

Tyrystorowe układy przeciwprzepięciowe – zastosowanie i metody badań

Hubert JANICKI¹

Streszczenie

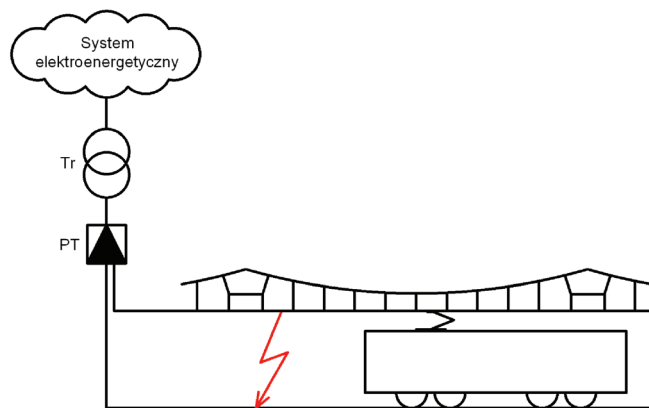
W części teoretycznej artykułu scharakteryzowano wybrane zagadnienia dotyczące przepięć powstających w podstacji trakcyjnej podczas wyłączania zwarc. Przedstawiono wybrane urządzenia działające na podstacji oraz ich funkcje i znaczenie dla prawidłowego działania systemu zasilania 3 kV DC. Opisano proces wyłączania zwarcia przez wyłączniki szybkie, jego skutki i zagrożenia jakie stanowi dla systemu zasilania. Zaprezentowano tyrystorowy układ przeciwprzepięciowy TOP: jego budowę, zasadę działania oraz wpływ na proces wyłączania zwarcia i wynikające z niego korzyści. W części praktycznej artykułu przywołano doświadczenia i wyniki badań zrealizowanych przez Zakład Elektroenergetyki Instytutu Kolejnictwa. Zaprezentowano aparaturę badawczą wykorzystaną w trakcie badań układu TOP. Następnie przedstawiono zrealizowane badania: metodę ich przeprowadzenia oraz wyniki. Poszczególne opisy badań opatrzone stosownymi rysunkami, bądź przebiegami oraz krótką interpretacją uzyskanych wyników.

Słowa kluczowe: tyrystorowy układ przeciwprzepięciowy, zasilanie trakcji elektrycznej, wyłącznik szybki, prąd zwarcia

1. Wprowadzenie

Energia elektryczna dostarczana do systemu zasilania 3 kV DC jest pobierana z krajowego systemu elektroenergetycznego na poziomie napięcia średniego lub wysokiego i dostarczana do podstacji trakcyjnych PT, następnie napięcie przemiennie jest prostowane przez prostowniki trakcyjne (6- lub 12-pulsowe) i dostarczane do pojazdów elektrycznych za pośrednictwem sieci górnej (przewody jezdne i lina nośna) oraz sieci powrotnej (szyny).

W trakcie pracy zelektryfikowanego systemu kolejowego mogą wystąpić sytuacje awaryjne, kiedy dochodzi do zwarcia obwodu zasilania – międzybiegunowego lub doziemnego (rys. 1).

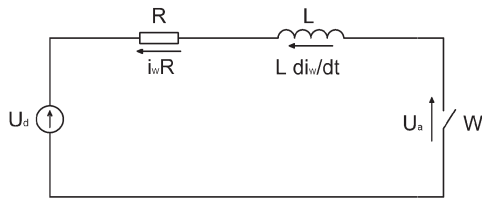


Rys. 1. Zwarcie w systemie zasilania 3 kV DC [opracowanie własne]

Przepływ prądu zwarcia jest istotnym zagrożeniem dla elementów systemu zasilania. Podczas zwarcia na elementach systemu zasilania lub urządzeniach zainstalowanych na / lub w pobliżu linii kolejowej, mogą pojawić się wartości napięć niebezpieczne dla zdrowia i życia. W związku z tym, w głównym obwodzie prądowym w podstacjach trakcyjnych zainstalowano wyłączniki szybkie prądu stałego, będące podstawową ochroną przed przepływem prądów zwarcia. Metody badań wyłącznika szybkiego opisano w [6]. Gdy wartość prądu płynącego w obwodzie głównym przekroczy wartość nastawy wyłącznika szybkiego, wówczas następuje wyzwolenie napędu wyłącznika i przerwanie prądu zwarcia.

Proces wyłączania zwarcia w układzie przedstawionym na rysunku 1 przebiega następująco. W wyniku wystąpienia w obwodzie zasilania sytuacji awaryjnej, np. zwarcie w układzie sieci, następuje zamknięcie się obwodu zwarcia i pojawienie się prądu zwarcia. W przypadku zwarcia, prąd może osiągać bardzo duże wartości, rzędu dziesiątek kiloamperów. Narastanie prądu nie zachodzi w sposób skokowy. Zgodnie z prawem komutacji, prąd zwarcia w obwodzie z indukcyjnością narasta z pewną stromością, ściśle zależną od wartości tej indukcyjności. W systemie zasilania występują naturalne indukcyjności obwodu oraz przede wszystkim dławik katodowy włączony w obwód PT i indukcyjność sieci trakcyjnej (rys. 2). W czasie osiągnięcia przez prąd zwarcia wartości nastawy wyłącznika szybkiego następuje wyzwolenie się napędu wyłącznika i zaczyna się proces wyłączania prądu zwarcia.

¹ Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Zakład Elektroenergetyki; e-mail: hjanicki@ikolej.pl.



Rys. 2. Schemat zastępczy układu prądu stałego 3 kV DC: U_d – napięcie zasilające, i_wR – prąd wyłączany, R – rezystancja wypadkowa układu, L – indukcyjność wypadkowa układu, U_a – napięcie łuku na wyłączniku W [opracowanie własne]

Na podstawie II prawa Kirchhoffa, schemat ten można opisać równaniem [1]:

$$U_d = Ri_w + L \frac{di_w}{dt} + U_a \quad (1)$$

zatem napięcie łuku elektrycznego wynosi

$$U_a = U_d - Ri_w - L \frac{di_w}{dt} \quad (2)$$

Jeśli:

$$\frac{di_w}{dt} < 0 \quad (3)$$

to wówczas równanie (2) przyjmuje postać

$$U_a = U_d - Ri_w + L \frac{di_w}{dt} \quad (4)$$

Należy mieć na uwadze fakt, że pochodna prądu w wyrażeniu odpowiadającym za spadek napięcia na indukcyjności może przyjąć wartość ujemną – dzieje się to, gdy wyłącznik zaczyna ograniczać prąd zwarcia i zaczyna on maleć. Można spotkać się wówczas z sytuacją, kiedy napięcie łuku może być większe, i to wielokrotnie, niż napięcie źródłowe U_d .

W momencie wyłączenia zwarcia pojawiają się przebiegi o wartości proporcjonalnej do indukcyjności i szybkości zmian prądu w obwodzie. Wysokie poziomy przebieg są zagrożeniem dla izolacji urządzeń podstawowych, taboru oraz sieci trakcyjnej, dlatego, jako jeden z najbardziej skutecznych środków ograniczających napięcia łączeniowe, wykorzystuje się układ z tyrystorowym ogranicznikiem przebieg TOP włączonym równolegle do dławika katodowego [5, 6].

2. Budowa TOP

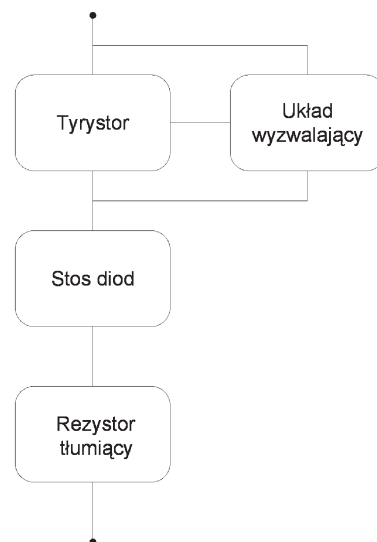
Układ TOP składa się z połączonych ze sobą szeregowo następujących elementów [2]:

1. Tyrystora – elementu półprzewodnikowego złożonego z czterech warstw p-n-p-n. Zadaniem tyrystora w układzie TOP jest zamknięcie obwodu: dławik katodowy –

rezystor, w momencie wystąpienia na zaciskach układu TOP przebiegi o określonej wartości.

2. Układu wyzwalającego – układ składający się z elektrod mierzących spadek napięcia na zaciskach układu TOP oraz obwodu elektroniczno-logicznego. W momencie wystąpienia przebiegi o określonej wartości na zaciskach TOP, układ podaje sygnał na bramkę tyrystora i wprowadza go w stan przewodzenia.
3. Stosu diod – w trakcie normalnej pracy układu zasilania, diody zabezpieczają tyrystor przed wysokim napięciem tak, aby nie nastąpiło jego przebicie i przepływ prądu roboczego przez układ.
4. Rezystora tłumiącego – na rezystorze tłumiącym następuje rozproszenie energii nagromadzonej w dławiku, głównie w postaci ciepła.

Na rysunku 3 przedstawiono schemat blokowy układu TOP, a na rysunku 4 zaprezentowano przykładowe urządzenie.



Rys. 3. Schemat blokowy układu TOP [opracowanie własne]



Rys. 4. Przykładowe wykonanie tyrystorowego układu przeciwprzebiegiowego [źródło: strona internetowa producenta]

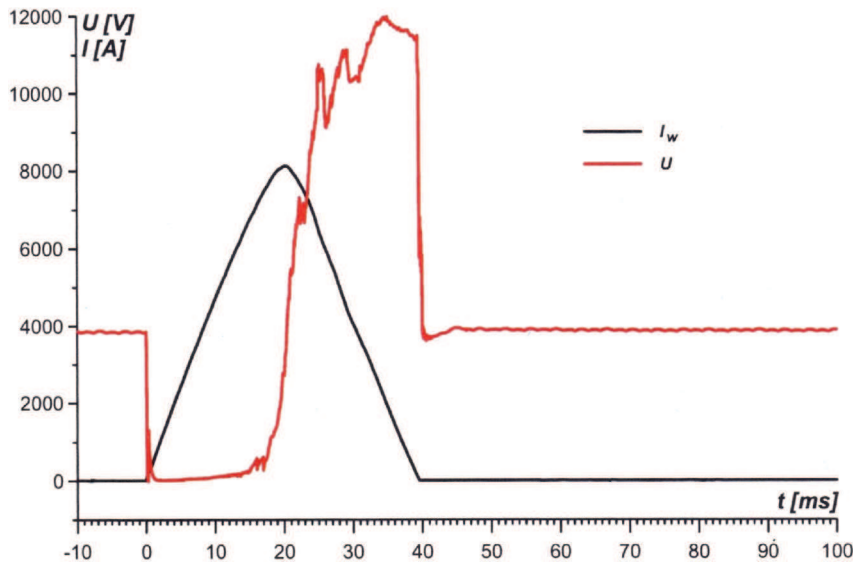
3. Zasada działania

Układ TOP załącza się przy wystąpieniu na jego zaciskach przepięć o wartości rzędu 500–700 V. Wynika to z faktu, że prąd wyjściowy zespołu trakcyjnego w trakcie normalnej pracy zawiera w sobie tętnienia wynikające z komutacji na mostku prostownikowym. Opadające zbocza prądu, zgodnie ze wzorem (3), powodują na dławiku ciągłe występowanie przepięć o małych wartościach. Te małe przepięcia są pomijalne i nieszkodliwe dla elementów systemu zasilania i nie muszą być eliminowane, stąd elementy TOP dobierane są tak, aby eliminować jedynie przepięcia powstałe w wyniku zwarcia.

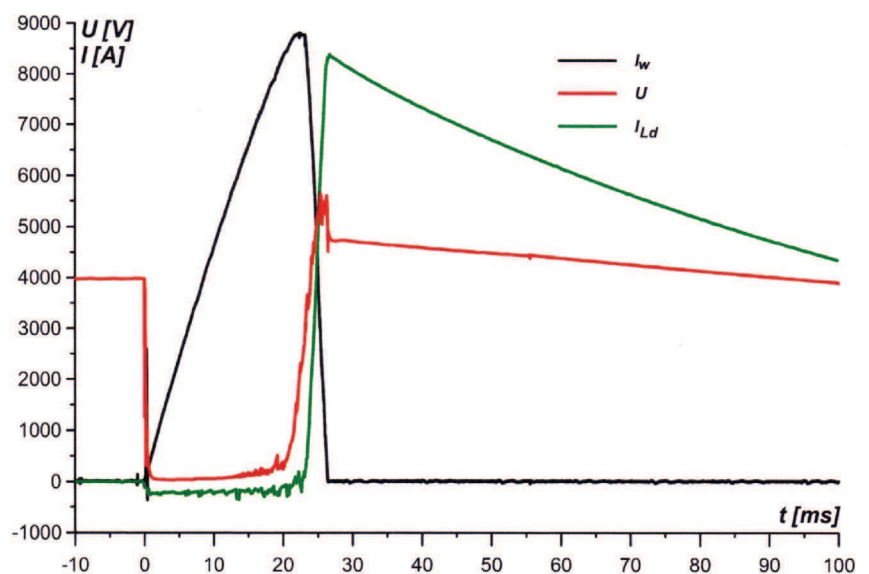
W momencie wystąpienia na zaciskach TOP napięcia o określonej wartości, przechodzi on w stan przewodzenia. Umożliwia to przepływ prądu wywołanego przepięciem.

Energia zgromadzona w dławiku katodowym zostaje zamieniona w ciepło na rezystancji obwodu: TOP – dławik wygładzający. Dodatkową korzyścią płynącą z zastosowania układu TOP jest skrócenie czasu wyłączenia zwarcia. Wynika to ze zbocznikowania dławika katodowego małą rezystancją, co umożliwia szybsze zmiany prądu w obwodzie zwarcia i w efekcie prowadzi do skrócenia czasu palenia się łuku elektrycznego w komorze gaseniowej wyłącznika szybkiego. Oznacza to mniejsze zużycie styków wyłącznika oraz komory.

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe przebiegi prądu zwarcia i napięcia zasilania (na zaciskach wyłącznika szybkiego) w układzie bez tyrystorowego układu przeciwprzepięciowego. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe przebiegi prądu zwarcia i napięcia na zaciskach WS przy zainstalowanym w obwodzie układzie TOP.



Rys. 5. Przebieg prądu zwarcia i napięcia łączeniowego dla obwodu bez układu przeciwprzepięciowego: i_w – prąd wyłączany, U – napięcie na zaciskach wyłącznika szybkiego [6]



Rys. 6. Przebieg napięcia i prądów zwarcia dla obwodu z układem przeciwprzepięciowym: i_w – prąd wyłączany, i_{Ld} – prąd w obwodzie; TOP – dławik katodowy, U – napięcie na zaciskach wyłącznika szybkiego [6]

4. Wymagania stawiane TOP

Dotychczas, Europejski Komitet Normalizacyjny Elektrotechniki (CENELEC) i Polski Komitet Normalizacyjny nie wydały normy, odpowiednio europejskiej lub krajowej, dotyczącej tyrystorowych układów przeciwprzepięciowych. Należy nadmienić, że od firm i podmiotów nie wymaga się bezwzględnego stosowania norm, jednak firmy i podmioty, które je stosują i spełniają wymagania w nich stawiane, udowadniają w ten sposób, że ich produkty osiągnęły pewien poziom jakości, bezpieczeństwa i niezawodności.

W związku z tym, producenci tyrystorowych układów przeciwprzepięciowych, jak i operatorzy systemu zasilania 3 kV DC, muszą określać wymagania stawiane układom TOP na podstawie specjalistycznej wiedzy i doświadczeń. Przykładowo, PKP Energetyka S.A. w swoich standardach [3] częściowo określa wymagania stawiane układom przeciwprzepięciowym. Wymagania te zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Wymagania stawiane układom przeciwprzepięciowym przez PKP Energetyka S.A.

Parametr	Wartość
Napięcie blokowania [V]:	
– znamionowe	3000
– max powtarzalne	3600
– max niepowtarzalne	3900
Wytrzymałość na zwyzkę napięcia blokowania / 10 s [kV]	12
Wytrzymałość na udar prądu [A]	8000
Stopień ochrony [-]	IP00

Opracowanie własne na podstawie [3].

5. Metodyka badań układów TOP

5.1. Warunki przeprowadzenia badań

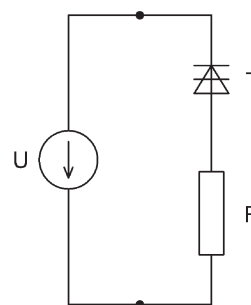
Próby poziomu wyzwalania, wytrzymałości napięciowej oraz badanie izolacji należy wykonywać na stanowisku izolowanym, w pomieszczeniu zamkniętym. Próbę obciążenia prądowego, ze względu na jej charakter, można przeprowadzić wyłącznie w laboratorium zwarciovym. Układ zasilania w laboratorium składa się z: prostownika trakcyjnego zasilonego z transformatora wysokonapięciowego, regulowanego dławika katodowego, rezystorów z możliwością doboru rezystancji, wyłącznika szybkiego i odłączników. Układ TOP zostaje zatem włączony w układ zasilania o zadanych parametrach, symulujących warunki występujące na rzeczywistych podstacjach trakcyjnych.

Podczas przeprowadzania tych prób należy zachować ostrożność i przestrzegać zasad BHP obowiązujących podczas pracy z wysokim napięciem. Prace przygotowawcze do prób oraz same próby może wykonywać wyłącznie

przeszkolony personel posiadający aktualne świadectwa SEP w zakresie eksploatacji. Dodatkowo, podczas prób wykonywanych w laboratorium zwarciovym wymaga się, aby kierownik zespołu wykonującego prace miał aktualne świadectwo SEP w zakresie dozoru.

5.2. Poziom wyzwalania

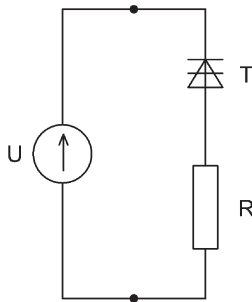
Badanie poziomu wyzwalania ma na celu określenie, przy jakiej wartości napięcia tyrystor układu przeciwprzepięciowego przechodzi w stan przewodzenia. W tym celu do zacisków układu podłącza się zadajnik napięcia stałego. Biegun dodatni zadawanego napięcia należy podać na zacisk odpowiadający anodzie tyrystora, biegun ujemny zaś na zacisk odpowiadający katodzie tyrystora, jak przedstawiono na rysunku 7. Następnie stopniowo zwiększa się napięcie, aż do momentu wyzwolenia tyrystora. Próbę należy powtórzyć, co najmniej 5-krotnie. Poziom wyzwalania układu określa się jako wartość uśrednionego napięcia uzyskanego podczas prób. Wynik prób jest pozytywny wówczas, gdy poziom wyzwalania tyrystora mieści się w przedziale 500–700 V.



Rys. 7. Schemat obwodu do badania poziomu wyzwalania układu przeciwprzepięciowego: U – zadajnik napięcia stałego, T – tyrystor układu TOP, R – rezystor układu TOP [opracowanie własne]

5.3. Wytrzymałość napięciowa

Badanie wytrzymałości napięciowej wstecznej ma na celu stwierdzenie czy nastąpi uszkodzenie układu przeciwprzepięciowego w trakcie normalnej pracy układu zasilania oraz chwilowych skoków napięcia. Do zacisków układu podłącza się zadajnik napięcia stałego. Biegun dodatni zadawanego napięcia należy podać na zacisk odpowiadający katodzie tyrystora, biegun ujemny zaś na zacisk odpowiadający anodzie tyrystora, jak przedstawiono na rysunku 8. Następnie należy zadawać napięcie zaczynając od najniższej wartości: 6, 8, 10, 12 kV. Stopniowanie napięcia umożliwia określenie, w jakim zakresie napięcia układ przeciwprzepięciowy uległ uszkodzeniu w przypadku negatywnego wyniku. Każda próba wytrzymałości napięciowej powinna trwać 1 minutę. W obrębie każdego poziomu napięcia wskazane jest wykonanie co najmniej 5 prób. Wynik próby jest pozytywny, gdy układ wytrzyma próby z narażeniem napięciem $U = 12$ kV/min.



Rys. 8. Schemat obwodu do badania wytrzymałości napięciowej wstecznej układu przeciwprzepięciowego: U – zadajnik napięcia stałego, T – tyrystor układu TOP, R – rezystor układu TOP [opracowanie własne]

5.4. Badania izolacji

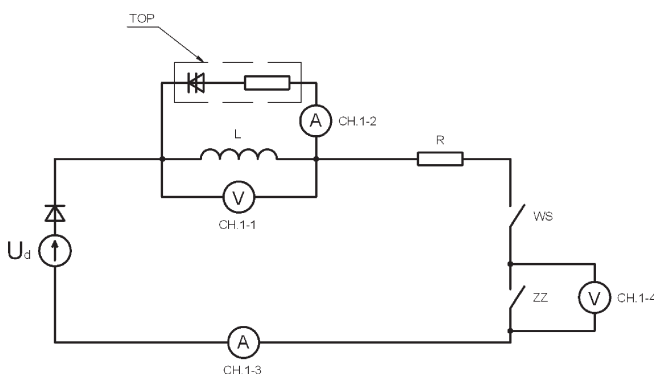
Badanie izolacji ma na celu określenie, czy w układzie przeciwprzepięciowym w sposób poprawny dobrano izolatory oraz odstępy izolacyjne, co umożliwi bezawaryjną pracę układu. W celu określenia poprawności doboru izolacji należy za pomocą miernika izolacji zbadać określone pary elementów badanego układu:

- obwód główny – metalowa podstawa: 15 kV DC/1 min,
- obwód główny – obwód pomocniczy: 15 kV DC/1 min,
- obwód pomocniczy – metalowa podstawa: 500 V DC/1 min.

Każdą z prób należy powtórzyć co najmniej 5-krotnie. Jeżeli w trakcie próby nie wystąpiło przebicie warstwy izolacyjnej ani odstępu izolacyjnego, to izolację układu dobrano w sposób prawidłowy i wynik próby jest pozytywny.

5.5. Obciążalność prądowa

Próbę obciążalności prądowej należy przeprowadzać w obwodzie połączonym według schematu przedstawionego na rysunku 9. Wartość indukcyjności włączonej w obwód powinna wynosić około 8 mH, co jest odwzorowaniem indukcyjności o dużej wartości występujących w obwodach rzeczywistych. Układ wyzwalający wyłącznika szybkiego należy ustawić na wartość około 2500 A.



Rys. 9. Schemat obwodu do badania obciążalności prądowej układu przeciwprzepięciowego: L – dławik, R – skupiona rezystancja obwodu, WS – wyłącznik szybki, ZZ – załącznik zwarciowy, U_d – napięcie zasilające z zacisków prostownika trakcyjnego [opracowanie własne]

Po podaniu napięcia zasilającego z prostownika trakcyjnego należy zamknąć wyłącznik szybki WS . Wówczas jedyną przerwę w obwodzie stanowi załącznik zwarciowy ZZ . Zamknięcie ZZ inicjuje zwarcie, które powinno zostać przerwane po osiągnięciu przez prąd zwarcia nastawy wyłącznika szybkiego WS . Całkowity czas wyłączenia zwarcia powinien wynieść około 400 ms. W trakcie próby należy zarejestrować następujące przebiegi:

- CH.1-1 – spadku napięcia na układzie UP500 / dławiku katodowym,
- CH.1-2 – prądu w układzie TOP – dławik katodowy,
- CH.1-3 – prądu zwarciowego,
- CH.1-4 – napięcia na zaciskach załącznika zwarciowego ZZ .

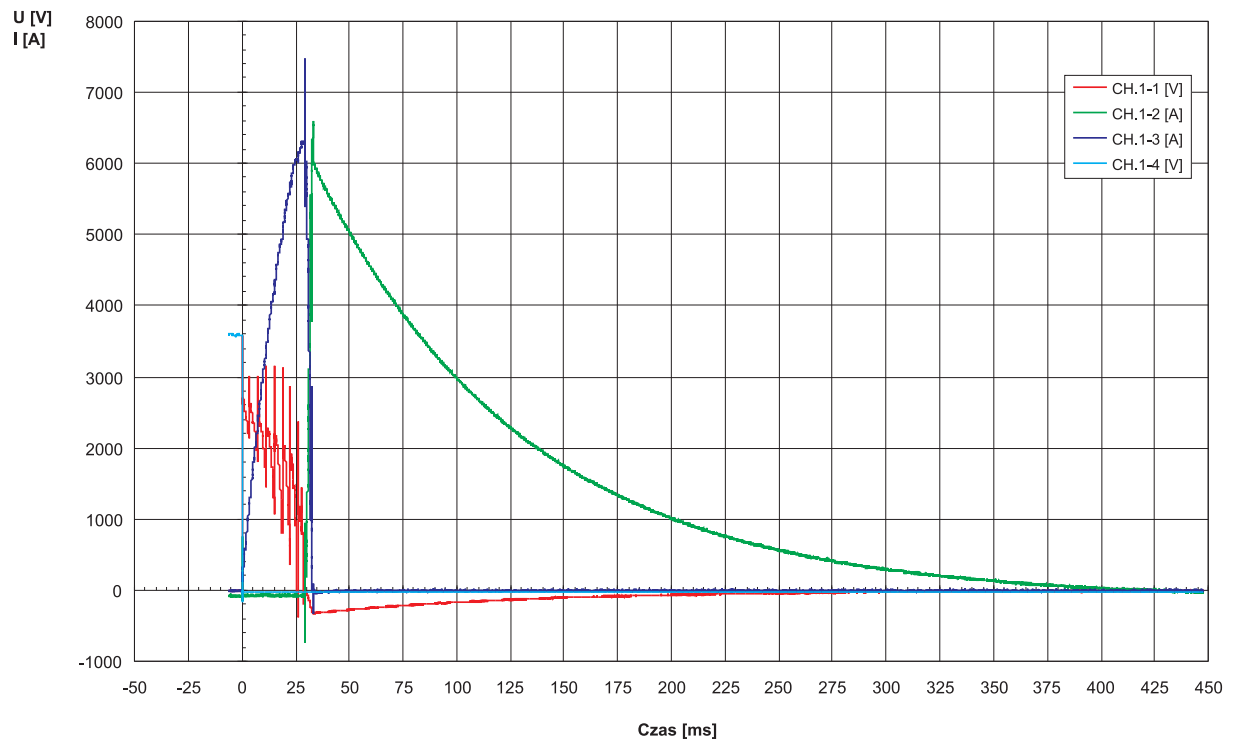
Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono przykładowe przebiegi zmian napięcia i prądu zarejestrowane w trakcie jednej z prób obciążalności prądowej układu TOP.

6. Podsumowanie

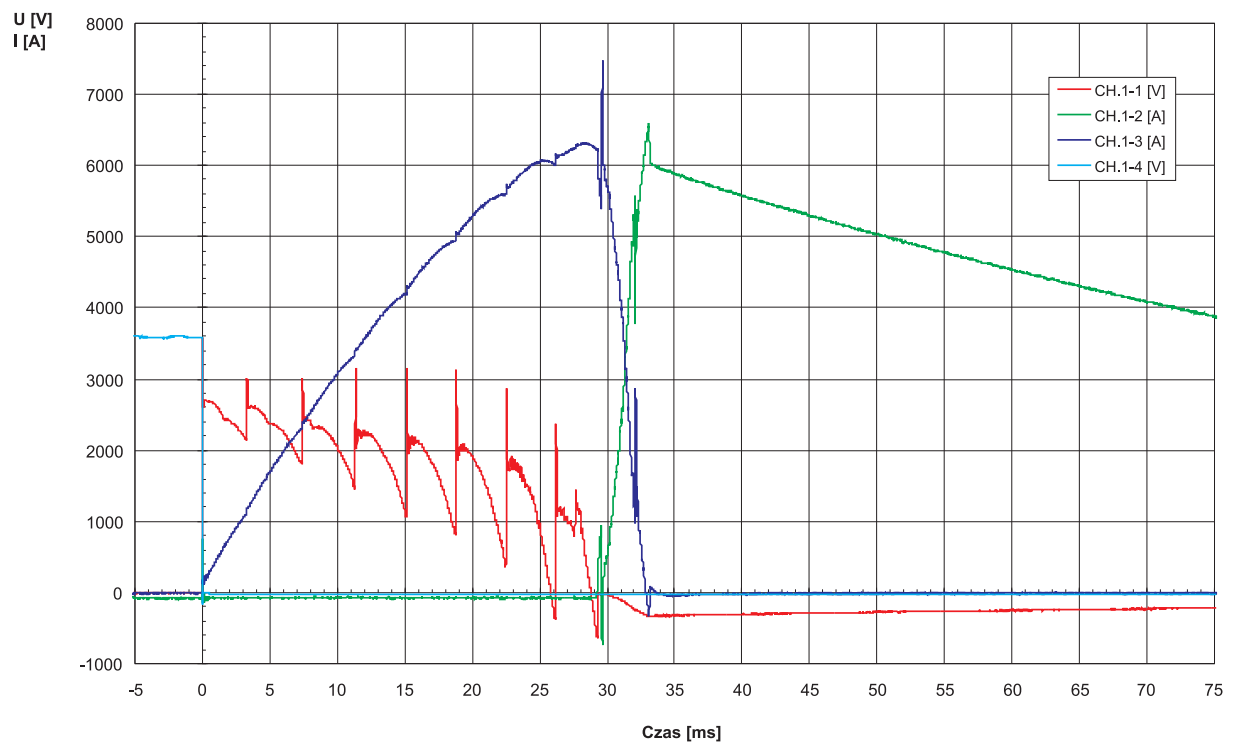
Ochrona urządzeń energetycznych przed przepięciami jest ważnym aspektem przy projektowaniu układów energetycznych podstacji trakcyjnych. Ponieważ przepięcia powstałe w obwodach głównych podstacji trakcyjnych niosą dużą energię, jest możliwe uszkodzenie prostowników, transformatorów oraz innych urządzeń energetycznych. Przepięcia takie mogłyby być również wynoszone poza obszar podstacji trakcyjnej. Wykorzystanie układów tyrystorowych zapewnia ograniczanie powstałych przepięć, a jednocześnie są to układy bezawaryjne i niewymagające prac utrzymaniowych.

Bibliografia

1. Bolkowski S.: *Teoria obwodów elektrycznych*, Wydawnictwo WNT, 2008.
2. Kaźmierkowski M.P., Matysik J.T.: *Wprowadzenie do elektroniki i energoelektroniki*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005.
3. PKP Energetyka S.A.: *Standardy Techniczne, Zeszyt VI: Zespoły prostownikowe – wymagania i parametry*, Warszawa, 04.10.2017.
4. Rojek A., Sidorowicz M.: *Researches and tests of high-speed circuit breakers for rolling stock and substations in 3 kV DC traction power system*. Problemy Kolejnictwa 2013, zeszyt 159.
5. Rojek A.: *Nowe i najnowsze rozwiązania w układzie zasilania trakcji elektrycznej w Polsce*, Technika Transportu Szynowego 2003, zeszyt 7–8.
6. Rojek A.: *Wyłączniki szybkie prądu stałego w transporcie szynowym*. Wydawnictwo Instytutu Kolejnictwa, 2016.



Rys. 10. Przebiegi napięcia i prądu podczas zwarcia obwodu przedstawionego na rysunku 9 [opracowanie własne]



Rys. 11. Początkowy fragment przebiegu przedstawionego na rysunku 10 [opracowanie własne]