

## Primena Hejdlorove funkcije u programima za elektromagnetne prelazne procese

Jovan Mrvić<sup>1</sup>, Ranko Jasika<sup>1</sup>, Ninoslav Simić<sup>1</sup>

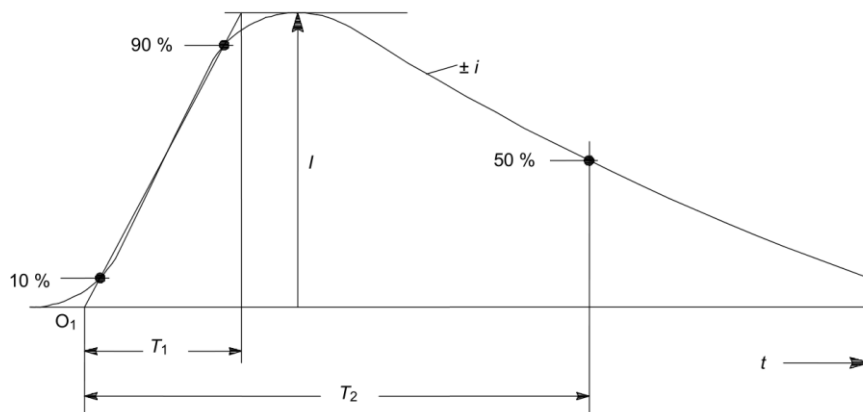
<sup>1</sup>Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a,  
11000 Beograd, Srbija  
[ranko.jasika@ieent.org](mailto:ranko.jasika@ieent.org), [jmrvic@ieent.org](mailto:jmrvic@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** U radu je analizirana mogućnost upotrebe Hejdlorove funkcije u programima za elektromagnetne prelazne procese. Izračunati su parametri Hejdlorove funkcije za razne standardne talasne oblike, pri čemu je za određene talase pokazana veća tačnost nego upotrebom standardom definisanih parametara. Izračunati parametri za odabrane talasne oblike su predstavljeni tabelom i pokazana je mogućnost korišćenja tabele za procenu parametara određenih talasnih oblika koji nisu dati u tabeli. Prikazani su mogući načini primene Hejdlorove funkcije u programima za elektromagnetne prelazne procese.

**Ključne reči:** Hejdlor, simulacije udara groma, ATP/EMTP, EMTP-RV, PSCAD/EMTDC, MicroTran

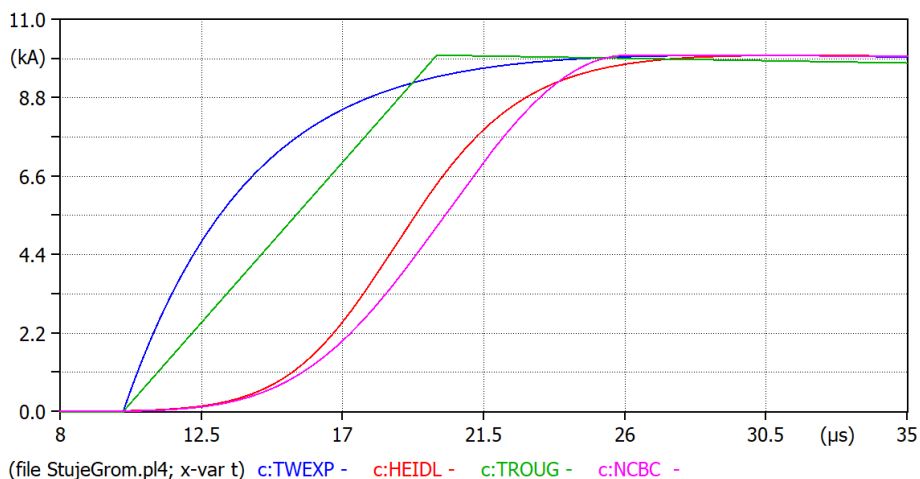
### 1. Uvod

Prilikom simulacije atmosferskih pražnjenja u delove elektroenergetskog sistema uobičajeno se koriste specijalizovani programi za elektromagnetne prelazne procese tipa EMTP (ElectroMagnetic Transients Program). Najčešće su u upotrebi u varijantama ATP/EMTP, EMTP-RV, PSCAD/EMTDC i MicroTran, pri čemu svaka ima svoje specifičnosti i mogućnosti. Udar groma se najčešće modeluje strujnim generatorom sa parametrima koji zavise od željenog oblika struje. Oblik i amplituda struje groma su za razne vrste udara definisani Aneksom A standarda IEC 62305-1 [1] i za udare čije je trajanje manje od 2 ms koji su najčešće predmet simulacija, prikazani su na slici 1.



Slika 1. Oblik i parametri struje groma:  $O_1$ - virtualni početak,  $T_1$ -vreme čela,  $T_2$ -vreme začetja,  $I$ -amplituda

Oblik struje prikazan na slici 1 može se simulirati raznim funkcijama. Istorijski najstarija i najjednostavnija je predstava trougaonom funkcijom, zatim dvostrukom eksponencijalnom funkcijom, Hejdlrovom funkcijom [3], NCBC (new channel base current) funkcijom [4] ili na neki drugi način. Na slici 2 su prikazane navedene funkcije za talas oblika 10/350  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ , amplitude 10 kA.



(file StujeGrom.pl4; x-var t) c:TWEXP - c:HEIDL - c:TROUG - c:NCBC -  
Slika 2. Struja oblika 10/350  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$  prikazana: trougaonom funkcijom (zelena kriva), dvostrukom eksponencijalnom funkcijom (plava kriva), Hejdlrovom funkcijom (crvena kriva) i NCBC funkcijom (ružičasta kriva)

Osim funkcije koja opisuje struju groma, potrebno je poznavati i njene izvode u cilju proračuna indukovanih prenapona i za daljne poboljšavanje modela atmosferskog pražnjenja [5].

## 2. Primena Hejdlerove funkcije za simulaciju struje groma

Hejdlerova funkcija je definisana jednačinom (1).

$$I(t) = Amp \cdot \frac{\left[\frac{t}{Tf}\right]^n}{1 + \left[\frac{t}{Tf}\right]^n} \cdot e^{\left[-\frac{t}{Td}\right]} \quad (1)$$

Sve parametre jednačine (1) potrebno je odrediti tako da ona odgovara željenom obliku struje. Jednačina (1) se može diferencirati i analitički odrediti njen prvi i drugi izvod koji su kontinualni, međutim ona nije integrabilna. Prvi izvod Hejdlerove funkcije prikazan je jednačinom (2), a drugi jednačinom (3)

$$\frac{dI(t)}{dt} = -Amp \cdot \frac{e^{-\frac{t}{Td}} \cdot \left(\frac{t}{Tf}\right)^n \cdot \left(t \cdot \left(\frac{t}{Tf}\right)^n - Td \cdot n + t\right)}{Td \cdot t \cdot \left(\left(\frac{t}{Tf}\right)^n + 1\right)^2} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2I(t)}{dt^2} &= \\ &= Amp \cdot \frac{e^{-\frac{t}{Td}} \left(\frac{t}{Tf}\right)^n \cdot \left(Td^2(-n) \left(\left(\frac{t}{Tf}\right)^n + n \left(\left(\frac{t}{Tf}\right)^n - 1\right) + 1\right) - 2Td \cdot n \cdot t \left(\left(\frac{t}{Tf}\right)^n + 1\right) + t^2 \left(\left(\frac{t}{Tf}\right)^n + 1\right)^2\right)}{Td^2 \cdot t^2 \cdot \left(\left(\frac{t}{Tf}\right)^n + 1\right)^3} \quad (3) \end{aligned}$$

Referenca [1] u Aneksu B daje vrednosti parametara Hejdlerove funkcije za struje oblika 10/350  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ , 1/200  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$  i 0,25/100  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ . U tabeli 1 date su ove standardne vrednosti parametara Hejdlerovih funkcija (n, Amp, Tf i Td) svedenih na talase amplitude 1 p.u. i izračunati su parametri (Tc-vreme čela, Tz-vreme začelja i Mag-amplituda) ovako generisanih funkcija saglasno definiciji sa slike 1.

Tabela 1. Parametri Hejdlerovih funkcija datih standardom IEC 62305 i provera njihovog oblika

redni broj	oblik po Std 60232	n	Amp [p.u.]	Tf [s]	Td [s]	Tc [ $\mu\text{s}$ ]	Tz [ $\mu\text{s}$ ]	Mag [p.u.]
1	10/350	10	1,07526	19,0E-6	4,85E-4	9,9875	356,59	1,0013
2	1/200	10	1,01419	1,82E-6	285E-6	0,9875	200,1	1,0004
3	0,25/100	10	1,00704	0,454E-6	143E-6	0,25	99,835	0,99976

Može se uočiti greška od 1,25% kod vremena čela za oblike 10/350  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$  i 1/200  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$  i greška od 1,88% kod vremena začelja za oblik 10/350  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ .

Izračunate su vrednosti parametara Hejdlarovih funkcija za standardne oblike struja groma kao i za one oblike struja koje se često koriste kod određivanja parametara odvodnika prenapona. Takođe su izračunati parametri naponskih talasa 1,2/50  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$  i 250/2500  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$  pri čemu su za naponske talase vremena čela računata preko vremena od 30% do 90% vrednosti amplitude saobrazno standardu IEC 60060-1:2010 [2]. Parametri nekih oblika struja izračunati su za dve vrednosti parametra n od 5 i 10. Na kraju su dati parametri Hejdlarove funkcije za struju amplitude 121 kA i strmine 43 kA/ $\mu\text{s}$  koja može biti premašena sa verovatnoćom od 2 % i često se koristi u simulacijama [6]. Svi parametri Hejdlarovih funkcija datih u tabeli 2 su podešeni da daju jedinični talas, pa je ovako dobijenu funkciju potrebno pomnožiti sa željenom amplitudom. Za sve generisane Hejdlarove funkcije obavljena je provera oblika, koja je takođe prikazana u tabeli 2. Svi parametri imaju isto značenje kao u tabeli 1.

Tabela 2. Izračunati parametri Hejdlarovih funkcija i provera njihovog oblika

redni broj	oblik	n	Amp [p.u.]	Tf [s]	Td [s]	Tc [ $\mu\text{s}$ ]	Tz [ $\mu\text{s}$ ]	Mag [p.u.]
1	10/350	5	1,06324	9,62708E-6	4,7071E-4	10	350,22	1
2	10/350	10	1,07549	1,90532E-5	4,7554E-4	10,025	350,37	0,9999
3	1/200	5	1,01311	9,04189E-7	2,839E-4	1	200,08	1
4	1/200	10	1,01389	1,83191E-6	2,8484E-4	1	200,11	1
5	0,25/100	5	1,00723	2,23762E-7	1,4295E-4	0,25	100,05	0,99999
6	0,25/100	10	1,0073	4,55229E-7	1,4326E-4	0,2625	99,836	1
7	1,2/50 naponski	5	1,05251	1,11846E-6	6,7946E-5	1,2	49,98	0,99991
8	1,2/50 naponski	10	1,06512	2,34458E-6	6,8477E-5	1,2	50,02	1,0001
9	1/20	5	1,11064	1,00351E-6	2,5731E-5	1	19,99	1,0002
10	1/20	10	1,13718	1,9571E-6	2,6115E-5	1	20	0,99975
11	8/20	5	6,18532	1,27153E-5	1,0278E-5	8	20,02	1,0049
12	30/80	5	4,7654	4,6147E-5	4,5132E-5	29,975	79,947	1,0004
13	30/60	5	41,93393	5,62754E-5	1,8391E-5	30,013	60,031	1,0002
14	45/90	5	41,93294	8,44139E-5	2,7587E-5	45	90,02	1,0018
15	1/2	5	41,92867	1,87578E-6	6,1304E-7	1	2,01	0,99336
16	250/2500 naponski	5	1,24512	2,74531E-4	0,0029	250,35	2499,2	0,99956
17	4/10	5	6,18509	6,35761E-6	5,1391E-6	4	10,02	0,9997
18	40/100	5	6,18509	6,35761E-5	5,1391E-5	40,012	100,03	0,9997
19	1/3	5	3,3599	1,45915E-6	1,9472E-6	1	3,01	1,0008
20	1/4	5	2,06007	1,3169E-6	3,2973E-6	1,0125	4,0212	0,99908
21	1/5	5	1,67483	1,23834E-6	4,6659E-6	1	5,01	0,9998
22	1/6	5	1,49484	1,18756E-6	6,0451E-6	1	6,02	0,99958
23	1/7	5	1,39128	1,1515E-6	7,4315E-6	1	7,01	1,0003
24	1/8	5	1,32417	1,12442E-6	8,8234E-6	1	8	1,0008
25	1/9	5	1,27715	1,10317E-6	1,022E-5	1	8,99	1,0002
26	1/10	5	1,2424	1,08595E-6	1,1619E-5	1	10	0,99903
27	savic 43kA/us	5	1,08835	2,76916E-6	9,1896E-5	2,8125	70,011	0,99998

Analizom tabele 2, može se uočiti značajno smanjenje grešaka uočenih u tabeli 1, kod vremena čela za oblike 10/350  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$  i 1/200  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$  i kod vremena začelja za oblik 10/350  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ , najveća je sad reda 0,1%.

Sledeći zaključak je da se tabela 2 može iskoristiti za izračunavanje parametara  $T_f$  i  $T_d$  u slučajevima kad je odnos čela i začelja talasa  $T_c/T_z$  odgovara vrednostima datim u tabeli. Na primer, za talas oblika 30/60  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$  u tabeli 2 su dati parametri  $T_f$  i  $T_d$ . Ukoliko želimo parametre za talas oblika 50/100  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$  koji nije dat u tabeli 2, ali čiji odnos  $T_c/T_z$  odgovara talasu 30/60  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ , dovoljno je da parametre  $T_f$  i  $T_d$  za talas 30/60  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$  podelimo sa 30 i pomnožimo sa 50. Parametri  $n$  i  $Amp$  ostaju nepromenjeni. Ovo se najlakše uočava u redovima 17 i 18 tabele 2 gde su za oblike talasa 4/10  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$  i 40/100  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$  parametri  $T_f$  i  $T_d$  u odnosu 1:10.

### 3. Primena Hejdlrova funkcije u programima za elektromagnetne prelazne procese

Uobičajeno je da se simulacije atmosferskih pražnjenja u programima za elektromagnetne prelazne procese izvode u vremenskom domenu, pa tako činjenica da se Hejdlrova funkcija ne može direktno integraliti u cilju prelaska u frekventni domen nije od praktičnog značaja.

U programskom paketu ATP/EMTP i njegovom grafičkom okruženju ATPDraw, upotrebom programskog jezika MODELS za kontrolu strujnog izvora, direktno su programirane jednačine (1), (2) i (3).

$$o1 := \text{Magn} * \text{Amp} * (t/T_f)^n / (1 + (t/T_f)^n) * \exp(-t/T_d) \quad (4)$$

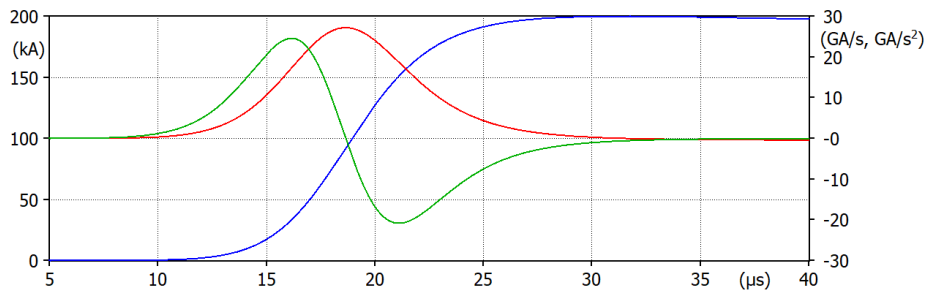
$$\begin{aligned} \text{prvi} := & -\text{Magn} * \text{Amp} * (\exp(-t/T_d) * (t/T_f)^n * (-T_d^n + t + t * (t/T_f)^n)) / \\ & (1e12 * (T_d * t * (1 + (t/T_f)^n)^2)) \\ \text{prvi} := & \text{prvi} * 1e12 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{drugi} := & \text{Magn} * \text{Amp} * \exp(-t/T_d) * (t/T_f)^n * (T_d^{2-n} * ((t/T_f)^n + n * ((t/T_f)^{n-1} \\ & + 1) - 2 * T_d * n * t * ((t/T_f)^{n+1}) + t^2 * ((t/T_f)^{n+1})^2) / \\ & (1.e12 * (T_d^{2-n} * t^2 * ((t/T_f)^{n+1})^3)) \\ \text{drugi} := & \text{drugi} * 1e12 \end{aligned} \quad (6)$$

U jednačinama (4), (5) i (6) koje su praktično prevod na programski jezik MODELS jednačina (1), (2) i (3), promenljiva "o1" je Hejdelrova funkcija koja upravlja strujnim generatorom, dok su promenljive "prvi" i "drugi" njen prvi i

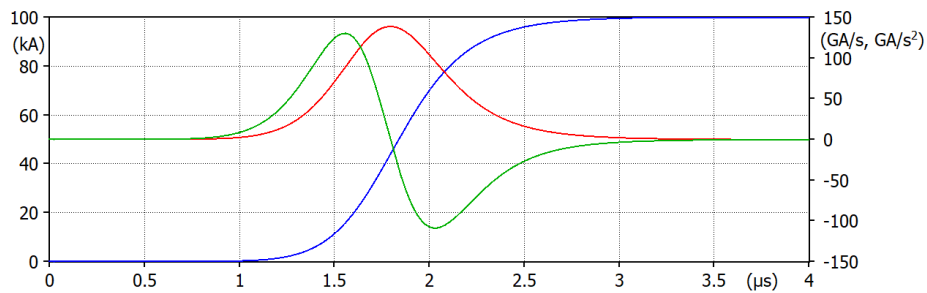
drugi izvod. Parametar Magn koji figuriše u jednačinama predstavlja željenu amplitudu struje a konstanta  $1e12$  ( $10^{12}$ ) kojom se prvo deli a potom množi, služi da se izbegnu numeričke nestabilnosti pri računanju prvog i drugog izvoda. U saglasnosti sa tabelom 2 u modelu se bira oblik od 1 do 27 i zadaje željena amplituda.

Na sledećim slikama su prikazane neke struje i njihovi prvi i drugi izvodi. S obzirom da drugi izvod ima veoma velike vrednosti, on je na slikama prikazan normalizovano, da bi se mogao prikazati na zajedno sa prvim izvodom na istoj ordinati.



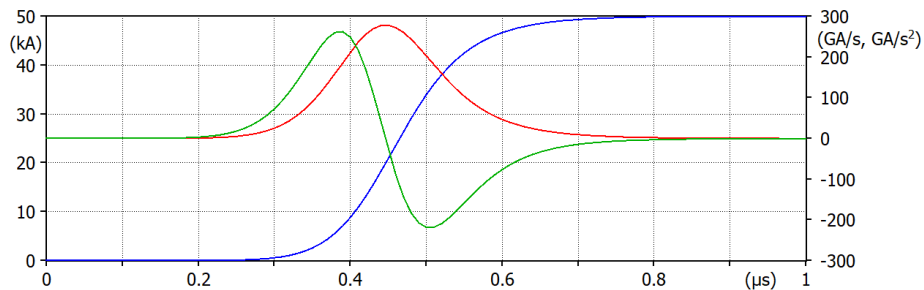
(file StrujeHajder2.pl4; x-var t) c:GROM -XX0002 m:PRVI f1

Slika 3 Struja oblika  $10/350 \mu\text{s}/\mu\text{s}$  (plava kriva sa ordinatom levo) i njen prvi i drugi izvod podeljen sa  $0,25 \cdot 10^6$  (crvena i zelena kriva sa ordinatom desno respektivno)



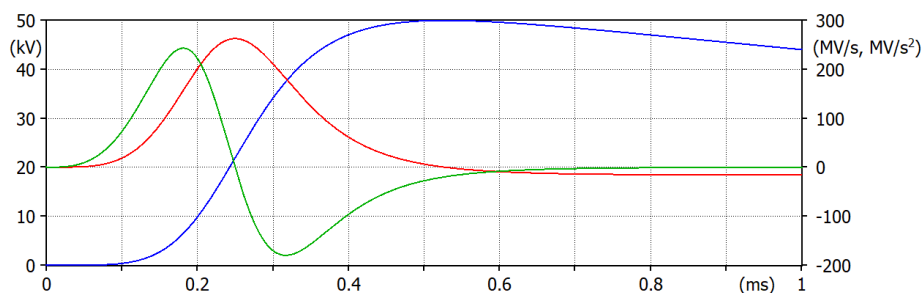
(file StrujeHajder2.pl4; x-var t) c:GROM -XX0002 m:PRVI f1

Slika 4 Struja oblika  $1/200 \mu\text{s}/\mu\text{s}$  (plava kriva sa ordinatom levo) i njen prvi i drugi izvod podeljen sa  $2,5 \cdot 10^6$  (crvena i zelena kriva sa ordinatom desno respektivno)



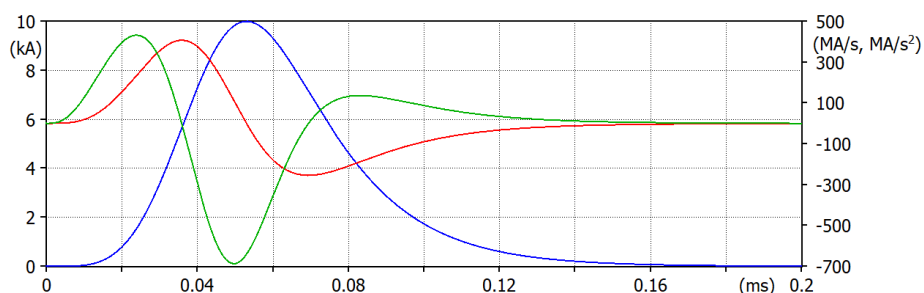
(file StrujeHajder2.pl4; x-var t) c:GROM -XX0002 m:PRVI f1

Slika 5 Struja oblika 0,25/100 μs/μs (plava kriva sa ordinatom levo) i njen prvi i drugi izvod podeljen sa  $10^6$  (crvena i zelena kriva sa ordinatom desno respektivno)



(file StrujeHajder2.pl4; x-var t) c:GROM -XX0002 m:PRVI f1

Slika 6 Napon oblika 250/2500 μs/μs (plava kriva sa ordinatom levo) i njen prvi i drugi izvod podeljen sa  $10^4$  (crvena i zelena kriva sa ordinatom desno respektivno)



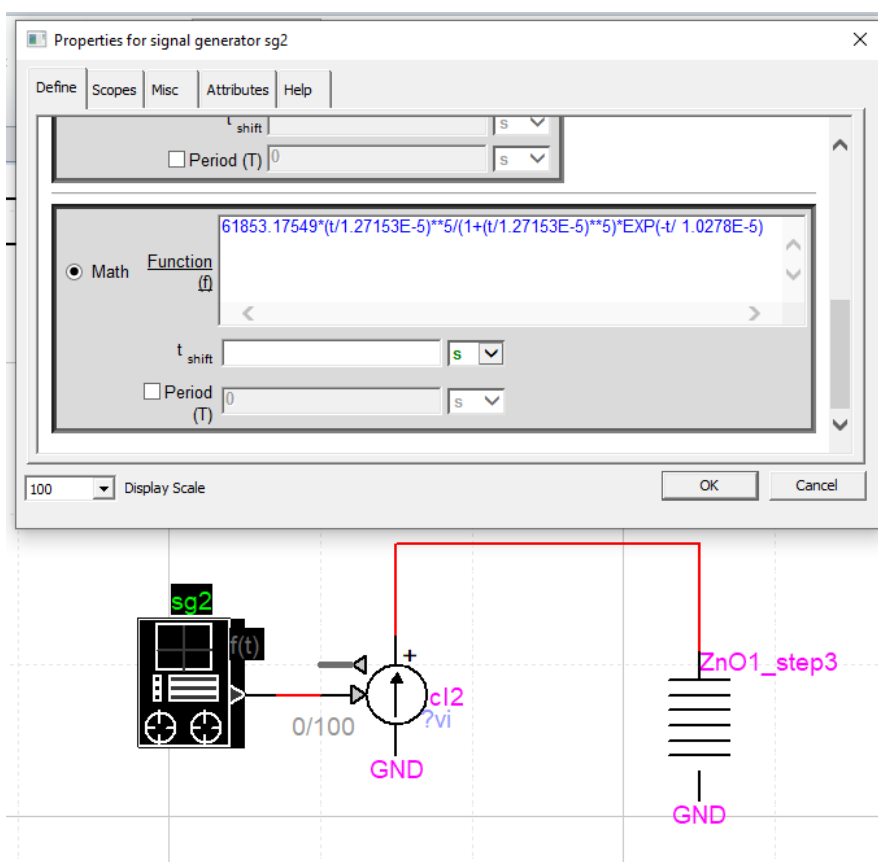
(file StrujeHajder2.pl4; x-var t) c:GROM -XX0002 m:PRVI f1

Slika 7 Struja oblika 30/60 μs/μs (plava kriva sa ordinatom levo) i njen prvi i drugi izvod podeljen sa  $0,5 \cdot 10^5$  (crvena i zelena kriva sa ordinatom desno respektivno)

Osim primenjenog pristupa u programskom paketu ATP/EMTP odavno je ugrađena podrška za Hejdlерову funkciju a odnedavno je značajno olakšana i

određivanje njenih parametara za zahtevani oblik talasa upotrebom grafičkog pretprocesora ATPDraw.

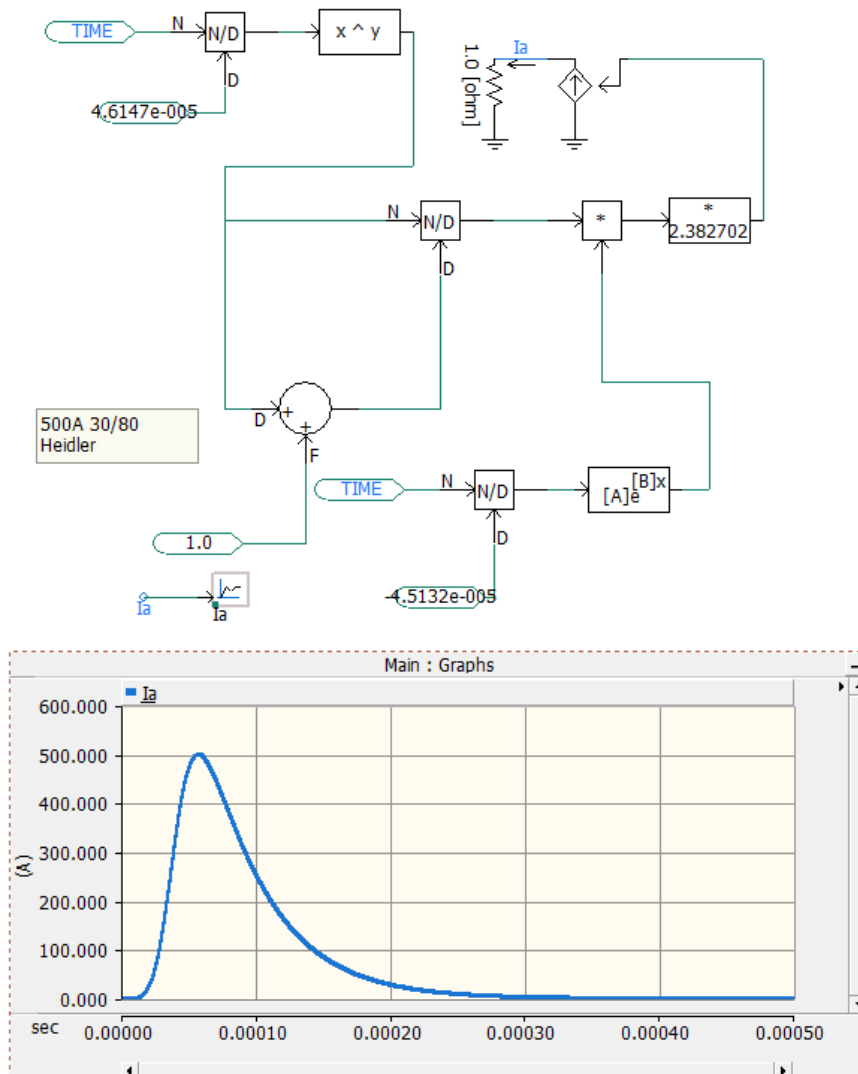
Programski paket EMTP-RV i njegovo grafičko okruženje EMTPWorks nemaju ugrađenu podršku za Hejderovu funkciju tako da se ona može realizovati **kontrolisanim** strujnim generatorom, čiji je oblik moguće definisati jednačinom. Primer upotrebe Hejlderove funkcije u programskom paketu EMTP/RV je prikazan na slici 8.



Slika 8 Primer primene Hejlderove funkcije u programskom paketu EMTP-RV

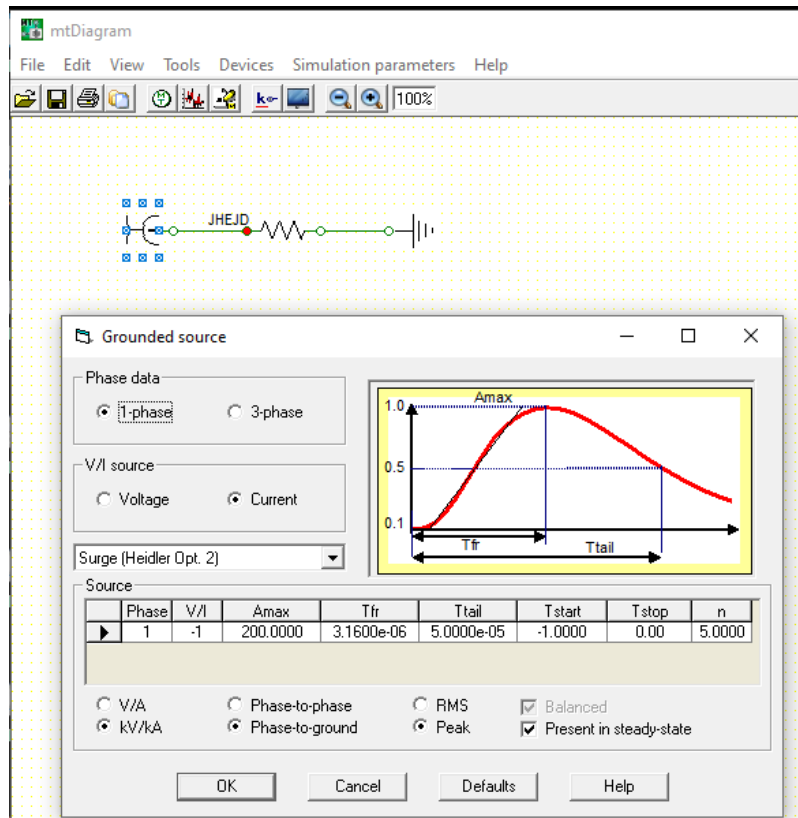


Programski paket PSCAD/EMTDC nema ugrađenu podršku za Hejdlерову funkciju tako da se ona ovde realizuje slično kao i u prethodnom slučaju samo što se sad upravljačka funkcija ne može direktno zadati već se mora ostvariti signalnim dijagramom slično Simulink paketu programskog okruženja Matlab. Ovo može postati zametno u slučaju da je potrebno programirati i izvode funkcija. Primer upotrebe Hejdlерove funkcije u programskom paketu PSCAD/EMTDC je prikazan na slici 9.



Slika 9 Primer primene Hejdlерove funkcije u programskom paketu PSCAD/EMTDC

U programskom paketu MicroTran i njegovom grafičkom okruženju Mtdiagram postoji podrška za Hejdlерову funkciju u dve varijante ali su obe nestandardno definisane i zahtevaju preračunavanja parametara. Primer upotrebe Hejdlерove funkcije u programskom paketu Microtran prikazan je na slici 10.



Slika 10 primer primene Hejdlерove funkcije u programskom paketu MicroTran

## 4. Zaključak

U radu je analizirana mogućnost upotrebe Hejdlrove funkcije u programima za elektromagnetne prelazne procese. Izračunati su parametri Hejdlrove funkcije za razne standardne talasne oblike, i urađena provera njihovog oblika pri čemu je za određene talase pokazana veća tačnost nego upotrebom standardom definisanih parametara. Izračunati parametri su predstavljeni tabelom i pokazana je mogućnost korišćenja tabele za procenu parametara u slučaju da željeni talas nije dat u tabeli a istog je odnosa vremena čela i začelja  $T_c/T_z$  kao talas čiji su parametri zadati u tabeli. Date su jednačine za izračunavanje prvog i drugog izvoda Hejdlrove funkcije. Za određene talase grafički su prikazani njihovi oblici predstavljeni Hejdlrovom funkcijama kao i njihovi izvodi. Pokazani su mogući načini primene Hejdlrove funkcije u programima za elektromagnetne prelazne procese.

## Zahvalnica

Rad je nastao u okviru projekta: III 044006 „Razvoj novih informaciono-komunikacionih tehnologija, korišćenjem naprednih matematičkih metoda, sa primenama u medicini, telekomunikacijama, energetici, zaštiti nacionalne baštine i obrazovanju“, koji je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## Literatura

- [1] *Protection against lightning Part 1: General principles, Edition 2.0*, IEC 6235-1:2010.
- [2] *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements Edition 3.0*, IEC 60060-1:2010.
- [3] F. Heidler, J. Cvetic, „A Class of Analytical Functions to Study the Lightning Effects Associated With the Current Front“, *Euro. Trans. Electr. Power*, Vol 12, No 2 March/April 2002, pp. 141-150. doi:10.1002/etep.4450120209
- [4] V. Javor, "New functions for representing IEC 62305 standard lightning currents," *2010 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 2010, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICLP.2010.7845806.
- [5] Karl Lundengård, Milica Rančić, Vesna Javor, Sergei Silvestrov „Novel approach to modelling of lightning current derivative“, *FACTA UNIVERSITATIS Series: Electronics and Energetics* Vol. 30, No 2, June 2017, pp. 245 – 256 doi: 10.2298/FUEE1702245L

- [6] M. S. Savic and A. M. Savic, "Substation Lightning Performance Estimation Due to Strikes Into Connected Overhead Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 4, pp. 1752-1760, Aug. 2015, [doi: 10.1109/TPWRD.2015.2404771](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2404771).

**Abstract:** The paper analyzes the possibility of using the Heidler function in programs for electromagnetic transients. The parameters of the Heidler function are calculated for various standard waveforms, where greater accuracy is shown for certain waves than with the use of parameters defined by the standard. The calculated parameters for the selected waveforms are presented in the table and the possibility of using the table to estimate the certain waveform parameters not given in the table is shown. Possible ways of applying the Heidler function in programs for electromagnetic transients are presented.

**Keywords:** Heidler, lightning simulation, ATP / EMTP, EMTP-RV, PSCAD / EMTDC, MicroTran

## Application of the Heidler Function in Electromagnetic Transients Programs

Jovan Mrvić, Ranko Jasika, Ninoslav Simić

Rad primljen u uredništvo: 01.07.2021. godine.

Rad prihvaćen: 29.09.2021. godine.