

Načrtovanje laboratorijskega udarnega napetostnega generatorja

Mislav Trbušić, Marko Jesenik, Mladen Trlep in Anton Hamler

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija

E-pošta: mislav.trbusic@um.si

Design of a surge voltage generator

Abstract. To asset a withstand voltage level of semiconductor elements and circuits on fast transient voltages such as surge voltage, it is desirable to have a device that is capable to produce a surge wave with the prescribed wave shape and voltage level. Such devices are called surge wave generators. For low voltage applications, up to 10 kV, it is possible to build up such generators based on MOSFET technology, which turns to be a proper solution for research experiments. The paper presents a brief introduction to the design principles of surge wave generators, where the parameters of the generator are calculated by the usage of Angelini's method. The verification of the method is confirmed by simulations.

1 Uvod

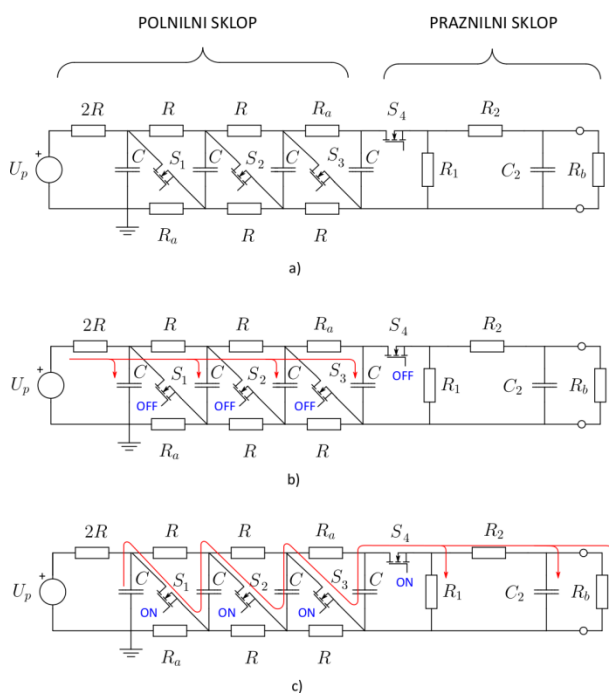
Naprave priključene na električno omrežje, so med obratovanjem pogosto izpostavljene prenapetostim, ki so posledica atmosferskih razelektritev, stikalnih manevrov, prehodnih in resonančnih pojavov v omrežju. Takšne napetostne anomalije lahko poškodujejo ali uničijo električno napravo, oziroma elemente v njej. Še posebej občutljive na prenapetosti so elektronske komponente (tranzistorji, diode, integrirana vezaja, ipd.) [1]. V splošnem, je za ovrednotenje vzdržnosti izolacije elementov, te potrebno testirati na udarno napetost, ki je hipnega in tranzientnega značaja. Za tak namen se uporabljajo udarni napetostni (in tokovni) generatorji, kateri so zmožni proizvesti aperiodično obliko udarnega vala s karakterističnim strmim čelom in položnim hrbtom [2][3]. Za namen preizkušanja polprevodniških elementov, ki se nahajajo v napravah z napetostnim nivojem do 300 V, je v Laboratoriju za aplikativno elektromagnetiko (UM FERI) bil izdelan 900 V štiristopenjski udarni napetostni generator, kjer je napetostni množilnik izveden z elektronskim proženjem preko MOS tranzistorjev (MOS je okrajšava za Metal-Oxide-Semiconductor). V članku so predstavljeni osnovni principi načrtovanja udarnega generatorja.

2 Udarni napetostni generator

V praksi se srečuje več tipov udarnih napetostnih generatorjev, med katerimi je najbolj pogost t.i. Marxov kaskadni množilnik, oziroma kar Marxov generator [4][5]. V referatu je predstavljeno načrtovanje laboratorijskega udarnega napetostnega generatorja z uporabo MOSFET tehnologije.

2.1 Nadomestno vezje

Splošno so udarni generatorji sestavljeni iz dveh sklopov, in sicer iz polnilnega in praznilnega sklopa. V prvem sklopu se generatorju iz enosmernega vira napetosti dovaja energija, ki se skladišči v kondenzatorjih in se nato v praznilnem procesu sprosti preko praznilnega sklopa, kot je prikazano na sliki 1. Med procesom polnjenja MOS tranzistorji ne prevajajo, medtem, ko se udarni val na bremenu doseže s prehodom MOS tranzistorjev v prevodno stanje.



Slika 1: Električna shema štiristopenjskega Marksovega generatorja v izvedbi z MOS tranzistorji namesto iskrišč: a) opredelitev polnilnega in praznilnega sklopa; b) polnilni proces; c) praznilni proces

2.2 Polnilni proces

Med procesom polnjenja udarnega generatorja, MOS tranzistorji ne prevajajo, zato je aktiven le polnilni sklop, ki ga sestavljajo polnilni upori R in R_a ter kondenzatorji C . Z ozirom na sliko 2, so kondenzatorji priključeni v t.i. lestvično vezje, ki s staljšča polnjenja predstavlja vzporedno vezavo kondenzatorjev, saj se pri dovolj dolgem času polnjenja T_p vsi napolnijo na

napetost vira U_p . Praviloma so vrednosti kapacitivnosti kondenzatorjev C izbrane tako, da so med seboj enake in da med preizkušanjem zagotovijo neko želeno vrednost električne energije (1):

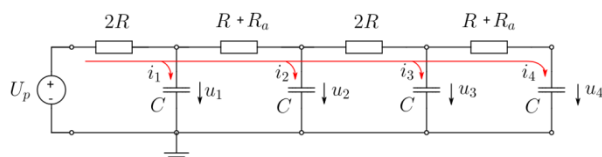
$$W_e = \frac{n C U_p^2}{2}, \quad (1)$$

kjer C pomeni vrednost polnilnega kondenzatorja, n število kaskadnih stopenj udarnega generatorja in U_p vrednost enosmerne, polnilne napetosti.

Ker se kondenzatorji ne napolnijo hkrati, je najbolj merodajen podatek čas, v katerem zadnja stopnja doseže vrednost napetosti polnilnega vira U_p . Za natančno določitev časovnih potekov napetosti med polnjenjem je potrebno simultano rešiti sistem linearnih diferencialnih enačb, vendar je za praktično uporabo bolj priročno uporabiti obrazec (2) [6]:

$$T_p \approx 5 R' C n^2. \quad (2)$$

Pri tem R' predstavlja povprečno vrednost polnilnega upora, ostale oznake pomenijo enako kot prej.



Slika 2: Nadomestno električno vezje med polnilnim procesom udarnega generatorja

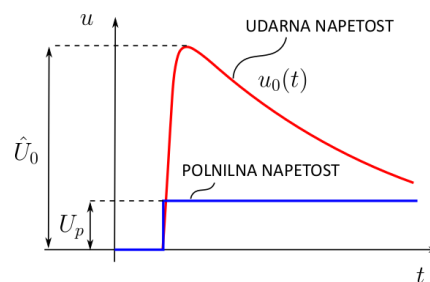
2.3 Praznilni proces

Kot je že bilo omenjeno, je namen napetostnega udarnega generatorja proizvesti določeno aperioidično obliko napetosti t.i. udarni val, katerega vršna vrednost $\hat{U}_0$ nekaj krat presega vrednost polnilne napetosti U_p (Slika 3). To je doseženo tako, da se preko MOS tranzistorjev kondenzatorji povežejo zaporedno, kar pomeni, da se napetosti na kondenzatorjih seštevajo. Razmerje med vršno vrednostjo napetosti $\hat{U}_0$ udarnega vala in polnilno napetostjo U_p je odvisna od karakterja preizkušanca (kapacitiven, ohmski, induktivni oz. kombinacija teh). Vendar za večino primerov, ki so ohmskega ali kapacitivnega značaja velja, da je to razmerje enako številu kaskadnih stopenj generatorja n (3).

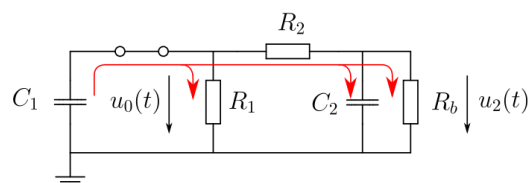
$$n = \frac{\hat{U}_0}{U_p} \quad (3)$$

Proces praznjenja Marxovega generatorja lahko opišemo glede na sliko 1-c. Predstavimo, da so kondenzatorji naelektrjeni tako, da je na njih napetost enosmerne vira. Delovanje MOS tranzistorjev poveže kondenzatorje zaporedno, kar da na izhodu štirikratno vrednost napetosti. Na sliki 4 je podano nadomestno vezje udarnega generatorja, ki je merodajno v procesu

praznjenja. Pri tem je impulzna kapacitivnost enaka $C_1 = \frac{C}{n}$.



Slika 3: Shematski prikaz razmerja med enosmerno polnilno napetostjo U_p in aperioidično obliko udarne napetosti $u_0(t)$



Slika 4: Nadomestno električno vezje med procesom praznjenja udarnega generatorja

Napetost na preizkušancu $u_2(t)$ je razlika dveh eksponencialnih funkcij, katere časovne konstante določajo elementi udarnega generatorja in preizkušane s svojo upornostjo in kapacitivnostjo (4).

$$u_2(t) = \hat{U}_0 \left(e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (4)$$

Pri tem sta časovni konstanti v eksponencialnih funkcijah enaki: $\tau_1 = R_2 C_2$ in $\tau_2 = R_1 (C_1 + C_2)$. Povezava med časom čela T_s in časom polovične vrednosti T_r ter časovni konstantama τ_1 in τ_2 je za standardni udarni val 1,2/50 z upoštevanjem pogoja $R_b \gg R_1, R_2$ sledeč: (5) in (6) [3].

$$T_s = 3 \tau_1 \quad (5)$$

$$T_r = 0.72 \tau_2 \quad (6)$$

2.4 Določanje vrednosti elementov

Pri načrtovanju napetostnega udarnega generatorja je potrebno posebno pozornost nameniti izbiri vrednosti elementov v udarnem oz. praznilnem sklopu, saj le ti v veliki meri določajo obliko udarnega vala in časovni konstanti čela ter hrbita. Praviloma so polnilni upori R_a in R izbrani tako, da je njihova ekvivalentna upornost v udarnem režimu bistveno večja kot sta upornosti R_1 in R_2 , zato polnilne upornosti praktično nimajo vpliva na obliko udarnega vala in je njihova vrednost pogojena z želenim časom polnjenja kondenzatorjev v polnilnem procesu.

Za štiristopenjski udarni generator ($n = 4$) in z izbrano vrednostjo polnilnega kondenzatorja $C = 1 \mu F$ ter

časom polnjenja $T_p = 350$ ms, je po enačbi (2) vrednost polnilnega upora približno enaka $R \approx 4k7 \Omega$.

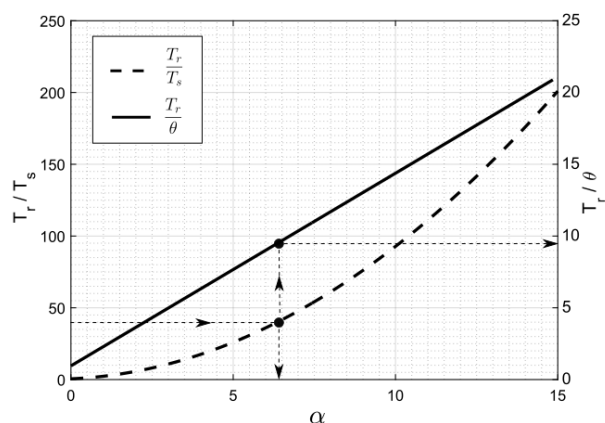
Pristopi k določitvi elementov udarnega generatorja so raznoliki, bolj napredni in računalniško podprti se temeljijo na optimizacijskih postopkih, modalni analizi ali pa karakterističnih vrednostih nadomestnega vezja [7]-[9]. Kakorkoli, v članku bo za ovrednotenje elementov uporabljena Angelinijeva grafična metoda [5].

Za nadomestno vezje udarnega sklopa, kot ga kaže slika 4 se vrednosti uporov R_1 in R_2 določita z ozirom na sliko 5 in enačbe (7)-(9), pri tem je potrebno poznati razmerje med časom polovične vrednosti in časom čela T_r/T_s ter kapacitivnosti C_1 in C_2 . Izbira vrednosti kondenzatorja C_2 je poljubna vendar je pri izbiri potrebno upoštevati $C_2 \ll C_1$, v konkretnem primeru smo izbrali $C_2 = 10$ nF.

$$R_1 = \frac{\alpha \theta}{C_1 + C_2} [1 + \sqrt{1 - X}] \quad (7)$$

$$R_2 = \frac{\alpha \theta}{C_2} [1 - \sqrt{1 - X}] \quad (8)$$

$$X = \frac{1}{\alpha^2} \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right) \quad (9)$$



Slika 5: Graf za določanje parametrov α in θ po Angelinijevi metodi [5]

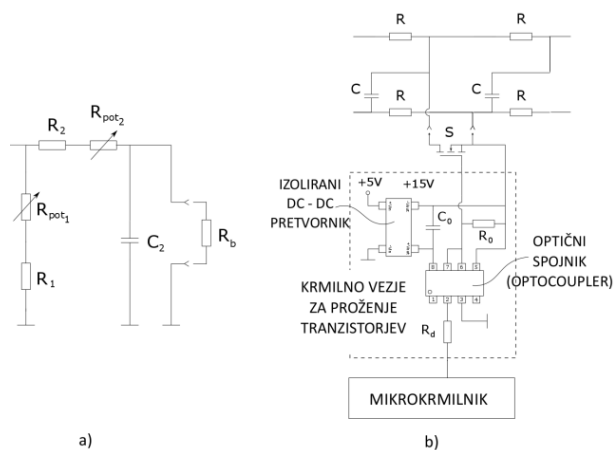
Vrednosti α in θ odčitamo iz grafa (Slika 5) na sledeč način:

- iz krivulje $\left(\frac{T_r}{T_s}\right)$ odčitamo vrednost α pri $T_r/T_s = 41,7$ ta znaša $\alpha = 6,5$;
- iz krivulje $\left(\frac{T_r}{\theta}\right)$ odčitamo vrednost $T_r/\theta = 9,5$ iz katere sledi $\theta = 5,26 \mu s$.

Z upoštevanjem vrednosti $\alpha = 6,5$, $\theta = 5,26 \mu s$, $C_1 = 250$ nF in $C_2 = 10$ nF, sta vrednosti uporov določljivi preko (7) in (8), ter enaki $R_1 = 261 \Omega$ in $R_2 = 42 \Omega$.

Pri dejanski sestavi generatorja je potrebno predvideti odstopanja fizičnih elementov od nazivnih vrednosti, zato se za prilagoditev oz. umerjanje časovnih konstant T_s in T_r , v praznilni sklop namestijo potenciometri, kot je prikazano na sliki 6-a. Ker je proženje oz. množenje

napetosti izvedeno preko MOS tranzistorjev, ki so na različnih električnih potencialnih nivojih, je potrebno zagotoviti galvansko ločitev med krmilnim vezjem in tranzistorji, za kar so bili uporabljeni optični spojniki (optocoupler-ji). Izvedba proženja ene stopnje je podana na sliki 6-b, kjer je povezava prožilnega vezja izvedena med vrati (G) in izvorom (S) tranzistorja. Pri izbiri MOS tranzistorjev je potrebno izbrati takšne, ki imajo zadosti visoko vzdržno napetost med ponorom (D) in izvorom (S), ki naj bo vsaj 20% višja od maksimalne pričakovane napetosti. Smotno je omeniti, da naj imajo izbrani tranzistorji hiter odziv in nizko prevajalno upornost v nasičenju.



Slika 6: a) Shematski prikaz izvedbe praznilnega ali udarnega oz. impulznega sklopa, kjer sta za umerjanje časovnih konstant T_s in T_r predvidena potenciometri R_{pot1} in R_{pot2} . b) Krmilno vezje za proženje tranzistorjev, ki mora zagotavljati galvansko ločitev od mikrokrmilnika.

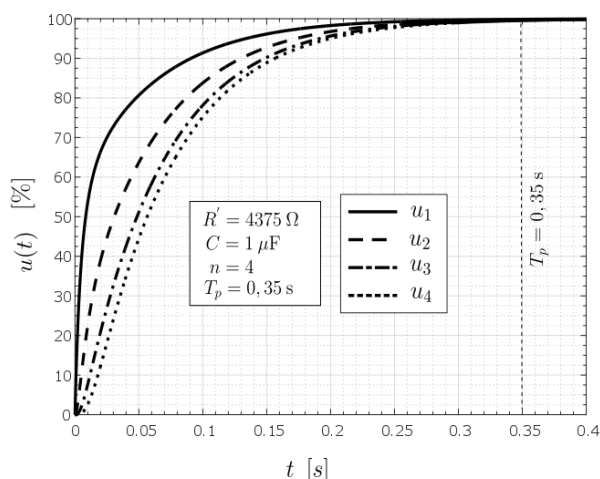
3 Simulacije in komentarji k rezultatom

Na podlagi izračunov so podani rezultati simulacij za štiristopenjski udarni napetostni generator s standardno obliko udarnega vala 1,2/50. Simulacije so bile opravljene v programskem okolju Matlab, kjer je pri polnilnem procesu bila upoštevana vezava, ki jo prikazuje slika 2, medtem ko je bilo v praznilnem procesu upoštevano poenostavljeno nadomestno vezje s slike 4. Vrednosti elementov udarnega generatorja so podane v tabeli 1 na koncu poglavja.

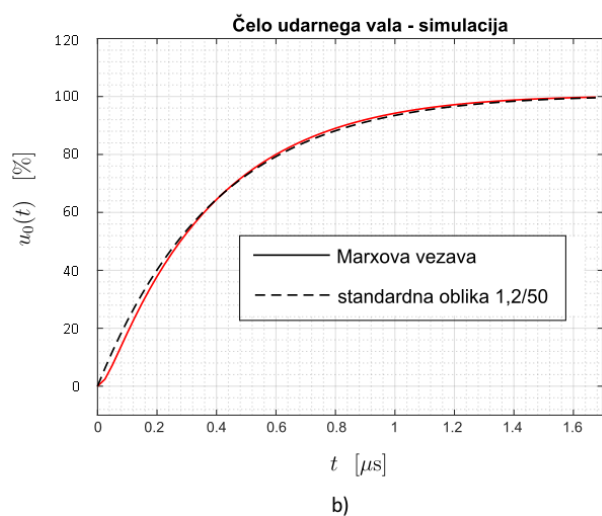
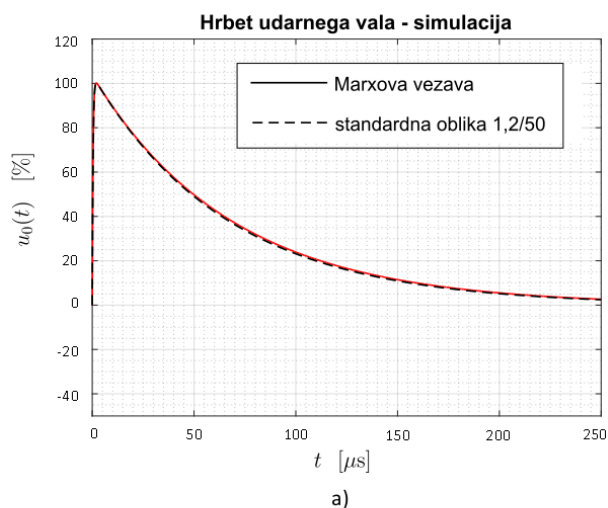
Slika 7 prikazuje izračunane časovne poteke napetosti na polnilnih kondenzatorjih C tekom polnjenja stopenj, pri tem se oznake napetosti navezujejo na sliko 2. Na sliki je prav tako označena vrednost časa polnjenja, izračunana na podlagi (2), iz česar lahko vidimo praktičen vidik izraza (2) pri načrtovanju polnilne stopnje udarnega generatorja.

Izračunane vrednosti potekov udarne napetosti, in sicer za hrbet ter čelo udarnega vala so podane na sliki 8. Pri izračunanih potekih je za primerjavo podana tudi s standardom predpisana oblika udarnega vala 1,2/50. Iz primerjave je razvidno, da ovrednotenje elementov udarnega generatorja po Angeliniju da zadovoljive rezultate, ter se predstavljena metoda lahko priporoči za

uporabo pri načrtovanju laboratorijskega udarnega napetostnega generatorja v Marxovi vezavi.



Slika 7: Časovni poteki napetosti na kondenzatorjih pri polnjenju Marxovega generatorja z ozirom na sliko 2



Slika 8: Časovni poteki napetosti pri praznjenju Marxovega generatorja: a) potek na hrbtu udarnega vala in b) potek na čelu udarnega vala. Za primerjavo je vrisana standardna oblika udarne napetosti 1,2/50 (črtkano), ki je podana z razliko dveh eksponencialnih funkcij $u_{std}(t) = (e^{-15000t} - e^{-2470000t})$.

Tabela 1: Parametri udarenga generatorja upoštevani v simulacijah

Parameter	vrednost	Opomba
n	4	število stopenj
R	4700 Ω	polnilni upor
R_a	2350 Ω	polnilni upor
C	1000 nF	polnilni kondenzator
C_1	250 nF	impulzna kapacitivnost
C_2	10 nF	praznilna kapacitivnost
R_1	261 Ω	upor za določanje hrbta vala
R_2	42 Ω	upor za določanje čela vala
R_b	100 k Ω	upornost preizkušanca
T_p	350 ms	polnilni čas stopenj
T_s	1,26 μ s	časovna konstanta čela vala
T_r	48,7 μ s	časovna konstanta hrbta vala

4 Sklepna beseda

V članku je predstavljena metoda izračuna udarnega napetostnega generatorja, ki se v veliki meri opira na Angelinijevo grafično metodo. Na podlagi simulacij lahko podamo sklep, da je predstavljena metoda primerna za praktično uporabo pri načrtovanju tovrstnih generatorjev. Čeprav je v konkretnem primeru bilo obravnavano načrtovanje udarnega generatorja z vršno napetostjo 900 V, pa enaki principi izračuna veljajo tudi za generatorje z večjim številom stopenj in višjo preizkusno napetostjo.

Literatura

- [1] M. Majcen, »Rešitve v proizvodnji varistorjev v ohišji SMD«, diplomsko delo, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, UM, Maribor, 2016.
- [2] IEC 60076-1, Power Transformers, Part 1: General, IEC Standard, 2000.
- [3] M. Babuder, »Visokonapetostna tehnika – skripta«, UL-Fakulteta za elektrotehniko, UL, Ljubljana, 2006.
- [4] K. Schon, »High Impulse Voltage and Current Measurement Techniques«, Springer, 2013.
- [5] B. Heller, A. Veverka, »Surge Phenomena in Electrical Machines«, Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences, Prague, 1968.
- [6] M. Trbušič, J. Pihler, A. Hamler, *Kompensacija časa polovične vrednosti pri preskušanju z Markovim generatorjem*, 25. Posvetovanje Komunalna energetika, Maribor, 2015.
- [7] W.M. Al-Hasawi, K.M. El-Naggar, *A Genetic Based algorithm for Digitally Recorded Impulse Parameter Estimation*, IEEE Bologna Power Tech conference Proceedings, vol. 2, 23-26, 2003.
- [8] E.A. Feilat, A. Al-Hinai, *HV Impulse Parameter Estimation using ESPRIT-based method*, 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2011.
- [9] P. Yutthagowith, P. Tuethong, N. Pattanadech, *Effective Circuit Parameter Determination in lightning Impulse Voltage Tests of air Core Inductors*, 12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, Beijing, China, 2016.