

Zjawisko niejednoczesności otwierania styków w łączniku próżniowym

Streszczenie. W pracy przedstawiono opracowany w programie ATP/EMTP model do analizy wpływu wartości parametrów konstrukcyjnych układu stykowo-gaszeniowego łącznika próżniowego na spodziewane wartości przebiegów i przetężeń w komutowanym obwodzie pojemnościowym. W przeprowadzonych w tym modelu symulacjach cyfrowych badano wpływ niejednoczesności otwierania się styków łącznika próżniowego, prędkości ich otwierania się oraz długości przerwy zestykowej na przebiegi przejściowe prądów i napięć w komutowanych obwodach pojemnościowych.

Abstract. The paper presents a program in ATP / EMTP model for analyzing the impact of the design parameters of the vacuum switch on the expected value of the overcurrent surges and circuit switched capacitor circuit. The carried out numerical simulations that model the effect of opening asynchronicity vacuum connector contacts, speed of opening up and the length of the contact gap on transient currents and voltages in the switched capacitor circuits (**The phenomenon of asynchronicity opening contacts in the vacuum switch**)

Słowa kluczowe: program ATP/EMTP, przebiecia, procesy łączeniowe, niejednoczesność otwierania styków

Keywords: ATP/EMTP program, overvoltage, switching process, not simultaneous open contacts

doi:10.12915/pe.2014.02.53

Wstęp

Podczas procesów łączeniowych w obwodach pojemnościowych z łącznikami próżniowymi mogą pojawiać się niebezpieczne wartości przebiegów oraz przetężeń prądowych. Istnieje wiele czynników, które mają istotny wpływ na ich powstawanie i osiągane wartości. Między innymi należą do nich parametry konstrukcyjne układu stykowo-gaszeniowego łącznika takie jak niejednoczesność otwierania się styków w poszczególnych biegunach łącznika, prędkość ich rozchodzenia się podczas otwierania się łącznika oraz długość przerwy zestykowej w stanie otwarcia łącznika. W przypadkach niejednoczesnego otwierania się styków łącznika przebiegi prądu i napięcia w ostatnim z wyłączanych biegunów silnie zależą od przebiegów tych wielkości w biegunach wcześniej wyłączanych i przy pewnych wartościach wymienionych parametrów konstrukcyjnych łącznika i ich wzajemnych korelacjach mogą osiągać niebezpieczne wartości dla izolacji komutowanych obwodów i samego łącznika. Opis analityczny tych przebiegów komplikuje dodatkowo ich charakter losowy, zależny od przypadkowej chwili rozpoczęcia się rozchodzenia styków podczas otwierania łącznika przy każdorazowo przypadkowych wartościach chwilowych prądów i napięć w poszczególnych fazach komutowanego obwodu. Z kolei badania laboratoryjne takich przebiegów są czasochłonne i pracochłonne oraz wymagają specjalistycznej aparatury, co czyni je bardzo drogimi i ogranicza ich liczbę. Z tego względu w pracy analizę omawianego zagadnienia oparto o symulację cyfrową zrealizowaną w programie ATP/EMTP, która nie posiada wymienionych ograniczeń i pozwala na wielokryterialną analizę rozpatrywanych przebiegów. Prezentowane symulacje przeprowadzono dla rozpatrywanych parametrów konstrukcyjnych o wartościach zaczerpniętych z katalogów łączników próżniowych dostępnych na rynku krajowym [11] oraz o wartościach rekomendowanych w normie [6]. Wyniki przeprowadzonych symulacji pozwoliły na ocenę przydatności praktycznej opracowanego modelu do analizy wpływu wartości parametrów konstrukcyjnych układu stykowo-gaszeniowego łącznika próżniowego na spodziewane wartości przebiegów i przetężeń w komutowanym obwodzie pojemnościowym zarówno na etapie projektowania łącznika jak i jego badań konstrukcyjnych. Pozwoliły także na ocenę możliwości ograniczania występujących przebiegów i przetężeń łączeniowych w komutowanych obwodach pojemnościowych poprzez odpowiedni dobór wartości

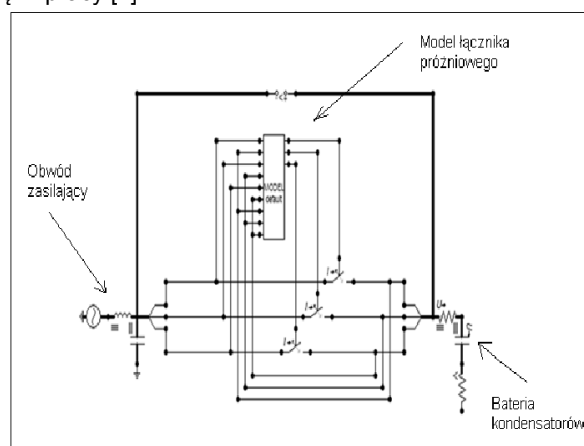
rozpatrywanych parametrów konstrukcyjnych oraz na ocenę poprawności i zasadności przyjęcia wartości tych parametrów podanych w normach i katalogach tych łączników.

Model obwodu pojemnościowego do analizy przebiegów prądów i napięć podczas procesów łączeniowych

Symulacje przebiegów prądów i napięć występujących podczas procesów łączeniowych w obwodach pojemnościowych zostały wykonane z zastosowaniem opracowanego w programie ATP/EMTP obwodu, w skład którego wchodziły (rys. 1):

- obwód zasilający (napięcie zasilania 15 kV, elementy RLC odwzorowujące parametry kabla elektroenergetycznego),
- łącznik próżniowy – element zaprogramowany w bloku MODELS (rys. 2),
- obwód zasilający baterię kondensatorów (elementy RLC odwzorowujące parametry kabla elektroenergetycznego),
- 3-fazowa bateria kondensatorów o mocy 100 kVar z izolowanym punktem neutralnym.

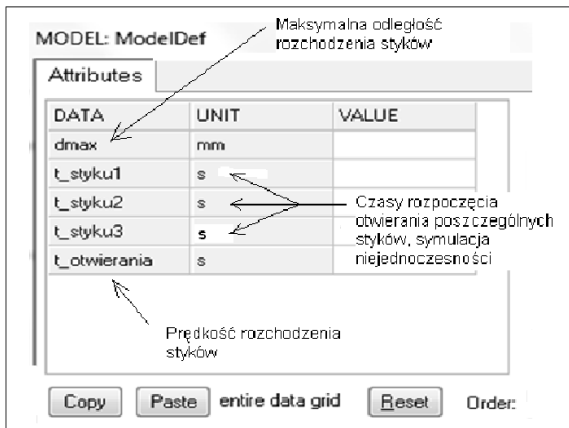
Dobór wielkości poszczególnych elementów znajduje się w pracy [2].



Rys. 1. Model obwodu pojemnościowego do analiz przebiegów prądów i napięć podczas procesów łączeniowych wykonany w programie ATP/EMTP

Zastosowany w obwodzie model łącznika próżniowego został zbudowany z „idealnego łącznika”, zaczerpniętego z biblioteki programu ATP/EMTP oraz z algorytmu kontrolującego zaprogramowanego w bloku MODELS.

Działanie modelu łącznika próżniowego oraz jego parametry i ich dobór są opisane szczegółowo w pracach [3,4]. Symulacje niejednoczesnego otwierania się styków łącznika są w tym modelu realizowane poprzez zadawanie wybranych wartości czasów otwierania się styków w poszczególnych biegunach łącznika, maksymalnej odległości międzystykowej otwartego łącznika oraz prędkości rozchodzenia styków podczas otwierania się łącznika.



Rys. 2. Widok panelu do wprowadzanie danych do modelu łącznika próżniowego w programie ATP/EMTP

Szybkie i łatwe wprowadzanie zmian wartości tych parametrów, a przez to skrócenie czasu dokonywanych symulacji, zapewniło zastosowanie specjalnie zaprojektowanego w tym celu panelu (rys. 2).

Analizę wpływu niejednoczesnego otwierania się styków łącznika na przebiegi łączeniowe prądów i napięć na zaciskach wyłączanej baterii kondensatorów oraz na zaciskach łącznika przeprowadzono dla zmian wartości parametrów konstrukcyjnych układu stykowo-gaszeniowego łącznika dokonywanych w możliwych do praktycznej realizacji zakresach. Obejmowały one zakresy podane w normie [6] i katalogach łączników [11]:

- długość przerwy zestykowej w stanie otwartym łącznika- 4-13 mm,
- niejednoczesność otwierania się styków w poszczególnych biegunach łącznika- 20-50 ms,
- prędkość otwierania się styków- 0,2-0,9 m/s,
- maksymalnie dopuszczalny czas wyłączenia- 5 s.

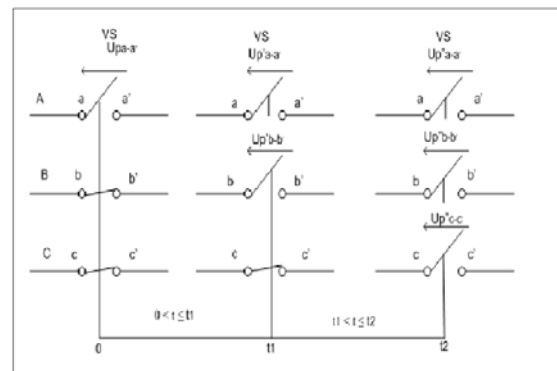
Symulacje przeprowadzono dla sekwencji otwierania się styków łącznika, przedstawionych na rys. 3, zgodnych z sekwencjami przedstawionymi w pracy [1]. Zapewniło to możliwość weryfikacji rezultatów tych symulacji wynikami analiz teoretycznych i badań laboratoryjnych rozpatrywanych zjawisk łączeniowych podanych w pracy [1].

Wyniki symulacji

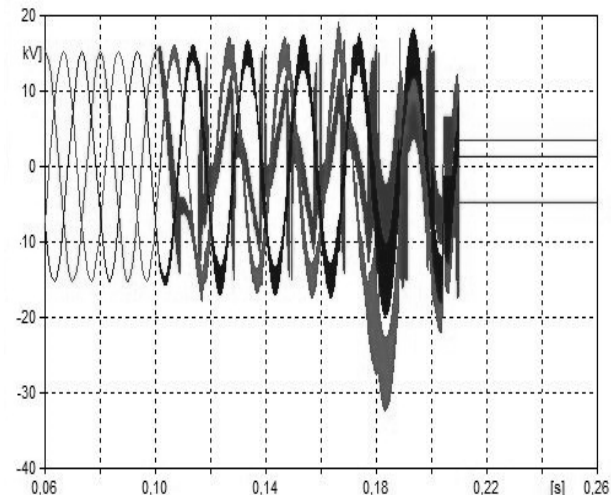
Przykładowe przebiegi czasowe napięć i prądów otrzymane z przeprowadzonych symulacji przedstawiono na rysunkach 4 – 9. Ocenę potencjalnego zagrożenia przepięciowego i przetężeniowego oparto na porównaniu wartości maksymalnych prądów i napięć otrzymanych z symulacji z dopuszczalnymi wartościami maksymalnymi tych wielkości podanymi w normach [6,7,8,9]:

- maksymalna długotrwała wartość skuteczna napięcia kondensatora- $1,1U_N$,
- maksymalna długotrwała wartość szczytowa napięcia kondensatora- $1,4U_N$,
- maksymalna wartość szczytowa napięcia podczas krótkotrwałych przepięć- $2\sqrt{2}U_N$,

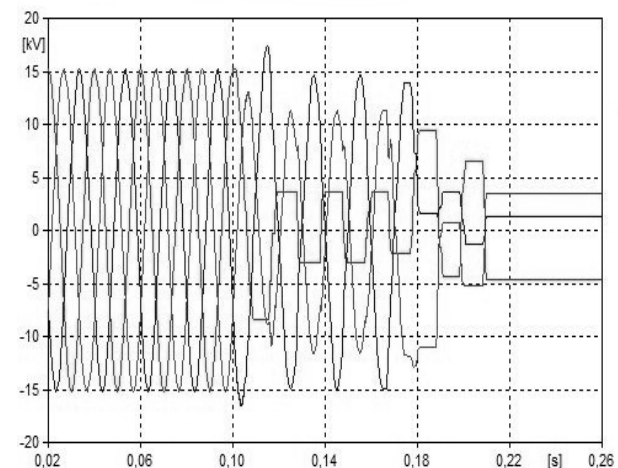
- maksymalna długotrwała wartość skuteczna prądu kondensatora - $1,35I_N$,
 - maksymalna wartość mocy bierniej kondensatora- $1,35Q_N$,
- gdzie: U_N , I_N , Q_N są wartościami znamionowymi odpowiednio: napięcia, prądu i mocy kondensatora.



Rys. 3. Sekwencja niejednoczesnego wyłączenia prądów trójfazowego łącznika próżniowego VS: t_0 - otwarcie styków bieguna A, t_1 - otwarcie styków bieguna B, t_2 - otwarcie styków bieguna C, U_p - napięcia powrotne na poszczególnych biegunach w chwili t_0 , U_p^1 - napięcia powrotne na poszczególnych biegunach w chwili t_1 , U_p^2 - napięcia powrotne na poszczególnych biegunach w chwili t_2 [1]



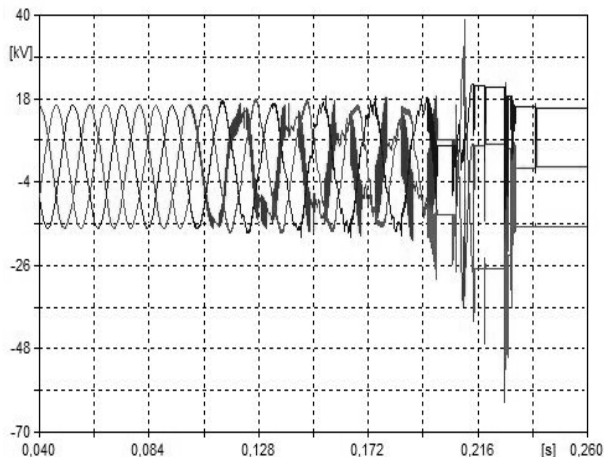
Rys. 4. Przebiegi czasowe napięć fazowych na zaciskach łącznika próżniowego podczas wyłączenia obwodu pojemnościowego przy maksymalnym odstępnie styków łącznika 6 mm, prędkości rozchodzenia się styków 0,9 m/s i niejednoczesności otwierania się poszczególnych styków 50 ms



Rys. 5. Przebiegi czasowe napięć fazowych na zaciskach wyłączanej baterii kondensatorów łącznikiem próżniowym o maksymalnym odstępnie styków 6 mm, prędkości rozchodzenia się styków 0,9 m/s i niejednoczesności otwierania się poszczególnych styków 50 ms

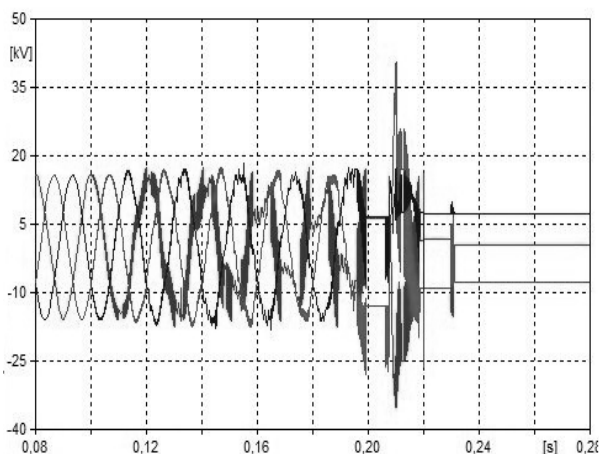
Analiza wyników przeprowadzonych symulacji i otrzymanych na ich podstawie zależności pozwala na sformułowanie następujących stwierdzeń:

1. Wartości prądów i prężeń powstających w komutowanych przez łączniki próżniowe obwodach o charakterze pojemnościowym zależą w sposób istotny od wartości parametrów konstrukcyjnych układów stykowo-gaszeniowych tych łączników. Przy pewnych wartościach tych parametrów i ich niekorzystnych korelacjach mogą osiągać niebezpieczne wartości dla izolacji komutowanych obwodów i samego łącznika, mogą także powstawać ponowne zapłony łuku w łączniku, potęgujące występujące zagrożenie przepięciowe i przetężeniowe.



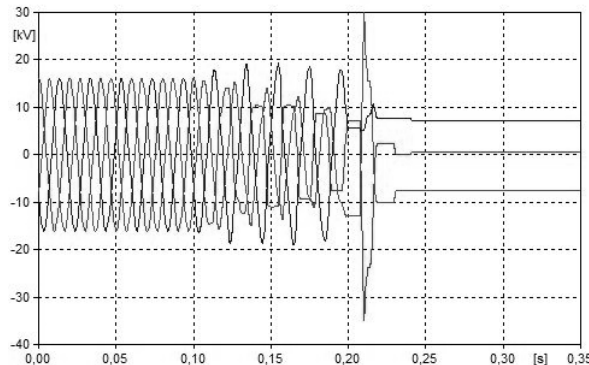
Rys. 6. Przebiegi czasowe napięć fazowych na zaciskach łącznika próżniowego podczas wyłączania obwodu pojemnościowego przy maksymalnym odstępnie styków łącznika 4 mm, prędkości rozchodzenia się styków 0,9 m/s i niejednoczesności otwierania się poszczególnych styków 50 ms

2. Łączniki próżniowe o parametrach konstrukcyjnych układów stykowo-gaszeniowych podanych w rozpatrywanych katalogach [11] i spełniających wymagania norm przedmiotowych [6,7,8,9] nie stwarzają zagrożeń przepięciowych i przetężeniowych w komutowanych obwodach pojemnościowych. Maksymalne przepięcia otrzymane z symulacji nie przekraczały $2U_N$ (rys. 5) i były mniejsze od dopuszczalnych przepięć równych $2\sqrt{2}U_N$. Podobnie przetężenia, które były mniejsze od $1,35I_N$, jak i czas trwania wyłączeń, który wynosił 2-3 s i był mniejszy od dopuszczalnego, równego 5 s (rys.6).



Rys. 7. Przebiegi czasowe napięć fazowych na zaciskach łącznika próżniowego podczas wyłączania obwodu pojemnościowego przy maksymalnym odstępnie styków łącznika 5 mm, prędkości rozchodzenia się styków 0,9 m/s i niejednoczesności otwierania się poszczególnych styków 30 ms

3. W przypadkach, gdy wartości rozpatrywanych parametrów konstrukcyjnych były większe lub mniejsze od podanych w katalogach [11] i normach [6,7,8,9] istnieje możliwość wystąpienia w komutowanym obwodzie nadmiernych przepięć. W przeprowadzonych symulacjach stwierdzono przepięcia o wartości 3,5 krotnie przekraczające wartości znamionowe (rys. 5) przy parametrach: $v = 0,9$ m/s, zwłoka czasowa między wyłączeniem poszczególnych styków 50ms, $d = 8$ mm. Zwiększenie prędkości otwierania się styków powyżej 0,9 m/s powoduje nadmierny wzrost przepięcia na zaciskach wyłączanej baterii kondensatorów, przekraczający 2,5-krotnie wartość napięcia znamionowego (rys. 7).

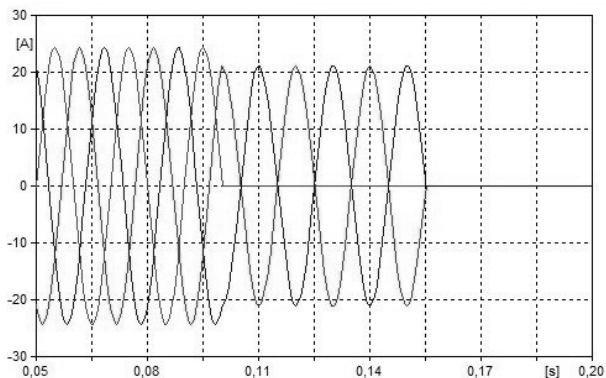


Rys. 8. Przebiegi czasowe napięć fazowych na zaciskach wyłączanej baterii kondensatorów łącznikiem próżniowym o maksymalnym odstępnie styków 8 mm, prędkości rozchodzenia się styków 0,9 m/s i niejednoczesności otwierania się poszczególnych styków 50 ms

4. Szczególnie duże zagrożenie przepięciowe i przetężeniowe może powstawać w przypadku komutacji obwodu pojemnościowego łącznikiem próżniowym, w którym kilka jednocześnie parametrów układu stykowo-gaszeniowego nie spełnia wymagań normy [6,7,8,9] i ma wartości spoza zakresów w niej określonych. Mogą wówczas wystąpić w łączniku ponowne zapłony łuku generujące duże przepięcia i przetężenia. Przeprowadzone symulacje wykazały możliwość pojawienia się ponownych zapłonów łuku przy odległościach międzystykowych z zakresu 1-3 mm i opóźnieniach otwierania się styków w poszczególnych biegunach łącznika większych od 50 ms, a także w przypadkach zbyt małych prędkości otwierania się styków, z zakresu 0,1 - 0,2 m/s i opóźnieniach otwierania się styków w poszczególnych biegunach większych niż 50 ms. Stwierdzone wówczas przepięcia przekraczały 3,5-krotnie wartość napięcia znamionowego.

5. Wartości prądów i prężeń łączeniowych zależą także od sekwencji wyłączania poszczególnych torów prądowych łącznika. Przykładowo, zmiana sekwencji polegającej na kolejnym wyłączaniu poszczególnych biegunów z określonym opóźnieniem (rys. 3) na sekwencję, w której dwie fazy są wyłączane w tym samym momencie, a trzecia z opóźnieniem 50 ms powoduje zmniejszenie się oczekiwanych prądów i prężeń do wartości nie przekraczających 1,2 wartości znamionowych i skrócenie czasu wyłączenia do 1 s.

6. Otrzymane z symulacji wartości prądów i prężeń są w dużej zgodności z rezultatami obliczeń teoretycznych i wyników badań laboratoryjnych podawanych literaturze [1]. Dowodzi to prawdziwości otrzymanych zależności oraz poprawności opracowanego modelu obliczeniowego i jego przydatności praktycznej do szacowania spodziewanych prądów i prężeń podczas komutacji łącznikami próżniowymi obwodów pojemnościowych.



Rys. 9. Przebiegi prądów w obwodzie pojemnościowym podczas jego wyłączenia łącznikiem próżniowym o maksymalnym odstępnie styków 6 mm, prędkości rozchodzenia się styków 0,9 m/s i niejednoczesności otwierania się poszczególnych styków 50 ms

Podsumowanie

Przedstawiony model może stanowić użyteczne narzędzie praktyczne przydatne w pracach projektowych oraz badaniach konstrukcyjnych nowych łączników próżniowych, umożliwiające dobór optymalnych wartości parametrów konstrukcyjnych układów stykowo-gaszeniowych tych łączników z punktu widzenia możliwości ograniczenia generowanych przez te łączniki przepięć i przetężeń. Pozwala on także na ocenę narażeń przepięciowych i przetęzeniowych występujących w eksploatacji obwodów o charakterze pojemnościowym z łącznikami próżniowymi i w razie potrzeby - na określenie parametrów wymaganej ochrony.

Przeprowadzone z zastosowaniem opracowanego modelu obliczeniowego symulacje wykazały, że komutacja obwodów pojemnościowych łącznikami o parametrach konstrukcyjnych układów stykowo-gaszeniowych spełniających wymagania norm przedmiotowych nie stwarza w tych obwodach zagrożeń przepięciowych ani przetęzeniowych. Zagrożenia takie mogą natomiast występować gdy parametry te nie spełniają wymagań norm. Mogą wówczas mieć miejsce także wyłączenia z ponownymi zapłonami łuku w łączniku, generujące nadmiernie duże przepięcia i przetężenia, groźne dla izolacji komutowanego obwodu oraz łącznika

LITERATURA

- [1] Kowalski J., Jak pisać tekst do Przeglądu, *Przegląd Elektrotechniczny*, 78 (2002), nr.5, 125-128
- [2] Johnson B., Pike G.E., Preparation of Papers for Transactions, *IEEE Trans. Magn.*, 50 (2002), n.5, 133-137
- [3] Batura R., *Analiza zjawisk występujących przy łączeniu obwodu pojemnościowego łącznikiem próżniowym*, Praca doktorska Poznań 1990
- [4] Budzisz J., Wróblewski Z., *Switching effects in capacity circuits with a vacuum switch*, konferencja MEPS'10, (20-22 september 2010)
- [5] Budzisz J., Wróblewski Z., *Modeling of switching effects in capacitive circuit with a vacuum switch and varistor surge protection*. *Przegląd Elektrotechniczny*. (2012), R. 88, nr 5a, s. 284-289.
- [6] Budzisz J. Praca doktorska "Przepięcia oraz przetężenia prądowe generowane przez łączniki próżniowe w obwodach o charakterze pojemnościowym" (2012)
- [7] Elwardt J., Veuhoff F.W: *Vacuum circuit breaker model in EMT-ATP for examination of multiple reignition in inductive circuits*. *EEUG News*, (vol. 7, No 3, p. 36-43, 2001)
- [8] PN-EN62271-100:2009 „Wysokonapięciowa aparatura rozdzielcza i sterownicza cz. 100: Wyłączniki wysokiego napięcia prądu przemiennego
- [9] PN_E_04700_1998 „Urządzenia i układy elektryczne w obiektach elektroenergetycznych –Wytyczne przeprowadzania pomontażowych badań odbiorczych.
- [10] PN-EN_60143_2_2002 „Kondensatory energetyczne do szeregowej kompensacji mocy biernej – cz. 2: Urządzenia zabezpieczające szeregowe baterie kondensatorów
- [11] PN-EN_61166:2002 „Wyłączniki wysokonapięciowe prądu przemiennego, przewodnik oceny wyłączników pod względem sejsmicznym
- [12] Wróblewski Z., *Badania i symulacja cyfrowa wybranych właściwości łączników próżniowych*. Monografia z serii Postępy Wielkich Mocy i Wysokich Napięć, Komitetu Elektrotechniki PAN, Oficyna Wydawnicza PWR., Wrocław (2005)
- [13] Strony internetowe:
 - o Eaton.pl
 - o Abb.com
 - o Elma-energia.pl
 - o Wiater Jarosław, strona prywatna, <http://Teleinfo.pb.edu.pl/emc/jw>.
 - o <http://www.eeug.org> – Europejska Grupa Użytkowników ATP-EMT
 - o Elektromontex.com
 - o Tavidra.pl, katalog Wyłącznika ŚN VCB/TEL- wersja shell
 - o Olmex.pl

Autorzy: prof. dr hab. inż. Zbigniew Wróblewski, dr inż. Joanna Budzisz Politechnika Wroclawska, Instytut Energoelektryki, ul. Janiszewskiego 8, 50-372 Wrocław, joanna.budzisz@pwr.wroc.pl