Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Tomaž Živic

# Pričakovane vrednosti prehodnih prenapetosti v sekundarnih tokokrogih elektroenergetskih postrojev pri stikalnih preklopih z ločilniki

Magistrsko delo

Mentor: prof. dr. Igor Papič, univ. dipl. inž. el.

Ljubljana, 2016

.

### Zahvala

Z leti človek opazi, kako mnogo je dogodkov v življenju, ki minejo prehitro, da bi se jih zavedel. Podobno je z zahvalo. Pozabljena ali odložena in priložnost za zahvalo spolzi skozi čas in spomin. Zato je zdaj na tem mestu priložnost, da se zahvalim ključnim ljudem, ki so pripomogli, da sem začel in da dokončam to magistrsko delo. Zavedam pa se, da je spomin dostikrat luknjičast. Če sem na koga pozabil, prosim, naj mi ne zameri.

Najprej izrekam zahvalo svojim pokojnim staršem. Brez njune velike skrbnosti, spodbujanja in zaupanja nebi prišel kaj dosti daleč.

Zahvala gre tudi kolegu Francu Žlahtiču, ki me je vpeljal na področje elektromagnetne združljivosti v elektroenergetskih postrojih. Človek širokega pogleda, ki mi je odstrl marsikatero spoznanje, tako v stroki kot tudi sicer.

Iz srca bi se rad zahvalil profesorju Petru Žunku, svojemu prvemu mentorju na podiplomskem študiju. Iskrena hvala profesor Žunko za Vašo podporo in razumevanje.

Zahvalo dolgujem tudi kolegu Dušanu Huču, ki me je v začetku leta 2016 zdramil in pognal zastalo kolesje podiplomskega študija ter mi bil v oporo pri uporabi zahtevnega programskega orodja. Hvaležen pa sem tudi drugim kolegom na delovnem mestu, predvsem za pazljivo poslušanje, navdih in sproščujoče vzdušje.

Potem se želim zahvaliti mnogim, ki so mi z veliko dobre volje pomagali, da sem uspel urediti formalnosti: gospem iz študentske pisarne, Marjani Rebernik, Andreji Lavrenčič in Tatjani Lušina, profesorjem Janezu Nastranu, Tomažu Slivniku, Rafku Mihaliču in akademiku profesorju Ivanu Bratku ter sedanjemu mentorju profesorju Igorju Papiču, ki mu gre posebna zahvala za njegove spodbudne besede in zaupanje.

Na koncu, čeravno ne najmanj, sem hvaležen svoji družini, ženi Barbari, ki je potrpežljivo prenašala moja večerno nočna premišljevanja ter sinovoma, Severinu in Ireneju, da sem lahko čas, namenjen njima, porabil za izdelavo tega dela.

V Ljubljani, avgusta 2016

# KAZALO VSEBINE

Zahvala	
Seznam slik	ix
Seznam tabe	lxiii
Seznam krati	c in uporabljenih simbolovxv
Seznam kra	atic in okrajšavxv
Seznam ve	ličin in simbolovxvi
Povzetek	
Abstract	
1 Uvod	5
2 Splošno	o elektromagnetni združljivosti7
3 Elektrom	nagnetne motnje v EEP
3.1 Splo	ošno o elektromagnetnih motnjah9
3.1.1	Vir elektromagnetnih motenj zunaj EEP10
3.1.2	Elektromagnetne motnje zaradi delovanja EEP11
3.2 Nas	tanek motenj pri preklopu ločilnika11
3.2.1	Prehodni pojav potujočih valov11
3.2.2	Frekvence motenj14
3.2.3	Električni oblok pri preklopu ločilnika16
3.3 Prei	nos elektromagnetnih motenj v EEP16
3.3.1	Impedančni prenos17
3.3.2	Induktivni prenos
3.3.3	Kapacitivni prenos

		3.3.4	Prenos s sevanjem	18
4		Zmanjše	evanje motenj v sekundarnih tokokrogih s pasivnimi ukrepi	21
	4.	.1 Osi	nove	21
		4.1.1	Prenosna impedanca kabelskega oklepa	21
		4.1.2	Kabel z enojnim obojestransko ozemljenim oklepom	23
		4.1.3	Kompenzacijski vodnik	24
		4.1.4	Kabel z enojnim enostransko ozemljenim oklepom	26
		4.1.5	Kabli z dvojnim oklepom	26
	4.	.2 Vpl	liv frekvence prehodnih pojavov na pasivne ukrepe	27
		4.2.1	Splošno	27
		4.2.2	Material in oblika	27
		4.2.3	Odvisnost učinkovitosti ukrepov od frekvence	29
	4.	.3 Apl	likacija pasivnih ukrepov	30
		4.3.1	Zmanjševanje pri galvanskem prenosu	32
		4.3.2	Zmanjševanje pri induktivnem prenosu	32
		4.3.3	Zmanjševanje pri kapacitivnem prenosu	33
		4.3.4	Zmanjševanje pri prenosu zaradi sevanja	33
5		Izvedba	pasivnih ukrepov v EEP	35
	5.	.1 Ma	terial in oblika	35
	5.	.2 Uki	repi po sklopih postroja	35
		5.2.1	Ozemljitveni sistem, povezave in izenačitev potencialov	36
		5.2.2	Oblikovanje ozemljitvenega sistema postroja	38
		5.2.3	Zbiralka za izenačitev potencialov	40
		5.2.4	Kabli sekundarnih sistemov	42
		5.2.5	Spajanje kabelskih opletov	42
		5.2.6	Kabelski poteki	44

		5.2.	7	Ločitev različnih zvrsti tokokrogov	. 45
		5.2.	8	Kabelska korita	. 46
		5.2.	9	Omare sekundarnih sistemov	. 48
		5.2.	10	Kompenzacijski vodniki	. 50
		5.2.	11	Vodniki za povezave	. 50
		5.2.	12	Spajanje povezav in opletov	. 51
6		Ret	rospe	ktivna statistična analiza merilnih rezultatov	. 53
	6.	1	Mer	ilna metoda in oprema	. 54
	6.	2	Opis	s merjenih EEP in njihove izvedbe	. 56
	6.	3	Stat	istična analiza	. 58
		6.3.	1	Priprava podatkov	. 59
		6.3.	2	Testiranje vzorcev	. 60
		6.3.	3	Faktorska analiza variance	. 62
		6.3.	4	Povprečne vrednosti prenapetosti	. 76
	6.	4	Pov	zetek poglavja	. 78
7		Prin	nerja	va empiričnih in računskih rezultatov	. 81
	7.	1	Rači	unski model	. 81
		7.1.	1	Parametri modela	. 83
		7.1.	2	Analiza rezultatov računskega modela in primerjava	. 85
8		Pre	dlog l	kriterija	. 91
9		Zak	ljučel	<	. 97
10	)	V	'iri in	literatura	. 99

# SEZNAM SLIK

Slika 3.1	Celotni pojav prehodnih prenapetosti v sekundarnem tokokrogu pri izklopu (le	vo)
	in vklopu (desno) 110-kV ločilnika.	. 13
Slika 3.2	Oblika posamezne prehodne prenapetosti	. 15
Slika 3.3	Spekter prehodne prenapetosti v postroju, izoliranem z zrakom	. 15
Slika 3.4	Spekter prehodne prenapetosti v postroju, izoliranem s plinom (GIS)	. 16
Slika 3.5	Shema impedančnega (galvanskega) prenosa [5]	. 17
Slika 3.6	Shema induktivnega prenosa [5].	. 18
Slika 3.7	Shema kapacitivnega prenosa elektromagnetnih motenj [5]	. 19
Slika 4.1	Shematični prikaz kabelskega oklepa in prenosne impedance $Z_{T}$	. 22
Slika 4.2	Frekvenčna odvisnost prenosne impedance za različne vrste oklepov [1]	. 22
Slika 4.3	Kabel z opletom (zgoraj), predstavljen kot transformator (spodaj) [11]	. 23
Slika 4.4	Razporeditev potenciala na obojestransko ozemljenem opletu in kabels	skih
	vodnikih [11]	. 25
Slika 4.5	Napetost $u_l$ na vodnikih vzdolž katerih poteka ozemljen vodnik [11]	. 25
Slika 4.6	Poenostavljen prikaz kožnega pojava v okroglem in pravokotnem vodniku	. 28
Slika 4.7	Pravilo $\lambda/10$ za določanje še učinkovite dolžine povezave [11]	. 30
Slika 4.8	Izračunana še učinkovita dolžina povezave, ki ni v zemlji, pri pravilu $\lambda/10~[11]$	. 30
Slika 4.9	Mehanizmi prenosa elektromagnetnih motenj v EEP [11]	.31
Slika 5.1	Načelo sistema izenačitve potencialov [18].	. 37
Slika 5.2	Shema oblikovanja ozemljitvene mreže postroja [14]	. 39
Slika 5.3	Shema oblikovanja ozemljitvene mreže stavbe [14]	. 40
Slika 5.4	Shema povezave zbiralk za primer RTP 110 kV/SN [9]	.41
Slika 5.5	Skica zbiralke za izenačitev potencialov [9]	. 42
Slika 5.6	Shematski prikaz kabelskega opleta	. 42
Slika 5.7	Shematični prikaz izvedbe spoja kabelskega opleta	. 43
Slika 5.8	Primer EMC uvodnice z vzmetnimi peresi	. 44
Slika 5.9	Primer EMC uvodnice s konusom	. 44

Slika 5.10	Primer EMC uvodnice s krožno vzmetjo	. 44
Slika 5.11	Priporočeni potek tokokroga med napravami	. 45
Slika 5.12	Ločitev tokokrogov [15]	. 46
Slika 5.13	Potek vodnikov tokokroga	. 46
Slika 5.14	Vrste kabelskih korit po primernosti [15]	. 47
Slika 5.15	Pravilen – neprekinjen – potek kabelskega korita skozi zid [15]	. 47
Slika 5.16	Neprekinjen odcep kabelskega korita [15]	. 47
Slika 5.17	Faradayeva kletka kabelskega kanala (levo), magnetno polje okrog kanala (des	sno)
	[11]	. 48
Slika 5.18	Povezave za izenačitev potencialov v komandni omari	. 49
Slika 5.19	Izvedba spojev (opleta na zbiralko, ozemljitvene povezave ipd.)	. 51
Slika 6.1	Enopolna shema daljnovodnega polja	. 54
Slika 6.2	Enopolna shema zveznega polja	. 54
Slika 6.3	Šum v posnetku tokokroga napetostnika in upoštevani del posnetka	a s
	prenapetostmi	. 60
Slika 6.4	Graf verjetnosti normalne porazdelitve vzorca tok_KP postroj EEP-28	. 61
Slika 6.5	Izrez iz vzorca tok_ST v EEP-21	. 61
Slika 6.6	Del opisnih statistik vzorca tok_ST v EEP-21	. 62
Slika 6.7	Graf povprečja pri kablu z opletom in brez opleta za tokokrog nap_KP	. 63
Slika 6.8	Graf povprečja pri kablu z opletom in brez opleta za tokokrog nap_ST	. 64
Slika 6.9	Graf povprečja pri kablu z opletom in brez opleta za tokokrog tok_KP	. 64
Slika 6.10	Graf povprečja pri kablu z opletom in brez opleta za tokokrog tok_ST	. 65
Slika 6.11	Graf povprečja pri ozemljitveni mreži iz Cu in FeZn za tokokrog nap_KP	. 65
Slika 6.12	Graf povprečja pri ozemljitveni mreži iz Cu in FeZn za tokokrog nap_ST	. 66
Slika 6.13	Graf povprečja pri ozemljitveni mreži iz Cu in FeZn za tokokrog tok_KP	. 66
Slika 6.14	Graf povprečja pri ozemljitveni mreži iz Cu in FeZn za tokokrog tok_ST	. 67
Slika 6.15	Graf povprečja pri zgoščeni in nezgoščeni ozemljitveni mreži za tokokrog nap_	_KP.
Slika 6.16	Graf povprečja pri zgoščeni in nezgoščeni ozemljitveni mreži za tokokrog nap_	_ST.
Slika 6.17	Graf povprečja pri zgoščeni in nezgoščeni ozemljitveni mreži za tokokrog tok_	_KP.
		. 09

Slika 6.18	Graf povprečja pri zgoščeni in nezgoščeni ozemljitveni mreži za tokokrog tok_ST. 69
Slika 6.19	Graf povprečja pri postrojih s kompenzacijskim vodnikom in brez za tokokrog nap_KP70
Slika 6.20	Graf povprečja pri postrojih s kompenzacijskim vodnikom in brez za tokokrog nap_ST70
Slika 6.21	Graf povprečja pri postrojih s kompenzacijskim vodnikom in brez za tokokrog tok_KP71
Slika 6.22	Graf povprečja pri postrojih s kompenzacijskim vodnikom in brez za tokokrog tok_ST72
Slika 6.23	Graf povprečja pri postrojih z gosto in redko povezavo med komandnim prostorom in stikališčem za tokokrog nap_KP.
Slika 6.24	Graf povprečja pri postrojih z gosto in redko povezavo med komandnim prostorom in stikališčem za tokokrog tok_KP73
Slika 6.25	Graf povprečja pri kablu z opletom in brez opleta za združene tokokroge73
Slika 6.26	Graf povprečja pri ozemljitveni mreži iz Cu in FeZn za združene tokokroge74
Slika 6.27	Graf povprečja pri zgoščeni in nezgoščeni ozemljitveni mreži za združene tokokroge
Slika 6.28	Graf povprečja pri postrojih s kompenzacijskim vodnikom in brez za združene tokokroge
Slika 6.29	Graf povprečja pri postrojih z gosto in redko povezavo med komandnim prostorom in stikališčem za združene tokokroge
Slika 7.1	Detajl ozemljitvene mreže iz načrta 400-kV polja
Slika 7.2	Shema modela (obkrožene so opazovane točke)
Slika 7.3	Detajl modela in označene opazovane točke v RH
Slika 7.4	Oblika prenapetosti (ordinata: p.u., abscisa: čas v mikrosekundah)
Slika 7.5	Spekter vhodnega signala (ordinata: amplitude frekvenčne komponente, abscisa: frekvenca v megahercih)
Slika 7.6	Graf napetosti za primer Cu vrv 120 mm <sup>2</sup> in kabel z opletom
Slika 7.7	Graf napetosti za primer Cu vrv 120 mm <sup>2</sup> in kabel brez opleta
Slika 7.8	Graf napetosti za primer FeZn trak 40 mm × 4 mm in kabel z opletom
Slika 7.9	Graf napetosti za primer FeZn trak 40 mm × 4 mm in kabel brez opleta

Slika 7.10	Graf napetosti za primer FeZn trak 40 mm×4 mm, kabel z opleton	ו in
	kompenzacijski vodnik	88
Slika 8.1	Primer prenapetosti v EEP-16 in dopustna vrednost	92
Slika 8.2	Primer prenapetosti v EEP-10 in dopustna vrednost	92
Slika 8.3	Analiza primera 1 po statističnem kriteriju.	94
Slika 8.4	Analiza primera 2 po statističnem kriteriju.	95

### SEZNAM TABEL

Tabela 6.1	Podatki merjenih EEP56
Tabela 6.2	ANOVA za tokokrog nap KP (kategorija: kabel)63
Tabela 6.3	ANOVA za tokokrog nap ST (kategorija: kabel)63
Tabela 6.4	ANOVA za tokokrog tok KP (kategorija: kabel)64
Tabela 6.5	ANOVA za tokokrog tok ST (kategorija: kabel)65
Tabela 6.6	ANOVA za tokokrog nap KP (kategorija: material ozemljitvene mreže)65
Tabela 6.7	ANOVA za tokokrog nap ST (kategorija: material ozemljitvene mreže)
Tabela 6.8	ANOVA za tokokrog tok KP (kategorija: material ozemljitvene mreže)
Tabela 6.9	ANOVA za tokokrog tok ST (kategorija: material ozemljitvene mreže)67
Tabela 6.10	ANOVA za tokokrog nap KP (kategorija: zgostitev ozemljitvene mreže)67
Tabela 6.11	ANOVA za tokokrog nap ST (kategorija: zgostitev ozemljitvene mreže) 68
Tabela 6.12	ANOVA za tokokrog tok KP (kategorija: zgostitev ozemljitvene mreže) 68
Tabela 6.13	ANOVA za tokokrog tok ST (kategorija: zgostitev ozemljitvene mreže) 69
Tabela 6.14	ANOVA za tokokrog nap KP (kategorija: kompenzacijski vodnik)70
Tabela 6.15	ANOVA za tokokrog nap ST (kategorija: kompenzacijski vodnik)
Tabela 6.16	ANOVA za tokokrog tok KP (kategorija: kompenzacijski vodnik)71
Tabela 6.17	ANOVA za tokokrog tok ST (kategorija: kompenzacijski vodnik)71
Tabela 6.18	ANOVA za tokokrog nap KP (kategorija: povezava med ST in KP)72
Tabela 6.19	ANOVA za tokokrog tok KP (kategorija: povezava med ST in KP)73
Tabela 6.20	ANOVA za združene tokokroge (kategorija: kabli)73
Tabela 6.21	ANOVA za združene tokokroge (kategorija: material ozemljitvene mreže) 74
Tabela 6.22	ANOVA za združene tokokroge (kategorija: zgostitev ozemljitvene mreže) 74
Tabela 6.23	ANOVA za združene tokokroge (kategorija: kompenzacijski vodnik)75
Tabela 6.24	ANOVA za združene tokokroge (kategorija: povezava med KP in ST)
Tabela 6.25	Povprečne vrednosti glede na okolje in pasivne ukrepe

xiv		
		_

Tabela 6.26	Povprečna raven prenapetosti glede na okolje in pasivne ukrepe	.77
Tabela 6.27	Enosmerna ANOVA – p-vrednost po tokokrogih in faktorjih	78
Tabela 6.26	Enosmerna ANOVA – p-vrednost po faktorjih za združene tokokroge	79
Tabela 7.1	Seznam frekvenc za izračun	85
Tabela 7.2	Izračunane prenapetosti na vodnikih	86
Tabela 8.1	Opisna statistika za tok_ST v EEP-16	94
Tabela 8.2	Opisna statistika za nap_ST v EEP-10	95

# SEZNAM KRATIC IN UPORABLIENIH SIMBOLOV

### SEZNAM KRATIC IN OKRAJŠAV

ang.	angleško
ANOVA	analiza variance
CDEGS	ang. Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis
CIGRÉ	fr. Conseil International des Grands Réseaux Electriques
CISPR	fr. Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
EAxy	110-kV polje XY
EEP	elektroenergetski postroj
EES	elektroenergetski sistem
EIMV	Elektroinštitut Milan Vidmar
EMC	elektromagnetna združljivost
EN	evropski standard
FeZn	pocinkano jeklo
fr.	francosko
GI	glavne zbiralke sistema 1
GIS	ang. Gas Insulated Switchyard
H07V-K	večžični vodnik, v starem poimenovanju P/F
H07V-R	vodnik t. i. vrv
IEC	ang. International Electrotehnical Commission; mednarodni elektrotehniški standard
КР	komandni prostor
L3	faza 3 v trifaznem napetostnem sistemu
Nap KP, nap_KP	tokokrog napetostnika, ki se konča v komandnem prostoru
Nap ST, nap_ST	tokokrog napetostnika, ki se konča v relejni hišici ali krmilni omarici v VN stikališču
nem.	nemško
NYCY	tip kabla

PEC	ang. Parallel Earthing Conductor
Q0	odklopnik
Q1	zbiralnični ločilnik
Q9	daljnovodni ločilnik
RH	relejna hišica
RTP	razdelilna transformatorska postaja
SES	ang. Safe Engineering Services & technologies Ltd.
SF <sub>6</sub>	žveplov heksafluorid
SIST	Slovenski (SI) inštitut za standardizacijo; slovenski standard
slov.	slovensko
SN	srednja napetost (več kot 1 kV in manj kot 110 kV)
ST	stikališče
T1	tokovni instrumentni transformator
Т5	napetostni instrumentni transformator
TIT	tokovni instrumentni transformator
Tok KP, tok_KP	tokokrog tokovnika, ki se konča v komandnem prostoru
Tok ST, tok_ST	tokokrog tokovnika, ki se konča v relejni hišici ali krmilni omarici v VN stikališču
TPV	tipska preskusna vrednost
VDE	nem. Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
VN	visokonapetostni (v tem delu je mišljena napetost 110 kV in več)

# SEZNAM VELIČIN IN SIMBOLOV

Natančnejši pomen simbolov in njihovih indeksov je razviden iz ustreznih slik ali pa je pojasnjen v spremljajočem besedilu, kjer je simbol uporabljen.

$\bar{x}$	povprečna vrednost
μ	skupna permeabilnost
$\mu_0$	permeabilnost = $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
а	stranica
A, A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub>	površina
b	stranica

C <sub>E</sub>	parazitna kapacitivnost
C <sub>K</sub>	parazitna kapacitivnost
Cq	parazitna kapacitivnost
Cs	kapacitivnost
Cu	baker
C <sub>V</sub>	kapacitivnost med VN delom in zemljo
d	razdalja
d <sub>v</sub>	debelina prevodne plasti
E <sub>odd</sub>	električna poljska jakost (oddajnika)
E	napetost med zbiralkami in zemljo
ERP	efektivna sevana moč iz antene
f	frekvenca
Fe	železo
f <sub>min</sub>	minimalna frekvenca vala
f <sub>n</sub>	faktor
$f_s$	faktor
f <sub>u</sub>	faktor
G <sub>V</sub>	odvodnost med VN delom in zemljo
Н	magnetno polje
i	tok
i <sub>2</sub>	tokovni val od VN naprave naprej
i <sub>c</sub>	tok v kapacitivnost VN naprave
i <sub>Cm</sub>	maksimalni tok skozi kapacitivnost VN naprave
I <sub>E</sub>	tok motnje v primarnem tokokrogu
i <sub>E</sub>	tok motnje v ozemljitvenem sistemu
<i>I</i> <sub>1</sub>	tok vzdolž kabelskega opleta
iL	tok v zbiralkah
i <sub>r</sub>	reflektirani (odbiti) tokovni val
i <sub>V</sub>	tokovni val
k	konstanta
k <sub>mEMC</sub>	faktor EMC obrobja
1	dolžina

L	induktivnost
L <sub>E</sub>	induktivnost ozemljitvenega sistema
L <sub>V</sub>	induktivnost zanke VN vodnik – zemlja
I <sub>Z</sub>	dolžina od mesta VN naprave do konca zbiralk
М	medsebojna induktivnost
Mean	povprečna vrednost
M <sub>K</sub>	medsebojna induktivnost
NS	število vzorcev (točk posnetka)
р	testna statistika
r <sub>V</sub>	polmer vodnika
r	razdalja
R	upornost
r <sub>a</sub>	razdalja med oddajnikom (anteno) in mestom učinka
R <sub>E</sub>	upornost ozemljitvenega sistema
r <sub>G</sub>	geometrijska srednja razdalja
$R_V$	upornost zanke VN vodnik – zemlja
S	standardna deviacija
S	vzorčenje
Т	perioda
T <sub>i</sub>	časovna konstanta VN naprave
T <sub>M</sub>	čas trajanja meritve
T <sub>S</sub>	časovna konstanta izklopljenega dela zbiralk
U <sub>d</sub>	dopustna napetost
U <sub>E</sub>	napetost med koncema kabelskega opleta
U <sub>E</sub>	napetost med deli ozemljitvenega sistema
$U_{i,} u_{i}$	inducirana napetost
U <sub>I</sub> , u <sub>I</sub>	napetost vodnika proti ozemljitvi (asimetrična, vzdolžna)
$U_L$	napetost med vodnikom sekundarnega tokokroga in ozemljitvijo
<i>U</i> <sub>11</sub>	napetost med vodnikom in ozemljitvijo
U <sub>12</sub>	napetost med vodnikom in ozemljitvijo
U <sub>m</sub>	največja napetost med poloma ločilnika
U <sub>n</sub>	nazivna medfazna napetost
U <sub>NL</sub>	napetost med vodnikom sekundarnega tokokroga in ozemljitvijo

Uq	napetost med vodnikoma (simetrična, prečna)
U <sub>r</sub>	reflektirani (odbiti) napetostni val val
U <sub>TPV</sub>	napetost pri tipskem preskusu
U <sub>v</sub>	napetostni val
V <sub>V</sub>	hitrost vala
Z <sub>Ot</sub>	impedanca sekundarnega navitja instrumentnega transformatorja
$Z_1, Z_2, Z_3$	valovna impedanca na odcepu zbiralke do VN naprave
Z <sub>E</sub>	impedanca
Zi	vhodna impedanca sekundarne naprave
Z <sub>K</sub>	skupna impedanca dveh tokokrogov
Z <sub>T</sub>	prenosna impedanca
Z <sub>V</sub>	valovna impedanca
λ	valovna dolžina
$\mu_r$	relativna permeabilnost
π	konstanta = 3,14159
Φ	magnetni pretok
ρ	specifična upornost vodnika
σ	specifična prevodnost vodnika

### Povzetek

Obravnavan je en od parametrov elektromagnetnega okolja v elektroenergetskem postroju, t.j. prehodne prenapetosti, ki se pojavijo v sekundarnih tokokrogih pri stikalnih preklopih z ločilniki. Opredeljeni so načini prenosa prehodnih prenapetosti v sekundarne tokokroge in nastanek prehodnih prenapetosti. Prikazani so teoretični načini za zmanjševanje prenosa motenj s pasivnimi ukrepi in uporaba pasivnih ukrepov v postroju. Z računskim modelom je prikazan vpliv materiala osnovne ozemljitvene mreže in vrste kabla sekundarnega tokokroga na prehodno prenapetost. Rezultat računskega modela kaže, da je raven prenapetosti v kablu z opletom nižja od tiste v kablu brez opleta. V retrospektivni statistični analizi so na merilnih rezultatih iz različnih postrojev raziskani vplivi pasivnih ukrepov. Pričakovano najbolj izstopa nizka raven prenapetosti v kablih sekundarnih tokokrogov z opletom. Drugi pasivni ukrepi so izraženi manj izrazito. Rezultati analize kažejo na več neznanih parametrov postroja. Iz spremljajočih podatkov merilnih rezultatov ni bilo možno ugotoviti neznanih vplivnih parametrov. Vendar lahko sklepamo, da so dodatno potrebni parametri še vsaj kakovost izvedbe pasivnih ukrepov in podrobnejši podatki instrumentnih transformatorjev. Zasnovan je kriterij za ocenjevanje zagotovitve elektromagnetne združljivosti v elektroenergetskih postrojih. Kriterij temelji na statistični analizi izmerjenih prehodnih prenapetosti in upoštevanju tipske preskusne vrednosti za odpornost sekundarne naprave.

Ključne besede: elektroenergetski postroj, elektromagnetna združljivost, elektromagnetne motnje, sekundarni sistem, pasivni ukrepi, zmanjševanje motenj, statistika

### ABSTRACT

Considered is one of the parameters of the electromagnetic environment in the electric power substation, i.e. transient over-voltage that occur in the secondary circuits at switching manoeuvres with disconnectors. Described are transmission modes of transient over-voltage to secondary circuits and the formation of transient over-voltage. The theoretical background of passive means and the use of passive means in substation for reducing interference transmission are shown. According to the computing model the impact of ground network material and cable type of secondary circuit on transients are shown. The result of numerical modelling shows that the level of over-voltage in the cable with the shield is lower than that of the cable without shield. In a retrospective statistical analysis of the measurement results from different substations the effects of passive means are studied. As expected it stands out the lowest over-voltages are on the secondary circuit cables with shield. Impact of other passive means on over-voltages is less pronounced. The results of the analysis indicate several unknown parameters. From the accompanying data of measurement results, it was not possible to determine the unknown influencing parameters. However, it can be concluded that the additional parameters required are at least the quality of the implementation of passive means and more detailed information about instrument transformers. The criterion for evaluation of electromagnetic compatibility assurance in electric power plants is designed. The criterion is based on a statistical analysis of the measured transient over-voltages and immunity type test value of secondary equipment.

Key words:electric power substation, electromagnetic compatibility,<br/>electromagnetic disturbance, secondary system, passive means,<br/>interference reducing, statistics

### 1 Uvod

V modernih postrojih elektroenergetskega sistema (EES) so že dlje časa vgrajene mikroprocesorske in mikroračunalniške naprave. Moderni sistem vodenja EES namreč temelji na množici podatkov, ki jih pošiljajo in sprejemajo naprave za vodenje, zaščito in meritve v posameznem elektroenergetskem postroju (EEP). Te naprave označujemo s pojmom sekundarne naprave za razliko od primarnih naprav, ki so energetski, visokonapetostni del postroja. Sekundarne naprave med seboj in s sekundarnim delom primarnih naprav (npr. z instrumentnimi transformatorji, stikalnimi napravami) povezujejo sekundarni tokokrogi. Sekundarne naprave in tokokroge skupaj poimenujemo z izrazom sekundarni sistem.

Elektroenergetski postroj je zelo posebno okolje, ki ga zaradi lastnosti (t.j. vseh vrst elektromagnetnih pojavov v njem in njihovih velikosti ter frekvenc) imenujemo elektromagnetno okolje. V tem okolju so različni viri elektromagnetnih motenj, ki vplivajo na druge naprave znotraj postroja. Vpliv na sekundarno napravo se pokaže z njenim motenim delovanjem, ki največkrat pomeni napačno informacijo, v hujših primerih pa je posledica celo napačno delovanje elektroenergetske naprave. Končna posledica je nezanesljivost delovanja EES. Zato morajo vgrajene sekundarne naprave imeti zadostno odpornost proti elektromagnetnim motnjam.

Po drugi strani je treba v EEP vzpostaviti takšno elektromagnetno okolje, ki bo primerno za vgradnjo modernih sekundarnih naprav. To pomeni, da je raven elektromagnetnih motenj dovolj nizka. Upoštevanje obojega skupaj, t.j. odpornosti naprav in ustreznega elektromagnetnega okolja, tvori elektromagnetno združljivost.

Raven elektromagnetnih motenj lahko znižamo na pasivni in aktivni način. Aktivni način so vse dodatne naprave oziroma elementi, ki so dograjeni sekundarnim tokokrogom (npr. feritni obročki, prenapetostni odvodniki ipd.). S pasivnim načinom oziroma pasivnimi ukrepi pa razumemo tiste elemente postroja, ki so že sicer na tak ali drugačen način del EEP – npr. kot del ozemljitvenega sistema ali izenačitve potencialov.

O osnovah pasivnih ukrepov za elektroenergetske postroje govori poglavje 4, kjer je povzeta zasnova, ki je bila opisana že v študiji, izdelani za Raziskovalno skupnost Slovenije [1,2]. V magistrskem delu [3], ki je nastalo med izdelavo omenjene študije, je podrobneje opisan način uporabe ukrepov. To je bilo v času, ko je nastajala 400-kV zanka Nikola Tesla in so bili zgrajeni postroji RTP 400/110 kV Maribor, RTP 400/220 kV Beričevo in RTP 400/220/110 kV Divača [4] in so v njih bolj ali manj dosledno upoštevali uporabo pasivnih

ukrepov. Z vgradnjo mikroprocesorske opreme za vodenje in zaščito je v nadaljnjih letih prišlo do modernizacije tudi v drugih EEP. Vendar so si spoznanja o uporabi pasivnih ukrepov le s težavo utirala pot v starejše EEP. Leta 1987 je bila končana študija [5] na Elektroinštitutu Milan Vidmar (EIMV), v kateri so konkretizirani pasivni ukrepi. Hkrati je opredeljeno, da se ravni prenapetosti v sekundarnih tokokrogih ter učinkovitost ukrepov ocenjuje z merjenjem prehodnih prenapetosti pri preklopu ločilnika. Takšen način je bil predviden že v 2. fazi študije [2].

O potrebi ugotavljanja motenj v sklopu širše analize elektromagnetnega okolja v EEP piše tudi v najnovejši publikaciji CIGRÉ 535 [6, str. 243] iz leta 2013. Piše pa tudi o prednostih in slabostih ugotavljanja stanja elektromagnetne združljivosti z merjenjem v postroju. Med prednostmi izpostavlja tudi možnost uporabe dejanskih motenj (npr. preklopa z ločilnikom). Tako lahko ugotovimo dejansko stanje motenj v sekundarnih tokokrogih EEP pri normalnem obratovanju, česar ni možno na noben drug način. V praksi izvedba ukrepov – izenačitve potencialov, ozemljitvenega sistema, poteka kablov idr. – ni idealna niti pri novogradnji. Prav idealno izvedbo predpostavljajo izračuni raznih simulacij. Tudi če bi pri projektiranju novega EEP izračunali, kolikšne bodo prehodne prenapetosti v sekundarnih tokokrogih, bi to veljalo le v izračunu. Predvsem različna odstopanja od projektnih zahtev med gradnjo in nedoslednosti pri izvedbi ukrepov se pokažejo v povečanih prehodnih prenapetostih. Če pa v življenjski dobi EEP različni vplivi degradirajo ukrepe (npr. korozija), se stanje še poslabša. Zato je zelo pomembno ugotoviti dejansko stanje elektromagnetne združljivosti znotraj EEP. Lahko pa s simulacijskimi izračuni primerjamo različne rešitve med seboj in na tej podlagi izberemo primerno. Kratek vpogled v simulacijski izračun je v poglavju 7.

Kot pomembno pomanjkljivost pri ocenjevanju zagotovitve elektromagnetne združljivosti z merjenjem v EEP Cigréjeva publikacija [6] izpostavlja pomanjkanje enotnega kriterija. Z retrospektivno analizo merilnih rezultatov v poglavju 6 in s predlaganim kriterijem v poglavju 8 poskušam pripraviti prispevek za enotno ocenjevanje posameznega EEP z merjenjem prehodnih prenapetosti pri preklopu ločilnika.

# 2 Splošno o elektromagnetni združljivosti

Širše vzeto je elektromagnetna združljivost področje elektrotehnike, ki obravnava dejavnosti, povezane z ugotavljanjem motenja naprav ali motenj, ki jih naprave povzročajo pri svojem delovanju, vzrokov za nastanek motenj in z ukrepi za njihovo zmanjšanje.

Merljiva posledica elektromagnetnih motenj v prehodnem stanju so prehodne prenapetosti, ki nastanejo v električnih tokokrogih in napravah sekundarnega sistema EEP. Raven prehodnih prenapetosti lahko ugotovimo z meritvami.

Pri obravnavanju elektromagnetne združljivosti uporabljamo definicije pojmov, podanih v Mednarodnem elektrotehniškem slovarju [7] v poglavju o elektromagnetni združljivosti:

- Elektromagnetno okolje (ang. electromagnetic environment, SIST IEC 60050(161-01-01)) so vsi elektromagnetni pojavi, ki obstajajo na danem kraju.
- Elektromagnetna motnja (ang. electromagnetic disturbance, SIST IEC 60050(161-01-05)) je katerikoli elektromagnetni pojav, ki lahko poslabša delovanje naprav, opreme ali sistemov ali neugodno vpliva na živo ali neživo snov.
- Elektromagnetna motenost oziroma elektromagnetno motenje (ang.
  electromagnetic interference EMI, SIST IEC 60050(161-01-06)) je poslabšanje
  delovanja opreme, prenosnih kanalov ali sistemov, ki ga povzroči
  elektromagnetna motnja.
- Elektromagnetna združljivost (ang. electromagnetic compatibilty EMC, SIST IEC 60050(161-01-07)) je zmožnost opreme ali sistemov, da v svojem elektromagnetnem okolju delujejo zadovoljivo in ne vnašajo nedopustnih elektromagnetnih motenj ničemur v tem okolju.
- Prehodni (pridevnik), prehodni pojav (samostalnik) (ang. transient EMC, SIST IEC 60050(161-02-01)) se nanaša na tiste pojave ali veličine ali jih označuje, ki se spreminjajo med dvema zaporednima stanjema v času, ki je kratek v primerjavi s časom opazovanja.

# 3 Elektromagnetne motnje v EEP

Elektromagnetna okolja in njihove lastnosti lahko dokaj dobro določimo s preskusi oziroma meritvami. Prenosne zakonitosti pa lahko opredelimo s pomočjo teoretične elektrotehnike in praktičnimi izkušnjami. V splošni elektrotehniški literaturi je mnogo analiziranih primerov, zato so v nadaljevanju samo na kratko navedene osnove nastanka elektromagnetnih motenj v EEP in zakonitosti pri njihovem prenosu.

#### 3.1 Splošno o elektromagnetnih motnjah

Elektromagnetne motnje, ki se v določenem delu postroja lahko pojavijo, delimo po njihovih lastnostih in načinu motenja. Mednarodna standardizacija (IEC, CISPR) jih obravnava v frekvenčnem obsegu med 0 Hz in precejšnjim delom gigaherčnega področja.

Glede na vrsto delimo elektromagnetne motnje na:

- nizkofrekvenčne motnje po vodniku,
- sevane nizkofrekvenčne motnje (stacionarno in prehodno magnetno polje ter električno polje),
- visokofrekvenčne motnje po vodniku (bodisi je vzrok v tokokrogu ali gre za inducirano napetost),
- sevane visokofrekvenčne motnje (elektromagnetno polje),
- elektrostatične razelektritve,
- jedrski elektromagnetni impulz.

Po načinu prodora v sekundarni sistem delimo elektromagnetne motnje v:

- motnje po vodniku energija motnje pride v napravo po enem ali več vodnikih;
  mednje spadajo spremembe toka ali napetosti ter vključujejo harmonike,
  medharmonike, enosmerne komponente, posledice prehodnih pojavov,
  prekinitev toka ali napetosti in njuno nihanje, posledice stikanj ali elektrostatičnih
  ter atmosferskih praznitev;
- sevane motnje energija motnje pride v napravo kot elektromagnetno valovanje;
  mednje spadajo elektromagnetna polja elektroenergetskih in signalnih vodov,
  anten oddajnikov (radijski, televizijski, radarski, amaterski, mobilne telefonije ipd.),

naprav (usmerniške-pretvorniške naprave, računalniški sistemi, stikalne naprave) in atmosferskih razelektritev.

V okviru EEP delimo prehodne prenapetosti tudi po tem, kje je izvor njihovega nastanka, in sicer:

- v primarnem delu EEP (stikališče, daljnovod, transformator, stikalna celica ipd.),
- v sekundarnem delu EEP, t.j. znotraj sekundarne opreme (kontaktorji, releji, naprave lastne rabe ipd.),
- drugje (atmosferske razelektritve, elektrostatične razelektritve, radiofrekvenčni oddajniki – npr. mobilni telefon, bazne postaje mobilne telefonije, ročna radijska postaja ipd.).

Elektromagnetne motnje se v sekundarnem tokokrogu v vsakem primeru izrazijo kot prenapetost in ker je ta pojav prehodnega značaja, ga imenujemo prehodna prenapetost.

Prehodne prenapetosti delimo po mednarodnem elektrotehniškem slovarju [7] na:

- asimetrične, pri katerih gre za napetost med vodnikom in, po navadi, ozemljitvijo,
- simetrične, pri katerih gre za napetost med katerimakoli dvema vodnikoma iz določene skupine vodnikov.

#### 3.1.1 Vir elektromagnetnih motenj zunaj EEP

Najbolj vplivni naravni vir elektromagnetnih motenj zunaj EEP so atmosferske razelektritve (katere vidni del imenujemo strela). To je pojav, pri katerem teče električni naboj med oblakom in ozemljenim delom. Velikost toka, ki teče v kanalu strele, je reda nekaj deset kiloamperov. Točnejše vrednosti lahko ugotovimo z meritvami. Pomembni podatki pri ugotavljanju vpliva atmosferske razelektritve na nastanek prehodnih prenapetosti v sekundarnih tokokrogih so:

- strmina toka čela strele di/dt (največkrat nekaj deset kA/µs do reda 100 kA/µs), ki je pri direktnem udaru v EEP večja od tiste, ki nastane pri udaru v nadzemni vod,
- trajanje čela strele (od nekaj mikrosekund do nekaj deset mikrosekund).

Med umetnimi viri so najpogosteje različni radijski oddajniki, npr. bazne postaje mobilne telefonije, radiodifuzni oddajniki, radijske ročne prenosne postaje ipd. Pri frekvencah radijskih oddajnikov lahko privzamemo, da gre za daljno polje, kjer je električna poljska jakost dana z enačbo [8]:

$$E_{odd} = \frac{k \cdot \sqrt{ERP}}{r_a} \tag{3.1}$$

kjer so:

-	
E <sub>odd</sub>	električna poljska jakost (zaradi oddajnika) [V/m],
k	konstanta (za večino virov je 7; za prenosne radijske postaje je 3),
ERP	efektivna sevana moč iz antene [W],
r <sub>a</sub>	razdalja med oddajnikom in mestom učinka [m].

#### 3.1.2 Elektromagnetne motnje zaradi delovanja EEP

V okviru dogodkov v VN delu EEP najpogosteje najdemo vzrok nastanka prehodnih prenapetosti v sekundarnih tokokrogih v dveh skupinah:

- delovanje EEP, kamor spadajo različni stikalni preklopi v stikališčih oziroma stikalnih napravah,
- kratki stiki, kamor štejemo vse vrste od različnih tipov enofaznih do trifaznih.

Stikalni preklopi so v delovanju EEP normalni del, ki se dogaja po potrebi. Razlikujemo stikalne preklope z ločilniki od stikalnih preklopov z odklopniki.

Trajanje prenapetosti, ki se pri tem pojavijo, je sorazmerno času preklopa. Pri ločilniku trajajo skoraj ves čas premikanja polov. Pri odklopniku pa je zaradi velike hitrosti premikanja stikalnega dela odklopnika pojav prenapetosti zelo kratek. Praksa kaže tudi, da je prenapetost pri izklopu manjša od prenapetosti pri vklopu. To po vsej verjetnosti lahko pojasnimo s konstrukcijo odklopnika, ki je konstruiran za izklapljanje s čim manjšim oblokom.

Razmere ob kratkem stiku, predvsem obločnem, so do neke mere podobne stikalnim preklopom z ločilnikom, le da je pri kratkem stiku pretok električnega naboja oziroma njegova sprememba mnogo večja.

#### 3.2 Nastanek motenj pri preklopu ločilnika

#### 3.2.1 Prehodni pojav potujočih valov

Prehodni pojav v postroju nastane zaradi potujočih valov, ki se pojavijo pri preklopu, in zaradi lastnega nihanja primarnega dela postroja.

Prehodni pojav se da opisati z uporabo teorema superpozicije [1]. Na mestu spremembe priklopimo enosmerno napetost. Njena amplituda je enaka negativni razliki napetosti po spremembi in napetosti pred spremembo. Po priklopu napetosti se pojavi val  $u_v$ , ki se širi v obe smeri, in se na spremembah v tokokrogu, kjer se spremeni valovna impedanca (npr. pri instrumentnih transformatorjih), delno odbija. Če je napetost priklopljena med VN

delom in zemljo, sta oba vala, ki se širita po VN delu, enake polaritete. Tudi vala po zemlji imata enako polariteto, vendar nasprotno kot vala na VN delu. Če pa je napetost priklopljena med pola ločilnika, sta vala, ki se širita s tega mesta različnih polaritet. Z napetostnim valom se pojavi tudi tokovni val  $i_V$ . Njegova velikost je odvisna od impedance, ki jo sestavljajo upornost  $R_V$  in induktivnost  $L_V$  zanke VN vodnik – zemlja ter odvodnost  $G_V$  in kapacitivnost  $C_V$  med VN delom in zemljo. [1] Pri visokih frekvencah lahko upornost  $R_V$  in odvodnost  $G_V$  zanemarimo. Impedanca, ki jo imenujemo valovna impedanca, je:

$$Z_V = \sqrt{\frac{L_V}{C_V}} \tag{3.2}$$

Pri podatkih iz študije [1] za  $L_V$  = 1,667 µH in  $C_V$  = 6,67 pF dobimo  $Z_V$  = 500  $\Omega$ .

Hitrost vala, ki se širi po, npr. zbiralkah, izoliranih z zrakom, je:

$$v_V = \sqrt{\frac{1}{L_V C_V}} \tag{3.3}$$

Če vstavimo gornje vrednosti v enačbo (3.3) dobimo hitrost vala 300·10<sup>6</sup> m/s oziroma 300 m v eni mikrosekundi.

Razmerje med napetostjo reflektiranega (odbitega)  $u_r$  in vpadnega vala  $u_v$  na mestu, kjer val naleti na drugo impedanco  $Z_2$ , je [1]:

$$\frac{u_r}{u_v} = \frac{(Z_2 - Z_V)}{(Z_2 + Z_V)}$$
(3.4)

Hkrati z napetostjo se deloma odbije tudi tokovni val *i*<sub>r</sub>, katerega velikost je [1]:

$$i_r = -\frac{u_r}{Z_V} \tag{3.5}$$

V dejanskih razmerah v postroju se napetostni val pojavi pri preklopu ločilnika, ko nastane oblok. Amplituda napetostnega vala, ki se pojavi v primarnem, t.j. visokonapetostnem delu EEP, je odvisna od vrste preklopa.

Pri vklopu nastane prvi preboj obloka med poloma ločilnika takrat, ko je napetostna trdnost manjša od napetosti med njima. Največjo napetost med poloma  $u_m$ , ki je hkrati temenska vrednost fazne napetosti, določa [1]:

$$u_m = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \tag{3.6}$$

Preboju sledi kratko dušeno nihanje, potem oblok za kratek čas ugasne in za tem spet nastane preboj, kar se ponavlja dokler kontakta ločilnika nista staknjena. Vsakič je preboj odvisen od prebojne trdnosti med poloma ločilnika in se zmanjšuje z manjšanjem razdalje. Dušenje nihanja je določeno s časovno konstanto, ki je odvisna od kapacitivnosti in upornosti tistega dela zbiralk, ki ga vklapljamo, proti zemlji.

Prenapetost, ki nastane pri izklopu ločilnika je [1]:

$$u_m = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_n \cdot (1 + e^{\left(-\frac{T}{2 \cdot T_S}\right)})$$
(3.7)

pri čemer so:

*u<sub>m</sub>* največja sprememba napetosti,

*U<sub>n</sub>* nazivna medfazna napetost,

T perioda (pri 50 Hz je perioda 20 ms),

*T<sub>s</sub>* časovna konstanta, ki jo določata kapacitivnost in upornost izklopljenega dela zbiralk proti zemlji.

Iz enačbe (3.7) ugotovimo, da je lahko prenapetost pri izklopu za faktor 2 večja od prenapetosti pri vklopu, če je časovna konstanta  $T_s \gg T$ , ker je takrat eksponentni člen približno 1. Razlika med prenapetostjo pri izklopu in vklopu je razvidna s slike 3.1.



Slika 3.1 Celotni pojav prehodnih prenapetosti v sekundarnem tokokrogu pri izklopu (levo) in vklopu (desno) 110-kV ločilnika.

Za nastanek prenapetosti v sekundarnem tokokrogu je pomemben tisti del tokovnega vala, ki teče v kapacitivnost VN naprave -  $i_c$ . Njegovo velikost dobimo po izpeljavi s pomočjo Laplaceove transformacije v [1] in je določen z enačbo (3.8) oziroma (3.9):

$$i_C(t) = i_V(t) + i_r(t) - i_2(t)$$
 (3.8)

oziroma pri predpostavki, da sta valovni upornosti na vsako stran ločilnika enaki, je

$$i_C(t) = 2 \frac{u_m}{Z_V} \cdot e^{\left(-\frac{t}{T_i}\right)}$$
(3.9)

kjer je časovna konstanta  $T_i$  odvisna od kapacitivnosti  $C_K$  VN naprave:

$$T_i = \frac{C_k \cdot Z_V}{2} \tag{3.10}$$

Maksimalni tok  $i_{Cm}$  skozi kapacitivnost  $C_K$ , z upoštevanjem maksimuma pri izklopu ločilnika in predpostavki enakih valovnih upornosti na obeh straneh, je:

$$i_{Cm}(t) = \frac{2 \cdot u_m}{2 \cdot Z_V} = \frac{U_n}{Z_V} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$
(3.11)

Po podatkih iz študije [1] bi pri valovni impedanci  $Z_V = 500 \Omega$  in nazivni napetosti  $U_n = 400$  kV tekel skozi kapacitivnost VN naprave tok  $i_{Cm} = 0,625$  kA.

#### 3.2.2 Frekvence motenj

Po nekaj prehodih čez mesta s spremembo impedance se zgodi, da je celotni VN del postroja prekrit z valovanjem, ki ima različne frekvence, na kar vplivajo tudi različne kapacitivnosti (npr. instrumentnih transformatorjev).

Meritve pokažejo, da je prehodna prenapetost, ki se pojavi v sekundarnem tokokrogu, visokofrekvenčni in dušeni pojav (slika 3.2). Z meritvami, ki so bile podlaga referatu [9], je bilo tudi ugotovljeno, da imajo posamezne prenapetosti v EEP, izoliranih z zrakom, frekvenco nekaj megahercev – tipično med 1 in 5 MHz (slika 3.3). V plinsko izoliranih postrojih (SF<sub>6</sub>) pa imajo prenapetosti frekvenco nekaj deset megahercev – tipično med 10 in 60 MHz (slika 3.4).

Minimalno frekvenco prehodnega pojava lahko ugotovimo [1], če upoštevamo, da se napetostni val na koncu zbiralk odbije z isto polariteto, pri kapacitivnostih VN naprav pa z nasprotno polariteto. Tako nastane nihanje, katerega polovica valovne dolžine je enaka dvojni dolžini od VN naprave do konca zbiralk. Ker valovno dolžino pri hitrosti in frekvenci določa izraz  $\lambda = v/f$ , je minimalna frekvenca nihanja potujočega vala določena z enačbo:

$$f_{min} = \frac{v_V}{4 \cdot l_Z} \tag{3.12}$$

kjer sta:

 $v_V$  hitrost valovanja,

 $I_Z$  dolžina od mesta VN naprave do konca zbiralk.

Primer: pri izračunani hitrosti  $v_V = 300 \cdot 10^6$  m/s in dolžini  $I_Z = 50$  m bi bila minimalna frekvenca  $f_{min} = 1,5$  MHz.



Slika 3.2 Oblika posamezne prehodne prenapetosti.



Slika 3.3 Spekter prehodne prenapetosti v postroju, izoliranem z zrakom.



Slika 3.4 Spekter prehodne prenapetosti v postroju, izoliranem s plinom (GIS).

#### 3.2.3 Električni oblok pri preklopu ločilnika

Električni oblok, ki nastane pri preklopu polov ločilnika sestavljajo trije deli [1]:

- temno ali Townsendovo razelektrenje,
- tlilno razelektrenje,
- obločno razelektrenje.

Pri obloku, ki ga napaja izmenična napetost je po navedbah [1] opis dogajanja dokaj zapleten. Ena glavnih ugotovitev v študiji [1] je, da tok v obloku ne niha harmonično, temveč se pojavlja spekter različnih frekvenc, ki se kaže v frekvencah prehodne prenapetosti v sekundarnem tokokrogu. Druga ugotovitev je, da bi oblok gorel stabilno le, če bi imel upor zaporedno z virom napetosti. Povedano drugače, ker so v primarnem delu EEP tudi induktivnosti in kapacitivnost, oblok pri preklopu ločilnika ne more biti stabilen.

### 3.3 Prenos elektromagnetnih motenj v EEP

Prenos motenj iz primarnega dela postroja v sekundarni tokokrog lahko poteka z:

- impedančno povezavo,
- induktivno povezavo,
- kapacitivno povezavo,
- sevanjem.
V praksi se motnje v tokokrogu sekundarnega sistema pojavijo kot kombinacija vseh štirih povezav. Kako bomo opisali zakonitosti prenosa elektromagnetne motnje v tokokrog ali napravo sekundarnega sistema, je odvisno od frekvence oziroma valovne dolžine motnje in razdalje med virom in napravo ali tokokrogom. Če je valovna dolžina  $\lambda$  mnogo manjša kot razdalja r (pogoj:  $r \gg \lambda/2\pi$ ) med virom motnje in tokokrogom sekundarnega sistema, potem ima elektromagnetni val značaj ravnega valovanja [20]. V tem primeru prevladujejo galvanski, induktivni in kapacitivni sklop. Če pogoj ni izpolnjen, je treba upoštevati tudi prenos s sevanjem.

#### 3.3.1 Impedančni prenos

Impedančni ali, kakor ga tudi imenujemo, galvanski prenos nastane, ko sta dva tokokroga, ki sta različna po namenu, povezana med seboj, pri čemer ima povezava impedanco  $Z_{\kappa}$  [5] (slika 3.5). Povezava je lahko npr. ozemljitev. V sekundarnem tokokrogu je vključena sekundarna naprava s svojo vhodno impedanco  $Z_{i}$ .

Če upoštevamo pogoj ( $Z_i >> Z_K$ ), kar v praksi največkrat drži, lahko poenostavljeno zapišemo, da je inducirana napetost  $U_i$  na vhodu sekundarne naprave, zaradi galvanskega prenosa motenj, odvisna od toka  $I_E$  skozi impedanco  $Z_K$ :

$$U_i = I_E \cdot Z_K \tag{3.13}$$



Slika 3.5 Shema impedančnega (galvanskega) prenosa [5].

#### 3.3.2 Induktivni prenos

Induktivni prenos nastane, ko je sekundarni tokokrog v magnetnem polju drugega tokokroga (npr. VN zbiralk, drugega vodnika ipd.), kot kaže slika 3.6. Inducirana napetost  $U_i$  v sekundarnem tokokrogu je:

$$U_i = -M_K \cdot \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} \tag{3.14}$$

kjer sta:

*M<sub>K</sub>* medsebojna induktivnost

d*l/*d*t* sprememba toka v času



Slika 3.6 Shema induktivnega prenosa [5].

#### 3.3.3 Kapacitivni prenos

Kapacitivni prenos, prikazan na sliki 3.7, nastane, ko je sekundarni tokokrog v električnem polju drugega tokokroga (npr. VN zbiralk).

Napetost  $U_l$  se pojavi zaradi parazitskih kapacitivnosti  $C_E$  in  $C_K$  sekundarnega tokokroga. Če je sekundarni tokokrog simetričen in ni ozemljen, potem napetosti  $U_q$  med vodnikoma skoraj ni. Napetost  $U_l$  je sorazmerna razmerju kapacitivnosti  $C_K/C_E$ .

Če sekundarni tokokrog ni simetričen (npr. tokokrog merilnega transformatorja, kjer je en vodnik ozemljen), potem je napetost  $U_q$  odvisna od obeh vzporednih impedanc  $Z_{0t}$  in  $Z_i$ . Pri frekvencah, višjih od obratovalne (50 Hz), bo večji del toka tekel skozi parazitsko kapacitivnost in bo napetost  $U_q$  sorazmerna razmerju  $C_k/C_q$ . Pri zelo visokih frekvencah pa bo tok tekel skozi parazitsko kapacitivnost  $C_E$ , še posebej, ko induktivnost do ozemljitvene točke ni več zanemarljiva. V tem primeru je  $U_l$  sorazmerna razmerju  $C_k/C_E$ , torej enako kot v primeru, ko sekundarni tokokrog ni ozemljen.

Pri običajni konfiguraciji v stikališču, izoliranem z zrakom, so sekundarni tokokrogi zelo malo izpostavljeni kapacitivnemu vplivu primarnega dela. Večinoma potekajo pod zemljo in v kovinskih ceveh (ki sicer služijo bolj za mehansko zaščito).

#### 3.3.4 Prenos s sevanjem

Pri prenosu motenj s sevanjem pojav opišemo z Maxwellovimi enačbami. Značilnost te vrste prenosa motenj je [20, str. 345]:

- če sta pri neki frekvenci primarni tokokrog in sekundarni tokokrog med seboj
   oddaljena manj kot valovno dolžino (r < λ/2π), torej je sekundarni tokokrog v</li>
   bližnjem polju, potem upada električna komponenta motilnega polja električnega
   dipola sorazmerno s kubom razdalje (1/r<sup>3</sup>), magnetna komponenta pa sorazmerno
   s kvadratom razdalje (1/r<sup>2</sup>),
- če sta pri neki frekvenci primarni tokokrog in sekundarni tokokrog med seboj
   oddaljena več kot valovno dolžino (r >  $\lambda/2\pi$ ), torej je sekundarni tokokrog v
   daljnem polju, potem upada vplivno elektromagnetno polje sorazmerno z razdaljo
   (1/r).

Primer: pri frekvenci 1 MHz je valovna dolžina 300 m in je daljno polje na razdalji več kot 48 m, pri frekvenci 3 MHz pa je valovna dolžina 100 m in je daljno polje na razdalji več kot 16 m od vira sevanja.



Slika 3.7 Shema kapacitivnega prenosa elektromagnetnih motenj [5].

Elementi na sliki 3.7 so:

- $C_{K}$  parazitna kapacitivnost med posameznim vodnikom sekundarnega tokokroga in primarnim delom (VN),
- *C<sub>E</sub>* parazitna kapacitivnost med posameznim vodnikom sekundarnih tokokrogov in ozemljitvijo,
- C<sub>q</sub> parazitna kapacitivnost med posameznimi vodniki sekundarnih tokokrogov,
- *E* fazna napetost VN zbiralk,
- *U*<sub>1</sub> napetost med posameznim vodnikom tokokroga in ozemljitvijo (asimetrična napetost),
- U<sub>q</sub> napetost med vodnikoma tokokroga (simetrična napetost),
- *Z*<sub>0t</sub> impedanca sekundarnega navitja instrumentnega transformatorja,
- *Z<sub>i</sub>* vhodna impedanca sekundarne naprave.

# 4 Zmanjševanje motenj v sekundarnih tokokrogih s pasivnimi ukrepi

Za naprave sekundarne opreme v EEP velja zahteva, da se ob elektromagnetni motnji njihovo delovanje ne sme poslabšati za več oziroma bolj kot je to določeno oziroma jih ne smejo uničiti. V vseh primerih motenja je lahko posledica izguba funkcionalnosti sistema – npr. sistema vodenja, kar ima negativni vpliv na kakovost električne energije (na zanesljivost njene dobave), na kakovost električne napetosti (na njene parametre) in tudi na varnost obratovanja (če izklop voda ni mogoč). Zagotoviti je torej treba, da raven motenja in s tem ravni motenj ne dosegajo ravni odpornosti naprav proti motnjam.

Ideja pri pasivnih ukrepih za zmanjševanje motenj v sekundarnih tokokrogih je ta, da uporabimo elemente EEP, ki so že sicer vgrajeni (npr. ozemljitveno mrežo, povezave za izenačitev potencialov, kabelske oplete itd.), na takšen način, da v največji možni meri pripomorejo k zmanjševanju motenj. V same tokokroge pa ne posegamo (npr. z vgradnjo feritnih filtrov, odvodnikov ipd.).

#### 4.1 Osnove

#### 4.1.1 Prenosna impedanca kabelskega oklepa

Kabelski oklep ali zaslon oziroma oplet, če je spleten iz (npr. bakrenih) vodnikov, ima v idealnem primeru obliko zelo dolge cevi (slika 4.1). Tok  $I_l$  teče vzdolž opleta in na prenosni impedanci  $Z_T$  povzroči asimetrično napetost  $U_l$ :

$$Z_T = \frac{U_I}{I_I} \tag{4.1}$$

Velikost asimetrične napetosti je torej odvisna od prenosne impedance. Ta pa je odvisna od frekvence in izvedbe kabelskega oklepa. Pri nizkih frekvencah ima ohmski karakter, pri višanju frekvence pa dobi najprej kapacitivni in potem induktivni karakter. V vsakem primeru je impedanca kompleksna.



Slika 4.1 Shematični prikaz kabelskega oklepa in prenosne impedance  $Z_{T}$ .

Na sliki 4.2, povzeti iz elaborata [1], ki temelji na rezultatih raziskave v francoskem Laborelec iz leta 1977, je prikazana odvisnost prenosne impedance od frekvence za različne vrste oklepov. S slike lahko ugotovimo:

- pri nizkih frekvencah je impedanca enaka upornosti za enosmerni tok,
- pri svinčenem plašču (ki deluje kot cev) prenosna impedanca z naraščanjem frekvence postaja manjša, predvsem zaradi kožnega pojava,
- pri čistem bakrenem opletu prenosna impedanca naraste nad vrednost upornosti šele pri mnogo večjih frekvencah kot pri plašču iz jeklenih trakov in bakrene žice ali pri opletu samo iz jeklenih žic,
- na podlagi prejšnje ugotovitve lahko sklepamo, da armature kablov ne učinkujejo pri zmanjševanju asimetričnih prenapetosti tako dobro kot bakreni oplet.



Legenda:

kabel 1: svinčeni plašč, kabel 2: bakreni oplet z 80 % pokritjem, kabel 3: plašč iz ovitih jeklenih žic, kabel 4: plašč iz jeklenih trakov in ovite bakrene žice

Slika 4.2 Frekvenčna odvisnost prenosne impedance za različne vrste oklepov [1].

#### 4.1.2 Kabel z enojnim obojestransko ozemljenim oklepom

Asimetrične motnje oziroma prenapetosti je možno zmanjšati z uporabo ozemljenega kabelskega oklepa (slika 4.3), ki je v praksi največkrat oplet, spleten iz bakrenih žic. Tak način je učinkovit v simetričnih tokokrogih zaradi induktivne povezave med vodniki v kablu in kabelskim opletom. V tokokrogih, ki so nesimetrični, pa lahko zaradi obojestranske ozemljitve opleta nastane prečna (simetrična) napetost. Simetrično napetost, ki bi se lahko pojavila, se zmanjša z drugim ukrepom, t.j. s sukanjem vodnikov.

V kabelskem opletu se inducira (vzdolžna) protinapetost med vsakim vodnikom in ozemljenim kabelskim opletom in s tem zmanjša napetost motnje v vodnikih, ki nastane zaradi razlike potencialov v ozemljitvenem sistemu.

Razlika potencialov  $u_E$  požene tok *i* skozi oplet:

$$u_{\rm E} = R \cdot i + L \cdot \frac{\mathrm{d}\,i}{\mathrm{d}\,t} \tag{4.2}$$

pri čemer sta R upornost in L induktivnost opleta.



Legenda:

*u*<sub>1</sub> napetost vodnika proti ozemljitvi; *L* induktivnost opleta; *M* medsebojna induktivnost opleta in vodnika; *R* upornost primarnega dela transformatorja oziroma sklopna upornost

Slika 4.3 Kabel z opletom (zgoraj), predstavljen kot transformator (spodaj) [11].

Kabelski oplet si lahko zamislimo kot primarno navitje transformatorja z enim ovojem, vodniki v kablu pa so sekundarno navitje. V transformatorju brez stresanega fluksa je medsebojna induktivnost enaka induktivnosti primarnega navitja. Takrat velja  $u_E \approx u_i$  in  $u_l \approx 0$ . Inducirana napetost je:

$$u_i = M \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = L \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{4.3}$$

Napetost *u*<sub>l</sub> je:

$$u_l = u_E - u_i = R \cdot i \tag{4.4}$$

V realnih razmerah je treba pri kabelskem opletu upoštevati prenosno impedanco. Isti rezultat lahko dobimo tudi z drugačnim razmislekom. Napetost  $u_E$  upada vzdolž kabelskega opleta (slika 4.4) linearno. Na tisti strani, kjer je vodnik v kablu povezan z ozemljitvijo, ima vodnik isti potencial kot oplet. Napetost, ki se inducira v vodniku, se odšteje in tako napetosti med vodnikom in kabelskim opletom skoraj ni. Napetost, ki ostane, je posledica upornosti primarnega navitja transformatorja oziroma prenosne impedance.

Kabel z enojnim opletom, ozemljenim na obeh straneh, ima naslednje lastnosti:

- zelo učinkovito zmanjšuje visokofrekvenčne motnje,
- ni potencialne razlike med kablom in drugimi kovinskimi deli,
- omogoča potek različnih kategorij tokokrogov blizu drug drugemu.

#### 4.1.3 Kompenzacijski vodnik

Pri kablu brez opleta, vzdolž katerega poteka ozemljen vodnik (slika 4.5), je podobno kot pri kablu z opletom. Razlika je v tem, da induktivni sklop med ozemljenim vodom in kabelskimi vodniki ni popoln. Zaradi stresanega fluksa med primarnim in sekundarnim navitjem je induktivni sklop manjši. Zato je napetost vodnika proti ozemljitvi (ali tudi vzdolžna napetost)  $u_l$ večja, kot pri kablu z opletom:

$$u_{l} = R \cdot i + (L - M) \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$
(4.5)



Slika 4.4 Razporeditev potenciala na obojestransko ozemljenem opletu in kabelskih vodnikih [11].



Slika 4.5 Napetost  $u_l$  na vodnikih vzdolž katerih poteka ozemljen vodnik [11].

Medsebojna induktivnost  $M_k$  dveh premih vzporednih vodnikov, v katerih teče isti tok v nasprotni smeri, je [10]:

$$M_{K} = \frac{\mu}{2\pi} \left[ l \cdot \ln\left(\frac{l + \sqrt{l^{2} + d^{2}}}{d}\right) - \sqrt{l^{2} + d^{2}} + d \right]$$
(4.6)

kjer so:

I dolžina skupnega poteka obeh vodnikov,

- d razdalja med osjo enega in drugega vodnika,
- $\mu$  permeabilnost, ki je enaka  $\mu_0$ , če je relativna permeabilnost vmesnega medija enaka 1.

Iz enačbe (4.6) lahko razberemo, da je medsebojna induktivnost odvisna od medsebojne dolžine in razdalje med vodnikoma. Medsebojna induktivnost je tem večja, kolikor je manjša

razdalja med vodnikoma in kolikor je daljši njun skupni potek. Večja kot je medsebojna induktivnost, manjša bo napetost  $u_l$  na vhodu sekundarne naprave, kar pomeni, da je prenos motnje manjši.

#### 4.1.4 Kabel z enojnim enostransko ozemljenim oklepom

V nekaterih primerih sme biti kabelski oklep ozemljen samo na eni strani, npr. zaradi kotlovske zaščite transformatorja ipd. V takih primerih je kabelski oklep ozemljen na tisti strani, kjer so komandne in komunikacijske naprave.

Enostransko ozemljen kabelski oklep zmanjšuje le kapacitivno prenesene motnje, induktivno prenesenih pa ne, ker ne more teči tok, ki bi zmanjšal motilni tok.

Kompromis med enostransko in obojestransko ozemljenim kabelskim oklepom je lahko kondenzator, prek katerega je ena stran kabelskega oklepa ozemljena. Pri nizkih frekvencah ima veliko impedanco, ki postaja manjša z večanjem frekvence. Vendar se lahko zgodi, da kondenzator prebije in ostane v kratkem stiku, kar pa ne izpolnjuje več gornjih zahtev o enostranski ozemljitvi.

Kabel z enojnim opletom, ozemljenim na eni strani, ima naslednje lastnosti:

- ne zmanjšuje visokofrekvenčnih motenj,
- lahko ščiti izolirane tokokroge (razni senzorji) proti nizkofrekvenčnim električnim poljem,
- oplet lahko deluje kot antena v tem primeru so motnje lahko večje kot brez opleta,
- preprečuje brnenje (nizkofrekvenčni tok v opletu).

#### 4.1.5 Kabli z dvojnim oklepom

Kabli, ki imajo dvojni oklep, so uporabni tako za zaščito proti nizkofrekvenčnim kot proti visokofrekvenčnim motnjam (seveda morata biti oklepa medsebojno izolirana). V tem okviru se taki kabli delijo na tiste, ki imajo vsak par vodnikov opleten oziroma ovit in še oklep za celotni kabel, ter na tiste, ki imajo dvojni oklep za celotni kabel. Prvo vrsto se uporablja predvsem za zelo zmogljive računalniške komunikacije. Drugo vrsto pa predvsem pri zelo velikih razdaljah oziroma v nevarnih industrijskih okoljih.

## 4.2 Vpliv frekvence prehodnih pojavov na pasivne ukrepe

#### 4.2.1 Splošno

Kot je omenjeno v poglavju 3.2.1 imajo prehodne prenapetosti frekvenco mnogo več kot 50 Hz. Isto velja za posledice, t.j. prehodne prenapetosti v sekundarnih tokokrogih. Zato morajo biti pasivni ukrepi učinkoviti glede na svoj način delovanja. V EEP se srečamo z materiali in oblikami, ki so pogojeni bodisi z možnostmi pri izdelavi ali vgradnji bodisi z drugimi tehničnimi zahtevami (npr. velika tokovna zmogljivost). Izmed materialov in oblik v ozemljitvenem sistemu in izenačitvi potencialov so uporabljeni pocinkani jekleni ploščati vodniki in bakreni vodniki, ki so največkrat v obliki vrvi. V zadnjem času so uporabljeni tudi nerjaveči oziroma t. i. inox ploščati vodniki, predvsem pri povezavah armature relejnih hišic z ozemljitvenim sistemom. Pri iskanju ustreznega materiala in oblike, izmed uporabljanih, ki imajo čim boljše lastnosti, je treba upoštevati naslednje pogoje:

- začetek prenapetosti ima zelo strmo čelo (nekaj deset nanosekund),
- frekvence so v postrojih, izoliranih z zrakom, večinoma do 5 MHz, v SN postrojih, izoliranih z zrakom, večinoma do 12 MHz, v postrojih, izoliranih s plinom, pa večinoma do 60 MHz (neodvisno od nazivne napetosti).

#### 4.2.2 Material in oblika

Iz teorije in prakse elektromagnetike je znano, da se pri vseh izmeničnih tokih pojavi izrivanje toka proti zunanjosti vodnika, kar imenujemo kožni pojav (ang. skin effect) – slika 4.11. To pomeni, da se pri visokih frekvencah poveča upornost vodnika.

Globina kožnega pojava oziroma debelina  $d_V$  zunanje plasti vodnika, ki prevaja tok, je odvisna od snovnih lastnosti materiala [6]:

$$d_{V} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_{0} \cdot \mu_{r} \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu_{0} \cdot \mu_{r}}}$$
(4.13)

kjer so:

ffrekvenca toka [Hz], $μ_0$ permeabilnost, ki je 4·π·10<sup>-7</sup> [Vs/Am], $μ_r$ relativna permeabilnost vodnika,σprevodnost vodnika [m/Ω·mm²],ρupornost vodnika [Ω·mm²/m].

V tabeli 4.1 so informativno izračunane debeline plasti, ki prevaja tok pri različnih frekvencah, za naslednje podatke:

- relativna permeabilnost (za baker je enaka 1; za železo je približno 90),
- prevodnost (za baker je 58; za železo je približno 7,7) [m/ $\Omega$ ·mm $^2$ ],
- upornost (za baker je 0,01724; za železo je približno 0,1299) [ $\Omega$ ·mm<sup>2</sup>/m].



Slika 4.6 Poenostavljen prikaz kožnega pojava v okroglem in pravokotnem vodniku.

Tabela 4.1	Približna	debeline	$d_V$ prevodne	plasti voo	Inika
	THOMETIC	acocinic	av pretourie	p14001 100	

Frekve	nca	50 Hz	150 Hz	100 kHz	1 MHz	10 MHz
$d_V$ [mm]	Cu	9,3	5,4	0,21	0,066	0,02
	Fe	2,7	1,6	0,06	0,02	0,006

Iz tabele 4.1 lahko razberemo, da je pri pocinkanem jeklenem traku (t. i. valjanec) debelina prevodne plasti, že pri frekvenci 100 kHz, dejansko odvisna samo od debeline pocinkane plasti, to je približno od 0,05 mm do 0,07 mm [12].

Zaradi boljšega prevajanja visokofrekvenčnih tokov je torej bolj priporočljiv material baker. Tudi glede obstojnosti ima baker prednost. Pri FeZn traku se pocinkana plast s časom tanjša in s tem se tanjša tudi visokofrekvenčna prevodna plast. Stopnjo tanjšanja lahko ocenimo na do 5 µm na leto [13]. Dejansko tanjšanje pocinkane plasti je zelo odvisno od klimatskih pogojev in kemijske agresivnosti zemlje ter kakovosti nanosa pocinkane plasti.

Na reaktanco vodnika vpliva induktivnost vodnika, ki se veča s frekvenco. Glede oblike v nadaljevanju lahko ugotovimo, da ima prednost uporaba ploščatih vodnikov pred okroglimi.

Lastna induktivnost okroglega vodnika dolžine l in polmera  $r_V$  je za visoke frekvence [21, str. 305]

$$L = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot l}{r_V} \right) - 1 \right]$$
(4.13)

Lastna induktivnost ploščatega vodnika dolžine l in s stranicama a in b v prerezu je za visoke frekvence [21, str. 313]

$$L = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot l}{r_G} \right) - 1 + \frac{r_G}{l} \right]$$
(4.13)

kjer je  $r_G$  geometrijska srednja razdalja pravokotnega lika (prereza vodnika). Kot je v [21] navedeno, se lahko za  $r_G$  vzame izraz 0,2236(a+b), ker je faktor 0,2236 konstanten za velik razpon razmerij med a in b (od 1:1,5 do 1:10). Ko vstavimo izraz geometrijske srednje vrednosti v enačbo (4.13) dobimo

$$L = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot l}{(a+b) \cdot 0,2235} \right) - 1 + \frac{(a+b) \cdot 0,2235}{l} \right]$$
(4.14)

Če upoštevamo, da so v EEP dolžine vodnikov desetine metrov, da je širina *a* oziroma debelina *b* ploščatih vodnikov reda milimetrov in da je ln(1/0,2236) približno 1,5, potem dobimo poenostavljeno enačbo lastne induktivnosti ploščatega vodnika pri visokih frekvencah

$$L = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot l}{(a+b)} \right) + \frac{1}{2} \right]$$
(4.15)

Če vzamemo okrogli vodnik prereza 120 mm<sup>2</sup> in ploščati vodnik enakega prereza, ki ima stranici 40 mm in 3 mm, ter sta dolga 10 m, je lastna induktivnost okroglega vodnika 1,06-krat večja od lastne induktivnosti okroglega vodnika.

#### 4.2.3 Odvisnost učinkovitosti ukrepov od frekvence

Na učinkovitost ukrepa vpliva predvsem frekvenca pa tudi dimenzije, ki jih ima ukrep – npr. dolžina povezave za izenačitev potencialov.

Zgornja frekvenčna meja učinkovitosti ukrepa je določena s pravilom  $\lambda/10$  [11], pri čemer je  $\lambda$  valovna dolžina tiste frekvence, ki jo kot največjo pričakujemo v danem elektromagnetnem okolju (slika 4.12). S tem pravilom obravnavamo dolžino ozemljitvenih povezav, povezav kabelskih opletov ter robov in odprtin elektromagnetnih zaslonov (slika 4.13).

Pri tem je treba upoštevati, da opazujemo celotno dolžino. Na primer, k dolžini priključka kabelskega opleta je treba prišteti še dolžino vseh povezav do ozemljitvenega sistema oziroma sistema izenačitve potencialov (npr. od zbiralke v omari sekundarnih naprav do glavne zbiralke za izenačitev potencialov oziroma do ozemljitvenega sistema).



Slika 4.7 Pravilo  $\lambda/10$  za določanje še učinkovite dolžine povezave [11].



Slika 4.8 Izračunana še učinkovita dolžina povezave, ki ni v zemlji, pri pravilu  $\lambda/10$  [11].

#### 4.3 Aplikacija pasivnih ukrepov

Na sliki 4.9 [11] so združeno prikazane prenosne poti motenj od primarnega dela EEP v sekundarne tokokroge. Zgoraj so VN zbiralke in stikalna naprava, na zbiralke pa je priključen napetostni merilni transformator. Ob spremembah na VN strani – vklopu ali izklopu stikalne naprave – se, zaradi sprememb naboja na zbiralkah, pojavi visokofrekvenčni tok v ozemljitvenem sistemu  $i_E$ , ki na impedanci ozemljitvenega sistema povzroči nastanek potenciala  $U_E$ .

V nadaljevanju je prikazana aplikacija prej opisanih pasivnih ukrepov.

Kapacitivni prenos, ki nastane znotraj instrumentnega transformatorja, ni posebej prikazan, saj je ta prenos možno zmanjšati z zasnovo oziroma izvedbo transformatorja.

Pri galvanskem prenosu povzroči potencialna razlika  $U_E$  med ozemljenim in neozemljenim delom merilnega tokokroga nastanek napetosti  $U_{l1}$  in  $U_{l2}$  (vzdolžna oziroma

asimetrična napetost). Ideja za zmanjšanje galvanskega prenosa je v tem, da bi v vodnikih tokokroga inducirali enako veliko in nasprotno usmerjeno napetost.



Slika 4.9 Mehanizmi prenosa elektromagnetnih motenj v EEP [11].

Prenosne mehanizme na sliki predstavljajo:

- (1) kapacitivni prenos parazitne kapacitivnosti  $C_s$  in parazitna kapacitivnost med zbiralkami in ozemljitvenim sistemom  $C_{E_r}$
- 2 induktivni prenos magnetno polje H v zanki  $A_1$  zaradi pretoka naboja  $i_{L}$
- ③ galvanski prenos zaradi ozemljitve tokokroga instrumentnega transformatorja,
- sevanje visokofrekvenčno elektromagnetno polje (ob nastanku obloka),
- Induktivni prenos magnetno polje H v zanki  $A_1$  in  $A_2$  zaradi pretoka naboja  $i_E$ . prenos zaradi valovnih impedanc  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ .

Pri induktivnem prenosu se zaradi tokov  $i_E$  in  $i_L$  tvori magnetno polje H, ki inducira napetosti v zankah s sekundarnimi tokokrogi s površino A. Velikost inducirane napetosti je:

$$u = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}, \quad \Phi = \mu_0 \cdot H \cdot A \tag{4.16}$$

Učinkovit ukrep za zmanjšanje motilne, inducirane napetosti je zmanjšanje površine zank A. Površino zanke  $A_1$  (površina med vodnikoma tokokroga) je možno zmanjšati s prepletanjem vodnikov tokokroga. Površino  $A_2$  pa je možno zmanjšati tako, da je vodniški par tokokroga položen čim bližje ozemljitvenemu sistemu. Zmanjšanje magnetnega polja oziroma njegovega prehoda skozi zanke je težje kot zmanjšati površine zank. Za zmanjšanje bi namreč potrebovali zaslone ali oklepe iz posebnih materialov.

#### 4.3.1 Zmanjševanje pri galvanskem prenosu

Iz osnove galvanskega prenosa v poglavju 3.3.1 lahko razberemo, da bo ta manjši, če je manjša sklopna impedanca  $Z_{\kappa}$  ali tok  $i_{E}$  ali oboje.

Ob upoštevanju, da sklopna impedanca povezuje naprave npr. prek skupnega ozemljitvenega sistema, pridemo do prvega ukrepa za zmanjševanje elektromagnetnih motenj (prehodnih prenapetosti), ki je hkrati osnova tudi vsem drugim. To je čim manjša impedanca ozemljitvenega sistema ( $R_E$ ,  $L_E$ ) in ozemljitvenih povezav, kar se že navezuje na izenačitev potencialov. K zmanjšanju potenciala med dvema točkama (deloma postroja) oziroma k njuni izenačitvi lahko, poleg ozemljitvene mreže, prispeva dodatna namenska galvanska povezava, ki povezuje ti dve točki (v tuji literaturi je poimenovana kot »vzporedni ozemljitveni vodnik«, ang. PEC – Parallel Earthing Conductor; pri nas pa smo ga poimenovali »kompenzacijski vodnik«, ker zaradi fizikalnih, električnih lastnosti zmanjšuje, t.j. kompenzira, motnje v kablu sekundarnih tokokrogov poleg katerega je položen).

Zmanjšanje toka  $i_E$  v postroju sicer ni možno, ker ga določajo geometrijsko električni parametri (dolžina zbiralk in njihova višina nad ozemljitvenim sistemom, konfiguracija visokonapetostnih elementov ipd.). Lahko pa ga zmanjšamo posredno, tako da povzročimo tok v nasprotni smeri toku  $i_E$ . Tako na sklopni impedanci nastane napetost, ki je sorazmerna samo razliki obeh tokov skozi njo.

#### 4.3.2 Zmanjševanje pri induktivnem prenosu

Iz osnove induktivnega prenosa v poglavju 3.3.2 izhaja, da bo ta manjši, če je manjša medsebojna induktivnost  $M_K$  oziroma če je manjši tok  $i_E$  ali oboje.

S slike 4.9. lahko razberemo, da je induktivni prenos manjši, ko je površina zanke A manjša. Površina med vodnikoma sekundarnega tokokroga  $A_1$  je minimalna takrat, ko sta vodnika tesno drug ob drugem. Površina  $A_2$  pa je minimalna takrat, ko sta vodnika sekundarnega tokokroga tik ob ozemljitvenem sistemu ( $R_E$  in  $L_E$ ).

Vpliv toka  $i_E$  bi v vodnikih sekundarnega tokokroga lahko zmanjšali z napetostjo, ki bi jo inducirali v nasprotni smeri, kot jo povzroča tok  $i_E$ . Ena od možnosti je prevodni oklep okoli vodnikov sekundarnega tokokroga, ki seveda mora biti spojen v ozemljitveni sistem na obeh straneh, da lahko po njem teče tok. Druga možnost je vodnik, položen tesno ob vodnikih sekundarnega tokokroga, ki tudi mora biti spojen v ozemljitveni sistem, da lahko po njem teče tok.

#### 4.3.3 Zmanjševanje pri kapacitivnem prenosu

Glavno vlogo pri nastanku motilne napetosti na vodnikih sekundarnega tokokroga imajo parazitska kapacitivnost  $C_{\kappa}$  med vodniki visokonapetostnega in sekundarnega tokokroga ter parazitska kapacitivnost  $C_{E}$  med vodniki sekundarnega tokokroga in ozemljitvijo (slika 3.7). Manjša  $C_{\kappa}$  oziroma večja  $C_{E}$  bi torej pomenila manjšo motilno napetost.

Če ima kabel s sekundarnimi tokokrogi oplet, je  $C_K$  v tem primeru manjša kot pri kablu brez opleta, pri čemer zadošča, da je oplet ozemljen samo na eni strani.

Večjo  $C_E$  pa je možno doseči s postavitvijo kabla bližje k ozemljitvi.

#### 4.3.4 Zmanjševanje pri prenosu zaradi sevanja

Prenos elektromagnetnih motenj s sevanjem je možno zmanjšati z elektromagnetnim zaslonom. To je kovinska plošča ali mreža, ki je postavljena med vir elektromagnetnih motenj ter napravo in tokokrog, ki ju želimo zaščititi pred motnjami. Zaslon učinkuje le, če prostor, ki ga ščiti, obdaja z vseh šestih strani.

Zaslonimo lahko kabelske kanale, kabelske police, kabelska korita, procesni prostor centra vodenja ipd.

# 5 Izvedba pasivnih ukrepov v EEP

Na podlagi teoretičnih opredelitev pasivnih ukrepov, opisa aplikacije in na podlagi usmeritev, ki jih dajejo standardi, lahko opišemo izvedbo v EEP, ki naj bi čim bolj prispevala k zmanjševanju prenosa prehodnih prenapetosti v sekundarne tokokroge.

## 5.1 Material in oblika

Iz izvajanja v poglavju 4.2 izhaja, da je v sistemu za izenačitev potencialov ali sklopu, ki je njegov del (npr. osnovna ozemljitvena mreža), priporočljiva uporaba bakra – za kabelske oplete, zbiralke in vodnike za izenačitev potencialov, ozemljitvene vrvi, povezave itd.

V praksi so oblike, ki v EEP pridejo v poštev ploščata pletenica, večžični vodnik npr. H07V-K (po starem P/F), vrv H07V-R in Cu trak. Ploščata pletenica je uporabna predvsem za povezave v notranjosti omar in podobno, večžični vodnik večinoma kot povezava v ozemljitveni sistem, vrv kot kompenzacijski vodnik in vodnik ozemljitvene mreže, trak pa večinoma za zbiralke izenačitve potencialov.

Poleg oblike samega materiala gre pri pasivnih ukrepih tudi za oblikovanje v širšem smislu, npr. oblikovanje osnovne ozemljitvene mreže.

## 5.2 Ukrepi po sklopih postroja

V nadaljevanju je opisana uporaba ukrepov, ki so opredeljeni v prejšnjih poglavjih in kot jih navajajo standardi [14, 15, 16]. Pri načrtovanju ukrepov izhajamo iz načrtovanja pri frekvenci 50 Hz:

- izračun prereza vodnikov ozemljitvenega sistema z upoštevanjem odvajanja toka okvare,
- gostota ozemljitvene mreže v stikališču po kriteriju napetosti dotika in koraka.

Dodatno pa upoštevamo zahtevo glede učinkovitosti pri visokih frekvencah, kar vpliva na izbiro materiala, oblikovanja in poteka.

Ukrepe na kratko opišemo takole:

- v EEP so vse naprave primarnih in sekundarnih sistemov povezane v sistem izenačitve potencialov,
- sistemi izenačitve potencialov v posameznih delih EEP so povezani z ozemljitvenim sistemom oziroma so večinoma sestavni del ozemljitvenega sistema,
- oklep kabla sekundarnega sistema je povezan v sistem izenačitve potencialov na obeh koncih kabla,
- kabli sekundarnih sistemov potekajo tesno ob vodnikih ozemljitvenega sistema oziroma sistema izenačitve potencialov,
- omare s sekundarnimi napravami so povezane v sistem izenačitve potencialov.

#### 5.2.1 Ozemljitveni sistem, povezave in izenačitev potencialov

Sistema izenačitve potencialov v EEP ne moremo ločiti od ozemljitvenega sistema. Glavna razlika med njima je, da sistem izenačitve potencialov ni nujno položen v zemljo oziroma ni v stiku z zemljo. Torej ne služi odvajanju toka v zemljo, temveč zmanjšanju potencialnih razlik med deli postroja (slika 5.1.) oziroma napravami v njem. Ker pa je tak sistem postavljen v postroju, kjer veljajo tudi zahteve za varovanje in zaščito (zmanjšanje nevarne napetosti dotika, odvod atmosferskih razelektritev ipd.) ga obravnavamo skupaj z ozemljitvenim sistemom.

Izhodišče ozemljitvenega sistema postroja je dimenzioniranje v skladu z [17]:

- varnostnimi zahtevami (varovanja pred električnim udarom,
- obratovalnimi zahtevami in
- zaščito proti atmosferskim razelektritvam.

Zmanjšanje impedance ozemljitvenega sistema in ozemljitvenih povezav dosežemo tako, da v ozemljitveni sistem:

- visokonapetostne naprave stikališča (energetski transformator, napetostni in tokovni instrumentni transformator, ločilnik, odklopnik) dodatno povežemo,
- povežemo armature kabelskih kanalov,
- povežemo obroče okrog stavb in njihova temeljska ozemljila,
- spojimo kompenzacijske vodnike in
- povežemo zbiralke za izenačitev potencialov.

Ozemljitveni sistem postroja, ki je namenjen tudi zmanjševanju elektromagnetnih motenj, je praviloma izveden zazankano – v obliki mreže – tako je impedanca manjša.

Vodnike ozemljitvenega sistema dimenzioniramo upoštevaje frekvenčno odvisnost, kar pomeni:

- ozemljitvena mreža v zemlji je iz bakrene vrvi,
- ozemljitvena mreža oziroma mreža izenačitve potencialov v postrojih, izoliranih s plinom je iz ploščatega bakrenega traka,
- mreža izenačitve potencialov v stavbi (npr. v komandnem prostoru) je iz ploščatega bakrenega traka,
- povezave visokonapetostnih naprav v sistem izenačitve potencialov so iz
   izoliranega bakrenega večžičnega vodnika ali ploščatega bakrenega traka.



Slika 5.1

Načelo sistema izenačitve potencialov [18].

#### 5.2.2 Oblikovanje ozemljitvenega sistema postroja

Da bi ozemljitveni sistem EEP imel čim manjšo impedanco je, poleg kovinske plošče, možna le še zazankana mreža. Na sliki 5.2 [14] je shematično prikazano oblikovanje ozemljitvene mreže v stikališču (izoliranem z zrakom) na prostem.

S slike 5.2. je razvidno posebno oblikovanje ozemljitvene mreže ob stavbah. Predvsem gre za stavbe, ki so po električnih tokokrogih kakorkoli povezane z drugimi stavbami ali deli postroja (npr. signalni in krmilni tokokrogi, enosmerno in izmenično napajanje ipd.). V praksi so to:

- stavbe s komandnimi prostori,
- stavbe s prostori in opremo za telekomunikacije,
- stavbe s prostori, v katerih je oprema za meritve in zaščito ter
- prostori, kjer so nameščeni agregati za lastno rabo.

Ob stavbah je ozemljitvena mreža zgoščena. To dosežemo tako, da [18]:

- so stranice zank mreže velikosti med približno 8 m in največ 10 m,
- je neposredno okrog temeljev stavbe položen obroč (zaradi odvajanja udara atmosferskih razelektritev),
- je v oddaljenosti 5 m od prvega obroča položen še en obroč, ki je na vseh križanjih z ozemljitveno mrežo spojen z njo, ali je pri manjših objektih, ki niso večji kot 5 m × 5 m, položen dodatni obroč 5 m od središča takega objekta,
- so ob glavnem kabelskem kanalu, ki je širši kot 0,6 m, položeni ozemljitveni vodi na obeh straneh, ki so spojeni z ozemljitveno mrežo na vseh križanjih; ti vodi naj bodo položeni tik ob kanalu (pri običajnih širinah kanala naj bo njuna medsebojna oddaljenost manjša kot 1,5 m),
- majhen objekt, npr. krmilna omarica, stoji na stičišču zank ozemljitvene mreže.

Tudi znotraj stavb (slika 5.3) je ozemljitveni sistem v obliki zazankane mreže (ki je v bistvu mreža za izenačitev potencialov). Stranice zank so prilagojene razporeditvi naprav in naj bi bile manjše od 3 m, v posebnih prostorih (npr. komandni) pa tudi manj, torej do 2 m [14]. Ozemljitvena mreža je lahko, na primer:

- zalita v betonu,
- na tleh, če je pod dvojnim podom,
- pod stropom (npr. pod prostorom GIS).

Lahko se tvori »otoke«, znotraj katerih je mreža gosta, zunaj pa redkejša. Vedno pa morajo biti med seboj povezani tisti otoki, ki imajo električno medsebojno povezane naprave (v ta sklop spada tudi napajanje).



Vedno je smiselno na čim več mestih povezati armaturo zidov in plošč z mrežo za izenačitev potencialov. Tako je lahko mreža za izenačitev potencialov tudi redkejša.

2 aparati, ki stojijo posamezno (npr. tokovniki, napetostniki),

③ stavba (npr. relejna hišica, komandna stavba, SN stikališče),

④ steber daljnovoda znotraj postroja,

- ⑤ steber daljnovoda v neposredni bližini postroja,
- <sup>©</sup> ograja (po kriterijih EMC zanjo ni posebnih zahtev).
- Slika 5.2 Shema oblikovanja ozemljitvene mreže postroja [14].



Slika 5.3 Shema oblikovanja ozemljitvene mreže stavbe [14].

#### 5.2.3 Zbiralka za izenačitev potencialov

Pomemben del sistema izenačitve potencialov je zbiralka, ki pa nima značaja PE zbiralke (ki je zaradi varovanja in zaščite). Konfiguracija sistema izenačitve potencialov naj sledi prikazu na sliki 5.1. Uporaba ene zbiralke za oba namena namreč prinaša nevarnost, da motnje iz napajanja pridejo v sistem izenačitve potencialov oziroma v druge tokokroge sekundarnih sistemov.

Glede na ugotovitve v poglavju 4.2 je zbiralka iz bakra in pravokotnega prereza. Nanjo so spojeni opleti kablov za tokokroge sekundarnih sistemov, kompenzacijski vodniki, ogrodja omar (krmilnih, vodenja, lastne rabe ipd.), kovinski podstavki dvojnega poda itn. Zbiralke so povezane z ozemljitvenim sistemom, armaturami zidov in plošč in z drugimi zbiralkami sistema izenačitve potencialov (slika 5.4).

Na njej mora biti zadostno število pritrditvenih mest za kabelske oplete tako, da ima vsak oplet svoje mesto. Poleg teh mest pa mora biti na njen prostor tudi za povezave v ozemljitveni sistem, na ohišje omare, za kompenzacijski vodnik.



Slika 5.4 Shema povezave zbiralk za primer RTP 110 kV/SN [9].

Pritrditvena mesta za povezave med zbiralko in sistemom izenačitve potencialov morajo biti primerno razporejena, kot je prikazano na sliki 5.5. Da bi zmanjšali induktivnost povezave med zbiralko in sistemom izenačitve potencialov, je priporočljivo narediti več povezav (npr. dve povezavi za zbiralko do 60 cm, tri povezave za zbiralko do 90 cm itn).

Ker je zbiralka namenjena predvsem izenačitvi potencialov, je priporočljivo, da ima definirane povezave. To pomeni, da je nameščena izolirano od kovinske podlage (če podlaga ni kovinska, nosilcev zbiralke ni treba izolirati od podlage). To velja tako za omare v komandnem prostoru kot relejni hišici ali krmilni omarici.

Če je za povezavo kabelskih opletov v sistem izenačitve potencialov uporabljena posebna kovinska, EMC uvodnica, posebna zbiralka ni potrebna. Kovinsko ohišje omare v tem primeru prevzame vlogo zbiralke. Temu primerno mora biti narejena povezava take omare v ozemljitveno mrežo – mesto povezave mora biti čim bliže uvodnicam.



Slika 5.5 Skica zbiralke za izenačitev potencialov [9].

## 5.2.4 Kabli sekundarnih sistemov

Pri izbiri kablov za tokokroge sekundarnih sistemov veljajo naslednja pravila:

- imeti morajo bakreni oklep v praksi so to večinoma opletene izvedbe,
- oplet mora biti tokovno obremenljiv (samo folija ni primerna),
- oplet mora biti takšen, da čim bolj pokrije obod kabla (vsaj 80 % površine oboda).

Kabli, ki imajo oplet sestavljen iz tanjših žic in folije (npr. NYCY), imajo sicer zadovoljive lastnosti, vendar je oplet takšnega kabla zelo težko dobro spojiti v EMC uvodnici.

Kabli s samo žičnatim opletom iz mnogo tankih žic se pri spajanju v EMC uvodnicah najbolje obnesejo.



Slika 5.6

Shematski prikaz kabelskega opleta.

# 5.2.5 Spajanje kabelskih opletov

S kapacitivnostmi med vodniki kabla, med vodniki in opletom ter med opletom in ozemljitvijo so določene velikosti visokofrekvenčnih tokov, ki se skoznje zaključujejo. V praksi sta kapacitivnosti med parom vodnikov v kablu in kabelskim opletom nekaj desetkrat večji kot parazitska kapacitivnost na priključku kabla. Zaradi tega je vsota tokov pri obojestransko ozemljenem kabelskem opletu, ki tečeta prek kapacitivnosti med parom vodnikov in opletom, mnogo večja kot pri enostransko ozemljenem opletu. To pa tudi pomeni, da so pri obojestransko ozemljenem kabelskem opletu napetosti med vodniki in ozemljenimi deli manjše kot pri enostransko ozemljenem opletu. Enostransko ozemljevanje kabelskega opleta je dopustno le takrat, ko so parazitske kapacitivnosti ob priključkih zelo velike, vendar to na napravah v postrojih elektroenergetskega sistema ni primer. Enostransko ozemljevanje je dopustno oziroma zahtevano takrat, ko gre za kabel, ki se konča na transformatorju z aktivno kotlovsko zaščito. V tem primeru opleta, ki se konča na transformatorju, tam ne smemo ozemljiti.

Parazitske kapacitivnosti priključkov vodnikov iz kabla na napravo so najmanjše, če se oplet kabla konča neposredno pred priključkom vodnikov iz kabla na napravo. V dejanskih razmerah je priporočljivo oplet kabla spojiti v sistem izenačitve potencialov tik ob vstopu v omaro (krmilno, priključno, za vodenje ipd.). Pri tem je pomembno, da je zagotovljena kratka in dobra galvanska povezava kabelskega opleta s sistemom izenačitve potencialov. Na ta način impedance opleta (prenosne impedance) ne povečamo preveč. Najboljši način je z EMC uvodnico, ki oplet kabla objame po celotnem obodu in ga, ker je kovinska, spoji neposredno z npr. ohišjem omarice. Če tak način ni izvedljiv, je treba oplet ozemljiti na drug, čeprav manj učinkovit način. Če je povezava predolga in narobe oblikovana, se njena impedanca zelo poveča in preseže impedanco opleta ter izniči njegov učinek. Primeri slabih in dobrih načinov so na sliki 5.7.



Slika 5.7 Shematični prikaz izvedbe spoja kabelskega opleta.

Če je povezava opleta na zbiralko izenačitve potencialov narejena s spletenimi žičkami opleta (najpogosteje primer pri kablih NYCY), mora biti povezava čim krajša. Povezava mora biti ravna, brez ovojev, lokov ipd.

Primeri EMC uvodnic so na slikah od 5.8. do 5.10. Uvodnica s peresi je uporabna kot končna (kjer se oplet konča) ali kot prehodna (kjer se oplet nadaljuje). Uvodnica s konusom je uporabna kot končna. Uvodnica s krožno vzmetjo je uporabna predvsem kot prehodna.



Slika 5.8 Primer EMC uvodnice z vzmetnimi peresi.



Slika 5.9 Primer EMC uvodnice s konusom.



Slika 5.10 Primer EMC uvodnice s krožno vzmetjo.

# 5.2.6 Kabelski poteki

Kabli tokokrogov sekundarnih sistemov naj potekajo kolikor je mogoče blizu sistema za izenačitev potencialov. Od VN naprav morajo biti v njegovo bližino speljani po najkrajši poti (slika 5.11). Pri tem velja, da bolj ko je potek odmaknjen od sistema izenačitve potencialov, večji je prenos motenj v tokokrog.

Pri tem se lahko izkoristi lastnosti kovinskih konstrukcij, da zmanjšujejo prenos motenj v tokokroge, in se položi kable v kotu npr. ozemljenega železnega profila oziroma kovinskega kabelskega korita ali kanala.



Slika 5.11 Priporočeni potek tokokroga med napravami.

# 5.2.7 Ločitev različnih zvrsti tokokrogov

V okviru poteka kablov omenimo tudi potrebo ločenega poteka različnih vrst tokokrogov. Tokokroge sekundarnih sistemov lahko razdelimo v štiri skupine (slika 5.12, ki jih polagamo medsebojno ločeno):

- analogne (za instrumentne transformatorje; so občutljivi za motnje),
- krmilni-signalni (vsebujejo naprave s kontakti, na katerih nastaja iskrenje; vnašajo motnje v analogne in digitalne tokokroge),
- napajalne (izmenična, enosmerna, razsmerjena lastna raba; vnašajo motnje v analogne in digitalne tokokroge),
- digitalne (vključno s komunikacijskimi omrežji; so občutljivi za motnje; vnašajo šum v analogne tokokroge).

Za digitalne tokokroge je v moderni praksi priporočljivo namesto električnih uporabiti svetlobne (optične) vodnike.

Vodniki posameznega tokokroga morajo vedno potekati v parih, s čimer se doseže najmanjša možna površina njune medsebojne zanke (slika 5.13). Pari vodnikov morajo tako potekati v celotni svoji dolžini.





Slika 5.13 Potek vodnikov tokokroga.

## 5.2.8 Kabelska korita

Znotraj postrojev – v stavbah – potekajo kabli sekundarnih sistemov pogosto v kabelskih koritih. S stališča EMC je zaželeno, da so kovinska in povezana v sistem izenačitve potencialov. Na sliki 5.14 so prikazane vrste korit glede na primernost. Pogosto so uporabljena korita z luknjami (perforirana), ki so namenjene predvsem lažjemu pritrjevanju kablov. Luknje smejo biti le podolgovate in obrnjene vzdolž korita. Prečne in okrogle luknje ter luknje v kotih korita delujejo kot motilni viri, ker tvorijo zožitve tokovni poti [14].



Slika 5.14 Vrste kabelskih korit po primernosti [15].

V smislu povezanosti vseh kovinskih konstrukcij v sistem izenačitve potencialov velja isto tudi za kabelska korita. Ker kovinsko korito učinkuje kot zaslon za kable in, če naj učinkuje kot vzporedni ozemljeni vodnik, mora biti galvansko povezano od začetka do konca svojega poteka – tudi skozi zid in na odcepih (sliki 5.17 in 5.18). Da bi to dosegli morajo biti segmenti korit medsebojno spojeni s prekrivanjem.



Slika 5.15 Pravilen – neprekinjen – potek kabelskega korita skozi zid [15].



Slika 5.16 Neprekinjen odcep kabelskega korita [15].

Kot je omenjeno v poglavju 4.3.4, je zaslon oziroma Faradayeva kletka edini način za zmanjšanje prenosa motenj s sevanjem. Če je zaslon tokovno obremenljiv in spojen v sistem izenačitve potencialov oziroma v ozemljitveni sistem, ščiti svojo notranjost tudi proti kapacitivnim in induktivnim prenosom. Pri kovinskih koritih je ta učinek možno doseči s pokrovom. Pri tem mora biti kovinski pokrov trdno spojen s koritom. Pokrito korito bo imelo najboljši učinek, ko bo tudi na obeh svojih koncih spojeno s kovinskim ogrodjem ali ohišjem – npr. GIS ohišja na eni strani in ohišja omare vođenja na drugi strani.

Primer Faradayeve kletke je tudi kabelski kanal, narejen z armaturo (slika 5.17). Armatura mora biti med seboj varjena. Kabelski kanali, ki nimajo armature tudi na zgornji strani, niso Faradayeva kletka, kar je pogost primer v slovenskih EEP.



Slika 5.17 Faradayeva kletka kabelskega kanala (levo), magnetno polje okrog kanala (desno) [11].

#### 5.2.9 Omare sekundarnih sistemov

Omare sekundarnih sistemov bi lahko na grobo razdelili na tiste, v katerih so samo vrstne sponke tokokrogov, in na tiste, v katerih so tudi naprave sekundarnih sistemov. Za vse je pomembno, da je omara vključena v sistem izenačitve potencialov. Omara s svojim kovinskim ohišjem pomeni tudi zaščito proti prenosu motenj v naprave sekundarnih sistemov s sevanjem in proti elektrostatskim razelektritvam. Ta zaščita pa je možna le takrat, ko so stranice in ogrodja omar med seboj električno dobro spojeni. Prav tako morajo biti med seboj električno dobro spojeni. Prav tako morajo biti med seboj električno dobro spojeni.

Bistveno je, da so opleti kablov spojeni v sistem izenačitve potencialov tik pri vstopu kablov v omaro. To je še posebej pomembno v omarah za stikališče, izolirano s plinom. Spoj

kabelskega opleta v vrstno sponko, še posebej, če je v notranjosti omare, ni priporočljiv. Spoj kabelskega opleta v sistem izenačitve potencialov je lahko narejen z zbiralko izenačitve potencialov, lahko pa je narejen z EMC uvodnicami. Če so pritrjene v kovinsko ploščo na dnu omare, mora biti plošča povezana v sistem izenačitve potencialov.



Slika 5.18 Povezave za izenačitev potencialov v komandni omari.

Kjer so v omarah nameščene naprave sekundarnih sistemov, mora biti tudi zanje vzpostavljen sistem izenačitve potencialov – znotraj omare. Na sliki 5.18 je shematski prikaz povezave sestavnih delov omare. Še posebej pomembne so povezave na okvir, kjer so pritrjene naprave sekundarnih sistemov. Teh povezav naj bo čim več (v smislu detajla s slike 5.18).

Znotraj omare je, zaradi učinka zaslanjanja, ki ga nudi kovinska površina, priporočljivo položiti sekundarne tokokroge čim bližje kovinski površini (zgled po sliki 5.13).

V VN stikališču, izoliranem z zrakom, najdemo sponke tokokrogov sekundarnih sistemov v krmilnih omaricah, omaricah napetostnih avtomatov, priključnih omaricah ločilnikov in odklopnikov ter instrumentnih transformatorjev. Naprav sekundarnih sistemov, npr. zaščitnega releja, v teh krmilnih omaricah v slovenskih EEP ni, so le krmilni paneli.

Glede na našteto je v vseh omaricah pomembno narediti povezave v sistem izenačitve potencialov – točke, v katerih so v ta sistem spojeni opleti kablov, bodisi na zbiralke bodisi z EMC uvodnicami na kovinsko ohišje omarice. Te točke morajo torej biti povezane v sistem izenačitve potencialov, ki je hkrati ozemljitveni sistem.

### 5.2.10 Kompenzacijski vodniki

Kompenzacijski vodnik (ang. Parallel Earthing Conductor) zmanjšuje prenos motenj v tokokrog sekundarnih sistemov, ker zmanjša prenosno impedanco. Da bi imel tak učinek, pa mora biti spojen v sistem izenačitve potencialov oziroma ozemljitveni sistem na obeh straneh kakor tudi v več točkah svojega poteka. Izbrani vodnik mora zadoščati tudi kriteriju tokovne obremenljivosti pri okvari v EEP.

Prenosna impedanca je manjša, ko je manjša medsebojna induktivnost sekundarnih tokokrogov s tokokrogi virov. Parametri, ki opredeljujejo vlogo kompenzacijskih vodnikov, so material, njihovo število, razpored in potek.

V referatu [12] je opisan poskus, s katerim smo ugotavljali kompenzacijske učinke. Pokazalo se je, da so bili rezultati najboljši:

- ko sta kompenzacijski vodnik in kabel tesno skupaj,
- če kompenziramo prehodne prenapetosti v manj kot štirih kablih, in sicer morajo biti tesno skupaj, največ na medsebojni razdalji 100 mm,
- ko je kompenzacija na razdalji do 400 mm pri uporabi Cu vrvi,
- ko ima v snopu kablov manj kot 6 kablov svoj kompenzacijski vodnik,
- ko je za kompenzacijo uporabljena Cu vrv prereza vsaj 70 mm<sup>2</sup>.

Za zbiralke izenačitve potencialov v omarah in kot glavne zbiralke izenačitve potencialov (npr. v relejnih hišicah) zaradi praktičnih razlogov pritrjevanja izberemo ploščati vodnik 5 mm × 30 mm ali 5 mm × 40 mm.

#### 5.2.11 Vodniki za povezave

Če je povezava iz ploščate pletenice, mora biti tudi prehod med vodnikom in pritrdilnim mestom ploščat. Pri ploščatih povezavah je določeno tudi priporočljivo razmerje med dolžino in širino povezave manj kot 5 [14], česar pa se v praksi v EEP ne doseže. Če tega pogoja ni možno doseči z enim vodnikom, je treba uporabiti več vzporednih. S tem se doseže manjšo induktivnost povezave.

#### 5.2.12 Spajanje povezav in opletov

Pri izvedbi spojev je treba upoštevati tudi zahteve za preprečevanje korozije (med različnimi kovinami ali zaradi vlage).

V zemlji in v delih, kjer so spoji lahko izpostavljeni vremenskim vplivom imajo prednost, predvsem v sistemu ozemljitev, t. i. nerazdružni spoji (t. j. eksotermni, npr. »Cadweld«, in kompresijski).

V notranjosti stavb, kjer ni možnosti za vlago oziroma kondenz, so spoji lahko tudi vijačni, vendar je bolje narediti kompresijske spoje, če gre za spajanje okroglih vodnikov. Izkušnje iz prakse kažejo, da je kakovost spoja zelo odvisna od skrbnosti izvedbe in uporabljenega materiala. Spoj mora vedno objeti spojene vodnike po celotni površini (po celotnem obodu) vodnika. Zato je treba uporabljati ustrezni spojni material – še posebej pri spoju med ploščatim in okroglim vodnikom, med okroglimi vodniki različnih prerezov, med vodniki različnih materialov – FeZn/Cu ipd.

Za vse spojene dele velja, da je dober stik med spojenima deloma, s stališča EMC, le ploskovni stik, torej po celotni stični površini (slika 5.19). Zato je zelo pomembno, da:

- je na mestu spoja odstranjena barva na celotni površini spoja,
- so oksidirane površine na mestu spoja očiščene,
- je mesto spoja dobro očiščeno (grobi delci, prah, maščoba).

Vsi spoji, ki so v prostorih, kjer je možnost vlage, morajo na koncu biti zaščiteni proti koroziji s posebnim trakom.



Slika 5.19 Izvedba spojev (opleta na zbiralko, ozemljitvene povezave ipd.).
# 6 Retrospektivna statistična analiza merilnih rezultatov

V preteklih 25 letih so bile na Elektroinštitutu Milan Vidmar (EIMV) izmerjene prehodne prenapetosti v sekundarnih tokokrogih v mnogih 110-kV in vseh 220-kV ter 400-kV EEP v Sloveniji. V nekaterih so bile meritve opravljene večkrat, v presledkih po približno pet let. V nekaterih pa so bile meritve opravljene pred prenovo postroja in po prenovi. Metoda merjenja je bila zasnovana v študiji [2] in natančneje opredeljena v referatu [5]. Meritve, predvsem na EIMV, so bile načrtovane kot rutinske meritve. Merilni rezultati naj bi dali oceno o zagotovitvi elektromagnetne združljivosti v postroju.

Glede na to, da meritve niso bile namenjene izrecno za študijsko analizo, obsegajo zbrani spremljajoči podatki posameznega EEP le grobe informacije:

- o materialu osnovne ozemljitvene mreže (Cu vrv ali FeZn trak) in v grobem njeno oblikovanje,
- o prisotnosti kompenzacijskega vodnika, vendar brez informacije o natančnem poteku in prerezu ter številu kompenzacijskih vodnikov,
- o vrsti kablov za sekundarne tokokroge z opletom ali brez opleta, vendar brez podrobnosti o tipu opleta, čeprav je večinoma uporabljen tip NYCY.

Kot se je v analizi izkazalo, bi morali spremljajoči podatki vsebovati vsaj še:

- vrsto instrumentnih transformatorjev (ali je induktivni ali kapacitivni, ali je sekundarno navitje spodaj ali zgoraj, po možnosti tudi znamko in tip)
- gostoto ozemljitvenih povezav med komandnim prostorom in primarnim delom postroja,
- natančnejši opis lege in razporeditve kompenzacijskih vodnikov.

Čeprav je bilo merjenih veliko postrojev – nekateri tudi večkrat – mnogi merilni rezultati niso bili uporabni, ker so se ohranili samo zapisani rezultati o maksimalnih vrednostih. Posnetki v elektronski obliki iz začetnih let pa zaradi sprememb programske opreme niso več dosegljivi. Zato so v tej analizi uporabljeni merilni rezultati iz zadnjih 15 let.

## 6.1 Merilna metoda in oprema

Merilna metoda je dokaj enostavna in ne zahteva posebnih preskusnih generatorjev in sklopnih vezij. Meritev poteka med stikalnim preklopom, ki je del normalnega obratovanja. Preklopni element je ločilnik oziroma ločilniki vseh treh faz. Preklopi in meritve potekajo v posameznem VN polju, pri čemer so v polju odklopniki izklopljeni. To velja tako za daljnovodna polja kot za zvezna polja. Na sliki 6.1 je prikazano daljnovodno polje. Daljnovod, ki je priključen v daljnovodno polje, je med meritvijo pod napetostjo, tako da lahko s preklopom daljnovodnih ločilnikov (Q9) nastane napetostni in tokovni val, ki potuje do instrumentnih transformatorjev (T1 in T5) in do odklopnikov Q0. V zveznem polju (slika 6.2), ki povezuje dva sistema zbiralk, poteka merjenje pri preklopu tistih ločilnikov (Q1), kjer so v veji do odklopnikov (Q0) postavljeni instrumentni transformatorji (T1). Zato mora biti pod napetostjo ustrezni sistem zbiralk (G I).



Slika 6.1 Enopolna sh

Enopolna shema daljnovodnega polja.



Slika 6.2 Enopolna shema zveznega polja.

Ker gre za meritve v delujočem postroju, se primarnega dela ne razelektri po izklopu ločilnika. Meritve se torej opravijo pri ujeti elektrini (ang. Trapped charge).

Cigré publikacija [6, str. 244] prav takšen način preskušanja v delujočem postroju omenja kot eno od možnosti za preskušanje dejanskega stanja zagotovitve elektromagnetne združljivosti – glede na izvedbo ozemljitve, izenačitve potencialov, postavitev sekundarnih kablov itd. V sklopu takšnega preskusa je zato smiselno, da so sekundarne naprave vključene v tokokrogu.

Merjena veličina je napetost, ki jo merimo na sponkah sekundarnega tokokroga na vhodu sekundarne naprave (v relejni hišici ali v komandnem prostoru oziroma relejnem prostoru). Napetost merimo med vodnikom tokokroga in ozemljitveno povezavo (t.j. asimetrična napetost).

Merilna oprema je zadnjih 15 let sestavljena iz digitalnih osciloskopov z napetostnimi sondami. Skupni analogni frekvenčni doseg merilnega sistema je 200 MHz. Osciloskopi vzorčijo vhodni signal s frekvenco  $2 \cdot 10^9$  s<sup>-1</sup>. Ker so prehodni pojavi ob preklopu ločilnika dolgi do nekaj sekund, je treba meritev opraviti na poseben način, sicer pomnilnik v osciloskopu ne bi zadoščal za celotni posnetek. Odnos med vzorčenjem posnetka in časom meritve je dan z enačbo (6.1):

$$NS = S \cdot T_M \tag{6.1}$$

kjer so:

NS število vzorcev (točk posnetka),

S vzorčenje  $[s^{-1}]$ ,

 $T_M$  čas trajanja meritve [s].

Primer: pri stalnem vzorčenju vhodnega signala z  $2 \cdot 10^9$  s<sup>-1</sup> in času merjenja 2 s, bi za to potrebovali pomnilnik s  $4 \cdot 10^9$  točkami. Zato imajo osciloskopi prilagojeno vzorčenje, ki se zmanjša sorazmerno z dolžino merjenja. Če ima osciloskop pomnilnik za 2500 točk, bi v tem primeru osciloskop vzorčil samo z  $1,25 \cdot 10^3$  s<sup>-1</sup>. Očitno premalo za kakršnokoli merjenje prehodnih pojavov, ker mora biti za pravilno merjenje prehodnega pojava frekvenca vzorčenja vsaj 5-krat do 10-krat večja od frekvence pojava. Tudi pri večjem pomnilniku, npr. za 50 $\cdot 10^3$  točk, bi osciloskop vzorčil samo s frekvenco  $20 \cdot 10^3$  s<sup>-1</sup>.

Rešitev v takšnem primeru je osciloskop s posebnim načinom zajemanja merjenega signala, t. i. »Peak Detect«. To pomeni, da osciloskop vzorči vhodni signal z maksimalno frekvenco. Celotni čas meritve je razdeljen v NS/2 intervalov. V vsak interval se shranita maksimalna in minimalna vrednost vhodnega signala v tistem intervalu. Pri takšnem načinu se ohrani amplitudna informacija merjenega signala, izgubita pa se oblika in frekvenca. Zaradi tega se frekvenco pojava meri z drugim osciloskopom, ki v krajšem času posname posamezno prenapetost.

Pri vsakem merjenju v posameznem tokokrogu se opravi več meritev, tako pri vklopu ločilnika kot pri izklopu – tipično po trije vklopi in trije izklopi.

## 6.2 Opis merjenih EEP in njihove izvedbe

Meritve prehodnih prenapetosti so bile opravljene tako v postrojih prenosa kot distribucije. V analizo so bili uvrščeni samo postroji, izolirani z zrakom. Osnovni podatki postrojev so zbrani v tabeli 6.1.

	EEP	Naz. nap.	Kabli z opletom (JA, NE)	Mat. ozem. mreže (Cu, FeZn)	Zgostitev ozem. mreže (JA, NE)	Funkc. izenač. potenc. (JA, NE)	Komp. vodn. v ST (JA, NE)	Mat. komp. vodn. (Cu, FeZn)	Povez. med KP in ST (gosta, redka)	Tokokrog
1	EEP-01	110	NE	FeZn	NE	NE	NE		redka	tok KP
2	EEP-01	110	NE	FeZn	NE	NE	NE		redka	nap KP
3	EEP-02	110	JA	Cu	JA	JA	NE		gosta	tok KP
4	EEP-02	110	JA	Cu	JA	JA	NE		gosta	nap KP
5	EEP-02	110	JA	Cu	JA	JA	NE			tok ST
6	EEP-02	110	JA	Cu	JA	JA	NE			nap ST
7	EEP-03	110	JA	Cu	JA	JA	JA	CU	gosta	tok KP
8	EEP-03	110	JA	Cu	JA	JA	JA	CU	gosta	nap KP
9	EEP-04	110	NE	Cu	NE	NE	NE		redka	tok KP
10	EEP-05	110	JA	FeZn	NE	JA	JA	CU		tok ST
11	EEP-05	110	JA	FeZn	NE	JA	JA	CU		nap ST
12	EEP-06	110	JA	FeZn	NE	JA	JA	CU	redka	tok KP
13	EEP-06	110	JA	FeZn	NE	JA	JA	CU	redka	nap KP
14	EEP-07	110	JA	Cu	JA	JA	JA	CU		tok ST
15	EEP-07	110	JA	Cu	JA	JA	JA	CU		nap ST
16	EEP-08	110	NE	FeZn	NE	NE	NE			nap ST
17	EEP-08	110	NE	FeZn	NE	NE	NE		redka	nap KP
18	EEP-09	110	JA	Cu	JA	JA	JA	CU		tok ST
19	EEP-09	110	JA	Cu	JA	JA	JA	CU		nap ST
20	EEP-10	220	JA	Cu	JA	JA	JA	CU		tok ST
21	EEP-10	220	JA	Cu	JA	JA	JA	CU		nap ST
22	EEP-11	110	JA	Cu	JA	JA	JA		redka	tok KP
23	EEP-11	110	JA	Cu	JA	JA	JA		redka	nap KP
24	EEP-11	110	JA	Cu	JA	JA	JA			tok ST
25	EEP-12	220	JA	Cu	JA	JA	JA			tok ST
26	EEP-12	220	JA	Cu	JA	JA	JA		redka	tok KP
27	EEP-12	220	JA	Cu	JA	JA	JA			nap ST
28	EEP-12	220	JA	Cu	JA	JA	JA		redka	nap KP

Tabela 6.1 Podatki merjenih EEP

	EEP	Naz. nap.	Kabli z opletom (JA, NE)	Mat. ozem. mreže (Cu, FeZn)	Zgostitev ozem. mreže (JA, NE)	Funkc. izenač. potenc. (JA, NE)	Komp. vodn. v ST (JA, NE)	Mat. komp. vodn. (Cu, FeZn)	Povez. med KP in ST (gosta, redka)	Tokokrog
29	EEP-13	110	JA	Cu	JA	JA	JA	CU	,	tok ST
30	EEP-13	110	JA	Cu	JA	JA	JA	CU		nap ST
31	EEP-14	110	JA	Cu	JA	JA	NE		gosta	tok KP
32	EEP-14	110	JA	Cu	JA	JA	NE		gosta	nap KP
33	EEP-15	110	JA	FeZn	NE	JA	NE			tok ST
34	EEP-15	110	JA	FeZn	NE	JA	NE			nap ST
35	EEP-16	400	JA	FeZn	NE	JA	NE			tok ST
36	EEP-16	400	JA	FeZn	NE	JA	NE			nap ST
37	EEP-17	110	JA	FeZn	NE	JA	JA	CU	redka	tok KP
38	EEP-17	110	JA	FeZn	NE	JA	JA	CU	redka	nap KP
39	EEP-18	110	JA	Cu	JA	JA	NE			tok ST
40	EEP-18	110	JA	Cu	JA	JA	NE			nap ST
41	EEP-19	400	JA	Cu	JA	JA	NE			tok ST
42	EEP-19	400	JA	Cu	JA	JA	NE			nap ST
43	EEP-20	110	NE	FeZn	NE	NE	NE			tok ST
44	EEP-20	110	NE	FeZn	NE	NE	NE		redka	tok KP
45	EEP-20	110	NE	FeZn	NE	NE	NE			nap ST
46	EEP-20	110	NE	FeZn	NE	NE	NE		redka	nap KP
47	EEP-21	400	JA	FeZn	NE	JA	NE			tok ST
48	EEP-22	110	JA	FeZn	NE	JA	JA	CU	redka	tok KP
49	EEP-22	110	JA	FeZn	NE	JA	JA	CU	redka	nap KP
50	EEP-23	110	JA	FeZn	NE	JA	NE		redka	tok KP
51	EEP-23	110	JA	FeZn	NE	JA	NE		redka	nap KP
52	EEP-24	110	JA	FeZn	NE	JA	JA	CU	redka	tok KP
53	EEP-24	110	JA	FeZn	NE	JA	JA	CU	redka	nap KP
54	EEP-25	110	NE	FeZn	NE	NE	NE			tok ST
55	EEP-25	110	NE	FeZn	NE	NE	NE		redka	tok KP
56	EEP-25	110	NE	FeZn	NE	NE	NE			nap ST
57	EEP-25	110	NE	FeZn	NE	NE	NE		redka	nap KP
58	EEP-26	110	NE	FeZn	NE	NE	NE		redka	tok KP
59	EEP-26	110	NE	FeZn	NE	NE	NE		redka	nap KP
60	EEP-27	110	JA	FeZn	NE	JA	NE			tok ST
61	EEP-27	110	JA	FeZn	NE	JA	NE		redka	tok KP
62	EEP-27	110	JA	FeZn	NE	JA	NE			nap ST
63	EEP-27	110	JA	FeZn	NE	JA	NE		redka	nap KP
64	EEP-28	110	JA	Cu	JA	JA	JA	CU	gosta	tok KP
65	EEP-28	110	JA	Cu	JA	JA	JA	CU	gosta	nap KP
66	EEP-29	110	JA	Cu	JA	JA	JA	CU	gosta	tok KP
67	EEP-29	110	JA	Cu	JA	JA	JA	CU	gosta	nap KP
68	EEP-30	110	JA	Cu	JA	JA	NE		redka	tok KP
69	EEP-30	110	JA	Cu	JA	JA	NE		redka	nap KP

Zbrani posnetki so bili za vsak EEP razvrščeni v štiri skupine glede na vrsto tokokroga:

- tokokrog, ki poteka od instrumentnega transformatorja v relejno hišico ali krmilno omarico
  - o tok v stikališču (»tok\_ST«),
  - o napetost v stikališču (»nap\_ST«),
- tokokrog, ki poteka od krmilne omarice v komandno stavbo
  - o tok v komandnem prostoru (»tok\_KP«),
  - o napetost v komandnem prostoru (»nap\_KP«).

V nekaterih EEP niso vse skupine tokokrogov. Kjer so postavljene relejne hišice, sta samo tokokroga »tok\_ST« in »nap\_ST«, ker so tam sekundarne naprave. Kjer ni relejnih hišic, so v stikališču, predvsem v starejših postrojih, krmilne omarice (tokokroga »tok\_ST« in »nap\_ST«), od katerih so tokokrogi speljani v komandno stavbo (»tok\_KP« in »nap\_KP«). V novejših distribucijskih postrojih tokokrogi, vsaj od tokovnikov, potekajo iz stikališča direktno v komandno stavbo.

V EEP so bili sistematično, od vsega začetka merjeni sekundarni tokokrogi instrumentnih transformatorjev (t. i. tokovniki in napetostniki). Glavni razlog je, da ti tokokrogi prenašajo informacijo o toku in napetosti primarnega dela EEP v naprave za vodenje, zaščito in meritve.

## 6.3 Statistična analiza

Namen analize je raziskati hipotezo, da je raven prehodnih prenapetosti v postroju odvisna od uporabljenih pasivnih ukrepov – parametrov postroja. Analiza po parametrih je narejena v okviru skupin tokokrogov, ki so del sistema vodenja postroja (to so 2. jedro v tokovnikih oziroma 2. navitje v napetostnikih). Ti tokokrogi so bili izbrani, ker je pregled merilnih rezultatov pokazal, da so prenapetosti v drugih tokokrogih dosledno manjše.

Parametri postroja so posamezni pasivni ukrepi:

- uporabljena vrsta kablov za sekundarne tokokroge JA pomeni z opletom, NE pomeni brez opleta,
- material za ozemljitveno mrežo Cu pomeni baker, FeZn pomeni pocinkani jekleni trak, t. i. valjanec,
- zgostitev ozemljitvene mreže JA pomeni, da so VN naprave povezane z ozemljitvijo dvostransko (t.j. v dve veji ozemljitve), NE pomeni, da so VN naprave povezane z ozemljitvijo enostransko,
- funkcionalna izenačitev potencialov JA pomeni, da je vsak kabelski oplet na obeh svojih koncih spojen s sistemom izenačitve potencialov, ki ga tvorijo zbiralke, povezane z ozemljitvijo, da so kovinske kabelske police in kanali povezani vzdolž

svojega poteka in z ozemljitvijo, NE pa pomeni, da vsega naštetega ni (v vseh analiziranih postrojih sovpada uporaba opletenih kablov z vzpostavljeno funkcionalno izenačitvijo, zato je pri analizi upoštevan kot parameter samo kabel),

- kompenzacijski vodnik v ST (stikališču) JA pomeni, da je vzdolž sekundarnih kablov v kabelskem kanalu položen vsaj en kompenzacijski vodnik, ne glede na oddaljenost od sekundarnih kablov, NE pomeni, da ni kompenzacijskega vodnika,
- material kompenzacijskega vodnika Cu, pisan tudi CU (zaradi zahtev analitičnega programa) pomeni baker, FeZn pomeni pocinkani jekleni trak (te možnosti nismo zasledili nikjer; kjer je položen kompenzacijski vodnik, je vedno bakren),
- povezava med KP (komandnim prostorom) in ST (stikališčem) gosta pomeni, da je stavba z ozemljitveno mrežo povezana vsaj približno tako, kot je prikazano na sliki 5.2, redka pa pomeni, da je povezav manj, po navadi ima stavba obroč, ki je na dveh mestih spojen z ozemljitveno mrežo.

### 6.3.1 Priprava podatkov

V sklopu pripravljanja merilnih rezultatov, t.j. posnetkov prenapetosti, so bili v posameznem EEP združeni posnetki določenega tokokroga. Izmed vseh posnetkov so bili upoštevani samo tisti, ki so bili posneti pri preklopu ločilnika v tistem polju, kjer je tudi merjeni tokokrog (primer: za tokokrog tokovnika daljnovodnega polja EAxy so bili združeni samo posnetki, dobljeni pri preklopih daljnovodnega ločilnika Q9 v polju EAxy).

Združeni posnetki določenega tokokroga iz določenega postroja predstavljajo en vzorec. Dobljeni vzorci imajo od nekaj sto do nekaj tisoč elementov (amplitud prenapetosti).

Pri vsakem vzorcu sta prisotna šum in del posnetka, ki je pred prehodno prenapetostjo oziroma po njej (slika 6.3). Šum in del posnetka brez prenapetosti bi pri analizi popačila rezultat. Ko določimo raven šuma, lahko pri analizi upoštevamo samo tiste točke posnetka, ki imajo amplitudo večjo od šuma (označeno z okvirjem na sliki 6.3). S tem izločimo šum.

V tokokrogu napetostnika je šum vrednost fazne napetosti. Pri razmerju napetostnika  $U_n/0,1$ kV je temenska vrednost fazne napetosti za  $\sqrt{2}/\sqrt{3}$  večja, kar je približno 81,6 V. Ker omrežje po navadi deluje pri višji napetosti (za 5 % do 10 %), je toliko višja tudi napetost v sekundarnem tokokrogu. V nekaterih primerih je bila še višja. Zato je bila raven šuma ugotovljena za vsak vzorec posebej.

V tokokrogu tokovnika so razmere drugačne. Skozi tokovnik ne teče bremenski tok (ker je odklopnik v polju izklopljen), vendar je v posnetku prisoten šum zaradi vseh drugih vplivov. Amplituda šuma je med približno 4 V in 20 V. Tudi pri teh vzorcih je bila raven šuma ugotovljena za vsakega posebej.



Slika 6.3 Šum v posnetku tokokroga napetostnika in upoštevani del posnetka s prenapetostmi.

#### 6.3.2 Testiranje vzorcev

Iz opisa nastanka prenapetosti v poglavju 3.2 izhaja domneva, da prenapetosti zaradi eksponentnega člena ne bodo imele normalne porazdelitve. Testiranje vzorcev je pokazalo, da so koeficienti asimetričnosti večinoma med 1 in 9, kar pomeni, da imajo vzorci daljši rep na desni (proti večjim vrednostim). Koeficienti sploščenosti imajo vrednosti večinoma več kot 1 do približno 33, kar kaže na zelo ozko obliko, nekaj pa je sploščenih. Grafično lahko prikažemo testiranje z grafom skladnosti med dejansko porazdelitvijo podatkov in pričakovano porazdelitvijo. Pri tem so parametri pričakovane porazdelitve izračunani iz podatkov vzorca. Na sliki 6.4 je primer testa z grafom, kjer premica kaže pričakovano vrednost pri normalni porazdelitvi, krivulja pa kaže dejansko porazdelitev vzorca tokokroga tok\_KP v postroju EEP-28. Krivulja, ki jo opisujejo krogci (modre barve) je porazdelitev surovih podatkov. Očitno je, da porazdelitev ni normalna. Krivulja, ki jo opisujejo kvadratki (rdeče barve) je porazdelitev transformiranih podatkov. Ujemanje z normalno porazdelitvijo je popolno, ker vse vrednosti ležijo na premici. Na abscisi so opazovane vrednosti (Observed Value), na ordinati so pričakovane normalne vrednosti (Expected Normal Value).

Ker imajo statistične analize, ki temeljijo na normalni porazdelitvi vzorca, večjo moč kot neparametrične, je zato vzorce smiselno transformirati tako, da bo njihova porazdelitev postala normalna. To dosežemo z logaritmiranjem vrednosti v vzorcih.





	71584	56	1,748188
	71585	188	2,274158
	71586	44	1,643453
	71587	4	0,60206
	71588	8	0,90309
-	71589	224	2,350248
	71590	116	2,064458
	71591	204	2,30963
	71592	8	0,90309
-	71593	200	2,30103
-	71594	160	2,20412
	71595	168	2,225309
-	71596	128	2,10721
-	71597	140	2,146128
-	71598	4	0,60206
-	71599	8	0,90309
	71600	132	2,120574
	71601	220	2,342423
	71602	52	1,716003
	71603	36	1,556303
	71604	216	2,334454
	71605	220	2,342423
	71606	36	1,556303

Slika 6.5 Izrez iz vzorca tok\_ST v EEP-21.

Po opravljenem testiranju porazdelitve vzorcev je bila narejena transformacija podatkov. Na sliki 6.5. je levi stolpec številka podatka v vzorcu, srednji stolpec je amplituda prenapetosti, desni stolpec pa je transformirana vrednost srednjega stolpca. Na transformiranih podatkih so bile narejene opisne statistike (slika 6.6), med njimi: aritmetična srednja vrednost (19), intervali zaupanja aritmetične srednje vrednosti (20, 21), varianca (30),

standardni odklon (31), interval zaupanja standardne deviacije (32, 33), test asimetričnosti (36) in sploščenosti (38), število veljavnih podatkov (17, 18).



Slika 6.6

Del opisnih statistik vzorca tok ST v EEP-21.

#### 6.3.3 Faktorska analiza variance

Za analizo vpliva, ki ga ima posamezni parameter postroja, je bila narejena enosmerna analiza vpliva posamičnih faktorjev (ANOVA). Rezultat analize kaže ali se povprečja pri posameznem faktorju med seboj statistično razlikujejo. Statistično značilne so tiste trditve, pri katerih je meja sprejetja hipoteze podana z  $\alpha$ =0,05 (verjetnost napake tipa I je 5 %).

Odvisna spremenljivka je aritmetična srednja vrednost iz opisne statistike posameznega transformiranega vzorca. Pri analizi je bilo ugotovljeno, da je treba vpeljati dodatni parameter gostoto ozemljitvene povezave med stikališčem in komandno stavbo, s čimer je faktorska analiza za tokokroge v komandnem prostoru pridobila statistično moč. Podatek o gostoti povezave je bil rekonstruiran na podlagi podatkov o starosti merjenega postroja, rastra ozemljitvene mreže v stikališču in poteka kabelskih kanalov med stikališčem ter komandno stavbo.

Kategorične spremenljivke, z dodano vred so: vrsta kablov, material ozemljitvene mreže, zgostitev ozemljitvene mreže, kompenzacijski vodnik, povezava med stikališčem in komandnim prostorom. Vsaka analiza je bila narejena po skupinah, ki jih predstavljajo tokokrogi: tok\_KP, tok\_ST, nap\_KP, nap\_ST.

V nadaljevanju so zbrani tabelarični in grafični rezultati faktorske analize variance s komentarji. Pomen izrazov v tabelah je:

- »Mean« povprečna vrednost,
- »Mean Std. Err.« standardna deviacija povprečne vrednosti,
- »Mean -95,00%« spodnja meja intervala zaupanja povprečne vrednosti,
- »Mean +95,00%« zgornja meja intervala zaupanja povprečne vrednosti,
- »N« število vzorcev.

#### Tabela 6.2 ANOVA za tokokrog nap KP (kategorija: kabel)

LS Means Current effect: F(1, 17)=4,5686, p=,04739 Effective hypothesis decomposition



Slika 6.7 Graf povprečja pri kablu z opletom in brez opleta za tokokrog nap\_KP.

Komentar: V tokokrogih nap\_KP je povprečje prenapetosti pri kablu z opletom statistično značilno različno od povprečja pri kablu brez opleta (p=0,04739 < 0,05).

Tabela 6.3	ANOVA za tokokrog nap ST (	kategorija: kabel)
------------	----------------------------	--------------------

Γ	Kabli z opletom (JA, NE)	Mean - Mean	Mean - Std.Err.	Mean95,00%	Mean - +95,00%	Ν
1	JA	2,079937	0,073237	1,921719	2,238156	12
2	NE	2,558555	0,146474	2,242118	2,874992	3

IS Means Current effect.	F(1	12)-8 5/18	n- 01188 Effect	ive hypothesis	decomposition
LJ IVICALIS CULLCTIC CHECCL.	· ( ±,	10,-0,0410,	p-,01100 LIICCL		uccomposition



Slika 6.8 Graf povprečja pri kablu z opletom in brez opleta za tokokrog nap\_ST.

Komentar: V tokokrogih nap\_ST je povprečje prenapetosti pri kablu z opletom statistično značilno različno od povprečja pri kablu brez opleta (p=0,01188 < 0,05).

#### Tabela 6.4 ANOVA za tokokrog tok KP (kategorija: kabel)





Komentar: V tokokrogih tok\_KP je povprečje prenapetosti pri kablu z opletom statistično značilno različno od povprečja pri kablu brez opleta (p=0,00416 < 0,05).



Tabela 6.5ANOVA za tokokrog tok ST (kategorija: kabel)

LS Means Current effect: F(1, 14)=3,5791, p=,07938 Effective hypothesis decomposition



Komentar: V tokokrogih tok\_ST povprečje prenapetosti pri kablu z opletom ni statistično značilno različno od povprečja pri kablu brez opleta (p=0,07938 > 0,05).

Tabela 6.6	ANOVA za tokokrog nap KP (kategorija: material ozemljitvene mreže)
LS Mear	s Current effect: F(1, 17)=1,7378, n= 20490 Effective hypothesis decomposition

	Mat. ozem. mreže (Cu, FeZn)	Mean - Mean	Mean - Std.Err.	Mean95,00%	Mean - +95,00%	Ν			
1	Cu	2,030110	0,044160	1,936942	2,123279	8			
2	FeZn	2,106619	0,037659	2,027164	2,186073	11			





Komentar: V tokokrogih nap\_KP povprečje prenapetosti pri ozemljitveni mreži iz bakra ni statistično značilno različno od povprečja pri ozemljitveni mreži iz FeZn (p=0,20490 > 0,05).



ANOVA za tokokrog nap ST (kategorija: material ozemljitvene mreže) Tabela 6.7

LS Means Current effect: F(1, 13)=3,3704, p=,08935 Effective hypothesis decomposition



Komentar: V tokokrogih nap ST povprečje prenapetosti pri ozemljitveni mreži iz bakra ni statistično značilno različno od povprečja pri ozemljitveni mreži iz FeZn (p=0,08935 > 0,05).

Tabela 6.8 ANOVA za tokokrog tok KP (kategorija: material ozemljitvene mreže) LS Means Current effect: F(1, 17)=2.9193, p=.10572 Effective hypothesis decomposition

_										
	Mat. ozem. mreže (Cu, FeZr	n) Mean - Mean	Mean - Std.Err.	Mean95,00%	Mean - +95,00%	Ν				
-	LCu	1,391982	0,117584	1,143902	1,640063	9				
1	2 FeZn	1,668911	0,111550	1,433561	1,904261	10				
	Takakagatak KP									





Komentar: V tokokrogih tok KP povprečje prenapetosti pri ozemljitveni mreži iz bakra ni statistično značilno različno od povprečja pri ozemljitveni mreži iz FeZn (p=0,10572 > 0,05).

**1** Cu

2 FeZn



Tabela 6.9 ANOVA za tokokrog tok ST (kategorija: material ozemljitvene mreže)



Mat. ozem. mreže (Cu, FeZn)

Komentar: V tokokrogih tok\_ST povprečje prenapetosti pri ozemljitveni mreži iz bakra ni statistično značilno različno od povprečja pri ozemljitveni mreži iz FeZn (p=0,31284 > 0,05).

Tabela 6.10 ANOVA za tokokrog nap KP (kategorija: zgostitev ozemljitvene mreže)

	LS Means Current effect: F(1, 17)=1,7378, p=,20490 Effective hypothesis decomposition							
	Zgostitev ozem. mreže (JA, NE)	Mean - Mean	Mean - Std.Err.	Mean95,00%	Mean - +95,00%	Ν		
1	JA	2,030110	0,044160	1,936942	2,123279	8		
2	NE	2,106619	0,037659	2,027164	2,186073	11		



Slika 6.15 Graf povprečja pri zgoščeni in nezgoščeni ozemljitveni mreži za tokokrog nap\_KP.

Komentar: V tokokrogih nap\_KP povprečje prenapetosti pri zgoščeni ozemljitveni mreži ni statistično značilno različno od povprečja pri nezgoščeni (p=0,20490 > 0,05).

	LS Means Current effect: F(1, 13)=3,3704, p=,08935 Effective hypothesis decomposition								
	Zgostitev ozem. mreže (JA, NE)	Mean - Mean	Mean - Std.Err.	Mean95,00%	Mean - +95,00%	Ν			
1	JA	2,046619	0,102893	1,824332	2,268906	8			
2	NE	2,323137	0,109997	2,085502	2,560772	7			

Tabela 6.11ANOVA za tokokrog nap ST (kategorija: zgostitev ozemljitvene mreže)



Slika 6.16 Graf povprečja pri zgoščeni in nezgoščeni ozemljitveni mreži za tokokrog nap\_ST.

Komentar: V tokokrogih nap\_ST povprečje prenapetosti pri zgoščeni ozemljitveni mreži ni statistično značilno različno od povprečja pri nezgoščeni (p=0,08935 > 0,05).

Tabela 6.12 ANOVA za tokokrog tok KP (kategorija: zgostitev ozemljitvene mreže)

	LS Means Current effect: F(1, 17)=7,2709, p=,01529 Effective hypothesis decomposition								
	Zgostitev ozem. mreže (JA, NE)	Mean - Mean	Mean - Std.Err.	Mean95,00%	Mean - +95,00%	N			
1	JA	1,305924	0,112985	1,067548	1,544301	8			
2	NE	1,706323	0,096354	1,503035	1,909611	11			



Slika 6.17 Graf povprečja pri zgoščeni in nezgoščeni ozemljitveni mreži za tokokrog tok\_KP.

Komentar: V tokokrogih tok\_KP je povprečje prenapetosti pri zgoščeni ozemljitveni mreži statistično značilno različno od povprečja pri nezgoščeni (p=0,01529 < 0,05).

T     C 4 0		//	1	× ۱
Labela 6 13	$\Delta N(1) / \Delta$ 72 tokokrog tok SI	(kategorija: zgostitev	ozemlutvene m	reze)
		(Rategorija, 2605tite)	ozennjitvene m	

	LS Means Current effect: F(1, 14)=1,0962, p=,31284 Effective hypothesis decomposition								
	Zgostitev ozem. mreže (JA, NE)	Mean - Mean	Mean - Std.Err.	Mean95,00%	Mean - +95,00%	Ν			
1	JA	1,632995	0,071985	1,478602	1,787388	9			
2	NE	1,746941	0,081624	1,571876	1,922007	7			



Slika 6.18 Graf p

Graf povprečja pri zgoščeni in nezgoščeni ozemljitveni mreži za tokokrog tok\_ST.

Komentar: V tokokrogih tok\_ST povprečje prenapetosti pri zgoščeni ozemljitveni mreži ni statistično značilno različno od povprečja pri nezgoščeni (p=0,31284 > 0,05).



Tabela 6.14 ANOVA za tokokrog nap KP (kategorija: kompenzacijski vodnik)





Komentar: V tokokrogih nap\_KP povprečje prenapetosti s kompenzacijskim vodnikom ni statistično značilno različno od povprečja brez kompenzacijskega vodnika (p=0,14286 > 0,05).

Tabela 6.15	ANOVA za tokokrog nap	ST (kategorija:	kompenzacijski vodnik)
-------------	-----------------------	-----------------	------------------------





Slika 6.20 Graf povprečja pri postrojih s kompenzacijskim vodnikom in brez za tokokrog nap ST.

Komentar: V tokokrogih nap\_ST povprečje prenapetosti s kompenzacijskim vodnikom ni statistično značilno različno od povprečja brez kompenzacijskega vodnika (p=0,20464 > 0,05).

	LS Means Current effect: F(1, 17)=2,8256, p=,11105 Effective hypothesis decomposition								
	Komp. vodn. v ST (JA, NE)	Mean - Mean	Mean - Std.Err.	Mean95,00%	Mean - +95,00%	Ν			
1	NE	1,667093	0,111813	1,431188	1,902998	10			
2	JA	1,394002	0,117862	1,145336	1,642668	9			

 Tabela 6.16
 ANOVA za tokokrog tok KP (kategorija: kompenzacijski vodnik)



Slika 6.21 Graf povprečja pri postrojih s kompenzacijskim vodnikom in brez za tokokrog tok\_KP.

Komentar: V tokokrogih tok\_KP povprečje prenapetosti s kompenzacijskim vodnikom ni statistično značilno različno od povprečja brez kompenzacijskega vodnika (p=0,11105 > 0,05).

Tabela 6.17 ANOVA za tokokrog tok ST (kategorija: kompenzacijski vodnik)

	LS Means Current effect: F(1, 14)=2,0712, p=,17208 Effective hypothesis decomposition									
Komp. vodn. v ST (JA, NE) Mean - Mean Mean - Std.Err. Mean95,00% Mean					Mean - +95,00%	Ν				
1	NE	1,749260	0,069767	1,599623	1,898896	9				
2	JA	1,597458	0,079109	1,427786	1,767130	7				



Slika 6.22 Graf povprečja pri postrojih s kompenzacijskim vodnikom in brez za tokokrog tok\_ST.

Komentar: V tokokrogih tok\_ST povprečje prenapetosti s kompenzacijskim vodnikom ni statistično značilno različno od povprečja brez kompenzacijskega vodnika (p=0,17208 > 0,05).

Tabela 6.18	ANOVA za tokokrog nap KP	(kategorija: povezava i	med ST in KP)
-------------	--------------------------	-------------------------	---------------

	LS Means Current effect: F(1, 17)=1,1356, p=,30149 Effective hypothesis decomposition								
	Povez. med KP in ST (gosta, redka)	Mean - Mean	Mean - Std.Err.	Mean 95,00%	Mean - +95,00%	N			
1	redka	2,092954	0,033931	2,021365	2,164542	14			
2	gosta	2,022468	0,056778	1,902677	2,142258	5			



Slika 6.23 Graf povprečja pri postrojih z gosto in redko povezavo med komandnim prostorom in stikališčem za tokokrog nap\_KP.

Komentar: V tokokrogih nap\_KP povprečje prenapetosti pri gosti povezavi ni statistično značilno različno od povprečja pri redki povezavi (p=0,30149 > 0,05).

	LS Current effect: F(1, 17)=7,8063, p=,01246 Effective hypothesis decomposition							
Povez. med KP in ST (gosta, redka)Mean - MeanMMean - MeanStd.Err.9				Mean 95,00%	Mean - +95,00%	Ν		
1	redka	1,658820	0,084482	1,480579	1,837060	14		
2	gosta	1,198695	0,141365	0,900441	1,496948	5		

#### Tabela 6.19 ANOVA za tokokrog tok KP (kategorija: povezava med ST in KP)



Slika 6.24 Graf povprečja pri postrojih z gosto in redko povezavo med komandnim prostorom in stikališčem za tokokrog tok\_KP.

Komentar: V tokokrogih tok\_KP je povprečje prenapetosti pri gosti povezavi statistično značilno različno od povprečja pri redki povezavi (p=0,01246 < 0,05).

Tabela 6.20	ANOVA z	a združene	tokokroge	(kategorija:	kabli)
-------------	---------	------------	-----------	--------------	--------

	LS Current effect: F(1, 67)=11,624, p=,00111 Effective hypothesis decomposition									
	Kabli z opletom (JA, NE)	Mean - Mean	Mean - Std.Err.	Mean95,00%	Mean - +95,00%	Ν				
1	JA	1,781843	0,047810	1,686414	1,877271	54				
2	NE	2,131438	0,090712	1,950376	2,312501	15				



Slika 6.25 Graf povprečja pri kablu z opletom in brez opleta za združene tokokroge.

Komentar: Za združene tokokroge je povprečje prenapetosti pri kablu z opletom statistično značilno različno od povprečja pri kablu brez opleta (p=0,00111 < 0,05).



Tabela 6.21 ANOVA za združene tokokroge (kategorija: material ozemljitvene mreže)

Slika 6.26 Graf povprečja pri ozemljitveni mreži iz Cu in FeZn za združene tokokroge.

Komentar: Za združene tokokroge je povprečje prenapetosti pri ozemljitveni mreži iz bakra statistično značilno različno od povprečja pri mreži iz FeZn (p=0,03286 < 0,05).

Tabela 6.22	ANOVA za združene	tokokroge	(kategorija: zg	gostitev ozem	ljitvene mreže)
		0		J	J /

	LS Means Current effect: F(1, 67)=5,4677, p=,02236 Effective hypothesis decomposition									
	Zgostitev ozem. mreže (JA, NE)	Mean - Mean	Mean - Std.Err.	Mean95,00%	Mean - +95,00%	Ν				
1	JA	1,750248	0,063703	1,623096	1,877400	33				
2	NE	1,956470	0,060991	1,834731	2,078208	36				



Slika 6.27 Graf povprečja pri zgoščeni in nezgoščeni ozemljitveni mreži za združene tokokroge.

Komentar: Za združene tokokroge je povprečje prenapetosti pri zgoščeni ozemljitveni mreži statistično značilno različno od povprečja pri nezgoščeni mreži (p=0,02236 < 0,05).

Tabela 6.23	ANOVA za združene	tokokroge (	(kategorija:	kompenzacijski	vodnik)
-------------	-------------------	-------------	--------------	----------------	---------

	LS Means Current effect: F(1, 67)=4,8001, p=,03194 Effective hypothesis decomposition										
	Komp. vodn. v ST (JA, NE)	Mean - Mean	Mean - Std.Err.	Mean95,00%	Mean - +95,00%	Ν					
1	NE	1,945424	0,059640	1,826383	2,064465	38					
2	JA	1,750483	0,066031	1,618685	1,882281	31					



Slika 6.28

Graf povprečja pri postrojih s kompenzacijskim vodnikom in brez za združene tokokroge.

Komentar: Za združene tokokroge je povprečje prenapetosti s kompenzacijskim vodnikom statistično značilno različno od povprečja brez vodnika (p=0,03194 < 0,05).

	LS Means Current effect: F(1, 36)=3,7428, p=,06092 Effective hypothesis decomposition									
	Povez. med KP in ST (gosta, redka)	Mean - Mean	Mean - Std.Err.	Mean95,00%	Mean - +95,00%	Ν				
1	redka	1,875887	0,070348	1,733214	2,018560	28				
2	gosta	1,610581	0,117715	1,371844	1,849319	10				

Tabela 6.24 ANOVA za združene tokokroge (kategorija: povezava med KP in ST)





Komentar: Za združene tokokroge povprečje prenapetosti pri gosti povezavi ni statistično značilno različno od povprečja pri redki povezavi (p=0,06092 < 0,05).

#### 6.3.4 Povprečne vrednosti prenapetosti

Pri iskanju pričakovane ravni prehodnih prenapetosti si pomagamo z opisno statistiko. Izračunamo jo po skupinah tokokrogov pri izbranih parametrih postroja. V tabeli 6.25 so našteti izbrani parametri in povprečne vrednosti ter standardna deviacija. Vrednosti prenapetosti, izračunane z obrnjeno transformacijo (inverzni logaritem), so v tabeli 6.26, kjer so izračunane tudi vrednosti pri 1- in 2-kratniku standardne deviacije.

Št.	Kabli z opletom	Mat. ozem. mreže	Zgost. ozem. mreže	Funkc. izenač. potenc.	Komp. vodn. v ST	Povez. med KP in ST	Okolje	Povpr. vrednost $\bar{x}$	Stand. deviacija <i>s</i>
1	NE	FeZn ali	NE	NE	NE		ST	2,308441	0,561383
2	NE	FeZn ali	NE	NE	NE	redka	KP	2,042937	0,221383
3	JA	FeZn	NE	JA	NE		ST	1,906993	0,294782
4	JA	Cu	JA	JA	NE		ST	1,868187	0,226803
5	JA	Cu	JA	JA	JA		ST	1,805526	0,287521
6	JA	FeZn	NE	JA	JA		ST	1,799696	0,400210

 Tabela 6.25
 Povprečne vrednosti glede na okolje in pasivne ukrepe

Št.	Kabli z opletom	Mat. ozem. mreže	Zgost. ozem. mreže	Funkc. izenač. potenc.	Komp. vodn. v ST	Povez. med KP in ST	Okolje	Povpr. vrednost $ar{x}$	Stand. deviacija <i>s</i>
7	JA	FeZn	NE	JA	JA	redka	KP	1,797333	0,290770
8	JA	FeZn	NE	JA	NE	redka	KP	1,783580	0,349939
9	JA	Cu	JA	JA	NE	redka	KP	1,765540	0,481874
10	JA	Cu	JA	JA	JA	redka	KP	1,762847	0,442165
11	JA	Cu	JA	JA	NE	gosta	KP	1,682768	0,415188
12	JA	Cu	JA	JA	JA	gosta	KP	1,562457	0,596588

Iz tabele 6.25 in 6.26 lahko razberemo naslednje ugotovitve:

- 1. Najvišja raven povprečja prenapetosti je v postrojih, ki imajo za sekundarne tokokroge kable brez opleta.
- 2. Med postroji, ki imajo kable z opleti za sekundarne tokokroge:
  - a. je najvišja raven povprečja prenapetosti v stikališču tam, kjer je ozemljitvena mreža iz pocinkanega jeklenega traka in ni zgoščene ozemljitvene mreže ter kompenzacijskih vodnikov,
  - b. je najvišja raven povprečja prenapetosti v komandnem prostoru tam, kjer je mreža iz pocinkanega jeklenega traka, ki ni zgoščena, ter je redka povezava med stikališčem in komandnim prostorom.
- 3. Iz stolpca  $\bar{x}$ +1s in  $\bar{x}$ +2s je razviden vpliv velike razpršenosti izmerjenih prenapetosti nekaterih vzorcev.

Št.	Kabli z opletom	Mat. ozem. mreže	Zgost. ozem. mreže	Funkc. izenač. potenc.	Komp. vodn. v ST	Povez. med KP in ST	Okolje	Povpr. prenap. $ar{x}$ [V]	<i>x</i> +1 <i>s</i> [V]	<i>x</i> +2 <i>s</i> [V]
1	NE	FeZn ali Cu	NE	NE	NE		ST	203,4	741,0	2699,0
2	NE	FeZn ali Cu	NE	NE	NE	redka	КР	110,4	183,8	306,0
3	JA	FeZn	NE	JA	NE		ST	80,7	159,1	313,7
4	JA	Cu	JA	JA	NE		ST	73,8	124,5	209,8
5	JA	Cu	JA	JA	JA		ST	63,9	123,9	240,2
6	JA	FeZn	NE	JA	JA		ST	63,0	158,5	398,2
7	JA	FeZn	NE	JA	JA	redka	KP	62,7	122,5	239,3
8	JA	FeZn	NE	JA	NE	redka	KP	60,8	136,0	304,4
9	JA	Cu	JA	JA	NE	redka	KP	58,3	176,8	536,1
10	JA	Cu	JA	JA	JA	redka	KP	57,9	160,3	443,8

Tabela 6.26 Povprečna raven prenapetosti glede na okolje in pasivne ukrepe

Št.	Kabli z opletom	Mat. ozem. mreže	Zgost. ozem. mreže	Funkc. izenač. potenc.	Komp. vodn. v ST	Povez. med KP in ST	Okolje	Povpr. prenap. $ar{x}$ [V]	<i>x</i> +1 <i>s</i> [V]	<i>x</i> +2 <i>s</i> [V]
11	JA	Cu	JA	JA	NE	gosta	KP	48,2	125,3	325,9
12	JA	Cu	JA	JA	JA	gosta	KP	36,5	144,2	569,7

## 6.4 Povzetek poglavja

Za 30 slovenskih EEP je bila narejena statistična analiza retrospektivnega tipa. Tokokrogi od instrumentnih transformatorjev (tokovnik, napetostnik) tvorijo skupine, ki so poimenovane glede na to, kje se končajo (v krmilni omarici ali relejni hišici v VN stikališču oziroma v komandnem prostoru). Vsaka skupina v določenem EEP tvori en vzorec.

Porazdelitve podatkov v vzorcih niso normalnega tipa, zato so bili podatki transformirani z logaritemsko funkcijo. Za transformirane podatke so bile izračunane opisne statistike.

Rezultati analize v tabeli 6.26 kažejo pričakovano povprečno raven prenapetosti ( $\bar{x}$ ) v določenem okolju (stikališče in komandni prostor) v EEP, ki imajo značilnosti, opisane v tabeli 6.26.

Rezultati enosmerne analize variance (ANOVA) povprečne vrednosti (Mean) po posameznih faktorjih (kabel z opletom in brez, material za ozemljitveno mrežo baker ali pocinkani jekleni trak, zgoščenost ozemljitvene mreže v VN stikališču, kompenzacijski vodnik vzdolž sekundarnih tokokrogov v VN stikališču, gosta ali redka ozemljitvena povezava med komandno stavbo in VN stikališčem) so združeni v tabelah 6.27 in 6.28, kjer so:

- zelena polja statistično značilni rezultati (p < 0,05), na podlagi katerih lahko z veliko verjetnostjo trdimo, da je nižja raven prenapetosti posledica uporabljenega pasivnega ukrepa,
- rumena polja (0,05 polja (p > 0,2) rezultati, ki kažejo, da trditev, da je nižja raven prenapetosti posledica parametra, nima statistične značilnosti. To pomeni, da se nižja raven v nekaterih primerih pojavi tudi pri nasprotnem parametru.

	Tabela 6.27	Enosmerna ANOVA –	p-vrednost po	tokokrogih	ı in faktor	jih
--	-------------	-------------------	---------------	------------	-------------	-----

Parameter	Tok KP	Nар КР	Tok ST	Nap ST
Kabel z opletom	0,004	0,047	0,079	0,011
Material ozem. mreže (baker)	0,105	0,204	0,312	0,089

	•			
Parameter	Tok KP	Nap КР	Tok ST	Nap ST
Zgoščena ozem. mreža	0,015	0,204	0,312	0,089
Komp. vodnik ob kablih	0,111	0,142	0,172	0,204
Gosta povezava med KP in ST	0,012	0,301		

Iz tabele 6.27 in tabel od 6.2 do 6.24 razberemo:

- 1. Tokokrogi, ki imajo kable z opletom, imajo nižjo raven prenapetosti.
- V postrojih, kjer je ozemljitvena mreža iz bakra, je nižja raven prehodnih prenapetosti, vendar to ni statistično značilno. To pomeni, da lahko obstaja nek neznan parameter, ki vpliva, da raven ni statistično značilno različna.
- 3. Raven prenapetosti pri zgoščeni ozemljitveni mreži v VN stikališču je nižja kot v postrojih, kjer ni zgoščena, vendar tega ni možno z gotovostjo trditi. V praksi to pomeni, da je v postroju, kjer je mreža zgoščena raven prenapetosti pa visoka, nek neznani parameter, ki vpliva, da je raven višja kot v postroju, ki mreže nima zgoščene.
- 4. Kjer je položen kompenzacijski vodnik, je raven prenapetosti nižja, vendar ne statistično značilno različno. Tudi tu lahko domnevamo, da gre za enega ali več neznanih parametrov, ki vplivajo, da rezultat ni izrazit.
- 5. Gosta povezava, t.j. število ozemljitvenih povezav med komandno stavbo in VN stikališčem, kaže statistično značilno manjšo raven prenapetosti v tokokrogih tokovnikov glede na postroje z redko povezavo. V tokokrogih napetostnikov raven prenapetosti ni statistično značilno različna. Razlika p-vrednosti med tokokrogi tokovnikov in napetostnikov je velika.
- Razlike p-vrednosti med tokokrogi tokovnikov in napetostnikov v stikališču kažejo, da gre za nek neznan parameter. Enako nakazuje razlika med tokokrogi tokovnikov in napetostnikov, ki se končajo v komandnem prostoru.

	1 5
Parameter	Tokokrogi
Kabel	0,001
Material ozem. mreže	0,032
Zgoščenost ozem. mreže	0,022
Komp. vodnik	0,032
Povezava med KP in ST	0,061

Tabela 6.26 Enosmerna ANOVA – p-vrednost po faktorjih za združene tokokroge

Iz tabele 6.26 za vse tokokroge skupaj razberemo:

- 1. statistično značilno so ravni prenapetosti nižje,
  - a. ko so uporabljeni kabli z opletom,
  - b. ko je ozemljitvena mreža iz bakra,
  - c. ko je ozemljitvena mreža zgoščena,
  - d. ko so ob kablih sekundarnih tokokrogov položeni kompenzacijski vodniki,
- nižja raven prenapetosti pri gosti povezavi med komandnim prostorom in stikališčem ni statistično značilna, vendar je odstopanje majhno.

Na podlagi teh ugotovitev lahko sklepamo, da je potrjena hipoteza o odvisnosti ravni prehodnih prenapetosti od pasivnih ukrepov.

Pri gornjih ugotovitvah se večkrat pojavi domneva o neznanem parametru. Iz prakse pregledovanja izvedbe pasivnih ukrepov pri gradnji postrojev lahko ugotovimo, da je kakovost izvedbe pasivnih ukrepov zelo različna. V obstoječih postrojih pa vpogled v kakovost izvedbe tako rekoč ni več možen, ker pasivni ukrepi niso dosegljivi oziroma so zakopani. Pri analizi ni bilo mogoče upoštevati kakovosti izvedbe pasivnih ukrepov, ker spremljajoči podatki merilnih rezultatov te informacije nimajo. Samo po sebi je razumljivo, da je učinkovanje vsakega pasivnega ukrepa povezano z dobrimi spoji. Če je, npr. kompenzacijski vodnik slabo spojen ali pa se spoj poslabša zaradi korozije, bo prispevek k zmanjšanju prenapetosti majhen ali ga sploh ne bo. Isto velja za spoje med vodniki ozemljitvene mreže ipd. Zato je možno, da pride do manjših razlik, kot bi sicer bile, med ravnmi prenapetosti v postrojih z več ukrepi in slabo izvedbo ter postrojih z manj ukrepi in dobro izvedbo.

Drugi neznani parameter, ki ima svoj vpliv predvsem na raven prenapetosti pri kompenzacijskem vodniku, je potek kompenzacijskega vodnika. Iz poglavja 4.1.3 sledi, da je učinek kompenzacije prenapetosti odvisen od razdalje do kabla sekundarnega tokokroga. Pri večji razdalji je učinek manjši. Praksa kaže, da v kabelskih kanalih kompenzacijski vodniki niso dosledno položeni tik ob sekundarnih tokokrogih.

Domnevamo lahko, da ima na razlike v p-vrednosti med tokokrogi tokovnikov in napetostnikov vpliv tretji neznani parameter. Obe vrsti tokokrogov sta v določenem postroju praviloma izvedeni enako: za oba tokokroga je uporabljena ista vrsta kablov, oba sta iz priključne doze na instrumentnem transformatorju speljana v kabelski kanal na isti način, oba potekata po isti trasi. So pa v postrojih instrumentni transformatorji različnih znamk in tipov. Zato lahko domnevamo, da je neznani parameter povezan z znamko in tipom oziroma načinom delovanja instrumentnega transformatorja.

## 7 Primerjava empiričnih in računskih rezultatov

Kot je omenjeno v Uvodu, so računska orodja lahko koristen pripomoček pri izbiri pravilnih parametrov pasivnih ukrepov. Eno od takšnih orodij je program CDEGS [19], kanadskega podjetja SES. V tem primeru ni bil cilj izbiranje parametrov za pasivne ukrepe, temveč analiza razmer v opazovanih točkah pri različnih parametrih. Za ta namen je bil zasnovan poenostavljen model na podlagi dejanskega 400-kV polja.

Za ilustracijo je narejena primerjava računskih rezultatov z empiričnimi iz 30 EEP v Sloveniji.

#### 7.1 Računski model

Model temelji na razporeditvi osnovne ozemljitvene mreže, kot je na slikah 7.1 in 7.2. Za izračune je bil upoštevan samo del polja, ki je označen z okvirjem.

Poleg vodnikov osnovne ozemljitvene mreže so v modelu podstavki treh VN tokovnih instrumentnih transformatorjev – TIT (slika 7.1). Druge VN naprave niso upoštevane, ker pri njih ni bilo predvidenega nobenega električnega dogajanja. Zato so VN odklopniki in njihovi podstavki, ki so na sliki v spodnjem delu okvirja, v modelu predstavljeni samo kot vodnik ozemljitvene mreže. Pri preklopu ločilnikov morajo biti odklopniki izklopljeni (kar je en od obratovalnih pogojev v postroju), ker ločilniki niso namenjeni za preklapljanje bremenskega toka, temveč samo za priklop oziroma odklop potenciala.

Za analizo potencialov na vodnikih je predpostavljen potek dvožilnega kabla med lokacijo instrumentnega transformatorja faze L3 in relejno hišico RH (slika 7.2). Na sliki 7.3 so prikazane opazovane točke za katere so bili izračunani potenciali in iz njih preračunana napetost  $U_L$ , ki je razlika med potencialom 1 in potencialom 3, ter napetost  $U_{NL}$ , ki je razlika med potencialom 1 in potencialom 2. Napetost  $U_{NL}$  predstavlja vodnik, ki je ozemljen pri instrumentnem transformatorju. Potencial 1 predstavlja ozemljeno zbiralko izenačitve potencialov.





Detajl ozemljitvene mreže iz načrta 400-kV polja.



Slika 7.2 Shema modela (obkrožene so opazovane točke).



Slika 7.3 Detajl modela in označene opazovane točke v RH.

## 7.1.1 Parametri modela

Parameter ozemljitvene mreže obsega naslednje variante:

- Cu vrv prereza 95 mm<sup>2</sup>, 120 mm<sup>2</sup>,
- jekleni pocinkani trak (FeZn) dimenzije 40 mm × 4 mm z relativno upornostjo
   30 p.u. glede na baker in relativno permeabilnostjo 300.

Pri podstavkih instrumentnih transformatorjev so bili upoštevani naslednji podatki:

– premer 0,2 m,

- višina 2,5 m,
- material jeklo z relativno upornostjo 30 p.u. glede na baker in relativno permeabilnostjo 300.

Sekundarni kabel je bil simuliran z dvema izoliranima vodnikoma prereza 2,5 mm<sup>2</sup> (povzeto po dejanskem kablu v izhodiščnem postroju) na medsebojni razdalji 10 mm. En vodnik je bil spojen z vrhom podstavka instrumentnega transformatorja, kot je to navadno pri tokovnikih. Oplet sekundarnega kabla je bil simuliran z dvema izoliranima vodnikoma, skupnega prereza 5 mm<sup>2</sup>, ki sta bila povezana med seboj na obeh koncih in sta potekala tesno ob kablu. Pri izračunih, ki simulirajo stanje kabla brez opleta, sta bila vodnika v celoti odstranjena.

V sekundarnem navitju instrumentnega transformatorja je predpostavljen visokofrekvenčni tokovni vir z amplitudo 1 A in faznim kotom 0°. Oblika visokofrekvenčnega signala je povzeta po dejansko izmerjeni prenapetosti v postroju (slika 7.4), ki ga je program pretvoril v frekvenčni spekter s Fourierevo transformacijo. Spekter vhodnega signala (slika 7.5) ima maksimum pri približno 3,3 MHz. Seznam frekvenc v spektru z dodatnimi frekvencami, ki jih je dodal program po prvi iteraciji računanja, je v tabeli 7.1. Izračuni potencialov na vodnikih so bili narejeni pri vseh frekvencah. Potenciali v opazovanih točkah so bili pretvorjeni z inverzno Fourierevo transformacijo v časovno obliko.



Slika 7.4 Oblika prenapetosti (ordinata: p.u., abscisa: čas v mikrosekundah).



Slika 7.5 Spekter vhodnega signala (ordinata: amplitude frekvenčne komponente, abscisa: frekvenca v megahercih).

Impedanco sekundarnega navitja predpostavljata upornost 0,5  $\Omega$  in induktivnost 1,2 mH, katere reaktanca se spreminja s frekvencami iz tabele 7.1. Variante izračunov z gornjimi parametri so bile opravljene pri:

- dvožilnem kablu z opletom in brez opleta,
- z vzporednim potekom kompenzacijskega vodnika in brez njega; kompenzacijski vodnik je vsakič ustrezal prerezu in materialu ozemljitvene mreže, razen pri FeZn traku, kjer je bila za kompenzacijski vodnik uporabljena Cu vrv 120 mm<sup>2</sup>; dolžina kompenzacijskega vodnika vzdolž sekundarnega kabla je približno 62 % celotne dolžine kabla, kar približno ustreza minimalni dolžini, kadar kompenzacijski vodnik poteka vzdolž kabla od VN polja do relejne hišice.

#### 7.1.2 Analiza rezultatov računskega modela in primerjava

Iz potencialov izračunanih pri posameznih frekvencah, so bile preračunane napetosti (razlike potencialov) na odprtih sponkah  $U_L$  in  $U_{NL}$ , ki so za posamezni parametrični izračun urejene po napetosti  $U_{NL}$  v tabeli 7.2.

Zap.		Zap.		Zap.		Zap.	
št.	Frekvenca [Hz]						
1	0	25	9.202.450	49	50.306.800	73	70.245.400
2	306.748	26	9.815.950	50	50.613.500	74	70.552.100
3	613.497	27	11.042.900	51	50.920.200	75	71.165.600

Tabela 7.1Seznam frekvenc za izračun

Zap.		Zap.		Zap.		Zap.	
št.	Frekvenca [Hz]						
4	920.245	28	12.269.900	52	51.227.000	76	71.472.400
5	1.226.990	29	15.030.700	53	51.533.700	77	72.392.600
6	1.533.740	30	17.791.400	54	51.840.500	78	73.006.100
7	1.840.490	31	20.552.200	55	52.147.200	79	73.619.600
8	2.147.240	32	23.312.900	56	52.454.000	80	73.926.400
9	2.453.990	33	26.073.600	57	52.760.700	81	74.233.100
10	3.374.230	34	28.834.400	58	53.067.500	82	74.539.900
11	3.680.980	35	31.595.100	59	53.374.200	83	74.846.600
12	3.987.730	36	34.355.800	60	53.681.000	84	75.153.400
13	4.294.480	37	37.116.600	61	54.601.200	85	75.460.100
14	4.601.230	38	39.877.300	62	56.441.700	86	75.766.900
15	4.907.980	39	42.638.000	63	57.975.500	87	76.073.600
16	5.214.720	40	45.398.800	64	59.202.500	88	76.380.400
17	5.521.470	41	47.546.000	65	61.963.200	89	76.687.100
18	6.134.970	42	48.159.500	66	64.723.900	90	76.993.900
19	6.748.470	43	48.466.300	67	67.484.700	91	77.300.600
20	7.361.960	44	48.773.000	68	68.404.900	92	77.607.400
21	7.975.460	45	49.079.800	69	69.018.400	93	77.914.100
22	8.282.210	46	49.386.500	70	69.325.200	94	78.220.900
23	8.588.960	47	49.693.200	71	69.631.900	95	78.527.600
24	8.895.710	48	50.000.000	72	69.938.600		

Tabela 7.2Izračunane prenapetosti na vodnikih

Material ozemljitvene mreže	Dimenzija	Vrsta kabla	$U_L$ [V]	$U_{NL}$ [V]
Cu	120 mm <sup>2</sup>	oplet	188,4	47,7
Cu	95 mm <sup>2</sup>	oplet	188,5	47,7
FeZn	40 mm×4 mm	oplet	187,7	47,8
FeZn	40 mm×4 mm	oplet + komp. vod.	187,9	50,9
Cu	120 mm <sup>2</sup>	brez opleta	186,5	101,1
FeZn	40 mm×4 mm	brez opleta	186	104,5





Graf napetosti za primer Cu vrv 120 mm<sup>2</sup> in kabel z opletom.



Slika 7.7 Graf napetosti za primer Cu vrv 120 mm<sup>2</sup> in kabel brez opleta.



Slika 7.8 Graf napetosti za primer FeZn trak 40 mm × 4 mm in kabel z opletom.





Graf napetosti za primer FeZn trak 40 mm × 4 mm in kabel brez opleta.



Slika 7.10 Graf napetosti za primer FeZn trak 40 mm × 4 mm, kabel z opletom in kompenzacijski vodnik.

Rezultati iz tabele 7.2 in s slik od 7.6 do 7.10 kažejo:

- najbolj očitna razlika je med primeroma, ko je kabel brez opleta oziroma z opletom, kar ustreza pričakovanemu rezultatu glede na fizikalno osnovo delovanja kabla z opletom,
- razlika med primeroma, ko je ozemljitvena mreža iz pocinkanega traka oziroma bakrene vrvi, je manjša od pričakovane, glede na izračunano debelino prevodne plasti pocinkanega traka pri visokih frekvencah,
- manjši od pričakovanega je učinek kompenzacijskega vodnika; napetost je celo nekoliko višja v primerjavi s primerom brez kompenzacijskega vodnika.
Iz rezultatov enosmerne faktorske analize (poglavje 6.3.3) in rezultatov računskega modela lahko ugotovimo:

- v obeh analizah je najmanjša raven prenapetosti v primeru, ko je uporabljen kabel z opletom in največja, ko ni opleta,
- v obeh analizah se kaže, da ni možno zagotovo trditi, da so pri ozemljitveni mreži iz bakra prenapetosti manjše v primerjavi s pocinkanim jeklenim trakom, kar bi pričakovali glede na izračunano debelino prevodne plasti pri visokih frekvencah pojasnilo bi mogoče lahko iskali v velikem ekvivalentnem radiju, ki ga ima pocinkani jekleni trak v primerjavi z bakreno vrvjo,
- v obeh analizah je ugotovljeno, da ni možno statistično značilno trditi, da je raven prenapetosti pri kompenzacijskem vodniku nižja.

## 8 Predlog kriterija

Za ocenjevanje zagotovitve elektromagnetne združljivosti v EEP na podlagi izmerjenih prehodnih prenapetosti v sekundarnih tokokrogih je bil že v študiji [22, str. 102] postavljen kriterij z enačbo

$$u_d \le \frac{u_{TPV}}{f_u \cdot f_n \cdot f_s} \tag{8.1}$$

kjer so:

*u<sub>d</sub>* dopustna temenska vrednost izmerjene prenapetosti,
 *u<sub>TPV</sub>* tipska preskusna vrednost (TPV) za odpornost sekundarne naprave,
 *f<sub>u</sub>* razmerje maksimalne obratovalne napetosti in napetosti, pri kateri je opravljena meritev je 1,1,
 *f<sub>n</sub>* razmerje med napetostjo preboja iskrišča in temensko vrednostjo fazne

- $f_n$  razmerje med napetostjo preboja iskrišča in temensko vrednostjo fazne napetosti je 2,9,
- $f_s$  varnostni faktor je 1,5.

Pri tipski preskusni vrednosti asimetrične napetosti 2,5 kV, kot jo predvideva standard [23] za signalne tokokroge, ki potekajo iz VN stikališča v prostor s sekundarno opremo, je dopustna temenska vrednost prehodne prenapetosti, po enačbi (8.1),  $u_d \leq 522$  V.

V okviru tega kriterija so bile meritve prehodnih prenapetosti predvidene samo pri vklopu ločilnika. Deloma tudi zato, ker ni obstajala primerna merilna oprema, s katero bi lahko zajeli celotni pojav prehodnih prenapetosti, temveč je bilo možno izmeriti le prenapetost pri prvem preboju med poloma ločilnika. Z modernejšo opremo lahko izmerimo celotni pojav. Merjenje tudi pri izklopu ločilnika je smiselno tako s stališča manjše obremenjenosti ločilnikov s preklopi kot časovnega izkoristka razpoložljivega časa za merjenje (ker je v tem času VN polje izklopljeno).

V praksi se pojavi vprašanje, kaj narediti v primeru, ko je  $u_d$  več kot 522 V. Koliko lahko ali pa sploh ne sme preseči dopustne vrednosti? Pri ocenjevanju zagotovitve elektromagnetne združljivosti na podlagi tega kriterija se je izkazalo, da je kriterij zelo tog.

Primer na sliki 8.1 kaže združene posnetke prenapetosti. V grafu je vrisana tudi meja po starem kriteriju (522 V), po katerem bi ocenili, da elektromagnetna združljivost v sekundarnem sistemu ni zagotovljena, ker prenapetosti presegajo dopustno vrednost.



Slika 8.1 Primer prenapetosti v EEP-16 in dopustna vrednost.

V drugem primeru, ki ga prikazuje graf na sliki 8.2, bi ravno tako ocenili, da elektromagnetna združljivost ni zagotovljena.



Vendar je očitno, da gre za manjše odstopanje, ki predstavlja majhen delež vseh izmerjenih prenapetosti. Iz obeh primerov sledi, da ocena ne more temeljiti zgolj na preseganju dopustne vrednosti. Pravilnejši kriterij bi moral upoštevati tudi verjetnost.

Iz statistične analize v poglavju 6 je razvidno, da imajo nekateri vzorci manjšo povprečno vrednost od drugih, vendar pa imajo večjo varianco oziroma standardno deviacijo. To napeljuje na zamisel, da je standardna deviacija tisti del kriterija, ki bo podal odgovor, kako vrednotiti izmerjene prehodne prenapetosti.

Pojem zagotovljena elektromagnetna združljivost pomeni, da obstaja dovolj veliko obrobje elektromagnetne združljivosti. Obrobje elektromagnetne združljivosti je izračunano kot razmerje med oddajno ravnjo in ravnjo odpornosti [7]. V praksi se je za EMC obrobje uveljavila številka 6 dB [24], kar pri relativnem razmerju napetosti predstavlja faktor 2. To pomeni, da bi lahko bila raven EMC združljivosti oziroma raven izmerjenih prehodnih prenapetosti največ polovico ravni odpornosti.

Pri kriteriju s statističnim pristopom izračunamo obseg vrednosti z vsoto povprečja in večkratnika standardne deviacije. Delež, ki obsega 99,73 % normalno porazdeljenih vrednosti, ustreza ±3-kratniku standardne deviacije, 99,95 % normalno porazdeljenih vrednosti pa ustreza ±3,5-kratniku standardne deviacije, ki jo prištejemo k povprečni vrednosti. Normalna porazdelitev je simetrična, vendar nas pri ocenjevanju zagotovitve EMC zanima samo tista stran porazdelitve, kjer so velike vrednosti, to pomeni pri pozitivni vrednosti standardne deviacije.

Z upoštevanjem povprečne vrednosti vzorca, 3- oz. 3,5-kratne standardne deviacije, faktorja EMC obrobja in tipske preskusne vrednosti je formula za kriterij:

$$\bar{x} + 3 \cdot s \le \frac{u_{TPV}}{k_{mEMC}} \tag{8.2}$$

ali

$$\overline{x} + 3.5 \cdot s \le \frac{u_{TPV}}{k_{mEMC}} \tag{8.3}$$

kjer so:

 $\bar{x}$ povprečna vrednost ravni prenapetosti,sstandardna deviacija povprečne vrednosti ravni prenapetosti, $k_{mEMC}$ faktor EMC obrobja (=2), $u_{TPV}$ tipska preskusna vrednost (TPV) za odpornost sekundarne naprave.

Za ilustracijo uporabe kriterija uporabimo ista dva primera, ki sta bila podlaga za sliki 8.1 in 8.2.

Primer 1:

Posnetki iz EEP-16 v tokokrogu iz tokovnika (tok\_ST), dobljeni pri merjenju v relejni hišici, so bili obdelani po postopku statistične analize. Rezultat je opisna statistika v tabeli 8.1.

Tabela 8.1 Opisna statistika za tok\_ST v EEP-16

Valid N % Valid obs.			Mean	Std.Dev.
1	4699	100,0000	1,740510	0,476072

Iz tabele razberemo:

 $\bar{x}$  = 1,740510 in *s* = 0,476072

Vrednost  $\bar{x} + 3 \cdot s = 3,168726$  je po antilogaritmiranju 1475 V (slika 8.3, Raven 3sigma). Pri  $u_{TPV}=2500$  V kriterij ni izpolnjen, 1475 V > 0,5 $\cdot$ 2500 V = 1250 V. V tem primeru se ocena sklada z oceno, ki bi jo dobili na podlagi starega kriterija, da EMC ni zagotovljena, ker je bila največja izmerjena prenapetost 800 V. Razlog je velika varianca, čeprav je sama povprečna vrednost nizka (55 V). Ocena bi se glasila: »V 99,73 % primerov raven prenapetosti presega raven EMC združljivosti. EMC ni zagotovljena za sekundarno napravo v tokokrogu tokovnika v EEP-16 pri  $u_{TPV}$  = 2500 V.«



Slika 8.3

Analiza primera 1 po statističnem kriteriju.

## Primer 2:

Posnetki iz EEP-10 v tokokrogu iz napetostnika (nap\_ST), dobljeni pri merjenju v relejni hišici, so bili obdelani po postopku statistične analize. Rezultat je opisna statistika v tabeli 8.2.

Tabela 8.2 Opisna statistika za nap\_ST v EEP-10

	Valid N	% Valid obs.	Mean	Std.Dev.
1	13609	100,0000	2,050651	0,155375

Iz tabele razberemo:

 $\bar{x}$  = 2,050651 in *s* = 0,155375

Vrednost  $\bar{x} + 3 \cdot s = 2,516776$  je po antilogaritmiranju 329 V (slika 8.4). Pri  $u_{TPV} = 2500$  V je kriterij izpolnjen, 329 V < 0,5·2500 V = 1250 V. V tem primeru je ocena ugodnejša od ocene, ki bi jo dobili na podlagi starega kriterija, čeprav je bila največja izmerjena prenapetost 712 V. Razlog je manjša razpršenost, čeprav je sama povprečna vrednost večja kot v prejšnjem primeru (112 V). Ocena bi se glasila: »V 99,73 % primerov je raven izmerjenih prenapetosti nižja od ravni EMC združljivosti. EMC je zagotovljena za sekundarno napravo v tokokrogu napetostnika v EEP-10 pri  $u_{TPV} = 2500$  V.«



Slika 8.4 Analiza primera 2 po statističnem kriteriju.

## 9 Zaključek

Na podlagi retrospektivne statistične analize izmerjenih prehodnih prenapetosti v sekundarnih tokokrogih 30 slovenskih elektroenergetskih postrojev je potrjena hipoteza, da je s pasivnimi ukrepi, t.j. z vrsto kablov za sekundarne tokokroge, z materialom vodnikov ozemljitvene mreže in sistema izenačitve potencialov ter z njunim oblikovanjem, možno vplivati na ustreznost elektromagnetnega okolja v elektroenergetskem postroju.

Na podlagi iste analize so ugotovljene pričakovane povprečne ravni prehodnih prenapetosti pri stikalnih preklopih z ločilniki, v odvisnosti od uporabljenih pasivnih ukrepov. Najvišja povprečna raven je v postrojih s kabli brez opleta za sekundarne tokokroge in z ozemljitveno mrežo iz pocinkanega jeklenega traka, ki ni zgoščena pri VN napravah. Najnižja je v postrojih, ki imajo ozemljitveno mrežo iz bakra, zgoščeno v VN stikališču, in so poleg kablov z opletom za sekundarne tokokroge položeni kompenzacijski vodniki.

Novi kriterij za ocenjevanje zagotovljenosti EMC v postroju, ki temelji na statistični analizi izmerjenih prehodnih prenapetosti, je natančnejši od starega kriterija zaradi upoštevanja raztrosa. S tem je tudi omogočena poljubna zaostritev ali omilitev kriterija, s čimer je kriterij prilagodljiv glede na dane specifikacije sekundarnih naprav in glede na potrebne lastnosti elektromagnetnega okolja.

## 10 Viri in literatura

- Anton Ogorelec et. al., »Tranzientne prenapetosti v sekundarnih vodih elektroenergetskih postrojev visokih napetosti – 1. faza«, Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko v Ljubljani, Katedra za elektroenergetske sisteme in naprave, 1977.
- Anton Ogorelec et. al., »Tranzientne prenapetosti v sekundarnih vodih elektroenergetskih postrojev visokih napetosti – 2. faza«, Ljubljana, Fakulteta za elektrotehniko v Ljubljani, Katedra za elektroenergetske sisteme in naprave, 1979.
- 3. Dušan, Kosec, Prenaponi u ožičenju relejne zaštite: magistarski rad, Zagreb: Elektrotehnički fakultet u Zagrebu, 1978.
- 4. Elektro-Slovenija, Trideset let sinhronega obratovanja z Evropo, Ljubljana: Elektro-Slovenija, 2004.
- Franc, Žlahtič, »Ukrepi za zmanjšanje prenapetosti v sekundarnih tokokrogih znotraj elektroenergetskega objekta (RTP Krško 400/110 kV)«, Elektroinštitut Milan Vidmar: Ljubljana, referat 1001, 1987.
- 6. CIGRE, EMC within Power Plants and Substations, Publication 535, CIGRE Working Group C4.208, 2013
- 7. Mednarodni elektrotehniški slovar Poglavje 161: Elektromagnetna združljivost, SIST IEC 60050(161), 1999.
- Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-3 : Testing and measurement techniques
  Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test, IEC 61000-4-3, 2001.
- T., Živic, U. M., Peterlin, »Analiza in tipizacija tehničnih ukrepov za zagotovitev elektromagnetne združljivosti v načrtovanih in saniranih distribucijskih postrojih (Tipizacija ukrepov EMC v distribucijskih postrojih)«, Elektroinštitut Milan Vidmar: Ljubljana, referat 1809, 2006.
- 10. H. A. Aebischer, B. Aebischer. (september 2014). Improved Formulae for the Inductance of Straight Wires. Advanced Electromagnetics [Online]. Vol. 3, No. 1, str. 31-43. Dosegljivo: http://aemjournal.org/index.php/AEM/article/view/254. (Dostopano 5. 8. 2016).
- 11. Elektromagnetische Veträglichkeit. Arbeitsgemeinschaft von 4. 11. bis 25. 11. 1991. VDE-Verlag GmbH. Berlin und Offenbach. 1991.

- 12. F., Žlahtič et. al. »Ukrepi za zmanjšanje tranzientnih prenapetosti v sekundarnih tokokrogih elektroenergetskih objektov: Priročnik«. Elektroinštitut Milan Vidmar: Ljubljana, referat 1106, 1991.
- R. Marciniak, M. Lobodl, R. Nowak. Influence of Climatic Conditions in China on Reliability of Power Earthing System. V Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, April 12 - 16 2010, Beijing, China [Online]. Dosegljivo: https://www.researchgate.net/publication/224142605\_Influence\_of\_climatic\_conditi ons\_in\_China\_on\_reliability\_of\_power\_earthing\_system. [Dostopano: 5. 8. 2016]
- 14. Electromagnetic compatibility (EMC) Part 5: Installation and mitigation guidelines Section 2: Earthing and cabling, SIST IEC/TR 61000-5-2, 1998.
- 15. Information technology Cabling installation Part 2: Installation planning and practices inside buildings, SIST EN 50174-2, 2001.
- 16. Izenačevanje potencialov in ozemljevanje v zgradbah z opremo informacijske tehnologije, SIST EN 50310, 2006.
- 17. Elektroenergetski postroji za izmenične napetosti nad 1 kV 1. del: Skupna pravila, SIST EN 61936-1, 2010.
- 18. F., Žlahtič, T., Živic, »Zagotavljanje elektromagnetne združljivosti v elektroenergetskih objektih«. Elektroinštitut Milan Vidmar: Ljubljana, referat 1302, 1996.
- 19. SES, Safe Engineering Services & technologies Ltd. [Online]. Dosegljivo: www.sestech.com. [Dostopano: 5. 8. 2016].
- 20. T.F., Ulaby, Fundamentals of applied electromagnetics, 1999 Edition, New Jersey: Prentice Hall Inc., 1999.
- E.B., Rosa, The self and mutual inductances of linear conductors, Bulletin of the Bureau of Standards, Vol. 4, No. 2, Washington, 1908. Dosegljivo: https://archive.org/details/selfmu430134419088080unse [Dostopano: 5. 8. 2016].
- Anton Ogorelec et. al., »Tranzientne prenapetosti v sekundarnih vodih elektroenergetskih postrojev visokih napetosti – 3. faza«, Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko v Ljubljani, Katedra za elektroenergetske sisteme in naprave, 1980.
- 23. Elektromagnetna združljivost (EMC) 6-5. del: Osnovni standardi Odpornost opreme, ki se uporablja v okoljih elektrarn in postaj, SIST EN 61000-6-5, 2015.
- 24. Electromagnetic environmental effects requirements for systems, MIL-STD-464, 1997.