

Tablica 3.9. Planirane razine za nesimetričnost napona u SN i VN i VVN energetskim sustavima prema IEC 61000-3-7:2008

Naponska razina	Planirana razina L_{u2} (%)
SN	1,8
VN	1,4
VVN	0,8

4. Funkcionalni opis flikermetra

Funkcionalne specifikacije za određivanje vrijednosti kratkotrajnih i dugotrajnih flikera definirane su međunarodnim standardom IEC 61000-4-15. U navedenom standardu detaljno je opisan i princip rada uređaja za mjerenje flikera (flikermetar). Funkcijski dijagram flikermetra sastoji se od 5 blokova, a prikazuje slika 4.1. Blok shema flikermetra, prema zadacima koje obavlja, može se podijeliti u dva dijela. Prvi dio je simulacija odziva svjetiljka-oko-mozak (blok 2, 3 i 4), a drugi dio je bilježenje statističkih podataka o flikerima i njihovo predočavanje (blok 5).

Blok 1 sadrži generator signala za kalibriranje flikermetra i naponski prilagodljivog kruga koji skalira srednju efektivnu vrijednost napona na referentnu razinu. Na taj način se mjerenja flikera mogu izraziti u postotnoj vrijednosti, neovisno o trenutnoj vrijednosti napona na ulazu u blok 1. Pomoću odcjepa na ulazu transformatora osigurava se pogodan ulazni napon za naponski ispravljač.

Funkcija bloka 2 je povećanje titranja napona i to tako da se kvadrira vrijednost ulaznog napona i skalira na referentnu razinu. Time se simulira ponašanje svjetiljke.

Blok 3 se sastoji od kaskade dvaju filtera i člana za odabir mjernog opsega koji može prethoditi ili slijediti strujne krugove filtera. Prvi filter eliminira istosmjernu komponentu napona i nepravilnosti s dvostrukom frekvencijom originala iz demodulatora. Drugi filter pridružuje važnost, odnosno težinu, simulirajući tako frekvencijski odziv na sinusoidalne promjene napona žarulje sa žarnom niti kombinirano sa sustavom ljudskog vida. Funkcija odziva temeljena je na pragu osjetljivosti za svaku frekvenciju kod 50% ispitanika. Za eliminaciju "šuma" koristi se visokopropusni (preporuka je 3 dB za graničnu frekvenciju od 0.05 Hz) i niskopropusni dio (preporuka je 3 dB za graničnu frekvenciju od 35 Hz). Ako se zanemari neznatno prigušenje spomenutih filtra na pojasno područje frekvencije u kojem se promatraju flikeri, tada se prijenosna funkcija, koja odgovara bloku 3 može napisati u obliku:

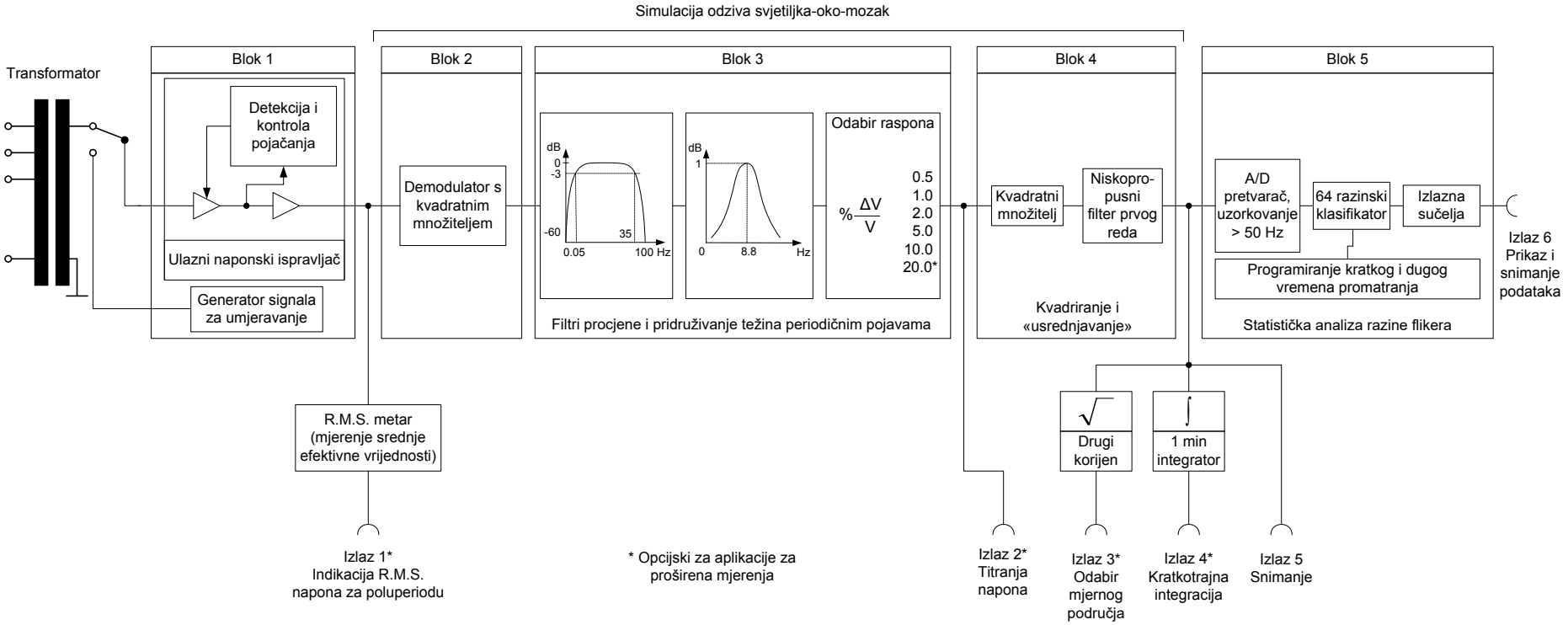
$$( ) = \frac{1}{^2 + 2\lambda + \frac{2}{1}} \cdot \frac{1 + \frac{}{2}}{\blacksquare + \frac{}{3}\blacksquare \blacksquare + \frac{}{4}\blacksquare}, \qquad (4.1)$$

gdje je *s* Laplaceova kompleksna varijabla, a vrijednosti ostalih parametara definirane su standardom IEC 61000-4-15.

Blok 4 sastavljen je od kvadratnog množitelja i niskopropusnog filtra prvog reda. Ljudski doživljaj flikera preko svjetiljke, oka i mozga je simuliran nelinearnim odzivima blokova 2, 3 i 4, a predstavlja ga izlaz iz bloka 4.

Blok 5 predstavlja mikroprocesor koji obavlja analizu razine flikera u stvarnom vremenu, čime se omogućava izravni proračun značajnih procjena parametara.

Prikazani flikermetar ima ukupno pet izlaza. Izlazi označeni zvjezdicom (*) nisu nužni, ali omogućavaju iskorištavanje mogućnosti instrumenta u svrhu istraživanja naponskih titranja.



Slika 4.1. Funkcijski dijagram flikermetra (IEC 61000-4-15, 2010)

Namjena izlaza 1 je prikaz naponskog kolebanja, tj. njegove efektivne vrijednosti. Kako bi bilo moguće kvalitetno promatrati male promjene napona, mora biti omogućeno ispravljanje i podešavanje otklona istosmjerne komponente (*engl. DC offset*). Izlaz 2 uglavnom je namijenjen za provjeru odziva bloka 3 i izvršavanju određenih promjena. Izlaz 3 je opcijski i daje trenutni prikaz relativne naponske promjene ΔV/V izražene u postotnim vrijednostima ekvivalentnim prema modulaciji sinusnog signala od 8.8 Hz. Najviše se koristi kada je potrebno odabrati ispravno mjerno područje. Izlaz 4 je također opcijski i kao vrijednost daje integral trenutno očitanih flikera u periodu od jedne minute. Izlaz 5 je obavezan i predstavlja izlaz trenutnih flikera koji mogu biti prikazani analogno u obliku grafa za brzi pregled na mjestu događaja ili se mogu snimiti na magnetski medij za potrebe mjerenja u većem vremenskom periodu i kasnije analize. Izlaz 6 na bloku 5 je također obavezan, a služi za spajanje na digitalno serijsko sučelje. Analogni prikazi kompletne funkcije vjerojatnosti mogu biti direktno preuzeti s ovog bloka, korištenjem digitalno-analognog pretvarača.

Fenomen flikera opisuje se njegovim intenzitetom i učestalošću pojavljivanja. Intenzitet flikera definiran je izrazom:

$$\% = \frac{|\quad| - |\quad|}{\quad} \cdot 100\%, \tag{4.2}$$

a svaki intenzitet veći od 1% smatra se flikerom.

Srednja frekvencija pojavljivanja računa se pomoću izraza:

$$= —, \tag{4.3}$$

gdje je m broj titranja, a T vremenski period u kojem se mjere titraji.

Mjera jakosti kratkotrajnog flikera P_{st} (*engl. short-term flicker*) u promatranom vremenu T_{st} = 10 min dobivena je na temelju statistike preuzete iz razinskog klasifikatora u bloku 5. Iznos kratkotrajnog flikera određen je izrazom:

$$= \sqrt{0.0314\ _{0,1} + 0.0525\ _{1} + 0.0657\ _{3} + 0.28\ _{10} + 0.08\ _{50}}, \tag{4.4}$$

gdje su $P_{0,1}$, P_1, P_3, P_{10} i P_{50} postotni iznosi flikera koji su premašili razine flikera za: 0.1; 1; 3; 10 i 50% u promatranom vremenu. Nastavak *s* u formuli znači da je korištena prosječna (*engl. smoothed*) vrijednost izračunata prema sljedećim izrazima:

$$_{50} = \frac{(\ _{30} + \ _{50} + \ _{80})}{3} \tag{4.5}$$

$$_{10} = \frac{(\ _{6} + \ _{8} + \ _{10} + \ _{13} + \ _{17})}{5} \tag{4.6}$$

$$_{3} = \frac{(\ _{2,2} + \ _{3} + \ _{4})}{3} \tag{4.7}$$

$$_{1} = \frac{(\ _{0,7} + \ _{1} + \ _{1,5})}{3} \tag{4.8}$$

Iznos vremenske konstante memorije flikermetra (0,3 s) osigurava da se veličina $P_{0,1}$ ne može naglo promijeniti pa za nju ne treba računati prosjek.

Period od 10 min za kratkotrajne flikere i pripadajući izračun dobar je samo za pojedinačne izvore smetnji s kratkim intervalima smetnji. U slučaju većeg broja trošila koja generiraju flikere (npr. uređaji za zavarivanje, elektromotori) ili trošila s velikim intervalom smetnji (npr. elektrolučne peći), spomenuti proračun nije sasvim prikladan pa je potrebno definirati dugotrajni fliker (*engl. long-term flicker*). Dugotrajni fliker P_{lt} definiran je izrazom:

$$= \sqrt[3]{\frac{\sum_{=1}^{\ 3}}{}^{3}}, \tag{4.9}$$

gdje su P_{sti} (i = 1, 2, 3, …) uzastopna mjerenja kratkotrajnih flikera P_{st}, a N je broj mjerenja koji je jednak broju 12 (europska norma za kvalitetu napona EN 50160).

Na temelju navedenog napravljen je programski modul u MATLAB-u koji simulira flikermetar, te omogućuje izračunavanje kratkotrajnih i dugotrajnih flikera koje uzrokuje elektrolučna peć, ali se može koristiti i za bilo koji drugi izvor flikera. Modul je testiran valnim oblicima koji su dani u [33]. Performanse flikermetra ispitane su sa sedam valnih oblika koji sadrže pravokutne promjene napona pri čemu P_{st} na izlazu iz flikermetra treba imati vrijednost 1 uz dopušteno odstupanje ±5%. Ispitni valni oblici odnose se na rasvjetu pri naponu 230 V i frekvenciji 50 Hz.

Tablica 4.1. Rezultati testiranja performansi flikermetra prema [33]

Broj promjena po minuti	Odstupanje napona $\Delta V/V$ (%)	Izračunati P_{st}	Pogreška (%)
1	2,724	0,974	-2,6
2	2,211	0,994	-0,6
7	1,459	1,002	0,2
39	0,906	1,013	1,3
110	0,725	1,004	0,4
1620	0,402	0,987	-1,3
4800	2,40	1,032	3,2

Rezultati proračuna pokazuju da flikermetar daje dobre rezultate pri određivanju kratkotrajnog flikera, a odstupanja su unutar dopuštenih granica propisanih u [33].

5. Matematički model elektrolučne peći

5.1 Matematički model električnog luka

Proces taljenja željezne šarže u izmjeničnoj elektrolučnoj peći rezultat je toplinske energije koju generira električni luk između elektroda i same šarže. Sam proces nastajanja i održavanja električnog luka vrlo je složen i ovisi o vrsti i vrijednosti struje, duljini luka i uvjetima njegovog gorenja. Stoga električni luk nastaje i održava se samo za određene vrijednosti i odnose između struje, napona i duljine luka. *U-I* karakteristika električnog luka, tj. funkcionalna ovisnost napona i struje luka predstavlja najvažniju ovisnost koja karakterizira električna svojstva luka. Ovisno o karakteru vrijednosti parametara luka razlikuju se statičke i dinamičke karakteristike. U statičkim karakteristikama vrijednosti parametara luka su konstantne, dok su u dinamičkim karakteristikama te vrijednosti promjenjive. Izmjenične elektrolučne peći modeliraju se dinamičkim karakteristikama.

S obzirom na znatan utjecaj velikog broja promjenjivih parametara (sastav i veličina komada šarže, vrsta elektroda, tlak i temperatura lučne plazme, duljina i radijus luka i dr.) vrlo je teško matematički opisati sam proces nastanka, gorenja i gašenja električnog luka. U literaturi postoje različiti matematički modeli koji opisuju električni luk, a u osnovi se svode na diferencijalne jednadžbe čijim se rješavanjem pokušavaju odrediti strujno-naponske karakteristike luka. Točnost postavljenog matematičkog modela ispituje se mjerenjima na stvarnoj elektrolučnoj peći.

Matematički modeli koji se najčešće koriste za modeliranje elektrolučne peći u vremenskoj i frekvencijskoj domeni mogu se prema metodološkom pristupu podijeliti u pet osnovnih skupina [8]:

a) primjena empirijskih formula na temelju odnosa između radijusa i duljine luka s naponom i strujom luka

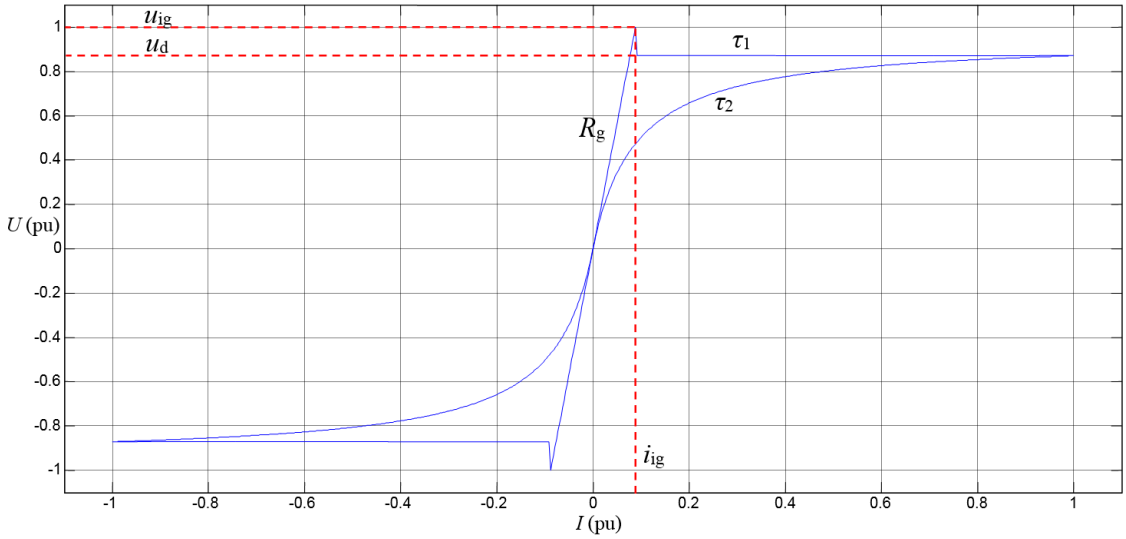
b) primjena modela na temelju U-I karakteristike luka elektrolučne peći

c) primjena modela s naponskim izvorom

d) primjena modela strujnog izvora ili nelinearnog i vremenski promjenjivog modela otpora na temelju postojećih mjerenja

e) stohastički pristup

U ovom radu je korišten matematički model elektrolučne peći zasnovan na stohastičkom pristupu određivanja *U-I* karakteristike električnog luka [83] kojom je opisana nepravilna, nelinearna promjena njegova otpora. Promjena otpora električnog luka R_a modelirana je s jednim linearnim i dva eksponencijalna segmenta *U-I* karakteristike. Dinamičku *U-I* karakteristiku električnog luka u fazi taljenja prikazuje slika 5.1.



Slika 5.1. Dinamička U-I karakteristika električnog luka za jednu periodu (20 ms)

Nelinearna *U-I* karakteristika luka opisana je izrazima (5.1)-(5.3).

$$R_a = R_g \quad ako\ je: \quad 0 \le I < i_{ig};\ \frac{dI}{dt} > 0 \tag{5.1}$$

$$R_a = \frac{u_d + (u_{ig} - u_d)e^{\frac{-(I - i_{ig})}{\tau_1}}}{I} \quad ako\ je: \quad I \ge i_{ig};\ \frac{dI}{dt} > 0 \tag{5.2}$$

$$R_a = \frac{u_t + (u_{ig} - u_t)e^{\frac{-I}{\tau_2}}}{I + i_{ig}} \quad ako\ je: \quad \frac{dI}{dt} < 0 \tag{5.3}$$

gdje je:

$$I = |i(t)| \tag{5.4}$$

$$u_{ig} = 1{,}15\, u_d \tag{5.5}$$

$$i_{ig} = \frac{u_{ig}}{R_1} \tag{5.6}$$

$$u_t = \frac{I_{\max} + i_{ig}}{I_{\max}}\, u_d \tag{5.7}$$

Ovako modelirana elektrolučna peć ponaša se kao naponski izvor kontroliran strujnim signalom. Na temelju analize stvarnih U-I karakteristika luka u elektrolučnoj peći, proces taljenja može se podijeliti u tri dijela: nastanak, gorenje i gašenje električnog luka, koji se ciklički ponavljaju.

U prvom dijelu dolazi do nastanka električnog luka. U trenutku kada napon luka dosegne iznos jednak nuli i struja luka je također jednaka nuli. Kada je napon luka manji od napona paljenja v_{ig}, otpor luka ima konstantnu vrijednost R_g i kroz peć teče relativno mala struja.

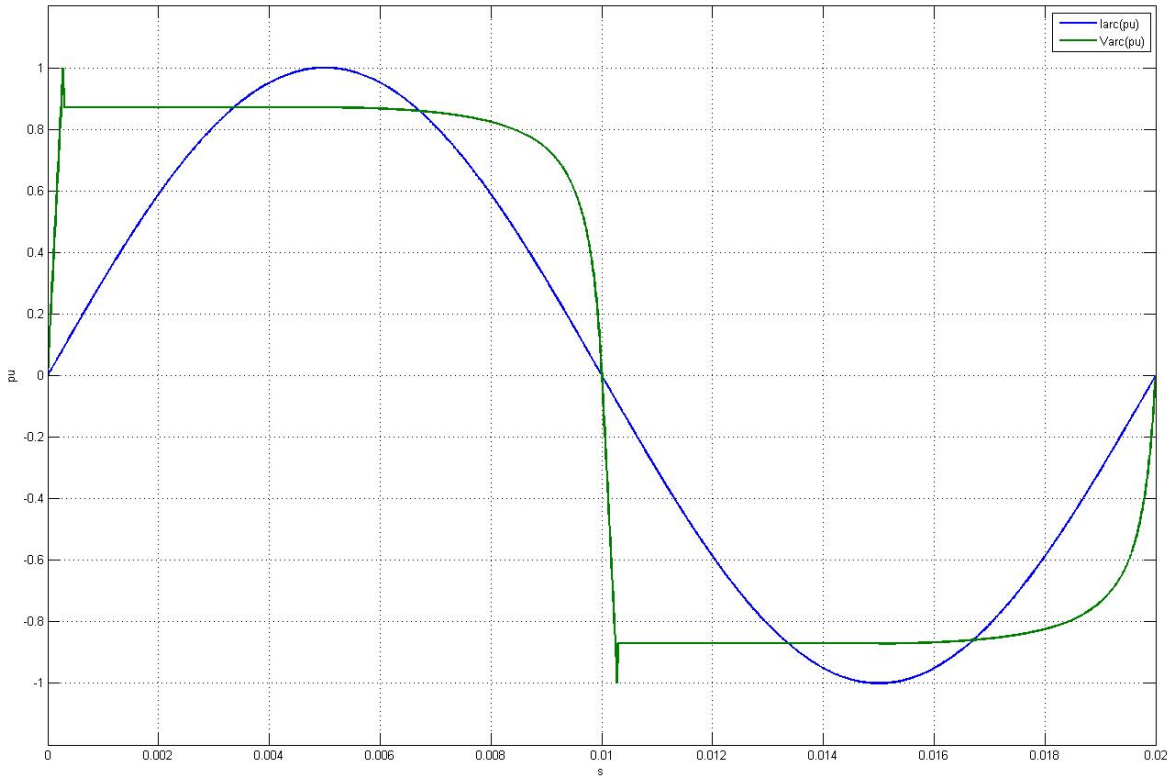
U drugom dijelu, kada napon dosegne vrijednost napona paljenja v_{ig}, dolazi do gorenja električnog luka. Pri toj vrijednosti napona, struja ima iznos koji je na slici 5.1. označen s i_{ig}. U tom trenutku dolazi do prijelazne pojave u valnom obliku napona koji naglo pada s vrijednosti v_{ig} na konstantnu vrijednost v_d. Ova prijelazna pojava opisana je eksponencijalnom funkcijom s vremenskom konstantom τ_1.

U trećem dijelu dolazi do gašenja električnog luka. Napon luka smanjuje se prema eksponencijalnoj funkciji s vremenskom konstantom τ_2. Luk se gasi kad struja prolazi kroz nulu, te se zatim ponovo pojavljuje u sljedećoj poluperiodi.

Vrijednosti parametara modela dobivene su eksperimentalno i ovisno o karakteristikama elektrolučne peći određuju izgled naponsko-strujnih karakteristika luka. U proračunima su korištene sljedeći parametri modela preuzeti iz literature [83]:

$R_g = 0{,}05\ \Omega$, $v_d = 305$ V, $v_{ig} = 350{,}75$ V, $I_{max} = 100$ kA, $\tau_1 = 0{,}01$ s, $\tau_2 = 0.02$ s.

Naponsko-strujnoj karakteristici koju prikazuje slika 5.1. odgovaraju karakteristike *v(t)* i *i(t)* za jednu periodu (20 ms) koju prikazuje slika 5.2. Sve tri karakteristike rezultat su opisanog matematičkog modela električnog luka izmjenične struje.



Slika 5.2. Naponska i strujna karakteristika električnog luka za jednu periodu (20 ms)

Rad peći karakteriziran je relativno niskim naponom i velikom strujom. Budući da se otpor luka mijenja, ovisno o temperaturi elektroda i vodljivosti lučne plazme, i to posebno u početnoj fazi taljenja, mijenjaju se i amplitude napona i struje na elektrolučnoj peći. Ta kolebanja efektivnih vrijednosti napona i struje mogu doseći i do ±10 % srednje vrijednosti, ovisno o sastavu šarže. Zbog toga u stvarnosti U-I karakteristika ima puno više „šuma“ zbog kaotične i nepredvidive prirode rada elektrolučne peći. Takav, nepredvidivi rad peći najčešće se simulira dodavanjem „slučajno“ generiranog signala u izlazni signal modela elektrolučne peći. Nepredvidivi karakter rada elektrolučne peći u proračunima je modeliran sinusoidnom modulacijom otpora električnog luka prema sljedećem izrazu iz [4]:

$$R_a(t) = \alpha R_a\left(1 + m\sin\left(\omega_f t\right)\right) \tag{5.8}$$

gdje je:

R_a – konstantni iznos otpora električnog luka;

m – faktor modulacije;

ω_f – frekvencija flikera (u proračunima je korištena iznos 10 Hz);

α – faktor prilagodbe otpora radnoj snazi elektrolučne peći.

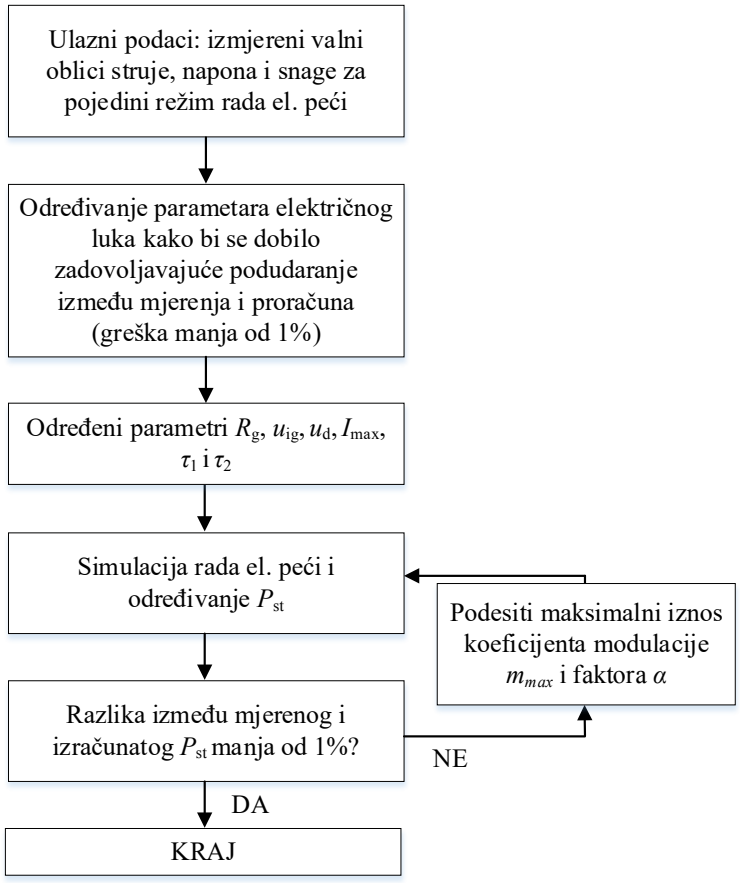
U predočenom matematičkom modelu električnog luka, njegova stohastička priroda uzima se u obzir odgovarajućim varijacijama faktora modulacije m i faktora prilagodbe α. Faktor modulacije je slučajno generiran u rasponu $0 - m$ prema uniformnoj raspodjeli, a faktor α kojim se otpor elektrolučne peći prilagođava njegovoj radnoj snazi određen je na temelju nazivne snage elektrolučne peći.

5.2 Određivanje faktora modulacije i faktora prilagodbe

Određivanje faktora modulacije m i faktora prilagodbe α složen je postupak zbog nepravilnog, fluktuirajućeg rada elektrolučne peći i ovisan je o velikom broju utjecajnih parametara, kao npr. sastavu šarže, vrsti elektroda, tlaku i temperaturi lučne plazme, duljini i radijusu luka i ostalim nepredvidivim okolnostima. Osim ovih parametara, karakterističnih za određeni tip i snagu elektrolučne peći, prilikom modeliranja potebno je voditi računa i o različitim režimima njenog rada, koji se u osnovi mogu podijeliti u tri skupine:

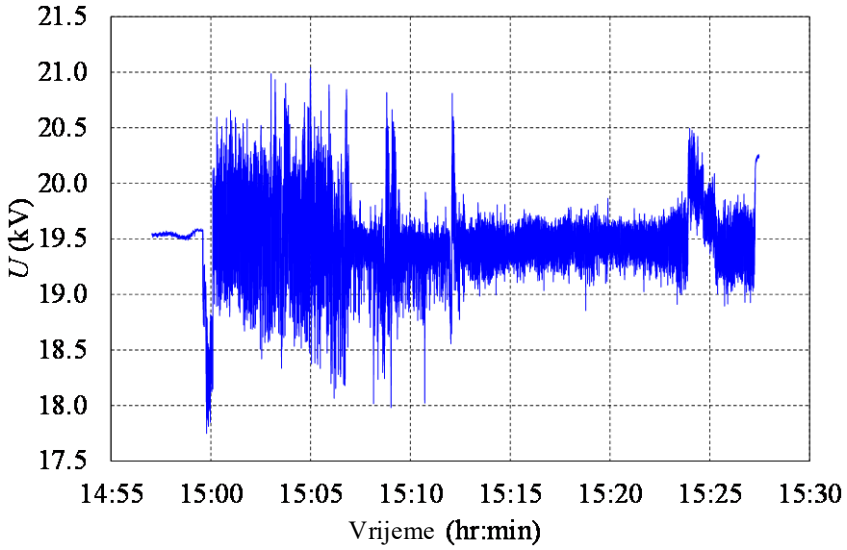
- početna faza taljenja (*eng. Boring*)
- taljenje (eng. Melting)
- rafiniranje (*eng. Refining*)

Pojednostavljeni postupak određivanja faktora modulacije m i faktora prilagodbe α ukratko se može opisati blok-dijagramom prikazanom u nastavku.

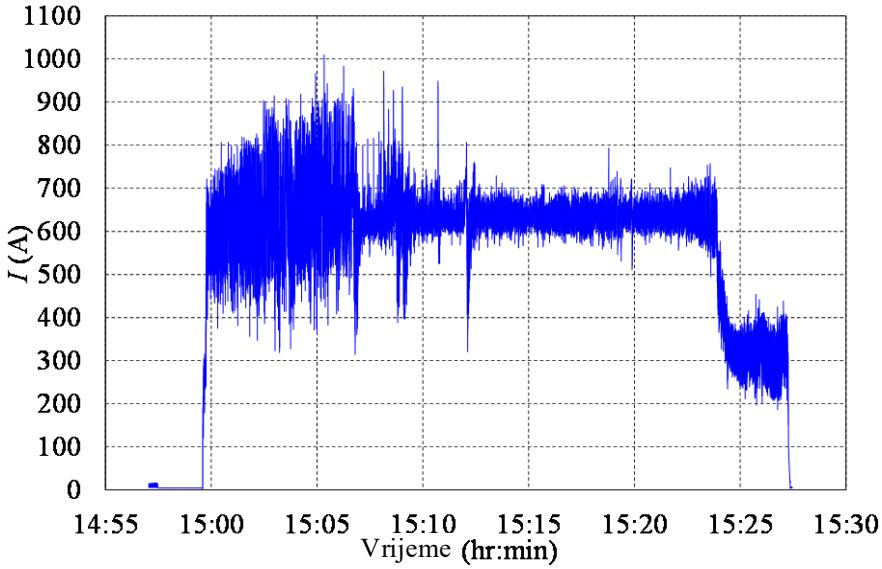


Slika 5.3. Blok dijagram za određivanje faktora α i m

Kako bi se odredio faktor modulacije m i faktor prilagodbe α u svakoj fazi rada elektrolučne peći potrebno je rezultate proračuna usporediti s mjerenjima. Mjerenja su provedena za jedan karakteristični 30-min. period u kojem su prikazane sve faze rada elektrolučne peći nazivne snage 28,8 MW, koja je na elektroenergetsku mrežu priključena preko transformatora 0,7/33 kV. Efektivne vrijednosti napona i struje u fazi a na 33 kV strani elektrolučne peći prikazuju slika 5.4. i slika 5.5.

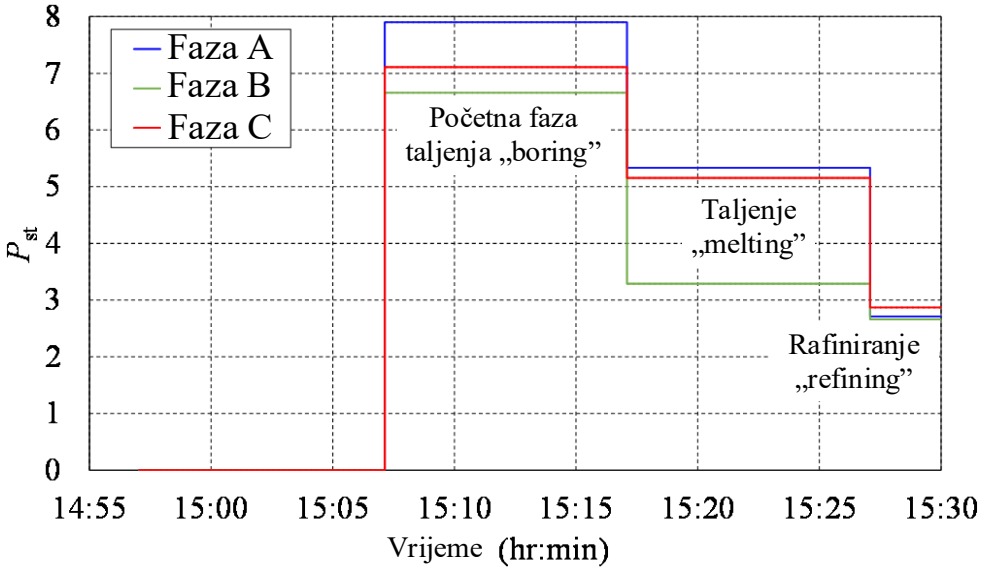


Slika 5.4. Izmjerene efektivne vrijednosti napona faze a na 33 kV strani transformatora elektrolučne peći 28,8 MW u intervalu 14:57 – 15:27 h



Slika 5.5. Izmjerene efektivne vrijednosti struje faze a na VN strani transformatora elektrolučne peći 28,8 MW u intervalu 14:57 – 15:27 h

Vrijednosti kratkotrajnih flikera u navedenom intervalu prikazuje slika 5.6. Vrijednosti kratkotrajnih flikera u početnom intervalu (prvih 10 min.) jednake su nuli, jer se vrijednosti kratkotrajnih flikera određuju na temelju kumulativnih mjerenja u 10-min. intervalu.



Slika 5.6. Vrijednosti kratkotrajnih flikera na VN strani transformatora elektrolučne peći

Na temelju postupka opisanog blok-dijagramom (slika 5.3.) određeni su faktori modulacije *m* i prilagodbe otpora električnog luka snazi elektrolučne peći α za svaku fazu rada elektrolučne peći. Pri određivanju navedenih faktora korišten je stohastički pristup, primjenom uniformne raspodjele i iterativnog postupka do željenog podudaranja iznosa jakosti kratkotrajnog flikera dobivenog mjerenjem i izračunatog iz predloženog matematičkog modela elektrolučne peći. Usporedbu izračunatih i izmjerenih vrijednosti kratkotrajnog flikera prikazuje tablica 5.1.

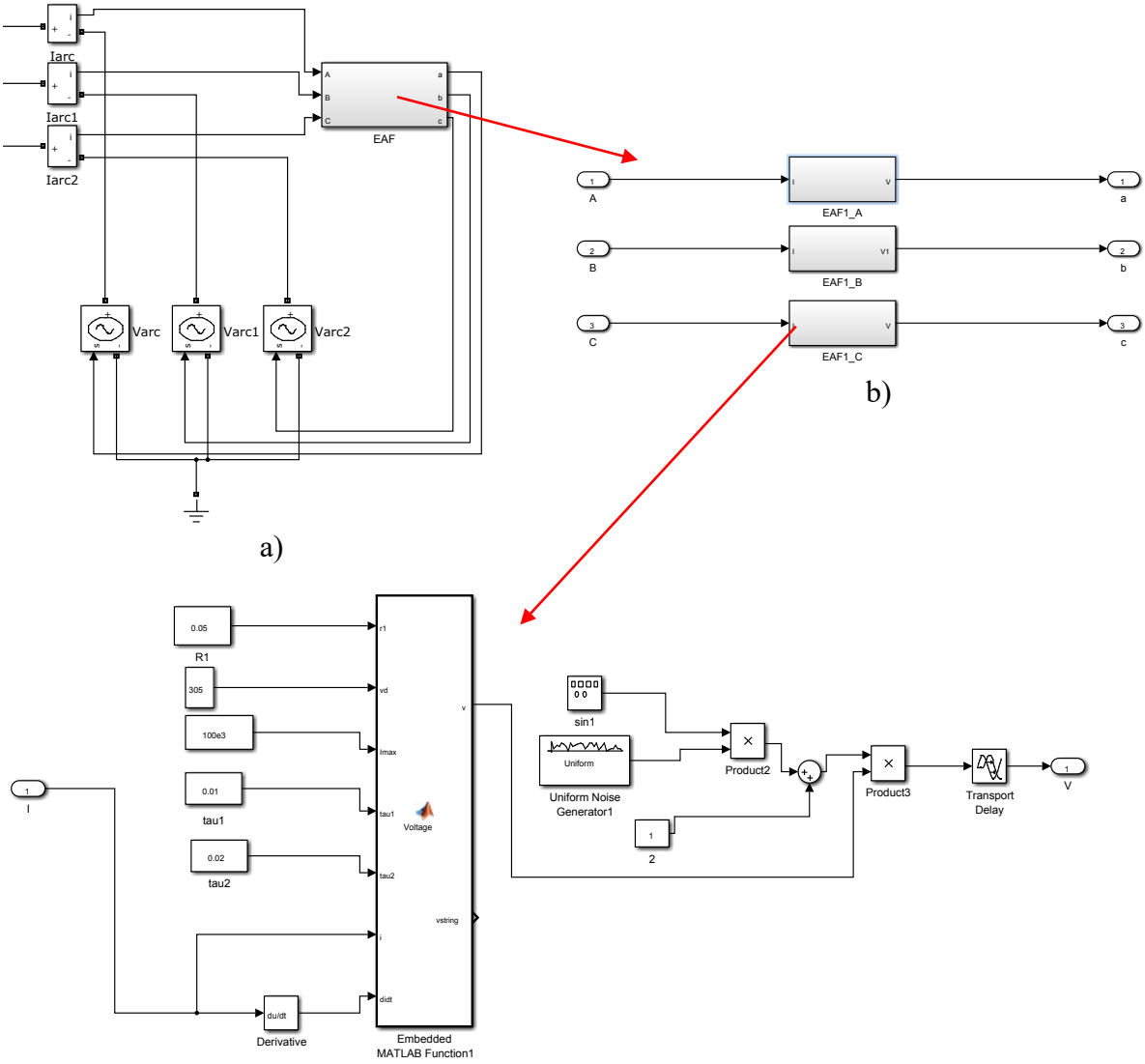
Tablica 5.1 Usporedba rezultata proračuna kratkotrajnih flikera na sabirnicama 33 kV i mjerenih vrijednosti za tri karakteristične faze rada elektrolučne peći

Režim rada	Početna faza taljenja (*boring*)	Taljenje (*melting*)	Rafiniranje (*refining*)
Koeficijent modulacije m_{max}	0,085	0,058	0,029
P_{st} (izmjereno)	7,85	5,35	2,65
P_{st} (izračunato)	7,8240	5,3261	2,6750
Greška ΔP_{st} (%)	-0,33	-0,45	0,94

5.3 Matematički model elektrolučne peći

Nakon određivanja faktora modulacije *m* i faktora prilagodbe otpora električnog luka snazi elektrolučne peći α napravljen je trofazni simulacijski model u programskom paketu MATLAB (Simulink). Shematski prikaz simulacijskog modela elektrolučne peći prikazuje slika 5.7. Iz prikaza je vidljivo da je elektrolučna peć modelirana naponskim izvorom s kontroliranim strujnim signalom. Ulazni parametri simulacijskog modela elektrolučne peći određeni su na temelju karakteristika elektrolučne peći, te na temelju iskustva brojnih autora koji se bave modeliranjem elektrolučnih peći [3]-[83]. Osim toga, za određivanje parametara simulacijskog modela elektrolučne peći, korišteni su i rezultati mjerenja napona i struja, te vrijednosti kratkotrajnih i dugotrajnih flikera.

Za simulaciju rada elektrolučne peći i proračun jakosti kratkotrajnog i dugotrajnog flikera, potrebno je osim modela elektrolučne peći modelirati i transformatore preko kojih je elektrolučna peć priključena na prijenosnu mrežu EES-a. Za razvoj simulacijskog simulacijskog modela elektrolučne peći nije potrebno detaljno analizirati okolnu prijenosnu mrežu te je ona modelirana idealnim naponskim izvorom i nadomjesnom impedancijom, izračunatom iz struje kratkog spoja na 110 kV sabirnicama u točki priključka elektrolučne peći na elektroenergetsku mrežu. Razlog tome je jednostavnije ispitivanje razvijenog modela elektrolučne peći i kraće vrijeme trajanja proračuna koji se provode u vremenskoj domeni. U nastavku istraživanja u kojem je predložena nova metoda proračuna širenja flikera kroz elektroenergetsku mrežu, razvijeni simulacijski model elektrolučne peći predstavlja izvor flikera.



Slika 5.7. Detaljni prikaz simulacijskog modela elektrolučne peći – MATLAB (Simulink): a) Naponski izvori upravljani strujnim signalima; b) model elektrolučne peći za faze A, B i C; c) prikaz detaljnog modela elektrolučne peći jedne faze

Iznosi brzih titranja napona na temelju kojih se određuju i iznosi flikera obrnuto su proporcionalni snazi kratkog spoja na sabirnicama prijenosne mreže na koju se priključuje elektrolučna peć. Stoga se za utvrđivanje maksimalnih iznosa flikera koji se mogu očekivati u pogonu mora računati s minimalnom strujom kratkog spoja. Proračuni minimalnog kratkog spoja su provedeni u skladu s međunarodnom normom IEC 60909. Vanjska, elektroprivredna mreža modelirana je na 110 kV sabirnicama na koje je priključeno postrojenje željezare odgovarajućim

nadomjesnim modelom određenom na temelju izračunatih struja kratkog spoja u prijenosnoj mreži. S obzirom da iznosi kratkotrajnih i dugotrajnih flikera na mjestu priključka elektrolučne peći ovise o snazi kratkog spoja u tom čvorištu, u doktorskom su radu analizirana dva karakteristična slučaja uklopnog i pogonskog stanja prijenosne mreže:

- Slučaj 1 – stanje za minimalnu struju kratkog spoja
- Slučaj 2 – stanje za maksimalnu struju kratkog spoja

U slučaju uklopnog i pogonskog stanja prijenosne mreže u kojem je struja kratkog spoja u priključnom čvorištu elektrolučne peći minimalna i iznosi:

$_{k3,1} = 11{,}1$

snaga kratkog spoja određena je izrazom:

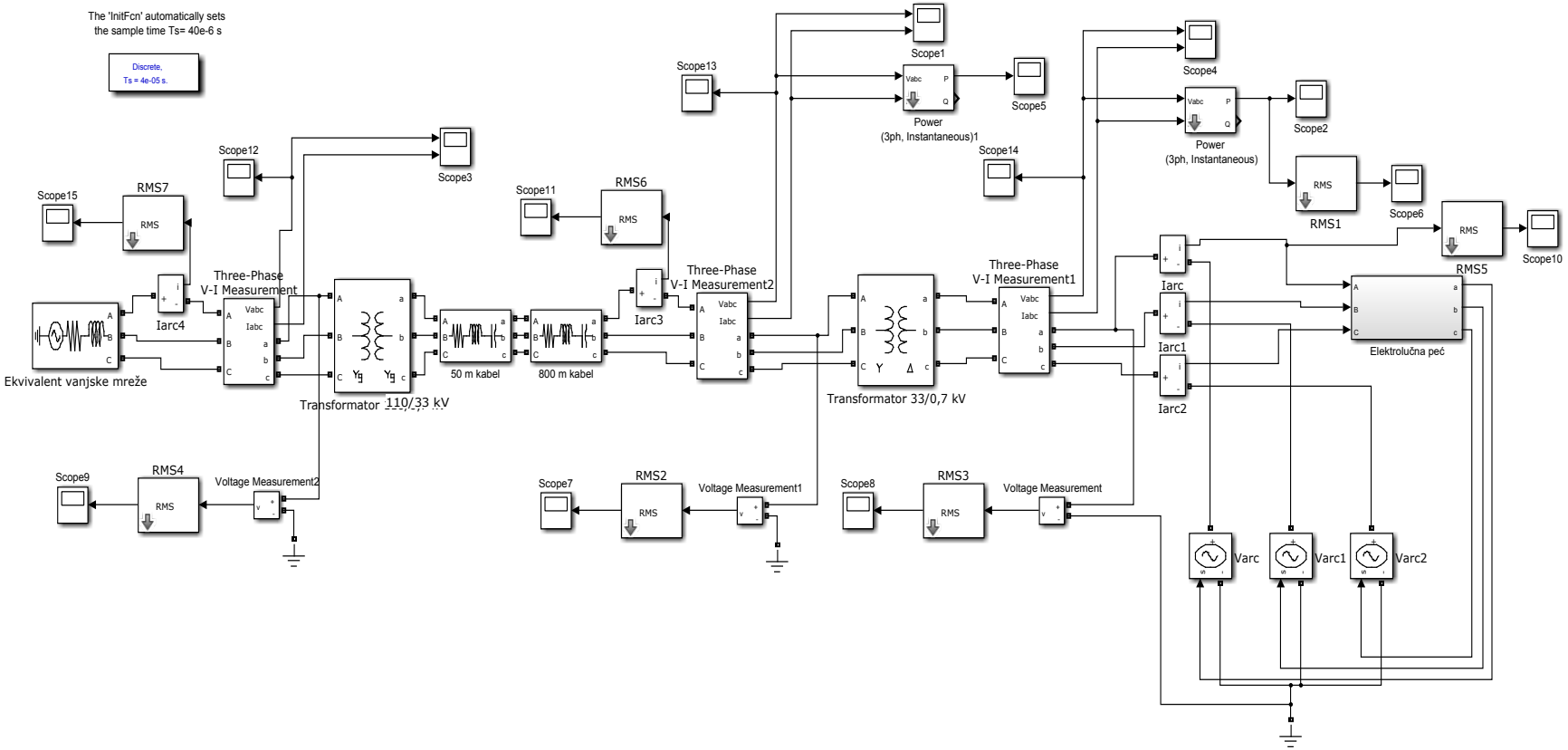
$$_{k3,1} = \sqrt{3} \cdot \quad \cdot \; _3 = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 11{,}1 = 2114{,}8$$

Drugo karakteristično uklopno stanje odnosi se na slučaj maksimalne snage kratkog spoja u točki priključka. U tom slučaju je:

$$_{k3,2} = 14{,}8 \quad , \quad _{k3,2} = 2819{,}8 \text{ MVA}$$

Nadomjesni model priključka elektrolučne peći na prijenosnu mrežu, napravljen u MATLAB-u, prikazuje slika 5.8.

Tehnički parametri novog mrežnog transformatora, pećnog transformatora, 33 kV kabela te vanjske mreže, modelirane na 110 kV sabirnicama u točki priključka elektrolučne peći na elektroenergetsku mrežu, prikazuje tablica 5.2.



Slika 5.8. Simulacijski model priključka elektrolučne peći na elektroenergetsku mrežu

Tablica 5.2. Tehnički parametri mrežnog i pećnog transformatora, 33 kV kabela te vanjske mreže

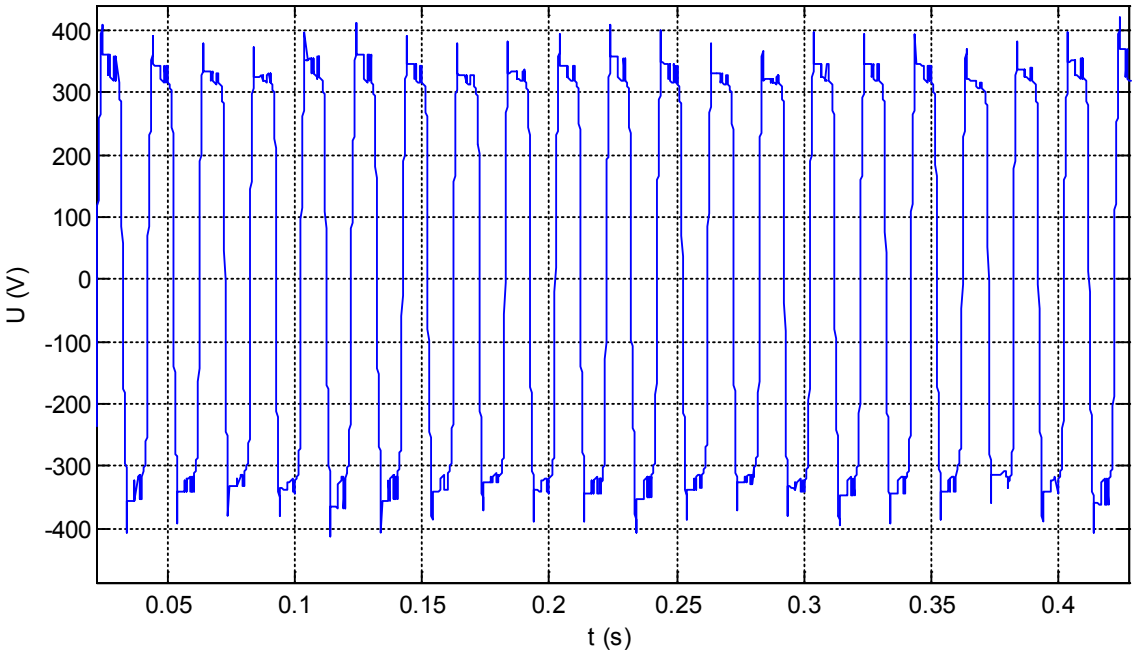
Transformator TR1 za napajanje elektrolučne peći	
Grupa spoja:	YN, yn0, d5
Nazivna snaga:	S_n = 63/63/21 MVA
Nazivni naponi:	$U_{n1}/U_{n2}/U_{n3}$ = 110±10x1,5%/33-30/6,3 kV
Nazivne struje:	$I_{n1}/I_{n2}/I_{n3}$ = 330,6/1102,2/1924,5 A
Naponi k.s.:	$u_{k,1-2}$ = 13,5 %, $u_{k,1-3}$ = 7,5 %
Transformator elektrolučne peći	
Grupa spoja:	Y,d
Nazivna snaga:	S_n = 60 MVA
Nazivni naponi:	U_{n1}/U_{n2} = 33 / 0,7 ÷ 0,344 kV
Prijenosni omjeri regulacijske sklopke - 17 položaja:	
Tap 1 (33/0,344 kV), Tap 8 (33/0,504 kV), Tap 9 (33/0,520 kV), Tap 17 (33/0,697 kV).	
Nazivne struje:	I_{n1}/I_{n2} = 1050 ÷ 630 / 60400 ÷ 49500 A
Naponi k.s.:	Tap 1 (u_k = 13,3%), Tap 8 (u_k = 15,5%), Tap 9 (u_k = 16%), Tap 17 (u_k = 20,6%)
R_{VN} = 0,0636 Ω (Tap 9)	
Z_{VN} = 2,904 Ω (Tap 9) – izračunat iz u_k = 16%	
X_{VN} = 2,903 Ω (Tap 9) – izračunat iz R_{VN} i Z_{VN}	
X_{VN} / R_{VN} = 45,6	
Vanjska mreža – (110 kV sabirnice u točki priključka)	
Maksimalna struja k.s.:	$I_{k3,min1}$ = 14,6 kA, X/R =5,16
Minimalna struja k.s.	$I_{k3,min2}$ = 11,1 kA, X/R=4,88
33 kV spojni kabelski vod između energetskog transformatora i pripadajućeg polja u 33 kV postrojenju – osnovni podaci	
Nazivni napon	33 kV
Tip	XHP 48 3x3x(1x300 mm^2)
Duljina	50 m
Induktivitet kabela po kilometru	0,37 mH/km
Radni otpor kabela po kilometru	0,0601 Ω/km
33 kV spojni kabelski vod do 33 kV postrojenja uz ELP – osnovni podaci	
Nazivni napon	33 kV
Tip kabela XHE 49-A 4x3x3x(1x300) mm^2	
Duljina	800 m
Induktivitet voda po kilometru	0,37 mH/km
Radni otpor voda po kilometru	0,1 Ω/km

Simulacija rada elektrolučne peći napravljena je za 3 karakteristične faze njenog rada. U početnoj fazi taljenja kada se luk još nije uspostavio (*engl. boring*) očekuju se najveći iznosi flikera zbog izrazito "nemirnog" rada peći. U fazi taljenja (*engl. melting*) luk je nešto stabilniji, pa se očekuju i nešto niži iznosi flikera, a u konačnoj fazi ti bi iznosi trebali biti najmanji. Unutar svake faze pretpostavljena je stohastička promjena napona u određenim granicama, kako bi se u obzir uzela kaotična i nepredvidiva priroda rada elektrolučne peći [3],[4]. U nastavku su prikazani rezultati simulacije rada elektrolučne peći u početnoj fazi taljenja budući da se tada očekuju najveći iznosi jakosti kratkotrajnog flikera.

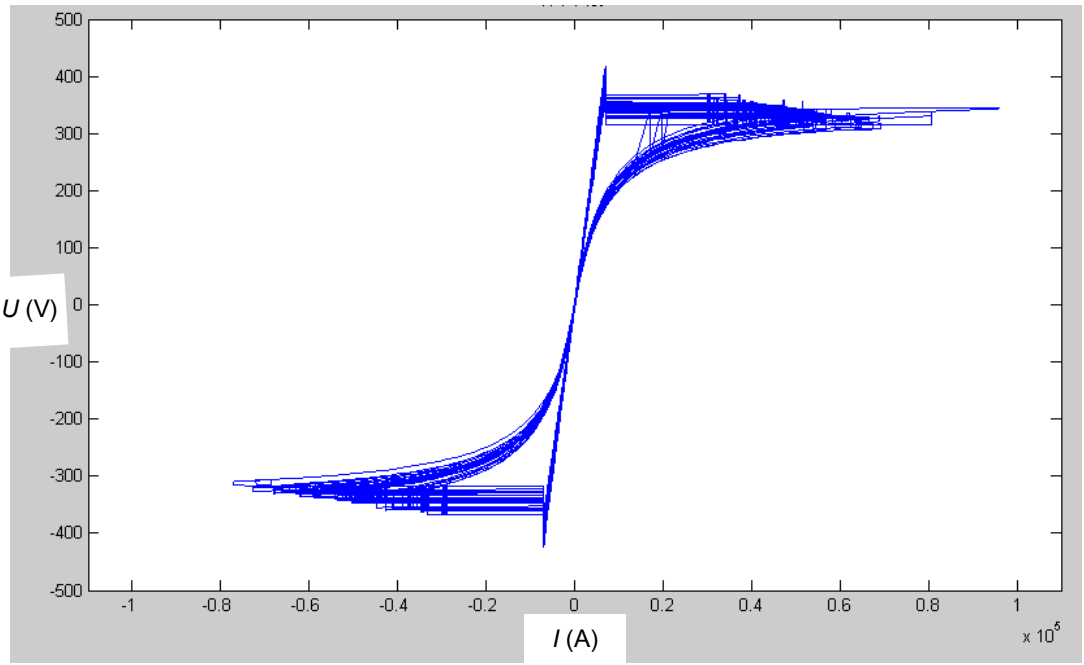
5.3.1 Rezultati proračuna za slučaj minimalne snage kratkog spoja u mreži

U slučaju minimalne struje kratkog spoja (I_{k3} = 11,1 kA, X/R = 4,88) za faktor modulacije m u početnoj fazi taljenja dobivena je vrijednost 0,085, a za faktor prilagodbe vrijednost α = 1,125. Izgled napona jedne faze postojeće elektrolučne peći nazivne snage 28,8 MW dobiven primjenom matematičkog modela napravljenog u MATLAB-u, prikazuje slika 5.9. za vremenski interval 0,4 s.

Za transformator elektrolučne peći pretpostavljen je srednji položaj regulacijske preklopke (Tap 9 – 33/0,52 kV). Dinamičku U-I karakteristiku faze A prikazuje slika 5.10.

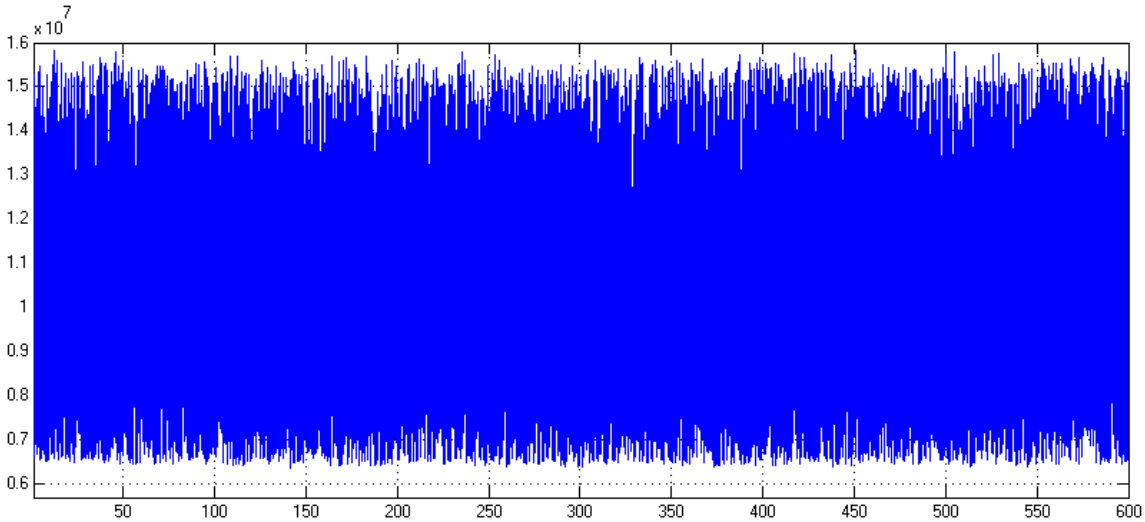


Slika 5.9. Stohastička promjena napona faze A elektrolučne peći 28,8 MW



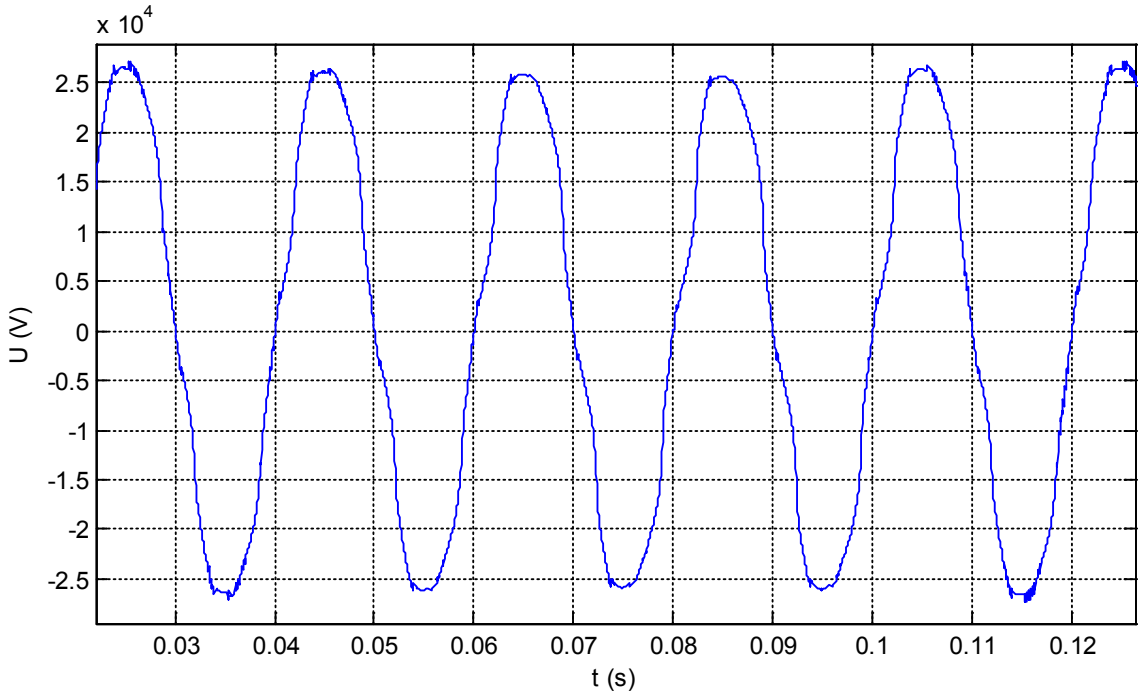
Slika 5.10. Dinamička U-I karakteristika faze A (x os – struja, y os - napon) na 0,52 kV strani transformatora

Slika 5.11. prikazuje fazne vrijednosti djelatne snage koju elektrolučna peć uzima iz mreže u istom 10-min. intervalu. Srednja vrijednost oko koje osciliraju efektivne vrijednosti djelatne snage iznosi oko 10 MW, što otprilike odgovara efektivnoj vrijednosti snage jedne faze elektrolučne peći.



Slika 5.11. Efektivne vrijednosti djelatne snage (MW) jedne faze elektrolučne peći 28,8 MW u 10-min. intervalu

Slika 5.12 prikazuje valni oblik napona faze A na 33 kV strani pećnog transformatora.

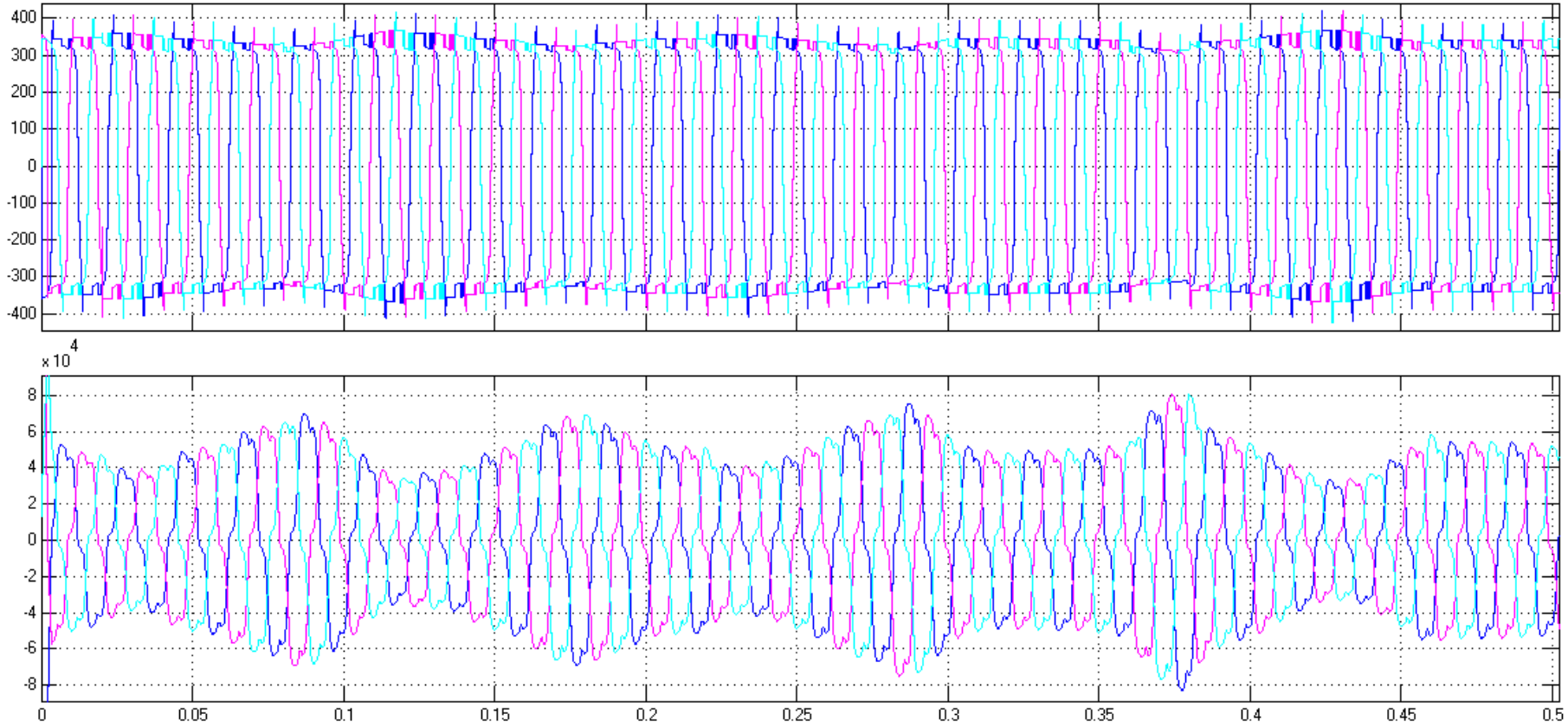


Slika 5.12 Valni oblik napona faze A na 33 kV strani pećnog transformatora

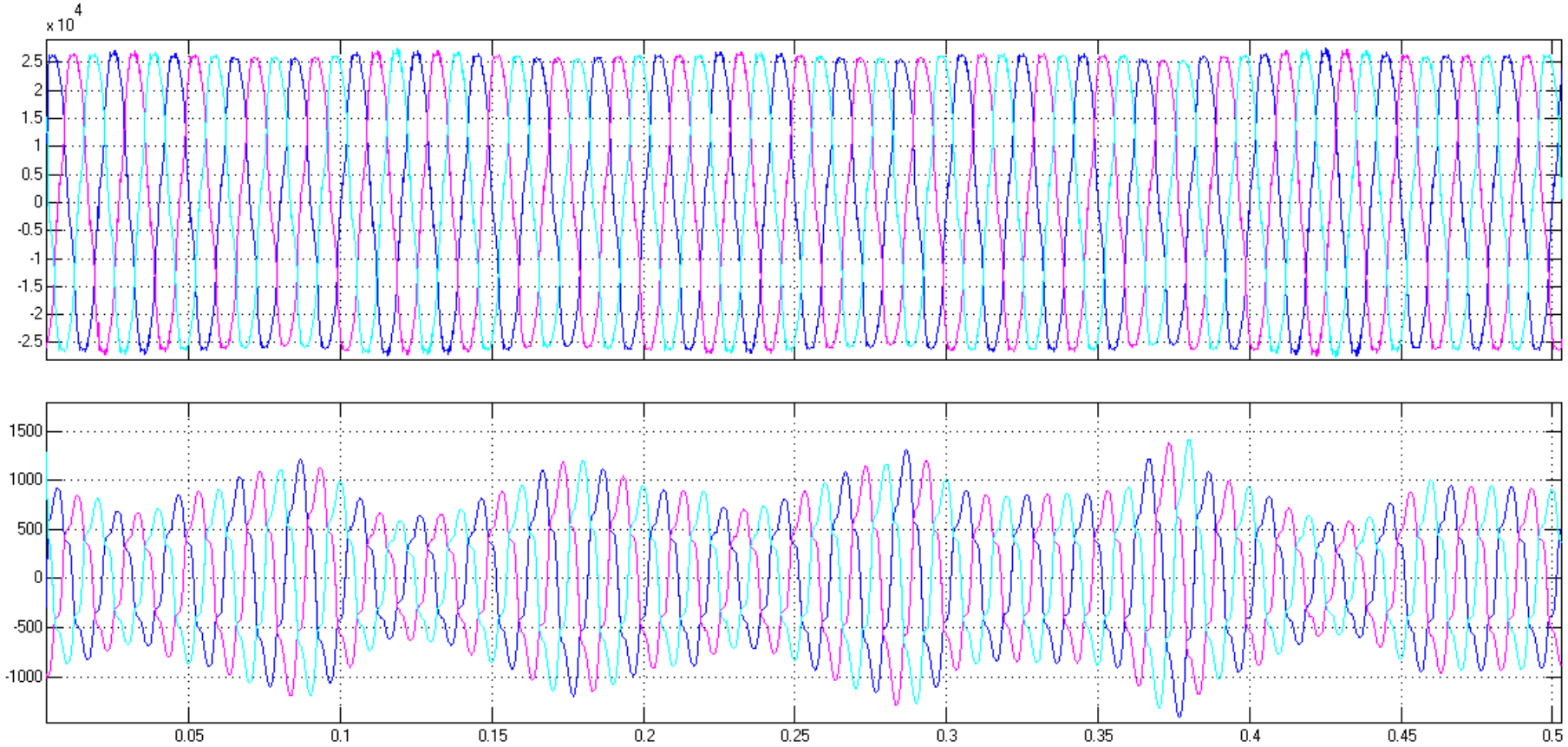
Budući da je transformator elektrolučne peći grupe spoja *Yd*, oblik napona na primarnoj strani transformatora nije isti kao na sekundarnoj strani. Valne oblike faznih napona i struja na sekundarnoj (0,52 kV) strani prikazuje slika 5.13, a napone na primarnoj (33 kV) strani transformatora prikazuje slika 5.14. Na slikama je dat vremenski prikaz za interval od 0,5 s kako bi se mogla uočiti razlika u obliku napona na primarnoj i sekundarnoj strani transformatora.

Efektivne vrijednosti faznog napona i struje na 0,52 kV strani u intervalu od 10 s prikazuje slika 5.15. Efektivna vrijednost faznog napona niskonaponske strane pećnog transformatora u praznom hodu (za srednji položaj regulacijske preklopke -Tap 9 i nazivni napon na visokonaponskoj strani) iznosi 0,3 kV ($0{,}52/\sqrt{3}$). Stvarni iznosi napona na niskonaponskoj strani pećnog transformatora u pogonu ovise o naponu prijenosne mreže, položajima regulacijskih preklopki oba transformatora, te padu napona na samom pećnom transformatoru, ovisnom o struji elektrolučne peći. Srednja vrijednost oko koje osciliraju iznosi efektivnih vrijednosti napona jedne faze koje prikazuje slika 5.15 iznosi oko 0,31 kV.

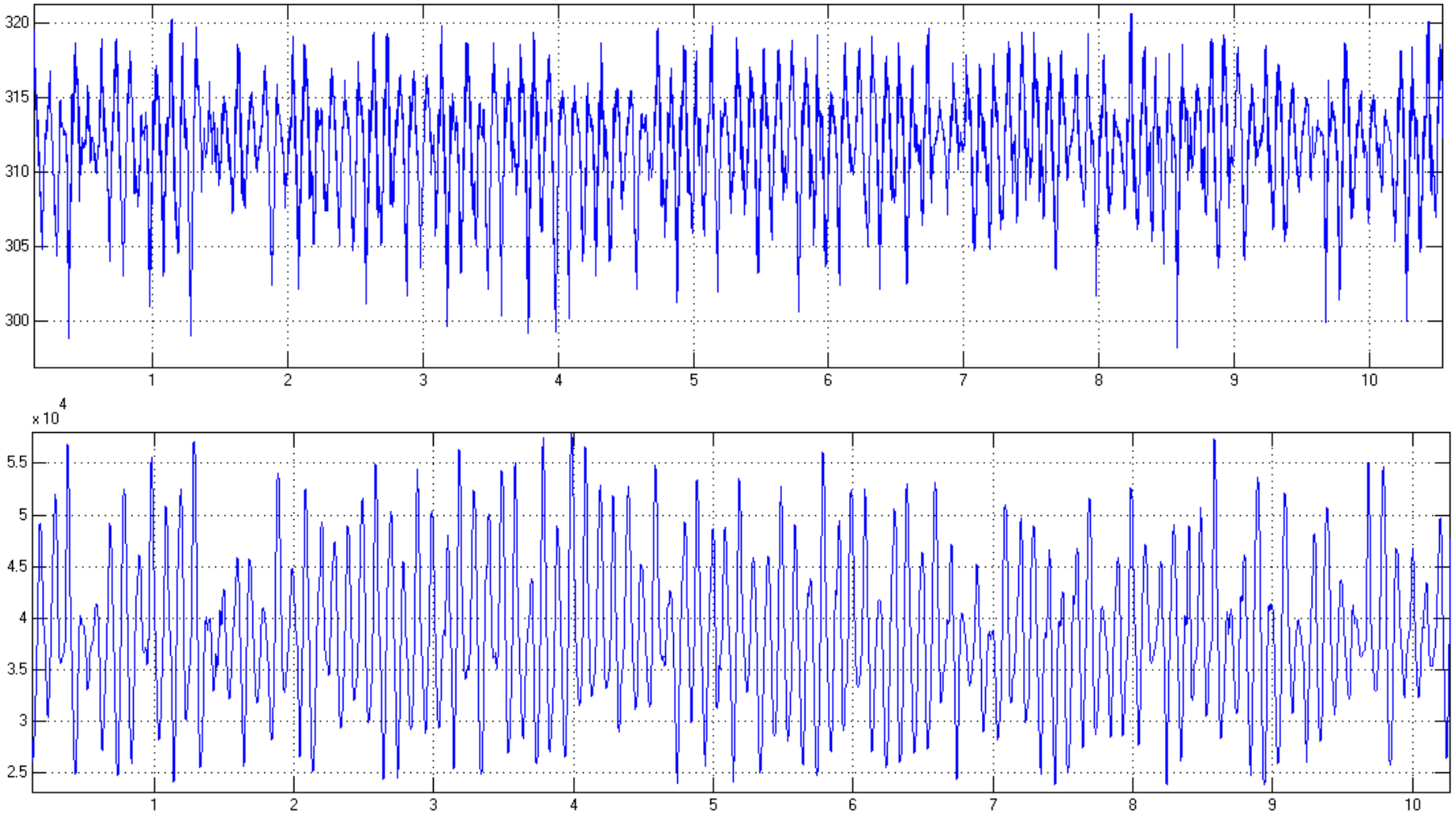
Efektivne vrijednosti napona na 33 kV i 110 kV strani prikazuje slika 5.16, a efektivne vrijednosti struje na 33 kV i 110 kV strani prikazuje slika 5.17. za vremenski interval od 10 s. Iz navedenih prikaza lako se može uočiti stohastički karakter titranja napona i struje.



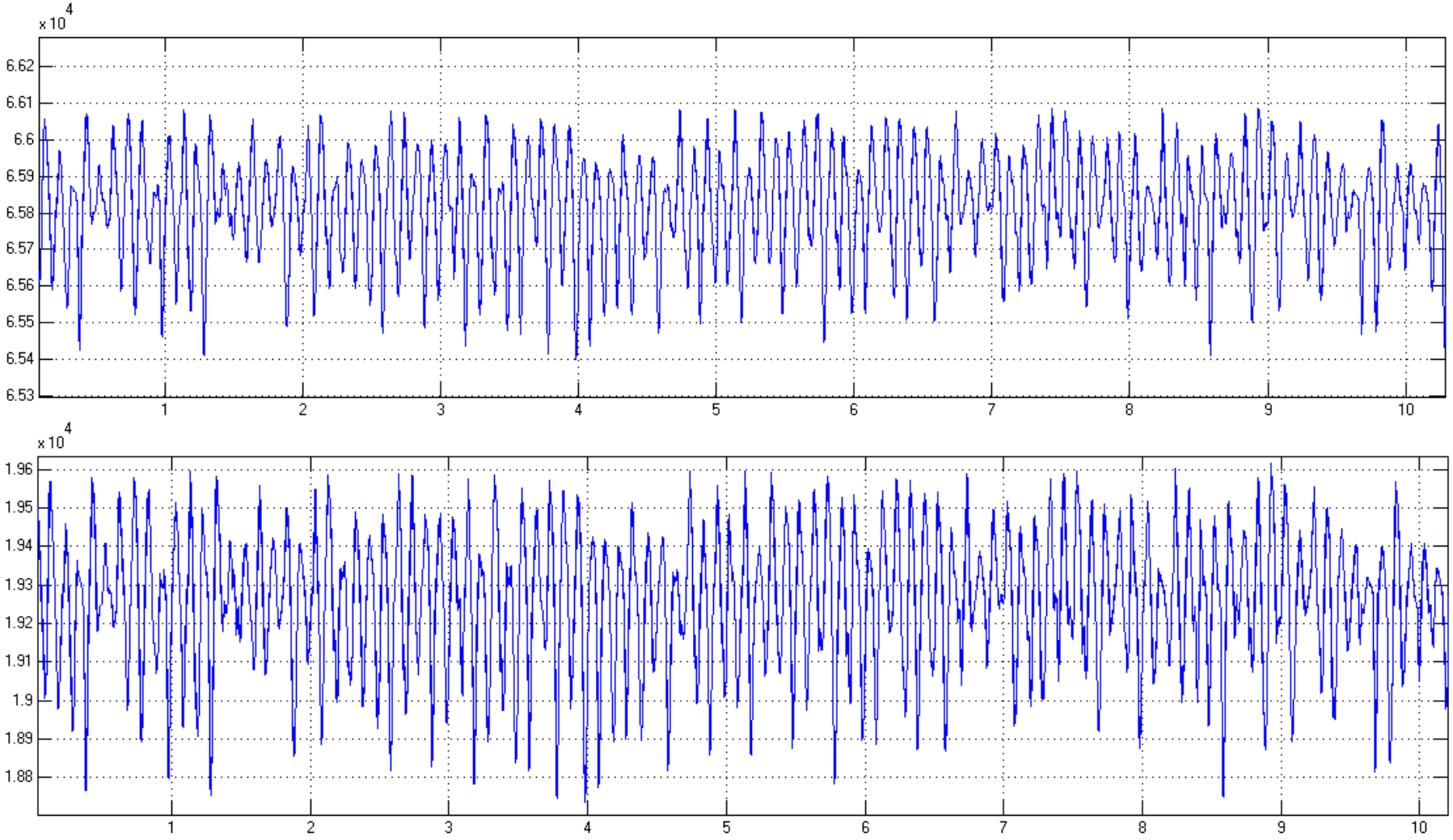
Slika 5.13 Gore: Vremenski prikaz faznih napona na 0,52 kV strani transformatora
dolje: Vremenski prikaz struja na 0,52 kV strani transformatora



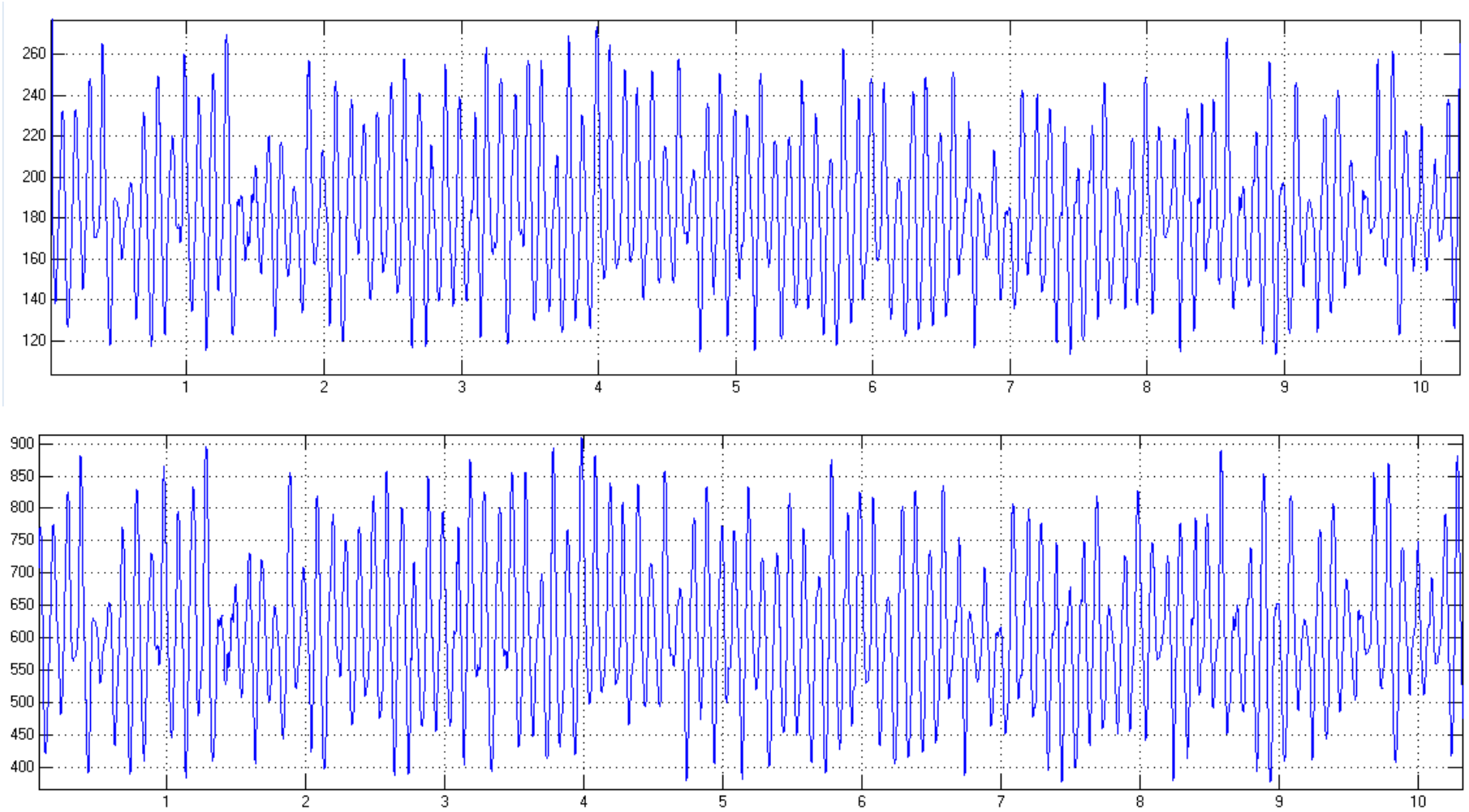
Slika 5.14 Gore: Vremenski prikaz faznih napona na 33 kV strani transformatora
dolje: Vremenski prikaz struja na 33 kV strani transformatora



Slika 5.15 Gore: Efektivne vrijednosti napona faze A na 0,52 kV strani transformatora
dolje: Efektivne vrijednosti struja faze A na 0,52 kV strani transformatora



Slika 5.16 Gore: Efektivne vrijednosti napona faze A na 110 kV strani transformatora dolje: Efektivne vrijednosti napona faze A na 33 kV strani transformatora

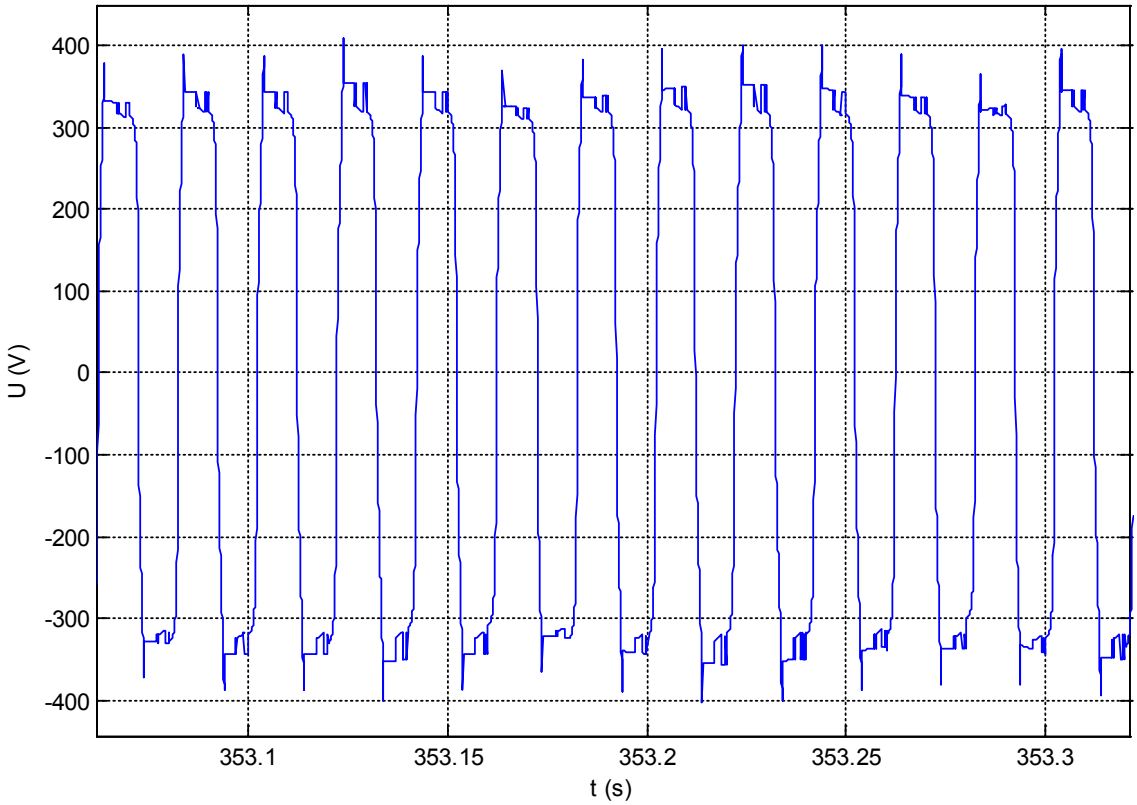


Slika 5.17. Gore: Efektivne vrijednosti struje faze A na 110 kV strani transformatora dolje: Efektivne vrijednosti struje faze A na 33 kV strani transformatora

5.3.2 Rezultati proračuna za slučaj maksimalne snage kratkog spoja u mreži

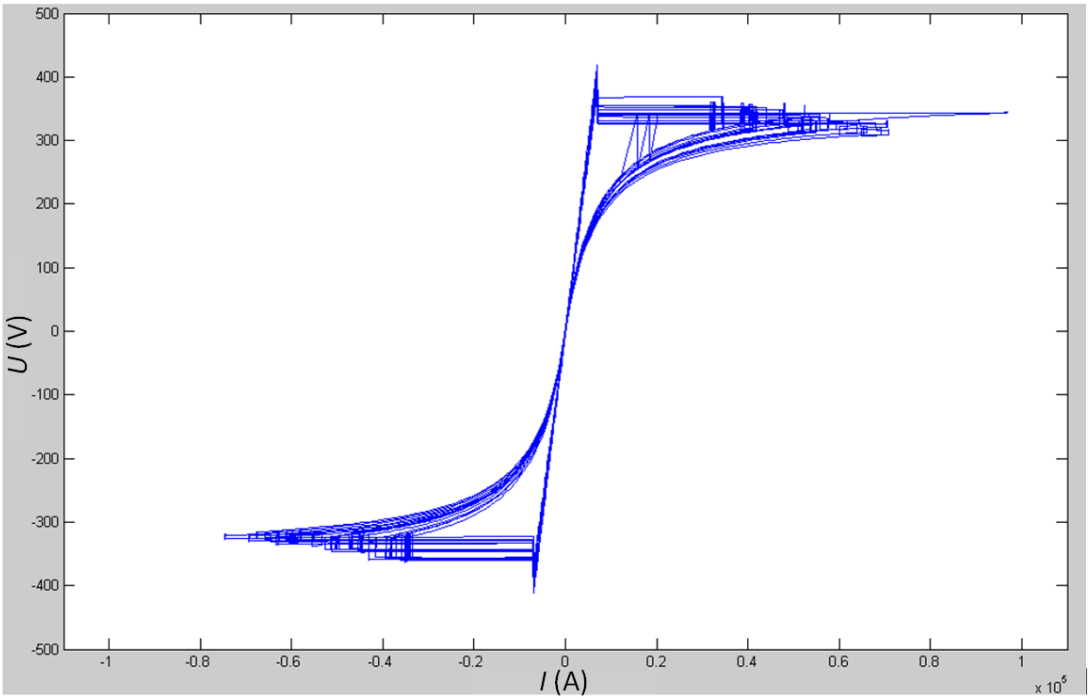
U slučaju uklopnog i pogonskog stanja u kojem se pojavljuje maksimalna struja kratkog spoja, koja iznosi I_{k3} = 14,8 kA uz X/R = 5,614, faktor modulacije je za početnu fazu taljenja 0,085, a faktor prilagodbe α = 1,125.

Izgled napona jedne faze elektrolučne peći nazivne snage 28,8 MW dobiven primjenom matematičkog modela napravljenog u MATLAB-u, prikazuje slika 5.18. Za transformator elektrolučne peći pretpostavljen je srednji položaj regulacijske preklopke (Tap 9 – 33/0,52 kV).



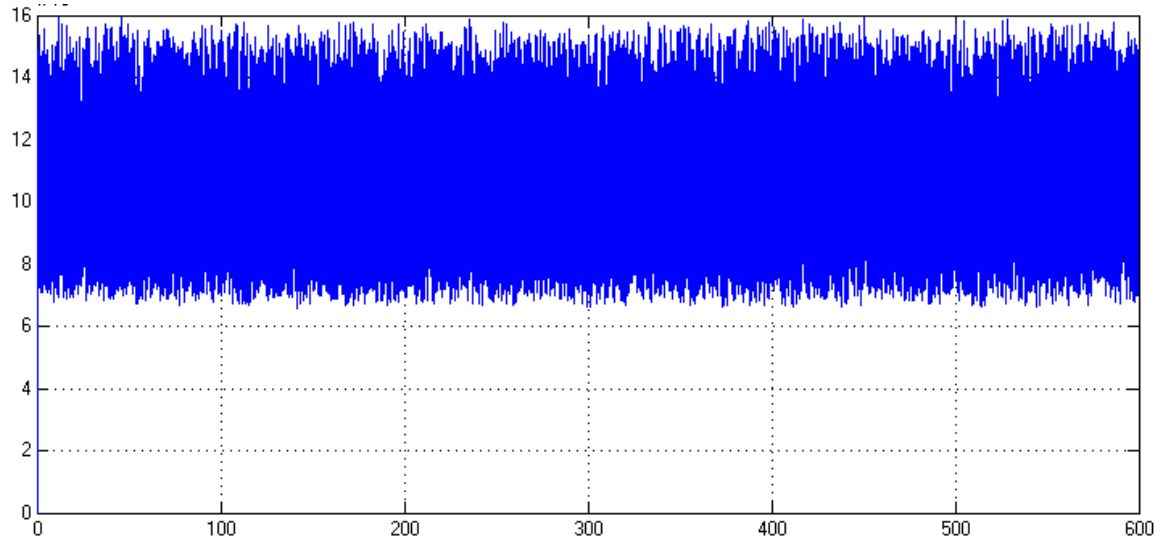
Slika 5.18. Stohastička promjena napona faze A elektrolučne peći 28,8 MW

Dinamičku U-I karakteristika faze A prikazuje slika 5.19.



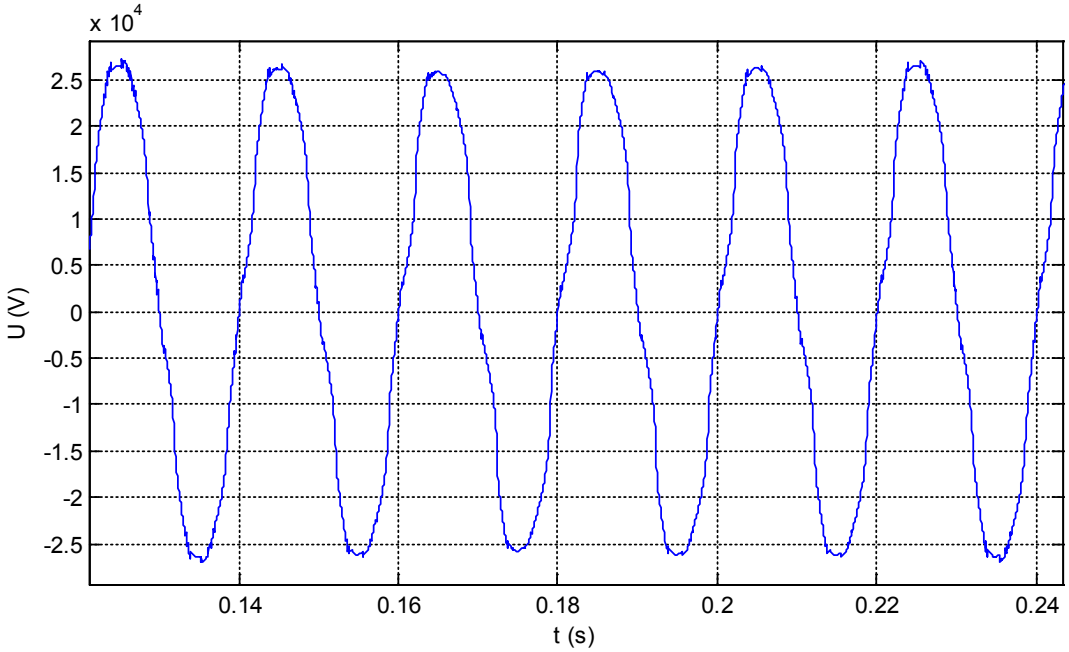
Slika 5.19. Dinamička U-I karakteristika faze A (x os – struja, y os - napon) na 0,52 kV strani transformatora

Slika 5.20. prikazuje fazne vrijednosti djelatne snage koju elektrolučna peć uzima iz mreže u istom 10-min. intervalu. Srednja vrijednost oko koje osciliraju efektivne vrijednosti djelatne snage iznosi oko 10 MW, kao i u slučaju minimalnog kratkog spoja, jer snaga koju elektrolučna peć uzima iz mreže ne ovisi o njenom uklopnom i pogonskom stanju.



Slika 5.20. Efektivne vrijednosti djelatne snage (MW) jedne faze elektrolučne peći 28,8 MW u 10-min. intervalu

Slika 5.21. prikazuje valni oblik napona faze A na 33 kV strani pećnog transformatora.

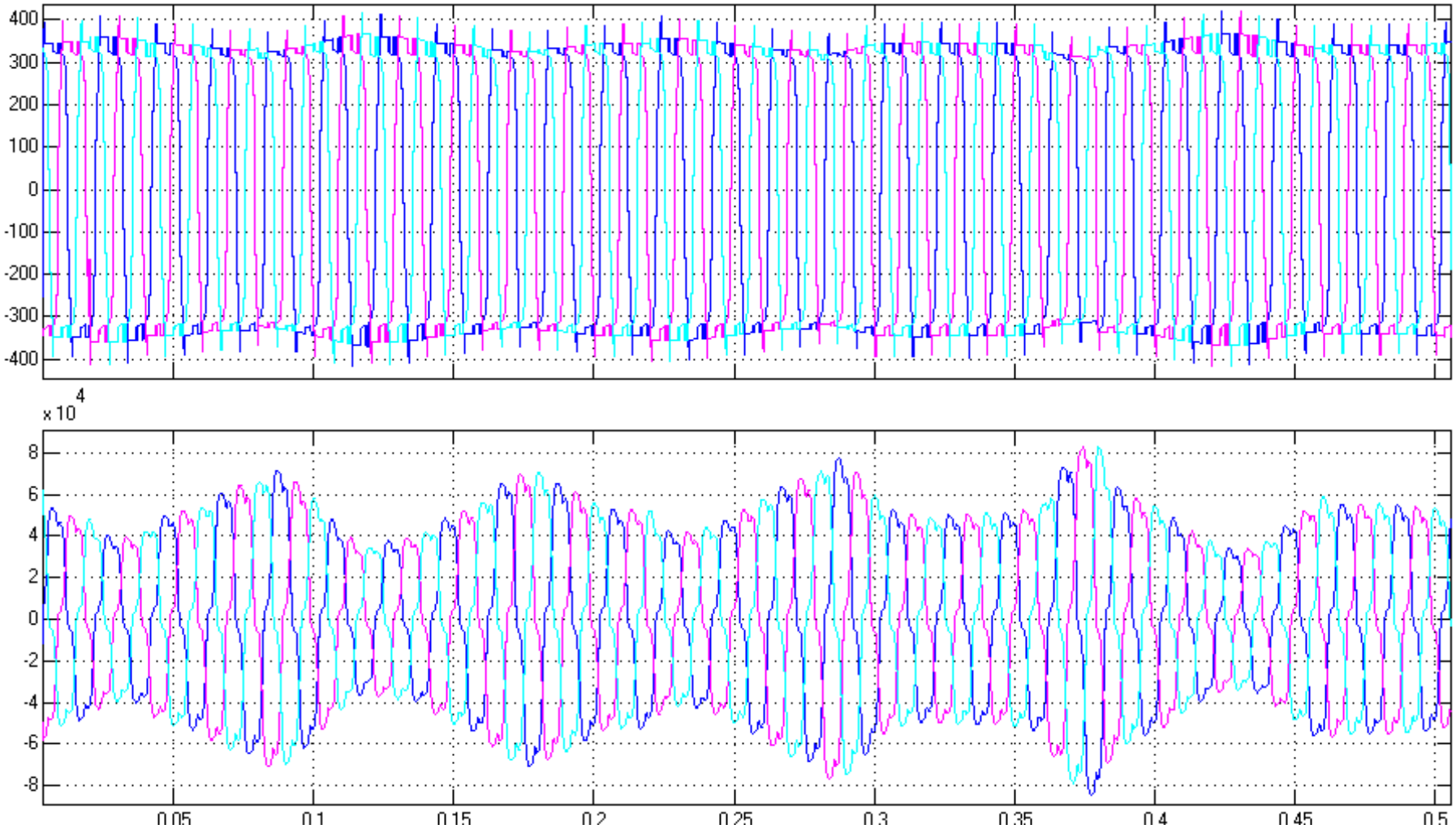


Slika 5.21. Valni oblik napona faze A na 33 kV strani pećnog transformatora

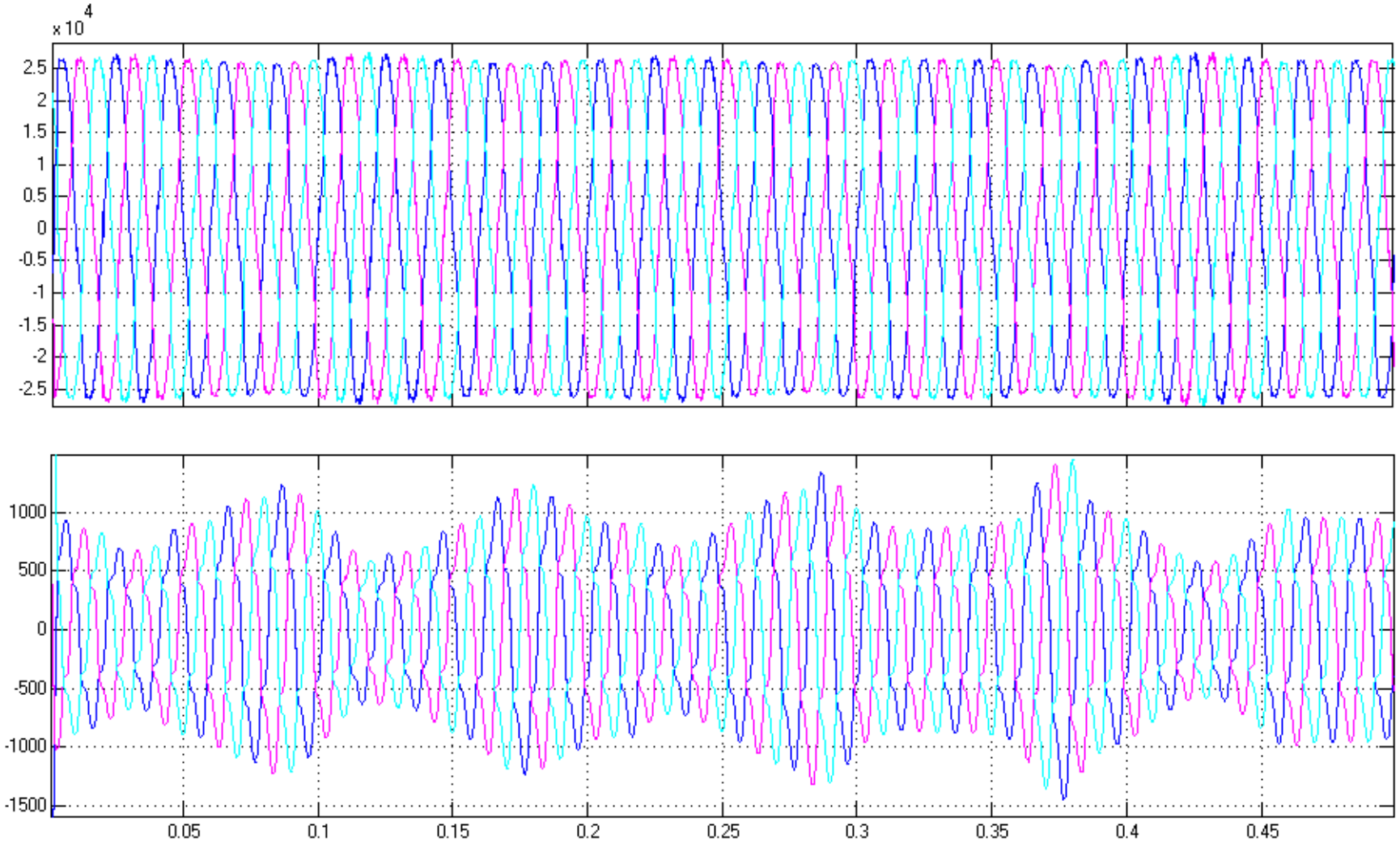
Budući da je transformator elektrolučne peći grupe spoja *Yd*, oblik napona na primarnoj strani transformatora nije isti kao na sekundarnoj strani. Valni oblici faznih napona i struja na sekundarnoj (0,52 kV) strani prikazuje slika 5.22., a napone na primarnoj (33 kV) strani transformatora prikazuje slika 5.23. Na slikama je dat vremenski prikaz za interval od 0,5 s kako bi se mogla uočiti razlika u obliku napona na primarnoj i sekundarnoj strani transformatora.

Efektivne vrijednosti faznog napona i struje na 0,52 kV strani u intervalu od 10 s prikazuje slika 5.24. Efektivna vrijednost faznog napona niskonaponske strane pećnog transformatora u praznom hodu (za srednji položaj regulacijske preklopke - Tap 9 i nazivni napon na visokonaponskoj strani) iznosi 0,3 kV (0,52/√3). Stvarni iznosi napona na niskonaponskoj strani pećnog transformatora u pogonu ovise o naponu prijenosne mreže, položajima regulacijskih preklopki oba transformatora, te padu napona na samom pećnom transformatoru, ovisnom o struji elektrolučne peći. Srednja vrijednost oko koje osciliraju iznosi efektivnih vrijednosti napona jedne faze koji prikazuje slika 5.24. iznosi oko 0,312 kV.

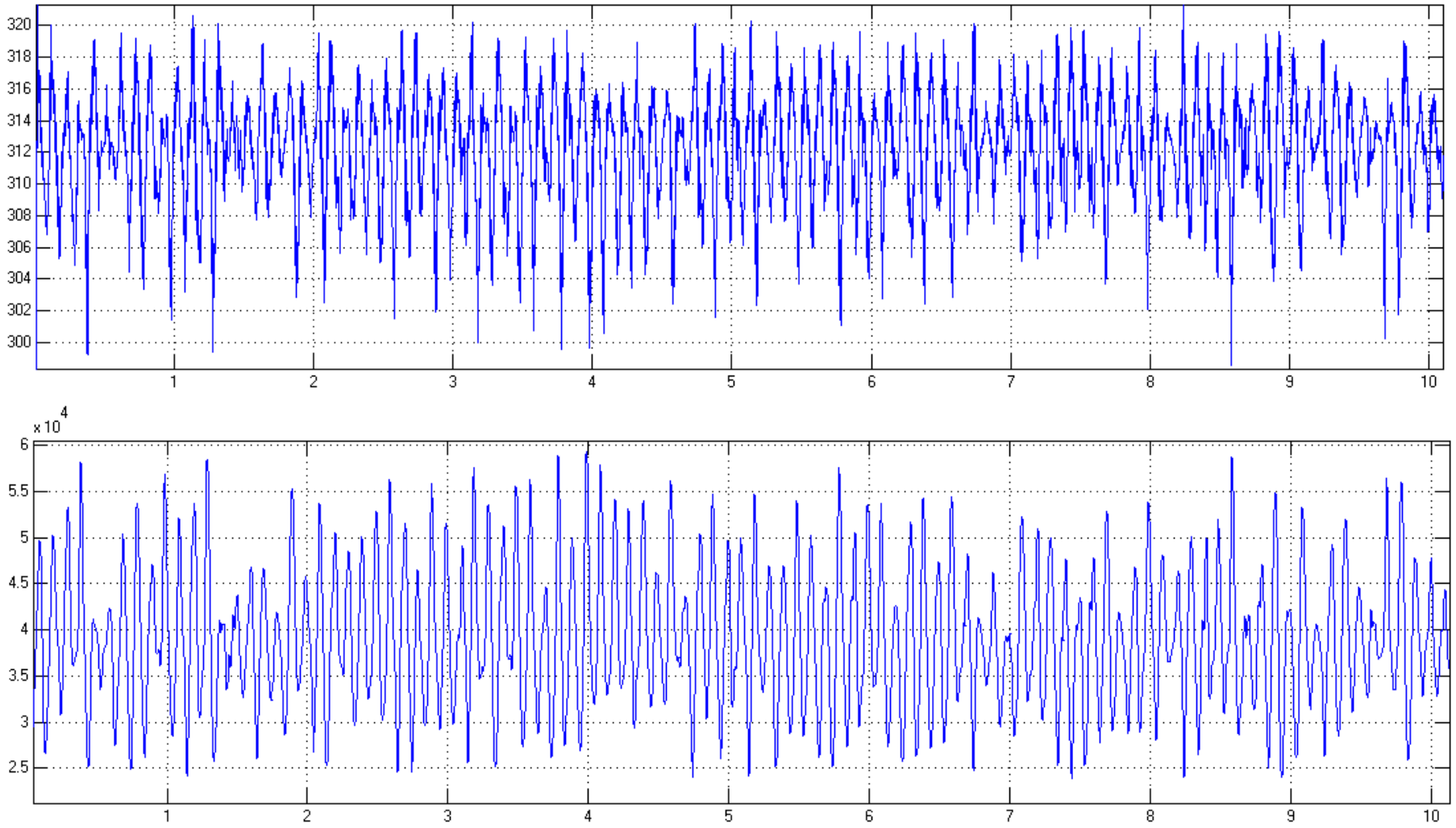
Efektivne vrijednosti napona na 33 kV i 110 kV strani prikazuje slika 5.25., a efektivne vrijednosti struje na 33 kV i 110 kV strani prikazuje slika 5.26. za vremenski interval od 10 s. Slično kao i u prethodnom slučaju i sada je lako uočljiv stohastički karakter titranja napona i struje.



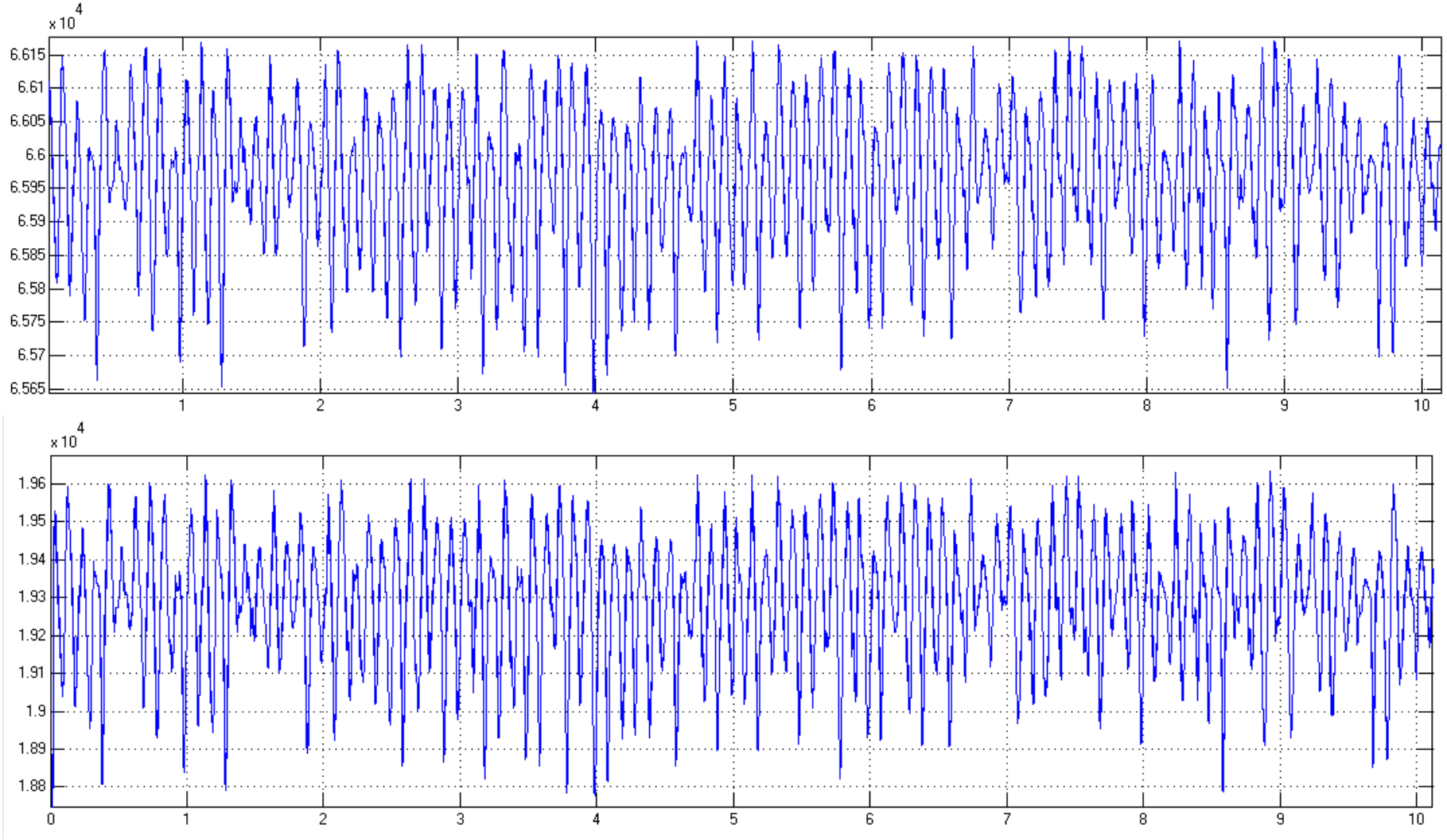
Slika 5.22. Gore: Vremenski prikaz faznih napona na 0,52 kV strani transformatora dolje: Vremenski prikaz struja na 0,52 kV strani transformatora



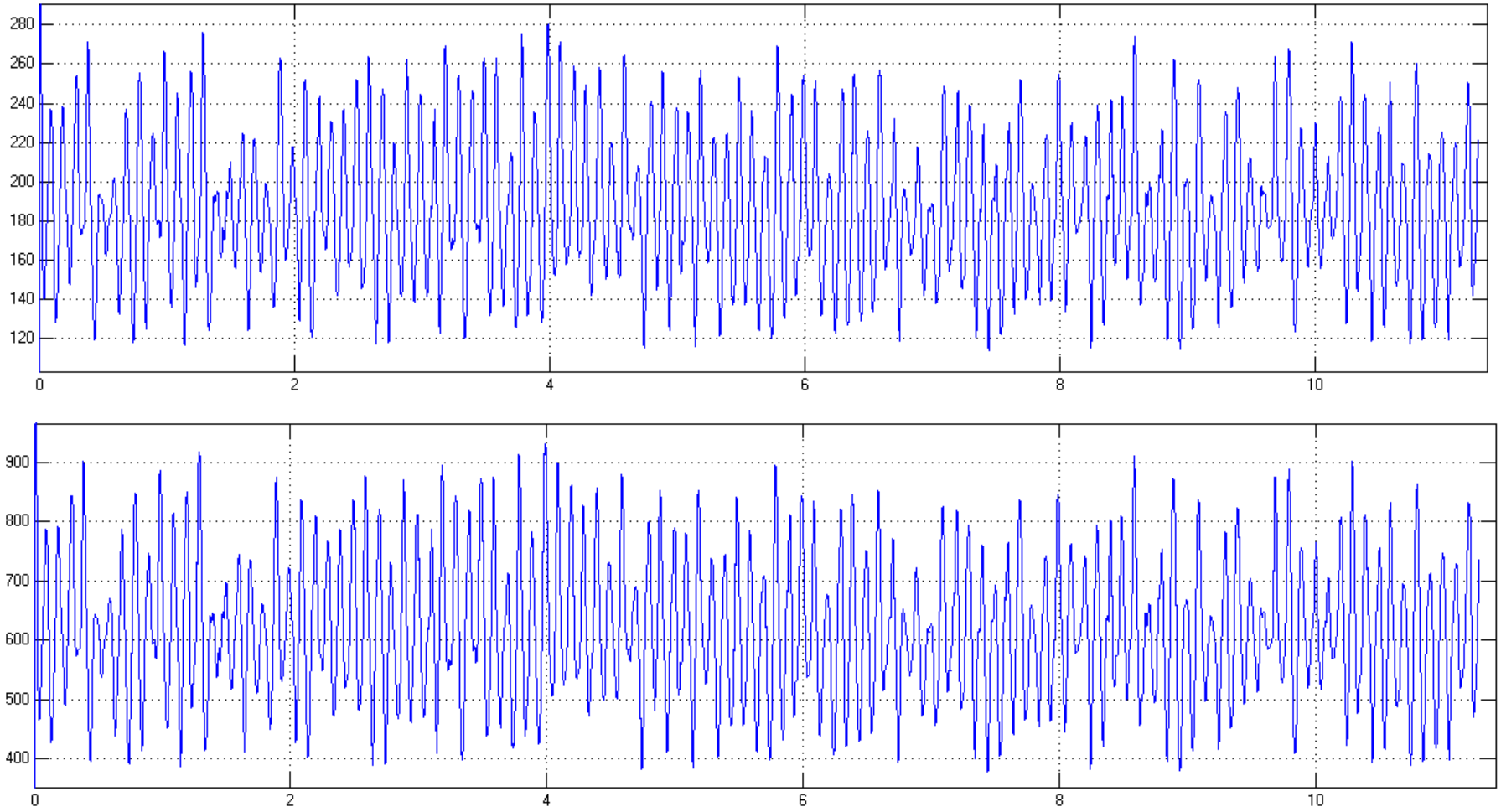
Slika 5.23. Gore: Vremenski prikaz faznih napona na 33 kV strani transformatora dolje: Vremenski prikaz struja na 33 kV strani transformatora



Slika 5.24. Gore: Efektivne vrijednosti napona faze A na 0,52 kV strani transformatora dolje: Efektivne vrijednosti struja faze A na 0,52 kV strani transformatora



Slika 5.25. Gore: Efektivne vrijednosti napona faze A na 110 kV strani transformatora dolje: Efektivne vrijednosti napona faze A na 33 kV strani transformatora



Slika 5.26. Gore: Efektivne vrijednosti struje faze A na 110 kV strani transformatora dolje: Efektivne vrijednosti struje faze A na 33 kV strani transformatora

5.3.3 Usporedba rezultata proračuna i mjerenja flikera elektrolučne peći 28,8 MW

Primjenom razvijenog matematičkog modela elektrolučne peći moguće je odrediti iznose kratkotrajnih i dugotrajnih flikera na sabirnicama 33 kV i 110 kV u TS u kojoj je priključena elektrolučna peć, ali i u okolnoj mreži za različite režime rada elektrolučne peći. Kao primjer napravljeni su proračuni flikera za 3 karakteristična režima rada elektrolučne peći: početak taljenja (*engl. boring*), topljenje (*engl. melting*) i rafiniranje (*engl. refining*). Rezultati proračuna kratkotrajnih flikera i mjerene vrijednosti faze *a* za navedena 3 karakteristična režima rada elektrolučne peći koje prikazuje tablica 5.3. Slični rezultati dobiveni su i za ostale dvije faze trofaznog sustava.

Tablica 5.3. Usporedba rezultata proračuna kratkotrajnih flikera na sabirnicama 33 kV i mjerenih vrijednosti za tri karakteristične faze rada elektrolučne peći

Početna faza taljenja (engl. *boring*)			Faza taljenja (engl. *melting*)			Faza rafiniranja (engl. *refining*)		
P_{st} (mjereno)	P_{st} (izračunato)	ΔP_{st} (%)	P_{st} (mjereno)	P_{st} (izračunato)	ΔP_{st} (%)	P_{st} (mjereno)	P_{st} (izračunato)	ΔP_{st} (%)
7,85	7,8240	-0,33	5,35	5,3261	-0,45	2,65	2,6750	0,94

Na temelju rezultata proračuna kratkotrajnih flikera i njihovih izmjerenih vrijednosti može se uočiti da se rezultati dobiveni simulacijom dosta dobro slažu s mjerenim vrijednostima. Maksimalno odstupanje u fazi rafiniranja iznosi ΔP_{st} = 0,94 %, što predstavlja sasvim zadovoljavajući rezultat s obzirom na kompleksnost same problematike nastanka i gorenja električnog luka i stohastičku prirodu tih procesa. Ovim je potvrđena zadovoljavajuća točnost simulacijskog modela, te se on može koristiti za proračun širenja flikera u prijenosnoj mreži.

Na temelju učestalosti i trajanja pojedinih režima rada moguće je simulirati rad elektrolučne peći u cijelom tjednu. Na taj način može se napraviti i procjena ukupnih vrijednosti kratkotrajnih i dugotrajnih flikera, koju je kasnije potrebno provjeriti odgovarajućim mjerenjima. Rezultati proračuna kratkotrajnih flikera P_{st} za sabirnice sve tri naponske razine, za pogonska stanja prijenosne mreže za minimalni i maksimalni kratki spoj u sva tri režima rada elektrolučne peći prikazuju tablica 5.4. do 5.9.

Tablica 5.4. Rezultati proračuna kratkotrajnih flikera Pst za početnu fazu taljenja, vanjski ekvivalent mreže 11,1 kA, X/R = 4,88 (faktor modulacije m = 0-0,085)

Vrijeme simulacije	0,52 kV	33 kV	110 kV
600 s	9,8646	7,8240	1,8945

Tablica 5.5. Rezultati proračuna kratkotrajnih flikera Pst početnu fazu taljenja, vanjski ekvivalent mreže 14,8 kA, X/R = 5,614 (faktor modulacije m = 0-0,085)

Vrijeme simulacije	0,52 kV	33 kV	110 kV
600 s	9,8219	7,6528	1,4332

Tablica 5.6. Rezultati proračuna kratkotrajnih flikera Pst za fazu taljenja, vanjski ekvivalent mreže 11,1 kA, X/R = 4,88 (faktor modulacije m = 0-0,058)

Vrijeme simulacije	0,52 kV	33 kV	110 kV
600 s	6,6849	5,3261	1,2924

Tablica 5.7. Rezultati proračuna kratkotrajnih flikera Pst za fazu taljenja, vanjski ekvivalent mreže 14,8 kA, X/R = 5,614 (faktor modulacije m = 0-0,058)

Vrijeme simulacije	0,52 kV	33 kV	110 kV
600 s	6,6646	5,2107	0,9777

Tablica 5.8. Rezultati proračuna kratkotrajnih flikera Pst za fazu rafiniranja, vanjski ekvivalent mreže 11,1 kA, X/R = 4,88 (faktor modulacije m = 0-0,029)

Vrijeme simulacije	0,52 kV	33 kV	110 kV
600s	3,3621	2,6750	0,6508

Tablica 5.9. Rezultati proračuna kratkotrajnih flikera Pst za fazu rafiniranja, vanjski ekvivalent mreže 14,8 kA, X/R = 5,614 (faktor modulacije m = 0-0,029)

Vrijeme simulacije	0,52 kV	33 kV	110 kV
600 s	3,3565	2,6190	0,4925

6. Mjerenja širenja flikera u elektroenergetskoj mreži

6.1 Opis i svrha mjerenja

Za vrednovanje razvijenog modela elektrolučne peći i metode za širenje flikera kroz elektroenergetsku mrežu, detaljno opisane u sljedećem poglavlju rada, potrebno je napraviti usporedbu s mjerenim vrijednostima kratkotrajnih flikera na mjestu priključka i u okolnim čvorištima elektroenergetske mreže. U radu su korišteni podaci izmjereni za jednu stvarnu elektrolučnu peć, priključenu na prijenosnu elektroenergetsku mrežu [93]. Mjesto preuzimanja električne energije postrojenja elektrolučne peći se nalazi na 110 kV sabirnicama u TS 110/35(33) kV Stanica 1 (slika 6.1.). S obzirom da su za kvalitetu napona u nekoj točki mreže odgovorni i operator prijenosnog sustava i korisnici mreže, svaka izgradnja i/ili dogradnja novog objekta zahtijeva i provedbu odgovarajućih mjerenja kvalitete napona. Održavanje određene razine kvalitete napona (nužno zbog ispravnog rada opreme koja je priključena na EES) u nekom čvorištu mreže je obveza operatora sustava. Ovu zadaću operator sustava provodi ograničavanjem negativnog povratnog djelovanja opreme svih korisnika mreže. Svaki korisnik mreže je dužan povratna djelovanja svoje opreme na kvalitetu napona (injektiranje viših harmonika, uzimanje jalove snage, emisija flikera i nesimetrije opterećenja) svesti na propisane (unaprijed dogovorene) granične vrijednosti (koje u načelu određuje operator sustava).

Kao što je već prije spomenuto, elektrolučna peć uzrokuje poremećaje u elektroenergetskom sustavu kao što su brza kolebanja napona (flikeri) frekvencije 0,5 do 30 Hz, nesimetrije u mreži, pojava viših harmonika, prenaponi u mreži uzrokovani čestim sklapanjima prekidača, povećane tokove jalove snage zbog niskog faktora snage i dr. Peć uzima iz mreže nesinusoidalnu i neperiodičku struju uslijed nelinearnosti otpora električnog luka koji se iznova pali i gasi u svakoj poluperiodi.

Svrha provedenih mjerenja je bila prvenstveno odrediti kvalitetu napona na obračunskom mjernom mjestu korisnika (110 kV sabirnice) u TS 110/35(33) kV Stanica 1 te kvantificirati utjecaj promatranog korisnika mreže na kvalitetu napona. Mjerenja su provedena na 110 kV odvodu transformatora T3, preko kojeg se napaja elektrolučna peć u TS 110/35(33) kV Stanica 1. Osim u toj transformatorskoj stanici, mjerenja kvalitete napona su istovremeno obavljena i u čvorištima okolne prijenosne i distribucijske elektroenergetske mreže.

Mjerenjima u okolnim čvorištima želio se utvrditi način širenja flikera po okolnoj elektroenergetskoj mreži, udaljavajući se od izvora (elektrolučna peć), kako po dubini same mreže, tako i preko transformacija na niženaponske razine.

6.2 Mjesta mjerenja

Mjerenja kvalitete napona i opterećenja te negativnog povratnog djelovanja korisnika mreže na kvalitetu napona provedena su na lokaciji korisnika elektrolučne peći i u okolnoj prijenosnoj i distribucijskoj elektroenergetskoj mreži. Mjerenja su obavljena u ukupno 6 mjernih točaka – 3 mjerne točke u prijenosnoj elektroenergetskoj mreži i 3 mjerne točke u distribucijskoj elektroenergetskoj mreži:

- MT1 – 110 kV sabirnice u TS 110/35(33) kV Stanica 1 – odvod transformatora T3
- MT2 – 110 kV sabirnice u TS 220/110 kV TE Elektrana 1
- MT3 – 110 kV sabirnice u TS 110/35 kV Stanica 2
- MT4 – 10 kV sabirnice u TS 110/10 kV Stanica 3
- MT5 – 0,4 kV sabirnice u TS 10/0,4 kV Stanica 4 (početna točka 10 kV izvoda 1 iz TS 110/10 kV Stanica 3)
- MT6 – 0,4 kV sabirnice u TS 10/0,4 kV Stanica 5 (krajnja točka 10 kV izvoda 1 iz TS 110/10 kV Stanica 3)

Mjerenja u mjernim točkama su obavljena suvremenim analizatorima kvalitete električne energije. U svim mjernim točkama su mjereni parametri kvalitete napona, dok je opterećenje mjereno u mjernoj točki MT1 (110 kV sabirnice u TS 110/35(33) kV Stanica 1 – odvod transformatora preko kojeg se napaja elektrolučna peć, da se utvrdi utjecaj njenog pogona na kvalitetu napona okolne elektroenergetske mreže.

Mjerenja u svim mjernim točkama su obavljena istovremeno u razdoblju od tjedan dana.

Mjerni rezultati su analizirani (ovisno o mjernoj točki) u skladu sa sljedećim međunarodnim normama i tehničkim izvještajima:

- IEC 61000-3-6:2008

Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems"

- IEC 61000-3-7:2008

Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-7: Limits - Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems"

- IEC 61000-3-13:2008

Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-13: Limits - Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV, HV and EHV power systems"

- HRN EN 50160:2008

"Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks"

Slika 6.1. prikazuje raspored mjernih mjesta na lokaciji korisnika mreže i u okolnoj prijenosnoj elektroenergetskoj mreži, u kojima su obavljena mjerenja.

Mjesto priključka korisnika mreže se nalazi na 110 kV razini u TS 110/35(33) kV Stanica 1. Navedena transformatorska stanica trenutno sadrži dva transformatora, T1 nazivne snage 63 MVA i T3 nazivne snage 63 MVA. Transformatori na sekundaru imaju razdvojene sabirnice. T3 napaja elektrolučnu peć i odvode za kompenzaciju i filtriranje 3. i 4. harmonika, dok transformator T1 od značajnijih potrošača napaja dio preostalog pogona korisnika mreže (staru elektrolučna peć i ostalo).

Cilj mjerenja je bio prvenstveno ustanoviti kvalitetu napona na 110 sabirnicama u TS 110/35(33) kV Stanica 1 i dati ocjenu negativnog povratnog djelovanja korisnika mreže na kvalitetu napona, tijekom pogona elektrolučne peći.

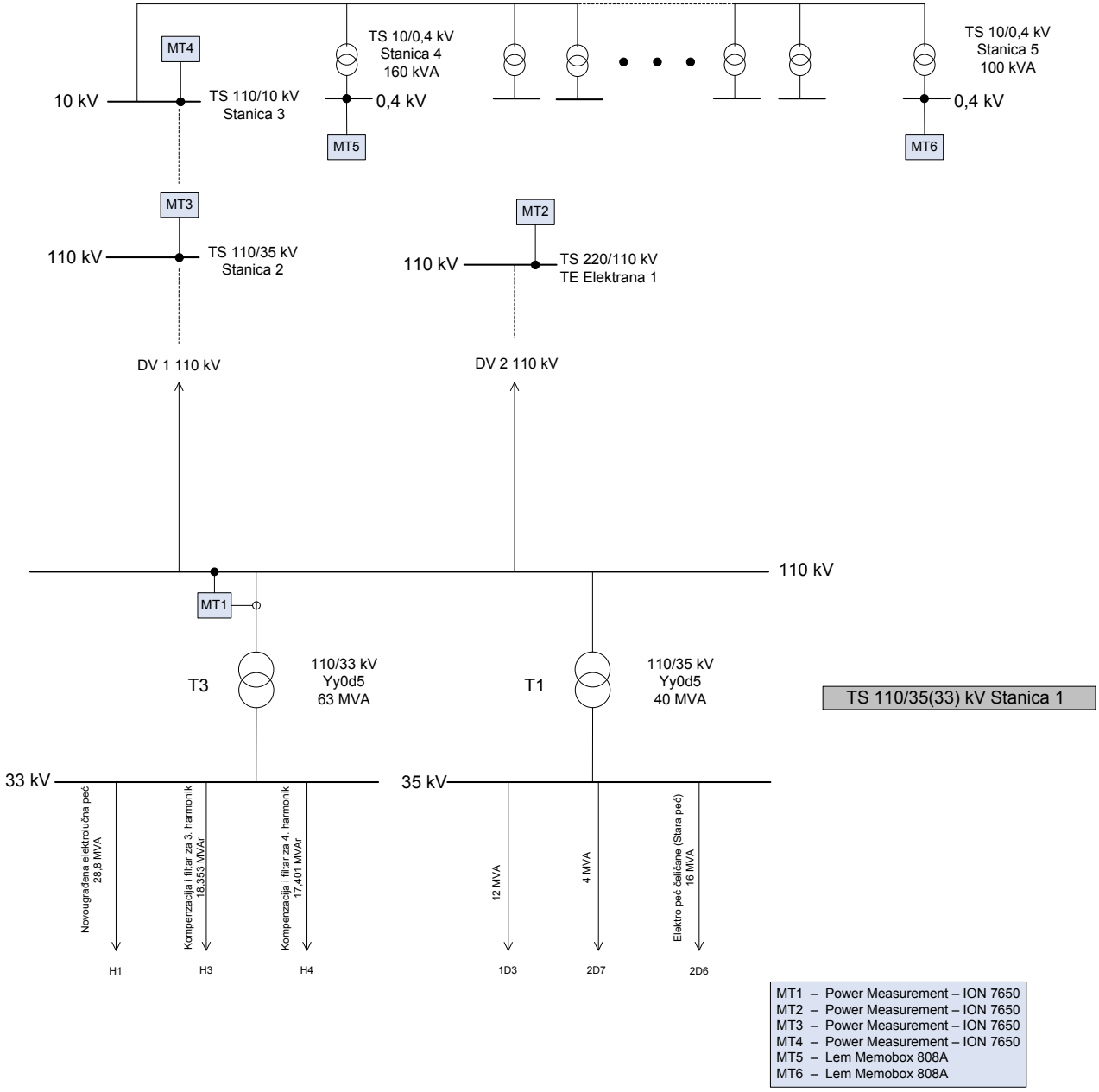
Za mjerenja su rabljeni analizatori kvalitete električne energije Power Measurement ION 7650 i Memobox 808 tvrtke Lem.

Instrument Ion 7650 tvrtke Power Measurement je instrument sa 5 strujnih i 4 naponska ulaza. Instrument mjeri struje i napone, flikere, propade i prekide u napajanju te mjerenje parametara kvalitete napona u skladu s normom EN 50160. Isto tako ima mogućnost snimanja valnih oblika napona i struja.

Instrument Memobox 808 tvrtke Lem je instrument 7-kanalnog tipa s 4 strujna i 3 naponska ulaza. Instrument mjeri iznose struja i napona, tokove aktivnih i jalovih snaga, flikere, propade i prekide u napajanju te mjerenje parametara kvalitete električne energije u skladu s normom EN 50160.

Za potrebe mjerenja opterećenja instrumenti su spajani na način da je smjer pozitivne aktivne snage u smjeru trošila. To znači da je P pozitivno. U modu mjerenja snage mjeri se i fazni kut. Prikaz rezultata je slijedeći: pozitivni fazni kut znači da struja zaostaje za naponom (induktivno opterećenje), a negativan fazni kut znači da struja prethodi naponu (kapacitivno opterećenje).

Mjerenja su obavljena u normalnim pogonskim stanjima u zatečenim stacionarnim opterećenjima. Vrijednosti napona, struje, aktivnih i jalovih snaga za mjernu točku MT1 su dobivene neizravnim mjerenjem preko strujnih i naponskih mjernih transformatora. Vrijednosti napona za mjerne točke MT2, MT3 i MT4 su dobivene neizravnim mjerenjem preko naponskih mjernih transformatora. Vrijednosti napona za mjerne točke MT5 i MT6 su dobivene izravnim direktnim mjerenjem.



Slika 6.1. Prikaz mjernih mjesta na lokaciji korisnika mreže i u okolnoj prijenosnoj elektroenergetskoj mreži

6.2.1 Rezultati mjerenja KN na 110 kV sabirnicama u TS 110/35(33) kV Stanica 1

Mjerenja opterećenja i kvalitete napona su obavljena na lokaciji korisnika mreže na 110 kV sabirnicama u TS 110/35(33) kV Stanica 1 na odvodu transformatora T3 u razdoblju od tjedan dana. Mjerenja kvalitete napona su analizirana u skladu sa tehničkim izvještajima IEC 61000-3-6:2008 (za više harmonike napona), IEC 61000-3-7:2008 (za fliker) i IEC 61000-3-13:2008 (za nesimetričnost napona). Rezultate mjerenja prikazuje tablica 6.1. U navedenoj tablici se nalaze prikazani parametri kvalitete napona, vrijednosti koje su izmjerene za navedeno razdoblje od tjedan dana te planirane razine za 110 kV razinu (VN razinu) prema tehničkim izvještajima (IEC 61000-3-6:2008, IEC 61000-3-7:2008 i IEC 61000-3-13:2008). Mjerni intervali unutar kojih se promatraju pojedini parametri su trajanja deset minuta (tijekom tjedna ukupno 1008 10-minutnih intervala). S obzirom da tehnički izvještaji postavljaju fiksno one vrijednosti kao planirane razine, koje ne smiju biti prekoračene 95% vremena monitoringa, vrijednosti koje su analizirane prema navedenim tehničkim izvještajima i dane u tablici su najveće izmjerene vrijednosti u 95 % vremena monitoringa.

Tablica 6.1. Sažeti prikaz rezultata mjerenja parametara kvalitete napona na lokaciji korisnika mreže na 110 kV sabirnicama u TS 110/35(33) kV Stanica 1- MT1 u razdoblju od tjedan dana

PARAMETAR KVALITETE NAPONA	**PLANIRANE RAZINE PREMA IEC 61000-3-6:2008 IEC 61000-3-7:2008 IEC 61000-3-13:2008**	**IZMJERENA VRIJEDNOST**
Frekvencija napona napajanja (Hz)	*49,50 – 50,50*	49,94 – 50,06
Iznos napona napajanja (%U_n)	*0,90 – 1,10*	L1 – 1,03 – 1,05 L2 – 1,03 – 1,05 L3 – 1,03 – 1,05
Kratkotrajna jakost flikera Pst	≤0,8	L1 – 1,76 L2 – 1,78 L3 – 1,83
Dugotrajna jakost flikera Plt	≤0,6	L1 – 1,71 L2 – 1,66 L3 – 1,71
Nesimetričnost napona (%)	< 1,4	0,42
Ukupno harmoničko izobličenje napona THD U10' (%)	< 3,0%	L1 – 0,61 L2 – 1,02 L3 – 0,90
Drugi naponski harmonik Uh2 RMS10' (% U1)	< 1,4%	L1 – 0,2 L2 – 0,1 L3 – 0,2
Treći naponski harmonik Uh3 RMS10' (% U1)	< 2,0%	L1 – 0,4 L2 – 0,8 L3 – 0,5
Četvrti naponski harmonik Uh4 RMS10' (% U1)	< 0,8%	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,1

PARAMETAR KVALITETE NAPONA	PLANIRANE RAZINE PREMA IEC 61000-3-6:2008 IEC 61000-3-7:2008 IEC 61000-3-13:2008	IZMJERENA VRIJEDNOST
Peti naponski harmonik Uh5 RMS10' (% U1)	< 2,0%	L1 – 0,4 L2 – 0,3 L3 – 0,6
Šesti naponski harmonik Uh6 RMS10' (% U1)	< 0,4%	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Sedmi naponski harmonik Uh7 RMS10' (% U1)	< 2,0%	L1 – 0,2 L2 – 0,2 L3 – 0,2
Osmi naponski harmonik Uh8 RMS10' (% U1)	< 0,4%	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Deveti naponski harmonik Uh9 RMS10' (% U1)	< 1,0%	L1 – 0,0 L2 – 0,2 L3 – 0,1
Deseti naponski harmonik Uh10 RMS10' (% U1)	< 0,35%	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Jedanaesti naponski harmonik Uh11 RMS10' (% U1)	< 1,5%	L1 – 0,1 L2 – 0,3 L3 – 0,3
Dvanaesti naponski harmonik Uh12 RMS10' (% U1)	< 0,3%	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Trinaesti naponski harmonik Uh13 RMS10' (% U1)	< 1,5%	L1 – 0,1 L2 – 0,3 L3 – 0,3
Četrnaesti naponski harmonik Uh14 RMS10' (% U1)	< 0,3%	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Petnaesti naponski harmonik Uh15 RMS10' (% U1)	< 0,3%	L1 – 0,0 L2 – 0,3 L3 – 0,3
Šesnaesti naponski harmonik Uh16 RMS10' (% U1)	< 0,3%	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Sedamnaesti naponski harmonik Uh17 RMS10' (% U1)	< 1,2%	L1 – 0,1 L2 – 0,2 L3 – 0,2
Osamnaesti naponski harmonik Uh18 RMS10' (% U1)	< 0,3%	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Devetnaesti naponski harmonik Uh19 RMS10' (% U1)	< 1,1%	L1 – 0,0 L2 – 0,2 L3 – 0,2
Dvadeseti naponski harmonik Uh20 RMS10' (% U1)	< 0,25%	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i prvi naponski harmonik Uh21 RMS10' (% U1)	< 0,2%	L1 – 0,0 L2 – 0,2 L3 – 0,2
Dvadeset i drugi naponski harmonik Uh22 RMS10' (% U1)	< 0,25%	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0

PARAMETAR KVALITETE NAPONA	PLANIRANE RAZINE PREMA IEC 61000-3-6:2008 IEC 61000-3-7:2008 IEC 61000-3-13:2008	IZMJERENA VRIJEDNOST
Dvadeset i treći naponski harmonik Uh23 RMS10' (% U1)	< 0,9%	L1 – 0,0 L2 – 0,2 L3 – 0,2
Dvadeset i četvrti naponski harmonik Uh24 RMS10' (% U1)	< 0,25%	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i peti naponski harmonik Uh25 RMS10' (% U1)	< 0,8%	L1 – 0,0 L2 – 0,2 L3 – 0,2

Vidljivo je da su sve izmjerene vrijednosti koje prikazuje tablica 6.1., osim kratkotrajne i dugotrajne jakosti flikera ispod preporučenih planiranih razina prema tehničkim izvještajima IEC 61000-3-6:2008 za harmoničko izobličenje napona, IEC 61000-3-7 za fliker i IEC 61000-3-13 za nesimetričnost napona. Visoke vrijednosti flikera su očekivane, obzirom na način rada elektrolučne peći kao trošila. Opterećenje transformatora T3 je za vrijeme mjerenja i rada elektrolučne peći bilo induktivno (faktor snage između 0,5 i 1,0 induktivno). Iznos ukupne radne snage se kretao između 0,0 i 27,9 MW. Iznos ukupne jalove snage se kretao između 25,2 Mvar i -0,2 Mvar.

6.2.2 Rezultati mjerenja KN na 110 kV sabirnicama u TS 220/110 kV TE Elektrana 1

Mjerenja kvalitete napona su obavljena u okolnoj prijenosnoj elektroenergetskoj mreži oko postrojenja korisnika mreže na 110 kV sabirnicama u TS 220/110 kV TE Elektrana 1 u razdoblju od tjedan dana. Mjerenja kvalitete napona su analizirana u skladu sa tehničkim izvještajima IEC 61000-3-6:2008 (za više harmonike napona), IEC 61000-3-7:2008 (za fliker) i IEC 61000-3-13:2008 (za nesimetričnost napona). Rezultate mjerenja prikazuje tablica 6.2. U navedenoj tablici se nalaze prikazani parametri kvalitete napona, vrijednosti koje su izmjerene za navedeno razdoblje od tjedan dana, te planirane razine za 110 kV razinu (VN razinu) prema tehničkim izvještajima (IEC 61000-3-6:2008, IEC 61000-3-7:2008 i IEC 61000-3-13:2008). Mjerni intervali unutar kojih se promatraju pojedini parametri su trajanja deset minuta (tijekom tjedna ukupno 1008 10-minutnih intervala). S obzirom da tehnički izvještaji postavljaju fiksno one vrijednosti kao planirane razine, koje ne smiju biti prekoračene 95% vremena monitoringa, vrijednosti koje su analizirane prema navedenim tehničkim izvještajima i dane u tablici su najveće izmjerene vrijednosti u 95 % vremena monitoringa.

Tablica 6.2. Sažeti prikaz rezultata mjerenja parametara kvalitete napona u okolnoj prijenosnoj elektroenergetskoj mreži oko postrojenja korisnika mreže na 110 kV sabirnicama u TS 220/110 kV TE Elektrana 1 – MT2 u razdoblju od tjedan dana

PARAMETAR KVALITETE NAPONA	**PLANIRANE RAZINE PREMA IEC 61000-3-6:2008 IEC 61000-3-7:2008 IEC 61000-3-13:2008 u 95% vremena**	**IZMJERENA VRIJEDNOST**
Frekvencija napona napajanja (Hz)	*49,50 – 50,50*	49,94 – 50,06
Iznos napona napajanja (%U_n)	*0,90 – 1,10*	L1 – 1,02 – 1,04 L2 – 1,02 – 1,05 L3 – 1,02 – 1,04
Kratkotrajna jakost flikera P_{st}	*≤0,8*	L1 – 1,57 L2 – 1,59 L3 – 1,63
Dugotrajna jakost flikera P_{lt}	*≤0,6*	L1 – 1,53 L2 – 1,55 L3 – 1,53
Nesimetričnost napona (%)	*< 1,4*	0,43
Ukupno harmoničko izobličenje napona THD $U_{10'}$ (%)	*< 3,0%*	L1 – 0,62 L2 – 0,97 L3 – 0,97
Drugi naponski harmonik U_{h2} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,4%*	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Treći naponski harmonik U_{h3} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 2,0%*	L1 – 0,5 L2 – 0,7 L3 – 0,6
Četvrti naponski harmonik U_{h4} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,8%*	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Peti naponski harmonik U_{h5} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 2,0%*	L1 – 0,4 L2 – 0,4 L3 – 0,6
Šesti naponski harmonik U_{h6} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,4%*	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Sedmi naponski harmonik U_{h7} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 2,0%*	L1 – 0,2 L2 – 0,2 L3 – 0,2
Osmi naponski harmonik U_{h8} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,4%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Deveti naponski harmonik U_{h9} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,0%*	L1 – 0,0 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Deseti naponski harmonik U_{h10} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,35%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Jedanaesti naponski harmonik U_{h11} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,5%*	L1 – 0,1 L2 – 0,3 L3 – 0,3
Dvanaesti naponski harmonik U_{h12} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,3%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0

PARAMETAR KVALITETE NAPONA	PLANIRANE RAZINE PREMA IEC 61000-3-6:2008 IEC 61000-3-7:2008 IEC 61000-3-13:2008 u 95% vremena	IZMJERENA VRIJEDNOST
Trinaesti naponski harmonik U_{h13} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,5%*	L1 – 0,1 L2 – 0,3 L3 – 0,3
Četrnaesti naponski harmonik U_{h14} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,3%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Petnaesti naponski harmonik U_{h15} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,3%*	L1 – 0,0 L2 – 0,3 L3 – 0,3
Šesnaesti naponski harmonik U_{h16} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,3%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Sedamnaesti naponski harmonik U_{h17} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,2%*	L1 – 0,1 L2 – 0,2 L3 – 0,2
Osamnaesti naponski harmonik U_{h18} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,3%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Devetnaesti naponski harmonik U_{h19} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,1%*	L1 – 0,0 L2 – 0,2 L3 – 0,2
Dvadeseti naponski harmonik U_{h20} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,25%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i prvi naponski harmonik U_{h21} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,2%*	L1 – 0,0 L2 – 0,2 L3 – 0,2
Dvadeset i drugi naponski harmonik U_{h22} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,25%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i treći naponski harmonik U_{h23} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,9%*	L1 – 0,0 L2 – 0,2 L3 – 0,2
Dvadeset i četvrti naponski harmonik U_{h24} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,25%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i peti naponski harmonik U_{h25} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,8%*	L1 – 0,0 L2 – 0,2 L3 – 0,2

Vidljivo je da su sve izmjerene vrijednosti koje prikazuje tablica 6.2., osim kratkotrajne i dugotrajne jakosti flikera ispod preporučenih planiranih razina prema tehničkim izvještajima IEC 61000-3-6:2008 za harmoničko izobličenje napona, IEC 61000-3-7 za fliker i IEC 61000-3-13 za nesimetričnost napona (Navedene vrijednosti se odnose na maksimalne vrijednosti u 95% vremena).

6.2.3 Rezultati mjerenja KN na 110 kV sabirnicama u TS 110/35 kV Stanica 2

Mjerenja kvalitete napona su obavljena u okolnoj prijenosnoj elektroenergetskoj mreži oko postrojenja korisnika mreže na 110 kV sabirnicama u TS 110/35 kV Stanica 2 u razdoblju od tjedan dana. Mjerenja kvalitete napona su analizirana u skladu sa tehničkim izvještajima IEC 61000-3-6:2008 (za više harmonike napona), IEC 61000-3-7:2008 (za fliker) i IEC 61000-3-13:2008 (za nesimetričnost napona). Rezultate mjerenja prikazuje tablica 6.3. U navedenoj tablici se nalaze prikazani parametri kvalitete napona, vrijednosti koje su izmjerene za navedeno razdoblje od tjedan dana, te planirane razine za 110 kV razinu (VN razinu) prema tehničkim izvještajima (IEC 61000-3-6:2008, IEC 61000-3-7:2008 i IEC 61000-3-13:2008). Mjerni intervali unutar kojih se promatraju pojedini parametri su trajanja deset minuta (tijekom tjedna ukupno 1008 10-minutnih intervala). S obzirom da tehnički izvještaji postavljaju fiksno one vrijednosti kao planirane razine, koje ne smiju biti prekoračene 95% vremena monitoringa, vrijednosti koje su analizirane prema navedenim tehničkim izvještajima i dane u tablici su najveće izmjerene vrijednosti u 95 % vremena monitoringa.

Tablica 6.3. Sažeti prikaz rezultata mjerenja parametara kvalitete napona u okolnoj prijenosnoj elektroenergetskoj mreži oko TS Stanica 1 na 110 kV sabirnicama u TS Stanica 2 – MT3 u razdoblju od tjedan dana

PARAMETAR KVALITETE NAPONA	**PLANIRANE RAZINE PREMA IEC 61000-3-6:2008 IEC 61000-3-7:2008 IEC 61000-3-13:2008 u 95% vremena**	**IZMJERENA VRIJEDNOST**
Frekvencija napona napajanja (Hz)	*49,50 – 50,50*	49,94 – 50,06
Iznos napona napajanja (%U_n)	*0,90 – 1,10*	L1 – 1,03 – 1,05 L2 – 1,03 – 1,05 L3 – 1,02 – 1,05
Kratkotrajna jakost flikera P_{st}	*≤0,8*	L1 – 1,50 L2 – 1,55 L3 – 1,58
Dugotrajna jakost flikera P_{lt}	*≤0,6*	L1 – 1,45 L2 – 1,54 L3 – 1,48
Nesimetričnost napona (%)	*< 1,4*	0,42
Ukupno harmoničko izobličenje napona THD $U_{10'}$ (%)	*< 3,0%*	L1 – 0,63 L2 – 1,08 L3 – 0,92
Drugi naponski harmonik U_{h2} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,4%*	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Treći naponski harmonik U_{h3} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 2,0%*	L1 – 0,5 L2 – 0,9 L3 – 0,5

PARAMETAR KVALITETE NAPONA	PLANIRANE RAZINE PREMA IEC 61000-3-6:2008 IEC 61000-3-7:2008 IEC 61000-3-13:2008 u 95% vremena	IZMJERENA VRIJEDNOST
Četvrti naponski harmonik U_{h4} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,8%*	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Peti naponski harmonik U_{h5} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 2,0%*	L1 – 0,5 L2 – 0,4 L3 – 0,6
Šesti naponski harmonik U_{h6} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,4%*	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Sedmi naponski harmonik U_{h7} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 2,0%*	L1 – 0,2 L2 – 0,2 L3 – 0,2
Osmi naponski harmonik U_{h8} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,4%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Deveti naponski harmonik U_{h9} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,0%*	L1 – 0,1 L2 – 0,2 L3 – 0,2
Deseti naponski harmonik U_{h10} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,35%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Jedanaesti naponski harmonik U_{h11} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,5%*	L1 – 0,1 L2 – 0,3 L3 – 0,3
Dvanaesti naponski harmonik U_{h12} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,3%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Trinaesti naponski harmonik U_{h13} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,5%*	L1 – 0,1 L2 – 0,3 L3 – 0,3
Četrnaesti naponski harmonik U_{h14} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,3%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Petnaesti naponski harmonik U_{h15} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,3%*	L1 – 0,0 L2 – 0,3 L3 – 0,3
Šesnaesti naponski harmonik U_{h16} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,3%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Sedamnaesti naponski harmonik U_{h17} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,2%*	L1 – 0,1 L2 – 0,2 L3 – 0,2
Osamnaesti naponski harmonik U_{h18} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,3%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Devetnaesti naponski harmonik U_{h19} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,1%*	L1 – 0,0 L2 – 0,2 L3 – 0,2
Dvadeseti naponski harmonik U_{h20} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,25%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0

PARAMETAR KVALITETE NAPONA	PLANIRANE RAZINE PREMA IEC 61000-3-6:2008 IEC 61000-3-7:2008 IEC 61000-3-13:2008 u 95% vremena	IZMJERENA VRIJEDNOST
Dvadeset i prvi naponski harmonik U_{h21} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,2%*	L1 – 0,0 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Dvadeset i drugi naponski harmonik U_{h22} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,25%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i treći naponski harmonik U_{h23} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,9%*	L1 – 0,0 L2 – 0,2 L3 – 0,2
Dvadeset i četvrti naponski harmonik U_{h24} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,25%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i peti naponski harmonik U_{h25} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,8%*	L1 – 0,0 L2 – 0,2 L3 – 0,2

Iz podataka koje prikazuje tablica 6.3. je vidljivo da su sve izmjerene vrijednosti, osim kratkotrajne i dugotrajne jakosti flikera ispod preporučenih planiranih razina prema tehničkim izvještajima IEC 61000-3-6:2008 za harmoničko izobličenje napona, IEC 61000-3-7 za fliker i IEC 61000-3-13 za nesimetričnost napona (Navedene vrijednosti se odnose na maksimalne vrijednosti u 95% vremena).

6.2.4 Rezultati mjerenja KN na 10 kV sabirnicama u TS 110/10 kV Stanica 3

Mjerenja kvalitete napona su obavljena u okolnoj distribucijskoj elektroenergetskoj mreži oko postrojenja korisnika mreže na 10 kV sabirnicama u TS 110/10 kV Stanica 3 u razdoblju od tjedan dana. Mjerenja kvalitete napona su analizirana u skladu sa normom HRN EN 50160:2008. Rezultate mjerenja daje tablica 6.4. U navedenoj tablici se nalaze prikazani parametri kvalitete napona, vrijednosti koje su izmjerene za navedeno razdoblje od tjedan dana, te granične vrijednosti prema normi HRN EN 50160:2008. Mjerni intervali unutar kojih se promatraju pojedini parametri su trajanja deset minuta (tijekom tjedna ukupno 1008 10-minutnih intervala), osim za frekvenciju koja se promatra u vremenskim isječcima od deset sekundi i napone signaliziranja koji se promatraju u vremenskim isječcima od 3 sekunde. S obzirom da norma postavlja fiksno one vrijednosti kao granične, koje ne smiju biti prekoračene 95% vremena monitoringa (za frekvenciju je to 99,5% vremena, a za napone signaliziranja 99% vremena), vrijednosti koje su dane u tablici su najveće izmjerene vrijednosti u 95 % vremena monitoringa (odnosno 99,5% za frekvenciju i 99% za napone signaliziranja).

Za SN mreže iznos opskrbnog napona je određen deklariranim naponom U_c i iznosi 10 kV.

Tablica 6.4. Sažeti prikaz rezultata mjerenja parametara kvalitete napona u okolnoj distribucijskoj elektroenergetskoj mreži oko postrojenja korisnika mreže na 10 kV sabirnicama u TS 110/10 kV Stanica 3 – MT4 u razdoblju od tjedan dana

PARAMETAR KVALITETE NAPONA	**GRANIČNA VRIJEDNOST PREMA HRN EN 50160:2008 u 95%/99%/99,5% vremena**	**IZMJERENA VRIJEDNOST**
Frekvencija napona napajanja (Hz)	*49,50 – 50,50*	49,94 – 50,06
Iznos napona napajanja (%U_n)	*0,90 – 1,10*	L1 – 1,05 – 1,06 L2 – 1,06 – 1,07 L3 – 1,05 – 1,06
Kratkotrajna jakost flikera P_{st}	-	L1 – 1,32 L2 – 1,35 L3 – 1,38
Dugotrajna jakost flikera P_{lt}	*≤1*	L1 – 1,28 L2 – 1,28 L3 – 1,29
Nesimetričnost napona (%)	*< 2%* *Iznimno < 3%*	0,45
Ukupno harmoničko izobličenje napona THD $U_{10'}$ (%)	*< 8,0%*	L1 – 2,50 L2 – 2,52 L3 – 2,79
Drugi naponski harmonik U_{h2} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 2,0%*	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Treći naponski harmonik U_{h3} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 5,0%*	L1 – 0,6 L2 – 1,0 L3 – 0,6
Četvrti naponski harmonik U_{h4} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,0%*	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Peti naponski harmonik U_{h5} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 6,0%*	L1 – 2,4 L2 – 2,3 L3 – 2,7
Šesti naponski harmonik U_{h6} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Sedmi naponski harmonik U_{h7} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 5,0%*	L1 – 0,7 L2 – 0,7 L3 – 0,8
Osmi naponski harmonik U_{h8} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Deveti naponski harmonik U_{h9} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,5%*	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Deseti naponski harmonik U_{h10} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0

PARAMETAR KVALITETE NAPONA	GRANIČNA VRIJEDNOST PREMA HRN EN 50160:2008 u 95%/99%/99,5% vremena	IZMJERENA VRIJEDNOST
Jedanaesti naponski harmonik U_{h11} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 3,5%*	L1 – 0,1 L2 – 0,2 L3 – 0,1
Dvanaesti naponski harmonik U_{h12} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Trinaesti naponski harmonik U_{h13} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 3,0%*	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,2
Četrnaesti naponski harmonik U_{h14} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Petnaesti naponski harmonik U_{h15} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Šesnaesti naponski harmonik U_{h16} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Sedamnaesti naponski harmonik U_{h17} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 2,0%*	L1 – 0,0 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Osamnaesti naponski harmonik U_{h18} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Devetnaesti naponski harmonik U_{h19} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeseti naponski harmonik U_{h20} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i prvi naponski harmonik U_{h21} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i drugi naponski harmonik U_{h22} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i treći naponski harmonik U_{h23} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i četvrti naponski harmonik U_{h24} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i peti naponski harmonik U_{h25} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Signalni napon $MTU_{3''}$ 283 Hz (%U_n)	*< 9%*	Nije mjereno

Iz navedene tablice je vidljivo da su sve izmjerene vrijednosti, osim kratkotrajne i dugotrajne jakosti flikera ispod graničnih razina danih prema HRN EN 50160:2008.

6.2.5 Rezultati mjerenja KN na 0,4 kV sabirnicama u TS 10/0,4 kV Stanica 4

Mjerenja kvalitete napona su obavljena u okolnoj distribucijskoj elektroenergetskoj mreži oko postrojenja korisnika mreže na 0,4 kV sabirnicama u TS 10/0,4 kV Stanica 4 (10 kV izvod iz TS 110/10 kV Stanica 3 Izvod 1 – početak izvoda) u razdoblju tjedan dana. Mjerenja kvalitete napona su analizirana u skladu sa normom HRN EN 50160:2008. Rezultate mjerenja daje tablica 6.5. U navedenoj tablici se nalaze prikazani parametri kvalitete napona, vrijednosti koje su izmjerene za navedeno razdoblje od tjedan dana, te granične vrijednosti prema normi HRN EN 50160:2008. Mjerni intervali unutar kojih se promatraju pojedini parametri su trajanja deset minuta (tijekom tjedna ukupno 1008 10-minutnih intervala), osim za frekvenciju koja se promatra u vremenskim isječcima od deset sekundi i napone signaliziranja koji se promatraju u vremenskim isječcima od 3 sekunde. S obzirom da norma postavlja fiksno one vrijednosti kao granične, koje ne smiju biti prekoračene 95% vremena monitoringa (za frekvenciju je to 99,5% vremena, a za napone signaliziranja 99% vremena), vrijednosti koje su dane u tablici su najveće izmjerene vrijednosti u 95 % vremena monitoringa (odnosno 99,5% za frekvenciju i 99% za napone signaliziranja).

Za NN mreže iznos opskrbnog napona je određen nazivnim naponom U_n i iznosi 0,4 kV.

Tablica 6.5. Sažeti prikaz rezultata mjerenja parametara kvalitete napona u okolnoj distribucijskoj elektroenergetskoj mreži oko postrojenja korisnika mreže na 0,4 kV sabirnicama u TS 10/0,4 kV Stanica 4 – MT5 u razdoblju od tjedan dana

PARAMETAR KVALITETE NAPONA	**GRANIČNA VRIJEDNOST PREMA HRN EN 50160:2008 u 95%/99%/99,5% vremena**	**IZMJERENA VRIJEDNOST**
Frekvencija napona napajanja (Hz)	*49,50 – 50,50*	49,94 – 50,06
Iznos napona napajanja (%U_n)	*0,90 – 1,10*	L1 – 1,03 – 1,05 L2 – 1,03 – 1,05 L3 – 1,03 – 1,05
Kratkotrajna jakost flikera P_{st}	-	L1 – 1,27 L2 – 1,29 L3 – 1,28
Dugotrajna jakost flikera P_{lt}	*≤1*	L1 – 1,21 L2 – 1,24 L3 – 1,18
Nesimetričnost napona (%)	*< 2%* *Iznimno < 3%*	0,38
Ukupno harmoničko izobličenje napona THD $U_{10'}$ (%)	*< 8,0%*	L1 – 3,05 L2 – 2,78 L3 – 2,98

PARAMETAR KVALITETE NAPONA	GRANIČNA VRIJEDNOST PREMA HRN EN 50160:2008 u 95%/99%/99,5% vremena	IZMJERENA VRIJEDNOST
Drugi naponski harmonik U_{h2} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 2,0%*	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Treći naponski harmonik U_{h3} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 5,0%*	L1 – 0,3 L2 – 0,9 L3 – 0,9
Četvrti naponski harmonik U_{h4} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,0%*	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Peti naponski harmonik U_{h5} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 6,0%*	L1 – 3,0 L2 – 2,6 L3 – 2,8
Šesti naponski harmonik U_{h6} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Sedmi naponski harmonik U_{h7} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 5,0%*	L1 – 0,9 L2 – 0,8 L3 – 1,0
Osmi naponski harmonik U_{h8} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Deveti naponski harmonik U_{h9} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,1
Deseti naponski harmonik U_{h10} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Jedanaesti naponski harmonik U_{h11} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 3,5%*	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,2
Dvanaesti naponski harmonik U_{h12} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Trinaesti naponski harmonik U_{h13} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 3,0%*	L1 – 0,0 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Četrnaesti naponski harmonik U_{h14} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Petnaesti naponski harmonik U_{h15} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Šesnaesti naponski harmonik U_{h16} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Sedamnaesti naponski harmonik U_{h17} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 2,0%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Osamnaesti naponski harmonik U_{h18} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0

PARAMETAR KVALITETE NAPONA	GRANIČNA VRIJEDNOST PREMA HRN EN 50160:2008 u 95%/99%/99,5% vremena	IZMJERENA VRIJEDNOST
Devetnaesti naponski harmonik U_{h19} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeseti naponski harmonik U_{h20} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i prvi naponski harmonik U_{h21} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i drugi naponski harmonik U_{h22} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i treći naponski harmonik U_{h23} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i četvrti naponski harmonik U_{h24} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i peti naponski harmonik U_{h25} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Signalni napon $MTU_{3''}$ 283 Hz (%U_n)	*< 9%*	Nije mjereno

Iz navedene tablice je vidljivo da su sve izmjerene vrijednosti, osim kratkotrajne i dugotrajne jakosti flikera ispod graničnih razina danih prema HRN EN 50160:2008.

6.2.6 Rezultati mjerenja KN na 0,4 kV sabirnicama u TS 10/0,4 kV Stanica 5

Mjerenja kvalitete napona su obavljena u okolnoj distribucijskoj elektroenergetskoj mreži oko postrojenja korisnika mreže na 0,4 kV sabirnicama u TS 10/0,4 kV Stanica 5 (10 kV izvod iz TS 110/10 kV Stanica 3 Izvod 1 – kraj izvoda) u razdoblju od tjedan dana. Mjerenja kvalitete napona su analizirana u skladu sa normom HRN EN 50160:2008. Rezultate mjerenja daje tablica 6.6. U navedenoj tablici se nalaze prikazani parametri kvalitete napona, vrijednosti koje su izmjerene za navedeno razdoblje od tjedan dana, te granične vrijednosti prema normi HRN EN 50160:2008. Mjerni intervali unutar kojih se promatraju pojedini parametri su trajanja deset minuta (tijekom tjedna ukupno 1008 10-minutnih intervala), osim za frekvenciju koja se promatra u vremenskim isječcima od deset sekundi i napone signaliziranja koji se promatraju u vremenskim isječcima od 3 sekunde. S obzirom da norma postavlja fiksno one vrijednosti kao granične, koje ne smiju biti prekoračene 95% vremena monitoringa (za frekvenciju je to 99,5% vremena, a za napone signaliziranja 99% vremena), vrijednosti koje su dane u tablici su najveće

izmjerene vrijednosti u 95 % vremena monitoringa (odnosno 99,5% za frekvenciju i 99% za napone signaliziranja).

Za NN mreže iznos opskrbnog napona je određen nazivnim naponom U_n i iznosi 0,4 kV.

Tablica 6.6. Sažeti prikaz rezultata mjerenja parametara kvalitete napona u okolnoj distribucijskoj elektroenergetskoj mreži oko postrojenja korisnika mreže na 0,4 kV sabirnicama u TS 10/0,4 kV Stanica 5 – MT6 u razdoblju od tjedan dana

PARAMETAR KVALITETE NAPONA	**GRANIČNA VRIJEDNOST PREMA HRN EN 50160:2008 u 95%/99%/99,5% vremena**	**IZMJERENA VRIJEDNOST**
Frekvencija napona napajanja (Hz)	*49,50 – 50,50*	49,94 – 50,06
Iznos napona napajanja (%U_n)	*0,90 – 1,10*	L1 – 1,01 – 1,05 L2 – 1,02 – 1,05 L3 – 1,01 – 1,05
Kratkotrajna jakost flikera P_{st}	-	L1 – 1,30 L2 – 1,31 L3 – 1,26
Dugotrajna jakost flikera P_{lt}	*≤1*	L1 – 1,19 L2 – 1,24 L3 – 1,15
Nesimetričnost napona (%)	*< 2%* *Iznimno < 3%*	0,48
Ukupno harmoničko izobličenje napona THD $U_{10'}$ (%)	*< 8,0%*	L1 – 3,81 L2 – 3,36 L3 – 3,74
Drugi naponski harmonik U_{h2} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 2,0%*	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Treći naponski harmonik U_{h3} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 5,0%*	L1 – 0,3 L2 – 1,0 L3 – 1,0
Četvrti naponski harmonik U_{h4} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,0%*	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Peti naponski harmonik U_{h5} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 6,0%*	L1 – 3,5 L2 – 3,0 L3 – 3,4
Šesti naponski harmonik U_{h6} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,1 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Sedmi naponski harmonik U_{h7} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 5,0%*	L1 – 1,8 L2 – 1,6 L3 – 1,8
Osmi naponski harmonik U_{h8} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Deveti naponski harmonik U_{h9} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,1 L3 – 0,1
Deseti naponski harmonik U_{h10} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0

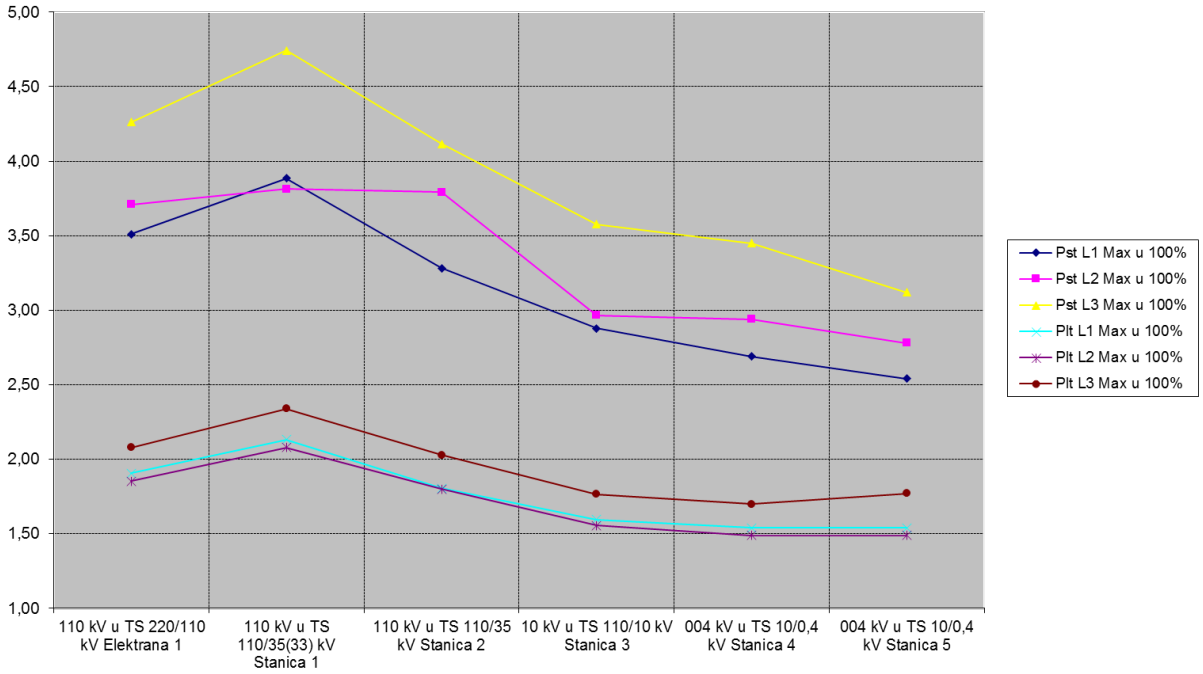
PARAMETAR KVALITETE NAPONA	GRANIČNA VRIJEDNOST PREMA HRN EN 50160:2008 u 95%/99%/99,5% vremena	IZMJERENA VRIJEDNOST
Jedanaesti naponski harmonik U_{h11} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 3,5%*	L1 – 0,3 L2 – 0,3 L3 – 0,3
Dvanaesti naponski harmonik U_{h12} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Trinaesti naponski harmonik U_{h13} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 3,0%*	L1 – 0,2 L2 – 0,2 L3 – 0,2
Četrnaesti naponski harmonik U_{h14} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Petnaesti naponski harmonik U_{h15} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Šesnaesti naponski harmonik U_{h16} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Sedamnaesti naponski harmonik U_{h17} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 2,0%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Osamnaesti naponski harmonik U_{h18} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Devetnaesti naponski harmonik U_{h19} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeseti naponski harmonik U_{h20} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i prvi naponski harmonik U_{h21} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i drugi naponski harmonik U_{h22} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i treći naponski harmonik U_{h23} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i četvrti naponski harmonik U_{h24} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 0,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Dvadeset i peti naponski harmonik U_{h25} $RMS_{10'}$ (% U_1)	*< 1,5%*	L1 – 0,0 L2 – 0,0 L3 – 0,0
Signalni napon $MTU_{3''}$ 283 Hz (%U_n)	*< 9%*	Nije mjereno

Iz navedene tablice vidljivo je da su sve izmjerene vrijednosti, osim kratkotrajne i dugotrajne jakosti flikera ispod graničnih razina danih prema HRN EN 50160:2008.

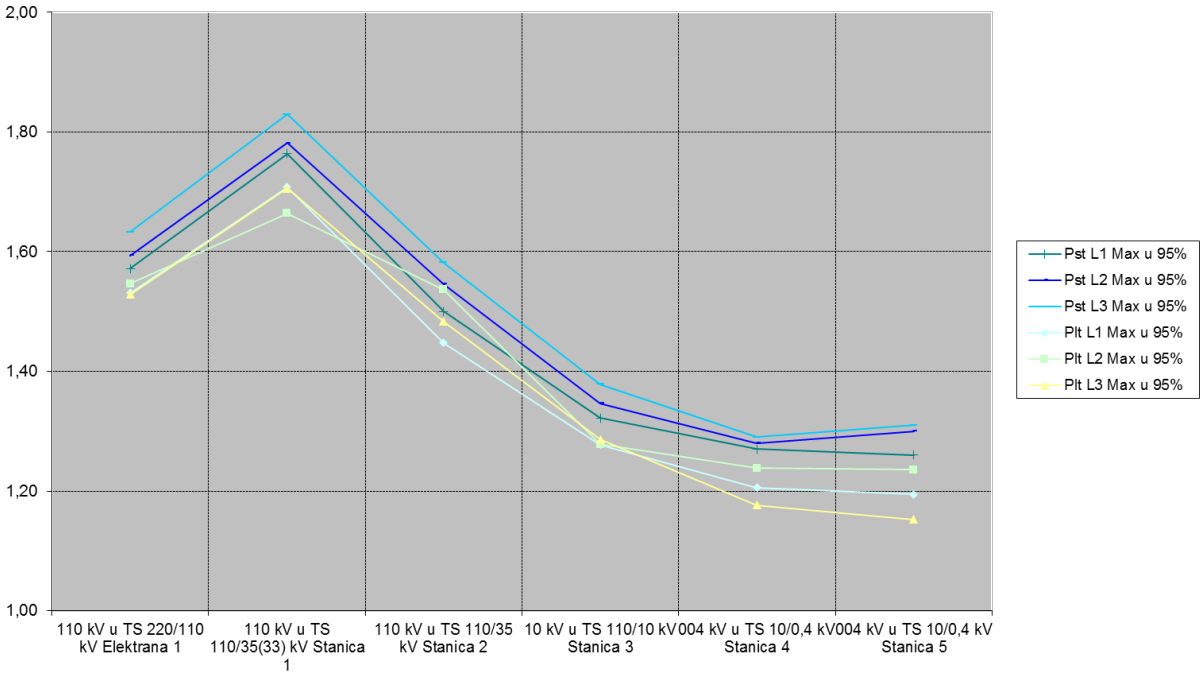
6.2.7 Usporedba rezultata mjerenja flikera u više mjernih točaka

Na lokaciji postrojenja korisnika mreže i u okolnoj prijenosnoj i distribucijskoj elektroenergetskoj mreži, obavljena su mjerenja u ukupno 6 mjernih točaka na lokacijama opisanim u poglavlju 6.2.

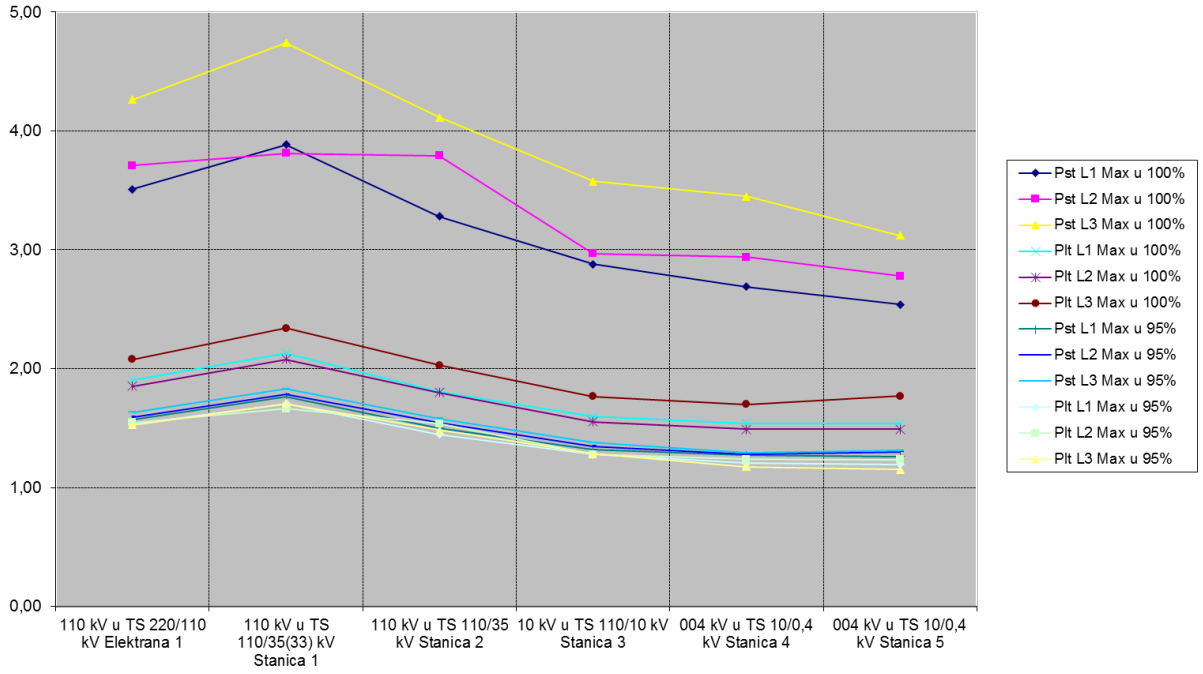
S obzirom da su izmjerene vrijednosti flikera u svim točkama vrlo visoke i prelaze preporučene planirane razine prema međunarodnom tehničkom izvještaju IEC 61000-3-7 (MT1, MT2 i MT3) i granične vrijednosti prema normi HRN EN 50160:2008 (MT4, MT5 i MT6), napravljena je usporedba vrijednosti flikera po mjernim točkama, da bi se ustanovilo kretanje, odnosno prigušenje flikera kroz elektroenergetsku mrežu. Usporedba vrijednosti flikera po mjernim točkama prikazuju slika 6.2. (vrijednosti u 100% vremena), slika 6.3. (vrijednosti u 95% vremena) i slika 6.4. (vrijednosti u 95% i 100% vremena). Dane su vrijednosti kratkotrajne i dugotrajne vrijednosti flikera po fazama za svaku mjernoj točku, u 100% vremena i 95% vremena. Mjerne točke su prikazane po "električkoj" udaljenosti od izvora flikera (elektrolučna peć u industrijskoj mreži postrojenja korisnika mreže). Gledajući od čvorišta mreže TS 110/10 kV Stanica 1, koje je 110 kV vodovima vezano na TS 220/110 kV TE Elektrana 1 i TS 110/35 kV Stanica 2, rezultati mjerenja u TS 220/110 kV TE Elektrana 1 se nalaze u jednom kraku mreže, i stoga su prikazani lijevo od TS 110/10 kV Stanica 1, dok su rezultati mjerenja u svim ostalim mjernim točkama (koje idu u "dubinu" mreže) prikazani desno od TS 110/10 kV Stanica 1. Električki gledano, TS 220/110 kV TE Elektrana 1 je bliže TS 110/35(33) kV Stanica 1 od TS 110/35 kV Stanica 2 prema duljini 110 kV nadzemnog voda, te su rezultati mjerenja flikera veći u TS 220/110 kV TE Elektrana 1, od TS 110/35 kV Stanica 2.



Slika 6.2. Usporedba vrijednosti flikera po mjernim točkama, P_{st} i P_{lt} u 100% vremena po fazama i po mjernim točkama



Slika 6.3. Usporedba vrijednosti flikera po mjernim točkama, P_{st} i P_{lt} u 95% vremena po fazama i po mjernim točkama



Slika 6.4. Usporedba vrijednosti flikera po mjernim točkama, P_{st} i P_{lt} u 100% i 95% vremena po fazama i po mjernim točkama

Ovako visoke vrijednosti flikera koje su zabilježene tijekom razdoblja mjerenja na priključnom mjestu elektrolučne peći su očekivane, obzirom da se radi o korisniku mreže koji unutar svoje industrijske mreže ima priključenu elektrolučnu peć relativno velike snage. Elektrolučna peć je vrlo nepredvidivo trošilo koje uzrokuje poremećaje u elektroenergetskom sustavu kao što su brza kolebanja napona (flikere) frekvencije 0,5 do 30 Hz. Slika 6.4. prikazuje blago padanje vrijednosti flikera kako se mjerna točka udaljava od izvora flikera (TS 110/10 kV Stanica 1), po dubini mreže i po naponskim razinama, što je posebno vidljivo na vrijednostima kratkotrajne i dugotrajne vrijednosti flikera u 95% vremena (slika 6.3.), kad su eliminirane najveće vrijednosti u 5% vremena koje po iznosu mogu odstupati zbog događaja u mreži (propadi napona i slično).

Isto tako, iz gore navedenih rezultata mjerenja se mogu dobiti koeficijenti prijenosa flikera između različitih naponskih razina. Koeficijenti prijenosa kratkotrajnog flikera se mogu računati kao $T_{Pst}AB = P_{st}(B)/P_{st}(A)$, obzirom da se dominantni izvori flikera nalaze priključeni u industrijskoj mreži postrojenja korisnika mreže, i uslijed rada elektrolučne peći se fliker širi po okolnoj elektroenergetskoj mreži preko 110 kV sabirnica u TS 110/35(33) kV Stanica 1. Faktor prijenosa flikera je mjerodavan za prigušenje flikera kroz mrežu. Tablica 6.7. prikazuje koeficijente prijenosa kratkotrajnog flikera $T_{Pst}AB$ po fazama između različitih naponskih razina. Za proračun su uzete u obzir maksimalne izmjerene vrijednosti u 95% vremena.

Prilikom proračuna, za 110 kV razinu je razmatrana TS 110/35 kV Stanica 2, za 10 kV razinu TS 110/10 kV Stanica 3, i za 0,4 kV razinu TS 10/0,4 kV Stanica 4 i TS 10/0,4 kV Stanica 5.

Tablica 6.7. Koeficijenti prijenosa kratkotrajnog flikera T_{PstAB} po fazama između različitih naponskih razina

KOEFICIJENT PRIJENOSA KRATKOTRAJNOG FLIKERA T_{PstAB} IZMEĐU RAZLIČITIH NAPONSKIH RAZINA	**IZNOS**	**NAPONSKE RAZINE**
$T_{Pst95\%}$Stanica 2-Stanica 3 $95\%_{\text{Stanica 2-Stanica 3}} = \frac{95\%_{\text{Stanica 3}}}{95\%_{\text{Stanica 2}}}$	L1 – 0,88 L2 – 0,87 L3 – 0,87	**110 kV – 10 kV**
$T_{Pst95\%}$ Stanica 3-Stanica 4 $95\%_{\text{Stanica 3-Stanica 4}} = \frac{95\%_{\text{Stanica 4}}}{95\%_{\text{Stanica 3}}}$	L1 – 0,96 L2 – 0,96 L3 – 0,93	**10 kV – 0,4 kV (početak izvoda)**
$T_{Pst95\%}$ Stanica 3-Stanica 5 $95\%_{\text{Stanica 3-Stanica 5}} = \frac{95\%_{\text{Stanica 5}}}{95\%_{\text{Stanica 3}}}$	L1 – 0,98 L2 – 0,97 L3 – 0,92	**10 kV – 0,4 kV (kraj izvoda)**
$T_{Pst95\%}$ Stanica 2-Stanica 4 $95\%_{\text{Stanica 2-Stanica 4}} = \frac{95\%_{\text{Stanica 4}}}{95\%_{\text{Stanica 2}}}$	L1 – 0,85 L2 – 0,84 L3 – 0,81	**110 kV – 0,4 kV (početak izvoda)**
$T_{Pst95\%}$ Stanica 2-Stanica 5 $95\%_{\text{Stanica 2-Stanica 5}} = \frac{95\%_{\text{Stanica 5}}}{95\%_{\text{Stanica 2}}}$	L1 – 0,87 L2 – 0,84 L3 – 0,80	**110 kV – 0,4 kV (kraj izvoda)**

Iz tablice se može zaključiti kako prigušenje flikera kroz mrežu iznosi maksimalno 20% i to između 110 kV sabirnica u TS 110/35 kV Stanica 2 i krajnje 0,4 kV TS 10/0,4 kV Stanica 5. Prigušenje flikera između 110 kV i 10 kV naponske razine iznosi maksimalno 13%, a između 10 kV i 0,4 kV naponske razine maksimalno 8%.

6.3 Zaključno o mjerenjima

Na lokaciji transformatora T3 na koji je priključena elektrolučna peć je zabilježena maksimalna radna snaga u iznosu od 27,9 MW i maksimalna jalova snaga od 25,2 Mvar induktivno (10-minutni prosjeci RMS vrijednosti) iz čega se može zaključiti da je elektrolučna peć za vrijeme mjerenja postigla gotovo maksimalnu radnu snagu.

Na temelju izmjerenih vrijednosti parametara kvalitete napona, za vrijeme promatranog intervala mjerenja od sedam dana, može se zaključiti slijedeće:

1) Iznosi napona na oba mjesta priključka korisnika mreže (odvod transformator T1 i odvod transformator T3) u kvazistacionarnom stanju stanju (10-minutni prosjeci RMS vrijednosti) se kreću između 1,03 U_n i 1,05 U_n.
2) Iznosi mrežne frekvencije na oba mjesta priključka korisnika mreže se kreću između 49,94 i 50,06 Hz.
3) Na oba priključna mjesta korisnika mreže iznosi kratkotrajne jakosti flikera P_{st} dosežu vrijednost od 1,83, a iznosi dugotrajne jakosti flikera P_{lt} dosežu vrijednosti od 1,71, te premašuju planirane razine prema IEC 61000-3-7:2008 za fliker (P_{st} = 0,8 i P_{lt} = 0,6) – navedene vrijednosti su vrijednosti u 95% vremena. Uslijed rada elektrolučne peći dolazi do velikih i naglih promjena opterećenja čije su posljedice visoke vrijednosti jakosti kratkotrajnih i dugotrajnih flikera na 110 kV razini. Iznosi kratkotrajne jakosti flikera P_{st}, maksimalne vrijednosti u 95% vremena u okolnoj 110 kV prijenosnoj mreži dosežu vrijednosti od: 1,63 u TS TE Elektrana 1, 1,58 u TS Stanica 2, a iznosi dugotrajne jakosti flikera P_{lt}, maksimalne vrijednosti u 95% vremena dosežu vrijednosti od: 1,55 u TE Elektrana 1 i 1,54 u TS Stanica 2. Iznosi kratkotrajne jakosti flikera P_{st}, maksimalne vrijednosti u 95% vremena u okolnoj distribucijskoj mreži dosežu vrijednosti od: 1,38 na 10 kV u TS Stanica 3, 1,29 na 0,4 kV u TS Stanica 4 i 1,31 na 0,4 kV u TS Stanica 5, a iznosi dugotrajne jakosti flikera P_{lt}, maksimalne vrijednosti u 95% vremena dosežu vrijednosti od: 1,29 na 10 kV u TS Stanica 3, 1,24 na 0,4 kV u TS Stanica 4, te 1,24 na 0,4 kV u TS Stanica 5. Rad elektrolučne peći uzrokuje povišenje iznosa flikera iznad planiranih i/ili propisanih granica prema tehničkim izvještajima i normama u široj okolini točke priključenja (u krugu većem i od 50 km).
4) Iznosi ukupnog harmonijskog izobličenja napona *ThdU* na oba priključna mjesta korisnika mreže dosežu vrijednost od 1,02 % (za 95 % vremena promatranja). Rad nove elektrolučne peći nema značajan utjecaj na povećanje iznosa ukupnog harmonijskog izobličenja napona na 110 kV razini.
5) Iznosi nesimetričnosti napona na oba priključna mjesta korisnika mreže dosežu vrijednost od 0,42 % (za 95 % vremena promatranja).

Rad elektrolučne peći uzrokuje emisiju vrlo visokih iznosa flikera na 110 kV razini. Ova se konduktivna smetnja širi okolnom prijenosom mrežom, te u krugu većem od 50 km uzrokuje prekoračenje planiranih i/ili propisanih granica prema tehničkim izvještajima i normama za jakost kratkotrajnih i dugotrajnih flikera. Vrijednosti flikera padaju kako se mjerna točka udaljava od izvora flikera (TS 110/10 kV Stanica 1), kako po dubini mreže, tako i po naponskim razinama, što je posebno vidljivo na vrijednostima kratkotrajne i dugotrajne vrijednosti flikera

u 95% vremena, kad su eliminirane najveće vrijednosti u 5% vremena koje po iznosu mogu odstupati zbog događaja u mreži (propadi napona i slično). Preko izračunatih koeficijenata prijenosa kratkotrajnog flikera po naponskim razinama, može se dobiti jasnija slika o prigušenju flikera kroz mrežu. Za proračun koeficijenata prijenosa kratkotrajnog flikera *TPstAB* između različitih naponskih razina u obzir su uzete maksimalne izmjerene vrijednosti kratkotrajnog flikera P_{st} u 95% vremena. Prigušenje flikera kroz mrežu iznosi maksimalno 20% i to između 110 kV sabirnica u TS 110/35 kV Stanica 2 i krajnje 0,4 kV TS 10/0,4 kV Stanica 5. Prigušenje flikera između 110 kV i 10 kV naponske razine iznosi maksimalno 13%, a između 10 kV i 0,4 kV naponske razine maksimalno 8%. Iz navedenih rezultata se može zaključiti kako širenje flikera kroz mrežu ima malo prigušenje i problem smanjenja flikera je učinkovitije rješavati na mjestu priključenja elektrolučne peći kao trošila.

7. Modeliranje i verifikacija metode širenja flikera u elektroenergetskoj mreži

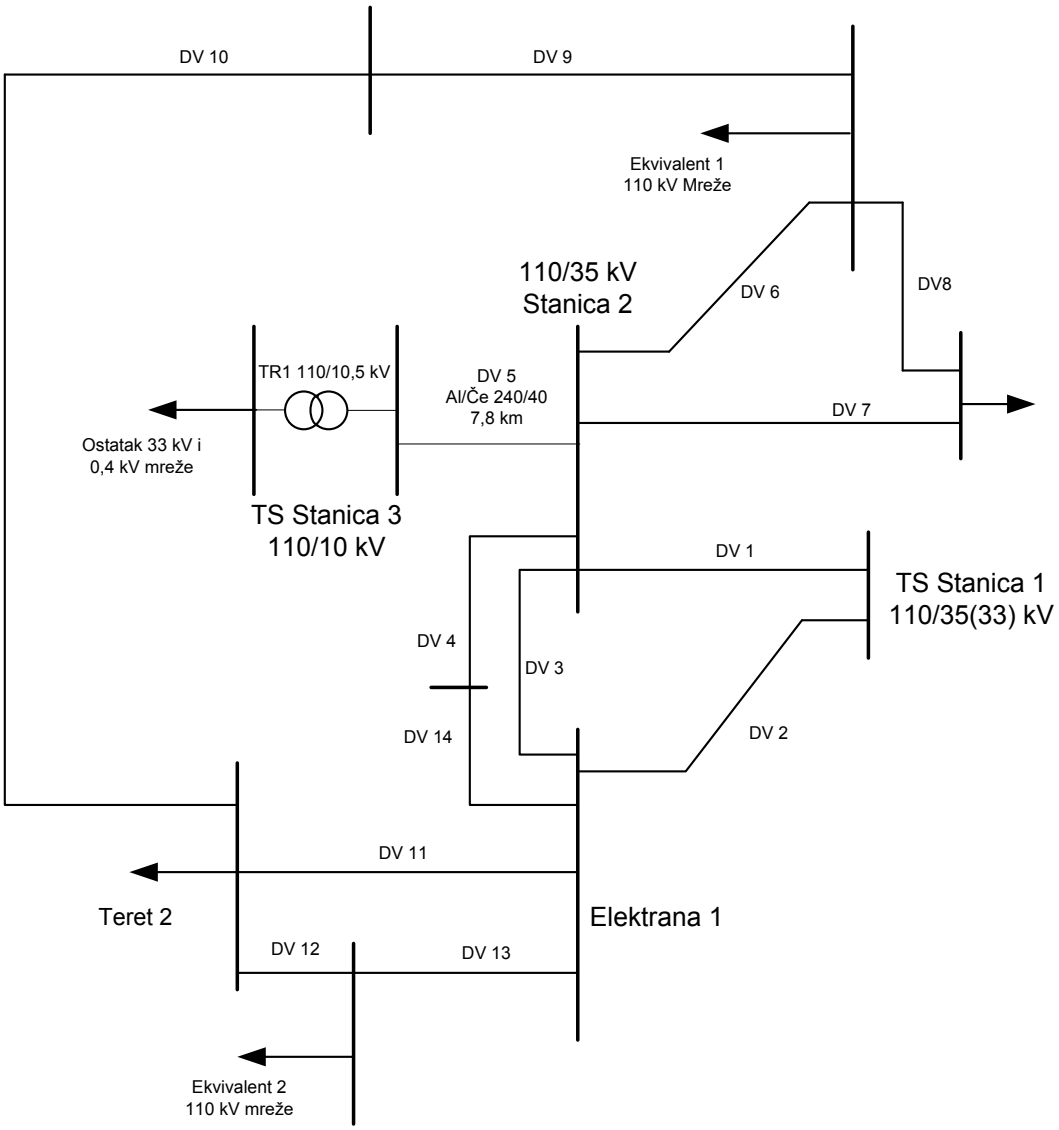
7.1 Klasični proračun širenja flikera u vremenskoj domeni

Model elektroenergetske mreže za proračun širenja flikera u vremenskoj domeni je napravljen u programskom paketu MATLAB (Simulink). Za modeliranje elektroenergetske mreže u okruženju ELP-i, korišteni su standardni niskofrekvencijski modeli elektroenergetskih vodova i transformatora [83]-[89]. Rad ELP-i je modeliran prema poglavlju 5. ovog rada za početnu fazu taljenja i fazu taljenja. Faza rafiniranja nije toliko važna za samo modeliranje jer je cilj dobiti najviše vrijednosti flikera koje se mogu očekivati tijekom pogona ELP-i.

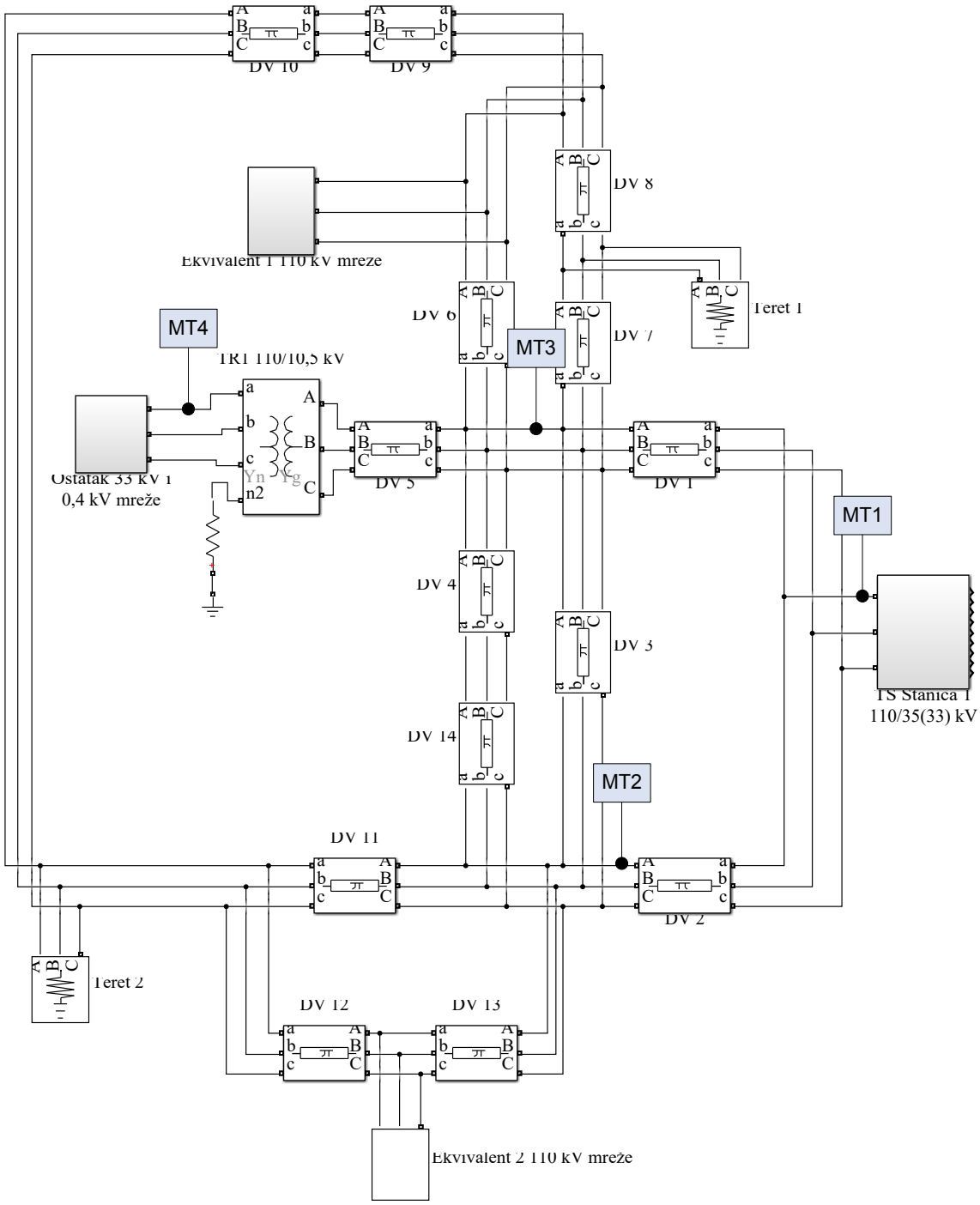
Model mreže odgovara slučaju koji je prikazan u poglavlju 6 (slika 6.1.). Analizirano je širenje flikera kroz prijenosnu i distribucijsku mrežu do kranjih potrošača koji su priključeni na naponskoj razini 0,4 kV. Proračun flikera uspoređen je s mjerenjima koja su obavljena istovremeno u šest mjernih točaka. Za dvije faze rada ELP-i modelirana su uklopna stanja koja odgovaraju uvjetima koji su vladali u mreži prilikom mjerenja. U modelu su za svako uklopno stanje u obzir uzeta stvarna opterećenja prijenosne i distribucijske mreže te naponi koji su bili izmjereni na pojedinim sabirnicama mreže. Korištena su dva Theveninova ekvivalenta prijenosne 110 kV mreže koji se sastoje od trofaznog naponskog izvora i ekvivalente impedancije koja je određena na temelju iznosa jednopolne i tropolne struje kratkog spoja u promatranom trenutku.

Konačni cilj proračuna je zapravo utvrditi domet emisije flikera po mreži te odrediti načine njegova prigušenja smanjenja emisije flikera da kako bi korisnik mreže rad svog postrojenja sveo u propisane granice po pitanju kvalitete električne energije, odnosno flikera. Stoga je bitno razmatrati stanje sa minimalnom snagom kratkog spoja u mreži (u ovom slučaju su i mjerenja napravljena kad su generatori u bliskoj elektrani bili van pogona). Slika 7.1. prikazuje blok shemu promatrane 110 kV mreže. Slika 7.2. i slika 7.3. prikazuju model prijenosne i distribucijske mreže (do korisnika mreže na 0,4 kV razini) za potrebe proračuna širenja flikera. Na slikama su prikazane točke u kojima su izračunati flikeri a koje odgovaraju točkama u kojima su provedena mjerenja iz poglavlja 6.

Tablica 7.1., tablica 7.2. i tablica 7.3. prikazuju podatke o nadzemnim vodovima, kabelima i energetskim transformatorima elektroenergetske mreže koja je modelirana za proračun širenja flikera.



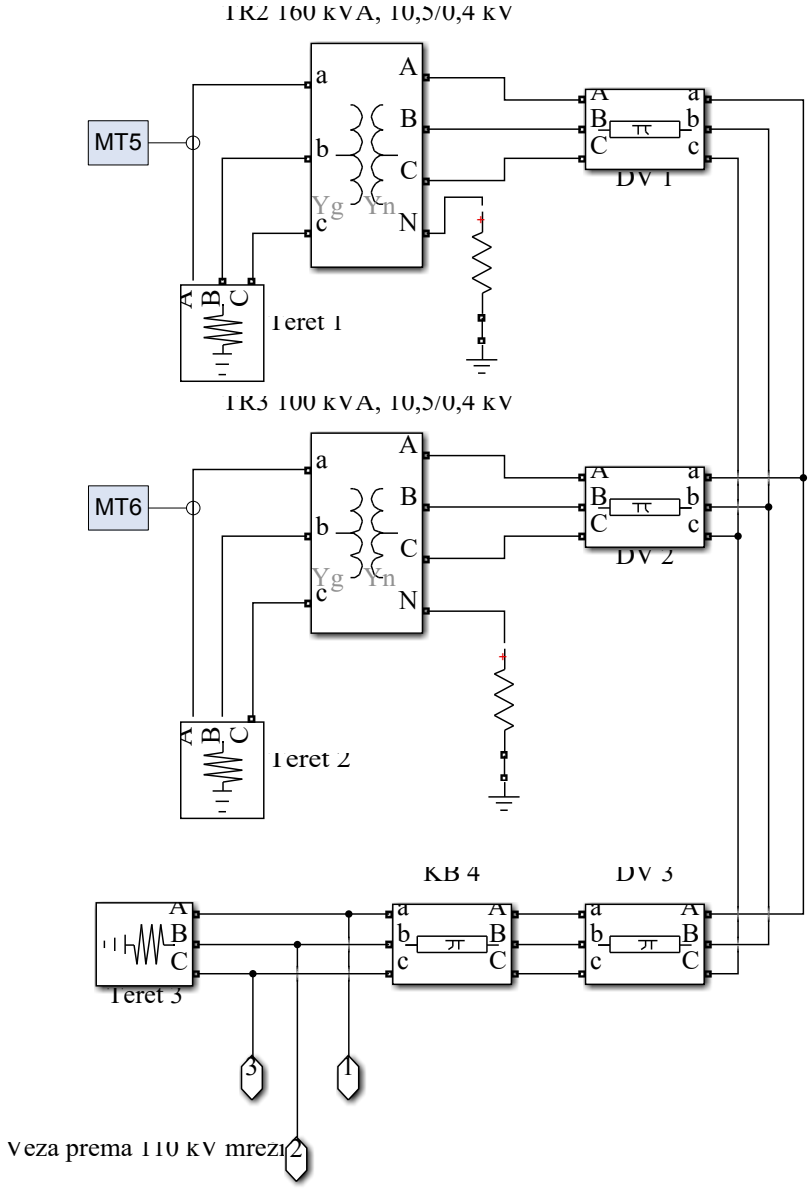
Slika 7.1. Blok shema promatrane 110 kV prijenosne mreže



Slika 7.2. Model prijenosne 110 kV mreže sa prikazom točaka u kojima su izračunati flikeri

Tablica 7.1. Parametri 110 kV prijenosnih vodova

DV	Duljina (km)	R_d (Ω/km)	R_0 (Ω/km)	L_d (mH/km)	L_0 (mH/km)	C_d (pF/km)	C_0 (pF/km)
1	5,4	0,119	0,379	1,303	3,908	88,95	57,82
2	4,3	0,119	0,387	1,303	3,909	88,83	57,74
3	5,4	0,119	0,379	1,303	3,908	88,42	57,47
4	3,2	0,119	0,437	1,337	4,011	89,52	58,19
5	7,8	0,120	0,384	1,305	3,915	89,13	57,93
6	35,4	0,119	0,381	1,305	3,914	89,92	58,45
7	21,5	0,119	0,381	1,305	3,915	86,26	58,57
8	34,6	0,119	0,381	1,305	3,914	89,92	58,45
9	39,8	0,120	0,384	1,292	3,877	89,41	58,12
10	23,6	0,120	0,384	1,324	3,973	89,45	58,14
11	33,8	0,119	0,439	1,337	4,012	86,58	56,28
12	11	0,120	0,384	1,293	3,880	89,45	58,14
13	43,4	0,120	0,384	1,337	4,011	86,55	56,25
14	2,5	0,192	0,442	1,337	4,011	89,19	57,93



Slika 7.3. Model 10 kV i 0,4 kV mreže sa prikazom točaka u kojima su izračunati flikeri

Tablica 7.2. Parametri distibucijskih vodova

DV/KB	Duljina (km)	R_d (Ω/km)	R_0 (Ω/km)	L_d (mH/km)	L_0 (mH/km)	C_d (nF/km)	C_0 (nF/km)
1	16,042	0,590	0,740	1,11	4,97	10	17,5
2	0,98	0,590	0,740	1,11	4,97	10	17,5
3	1,43	0,590	0,740	1,11	4,97	10	17,5
4	0,3	0,211	0,847	0,389	0,945	254	254

Tablica 7.3. Podaci o energetskim transformatorima

TR	S_n (MVA)	U_{n1}/U_{n2} (kV)	Grupa spoja	u_{k1-2}(%)
1	20	110/10,5	Yn,yn0	11,8
2	0,1	10,5/0,4	Yn,yn0	4
3	0,16	10,5/0,4	Yn,yn0	4

Prvi proračun širenja flikera po mreži proveden je u vremenskoj domeni sa vremenskim korakom 40 μs i trajanjem simulacije 600 s kako bi se odredio P_{st}. Proračuni su napravljeni za dvije faze rada ELP-i (početna faza taljenja i faza taljenja). Podaci koji su dobiveni proračunom su uspoređeni sa rezultatima mjerenja u 6 točaka u kojima su obavljena mjerenja.

Rezultate proračuna i usporedbu s mjerenjima za fazu taljenja prikazuje tablica 7.4. Prigušenja su izračunata u odnosu na prethodno čvorište (prethodni redak u tablici). Iz usporedbe rezultata mjerenja i rezultata proračuna (P_{st}) može se reći da se rezultati dobiveni proračunom slažu sa rezultatima mjerenja. Rezultati kratkotrajne jakosti flikera dobivene proračunom su nešto viši od rezultata dobivenih mjerenjem što bio značilo da je model za proračun širenja flikera na strani sigurnosti u odnosu na stanje u stvarnoj elektroenergetskoj mreži. Najveća postotna razlika proračuna prema mjerenjima iznosi 3,61% i to stanici 2 na 110 kV razini.

Tablica 7.4. Rezultati proračuna i usporedba s mjerenjima za početnu fazu taljenja

Stanica	**Pst (proračun)**	**Pst (mjerenje)**	**Prigušenje (%) proračun**	**Prigušenje (%) mjerenje**	**Postotna razlika proračun prema mjerenju (%)**
Stanica 1	1,8897	1,89	-	-	-0,02
Elektrana 1	1,7084	1,70	9,59	10,05	0,49
Stanica 2	1,6681	1,61	2,36	5,29	3,61
Stanica 3 (110 kV)	1,6591	-	-	-	-
Stanica 3 (10 kV)	1,5217	1,52	8,78	5,59	0,11
Stanica 4	1,4076	1,40	7,50	7,89	0,54
Stanica 5	1,228	1,19	12,76	15,00	3,19

Ukupno izmjereno prigušenje flikera, za početnu fazu taljenja, od točke u kojoj je priključena ELP na 110 kV razini do 0,4 kV razine iznosi 37,04%, dok se proračunom dobije prigušenje od 35,02%.

Rezultate proračuna i usporedbu s mjerenjima za fazu taljenja prikazuje tablica 7.5. Prigušenja su izračunata u odnosu na prethodno čvorište (prethodni redak u tablici). Iz usporedbe rezultata mjerenja i rezultata proračuna (P_{st}) može se reći da se rezultati dobiveni proračunom slažu sa rezultatima mjerenja. Rezultati kratkotrajne jakosti flikera dobivene proračunom su nešto viši od rezultata dobivenih mjerenjem što bio značilo da je model za proračun širenja flikera na strani sigurnosti u odnosu na stanje u stvarnoj elektroenergetskoj mreži. Najveća postotna razlika proračuna prema mjerenjima iznosi 9,28% i to u prvoj točki SN izvoda mreže na 0,4 kV razini.

Tablica 7.5. Rezultati proračuna i usporedba s mjerenjima za fazu taljenja

Stanica	Pst (proračun)	Pst (mjerenje)	Prigušenje (%) proračun	Prigušenje (%) mjerenje	Postotna razlika proračun prema mjerenju (%)
Stanica 1	1,3035	1,29	-	-	1,04
Elektrana 1	1,1708	1,16	10,18	10,08	0,92
Stanica 2	1,1501	1,11	1,77	4,31	3,49
Stanica 3 (110 kV)	1,1439	-	-	-	-
Stanica 3 (10 kV)	1,0490	0,96	8,79	13,51	8,48
Stanica 4	0,9700	0,88	7,53	8,33	9,28
Stanica 5	0,8458	0,82	12,80	6,82	3,05

Ukupno izmjereno prigušenje flikera, za fazu topljenja, od točke u kojoj je priključena ELP na 110 kV razini do 0,4 kV razine iznosi 36,43%, dok se proračunom dobije prigušenje od 35,11%.

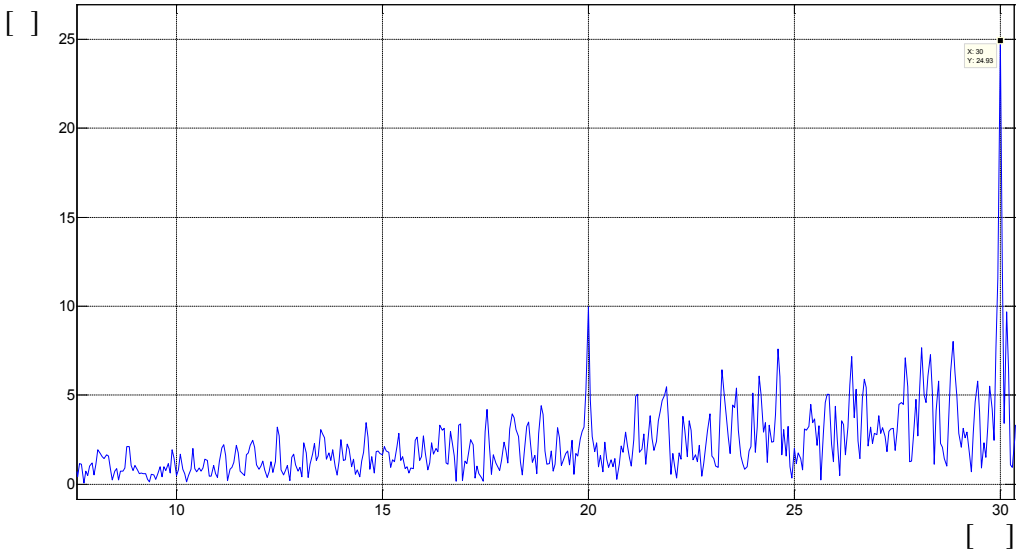
Na temelju rezultata proračuna i usporedbe s mjerenim vrijednostima može se zaključiti sljedeće:

- Izračunata prigušenja su nešto manja od onih koja se dobiju mjerenjima (rezultati proračuna su na strani sigurnosti)
- Razlika između izračunatih i izmjerenih iznosa flikera u pojedinim čvorištima za fazu taljenja ELP-i ne prelaze 3,61%, dok za fazu topljenja ne prelaze 9,28%.
- Ukupno izmjereno prigušenje flikera sa 110 kV do 0,4 kV je nešto veće od izračunatog prigušenja. To je i očekivano s obzirom da računski model ne uzima u obzir sva prigušenja koja postoje u stvarnosti (npr. prigušenje mjerenih signala preko mjernih naponskih i strujnih transformatora).

- Na kraju se može zaključiti da razvijeni model elektrolučne peći i klasična metoda proračuna flikera u vremenskoj domeni mogu se sa zadovoljavajućom točnošću koristiti za procjenu prigušenja flikera u prijenosnoj i distribucijskoj mreži.

7.1 *Proračun širenja flikera zasnovan na emisiji naponskih subharmonika*

Proračuni u vremenskoj domeni su vremenski zahtjevni i ovisni o vremenskom koraku proračuna, veličini mreže i broju modeliranih elemenata. U nekim slučajevima postoji mogućnost pojave numeričkih oscilacija koje su posljedica nepravilno odabranog vremenskog koraka simulacije i metode numeričke integracije. Osim problema s konveregencijom, proračuni u vremenskoj domeni traju relativno dugo (čak i po nekoliko sati), a njihovo vrijeme izvođenja eksponencijalno raste s veličinom analizirane mreže. FFT analiza valnog oblika napona predmetne elektrolučne peći (istovremeni valni oblici u trajanju 20 sekundi) priključene preko pećnog transformatora na 110 kV sabirnicu u TS Stanica 1, koju prikazuje slika 7.4. pokazuje da postoji nekoliko dominantnih naponskih subharmonika koje generira elektrolučna peć u početnoj fazi taljenja, a posebno su izraženi harmonici frekvencije 30 Hz i 20 Hz. Dominatni naponski subharmonici ovisni su o tipu elektrolučne peći, sastavu šarže, temperaturi taljenja i ostalim značajkama koje karakteriziraju svaku elektrolučnu peć. U FFT analizama valnog oblika napona elektrolučnih peći najčešće se razmatra širenje naponskih subharmonika u frekvencijskom spektru 0,3-30 Hz [90]-[92], karakterističnom za flikere koje generira elektrolučna peć.



Slika 7.4. Amplitude napona po frekvencijama na 110 kV razini u TS Stanica 1

Kako bi se pojednostavnio i ubrzao proračun širenja flikera po mreži, razvijena je metoda zasnovana na proračunu emisije dominatnih naponskih subharmonika, karakterističnih za svaku elektrolučnu peć i frekvencijski ovisnom modelu elemenata EES-a. Razvijeni model elektrolučne peći predstavlja u ovakvom pristupu, izvor dominantnih subharmonika, čiji se iznosi mijenjaju, ovisno o fazi rada elektrolučne peći (taljenje, topljenje, rafiniranje) i samim karakteristikama peći. Na taj je način problem širenja flikera u mreži zapravo sveden na analizu širenja dominantnih subharmonika, čime je izbjegnuto zahtjevno i dugotrajno rješavanje problema u vremenskoj domeni.

U nastavku su prikazani rezultati proračuna širenja flikera po analiziranoj elektroenergetskoj mreži (slika 7.1.) ukoliko se promatra prigušenje naponskih subharmonika u frekvencijskom spektru (0,3-30 Hz), karakterističnom za elektrolučne peći u početnoj fazi taljenja.

Fazne vrijednosti amplituda dominantnih naponskih subharmonika (V) prikazuje tablica 7.6.

Tablica 7.6. Fazne vrijednosti amplituda dominantnih naponskih subharmonika (V)

	MT 1	MT 2	MT 3	MT 4	MT 5	MT 6
Amplituda napona 8.8 Hz	2,1150	1,9030	1,8500	0,1639	0,005819	0,004952
Amplituda napona 10 Hz	0,4783	0,4305	0,4189	0,03685	0,001304	0,001115
Amplituda napona 20 Hz	**9,9740**	**9,0040**	**8,7900**	**0,7523**	**0,02627**	**0,02287**
Amplituda napona 30 Hz	**24,9300**	**22,5300**	**22,0300**	**1,871**	**0,06509**	**0,05687**
Amplituda napona 40 Hz	162,3000	146,7000	143,6000	12,15	0,4223	0,3697
Amplituda napona 50 Hz	93460	93500	93510	8861	336,4	335,2

Fazne vrijednosti amplituda dominantnih naponskih subharmonika izražene u % osnovnog harmonika prikazuje tablica 7.7.

Tablica 7.7. Fazne vrijednosti amplituda naponskih subharmonika (% u odnosu na osnovni harmonik)

	MT 1	MT 2	MT 3	MT 4	MT 5	MT 6
Amplituda napona 8.8 Hz	0,0023	0,0020	0,0020	0,0018	0,0017	0,0015
Amplituda napona 10 Hz	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004	0,0003
Amplituda napona 20 Hz	**0,0107**	**0,0096**	**0,0094**	**0,0085**	**0,0078**	**0,0068**
Amplituda napona 30 Hz	**0,0267**	**0,0241**	**0,0236**	**0,0211**	**0,0193**	**0,0170**
Amplituda napona 40 Hz	0,1737	0,1569	0,1536	0,1371	0,1255	0,1103
Amplituda napona 50 Hz	100	100	100	100	100	100

Prigušenja dominantnih naponskih subharmonika te jakosti kratkotrajnog flikera u mjernim točkama određena na temelju razvijene metode zasnovane na emisiji dominantnih subharmonika napona prikazane su na sljedećoj tablici.

Tablica 7.8. Prigušenje dominantnih naponskih subharmonika po mreži i jakosti kratkotrajnog flikera u mjernim točkama

Frekvencija	Prigušenje Stanica 1 – Elektrana 1 (%)	Prigušenje Elektrana 1 – Stanica 2 (%)	Prigušenje Stanica 2 – Stanica 3 (%)	Stanica 3 – Stanica 4 (%)	Prigušenje Stanica 4 - Stanica 5 (%)
8,8 Hz	10,06	2,80	6,51	6,48	14,59
10 Hz	10,03	2,70	7,17	6,79	14,19
20 Hz	**9,76**	**2,39**	**9,68**	**8,02**	**12,63**
30 Hz	**9,67**	**2,23**	**10,37**	**8,36**	**12,32**
Pst	9,60	2,37	8,74	7,47	12,77

Usporedbom rezultata proračuna širenja flikera prmjenom predložene metode, zasnovane na emisiji dominantnih subharmonika (tablica 7.8.) i rezultata proračuna klasičnom metodom u vremenskoj domeni i mjerenja koje prikazuje tablica 7.4. može se zaključiti da postoji dobra korelacija između prigušenja naponskih subharmonika koji su u FFT analizi valnog oblika u priključnoj točki elektrolučne peći na 110 kV imali najveću amplitudu (30 Hz i 20 Hz) i prigušenja jakosti kratkotrajnog flikera po mreži. Dakle naponski harmonici frekvencije 20 Hz i 30 Hz se prigušuju vrlo slično, kao što se prigušuje P_{st}. Prema tome, može se reći da se primjenom razvijene metode može sa zadovoljavajućom točnošću utvrditi prigušenje jakosti kratkotrajnog flikera P_{st} u svim čvorištima mreže injektiranjem signala dominantne frekvencije 20 Hz ili 30 Hz i praćenjem prigušenja njegove amplitude po mreži. Na temelju takvog proračuna se vrlo brzo može odrediti utjecaj rada elektrolučne peći na kvalitetu napona (po pitanju flikera) u slučaju priključenja bilo kojeg novog korisnika mreže.

8. Zaključak

Brze promjene napona u elektroenergetskoj mreži posljedica su priključka nelinearnih trošila s nepravilnim, fluktuirajućim ritmom radom, koji iz mreže uzimaju brzo promjenjive struje i time uzrokuju treperenja napona. Posebno su značajna treperenja napona frekvencije 0,5 do 30 Hz, koja dovode do izraženih vremenskih kolebanja svjetlosne gustoće ili spektralne razdiobe rasvjetnog tijela te su zbog toga zamjetna ljudskom oku. Jedan od najvećih uzročnika pojave flikera u mreži su elektrolučne peći, koje zbog svoje velike jedinične snage i intenziteta smetnji značajno narušavaju kvalitetu napona u elektroenergetskom sustavu.

S obzirom na svoj nepravilan, fluktuirajući rad, utjecaj elektrolučnih peći na strujno-naponske prilike u mreži najčešće se analizira proračunima u vremenskoj domeni, što često dovodi do problema s brzinom izvođenja i konvergencijom samog proračuna. Stoga je u istraživanjima provedenim u okviru ovog doktorskog rada naglasak stavljen na primjenu jednog drugačijeg pristupa za rješavanje navedenog problema. Osnovnu ideju predloženog pristupa čini kombinacija stohastičkog modela elektrolučne peći u vremenskoj domeni i metode širenja flikera po mreži utemeljene na emisiji naponskih subharmonika, karaktersitičnih za pogon elektrolučne peći.

Nakon kratkog opisa pojma kvalitete električne energije i pregleda trenutno važećih tehničkih izvještaja i normi iz područja kvalitete električne energije, u radu su prikazane osnovne teoretske postavke problematike vezane uz pojavu flikera te je opisan način rada flikermetra na kojem se temelji rad svih uređaja za mjerenje jakosti kratkotrajnih i dugotrajnih flikera.

U petom poglavlju rada detaljno je opisan simulacijski model elektrolučne peći utemeljen na stohastičkom pristupu i U-I karakteristici elektrolučne peći. Korištenjem jednadžbi koje opisuju fizikalnu prirodu električnog luka i slučajnog odabira faktora modulacije prema uniformoj razdiobi napravljen je algoritam za formiranje simulacijskog modela elektrolučne peći. Rezultat iterativnog postupka, u kojem se u svakom koraku mijenjaju faktori modulacije i prilagodbe otpora luka snazi elektrolučne peći kako bi odstupanja U-I karakteristike simulacijskg modela od stvarnih mjerenja bila što manja, predstavlja ujedno i prvi znanstveni doprinos ovog rada.

Za verifikaciju samog modela elektrolučne peći, ali i metode širenja flikera kroz elektroenergetsku mrežu u radu su korištena mjerenja, koja su provedena u jednom dijelu prijenosne i distribucijske mreže radi utvrđivanja utjecaja elektrolučne peći nazivne snage 28.8

MW na kvalitetu napona. Stoga su, u šestom poglavlju rada opisana istovremena mjerenja flikera na sabirnicama postrojenja elektrolučne peći i u elektroenergetskoj mreži u više čvorišta i na više naponskih razina.

U sedmom poglavlju opisan je način modeliranja dijela elektroenergetske mreže na kojoj su provedene simulacije širenja flikera prouzročenih radom elektrolučne peći. Simulacijski model mreže odgovara stvarnom stanju elektroenergetskog sustava (prema topologiji mreže, uklopnom stanju i angažiranosti proizvodnih jedinica) u vremenskom periodu u kojem su obavljena mjerenja. Međusobno podudaranje stvarnog i simulacijskog modela mreže veoma je važno za verifikaciju predložene metode širenja flikera, jer je njena točnost ovisna o svim parametrima analiziranog sustava. Za ostvarenje ideje o primjeni metode širenja flikera u frekvencijskj domeni u radu su provedena istraživanja za otkrivanje dominantnih stujnih i posljedično tome naponskih subharmonika, koji karakteriziraju svaki tip elektrolučne peći. U tu svrhu provedena je FFT analiza valnog oblika napona na 110 kV sabirnicama čvorišta u kojima je priključena elektrolučna peć, izračunata na temelju predloženog simulacijskog modela opisanog u petom poglavlju rada. Rezultati FFT analize pokazali su da harmonici frekvencije 30 Hz i 20 Hz imaju najveće amplitude te su oni izabrani za analizu širenja po mreži. Na temelju proračuna njihove emisije utvrđeno je da je prigušenje ovih, dominantnih naponskih subharmonika vrlo slično prigušenju jakosti kratkotrajnog flikera P_{st}. Na taj je način uspostavljena korelacija između širenja (prigušenja) dominantnih naponskih subharmonika i prigušenja jakosti kratkotrajnih flikera. Prema tome, može se konstatirati da se injekcijom signala frekvencije 20 Hz i 30 Hz na mjestu priključka elektrolučne peći i praćenjem njegovog prigušenja kroz mreže mogu odrediti i iznosi jakosti kratkotrajnog flikera u svim okolnim čvorištima mreže. Ovako koncipiranom metodom za određivanje prigušenja jakosti kratkotrajnog flikera izbjegnuto je dugotrajno i nestabilno izvođenje proračuna u vremenskoj domeni, čime je ispunjen drugi znanstveni doprinos rada.

Rezultati proračuna širenja flikera utemeljeni na razvijenom simulacijskom modelu i prethodno opisanoj metodi širenja flikera uspoređeni su sa mjerenjima u stvarnom sustavu. Usporedba je napravljena za dvije faze rada elektrolučne peći (taljenje i topljenje) u kojima se očekuju najveći iznosi kratkotrajnih flikera u mreži. Na temelju provedene usporedbe može se zaključiti da postoji zadovoljavajuće podudaranje rezultata proračuna i provedenih mjerenja, čime je potvrđen i treći znanstveni doprinos rada.

Iznosi jakosti kratkotrajnog flikera dobiveni proračunom su nešto viši od rezultata dobivenih mjerenjem što znači da je model za proračun širenja flikera na strani sigurnosti u odnosu na stanje u stvarnoj elektroenergetskoj mreži. To je i očekivano s obzirom da računski

model ne uzima u obzir sva prigušenja koja postoje u stvarnosti (npr. prigušenje mjernih signala preko mjernih naponskih i strujnih transformatora itd.). Prema tome, može se zaključiti da se razvijeni simulacijski model elektrolučne peći i metoda za proračun širenja flikera, utemeljena na korelaciji sa širenjem dominantnih naponskih subharmonika koje generira elektrolučna peć, može sa zadovoljavajućom točnošću koristiti za procjenu prigušenja flikera u prijenosnoj i distribucijskoj mreži.

Literatura

[1] G. T. Heydt, “Electric Power Quality,” Electr. Eng. Handb., pp. 805–810, 2005.

[2] R. F. Burch IV, “Thoughts on improving the electric arc furnace model,” IEEE Power Energy Soc. 2008 Gen. Meet. Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, PES, 2008.

[3] A. Singh, R. K. Singh, and A. K. Singh, “Power Quality Issues of Electric Arc Furnace and their Mitigations -A Review,” Int. J. Adv. Eng. Res. Sci., vol. 4, no. 4, pp. 22–41, 2017.

[4] J. Sousa, M. T. Correia De Barros, M. Covas, and a. Simoes, “Harmonics and flicker analysis in arc furnace power systems,” IPST’99 Int. Conf. Power Syst. transients, no. 1, pp. 626–630, 1999.

[5] CIGRE Working Group B4.19: “Static synchronous compensator (STATCOM) for arc furnace and flicker compensation”, technical brochure no. 237, 2003.

[6] International Electrotechnical Commission, “Electromagnetic compatibility (EMC) Part 3-6: Limits — Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems,” Iec 61000-3-6, 2008.

[7] British Standards Institution, DECC UK, Office for National Statistic, and Met Office UK, “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems,” Whether Clim. Chang., no. December, pp. 1–18, 2010.

[8] S. Varadan, E. B. Makram, and A. A. Girgis, “A new time domain voltage source model for an arc furnace using EMTP,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 11, no. 3, pp. 1685–1690, 1996.

[9] G. C. Montanari, M. Loggini, A. Cavallini, L. Pitti, and D. Zaninelli, “ARC-Furnace model for the study of flicker compensation in electrical networks,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 9, no. 4, pp. 2026–2036, 1994.

[10] H. Sharma, M. McGranaghan, and J. Smith, “An efficient module for flicker assessment of electric arc furnaces,” IEEE Power Energy Soc. 2008 Gen. Meet. Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, PES, 2008.

[11] M. A. P. Alonso and M. P. Donsión, “An Improved Time Domain Arc Furnace Model for Harmonic Analysis,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 19, no. 1, pp. 367–373, 2004.

[12] R. Horton, T. A. Haskew, and R. F. Burch IV, “A time-domain AC electric arc furnace model for flicker planning studies,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 24, no. 3, pp. 1450–1457, 2009.

[13] E. O’Neill-Carrillo, G. T. Heydt, E. J. Kostelich, S. S. Venkata, and A. Sundaram, “Nonlinear deterministic modeling of highly varying loads,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 14, no. 2, pp. 537–542, 1999.

[14] G. Carpinelli, F. Iacovone, A. Russo, and P. Varilone, “Chaos-based modeling of DC arc furnaces for power quality issues,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 19, no. 4, pp. 1869–1876, 2004.

[15] M. Torabian Esfahani and B. Vahidi, “A new stochastic model of electric arc furnace based on hidden markov model: A study of its effects on the power system,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 27, no. 4, pp. 1893–1901, 2012.

[16] F. Chen, K. B. Athreya, V. V. Sastry, and S. S. Venkata, “Function space valued Markov model for electric arc furnace,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 2, pp. 826–833, 2004.

[17] H. Samet and M. E. H. Golshan, “Employing stochastic models for prediction of arc furnace reactive power to improve compensator performance,” IET Gener. Transm. Distrib., vol. 2, no. 4, pp. 505–515, 2008.

[18] S. M. M. Agah, S. H. Hosseinian, H. A. Abyaneh, and N. Moaddabi, “Parameter identification of arc furnace based on stochastic nature of arc length using two-step optimization technique,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 25, no. 4, pp. 2859–2867, 2010.

[19] E. A. Cano-Plata, A. J. Ustariz Farfan, and O. J. Soto Marin, “Electric Arc Furnace Model in Distribution Systems,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 51, no. 5, pp. 4313–4320, 2015.

[20] G. W. Chang, C. I. Chen, and Y. J. Liu, “A neural-network-based method of modeling electric arc furnace load for power engineering study,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 25, no. 1, pp. 138–146, 2010.

[21] G. W. Chang, H. J. Lu, and H. J. Su, “Application of grey predictor model for forecasting flicker severity associated with electric arc furnace load,” Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP, pp. 216–219, 2012.

[22] G. W. Chang, M. F. Shih, Y. Y. Chen, and Y. J. Liang, “A hybrid wavelet transform and neural-network-based approach for modelling dynamic voltage-current characteristics of electric arc furnace,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 29, no. 2, pp. 815–824, 2014.

[23] G. W. Chang, S. J. Lin, Y. Y. Chen, H. J. Lu, H. H. Chen, and Y. R. Chang, “An Advanced EAF Model for Voltage Fluctuation Propagation Study,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 32, no. 2, pp. 980–988, 2017.

[24] J.D. Lavers, B. Danai, P.P. Biringer, "A method of examinig in detail electric arc furnace perfomance", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 21, pp. 137-146, 1985.

[25] H. Schau, D. Stade, "Mathematical modelling of three-phase arc furnaces". Proc IEEE International Conference on Harmonics in Power Systems, pp. 422-428, 1994.

[26] A. Gárcia-Cerrada, P. García-Gonzáez, R. Collantes, T. Gómez, and J. Anzola, “Comparison of thyristor-controlled reactors and voltage-source inverters for compensation of flicker caused by arc furnaces,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 15, no. 4, pp. 1225–1231, 2000.

[27] R. Collantes-Bellido and T. Gómez, “Identification and modelling of a three phase arc furnace for voltage disturbance simulation,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 12, no. 4, pp. 1812–1817, 1997.

[28] Z. Zhang, N. R. Fahmi, and W. T. Norris, “Flicker analysis and methods for electric arc furnace flicker (EAF) mitigation (a survey),” 2001 IEEE Porto Power Tech Proc., vol. 1, pp. 508–513, 2001.

[29] O. Ozgun and A. Abur, “Flicker Study Using a Novel ARC Furnace Model,” IEEE Power Eng. Rev., vol. 22, no. 7, p. 64, 2002.

[30] E. Acha, A. Semlyen, and N. Rajaković, “A harmonic domain computational package for nonlinear problems and its application to electric arcs” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 5, no. 3, pp. 1390–1397, 1990.

[31] M. P. Kennedy, “Three steps to chaos. I. Evolution”, IEEE Trans.Circuit Syst. I, vol. 40, no. 10, pp. 640–656, October 1993.

[32] M. P. Kennedy,“Three steps to chaos, Part 2:A Chua’s circuit primer”, IEEE Trans. Circuits Syst. I, vol. 40, pp. 657–674, Oct. 1993.

[33] “Flickermeter-Functional and Testing Specifications”, CEI, IEC Publ. 61000-4-15, 1997.

[34] T. Zheng and E. B. Makram, “An adaptive arc furnace model,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 15, no. 3, pp. 931–939, 2000.

[35] G. Chang et al., “Modeling devices with nonlinear voltage-current characteristics for harmonic studies,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 19, no. 4, pp. 1802–1811, 2004.

[36] A. Esfandiari, M. Parniani, and H. Mokhtari, “Mitigation of electric arc furnace disturbances using the unified power quality conditioner,” IECON Proc. (Industrial Electron. Conf., vol. 2, pp. 1469–1474, 2004.

[37] C. Sharmeela, G. Uma, M. R. Mohan, and K. Karthikeyan, “Voltage flicker analysis and mitigation-case study in AC Electric Arc Furnace using PSCAD/EMTDC,” 2004 Int. Conf. Power Syst. Technol. POWERCON 2004, vol. 1, pp. 707–712, 2004.

[38] M. P. Donsión and F. Oliveira, “AC arc furnaces flicker measurement with and without a SVC system connected,” Renew. Energy Power Qual. J., vol. 1, no. 05, pp. 785–788, 2007.

[39] Y. Wang, H. Li, B. Xu, and L. Sun, “Simulation research of harmonies in electric system of arc furnace,” 2004 Int. Conf. Power Syst. Technol. POWERCON 2004, vol. 1, pp. 902–906, 2004.

[40] I. Vervenne, K. Van Reusel, and R. Belmans, “Electric arc furnace modelling from a ‘power quality’ point of view,” 2007 9th Int. Conf. Electr. Power Qual. Util. EPQU, 2007.

[41] A. Wolf, J. B. Swift, H. L. Swinney, and J. A. Vastano, “Determining Lyapunov exponents from a time series,” Phys. D Nonlinear Phenom., vol. 16, no. 3, pp. 285–317, 1985.

[42] G. T. Heydt, E. O’Neill-Carrillo, and R. Y. Zhao, “The modeling of nonlinear loads as chaotic systems in electric power engineering,” 7th Int. Conf. Harmon. Qual. Power, pp. 704–709, 1996.

[43] P. E. Issouribehere, J. C. Barbero, F. Issouribehere, and G. A. Barbera, “Power quality measurements in a steel industry with electric arc furnaces,” IEEE Power Energy Soc. 2008 Gen. Meet. Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, PES, 2008.

[44] CIGRE JWG C4.07/CIRED, “Final WG Report: Power Quality Indices and Objectives,” Cigre, no. January, p. 96, 2004.

[45] IEC 61000-3-7, “Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power systems - Basic EMC publication,” 2008.

[46] IEC 61000-2-12:2003-04: Electromagnetic Compatibility (EMC)-Part 2-12: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public medium-voltage power supply systems.

[47] A. A. Gomez, J. J. Marulanda Durango, and A. E. Mejia, “Electric arc furnace modeling for power quality analysis,” 2010 IEEE ANDESCON Conf. Proceedings, ANDESCON 2010, 2010.

[48] G. Manchur and C. C. Erven, “Development of a Model for Predicting Flicker From Electric Arc Furnaces,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 7, no. 1, pp. 416–426, 1992.

[49] O. Ozgun and A. Abur, “Development of an Arc furnace model for power quality studies,” 1999 IEEE Power Eng. Soc. Summer Meet. PES 1999 - Conf. Proc., vol. 1, pp. 507–511, 1999.

[50] G. C. Lazaroiu and D. Zaninelli, “A control system for dc arc furnaces for power quality improvements,” Electr. Power Syst. Res., vol. 80, no. 12, pp. 1498–1505, 2010.

[51] J. L. Guan, J. C. Gu, M. T. Yang, and H. H. Chang, “New assessment and prediction for arc furnace flicker,” 2006 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet. PES, 2006.

[52] D. Andrews, M. T. Bishop, and J. F. Witte, “Harmonic measurements, analysis, and power factor correction in a modern steel manufacturing facility,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 32, no. 3, pp. 617–624, 1996.

[53] G. W. Chang, Y. J. Liu, and C. I. Chen, “Modeling voltage-current characteristics of an electric arc furnace based on actual recorded data: A comparison of classic and advanced models,” IEEE Power Energy Soc. 2008 Gen. Meet. Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, PES, 2008.

[54] A. D. Kolagar and A. Shoulaie, “Power quality improvement in DC electric arc furnace plants utilizing multi-phase transformers,” Int. Trans. Electr. Energy Syst., vol. 23, no. 8, pp. 1233–1253, 2013.

[55] G. Carpinelli and A. Russo, “Comparison of some active devices for the compensation of dc arc furnaces,” 2003 IEEE Bol. PowerTech - Conf. Proc., vol. 2, pp. 966–973, 2003.

[56] C. J. Wu, T. H. Fu, and Y. J. Chen, “Load characteristics and harmonic analysis of DC arc furnace,” Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf., vol. 2, pp. 778–782, 2000.

[57] H. Andrei, C. Cepisca, and S. Grigorescu, “Power Quality and Electrical Arc Furnaces,” Power Qual., 2011.

[58] H. M. Petersen, R. G. Koch, P. H. Swart, and R. van Heerden, “Modelling arc furnace flicker and investigating compensation techniques,” Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc., vol. 2, pp. 1733–1740, 1995.

[59] Y. Djeghader and H. Labar, “Improvement of power quality in electric ARC furnace operation case harmonics,” J. Electr. Eng., vol. 13, no. 4, pp. 162–166, 2013.

[60] L. Tang, S. Kolluri, and M. F. McGranaghan, “Voltage flicker prediction for two simultaneously operated ac arc furnaces,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 12, no. 2, pp. 985–992, 1997.

[61] A. Ribert and M. Couvreur, “Arc furnace flicker assessment and prediction,” IEE Conf. Publ., no. 373 pt 2, 1993.

[62] W. Brociek and R. Wilanowicz, “Estimation of voltage and current distortions in the power system supplying the AC arc furnace,” Prz. Elektrotechniczny, vol. 87, no. 7, pp. 127–129, 2011.

[63] International Electrotechnical Commission, “Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-15: Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications,” IEC 61000-4-15, 2010.

[64] J. Jatskevich, O. Wasynczuk, and L. Conrad, “A method of evaluating flicker and flicker-reduction strategies in power systems,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 13, no. 4, pp. 1481–1487, 1998.

[65] M. A. Golkar and S. Meschi, “MATLAB modeling of arc furnace for flicker study,” Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol., 2008.

[66] D. C. Bhonsle and R. B. Kelkar, “Simulation of electric arc furnace characteristics for voltage flicker study using MATLAB,” 2011 Int. Conf. Recent Adv. Electr. Electron. Control Eng. IConRAEeCE’11 - Proc., pp. 174–181, 2011.

[67] S. R. Mendis and D. A. González, “Harmonic and Transient Overvoltage Analyses in Arc Furnace Power Systems,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 28, no. 2, pp. 336–342, 1992.

[68] V. Logar, D. Dovžan, and I. Škrjanc, “Mathematical modeling and experimental validation of an electric arc furnace,” ISIJ Int., vol. 51, no. 3, pp. 382–391, 2011.

[69] B. N. Ramos and J. L. D. C. Parga, “An EMTP study of flicker generation and transmission in power systems due to the operation of an AC electric arc furnace,” Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP, vol. 3, pp. 942–947, 2000.

[70] G. C. Montanari, M. Loggini, L. Pitti, E. Tironi, and D. Zaninelli, “Effects of series inductors for flicker reduction in electric power systems supplying arc furnaces,” Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc., vol. 2, pp. 1496–1503, 1993.

[71] G. C. Montanari, M. Loggini, A. Cavallini, and L. Pitti, “Flicker and distortion compensation in electrical plants supplying arc-furnaces,” Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc., vol. 3, pp. 2249–2255, 1994.

[72] Y. Wang, Z. Mao, Y. Li, H. Tian, and L. Feng, “Modeling and parameter identification of an electric arc for the arc furnace,” Proc. IEEE Int. Conf. Autom. Logist. ICAL 2008, pp. 740–743, 2008.

[73] T. Zheng, E. B. Makram, and A. A. Girgis, “Effect of different arc furnace models on voltage distortion,” Proc. Int. Conf. Harmon. Qual. Power, ICHQP, vol. 2, pp. 1079–1085, 1998.

[74] M. D. Cox and A. Mirbod, “A New Static Var Compensator for An Arc Furnace,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 1, no. 3, pp. 110–119, 1986.

[75] P. E. King, T. L. Ochs, and A. D. Hartman, “Chaotic responses in electric arc furnaces,” J. Appl. Phys., vol. 76, no. 4, pp. 2059–2065, 1994.

[76] J. G. Mayordomo, R. Asensi, L. F. Beites, J. Bueno, L. Zabala, and J. Amantegui, “A frequency domain arc furnace model for harmonic power flows under balanced conditions,” Proc. 7th IEEE Int. Conf. Harmon. Qual. Power, pp. 419–427, 1996.

[77] J. G. Mayordomo, L. F. Beites, R. Asensi, M. Izzeddine, L. Zabala, and J. Amantegui, “A new frequency domain Arc Furnace model for Iterative Harmonic Analysis,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 12, no. 4, pp. 1771–1778, 1997.

[78] D. Stade, H. Schau, and S. Kraemer, “Modelling of the electrical behaviour of arc furnace,” vol. 1, pp. 125–128, 1994.

[79] W. M. Al-Hasawi and K. M. El-Naggar, “A genetic based algorithm for voltage flicker measurement,” Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 26, no. 8, pp. 593–596, 2004.

[80] R. C. Dugan, “Simulation of Arc Furnace Power Systems,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-16, no. 6, pp. 813–818, 1980.

[81] J. L. Guan, J. C. Gu, and C. J. Wu, “Real-Time Measurement Approach for Tracking the Actual Coefficient of Δ V / Δ V10 of Electric Arc Furnace,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 19, no. 1, pp. 309–315, 2004.

[82] J. L. Guan, J. C. Gu, and C. J. Wu, “A novel method for estimating voltage flicker,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 20, no. 1, pp. 242–247, 2005.

[83] A. T. Teklić, B. Filipović-Grčić, and I. Pavić, “Modelling of three-phase electric arc furnace for estimation of voltage flicker in power transmission network,” Electr. Power Syst. Res., vol. 146, pp. 218–227, 2017.

[84] M. Ožegović, K. Ožegović, “Električne energetske mreže I”, Svezak I, Opal Computing, Split, 1996.

[85] Ožegović, M. i Ožegović, K.: Električne energetske mreže III, Sveučilišni udžbenik, S veučilište u Splitu, FESB, 1997.

[86] M. Ožegović, K. Ožegović, “Električne energetske mreže V”, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2002.

[87] Hrvoje Požar: “Visokonaponska rasklopna postrojenja“, Tehnička knjiga, Zagreb, 1967.

[88] Župan, Alan; Tomasović Teklić, Ana; Filipović- Grčić, Božidar, “ Modelling of 25 kV Electric Railway System for Power Quality Studies“, IEEE Eurocon 2013 Conference, Zagreb, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) , 2013. p.p. 844-849

[89] Hydro-Québec, “ Power System Blockset User’s Guide“, TEQSIM International Inc., 1998 – 2000.

[90] M. Krnić, „Fourierova analiza“, predavanja, https://www.fer.unizg.hr/predmet/fouan

[91] B. D. Storey, „Computing Fourier Series and Power Spectrum with MATLAB“, materijal, https://faculty.olin.edu/bstorey/Notes/Fourier.pdf

[92] L. Illing, „FOURIER ANALYSIS“, predavanja, 2008., www.reed.edu/physics/courses/Physics331.f08/pdf/Fourier.pdf

[93] M. Lasić, A. Tomasović „Izvještaj o ispitivanju Br. 21582KEE11004“, KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d., rujan 2011.

Popis oznaka i kratica

Oznake:

C_d	*direktna komponenta kapaciteta*
C_0	*nulta komponenta kapaciteta*
f	*frekvencija*
F	*srednja frekvencija*
$F(s)$	*prijenosna funkcija*
h	*redni broj harmonika*
I	*električna struja*
I_n	*nazivna struja*
i_{ig}	*struja električnog luka*
I_{k3}	*struja tropolnog kratkog spoja*
L_d	*direktna komponenta induktiviteta*
L_0	*nulta komponenta induktiviteta*
m	*broj titraja*
m	*faktor modulacije (poglavlje 5)*
n	*redni broj harmonika*
N	*broj uzoraka*
P	*djelatna snaga*
P_{lt}	*dugotrajni fliker (engl. long-term flicker)*
P_{st}	*kratkotrajni fliker (engl. short-term flicker)*
ΔP_{st}	*odstupanje iznosa kratkotrajnog flikera*
Q	*jalova snaga*
R	*električni otpor*
R_a	*konstantni otpor električnog luka*
R_d	*realni dio direktne komponente impedancije*
R_g	*otpor električnog luka*
R_{VN}	*otpor visokonaponske strane transformatora*
R_0	*realni dio nulte komponente impedancije*
s	*kompleksni argument Laplaceove transformacije*
S_{K3}	*snaga tropolnog kratkog spoja*
S_n	*nazivna snaga transformatora*
t	*vrijeme*

T	*vremenski period*
T_{Pst}	*Koeficijent prijenosa kratkotrajnog flikera*
T_{st}	*promatrano vrijeme*
THD_U	*faktor ukupnog harmonijskog izobličenja napona*
u_k	*napon kratkog spoja transformatora*
U	*efektivna linijska vrijednost pogonskog napona*
U_{l}	*napon osnovnog harmonika*
U_{c}	*deklarirani napon mreže*
U_{n}	*nazivni napon mreže*
U_{h}	*amplituda napona h-tog harmonika*
U_{max}	*maksimalni iznos napona*
U_{min}	*minimalni iznos napona*
	iznos faznog napona
v_{d}	*konstantni napon električnog luka*
v_{ig}	*napona paljenja električnog luka*
X	*reaktancija*
X_{VN}	*reaktancija visokonaponske strane transsforamtora*
Z_{VN}	*impedancija visokonaponske strane transformatora*
α	*faktor kojim se otpor elektrolučne peći prilagođava radnoj snazi*
Δt	*vremenski korak proračuna*
ΔV	*promjena napona*
τ	*vremenska konstanta*
ω	*kružna frekvencija*
ω_{f}	*frekvencija flikera*

Kratice:

ANSI	*Američki institut za normizaciju (eng. American National Standards Institute*
CENELEC	*Europska komisija za elektrotehničku normizaciju (eng. European Committee for Electrotehnical Standardisation*
CIGRE	*fra. Conseil International des Grands Reseaux Electriques*
DC	*eng. Direct Current*
DV	*nadzemni vod*
DWT	*diskretna valna transformacija (eng. Discrete wavelet transform)*
EES	*elektroenergetski sustav*
EHV	*eng. Extra High Voltage*
ELP	elektrolučna peć
EN	europska norma (eng. European Norm)
eng.	*engleski jezik*
EMC	*elektromagnetska kompatibilnost (eng. electromagnetic compatibility)*
EMTP	*eng. Electromagnetic Transients Program*
FFT	*eng. Fast Fourier Transform*
HRN	*Hrvatska norma*
HV	*eng. High Voltage*
IEC	*Međunarodna komisija za elektrotehniku (eng.International Electrotechnical Commission)*
IEEE	*Udruženje inžinjera elektrotehnike i elektronike Institute of Electrical and Electronic Engineers*
KB	*Kabel*
KEE	*Kvaliteta električne energije*
KN	*Kvaliteta napona*
MV	*eng. Medium Volatage*
MT	*Mjerna točka*
MTU	*mrežno tonfrekvencijsko upravljanje*
NN	*niskonaponski, oznaka za niski napon*
(NN xx/yy)	*narodne novine broj xx/godina yy*
OMM	*obračunsko mjerno mjesto*
p.u.	*per unit*

RBFNN	*neuronska mreža s radijalnom baznom funkcijom (eng. radial basis function neural network)*
SGC	*statički sinkroni kompenzator*
SVC	*statički var kompenzator*
RH	*Republika Hrvatska*
RMS	*efektivna vrijednost napona (eng. Root Mean Square)*
SN	*srednjenaponski, oznaka za srednji napon*
THD	*ukupno harmonijsko izobličenje valnog oblika (eng. Total Harmonic Distortion)*
TS	*Transformatorska stanica*
TR	*Transformator*
UCTE	*eng. Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity*
UNIPEDE	*Međunarodno udruženje proizvođača i distributera električne energije (International Union of Producers and Distributors of Electrical Energy)*
VN	*visokonaponski, oznaka za visoki napon*
VVN	*vrlo visoki napon*

Životopis

Ana Tomasović Teklić rođena je u Splitu 1984. godine. Završila je osnovnu školu i matematičku gimnaziju u Splitu. Diplomirala je na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu 2007 godine.

Kao stipendistica 2007. godine počela je raditi Končar-Institut za elektrotehniku d.d. na radnom mjestu istraživača-ispitivača u Zavodu za Elektromagnetsku kompatibilnost, sigurnost i umjerevanje. Područje rada je najviše bilo usmjereno na mjerenje i analizu kvalitete električne energije uz primjenu međunarodnih normi i tehničkih izvještaja s tog područja, te poznavanje problematike utjecaja korisnika mreže i distribuiranih izvora na kvalitetu električne energije. Bavi se i proračunima i analizom tokova snaga, viših harmonika i flikera u elektroenergetskim mrežama te istraživanjem izvora elektromagnetskih smetnji, načina i puteva njihova širenja te utjecaja na sklopove, uređaje i sustave u sklopu Odjela za kvalitetu električne energije i energetsku učinkovitost.

Od 2013. godine u sklopu istog Zavoda u Končar – institutu za elektrotehniku d.d. Rukovoditelj je Odjela za kvalitetu električne energije i energetsku učinkovitost. Osim energetske učinkovitosti (obavljanje energetskih pregleda građevina i energetskog certificiranja zgrada sa složenim tehničkim sustavom uz prijedloge mjera za poboljšanje energetske učinkovitosti na temelju provedenih mjerenja), bavi se i analizom mogućnosti priključenja elektrana na distribucijsku i prijenosnu elektroenergetsku mrežu (uklapanje elektrana u razvojne planove distribucijske i prijenosne mreže, procjena potrebnih dogradnji EES-a i troškova priključenja elektrana na mrežu).

Član je tehničkog odbora HZN/TO E8, Sustavski vidovi opskrbe električnom energijom i tehničkog odbora HZN/TO E85, Oprema za mjerenje električnih i elektromagnetskih veličina. Autor je i koautor velikog broja stručnih i znastvenih članaka iz područja kvalitete električne energije koji su prezentirani na domaćim i međunarodnim skupovima.

Popis objavljenih radova

- **Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom:**

1) Tomasović, Ana; Lasić, Mate; Filipović-Grčić, Božidar, „Measurement and calculation of harmonics in distribution power system with connected small co- generation facility Etan // International Conference on Renewable Energies and Power Quality“, (ICREPQ’ 09), Valencia (Spain) 15th to 17th April, 2009. / European Association for the evelopment of Renewable Energies (ur.)., Valencia: European Association for the evelopment of Renewable Energies, 2009. str. 1-4

2) Pavleka, Josip; Nikolovski, Srete; Tomasović, Ana, „Analiza povratnog utjecaja postrojenja korisnika mreže HŽ Infrastruktura d.o.o. na mrežu“ // Zbornik radova s EIS 2014 - 28. međunarodni ELEKTROINŽENJERSKI SIMPOZIJ-Dani Josipa Lončara, Šibenik, Hrvatska, 2014.

3) A. Tomasović Teklić, I. Periša, and D. Škrlec, “Impact of the new electric arc furnace on the level of flicker in surrounding transmission and distribution power system,” Renew. Energy Power Qual. J., pp. 901–905, 2013.

4) A. T. Teklić, B. Filipović-Grčić, and I. Pavić, “Modelling of three-phase electric arc furnace for estimation of voltage flicker in power transmission network,” Electr. Power Syst. Res., vol. 146, pp. 218–227, 2017.

5) Župan, Alan; Tomasović Teklić, Ana; Filipović- Grčić, Božidar, “ Modelling of 25 kV Electric Railway System for Power Quality Studies“, IEEE Eurocon 2013 Conference, Zagreb, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) , 2013. p.p. 844-849

- **Ostali radovi u zbornicima skupova s recenzijom:**

1) Župan, Alan; Tomasović, Ana; Filipović-Grčić, Božidar, „Analiza utjecaja električne željeznice na kvalitetu napona u prijenosnoj 110 kV mreži“ // 11.savjetovanje HRO CIGRÉ : zbornik radova / Filipović-Grčić, Božidar (ur.).,Zagreb: Hrvatski ogranak CIGRÉ, 2013. str. 1-9

2) Tamburović, Srećko; Lasić, Mate; Tomasović, Ana; Periša Ivan, „Usporedba rezultata mjerenja flikera različitih mjernih uređaja“ // Treće savjetovanje Hrvatskog ogranka Međunarodne elektrodistribucijske konferencije / HO CIRED / Zdenko Tonković (ur.).Zagreb: Hrvatski ogranak Međunarodne elektrodistribucijske konferencije, 2012.

3) Tomasović, Ana; Lasić, Mate; Barukčić, Dražen; Periša, Ivan, „Utjecaj rada nove elektrolučne peći u CMC-u Sisak na razine flikera u okolnoj distribucijskoj elektroenergetskoj mreži HEP ODS-a“ // Treće savjetovanje Hrvatskog ogranka Međunarodne elektrodistribucijske konferencije / HO CIRED / Zdenko Tonković (ur.)., Zagreb: Hrvatski ogranak Međunarodne elektrodistribucijske konferencije, 2012.

4) Tomasović, Ana; Lasić, Mate; Barukčić, Dražen; Šimić, Jandro, “Određivanje negativnog povratnog djelovanja na lokaciji CMC Sisak i u okolnoj prijenosnoj EEM nakon prve faze dogradnje pogona nove elektrolučne peći,, // 10. savjetovanje HRO CIGRÉ Cavtat, 06.–10.11.2011. / Filipović-Grčić, Božidar (ur.)., Zagreb: HRVATSKI OGRANAK CIGRÉ, 2011. str. C4-10

5) Lasić, Mate; Tomasović, Ana; Šimić, Jandro; Barukčić, Dražen, „Proračun viših harmonika napona za pogon napajanja ispitne stanice“ // Drugo savjetovanje Hrvatskog ogranka Međunarodne elektrodistribucijske konferencije, Umag, 16.- 19.05.2010., HO CIRED / Zdenko Tonković (ur.).. Zagreb: Hrvatski ogranak Međunarodne elektrodistribucijske konferencije, 2010.

6) Tomasović, Ana; Lasić, Mate; Šimić, Jandro; Barukčić, Dražen, „Mjerenje kvalitete napona nakon priključka VE Orlice“ // Drugo savjetovanje Hrvatskog ogranka Međunarodne elektrodistribucijske konferencije, Umag, 16.- 19.05.2010., HO CIRED / Zdenko Tonković (ur.)., Zagreb: Hrvatski ogranak Međunarodne elektrodistribucijske konferencije, 2010.

7) Lasić, Mate; Tomasović, Ana; Šimić, Jandro; Čerina, Zdeslav, „Mjerni sustav za određivanje negativnog povratnog djelovanja u kvalitetu napona u TS 110/35/25 KV oštarije // Referati/Papers : 9. savjetovanje HRO CIGRÉ = 9th HRO CIGRÉ Session, 8.–12. studenoga 2009./November 8–12, 2009., Cavtat, Hrvatska, 2009.

8) Lasić, Mate; Tomasović, Ana; Nekić, Slaven; Veža, Mario; Šimić, Jandro; Škrlec, Davor, „Utjecaj vjetroagregata s promjenjivom brzinom vrtnje na kvalitetu napona“ // Prvo savjetovanje Hrvatskog ogranka Međunarodne elektrodistribucijske konferencije (HO CIRED) : zbornik radova ; SO4-06 / Tonković, Zdenko (ur.)., Zagreb: Hrvatski ogranak Međunarodne elektrodistribucijske konferencije, 2008. str. 1-6

9) Tomasović, Ana; Lasić, Mate; Nekić, Slaven; Veža, Marijan; Šimić, Jandro, „Negativno povratno djelovanje nelinearnih trošila na kvalitetu napona“ // Prvo savjetovanje Hrvatskog ogranka Međunarodne elektrodistribucijske konferencije, Šibenik, 18.-21.05.2008., HO

CIRED / Zdenko Tonković (ur.)., Zagreb: Hrvatskog ogranak Međunarodne elektrodistribucijske konferencije, 2008.

Curriculum Vitae

Ana Tomasović Teklić was born in Split in 1984. She completed elementary school and high school in Split. She graduated in 2007 at the Faculty of Electrical Engineering and Computing in Zagreb.

In 2007, she started working as a scholarship recipient of the Končar-Electrical Engineering Institute, at the position of Researche and Test Engineer at the devision for Electromagnetic Compatibility, Safety and Calibration. The work was mainly focused on measuring and analyzing Power Quality, applying international standards and technical reports, as well as knowing the issues of influence of network users and distributed sources on the Power Quality. She is also engaged in calculations and analysis of load flow, harmonics and flicker analyses, as well as investigating sources of electromagnetic interference, within the Department of Power Quality and Energy Efficiency.

Since 2013, within the same division in Končar - Electrical Engineering Institute she is the head of the Department for Power Quality and Energy Efficiency.

In addition to energy efficiency (performing energy audits of buildings and energy certification of buildings with a complex technical system, with proposals for measures to improve energy efficiency based on measurements), she also analyzes the possibility of connecting power plants to the distribution and transmission power grid (incorporating power plants into the development plans of the distribution and transmission grid, estimation of the necessary power system upgrades and costs of connection of power plants to the grid).

She is a member of the HZN / TO E8 technical committee “Systematic aspects of electricity supply“ and the HZN / TO E85 technical committee „Equipment for measuring electrical and electromagnetic quantities“.

She is the author and co-author of a large number of expert and scientific papers in the field of Power Quality that have been presented at national and international conferences.