KOMPENZACIJA ČASA POLOVIČNE VREDNOSTI PRI PRESKUŠANJU Z MARKSOVIM GENERATORJEM

Mislav TRBUŠIĆ, Jože PIHLER, Anton HAMLER

POVZETEK

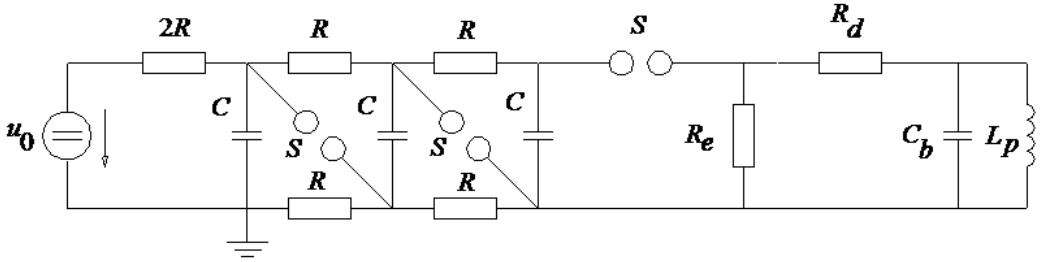
V tem delu predstavljamo matematični model Marksovega udarnega generatorja s kompenzacijo položnosti hrbta udarnega vala. Pri preskušanju nizkonapetostnih navitij transformatorjev, se zaradi nizkih induktivnosti preskušanca pojavijo težave na hrbtu udarnega vala, kjer se položnost hrbta zmanjša do te mere, da udarni val ne ustreza več IEC standardom. V tem primeru je potrebno Marksov generator nadgraditi z Glaningerjevo vezavo, ki na hrbtu udarnega vala poveča čas do polovične vrednosti.

ABSTRACT

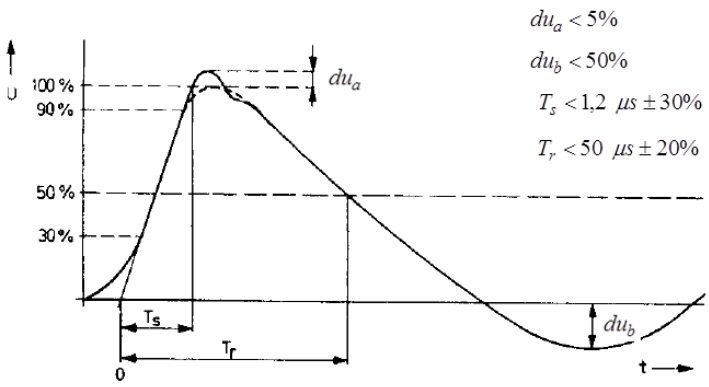
This Paper presents a mathematical model of the Marx generator with surge wave tail compensation. Due to small inductance of low-voltage transformers windings, the tail of the impulse voltage decreases in such a manner that the impulse voltage shape no longer meets the IEC standards. In this case it is necessary to modify the Marx connection with the Glaninger circuit, which increases the time to half value.

1. UVOD

Marksov generator ali Marksov množilnik (slika 1), ki se uporablja za proizvajanje visokonapetostnih impulzov iz enosmernega izvora, je nepogrešljiv element pri preskušanju elektroenergetskih naprav z udarno napetostjo. Oblika impulza, ki jo takšen generator proizvede je podobna obliki, ki nastane ob atmosferskih razelektritvah in je standardizirana z mednarodnimi predpisi. Takšni impulzi so aperiodični s strmim čelom in položnim hrbtom. Matematično jih lahko opišemo z razliko dveh eksponentnih funkcij (slika 2).



Slika 1: Konvencionalno vezje Marksovega generatorja



Slika 2: Standardna oblika udarnega vala $u_{1,2/50}$, z dopustnimi tolerancami [1].

Težave nastanejo pri preskušanju nizkonapetostnih navitij transformatorjev, takrat se zaradi majhne induktivnosti bremena zmanjša položnost hrbta udarnega vala [1]. Takšna oblika impulza ne ustreza več s standardi predpisani in jo je treba s pomočjo dodatnih kompenzacijskih elementov ustrezno korigirati. Eden od možnih načinov za povečanje časa polovične vrednosti T_r lahko dosežemo z Glaningerjevim vezjem, ki ga kaže slika 3 [1][2][3]. Razlika med konvencionalno Marksovo in Glaningerjevo vezavo je v dodatnih dveh elementih L_g in R_p na udarni stopnji.

R - polnilna upornost

C - polnilna kapacitivnost

R_e - upornost za določanje položnosti hrbta

R_d - upornost za določanje strmine čela

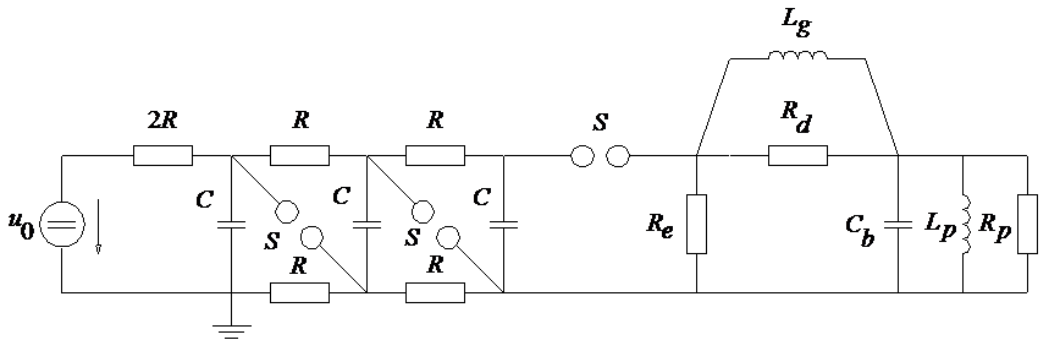
S - iskrilo

C_b - kapacitivnost bremena in merilne opreme

L_p - induktivnost bremena

L_g - Glaningerjeva kompenzacijska induktivnost

R_p - vzporedna kompenzacijska upornost

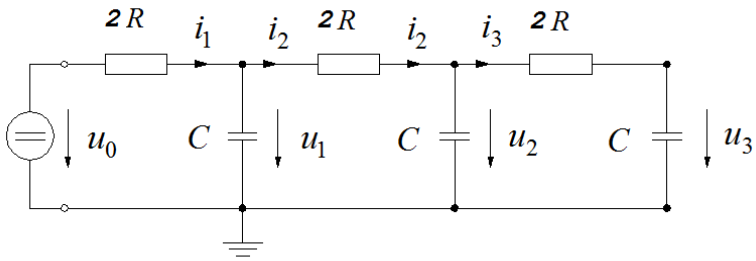


Slika 3: Glaningerjevo vezje za kompenzacijo strmine hrbta pri preskušanju bremen z majhno induktivnostjo.

2. POLNJENJE MARKSOVEGA GENERATORJA

Delovanje Marksovega generatorja lahko razdelimo v dve stopnji. Prva stopnja obsega polnjenje kondenzatorjev C, druga pa praznjenje kondenzatorjev preko iskril S in doseganje višjih napetosti s predpisano impulzno obliko $1{,}2/50\ \mu s$.

Pri procesu polnjenja lahko predstavimo Marksov generator z lestvičnim vezjem, kot kaže slika 4. V našem primeru smo se omejili na generator s tremi stopnjami ($n = 3$). Zapis obeh Kirchhoffovih zakonov nam da sistem diferencialnih enačb prvega reda.



Slika 4: Nadomestno lestvično vezje za ponazoritev polnjenja Marksovega generatorja.

Prvi Kirchhoffov zakon, lahko za vezje na sliki zapišem v matrični obliki z enačbo (1), ali splošno z enačbo (2).

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & 0 & 0 \\ 0 & C & 0 \\ 0 & 0 & C \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1' \\ u_2' \\ u_3' \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$[DI] \cdot [i] = [C] \cdot [u'] \tag{2}$$

Drugi Kirchhoffov zakon v matrični obliki za vezje po sliki 4 podajata enačbi (3) oz. (4).

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G & 0 & 0 \\ 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u_0 \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} G & 0 & 0 \\ 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2R & 0 & 0 \\ 0 & 2R & 0 \\ 0 & 0 & 2R \end{bmatrix}^{-1}$$

$$[i] = [G] \cdot [-DI]^T \cdot [u] + [E_0] \cdot u_0 \tag{4}$$

Kjer je $[DI]$ matrika prvih diferenc. Z eliminacijo tokov v enačbi (2) in po ureditvi, dobimo sistem diferencialnih enačb, ki opisuje pojav polnjenja Marksovega generatorja (5).

$$[u'] = [C]^{-1} \cdot [DI] \cdot [G] \cdot [-DI]^T \cdot [u] + [C]^{-1} \cdot [DI] \cdot [E_0] \cdot u_0 \tag{5}$$

$$[u'] = [A] \cdot [u] + [B] \cdot u_0 \tag{6}$$

$$[A] = [C]^{-1} \cdot [DI] \cdot [G] \cdot [-DI]^T \qquad [B] = [C]^{-1} \cdot [DI] \cdot [E_0]$$

Da dobimo odziv, je potrebno določiti homogene in partikularne rešitve sistema diferencialnih enačb (6). Homogeno rešitev lahko poiščemo tako, da predpostavimo rešitev v obliki $[u] = [U] \cdot e^{\lambda t}$, kar prevede sistem diferencialnih enačb na sistem algebrskih enačb. Rešitev homogenega sistema dobimo, če poiščemo njegove lastne vrednosti $[\lambda]$ in pripadajoče lastne vektorje $[A_x]$.

$$[u_h'] = [A] \cdot [u_h] \quad \rightarrow \quad ([A] - [\lambda]) \cdot [u_h] = [0] \tag{7}$$

$$[u_h] = [A_x] \cdot [e^{\lambda t}] \tag{8}$$

Partikularno rešitev je določljiva z enačbo, kjer je u_0 motilna funkcija. V našem primeru, smo za motilno funkcijo predpostavili izvor konstantne enosmerne napetosti $u_0 = 1$ V.

$$[u_p] = [u_h] \cdot \int [u_h]^{-1} \cdot [B] \cdot u_0 \, dt \tag{9}$$

Celotna rešitev, ki opiše polnjenje Marksovega generatorja je seštevek enačb (8) in (9).

$$[u] = [u_h] \cdot [k_x] + [u_p] \tag{10}$$

Neznani ostane le še vektor amplitudnih koeficientov $[k_x]$, ki ga dobimo z -upoštevanjem začetnih pogojev ob $t = 0\ s$.

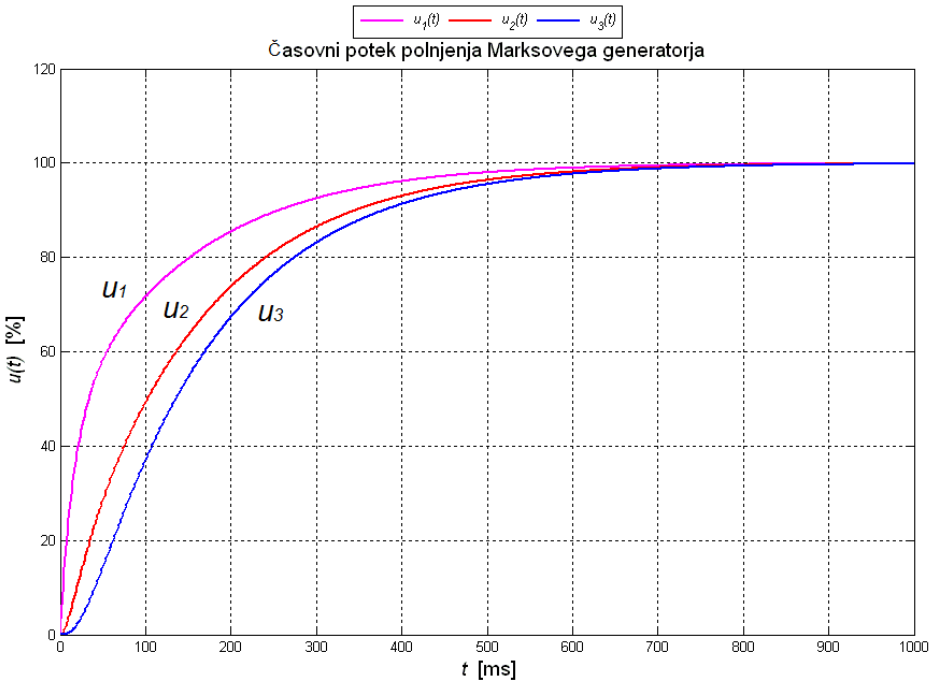
$$[k_x] = [u_h(0)]^{-1} \cdot \left([u(0)] - [u_p(0)] \right) \tag{11}$$

Kondenzatorji se ne napolnijo hkrati, zato je najbolj relevanten podatek za čas polnjenja čas, v katerem doseže zadnja stopnja napajalno napetost u_0. Ta čas je približno enak $5 \cdot T_n$, kjer je T_n časovna konstanta zadnje stopnje. Izkaže se, da je časovna konstanta T_n enaka $|1/\lambda_{\min}|$, kjer je $\lambda_{\min}$ najmanjša lastna vrednost sistema (8).

Približno lahko čas polnjenja določimo z enačbo (12).

$$T_p = 5 \cdot R \cdot C \cdot n^2 \tag{12}$$

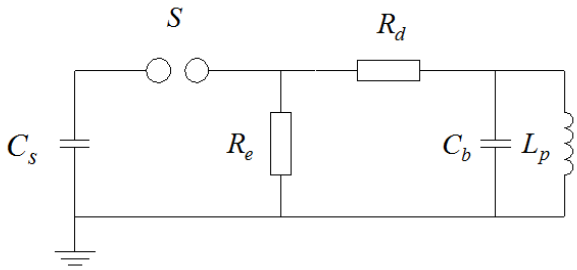
Na sliki 5 so pokazani rezultati simulacije polnjenja Marksovega generatorja po sliki 4.



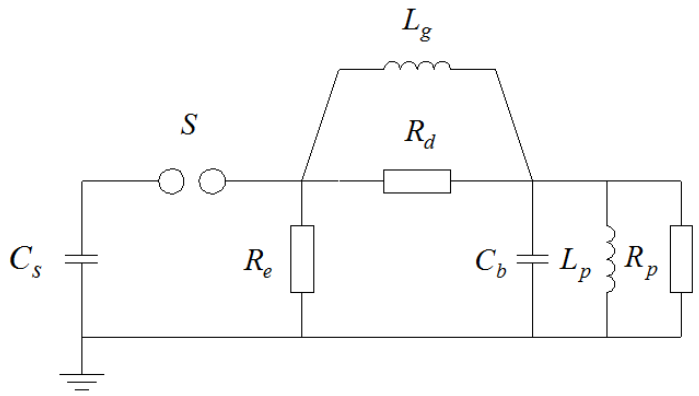
Slika 5: Časovni potek polnjenja posameznih stopenj Marksovega generatorja.
$R = 5000\ \Omega$, $C = 3\ \mu\text{F}$, $n = 3$.

3. PRAZNJENJE MARKSOVEGA GENERATORJA

Pri praznitvenem procesu Marksovega generatorja, je potrebno, da so elementi generatorja izbrani tako, da oblika impulza ustreza standardni obliki. Včasih, pri preskušanju nizko induktivnih bremen, kot so nizkonapetostna navitja transformatorjev, pa se položnost hrbta zmanjša do te mere, da oblika udarnega vala ni več v mejah s standardom predpisane. V teh primerih je potrebno konvencionalno vezavo Marksovega generatorja (slika 6) nadgraditi z Glaningerjevim vezjem (slika 7). Takšna vezava omogoča preskušanje bremen, ki imajo induktivnost L_p manjšo od 15 mH [1].



Slika 6: Marksov generator brez kompenzacije položnosti hrbta.

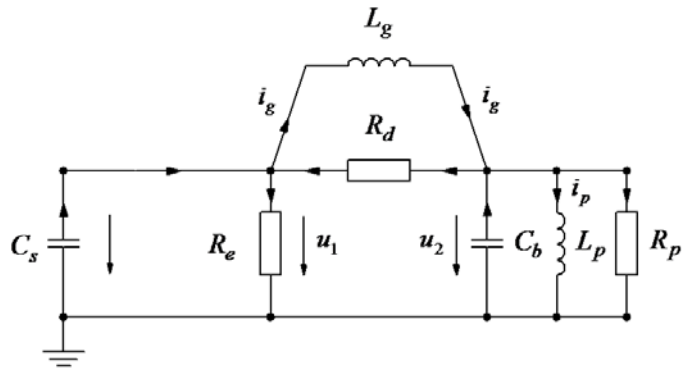


Slika 7: Marksov generator s kompenzacijo položnosti hrbta, za preskušanje nizko induktivnih bremen (Glaningerjevo vezje).

3.1 Matematični model Glaningerjevega vezja

Ponavadi proizvajalci že ponujajo sandardne vrednosti dodatnih elementov za Glaningerjevo vezavo [2]. Pri preskušanju z udarnimi generatorji, ali pri razvoju in dodelavi le teh, je zaželeno poznavanje odzivnosti za različne vrednosti elementov generatorja in bremen. Za ta namen je potrebno predstaviti matematični model udarnega generatorja, ki ga lahko uporabimo pri računalniških simulacijah. V naši obravnavi smo se osredotočili na model Glaningerjeve vezave.

Kot kaže slika 8, lahko zapišemo prvo Kirchhoffovo enačbo za obe vozlišči.



Slika 8: Nadomestno vezje Glaningerjeve vezave.

$$-u_1' \cdot C_s - \frac{u_1}{R_e} + \frac{u_2 - u_1}{R_d} - i_g = 0$$

$$-u_2' \cdot C_b - \frac{u_2}{R_p} - \frac{u_2 - u_1}{R_d} - i_p + i_g = 0$$

Če obe diferencialni enačbi odvajamo po času t in upoštevamo, da je $i_g^{'} = \frac{u_1 - u_2}{L_g}$ in $i_p^{'} = \frac{u_2}{L_p}$, lahko izraz strnemo v matrično obliko, kot jo opisuje enačba (13).

$$\begin{bmatrix} u_1^{''} \\ u_2^{''} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_s} \cdot \left(\frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_e} \right) & \frac{-1}{C_s \cdot R_d} \\ \frac{-1}{C_b \cdot R_d} & \frac{1}{C_b} \cdot \left(\frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_p} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1^{'} \\ u_2^{'} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_s \cdot L_g} & \frac{-1}{C_s \cdot L_g} \\ \frac{-1}{C_b \cdot L_g} & \frac{1}{C_b} \cdot \left(\frac{1}{L_g} + \frac{1}{L_p} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{13}$$

Sistem (13) je linearen in homogen ter ga lahko rešimo z dispozicijo $[u] = [U] \cdot e^{\lambda t}$, kar pripelje do iskanja lastnih vrednosti in pripadajočih lastnih vektorjev (14). Glede na najvišjo stopnjo odvoda, ki je dva, bo karakteristični polinom četrte stopnje. To pomeni, da v splošnem sistemu (13) pripadajo štiri kompleksne lastne vrednosti s pripadajočimi lastnimi vektorji (14). Odziv sistema (13) bo zato odvisen od značaja ničel karakterističnega polinoma.

$$\lambda_i = \delta_i + j\omega_i \quad , \quad \begin{bmatrix} a_{1i} \\ a_{2i} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \tag{14}$$

Formalno lahko splošno rešitev sistema (13) zapišemo z enačbo (15).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} &= k_1 \cdot \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \end{bmatrix} \cdot e^{\delta_1 t} \cos(\omega_1 t) + k_2 \cdot \begin{bmatrix} a_{12} \\ a_{22} \end{bmatrix} \cdot e^{\delta_2 t} \cos(\omega_2 t) + \\ & k_3 \cdot \begin{bmatrix} a_{13} \\ a_{23} \end{bmatrix} \cdot e^{\delta_3 t} \cos(\omega_3 t) + k_4 \cdot \begin{bmatrix} a_{14} \\ a_{24} \end{bmatrix} \cdot e^{\delta_4 t} \cos(\omega_4 t) \end{aligned} \tag{15}$$

Amplitudne koeficiente $[k]$ določimo iz začetnih pogojev ob $t = 0\,\mathrm{s}$ po enačbi (16).

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ \lambda_1 a_{11} & \lambda_2 a_{12} & \lambda_3 a_{13} & \lambda_4 a_{14} \\ \lambda_1 a_{21} & \lambda_2 a_{22} & \lambda_3 a_{23} & \lambda_4 a_{24} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{C_s}(0) \\ 0 \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \tag{16}$$

$$u_{C_s}(0) = 1\ \mathrm{V} \quad , \quad \alpha = \frac{-u_{C_s}(0) \cdot (R_d + R_e)}{R_d \cdot R_e \cdot C_s}, \quad \beta = \frac{u_{C_s}(0)}{R_d \cdot C_b}$$

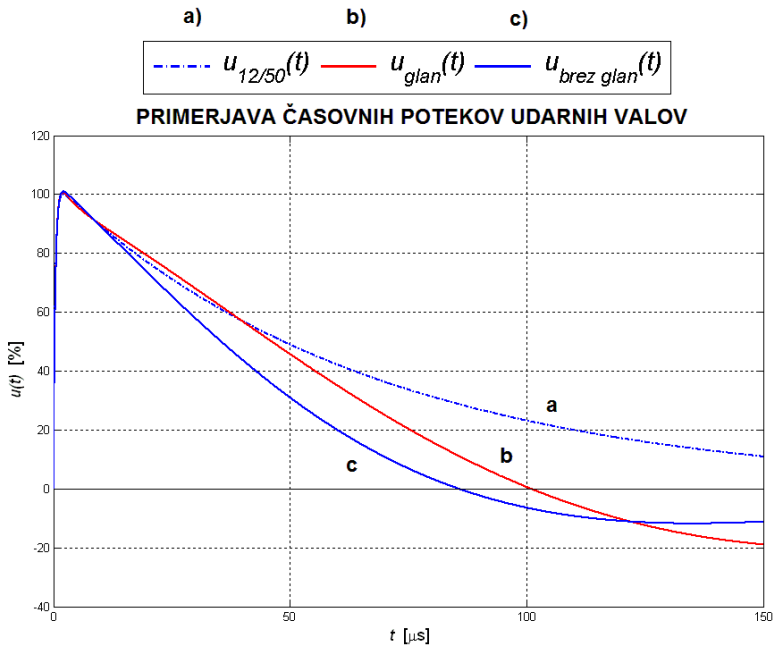
Pri izbiri kompenzacijskih elementov L_g in R_p je treba izbrati takšne vrednosti, da se izognemo prenihajem na čelnem delu vala, da val amplitudno ne oslabimo in da ustreza standardu.

4. REZULTATI SIMULACIJ

Po postopkih, ki smo jih opisali v prejšnjih točkah, smo v programskem okolju Matlab opravili simulacijo udarnega vala za breme z induktivnostjo $L_p = 3$ mH s konvencionalno vezavo Marksovega generatorja in z Glaningerjevo vezavo. Obe simulaciji smo primerjali z idealizirano obliko udarnega vala $u_{1,2/50}$. Rezultate simulacij kaže slika 9.

Vrednosti parametrov uporabljenih pri simulacijah (slika 7, slika 8).

$C_s = 1000$ nF	$C_b = 10$ nF	
$L_p = 3$ mH	$L_g = 150$ µH	
$R_d = 43\ \Omega$	$R_e = 67\ \Omega$	$R_p = 400\ \Omega$
$u_{1,2/50} = 1{,}038 \cdot (e^{-s_1 t} - e^{-s_2 t})$	$s_1 = 15000\ \mathrm{s}^{-1}$	$s_2 = 2470000\ \mathrm{s}^{-1}$



Slika 9: Primerjava simulacij časovnih potekov udarnih valov.

Iz slike 9 je razvidno, da s pomočjo Glaningerjeve vezave (rdeče) lahko povečamo čas polovične vrednosti udarnega vala T_r. Spodaj so podane vrednosti T_r za vse tri primere.

a) Standardni udarni val $u_{1,2/50}$: T_r = 50 µs

b) Glaningerjeva vezava : T_r = 46 µs

c) Marksova vezava : T_r = 36 µs

5. SKLEP

Prikazana je matematična obravnava napetostnega udarnega generatorja in kompenzacija položnosti hrbta udarnega vala z Glaningerjevim vezjem. Opisani računski postopki predstavljajo iztočnice pri načrtovanju, predelavi ali prilagajanju udarnega generatorja preskušancu z majhno induktivnostjo (L_p < 15 mH). Čeprav je v članku obravnavan model Glaningerjevega vezja, pa se s podobnim pristopom lahko analizira možnost kompenzacije prenihajev na čelnem delu udarnega vala, ki nastopijo pri preskušancih z relativno velikimi kapacitivnostmi (skoznjiki, odklopniki, VN navitja transformatorjev) [3].

6. VIRI, LITERATURA

[1] K. Feser: Circuit Design of Impulse Generators for the Lighting Impulse Voltage Testing of Transformers, Haefely, Switzerland, 1977.
[2] Data Sheet 3.32/2, Glaninger Circuit, Highvolt, Dresden, Germany, www.highvolt.de
[3] Impulse voltage test system SGSA, Haefely, Switzerland, 2001

NASLOV AVTORJEV

Mislav Trbušić, univ. dipl. inž. el.

Tel: + 386 2 220 70 81

Elektronska pošta: mislav.trbusic@um.si

red. prof. dr. Jože Pihler, univ. dipl. inž. el.

Tel: + 386 2 220 70 61 Fax: + 386 2 252 54 81, + 386 2 220 72 72

Elektronska pošta: joze.pihler@um.si

red. prof. dr. Anton Hamler, univ. dipl. inž. el.

Tel: + 386 2 220 70 42 Fax: + 386 2 220 72 72

Elektronska pošta: anton.hamler@um.si

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija