

## Modelowanie łuku elektrycznego w analizach przepięć łączeniowych podczas przerywania prądu przy użyciu niskonapięciowych styczników elektromechanicznych

**Streszczenie.** W niniejszym artykule zaprezentowano sposób modelowania łuku elektrycznego za pomocą specjalistycznego programu przeznaczonego do przeprowadzania analiz stanów przejściowych w systemach elektroenergetycznych (program EMTP-ATP). Celem przedstawianych symulacji jest określenie wartości przepięć oraz czasu łukowego w trakcie trwania operacji łączeniowych wykonywanych przy użyciu rozpowszechnionych styczników elektromechanicznych. Zaprezentowano porównanie przebiegów symulacyjnych oraz pomiarowych napięcia powrotnego zmierzonego pomiędzy stykami stycznika, oraz przebiegi przerywanego prądu. Wykazano, że symulacje są efektywnym i praktycznym narzędziem w analizie łączeniowych stanów przejściowych.

**Abstract.** This paper presents the electric arc modelling and its implementation in specialized simulation software for transient analyses during switching conditions in LV circuits (EMTP-ATP software). Simulations can be very useful to estimate overvoltages and arcing times during switching operations performed by means of electromechanical relays, which are commonly used in automation. Comparison of measured and calculated Transient Recovery Voltage (TRV) and current waveforms is shown in this article. It is clearly indicated that severe overvoltages may arise upon electromechanical relays operation, and that the simulation is an efficient tool when analyzing such phenomena.  
(Modeling of electric arc in analysis of switching overvoltages during current interruption with LV electromechanical relays).

**Słowa kluczowe:** model Mayra, łuk elektryczny, stycznik, przepięcia  
**Keywords:** Mayr model, electric arc, relay, overvoltages

### Wstęp

Analizy przepięć generowanych w trakcie trwania operacji łączeniowych wykonywane są powszechnie dla układów średnich (SN) oraz wysokich napięć (WN) [1-9]. Należy jednak przy tym zwrócić uwagę na fakt, iż także w systemach niskonapięciowych (nn) ze względu na mnogość występowania elektromechanicznych urządzeń łączeniowych (takich jak: styczniki, kontaktory, rozłączniki, etc.), przepięcia oraz inne niekorzystne zjawiska związane z procesami łączeniowymi mogą stanowić istotne zagrożenie dla układów elektroizolacyjnych urządzeń zainstalowanych w sieci. Ponadto, istnieje możliwość wystąpienia awarii urządzeń łączeniowych spowodowanych np. zespawaniem się styków, lub też występującymi ponownymi zapłonami łuku [10, 11]. Alternatywą dla łączeniowych elementów elektromechanicznych są elementy półprzewodnikowe (takie jak np.: tyrystory naturalnej komutacji, tyrystory GTO, lub tranzystory), mogące znaleźć zastosowanie w budowie półprzewodnikowych styczników Solid-State Relays (SSR) [12]. Rozwiązania tego typu umożliwiają dobór precyzyjnej chwili łączenia obwodu, pozbawione są także problemu związanego z występowaniem erozji łukowej aparatu zestykowego, dzięki czemu łączniki tego typu są w stanie wykonywać zwielokrotnioną liczbę operacji łączeniowych w porównaniu do styczników elektromechanicznych. Ponadto, łączniki oparte na elementach półprzewodnikowych umożliwiają bezłukowe przerwanie prądu, co jest szczególnie istotne w zastosowaniach specjalnych (np. w miejscach zagrożonych wybuchem). Wśród wad tego typu konstrukcji można natomiast wymienić m.in. ograniczoną zdolność łączeniową (ze względu na maksymalny prąd płynący przez urządzenie), brak separacji galwanicznej w rozłączanym obwodzie, wysokie straty (występujące nawet w przypadku nieprzewodzącego łącznika półprzewodnikowego) oraz wrażliwość na przeciążenia obwodu (spowodowane także przepływem prądu zwarcowego). Rozwiązaniem, które łączy w sobie zalety wyżej opisanych konstrukcji są łączniki hybrydowe [13]. W tego typu konstrukcjach, prąd płynący podczas operacji łączeniowych komutuje do gałęzi zawierających elementy

półprzewodnikowe, natomiast elektromechaniczny aparat zestykowy przewodzi prąd jedynie w stanie ustalonym, służąc jako bocznik eliminujący straty przewodzenia. W niniejszym artykule przeanalizowano stany łączeniowe wykonywane przy pomocy szeroko rozpowszechnionych styczników elektromechanicznych, w celu przedstawienia matematycznej reprezentacji zachowania łuku palącego się pomiędzy otwierającymi się stykami łącznika elektromechanicznego.

Spośród istniejących modeli matematycznych łuku elektrycznego, wyróżnić można szczególnie trzy grupy przydatne z punktu widzenia analiz elektrycznych oraz fizycznych. Podejście typu „black box” jest grupą modeli, w której zachowanie łuku palącego się w rozpatrywanym obwodzie jest odzwierciedlane przy użyciu jego elektrycznych parametrów, takich jak napięcie lub konduktancja łuku. Drugą wyróżniającą się grupą modeli jest podejście oparte na modelowaniu fizycznym łuku, uwzględniające parametry kolumny łukowej, takie jak jej geometria, rozkład pola elektromagnetycznego, czy też rozkład pola temperaturowego. Ostatnią grupą są modele reprezentujące zachowanie łuku w formie funkcji utworzonej w oparciu o pomiary napięcia łukowego i przerywanego prądu [14]. W niniejszym artykule poddano analizie model łuku elektrycznego typu „black box”, którego opis przedstawiono w dalszej części niniejszego opracowania.

Głównym celem niniejszego artykułu jest analiza operacji przerywania prądu przy wykorzystaniu łącznika elektromechanicznego, z uwzględnieniem zachowania łuku elektrycznego w rozpatrywanym obwodzie elektrycznym. Wynikiem przedstawionych badań jest uwypuklenie znaczenia estymacji przepięć oraz czasu łukowego w systemach niskonapięciowych zawierających styczniki elektromechaniczne. Dodatkowo, w niniejszej pracy przedstawiono także wpływ zastosowanego do obliczeń modelu łącznika na jakość wyników symulacji.

### Model idealnego łącznika

Najprostszym sposobem modelowania łączeniowych stanów przejściowych w systemach elektroenergetycznych jest zastosowanie modelu tzw. idealnego łącznika. Jest to bardzo uproszczone podejście, które może odwzorowywać

rozpatrywany łącznik jedynie w dwóch stanach: otwartym (z nieskończoną wielką rezystancją przejścia) oraz w stanie zamkniętym (z pomijalnie małą rezystancją przejścia) [1]. Model ten zatem nie jest w stanie precyzyjnie odwzorować rezystancji łuku.

Przejście pomiędzy oboma stanami określane jest przy pomocy dwóch parametrów: chwili rozejścia (lub zejścia) się styków oraz tzw. prądu ucięcia. Określenie właściwej wartości prądu ucięcia dla rozpatrywanego łącznika jest skomplikowanym zagadnieniem i zależy od wielu czynników, takich jak: kształt i wielkość styków łącznika, rodzaj napędu łącznika, stopień zużycia powierzchni stykowych, etc. Do rozważań praktycznych, wartość prądu ucięcia może być oszacowana dla konkretnego łącznika na podstawie wzoru [14]:

$$(1) \quad i_{ch} = k \cdot \sqrt{N \cdot C}$$

gdzie:  $k$  – stała charakterystyczna dla rozpatrywanego łącznika [ $A \cdot F^{-0.5}$ ],  $N$  – liczba komór gaszeniowych [-],  $C$  – całkowita pojemność widziana od strony zacisków łącznika [F].

Patrząc z praktycznego punktu widzenia, w analizach łączeniowych stanów przejściowych, moment rozejścia styków modelu idealnego łącznika nie wpływa na wyniki symulacji. Dzieje się tak z uwagi na fakt, iż do obwodu nie jest dodawana rezystancja łuku w chwili pomiędzy rozejściem się styków, a przerwaniem prądu (prąd przestaje płynąć zgodnie ze zdefiniowaną w modelu wartością prądu ucięcia). Jednakże, dla analiz dotyczących załączania obwodów elektroenergetycznych czas zejścia się styków ma kluczowe znaczenie, albowiem od tej chwili uzależniony jest charakter rozpatrywanego stanu nieustalonego.

### Modele łuku elektrycznego typu „black box”

Modele matematyczne łuku elektrycznego typu „black box” odzwierciedlają zachowanie łuku na podstawie jego statycznych parametrów, wyznaczając konduktancję łuku w funkcji czasu na podstawie zaimplementowanych do modelu równań. Otrzymana konduktancja łuku może być reprezentowana jako szeregowo dołączona do obwodu dynamiczna rezystancja. Parametry łuku elektrycznego wprowadzone do modelu zależą od konstrukcji analizowanego łącznika (m. in. od szybkości działania napędu, kształtu i wielkości powierzchni stykowych, rodzaju zastosowanego materiału stykowego, zastosowanego medium gaszeniowego, kształtu i rodzaju komory gaszeniowej, etc.). Z tego względu, wyznaczenie parametrów łuku elektrycznego niezbędnych do analizowania nieustalonych stanów łączeniowych za pomocą modeli łuku typu „blackbox” musi się odbywać każdorazowo dla danego typu rozpatrywanego łącznika.

Modele typu „black box” powszechnie stosowane do przeprowadzania symulacji stanów łączeniowych w systemach elektroenergetycznych bazują głównie na podejściu do modelowania opartym na różniczkowej zależności wyznaczonej przez Cassiego oraz Mayra [1, 14-17]. Oba modele matematyczne opierają się na analizach zjawisk termicznych w łuku elektrycznym i znajdują odzwierciedlenie w równaniu Sahy, określającym zależność stopnia zjonizowania gazu przez promieniowanie pochodzące od temperatury. Model opracowany przez Cassiego jest bardziej odpowiedni dla opisu zachowania łuku elektrycznego w otoczeniu ekstremum prądowego, natomiast model Mayra lepiej odzwierciedla zjawiska łukowe w pobliżu przejścia prądu przez zero. W celu opracowania modelu matematycznego mogącego odwzorować zachowanie łuku elektrycznego z dużą

dokładnością, należy uwzględnić konduktywność określoną zarówno przez równanie Mayra, jak i Cassiego. Jednakże, z uwagi na fakt, iż niniejszy artykuł skupia się na analizie przebiegów występujących w trakcie trwania nieustalonych stanów łączeniowych, do obliczeń zaimplementowano jedynie równanie Mayra, zapewniające dobre odwzorowanie zachowania łuku w pobliżu zera prądowego – obszaru kluczowego dla występowania przebiegów łączeniowych.

Równanie Cassiego określone jest za pomocą następującego wzoru [1]:

$$(2) \quad \frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \cdot \left( \frac{i_a \cdot u_a}{u_s^2} - g_c \right)$$

gdzie:  $g_c$  – konduktywność łuku elektrycznego [S],  $\tau_c$  – stała czasowa łuku elektrycznego [s],  $u_s$  – napięcie łuku elektrycznego w stanie ustalonym (stała) [V],  $i_a$  – prąd płynący przez łuk elektryczny [A],  $u_a$  – napięcie łuku elektrycznego [V].

Równanie Mayra określone jest za pomocą następującego wzoru [1]:

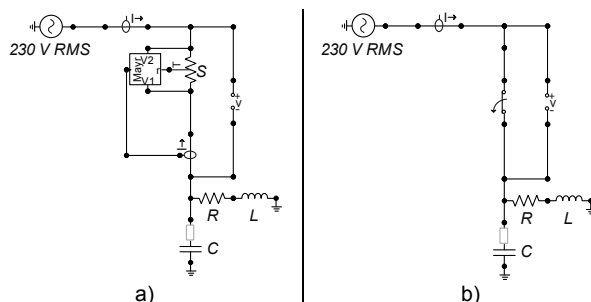
$$(3) \quad \frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \cdot \left( \frac{i_a^2}{P_0} - g_m \right)$$

gdzie:  $g_m$  – konduktywność łuku elektrycznego [S],  $\tau_m$  – stała czasowa łuku elektrycznego [s],  $P_0$  – moc gaszenia łuku elektrycznego [W],  $i_a$  – prąd płynący przez łuk elektryczny [A].

### Opis modelu symulacyjnego

Celem symulacji przedstawionych w niniejszym artykule jest wskazanie różnic w otrzymanych wynikach pomiędzy uproszczonym modelem łuku elektrycznego (model idealnego łącznika oparty na prądzie ucięcia), a modelem Mayra dodającym do modelu obwodowego konduktywność łuku elektrycznego. Dodatkowo, w celu zweryfikowania wyników obliczeń, przeprowadzono pomiary laboratoryjne dla zadanego układu, a wyniki doświadczalne porównano z danymi otrzymanymi w toku przeprowadzonych symulacji.

Przedstawione poniżej symulacje stanów łączeniowych przeprowadzono w programie Electromagnetic Transients Program – Alternative Transients Program (EMTP-ATP) v5.9p4 [18]. Na potrzeby analizy wybrano przypadek przerywania prądu w obwodzie niskiego napięcia o charakterze indukcyjnym. W celu odwzorowania zachowania łuku elektrycznego, do programu EMTP-ATP zaimplementowano model idealnego łącznika oraz równanie Mayra (3), zgodnie ze schematem obwodu symulacyjnego przedstawionym na Rysunku 1.



Rys.1. Schemat obwodu symulacyjnego w programie EMTP-ATP: a) z zaimplementowanym równaniem Mayra; b) z modelem idealnego łącznika

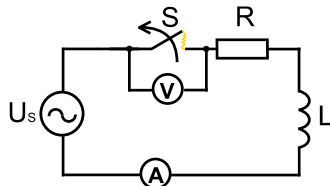
Jak pokazano na Rysunku 1, do przeprowadzenia symulacji z użyciem modelu Mayra, analizowany łącznik zamodelowano w programie jako rezystor ze zmienną w czasie rezystancją łuku. Wartość rezystancji łuku jest obliczana przez blok MODELS, w którym zaimplementowano różniczkowe równanie Mayra (3) przy użyciu procedury „DIFFEQ”. Do równania Mayra wprowadzono następujące parametry:  $P_0 = 50 \text{ W}$ ,  $\tau_m = 3 \mu\text{s}$ . Do czasu rozpoczęcia operacji łączeniowej, całkowita rezystancja ze styków wynosi  $1 \mu\Omega$ . Łącznik staje się w pełni otwarty, gdy wartość rezystancji przejścia osiąga  $10^6 \Omega$ , zgodnie z [1].

Z kolei, w celu przeprowadzenia obliczeń przy użyciu modelu idealnego łącznika, wykorzystano element TSWITCH zaczerpnięty z biblioteki programu ATPDraw v. 5.9p4. Ze względu na nieznaczną wielkość pojemności układu, prąd ucięcia został pominięty w modelu.

Jako obciążenie wykorzystane do badań laboratoryjnych posłużył powietrzny dławik, który zamodelowano w modelu symulacyjnym jako liniowy element indukcyjny wraz z dołączoną szeregowo rezystancją ( $R = 1,2 \Omega$ ) reprezentującą rezystancję uzwojenia dławika. Dodatkowo, do modelu dodano niewielką pojemność ( $C = 110 \text{ pF}$ ) reprezentującą pojemność uzwojenia dławika. Rezystancja połączona w szereg z pojemnością ( $R = 681 \Omega$ ) eliminuje oscylacje numeryczne [1].

### Opis modelu doświadczalnego

W celu zweryfikowania otrzymanych wyników symulacji, wykonano pomiary laboratoryjne w zadanym obwodzie elektrycznym, zawierającym obciążenie indukcyjne. Parametry obwodu symulacyjnego wprowadzono do modelu zgodnie z danymi obwodu testowego. Schemat laboratoryjnego obwodu testowego przedstawiono na Rysunku 2.



Rys.2. Schemat laboratoryjnego obwodu testowego:  $U_s = 230 \text{ V}$ ,  $R = 1,2 \Omega$ ,  $L = 29,8 \text{ mH}$ ,  $S$  – elektromechaniczny stycznik powietrzny (wybrane parametry zamieszczono w Tabeli 1)

Do przeprowadzania testów laboratoryjnych wykorzystano obciążenie indukcyjne w postaci dławika powietrznego. Rezystancja  $R$  oraz indukcyjność  $L$  przedstawione na Rysunku 2, reprezentują parametry zastępcze obciążenia (powietrznego dławika). Operacje łączeniowe przeprowadzono za pomocą elektromechanicznego stycznika (izolacja powietrzna zastosowana jako medium gaszeniowe). Wybrane parametry stycznika przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Wybrane parametry stycznika użytego do badań

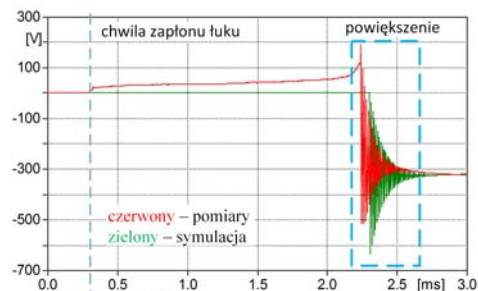
Parametr	Wartość	Jednostka
Znamionowe maksymalne napięcie łączeniowe	690	V
Zakres częstotliwości znamionowych	25-400	Hz
Prąd znamionowy łączeniowy przy AC1, $\theta \leq 40 \text{ }^\circ\text{C}$	50	A
$I_s$ / AC3 maksymalny prąd znamionowy łączeniowy	32	
Moc znamionowa łączeniowa przy AC3 (przy napięciu 220-240 V)	9	kW

Przebiegi napięcia powrotnego oraz przerywanego prądu zmierzono w obwodzie zgodnie z oznaczeniami przedstawionymi na Rysunku 2.

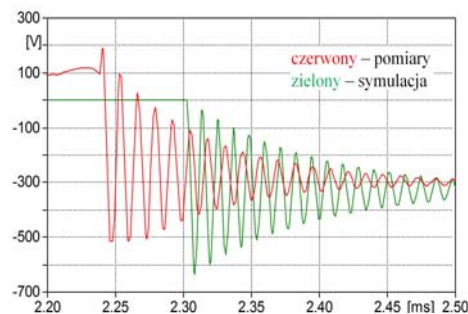
### Wyniki obliczeń symulacyjnych i badań laboratoryjnych

Jako, że celem artykułu była analiza przerywania prądu ze szczególnym wskazaniem na właściwe odzwierciedlenie zachowania łuku elektrycznego, wyniki pomiarów i symulacji przedstawiają przebiegi napięcia łukowego oraz prądu łuku w analizowanym obwodzie. Przebiegi zaprezentowane poniżej posłużyły do porównania wyników modelu uproszczonego (idealnego łącznika) z modelem opartym o równanie Mayra. Rysunki 3, 4 i 5 obrazują zestawienie pomiarów z wynikami symulacji wykonanymi z użyciem modelu idealnego łącznika. Rysunki 6, 7 i 8 przedstawiają z kolei porównanie wyników pomiarów i symulacji przeprowadzonych z użyciem modelu łącznika opartego o równanie Mayra. Na podstawie otrzymanych przebiegów określono czas łukowy  $t_l$  (od chwili zapłonu łuku do chwili jego zgaszenia) oraz przepięcie maksymalne  $U_{max}$ .

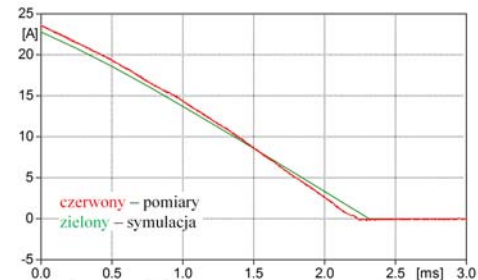
Analizując poniższe dane, można zaobserwować rozbieżności pomiędzy wynikami symulacji a wielkościami zmierzonymi. Jest to szczególnie zauważalne w przebiegu napięcia łukowego obliczonego dla modelu idealnego łącznika (dłuższy czas  $t_l$ , maksymalne przepięcie większe o 24% w porównaniu do wielkości zmierzonej). Bazując na otrzymanych wynikach można zatem stwierdzić, iż model Mayra lepiej odzwierciedla zachowanie łuku w porównaniu do modelu idealnego łącznika (czas łukowy pokrywa się z wynikami pomiarowymi, wartość maksymalnego przepięcia jest o 12% większa od wartości zmierzonej). Jednakże, w otoczeniu oddalonym od zera prądowego, symulowany przebieg napięcia łukowego znacznie odbiega od przebiegu zmierzonego.



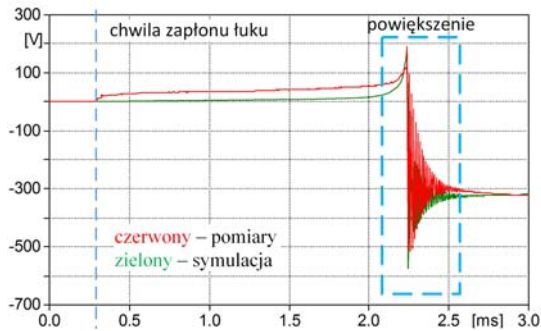
Rys.3. Model idealnego łącznika. Obliczone napięcie łuku ( $t_l = 2 \text{ ms}$ ,  $U_{max} = 635 \text{ V}$ ) wraz ze zmierzonym przebiegiem ( $t_l = 1,94 \text{ ms}$ ,  $U_{max} = 515 \text{ V}$ )



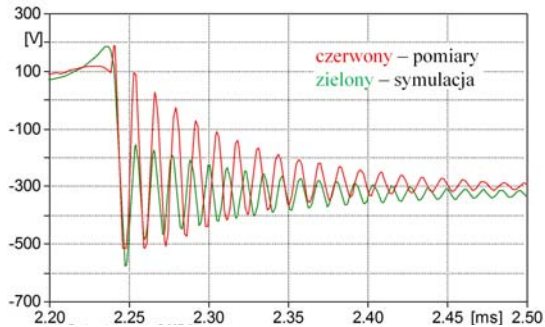
Rys.4. Napięcie łuku (powiększenie rysunku 3)



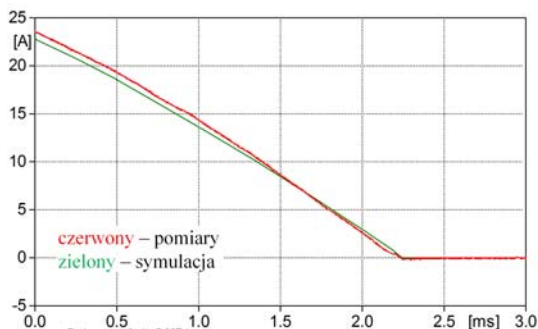
Rys.5. Model idealnego łącznika. Przebieg przerywanego prądu.



Rys.6. Model łącznika oparty o równanie Mayra. Obliczone napięcie łuku ( $t_l = 1,91$  ms,  $U_{max} = 575$  V) wraz z zmierzonym przebiegiem ( $t_l = 1,94$  ms,  $U_{max} = 515$  V)



Rys.7. Napięcie łuku (powiększenie rysunku 6)



Rys.8. Model łącznika oparty o równanie Mayra. Przebieg przerywanego prądu.

## Wnioski

W niniejszym artykule przedstawiono sposób symulowania procesów łączeniowych na przykładzie elektromechanicznych styczników pracujących w układach niskonapięciowych. Z punktu widzenia koordynacji izolacji, na podstawie otrzymanych wyników można wyróżnić charakterystyczne parametry związane z gaszeniem łuku elektrycznego. Są to odpowiednio czas łukowy (czas od momentu zapłonu łuku elektrycznego do momentu jego zgaszenia), częstotliwość oscylacji napięcia powrotnego oraz wartość maksymalnych przepięć łączeniowych. Długość czasu palenia się łuku może mieć kluczowe znaczenie dla efektów termicznych występujących podczas przerywania prądu, natomiast sam moment zgaszenia łuku (przerwania prądu) jest istotny z punktu widzenia charakteru napięcia powrotnego oraz narażeń systemu izolacji.

W wykonanych pomiarach i symulacjach wykazano, iż istotny jest sposób modelowania rozpatrywanego łącznika. Rozbieżność wyników symulacji i pomiarów w przypadku zastosowania prostego modelu idealnego łącznika, wskazuje na jego ograniczony zakres stosowania do

podobnych analiz. Bardziej złożony model łącznika (oparty na równaniu Mayra) dostarcza lepszą zbieżności wyników symulacji z pomiarami. Brak całkowitej zbieżności z wynikami pomiarów dla bardziej złożonego modelu wynika głównie z charakterystyki równania Mayra, które z zasady opisuje bardzo dobrze przerywanie prądów w otoczeniu napięcia powrotnego, które (z punktu widzenia gaszenia łuku) zależy w dużej mierze od ucięcia prądu płynącego przez łuk.

Dostępność innych, bardziej złożonych modeli łuku elektrycznego w literaturze (opierających się o równanie Cassie, czy Schwartz-Avdonina) stanowi wyzwanie do dalszej pracy badawczej.

**Autorzy:** mgr inż. Tomasz Chmielewski e-mail: tomasz.chmielewski@pl.abb.com, mgr inż. Piotr Oramus e-mail: piotr.oramus@pl.abb.com, dr hab. inż. Marek Florkowski e-mail: marek.florkowski@pl.abb.com, Korporacyjne Centrum Badawcze ABB, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków

## LITERATURA

- [1] IEC 60071-4:2004: Insulation coordination – Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks
- [2] IEC 60071-2: 2004. Insulation coordination – Part 2: Application Guide
- [3] IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination. IEEE Std 1313.2-1999
- [4] IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis, IEEE Std 399-1997
- [5] IEEE Recommended Practice for Overvoltage and Insulation Coordination of Transmission Systems at 1000 kV AC and Above, IEEE Std 1862™-2014
- [6] Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers, IEEE Std C37.011™-2005:
- [7] CIGRE Working Group 02 (SC 33), "Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients," CIGRE Brochure 39, 1990
- [8] Modeling and Analysis of System Transients Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs, IEEE working group 15.08.09. 2013
- [9] The calculation of switching surges – III. Transmission line representation for energization and re-energization studies with complex feeding networks" – CIGRE study committee 13 – Electra Nbr 62
- [10] Schoepf, T.; Rowlands, R.; Drew, G.A., "Contact welding at break of motor inrush current," Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on , vol.29, no.2, pp.278,285, June 2006
- [11] Peelo, D.F., "Current Interrupting Capability of Air Break Disconnect Switches," Power Engineering Review, IEEE, vol.PER-6, no.1, pp.53,54, Jan. 1986
- [12] Oliver, D.; Borrell, S., "Relay technology switches to solid state," Electronics and Power, vol.22, no.8, pp. 526-527, August 1976
- [13] Yong-Ho Chung, "Medium voltage hybrid transfer switch," Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE, vol.2, no., pp. 1158,1163 vol.2, 2002
- [14] CIGRE WG 13.01, State of the art of circuit- breaker modelling, 1998
- [15] Kandyba, A., Modelling of gliding arc in non-thermal plasma reactors, Przegląd Elektrotechniczny, v 89, n 2a, p 51-4, 2013
- [16] Mirosław Wciślik, Analityczne modele łuku elektrycznego, Przegląd Elektrotechniczny, 07/2008 Str. 115-117
- [17] Antoni Sawicki, Łukasz Światoń , Ryszard Sosiński, Ocena przydatności modeli Cassiego i hybrydowego Cassiego-Mayra i do symulacji procesów w obwodach z łukiem prądu przemiennego, Przegląd Elektrotechniczny, 01/2010 Str. 255
- [18] EMTP-ATP Rule Book