

Načrtovanje tokovnega udarnega generatorja

Matjaž Gaber, Jože Pihler

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Smetanova 17, Maribor, Slovenija,
E-pošta: matjaz.gaber@uni-mb.si

Povzetek. Članek obravnava način načrtovanja tokovnega udarnega generatorja. Le-ta je izvor standardnega eksponentnega udarnega toka, ki se uporablja za preskušanje prenapetostnih odvodnikov. Eksponentni udarni tok se tvori v zaporednem RLC vezju, pri praznjenju kondenzatorja prek tuljave in ohmskega upora. Prikazan je rezultat spremembe poteka toka, če se spremenijo kapacitivnost, induktivnost ali ohmska upornost. S pomočjo analitičnega modela je obravnavana določitev parametrov tokovnega udarnega generatorja iz poteka standardnega eksponentnega udarnega toka. Pri tem so prikazani rezultati izračunov, pri katerih se spreminjata čas čela in čas hrbta, maksimalna vrednost udarnega toka in kapacitivnost udarnega kondenzatorja. Na podlagi opravljenih izračunov in analiz je podan predlog vezja za praktično izvedbo tokovnega udarnega generatorja.

Ključne besede: tokovni udarni generator, standardni udarni tok, analitični model, preskušanje, prenapetostni odvodnik

Design of current impulse generator

Extended abstract. The standard exponential impulse current (Figure 1) is used for testing surge arresters and lightning protection systems [1,2,3,4,5]. It is generated in a serial RLC circuit by discharging the capacitor through the coil and the resistor. The impact of selection of the RLC circuit parameters on the current wave shape is described by the Equation (4) and is for various parameters shown in Figures 3, 4 and 5.

Parameters of the current impulse generator are determined by using the graph from Figure 6 [7]. From the computation results it is seen that it is impossible to obtain an accurate 8/20 μ s standard exponential impulse current wave shape in compliance with applicable standards (Tables 2, 3, and Figure 7), since the first oscillation after the passage of the current through zero is larger than permitted [1]. By changing the impulse front time T_1 and duration time T_2 , the results are in compliance with the standards (Tables 4, 5, and Figure 8). A change in the impulse current wave shape (front time T_1 and duration time T_2) varies all parameters of the current impulse generator. Upon changing the setting of the maximum impulse current, only the necessary supply voltage changes while the current wave shape and values of passive elements of current impulse generator remain unchanged (Figure 9). Reducing the surge capacitance results in the increases the supply voltage and inductance in the surge circuit. Therefore, it is very important to find a compromise between the supply voltage magnitude, capacitance and

inductance. Reducing capacitance requires a higher supply voltage magnitude (Table 9).

In figure 11, a practical design of the current impulse generator is proposed. It contains a triggering spark-gap to obtain the necessary switching speed. The figure also containing the tested object and measurement resistor that should be insensitive to the skin effect.

Key words: current impulse generator, impulse current, analytical model, testing, surge arrester

1 Uvod

Električna energija je ena najbolj uporabnih in preprosto uporabnih oblik energije. V preteklosti so to vrsto energije izkoriščale razmeroma preproste, robustne in neobčutljive naprave. V današnjem času pa so čedalje pogosteje uporabljene naprave, ki so občutljive na škodljive vplive elektroenergetskega sistema, kakršne so prenapetosti. Ker vzroka prenapetosti ni mogoče odpraviti, je bilo treba razviti naprave, ki učinko prenapetosti na različne elemente elektroenergetskega sistema zmanjšajo. Tako se je začel razvoj prenapetostnih odvodnikov. Za poenotenje karakteristik prenapetostnih odvodnikov različnih proizvajalcev in za zaščito uporabnikov prenapetostnih odvodnikov so se zahteve in načini preskušanja prenapetostnih odvodnikov standardizirali.

Preskušanja prenapetostnih odvodnikov so določena s standardi [1,2,3,4,5], prav tako so s standardi določene lastnosti prenapetostnih odvodnikov. Razmeroma malo pa je znanega o opremi za preskušanje prenapetostnih odvodnikov, zato v tem članku obravnavamo

najpomembnejši del opreme za preskušanje – tokovni udarni generator. Poznamo dve različni vrsti tokovnih udarnih generatorjev, in sicer tokovni udarni generator, s katerim generiramo eksponentno obliko udarnega toka, in tokovni udarni generator, s katerim generiramo pravokotno obliko udarnega toka. Pri svoji obravnavi smo se omejili samo na prvo vrsto tokovnega udarnega generatorja. Tokovni udarni generator je v osnovi zaporedno RLC vezje z elementi, ki so primerni za visoke napetosti. Delovanje temelji na praznjenju kondenzatorja skozi ohmsko upornost in induktivnost, pri čemer ohmsko upornost in induktivnost, poleg parametrov tokovnega udarnega generatorja, sestavlja tudi ohmska upornost in induktivnost preskušanca. Pri tem skozi RLC vezje steče tok, ki je pri pravilni postavitvi parametrov enak standardnemu eksponentnemu udarnemu toku.

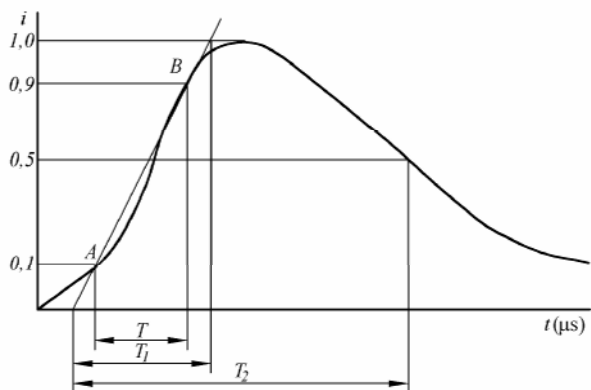
Obravnava tokovnega udarnega generatorja temelji na parametrih eksponentnega udarnega toka, ki je določen s standardizacijo. Prikazane so analitične enačbe zaporednega RLC vezja in vplivi sprememb parametrov zaporednega RLC vezja na obliko toka. Neposredne analitične povezave med standardi in parametri tokovnega udarnega generatorja ni, zato si pri določevanju parametrov pomagamo z eksperimentalno določenim grafom [9]. Pri obravnavi smo se omejili zgolj na tokovni udarni generator za eksponentni udarni tok $8/20 \mu\text{s}$.

2 Standardni eksponentni udarni tok

Preskušanje z udarnimi tokovi je namenjeno preskušanju elementov prenapetostne zaščite v distribucijskih sistemih, elementov električnih sistemov, ki so izpostavljeni atmosferskim praznitvam, preskušanju elementov v letalski industriji, ter tudi preskušanju elektromagnetne skladnosti. Mi smo se omejili na elemente prenapetostnih zaščit in zaščit pred učinki delovanja strel [1,2,3,4,5].

Vsi standardni eksponentni udarni tokovi (slika 1) so predstavljeni s pomočjo treh parametrov, in sicer s:

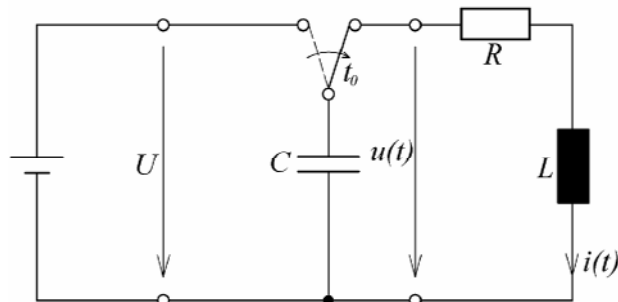
- Časom čela, T_f , ki je definiran kot 1,25-kratnik časovnega intervala med trenutoma, v katerih tokovni impulz doseže 10 odstotkov (A) in 90 odstotkov (B) maksimalne vrednosti. Če so na posnetku tokovnega impulza oscilacije, ti dve točki določimo na krivulji, ki dani tokovni impulz aproksimira idealnemu poteku.
- Časom hrbta, T_2 , ki je definiran kot časovni interval med navideznim začetkom toka in trenutkom, ko pade vrednost toka na 50 odstotkov maksimalne vrednosti.
- Vrednostjo testnega toka, ki je v normalnih razmerah definiran z maksimalno vrednostjo. V [1] je določeno, da v primeru oscilacij definicijo maksimalne vrednosti toka določajo področni standardi.



Slika 1: Definicija eksponentnega udarnega toka $8/20 \mu\text{s}$
Figure 1. Definition of exponential impulse current $8/20 \mu\text{s}$

3 Dogajanje v zaporednem RLC vezju

Tokovni udarni generator je v osnovi zaporedno RLC vezje (slika 2). Potek dogajanja v vezju je naslednji: najprej kondenzator C nabijemo na napetost U , v trenutku t_0 stikalo preklapimo. Napetost na kondenzatorju $u(t)$ skozi vezje požene tok $i(t)$. Dogajanje v vezju lahko opišemo z enačbo (1). Časovni potek toka $i(t)$ (4) pa dobimo z rešitvijo enačbe (1).



Slika 2: Zaporedno RLC vezje
Figure 2. Serial RLC circuit

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t idt = 0 \quad (1)$$

Trenutek, v katerem začnemo opazovati pojav je $t_0 = 0$. Pri tem moramo upoštevati začetna pogoja, ki ju določata enačbi (2) in (3).

$$u(0) = U \quad (2)$$

$$i(0) = 0 \quad (3)$$

Rešitev enačbe (1) pri upoštevanju (2) in (3) je:

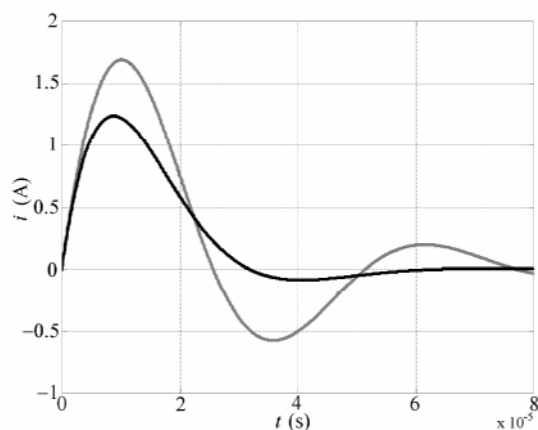
$$i(t) = I_0 (e^{s_1 t} - e^{s_2 t}) \quad (4)$$

Pri čemer so I_0 , s_1 in s_2 določeni z enačbami (5) in (6).

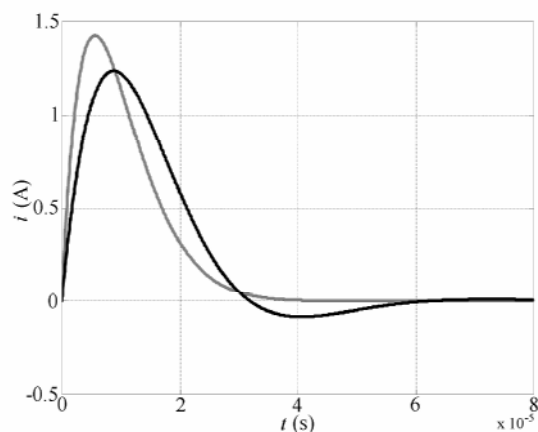
$$I_0 = \frac{U}{L(s_2 - s_1)} \quad (5)$$

$$s_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (6)$$

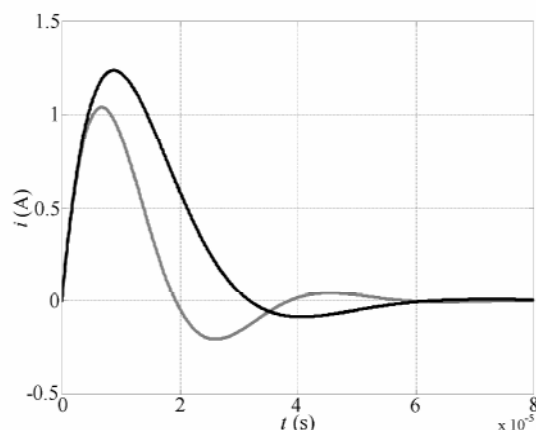
S pomočjo enačbe (4) smo opazovali vpliv parametrov R , L in C na časovni potek toka $i(t)$ v zaporednem RLC vezju. V tabeli 1 so prikazane izhodiščne vrednosti parametrov R_n , L_n in C_n , ki so izbrani tako, da je z njimi tok v RLC vezju kar najbolj podoben standardnemu eksponentnemu udarnemu toku s slike 1. Na sliki 3 je prikazan vpliv spremembe ohmske upornosti R , na sliki 4 vpliv spremembe induktivnosti L in na sliki 5 vpliv spremembe kapacitivnosti C na časovni potek toka $i(t)$. Pri vseh izračunih je bila napajalna napetost $U = 1V$. Na slikah 3, 4 in 5 je s temnejšo črto prikazan potek toka pri izhodiščnih vrednostih parametrov, s svetlejšo črto pa potek toka pri polovični vrednosti opazovanega parametra.



Slika 3: Vpliv spremembe ohmske upornosti R na potek toka
Figure 3. Impact of change in the resistance R on the current wave shape



Slika 4: Vpliv spremembe induktivnosti L na potek toka
Figure 4. Impact of change in inductance L on the current wave shape



Slika 5: Vpliv spremembe kapacitivnosti C na potek toka
Figure 5. Impact of change in the capacitance C on the current wave shape

R_n (Ω)	L_n (μH)	C_n (μF)
0,5	3	20

Tabela 1: Izhodiščne vrednosti parametrov
Table 1. Initial values of parameters

4 Izračun parametrov tokovnega udarnega generatorja iz parametrov standardnega udarnega toka

V prejšnji točki je prikazano, kako iz parametrov udarnega vezja (RLC vezja) izračunamo udarni tok. Za načrtovanje tokovnega udarnega generatorja pa je pot ravno nasprotna. Žal analitične rešitve za ta problem ni, zato se je na podoben način kot v prejšnji točki naredilo več izračunov, pri katerih so se opazovali vplivi parametrov tokovnega udarnega generatorja na parametre eksponentnega udarnega toka. Na podlagi teh izračunov se je izdelal graf na sliki 6 [9], ki predstavlja odvisnost parametrov tokovnega udarnega generatorja od parametrov udarnega toka.

Sedaj lahko iz časa čela T_1 in časa hrbtna T_2 s pomočjo normiranih veličin (enačbe (7) do (12)) [7] in grafa na sliki 6 izračunamo parametre tokovnega udarnega generatorja. Pri tem je R_r relativno dušenje, T časovna konstanta vezja in Z karakteristična impedanca vezja.

$$R_r = \frac{R}{2Z} \quad (7)$$

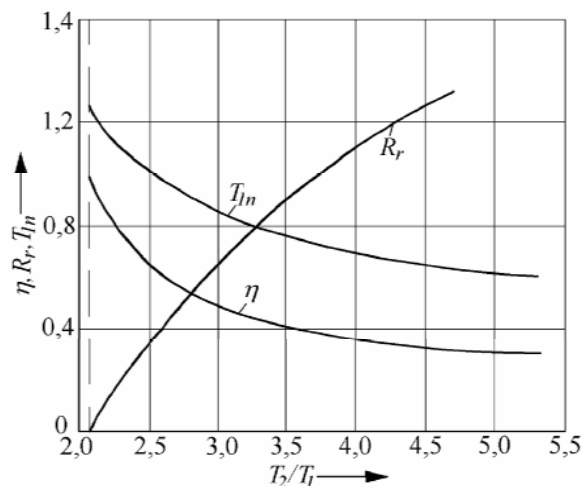
$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (8)$$

$$T = \sqrt{LC} \quad (9)$$

$$T = \frac{T_1}{T_{1n}} \quad (10)$$

$$Z = \frac{T}{C} \quad (11)$$

$$L = TZ \quad (12)$$



Slika 6: Odvisnost relativnega dušenja R_r , tokovnega izkoristka η in normiranega časa čela T_{in} od razmerja med časom hrbtna in časom čela T_2/T_1

Figure 6. Diagram of relative damping R_r , current efficiency η and normed impulse front time T_{in} against the ratio between impulse duration and front time T_2/T_1

5 Rezultati izračuna

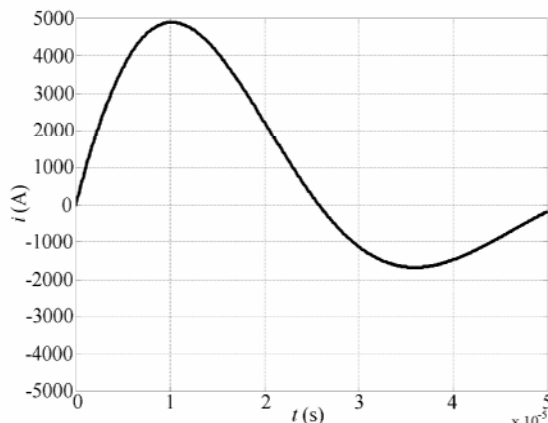
Prikazani so rezultati izračuna parametrov tokovnega udarnega generatorja na podlagi standardnega eksponentnega udarnega toka $8/20 \mu\text{s}$. Za omenjen izračun smo v Matlabu naredili program [10], v katerem je graf na sliki 6 prikazan s pomočjo aproksimacijskih polinomov [8]. Vhodni podatki v program so bili čas čela T_1 , čas hrbtna T_2 , kapacitivnost udarnega kondenzatorja C in maksimalna vrednost udarnega toka i_m . Kapacitivnost udarnega kondenzatorja C smo izbrali na podlagi priporočil v [6]. Rezultati izračuna pa so izris oblike toka in izpis izračunanih parametrov udarnega vezja: ohmska upornost vezja R , induktivnost vezja L , potrebna napajalna napetost U in velikost prenihaja toka po prvem prehodu skozi nič i_{lr} (v odstotkih maksimalne vrednosti toka i_m). Vhodni podatki prvega izračuna so v tabeli 2, rezultati izračuna pa na sliki 7 in v tabeli 3.

T_1 (μs)	T_2 (μs)	C (μF)	i_m (kA)
8	20	20	5

Tabela 2: Vhodni podatki prvega izračuna
Table 2. Input data of the first computation

R (Ω)	L (μH)	U (kV)	i_{lr} (%)
0,25	3,1	2,9	34

Tabela 3: Rezultati prvega izračuna
Table 3. Results of the first computation



Slika 7: Potek udarnega toka pri vhodnih podatkih iz tabele 2
Figure 7. Impulse current wave shape for input data from Table 2

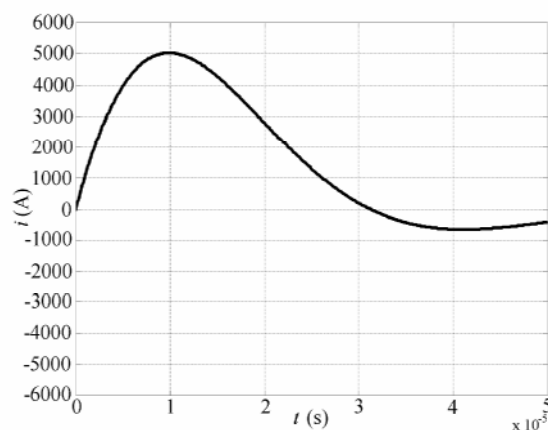
Iz rezultatov na sliki 7 in v tabeli 3 vidimo, da potek toka ni v skladu s standardi [1], saj je prvi prenihaj toka po prehodu skozi nič i_{lr} večji od dovoljenih 20 odstotkov. Iz tega lahko sklepamo, da natančnega poteka standardnega eksponentnega udarnega toka $8/20$ ni mogoče realizirati v skladu s standardi. Ta problem smo rešili tako, da smo z optimiranjem določili nov čas čela T_1 in čas hrbtna T_2 , saj je po standardu [1] dovoljeno odstopanje časa čela T_1 in časa hrbtna T_2 do 10 odstotkov. Novi vhodni podatki so v tabeli 4, rezultati pa na sliki 8 in v tabeli 5.

T_1 (μs)	T_2 (μs)	C (μF)	i_m (kA)
7,5	21,4	20	5

Tabela 4: Vhodni podatki drugega izračuna
Table 4. Input data of the second computation

R (Ω)	L (μH)	U (kV)	i_{lr} (%)
0,45	3,5	4,0	13

Tabela 5: Rezultati drugega izračuna
Table 5. Results of the second computation



Slika 8: Potek udarnega toka pri vhodnih podatkih iz tabele 4
Figure 8. Impulse current wave shape for input data from Table 4

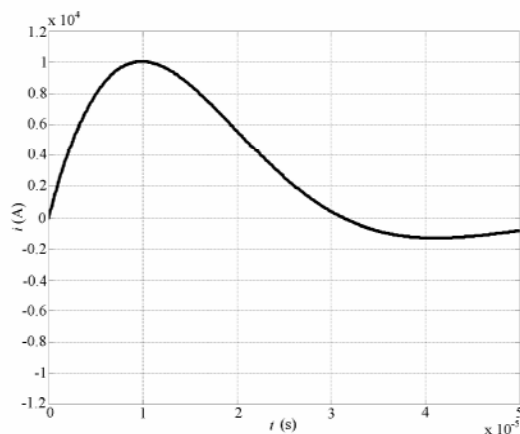
Sedaj vidimo, da smo z vsemi parametri zagotovili zahtevam standardizacije. Opazimo tudi, da sprememba oblike udarnega toka (čas čela T_1 in čas hrbtna T_2), vpliva na spremembo vseh izhodnih parametrov. V naslednjem izračunu smo opazovali vpliv zaželeno maksimalne vrednosti udarnega toka i_m na parametre tokovnega udarnega generatorja. Vhodni podatki tretjega izračuna so v tabeli 6, rezultati izračuna pa na sliki 9 in v tabeli 7.

T_1 (μs)	T_2 (μs)	C (μF)	i_m (kA)
7,5	21,4	20	10

Tabela 6: Vhodni podatki tretjega izračuna
Table 6. Input data of the third computation

R (Ω)	L (μH)	U (kV)	i_{lr} (%)
0,45	3,5	8,0	13

Tabela 7: Rezultati tretjega izračuna
Table 7. Results of the third computation



Slika 9: Potek udarnega toka pri vhodnih podatkih iz tabele 6
Figure 9. Impulse current wave shape for input data from Table 6

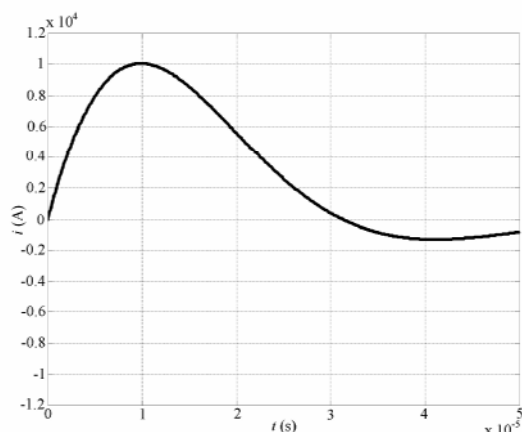
Iz rezultatov tretjega izračuna vidimo, da se pri spremembi zaželeno vrednosti maksimalne vrednosti udarnega toka i_m , spremeni samo napajalna napetost U , oblika toka in vrednosti pasivnih elementov tokovnega udarnega generatorja pa ostanejo popolnoma nespremenjeni. S pomočjo četrtega izračuna smo opazovali vpliv spremembe udarne kapacitivnosti C na parametre tokovnega udarnega generatorja. Vhodni podatki tretjega izračuna so v tabeli 8, rezultati izračuna pa na sliki 10 in v tabeli 9.

T_1 (μs)	T_2 (μs)	C (μF)	i_m (kA)
7,5	21,4	15	10

Tabela 8: Vhodni podatki četrtega izračuna
Table 8. Input data of the fourth computation

R (Ω)	L (μH)	U (kV)	i_{lr} (%)
0,6	4,6	10,7	13

Tabela 9: Rezultati četrtega izračuna
Table 9. Results of the fourth computation



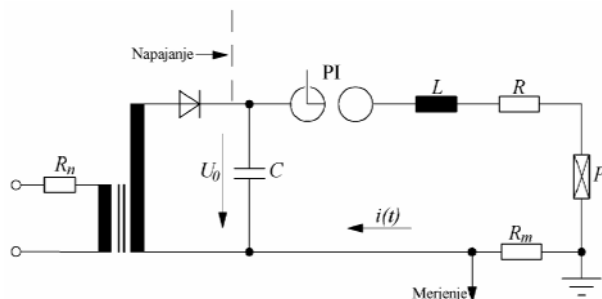
Slika 10: Potek udarnega toka pri vhodnih podatkih iz tabele 8
Figure 10. Impulse current wave shape for input data from Table 8

S pomočjo četrtega izračuna vidimo, da zmanjšanje udarne kapacitivnosti C pomeni predvsem potrebno povečanje napajalne napetosti U in povečanje induktivnosti L udarnega vezja. To je zelo pomembno, da najdemo kompromis med napajalno napetostjo, kapacitivnostjo in induktivnostjo. Vedeti je namreč treba, da je potrebna induktivnost v udarnem vezju zelo majhna in jo v pretežni meri sestavlja induktivnost električnih povezav, ki ne morejo biti poljubno kratke, torej tudi nimajo poljubno majhne induktivnosti. Iz tega lahko sklepamo, da mora biti kapacitivnost v udarnem vezju ustrezno majhna. Hkrati pa z manjšanjem kapacitivnosti narašča tudi potrebna napajalna napetost. Pri napajalni napetosti smo omejeni na zmogljivosti napajalnega dela udarnega generatorja, še bolj pa od izolacijskih sposobnosti posameznih elementov udarnega generatorja. Z višanjem napetosti rastejo tudi mere potrebnega udarnega kondenzatorja, s čimer se povečuje njegova induktivnost, kar še dodatno oteži izdelavo tokovnega udarnega generatorja.

6 Predlog vezja za praktično izvedbo

Na podlagi zahtev standardov in prikazanega v tem članku se za praktično izvedbo tokovnega udarnega generatorja predlaga vezje na sliki 11. Pri tem se namesto idealnega stikala, ki ga imamo na sliki 2, uporabi prožilno iskrišče PI, saj je to trenutno edini stikalni element, ki lahko svoje stanje spremeni z zadovoljivo hitrostjo [10]. Na sliki vidimo ločeno narisane napajalni del in udarni del tokovnega udarnega generatorja. V udarnem delu sta glede na sliko 2 dodana še preskušanelec P in merilni upor R_m . Pri merilnem

uporu je posebej pomembno, da je izbran tako, da ima čim manjšo upornost (vpliv na udarno vezje) in da je na njem čim manjši vpliv izriva toka.



Slika 11: Predlog vezja za praktično izvedbo
Figure 11. Proposal of the circuit for practical realisation

7 Sklep

Žal se pogosto zgodi, da je upoštevanje standardizacije lahko zelo zahtevno. Podobno je tudi pri načrtovanju tokovnega udarnega generatorja, saj standardizacija podaja zahteve, ki jih pri načrtovanju tokovnih udarnih generatorjev ni mogoče upoštevati z analitično rešitvijo. Zato izračuni tokovnih udarnih generatorjev v precejšnji meri temeljijo na eksperimentalno ali numerično določenih parametrih, saj sicer ni mogoče dobiti eksponentnih udarnih tokov, kakršne predpisuje standardizacija.

Poskušali smo najti najprimernejši način za določanje parametrov tokovnih udarnih generatorjev. Pokazalo se je, da je najprimernejša možnost določanje parametrov na podlagi eksperimentalno ali numerično določenega grafa. Pokazano je, da na parametre tokovnega udarnega generatorja vplivata le čas čela in čas hrbtna standardnega eksponentnega udarnega toka. Od zaželenih maksimalne vrednosti udarnega toka je odvisna le potrebna napajalna napetost. Najpomembnejši in hkrati najzahtevnejši del tokovnega udarnega generatorja, udarni kondenzator, je izbran fiksno, tako da se vsi drugi parametri prilagajajo njemu. Na koncu smo prikazali tudi vezje, na podlagi katerega je mogoče zgraditi tokovni udarni generator.

V nadaljnjem delu raziskujemo možnost uporabe polprevodniških stikal namesto prožilnega iskrišča, raziskujemo vpliv realnih elementov na delovanje tokovnega udarnega generatorja in proučujemo možnost sinhronizacije tokovnega udarnega generatorja na omrežje. Naš končni cilj je zgraditev prototipa tokovnega udarnega generatorja, sinhroniziranega na omrežje.

8 Literatura

- [1] CEI/IEC 60060-1. *High-voltage test techniques. Part 1: General Definitions and test requirements.* 1989-11
- [2] CEI/IEC 60099-4. *Surge arresters –Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems* 2004-05
- [3] CEI/IEC 61312-1. *Protection against lightning electromagnetic impulse – Part 1: General principles* 1995-03
- [4] CEI/IEC 61180-1. *High-voltage test techniques for low-voltage equipment – Part 1: Definitions, test and procedure requirements* 1992-10
- [5] SIST EN 61643-11. *Low-voltage surge protective devices – Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems – Requirements and tests*, Prva izdaja, 2002-11
- [6] Ž. Hribar, *Postavitev visokonapetostnega laboratorija z tokovnim udarnim generatorjem*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2001.
- [7] M. Beyer, W. Boeck, K. Möller, W. Zaengl, *Hochspannungstechnik, Theoretische und praktische Grundlagen Berichtiger Nachdruck*, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1981
- [8] M. Trlep, *Numerične metode v elektrotehniko, Zbrano gradivo za univerzitetni in visokošolski strokovni program ELEKTROTEHNIKA/ močnostna elektrotehnika*, Maribor, 1999/2000
- [9] M. Modrušan, *Normalized calculation of impulse current circuits for given impulse currents*, Haefely
- [10] M. Gaber, *Načrtovanje tokovnih udarnih generatorjev*, diplomsko delo, Maribor, avgust 2004

Matjaž Gaber je diplomiral leta 2004 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru.

Jože Pihler je diplomiral leta 1978, magistriral leta 1991 in doktoriral leta 1995 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Od leta 1978 je bil zaposlen v TSN Maribor kot razvojni konstruktor, vodja kontrole in direktor TOZD EN. Leta 1988 se je zaposlil na Fakulteti za elektrotehniko kot raziskovalec. Njegovo področje delovanja so elektroenergetske naprave in aparati ter umetna inteligenca. Je izredni profesor in član IEEE, CIGRE in SLOKO CIGRE.