

Uporaba Mayrjevega modela pri simulaciji električnega obloka

Mirza Sarajlić, Janez Ribič, Peter Kitak, Jože Pihler

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko računalništvo in informatiko, Smetanova ul. 17, 2000 Maribor, Slovenija
E-pošta: mirza.sarajlic@um.si

Povzetek. Članek opisuje uporabo Mayrjevega modela pri simulaciji električnega obloka. Mayrjev simulacijski model je del programskega orodja Matlab-Simulink, s katerim se izvajajo simulacije odprtega obloka. Eksperimentalni del je bil izveden v visokonapetostnem laboratoriju ICEM na ločilnem stikalu in odklopniku. Izdelana je bila primerjalna analiza simulacijskih izračunov in laboratorijskih meritev.

Ključne besede: električni oblok, Mayrjev model, preskusi in meritve, simulacija

Simulation of an electric arc using the Mayr model

The paper describes application of the Mayr model in simulation of an electric arc. The Mayr simulation model is a part of the Matlab-Simulink, where simulations of an open electric arc were performed. The experimental part was performed in the ICEM high-voltage laboratory at a circuit breaker and switch disconnectors. A comparative analysis was made of simulation calculations and laboratory measurements.

Keywords: electric arc, Mayr model, tests and measurements, simulation

1 UVOD

Električni oblok ima za industrijo pomembno vlogo, še zlasti za nekatere industrijske panoge, kot je železarstvo. Na principu uporabe električnega obloka delujejo elektro-obločne peči, obločno varjenje in obločna razsvetljava. Po drugi strani pa je električni oblok za stikala in druge aparate, za električna postrojenja in daljnovode skrajno nezaželen pojav, ki lahko povzroči resne poškodbe na opremi. Ker ima električni oblok v industriji precej široko in raznovrstno uporabo, se na tem področju opravljajo obsežne teoretične in eksperimentalne raziskave, katerih cilj je ugotavljanje delovanja in posledic delovanja v različnih razmerah in na različnih napravah [1].

Raziskave na električnem obloku so se začele že leta 1802, ko je V. V. Petrov opravil cel niz pomembnih fizikalnih raziskav, ki so bile podlaga za električne vire svetlobe, taljenje rud in drugo. Na področju raziskav električnega obloka sta Engel in Steenbeck leta 1934 objavila članek o električnem obloku, ki gori v plinu in pri katerem je premer obloka odvisen od jakosti toka. Njuna analiza temelji na predpostavki, da je oblok stacionaren (brez časovne spremembe posameznih parametrov), da je skupni tok posledica gibanja elektronov, da njihovo gibanje ni odvisno od jakosti polja in da je temperatura obloka enaka v vseh točkah

njegovega preseka [1]. Bistven prispevek k teoriji električnega obloka sta podala O. Mayr in A. M. Cassie, ki sta razvila model za analitično določanje parametrov električnega obloka. To je dinamična teorija ob upoštevanju naraščanja električne prevodnosti obloka s količino toplotne energije, ki je v njem akumulirana [2].

V članku je prikazana simulacija prekinitve toka z uporabo Mayrjevega simulacijskega modela, ki je sestavni del programskega paketa Matlab-Simulink. Za model električnega obloka je uporabljen model črne škatle (ang. *black-box model*). Modeli black-box [3–6] opisujejo električni oblok kot element tokokroga in glavni cilj modela black-box je opisovanje vzajemnega delovanja električnega obloka in ustreznega tokokroga med prekinitvenim procesom.

Članek je sestavljen iz šestih poglavij. V drugem poglavju je opisan stacionarni električni oblok. V tretjem poglavju je prikazana dinamična teorija električnega obloka. Četrto poglavje prikazuje simulacijski model električnega obloka in primere simulacije električnega obloka z ločilnim stikalom in odklopnikom. V petem poglavju so opisani preskusi in meritve električnega obloka na ločilnem stikalu in odklopniku v visokonapetostnem laboratoriju. V šestem poglavju so podane ugotovitve in sklep.

2 STACIONARNI ELEKTRIČNI OBLOK

Stacionarni električni oblok, napajan z enosmernim tokom, gori stabilno le, če prevaja konstantni tok obloka [1]. Če spreminjamo energijsko bilanco takšnemu električnemu obloku z razpihovanjem obloka z zrakom, s posebnim plinom ali splakovanjem z oljem, bo padala temperatura obloka in s tem njegova prevodnost. Pri idealnem obloku bo naraščal padec napetosti na obloku in bo električni oblok jemal več moči, da bo nadomestil izgubo toplote in padec temperature. V realnosti namreč velja, da se z naraščanjem temperature električnega

obloka in s tem njegove prevodnosti padec napetosti električnega obloka temu primerno zniža. Pri konstantnem toku bi se zmanjšala moč električnega obloka, temperatura bi ponovno dosegla svojo prejšnjo vrednost.

Električni oblok, na katerega je priključena konstantna napetost, ima stalen dotok energije in presega odvajanje toplote. Ta oblok ne ugasne in je zaradi tega nestabilen [1]. Potem velja naslednja enačba (1):

$$u_{ob} \cdot i = \text{konst.} \quad (1)$$

3 DINAMIČNA TEORIJA ELEKTRIČNEGA OBLOKA

Termodinamične in električne veličine obloka [2] povezuje naslednja enačba:

$$\frac{dQ}{dt} = |\vec{E}| \cdot I - N_0. \quad (2)$$

Iz enačbe (2) vidimo, da je diferencialna sprememba toplote dQ/dt enaka razliki dovedene električne energije $|\vec{E}| \cdot I$ in odvedene toplote iz stene obloka N_0 .

Električna poljska jakost $|\vec{E}|$ je v relaciji z električno napetostjo med kontaktoma. Pri statičnem obloku velja, da je $Q = \text{konst.}$, torej je $dQ/dt = 0$. Iz enačbe (2) tedaj sledi, da je $|\vec{E}| \cdot I = N_0$, kar pomeni, da je $|\vec{E}| = N_0 \cdot \frac{1}{I}$.

Za uporabo diferencialne enačbe (2) za dinamičen oblok v ločni obliki je potrebna še ena povezava med U in I , pri čemer je $U = |\vec{E}| \cdot d$ [V/mm], kjer je d razdalja med kontaktoma.

Uporabimo tudi enačbo za električno upornost:

$$R = \frac{|\vec{E}|}{I} \quad [\Omega \text{mm}^{-1}], \quad (3)$$

ki je odvisna od shranjene toplote Q .

Diferencialna enačba, ki povezuje toplotne veličine obloka in lastnosti električnega kroga [2], v katerem je ta oblok, je podana z (4):

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{Q_0}{R} \cdot \frac{dR}{dt}, \quad (4)$$

kjer je R električna upornost obloka odvisna od toplote Q , Q_0 pa pomeni količino toplotne energije, potrebne za povečanje prevodnosti obloka.

Če upoštevamo enačbi (2) in (4), dobimo nelinearno enačbo (5), ki vsebuje lastnosti obloka in električnega tokokroga v katerem oblok gori:

$$-\frac{Q_0}{R} \cdot \frac{dR}{dt} = |\vec{E}| \cdot I - N_0. \quad (5)$$

Če enačbe (5) v splošni obliki ne moremo rešiti, upoštevamo RLC karakteristike ostalega tokokroga. To je uporabno za mala nihanja frekvence in ne zajemamo celotnega procesa obloka. Določimo pogoje, pri katerih je oblok nestabilen, ko je prekinitev obloka mogoča [2].

Za $I = f(t)$ in $|\vec{E}| = R \cdot f(t)$ lahko enačbo (2) zapišemo drugače:

$$-\frac{1}{R^2} \cdot \frac{dR}{dt} = \frac{f^2(t)}{Q_0} - \frac{1}{R} \cdot \frac{N_0}{Q_0}. \quad (6)$$

Razčlenimo desno stran enačbe (6):

$$\left(\frac{1}{R}\right)' = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{R}\right) = \frac{1' \cdot R - 1 \cdot R'}{R^2} = \frac{0 \cdot R - 1 \cdot R'}{R^2} = -\frac{1}{R^2} \cdot \frac{dR}{dt}. \quad (7)$$

Upoštevamo časovno toplotno konstanto τ :

$$\tau = \frac{Q_0}{N_0} \quad [\text{s}], \quad (8)$$

in dobimo diferencialno enačbo (9):

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{R}\right) + \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{\tau} = \frac{1}{Q_0} \cdot f^2(t). \quad (9)$$

Zdaj lahko izpeljemo Mayrjev model električnega obloka. Predpostavimo, da imamo integralne veličine P_0 [W] in Q_n [J] in prevodnost g [S]:

$$g = \frac{1}{R}. \quad (10)$$

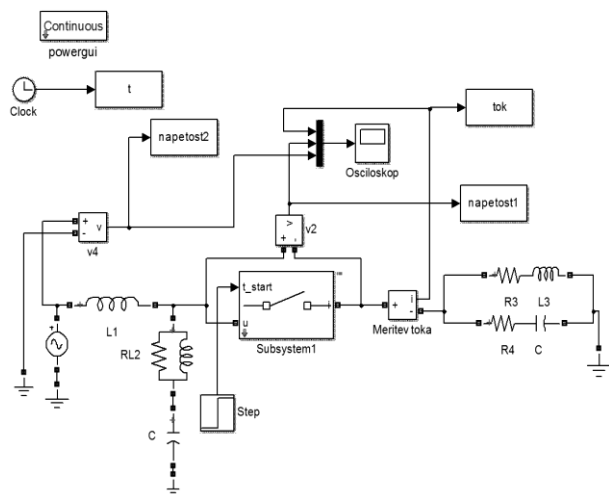
Po izpeljavi, opisani v [2], dobimo klasično diferencialno enačbo po Mayrju:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{d(g)}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot \left(\frac{u \cdot i}{R_0} - 1\right). \quad (11)$$

4 PREDSTAVITEV SIMULACIJSKEGA MODELA

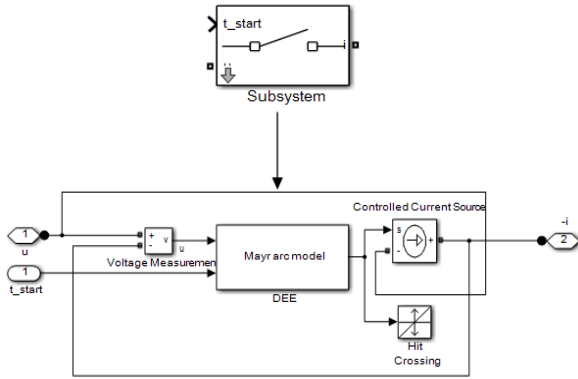
Mayrjev simulacijski model električnega obloka so razvili v laboratoriju Delftske Univerze tehnologij na Nizozemskem [7]. Narejen je za boljše razumevanje dogajanja ob prekinjanju električnega toka.

Slika 1 prikazuje tokokrog, v katerega je vključen Mayrjev matematični model. Leva stran vezja je napajalni del, desna stran pa kratek prenosni vod, ki je v kratkem stiku. Na vezju izvajamo meritev toka in napetosti. Napetost merimo na kontaktih odklopnika.



Slika 1: Mayrjev simulacijski model v programskem orodju Matlab

Mayrjev model je prikazan kot matematični zapis električnih lastnosti obloka. Zapisan je v obliki diferencialne enačbe (12). Diferencialna enačba opisuje nelinearno upornost električnega obloka. Izmerjena napetost in tok se uporabljata za pridobivanje parametrov diferencialne enačbe. Model je izveden kot napetostno voden tokovni vir, kot je prikazano na sliki 2.



Slika 2: Izvedba Mayrjevega modela

Diferencialna enačba Mayrjevega modela:

$$\frac{dx(1)}{dt} = \frac{u(2)}{\tau} \cdot \left(\frac{e^{x(1)} \cdot u(1)^2}{P} - 1 \right), \quad (12)$$

$$y = e^{x(1)} \cdot u(1). \quad (13)$$

Če v enačbi (12) upoštevamo $\tau = \nu_M$, $x(1) = \ln(g)$ in $u(1) = u$, dobimo:

$$\frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{u(2)}{\nu_M} \cdot \left(\frac{e^{\ln(g)} \cdot u^2}{P} - 1 \right). \quad (14)$$

Pomen posameznih elementov diferencialne enačbe [7]:

$x(1)$ stanje spremenljivke diferencialne enačbe, ki pomeni naravni logaritem prevodnosti električnega obloka: $\ln(g)$;

$x(0)$ začetna vrednost prevodnosti električnega obloka: $g(0)$;
 $u(1)$ napetost električnega obloka u ;
 $u(2)$ kontakti odklopnika: če je $u(2) = 0$, so kontakti zaprti, če je $u(2) = 1$ so kontakti odprti;
 y električni tok obloka i ;
 τ časovna konstanta modela ($\tau = \nu_M$);
 P moč hlajenja električnega obloka.

$\tau, P, g(0)$ in čas začetka ločevanja kontaktov so prosti parametri Mayrjevega modela, ki jih lahko uporabnik spreminja, kot je prikazano na slikah 3a in 3b.

Če enačbo (14) primerjamo z enačbo (11), vidimo, da je v Mayrjev simulacijski model vstavljena Mayrjeva diferencialna enačba, ki je podana v tretjem poglavju.

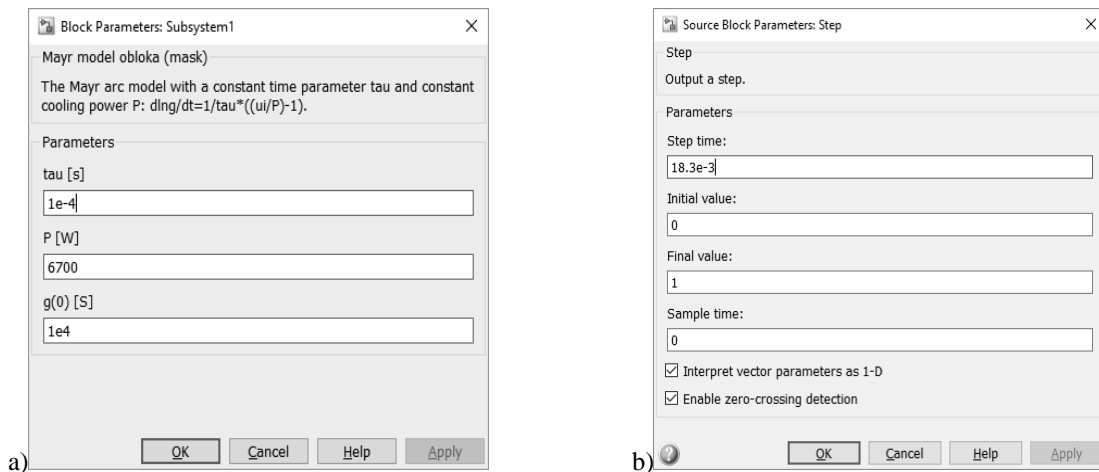
4.1 Simulacija električnega obloka z ločilnim stikalom

Tukaj bomo predstavili rezultate simulacije meritve električnega obloka z ločilnim stikalom. Začetni parametri simulacije so predstavljeni v tabeli 1.

Tabela 1: Začetni parametri simulacije električnega obloka z ločilnim stikalom

f [Hz]	50	R_3 [Ω]	0,2
U [V]	$400 \cdot \sqrt{2}$	L_3 [H]	$3,473 \cdot 10^{-4}$
Faza [$^\circ$]	0	R_4 [Ω]	100
L_1 [H]	$3,52 \cdot 10^{-3}$	C [F]	$1,93 \cdot 10^{-9}$
R_2 [Ω]	0,2	τ [s]	$0,2995 \cdot 10^{-3}$
L_2 [H]	$3,473 \cdot 10^{-4}$	P [W]	12000
Step time [s]	$16 \cdot 10^{-3}$	$g(0)$ [S]	10^5
$\cos \varphi$	0,4	I [A]	186

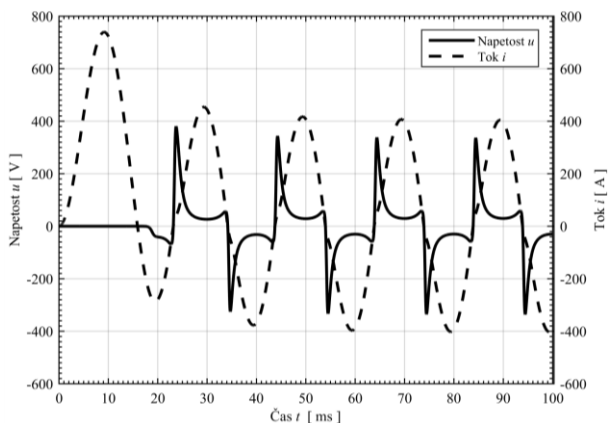
Slika 4 prikazuje simulacijo električnega obloka z ločilnim stikalom s podatki iz tabele 1. Pri 16 ms se



Slika 3: Nastavitve: a) prostih parametrov Mayrjevega modela in b) časa začetka ločevanja kontaktov

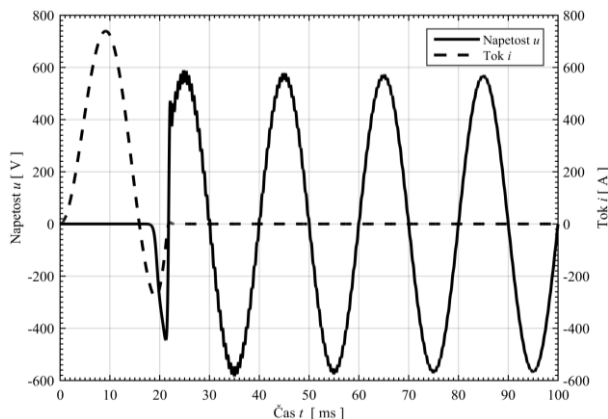
pojavi padec napetosti s koničasto obliko. Tok se nekoliko zmanjša, vendar teče nemoteno naprej prek vzpostavljenega električnega obloka. Padec napetosti na električnem obloku se zmanjša in obdrži konstantno vrednost. Električni tok ima karakteristično obliko, še posebej pri prehodu toka skozi nič. Kot vidimo, ni prišlo do prekinitve električnega toka in s tem pogasitve električnega obloka.

V tej sliki in na naslednjih slikah je napetost označena s polno črto, tok pa s črtkano.

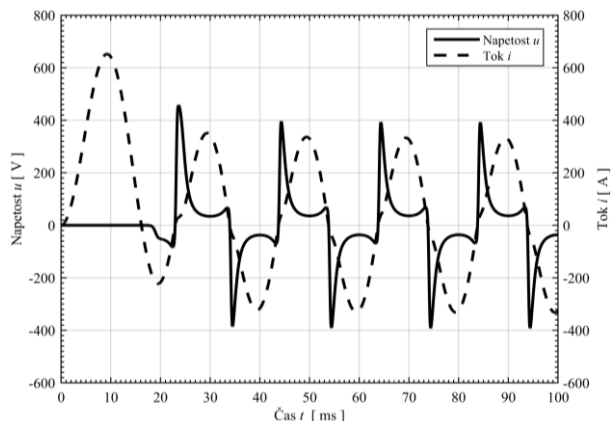


Slika 4: Simulacija električnega obloka z ločilnim stikalom

Spremenili smo moč ohlajanja P ($P = 100000$ W), preostali podatki so isti kot v tabeli 1. Sprememba moči ohlajanja obloka P fizikalno pomeni odvajanje toplote iz obloka. V tem primeru je vrednost P večja kot v prvi simulaciji, posledica tega pa je, da se tok prekine po prvem prehodu skozi naravno ničlo. Na sliki 5 vidimo, da pri 17 ms nastane prehodni pojav, kar pomeni, da se je proces prekinjanja električnega toka začel. Pojavi se padec napetosti na električnem obloku. Pri prvem prehodu toka skozi nič se le-ta prekine in oblok ugasne. Padec napetosti na električnem obloku se v tem trenutku vniha v fazno napetost.



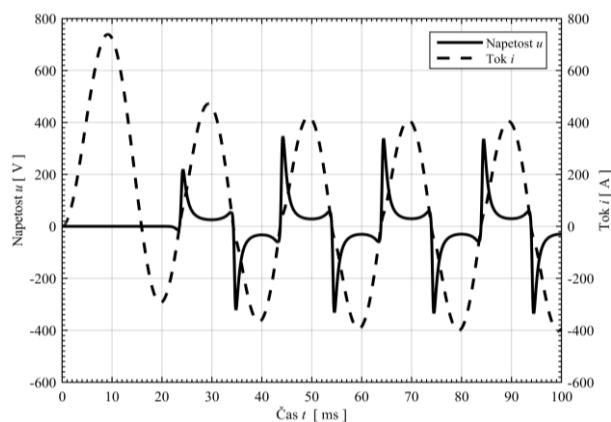
Slika 5: Simulacija električnega obloka z ločilnim stikalom pri spremenjeni vrednosti P



Slika 6: Simulacija električnega obloka z ločilnim stikalom pri spremenjeni vrednosti L

Spremenili smo L_3 ($L_3 = 1 \cdot 10^{-3}$ H), preostali podatki so isti kot v tabeli 1. Sprememba induktivnosti fizikalno pomeni zaostajanje toka za napetostjo. V tem primeru je induktivnost večja kot v prvi simulaciji. Iz slike 6 se vidi, da ima tok obliko popačenega sinusa, še zlasti pri prehodu toka skozi nič. Ni prišlo do prekinitve električnega toka in s tem pogasitve električnega obloka. V primerjavi s simulacijo prvega primera (slika 4) je sprememba pri padcu napetosti na obloku, in sicer ima višjo vrednost. Oblika se ni spremenila.

Slika 7 prikazuje odziv pri spremenjenem času začetka ločevanja kontaktov (Step time = $20 \cdot 10^{-3}$ s). Spreminjanje začetka ločevanja kontaktov fizikalno pomeni, kdaj bo prišlo do padca napetosti na obloku. V tem primeru je čas začetka ločevanja kontaktov daljši, proces ločevanja kontaktov se je začel pozneje in ni prišlo do prekinitve toka. Iz slike 7 se vidi, da se je vrednost padca napetosti na kontaktu spremenila (je manjši). Pri 25 ms se je začel proces prekinjanja toka. Do prekinitve toka ni prišlo. Padec napetosti na obloku ima značilno koničasto obliko.



Slika 7: Simulacija električnega obloka z ločilnim stikalom pri spremenjenem času začetka ločevanja kontaktov

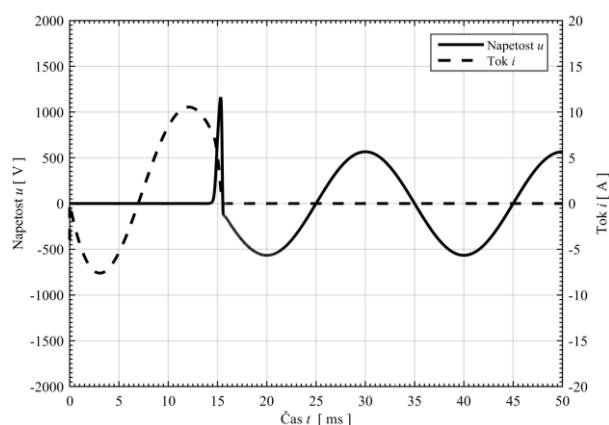
4.2 Simulacija električnega obloka z odklopnikom pri malih tokih

Tukaj bomo predstavili rezultate simulacije električnega obloka z odklopnikom pri malih tokih. Začetni parametri simulacije so predstavljeni v tabeli 2.

Slika 8 prikazuje simulacijo električnega obloka z odklopnikom pri malih tokih s podatki iz tabele 2. Padec napetosti se pojavi po 13 ms in ima koničasto obliko z veliko vrednostjo, ki preide v sinusno obliko in obdrži konstantno vrednost. Tok se prekine po prvem prehodu skozi nič.

Tabela 2: Začetni parametri simulacije električnega obloka z odklopnikom pri malih tokih

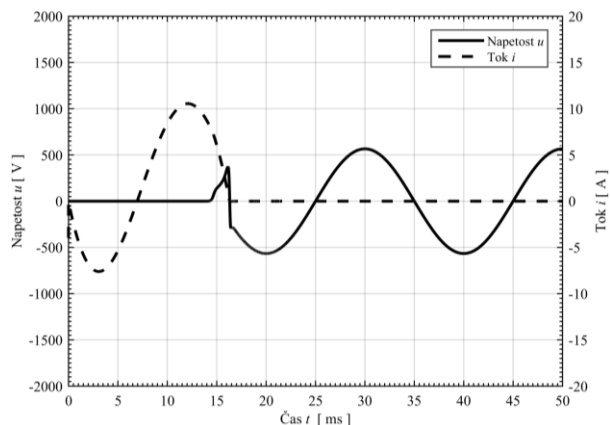
f [Hz]	50	R_3 [Ω]	42,576
U [V]	$400 \cdot \sqrt{2}$	L_3 [H]	0,102
Faza [$^\circ$]	-90	R_4 [Ω]	100
L_1 [H]	$3,52 \cdot 10^{-3}$	C [F]	$1,93 \cdot 10^{-9}$
R_2 [Ω]	42,576	τ [s]	$1 \cdot 10^{-4}$
L_2 [H]	0,102	P [W]	6700
Step time [s]	$13 \cdot 10^{-3}$	$g(0)$ [S]	10^6
$\cos\varphi$	0,8	I [A]	11,18



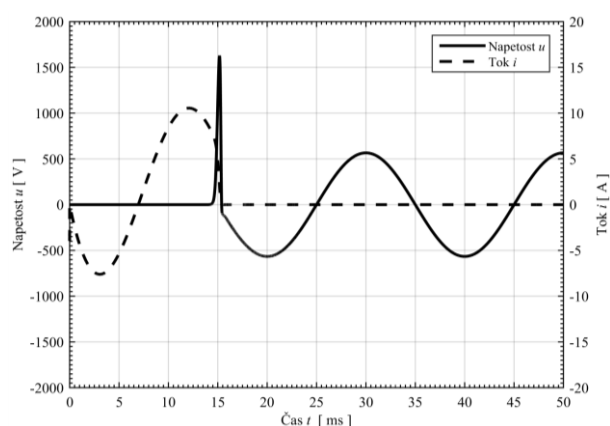
Slika 8: Simulacija električnega obloka z odklopnikom

Slika 9 prikazuje odziv pri spremenjeni moči ohlajevanja obloka P ($P = 1000$ W), drugi podatki so kot v tabeli 2. Sprememba moči ohlajanja obloka P fizikalno pomeni odvajanje toplote iz obloka. V tem primeru je vrednost napetosti manjša kot v prvi simulaciji (slika 8), za prekinitev toka je bil potreben daljši čas. Prisoten je manjši prehodni pojav pri padcu napetosti, kot je pri $P = 6700$ W. Po prehodnem pojavu ima napetost sinusno obliko.

Slika 10 prikazuje odziv pri spremenjeni moči ohlajanja obloka P ($P = 15000$ W), preostali podatki so enaki kot v tabeli 2. V tem primeru je vrednost padca napetosti večja kot v prvi simulaciji (slika 8), do prekinitve toka je prišlo v krajšem času. Tok se prekine po prvem prehodu skozi nič. Napetost ima na začetku izraženo koničasto obliko z veliko vrednostjo, ki preide



Slika 9: Simulacija električnega obloka z odklopnikom pri spremenjeni vrednosti P



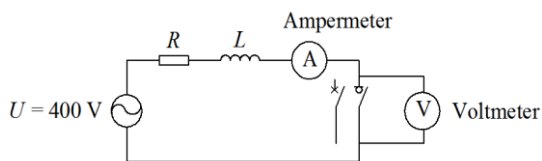
Slika 10: Simulacija električnega obloka z odklopnikom pri spremenjeni vrednosti P

v sinusno obliko in se ji vrednost zmanjša ter ostane konstantna. To se zgodi zaradi velike vrednosti moči ohlajanja obloka.

5 PRESKUŠANJE IN MERITVE OBLOKA

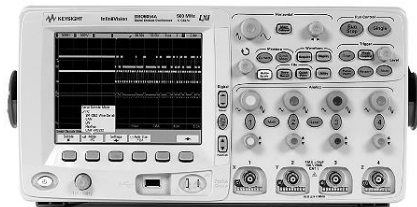
Za oceno simulacijskih rezultatov so narejene meritve električnega obloka na realnem modelu ločilnega stikala in odklopnika. Meritev električnega obloka smo izvajali v elektroenergetskem laboratoriju ICEM-TC [8]. Lokacija laboratorija je električno idealna, saj je v neposredni bližini hidroelektrarne Mariborski otok in le nekaj sto metrov oddaljena od razdelilne transformatorske postaje Pekre, z izjemno veliko kratkostično močjo. Le-ta je pogoj za preskuse, ki se opravljajo v močnostnem delu laboratorija.

Meritve so potekale tako, da smo sestavili tokokrog iz ohmskega in induktivnega bremena. Merilna shema (slika 11) je sestavljena iz napajanja, merjenca (ločilno stikalo in odklopnik, sliki 13 in 14) in bremena (ohmsko in induktivno).



Slika 11: Merilna shema

S kombinacijo bremen sta se nastavljal faktor delavnosti $\cos\varphi$ in velikost električnega toka. Potekala je meritev pritisknjene napetosti, meritev padca napetosti na obloku in toka, ki ga je aparat prekinjal. Napetost je merjena prek diferenčnih sond, tok pa prek soupora. Celoten sistem meritev je standardni sistem, ki je vključen v merilno progo MP3. Rezultati meritev so bili vizualno prikazani na digitalnem osciloskopu Agilent Technologies DSO6054A (slika 12) ter v podatkovni datoteki. Podatki so pozneje urejani v programskem orodju Matlab. V tabeli 3 so podatki uporabljenih merjencev.



Slika 12: Digitalni osciloskop Agilent Technologies DSO6054A [9]

Ločilno stikalo deluje po principu gašenja električnega obloka z generiranjem plina v komori. Najbolj uporabni izvedbi sta s komoro v obliki cevi in izvedba s ploščato komoro. [2]. Pri meritvah smo uporabili verzijo, prikazano na sliki 13. Pri odpiranju aparata se pomični glavni kontakti ločijo, tok pa teče prek obločnih kontaktov. Pomični obločni kontakt se z veliko hitrostjo loči od fiksnega. V komori nastane električni oblok, ki se razvleče pod vplivom elektromagnetnega polja. Električni tok teče prek obloka. Zaradi učinka hlajenja in aktivne deionizacije prostora v komori oblok hitro ugasne. Glavni pomični kontakt se pri zapiranju sklene pred obločnim kontaktom, kar omogoča kratkostično vklopno zmogljivost [1].

Odklopnik je mehanski stikalni aparat, ki vklaplja, prevaja in izklaplja tok v normalnih obratovalnih razmerah ter vklaplja, prevaja v določenem času in izklaplja tok v nenormalnih razmerah, kot je kratki stik [1]. Odklopnik, ki je uporabljen pri preskusu, je prikazan na sliki 14. Uporabljeni odklopnik je nizkonapetostni odklopnik, ki ima gasilne komore za hitro gašenje električnega obloka (zaprti sistem gašenja električnega obloka).

5.1 Preskus električnega obloka na ločilnem stikalu pri izrazitem induktivnem bremenu

Slika 15 prikazuje meritev električnega obloka na ločilnem stikalu pri izraziti induktivnosti in majhnem $\cos\varphi = 0,4$.

Tabela 3: Podatki ločilnega stikala in odklopnika

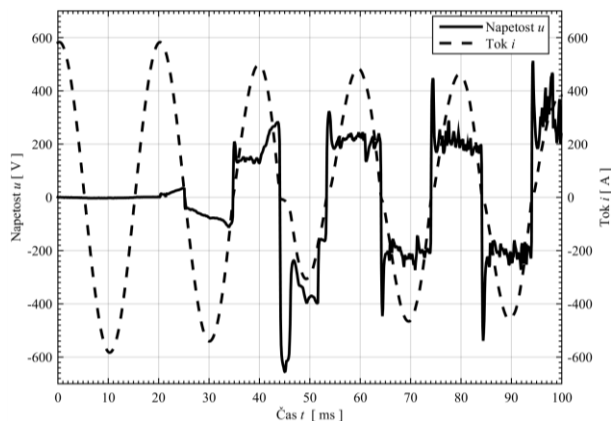
Ločilno stikalo	
Tip	OL 04/403
U_n	660 V
I_n	400 A
I_{th} (1 s)	30 kA
I_{dyn}	70 kA
f	50 Hz
Serijska številka	18631/08-96
Izdelovalec	TSN, Maribor
Odklopnik	
Tip	SACE E3H 25
U_e	690 V
I_u	2500 A
I_{cw}	75 kA \times 1 s
f	50 Hz
I_{cu}	85 kA
I_{cs}	85 kA
Izdelovalec	ABB



Slika 13: Ločilno stikalo



Slika 14: Odklopnik

Slika 15: Električni oblok na ločilnem stikalu in $\cos\varphi = 0,4$

Na sliki 15 vidimo, da se pri 20 ms pojavi padec napetosti, kar pomeni, da se je proces prekinjanja električnega toka začel (kontakta sta se začela oddaljevati). Tok se je nekoliko zmanjšal, vendar teče nemoteno naprej prek vzpostavljenega električnega obloka.

Padec napetosti na električnem obloku se povečuje in ima značilno koničasto obliko. Tudi električni tok ima značilno obliko, še zlasti pri prehodu toka skozi nič. Kot je razvidno iz slike 15, ni prišlo do prekinitve električnega toka in s tem pogasitve električnega obloka. Tokokrog je bil prekinjen s sinhronskim odklopnikom merilne proge laboratorija. Razlog za te razmere je visoka napetost, ki je na meji zmogljivosti aparata in močno induktivno breme v tokokrogu.

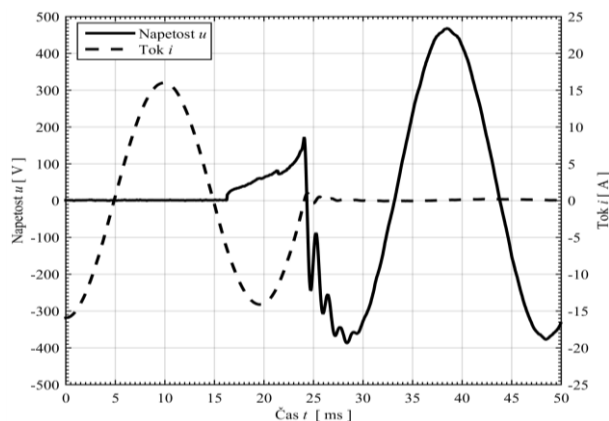
5.2 Preskus električnega obloka v odklopniku pri majhnem toku

Slika 16 prikazuje meritev električnega obloka v odklopniku pri majhnem toku 11,18 A in $\cos\varphi = 0,8$. Tudi pri prekinjanju majhnega toka v odklopniku so izraziti prehodni pojavi tako na toku kot na padcu napetosti na obloku. Do prekinitve toka je prišlo pri prvem naravnem prehodu toka skozi nič.

6 SKLEP

V članku je bila izvedena simulacija prekinitve električnega toka z uporabo Mayrjevega simulacijskega modela električnega obloka, ki je del programskega orodja Matlab-Simulink. V laboratoriju ICEM smo opravili preskuse in meritve prekinitve električnega toka oziroma gorenja električnega obloka na ločilnem stikalu in odklopniku. Nato smo izvedli primerjalno analizo med odzivi simulacij in poskusov.

Odzivi simulacij so v zadovoljivih odstotkih podobni rezultatom poskusov in meritev v laboratoriju. Ker v laboratoriju v realnosti nismo mogli spreminjati parametrov električnega obloka smo le-te spreminjali pri simulacijskih izračunih na modelu električnega

Slika 16: Električni oblok v odklopniku pri majhnem toku in $\cos\varphi = 0,8$

obloka. Spreminjali smo moč električnega obloka, kar pomeni intenzivnost ohlajanja. Pri povečani moči smo ugotovili, da hitreje pride do prekinitve električnega toka in pogasitve električnega obloka, kar je skladno s teoretičnimi zaključki. Pri povečani induktivnosti v tokokrogu sta opazna zmanjšanje toka in večja popačitev toka pri prehodu toka skozi naravno ničlo. Pri povečanju časa začetka ločevanja kontaktov ni prišlo do prekinitve električnega toka.

Iz spremembe parametrov pri manjših tokih v tokokrogu je razvidno, da je pri zmanjšani moči ohlajanja obloka manjša vrednost padca napetosti. Pri povečani moči ohlajanja obloka je vrednost padca napetosti večja.

Glavna značilnost uporabljenega modela električnega obloka je v tem, da ne zajema vseh fizikalnih dogajanj procesa prekinjanja električnega toka. Zato je povsem razumljivo, da popolnega ujemanja z merjenimi vrednostmi ni. Če bi hoteli upoštevati fizikalne lastnosti električnega obloka, bi bilo treba model nadgraditi. Trenutno že obstajajo kombinirani modeli, in sicer model Cassie-Mayr ter dopolnjeni Cassiejev in dopolnjeni Mayrjev model.

Uporabljeni model vsebuje RLC vezje, s pomočjo katerega smo se čim bolj približali rešitvi diferencialne enačbe obloka, po drugi strani pa vemo, da je omenjena kombinacija elementov teže obvladljiva, še posebno pri simulacijskih izračunih.

Ne glede na zgoraj omenjene pomanjkljivosti modela je ta model zelo uporaben za obravnavo osnovnih značilnosti prekinitve električnega toka. Zato priporočam uporabo tega modela, še zlasti če ni možnosti za preskušanje v laboratoriju na realnih napravah. Ugodnost je tudi ta, da se pri simulacijskih izračunih ne obrabljajo električni kontakti pri še tolikokrat izvedeni simulaciji.

LITERATURA

- [1] J. Pihler: Stikalne naprave elektroenergetskega sistema, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, 2003.
- [2] J. Ribič: Razvoj in analiza modela plinskega odvodnika, doktorska disertacija, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, 2011.
- [3] A. Ahmethodzic, M. Kapetanovic, K. Sokolija, R. P. P. Smeets, and V. Kertesz, "Linking a physical arc model with a black box arc model and verification," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, no. 4, pp. 1029–1037, Aug. 2011.
- [4] W. Xi-xiu, L. Zhen-Biao, T. Yun, M. Wenjun, and X. Xun, "Investigate on the simulation of black-box arc model," in *2011 1st International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology*, 2011, pp. 629–636.
- [5] M. Walter and C. Franck, "Improved Method for Direct Black-Box Arc Parameter Determination and Model Validation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 2, pp. 580–588, Apr. 2014.
- [6] S.-W. Lim, U. A. Khan, J.-G. Lee, B.-W. Lee, K.-S. Kim, and C.-W. Gu, "Simulation analysis of DC arc in circuit breaker applying with conventional black box arc model," in *Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), 2015 3rd International Conference on*, 2015, pp. 332–336.
- [7] P. H. Schavemaker, L. van der Sluis: The arc model blockset, Proceedings of the Second IASTED International Conference POWER AND ENERGY SYSTEMS (EuroPES), June 25–28, 2002, Crete, Greece.
- [8] Laboratorij ICEM-TC, dostopno na: <http://www.icem-tc.si/index.php/sl/predstavitev>.
- [9] Digitalni osciloskop Agilent Technologies DSO6054A, dostopno na: <http://www.keysight.com/en/pdx-x202247-pn-DSO6054A/oscilloscope-500-mhz-4-analog-channels?nid=-32537.1150412&cc=SI&lc=eng&pm=ov>.

Mirza Sarajlić je diplomiral leta 2013, magistriral leta 2015 in je trenutno v drugem letniku doktorskega študija na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru, kjer je zaposlen je kot mladi raziskovalec. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo stikalne naprave, optimizacijske metode in visokonapetostno tehniko. Je član IEEE in CIGRE.

Janez Ribič je diplomiral leta 2002, magistriral leta 2007 in doktoriral leta 2011 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru, kjer je trenutno zaposlen. Deluje na področju raziskav prenapetostne zaščite. Je član IEEE.

Peter Kitak je diplomiral leta 1999 in doktoriral leta 2006 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru, kjer je trenutno zaposlen. Njegovo raziskovalno področje obsega modeliranje elementov stikalnih naprav, numerične izračune elektromagnetnih in toplotnih polj ter uporabo modificiranih optimizacijskih metod na širšem področju elektrotehnike. Je član IEEE.

Jože Pihler je diplomiral leta 1978, magistriral leta 1991 in doktoriral leta 1995 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru, kjer je zaposlen kot redni profesor. Njegovo raziskovalno področje obsega električne naprave, proizvodnjo električne energije in visokonapetostno tehniko. Je član IEEE, CIGRE in EZ, aktivno deluje v mednarodni standardizaciji IEC in nacionalni standardizaciji SIST.