

1. Cel ćwiczenia

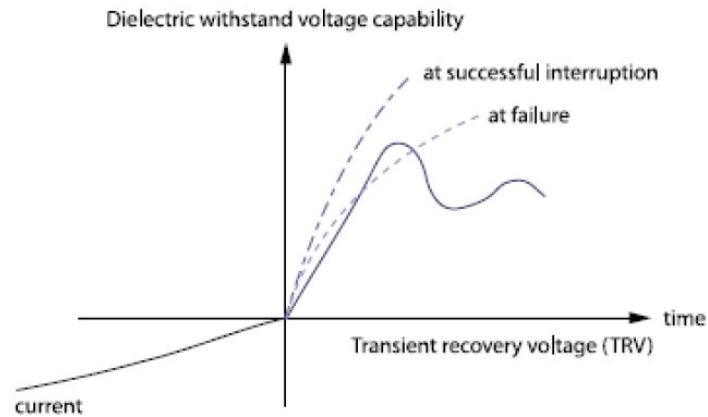
Mimo iż każdy wyłącznik ma ściśle zdefiniowany znamionowy prąd wyłączany, określony dla konkretnego znamionowego napięcia sieci i znormalizowanego przebiegu napięcia powrotnego (ang. TRV), jest on również zdolny wyłączać prądy o innych wartościach w innych warunkach napięciowych. Fakt ten pozwala na wykorzystanie tych samych komór gaszeniowych do produkcji wyłączników o różnych zdolnościach gaszeniowych.

Celem danego eksperymentu jest określenie granicznej zdolności łączeniowej przy wykorzystaniu modelu Mayra.

2. Wyłączenie prądu

Zgaszenie łuku elektrycznego wymaga sprowadzenia prądu do wartości zerowej, a następnie niedopuszczenia do jego ponownego zapłonu w przerwie międzystykowej. W obwodach DC, jest to uzyskiwane np. poprzez uzyskanie wystarczająco wysokiego napięcia łuku elektrycznego. W obwodach AC, obserwujemy naturalne przejście prądu przez zero, któremu towarzyszą najkorzystniejsze warunki gaszenia łuku elektrycznego tzn. w przerwie międzystykowej znajduje się minimalna ilość ładunków oraz występują najkorzystniejsze warunki dejonizacji.

Po przejściu prądu przez zero oraz zgaśnięciu łuku elektrycznego, rozpoczyna się proces budowania wytrzymałości napięciowej przez przerwę międzystykową, której szybkość przyrostu zależy od koncentracji ładunków w objętości kanału połukowego w chwili zera prądu oraz intensywności ich neutralizacji w kolejnych momentach. Ilość ładunków w przestrzeni międzystykowej zależy od ilości energii zmagazynowanej w kanale połukowym. Innymi słowy, zależy od intensywności odbierania ciepła z łuku oraz wartości wyłączanego prądu.

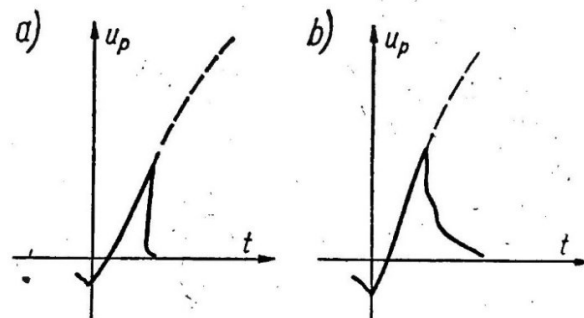


Rys. 2.1. Przebieg napięcia powrotnego oraz napięcia zapłonowego, w przypadku udanego oraz nieudanego wyłączenia prądu (przypadek zapłonu elektrycznego), [1].

Równoległe, wyłączenie prądu inicjuje stan przejściowy kształtujący budowanie się napięcia powrotnego (ang. TRV) na stykach łącznika. Jeżeli stromość narastania napięcia powrotnego (ang. RRRV) jest bardziej stroma niż szybkość narastania napięcia zapłonowego (wytrzymałości napięciowej) przerwy międzystykowej, to spodziewane jest wystąpienie zapłonu ponownego (ang. reignition), w tym wypadku zapłonu o genezie elektrycznej (Rys. 2.1). Zapłony, ze względu na genezę dzieli się na elektryczne oraz ciepłne.

Zapłon elektryczny następuje w skutek inicjacji jonizacji zderzeniowej, wywołanej napięciem powrotnym. O rozwoju zapłonu decyduje możliwość jonizacji przez stosunkowo niskie napięcie powrotne, przy jeszcze stosunkowo wysokiej temperaturze przestrzeni połukowej. Jeżeli w przestrzeni połukowej procesy jonizacyjne są przerywane, to zapłon rozwija się tylko i wyłącznie na skutek jonizacji zderzeniowej, do czego konieczna jest zdecydowanie wyższa wartość napięcia powrotnego. Charakterystyczne dla zapłonu elektrycznego jest strome ucięcie napięcia powrotnego (Rys. 2.2a). Czas ucięcia odpowiada czasowi przejścia przez lawinę elektronów i fotonów przerwy międzystykowej.

Zapłon ciepły występuje w przypadku odpowiednio dużej przewodności kanału połukowego, wynikającej z jego wysokiej temperatury. W tym wypadku, kształtujące się napięcie powrotne powoduje przepływ prądu połukowego, dodatkowo podgrzewającego przestrzeń kanału. Jeżeli energia doprowadzona jest większa od energii odbieranej, to może wystąpić jonizacja ciepła i stopniowy wzrost prądu, prowadzący finalnie do rozwoju wyładowania łukowego. Charakterystyczne dla zapłonu ciepłego jest stosunkowo wolno zanikające napięcie powrotne, spowodowane postępującą jonizacją termiczną (Rys. 2.2b).



Rys. 2.2. Przebieg napięcia powrotnego na stykach łącznika w przypadku wystąpienia zapłonu o genezie: a) elektrycznej; b) ciepłej [2].

3. Graniczny prąd wyłączalny – model Mayra

By proces wyłączenia prądu zakończył się sukcesem, istotne jest zapewnienie podczas fazy łukowej dostatecznie intensywne odbieranie ciepła z kolumny łukowej, a po przejściu prądu przez zero, zapewnienie warunków skuteczniej dejonizacji kanału połukowego, w celu zapewnienia wystarczająco szybkiego przyrostu wytrzymałości napięciowej przerwy międzystykowej. Miarą skuteczności chłodzenia kolumny łukowej jest przewodność kanału połukowego w chwili zera prądu.

Opis przewodności kolumny łukowej, przy uwzględnieniu stanu energetycznego gazu, dostarcza model łuku dynamicznego Mayra. Przewodność przestrzeni międzystykowej, wyrażona funkcją prądu przedstawia równanie (3.1).

$$\frac{dG}{dt} + \frac{1}{\tau_M} G = \frac{1}{\tau_M P_0} i^2(t) \quad (3.1)$$

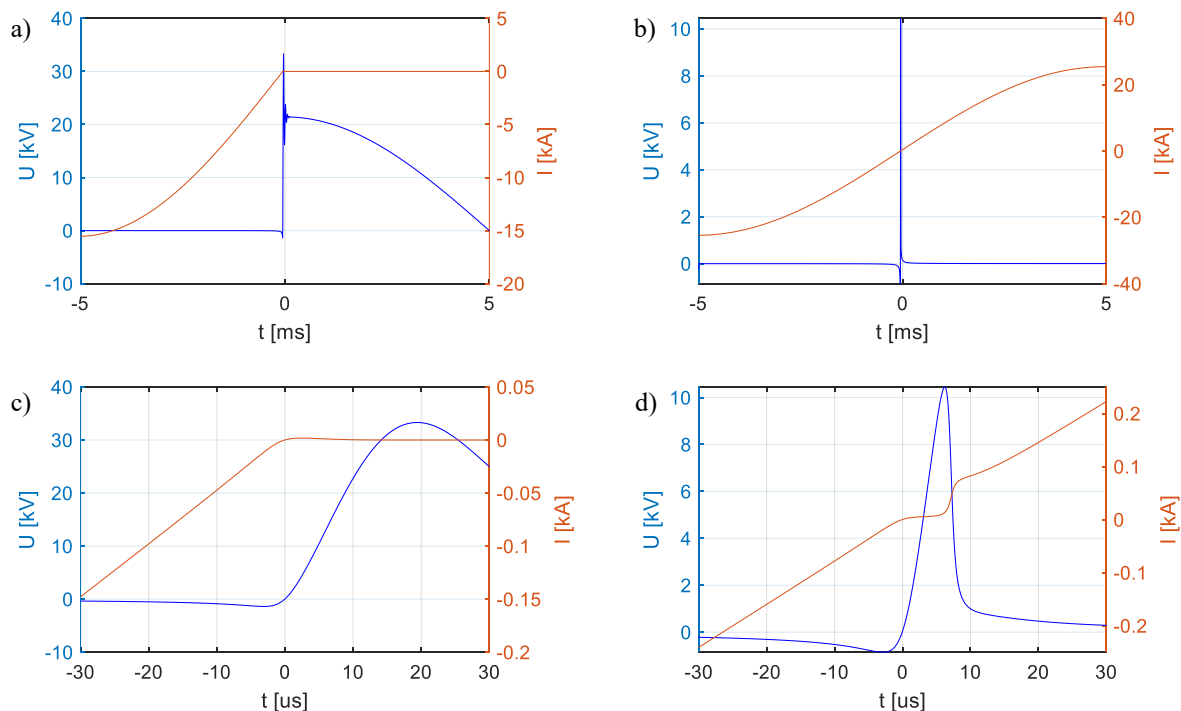
Gdzie:

G – przewodność kolumny łukowej, τ_M – stała czasowa łuku, P_0 - moc odbierana z kolumny łukowej, i – prąd łuku

Założenia w modelu Mayr'a:

- średnica kolumny łukowej jest stała
- moc odbierana P_0 jest stała w czasie
- temperatura kolumny łukowej zmienia się w czasie oraz przestrzeni

Model Mayra daje dobre odwzorowanie łączeniowego łuku elektrycznego w wyłącznikach SF₆ oraz powietrznych, dla stosunkowo małych wartości prądów, w szczególności w mikrosekundowym sąsiedztwie przejścia prądu przez zero. Dlatego, model Mayra jest wykorzystywany w określaniu granicznej zdolności łączeniowej danej komory gaszeniowej. Porównanie uzyskanych z modelu Mayra przebiegów prądu oraz napięcia na komorze gaszeniowej, dla dwóch różnych wartości wyłączanego prądu, przedstawiono na Rys. 3.1.

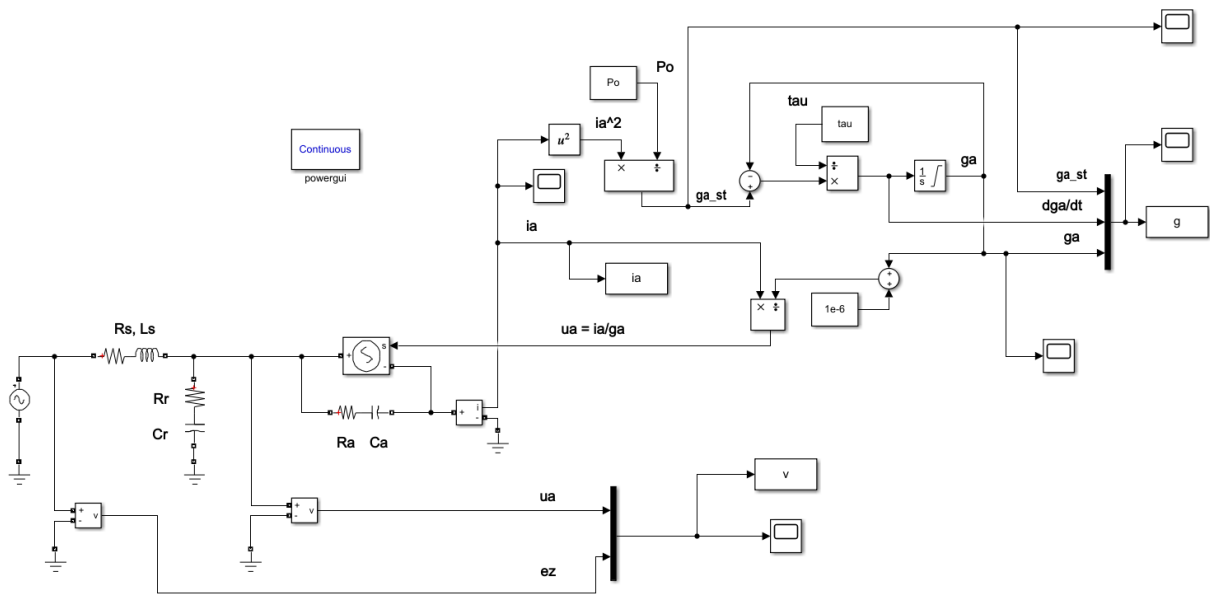


Rys. 3.1. Porównanie przebiegów prądów oraz napięć w pobliżu przejścia prądu przez zero podczas: a), c) udanego wyłączenia prądu; b), d) nieudanego wyłączenia prądu.

Rys. 3.1. prezentuje dwa możliwe scenariusze łączeniowe. Rysunki a) i c) przedstawiają przebiegi prądów oraz napięcia podczas skutecznego wyłączenia prądu o wartości 11 kA (RMS), podczas gdy rysunki b) and d) przedstawiają nieudaną próbę wyłączenia prądu o wartości 18 kA (RMS). Obie próby wykonane dla tych samych wartości parametrów mocy odbieranej itp.

4. Program badań

Poszukiwanie granicznej zdolności łączeniowej jest wykonywane poprzez skrypt Matlabowy *br_ser_con.m*. Skrypt wykonuje serię 10 prób wyłączenia prądu, w zadanym w skrypcie zakresie. Skrypt wywołuje wykonany w środowisku Simulink model *br_sim_lim.sim*, będący realizacją równania (3.1). Schemat modelu został przedstawiony na Rys. 4.1.

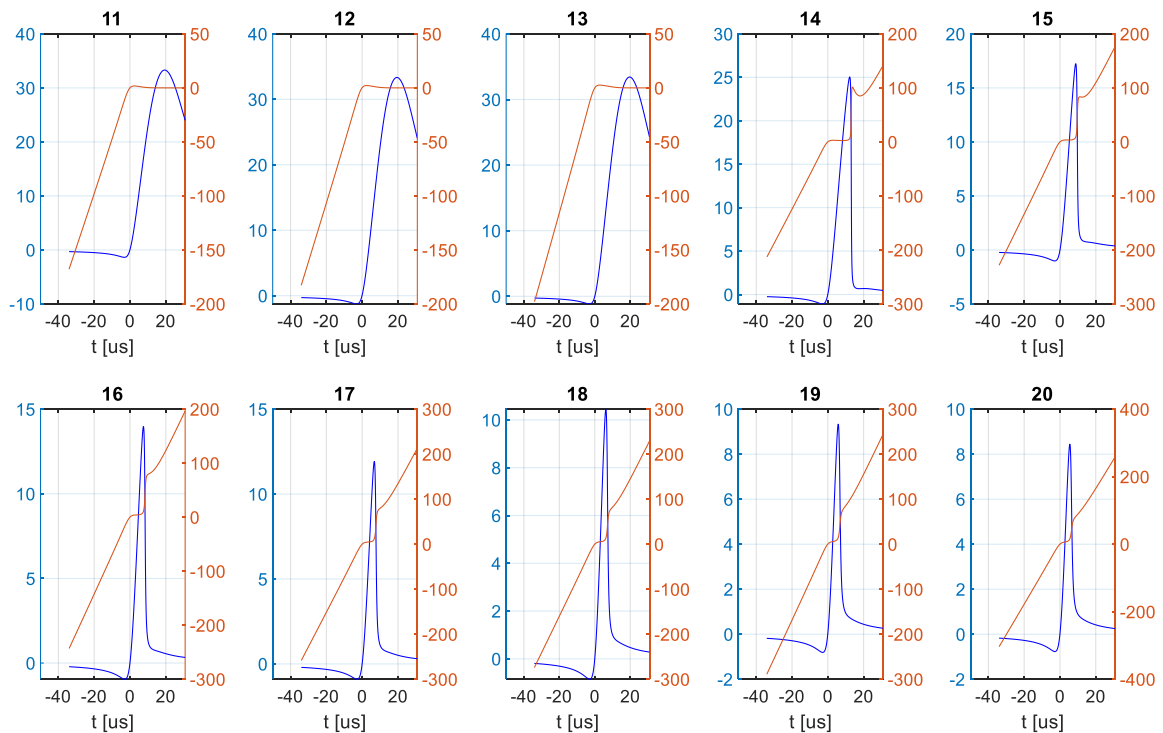


Rys. 4.1. Widok na model w środowisku Simulink.

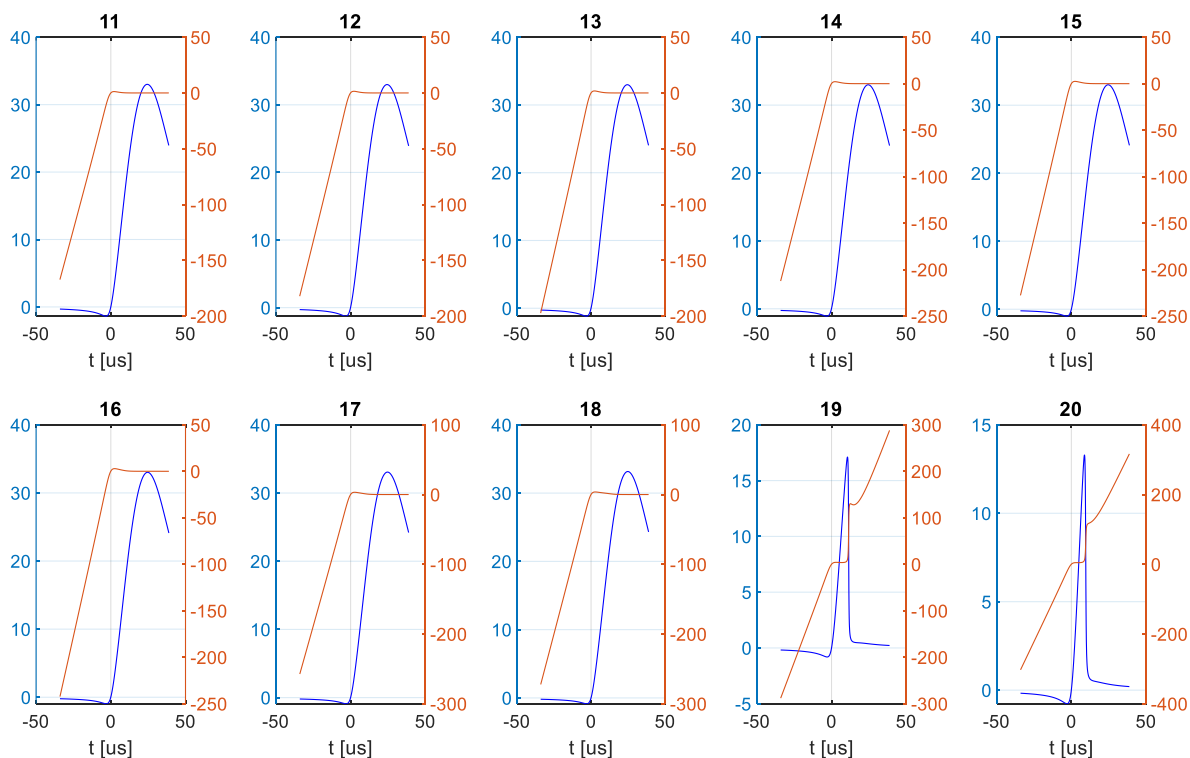
Próba jest prowadzona z zadanymi przez użytkownika parametrami wejściowymi:

- parametry łuku : P_0 – moc odbierana z łuku, τ_M – stała czasowa łuku,
- stromość narastania napięcia powrotnego na stykach łącznika, determinowana wartością czasu t_3 (czasem do szczytu)

Dla odpowiednio przygotowanej serii, jesteśmy w stanie określić maksymalną wartość prądu, dla której obserwujemy pomyślne wyłączenie prądu. Taka wartość prądu nazywana jest graniczną zdolnością łączeniową.



Rys. 4.2. Wyniki serii testowej: przebiegi napięcia (niebieski) oraz prądu (czerwony) dla $t_3 = 15.4 \mu s$, w tytule wykresu podano wartość wyłączanego prądu.

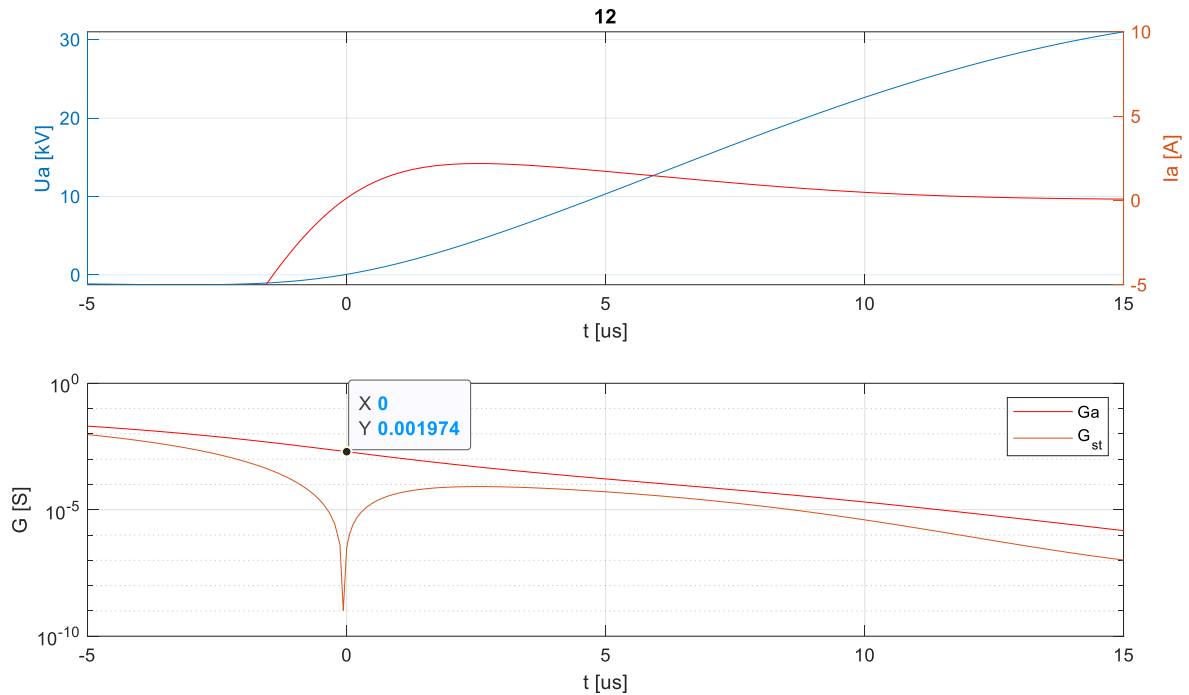


Rys. 4.3. Wyniki serii testowej: przebiegi napięcia (niebieski) oraz prądu (czerwony) dla $t_3 = 19.4 \mu\text{s}$, w tytule wykresu podano wartość wyłączanego prądu.

Przykładowe przebiegi prądów oraz napięć dla każdej próby łączeniowej w serii przykładowo przedstawiono na Rys. 4.2 oraz Rys. 4.3. Zaprezentowane przebiegi obejmują wyniki prób łączeniowych z prądem w zakresie 11 – 20 kA, dla tych samych parametrów łukowych jednak z różną stromością napięcia powrotnego.

Zwiększając wartości wyłączanego prądu, powyżej granicznej zdolności łączeniowej, zapłon ponowny jest obserwowany dla niższej wartości napięcia powrotnego. Graniczna zdolność łączeniowa zależy od stromości oraz wartości napięcia powrotnego (Rys. 4.2 i Rys. 4.3), a także od parametrów łuku elektrycznego.

Dla określonej granicznej zdolności łączeniowej, lepszy wgląd w przebieg procesu łączeniowego umożliwia wykorzystanie skryptu *br_lim_con.m*. Po uruchomieniu skryptu użytkownik jest proszony o podanie w Matlab Command Window, znalezionej granicznej wartości prądu. Skrypt przedstawi przebiegi napięcia oraz prądu a także przewodności przerwy międzystykowej w mikrosekundowej okolicy przejścia prądu przez zero. Uzyskane przebiegi zostały zaprezentowane na Rys. 4.4.



Rys. 4.4. Przykładowy wynik działania skryptu *br_lim_con.m* dla skutecznego wyłączenia prądu: Przebieg napięcia oraz prądu (górną), przewodność przerwy międzystykowej z zaznaczoną przewodnością w momencie przejścia prądu przez zero (dół).

5. Sprawozdanie

Report should contain:

- Przegląd literatury w zakresie tematyki ćwiczenia (normy, publikacje dostępne w np. w IEEE Xplore)
- jak wygląda skuteczne oraz nieskuteczne wyłączenie prądu. Kiedy wyłączenie prądu może zakończyć się niepowodzeniem.
- określenie granicznej zdolności łączeniowej prądu, dla zadanych wartości: P_o , τ_M , t_3 (*br_ser_con.m*). Mile widziane wykorzystanie ww. wartości wymienionych parametrów o wartościach z literatury
- analiza wpływu P_o , τ_M , t_3 na graniczną zdolność wyłączenia prądu
- analiza skutecznego oraz nieskutecznego wyłączenia w pobliżu zera prądu (*br_lim_con.m*)

W celu lepszej prezentacji wyników lub głębszej analizy procesów, w skryptach powinny być wykonane odpowiednie modyfikacje.

Dodatkowe:

- jaki inny jest często używany model łuku elektrycznego. Jakiego ma zastosowanie?
- co to prąd połukowy? Z czym jest związany?
- dlaczego przewodność przerwy połukowej jest miarą efektywności odbioru ciepła z kolumny łukowej?
- skonfrontuj wykorzystywany model z modelem dostępnym w bibliotece Matlab (*power_arcmodels*)

6. Literatura

- [1] K. Pedro, Electric Arc Modeling in Circuit Breakers for Electromagnetic Transients Analysis, 2017
- [2] Z. Ciok, Procesy łączeniowe w układach elektroenergetycznych, wydanie drugie, WNT, Warszawa, 1983