

Jerzy PRZYBYSZ
Maciej OWSIŃSKI
Zbigniew PIĄTEK

PRAKTYCZNE ASPEKTY WYTRZYMAŁOŚCI ZWARCIOWEJ URZĄDZEŃ Z PÓLPRZEWODNIKAMI MOCY

STRESZCZENIE *W ramach prowadzonych w Instytucie Energetyki w Warszawie badań urządzeń elektroenergetycznych wykonywane są między innymi próby sprawdzania ich wytrzymałości zwarciowej. W niniejszym artykule zebrano doświadczenia uzyskane podczas badań dla elementów półprzewodnikowych dużej mocy. Przedstawiono zachowanie się obiektów wyposażonych w elementy półprzewodnikowe, między innymi podczas łączenia prądów zwarciowych w stanie pracy znamionowej i awaryjnej. Pokazano zalety stosowania takich rozwiązań oraz omówiono zasadność wykonywania badań pozwalających uzyskać charakterystyki dynamiczne wykorzystywanych elementów półprzewodnikowych. Zwrócono również uwagę na zalety wykorzystania na etapie konstruktorskim zależności przejściowej impedancji termicznej struktur półprzewodników.*

Słowa kluczowe: *półprzewodniki, tyrystory, diody, wytrzymałość zwarciowa, badania*

1. WSTĘP

W ramach prowadzonych w Instytucie Energetyki w Warszawie badań urządzeń elektroenergetycznych wykonywane są między innymi bardzo istotne dla bezpieczeństwa eksploatacyjnego próby zwarciowej wytrzymałości elektrodynamicznej i cieplnej tych urządzeń. Mają one szczególne znaczenie dla obiektów zawierających

**dr hab. inż. Jerzy PRZYBYSZ, prof. IEn, mgr inż. Maciej OWSIŃSKI,
inż. Zbigniew PIĄTEK**

e-mail: [jerzy.przybysz; maciej.owsinski; zbigniew.piatek]@ien.com.pl

Instytut Energetyki – Instytut Badawczy, 01-330 Warszawa, ul. Mory 8

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 270, 2015

tory wieloprądowe i/lub pracujących w obwodach o dużych mocach zwarciovych zasilania. Sposób wykonania takich prób opisywany jest najczęściej w odpowiednich normach [1] i zależy od rodzaju badanego obiektu.

Od kilku lat coraz częściej laboratoria Pionu Elektrycznego IEn prowadzą wymienione wyżej badania na urządzeniach zawierających elementy elektroniczne mocy – tyrystory i diody – pełniące funkcje łączników. W literaturze można spotkać liczne przykłady [2, 3] urządzeń stosowanych w elektroenergetyce. Występujące w takich obiektach prądy zwarciovowe są najczęściej prądami stanów awaryjnych obwodów, w których urządzenia te są instalowane. Oznacza to, że na etapie projektowania i konstruowania tej grupy urządzeń szczególny nacisk kładzie się na dobór elementów i rozwiązań technicznych zapewniających jak najlepsze działanie w zakresie ich pracy znamionowej, a więc przy przepływie prądów roboczych wielokrotnie niższych od awaryjnych prądów zwarciovych. Zdarzają się jednakże urządzenia (np. załącznik zwarciovowy), dla których prąd zwarciovowy jest jednocześnie ich prądem znamionowym.

Optymalizacja współczesnych konstrukcji tej grupy obiektów narzuca między innymi konieczność przesuwania punktów pracy elementów półprzewodnikowych ze strefy pracy ustalonej do strefy pracy awaryjnej (dopuszczalnej krótkotrwale). Ilustracją tej filozofii precyzyjnego, optymalnego projektowania może być hipotetyczne urządzenie o prądzie krótkotrwałym na poziomie 30 kA konstruowane na bazie struktur półprzewodnikowych o prądach znamionowych 3000 A. Dwa przykładowe, skrajnie różnorodne podejścia koncepcyjne realizujące bezawaryjne przewodzenie tak dużego prądu mogą polegać na:

- a) połączeniu równoległym 10 elementów, wynikającym z ich prądów znamionowych,
- b) zastosowaniu jednego elementu o prądzie I_{TSM} (peak one cycle surge current) wynoszącym np. 75 kA, wybranego w oparciu o pozytywne wyniki odpowiednich obliczeń cieplnych.

Praktycznym zaleceniem układowym jest stosowanie optymalizacji poprzez minimalizację ilości elementów w oparciu o obliczenia, jednakże z jednoczesnym zachowaniem rozsądnego „marginesu bezpieczeństwa” polegającym na minimalnym zwiększeniu liczby elementów w przypadkach wyników obliczeń zwarciovych zawierających się w obszarze granicznych możliwości półprzewodników (w naszym przykładzie zamiast 10-u czy też 1-go elementu zastosować 2).

Możliwość opracowania optymalnej konstrukcji urządzenia z elementami elektronicznymi mającego określoną wytrzymałość zwarciovą zdeterminowana jest znajomością zarówno parametrów zwarciovych obwodu, jak i odpowiednich wielkości charakterystycznych elementów półprzewodnikowych.

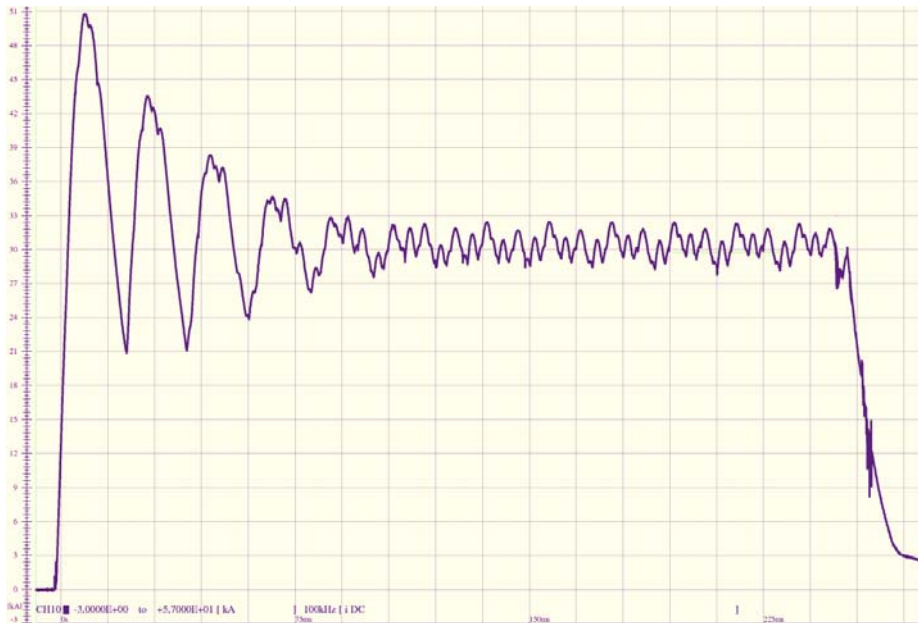
2. WYTRZYMAŁOŚĆ ZWARCIOWA ELEMENTÓW PÓLPRZEWODNIKOWYCH

Parametry zwarciovowe, a szczególnie przebieg prądu zwarciovowego, zależą od parametrów obwodu zwarciovowego i miejsca wystąpienia zwarcia. Na potrzeby niniejszej

pracy na rysunkach 1, 2 i 3 zaprezentowano przykładowe przebiegi prądów zwarciowych występujące w obwodach:

- prostownika 12-to pulsowego, zasilanego z transformatora 3-fazowego, trójzwojowego, przy zwarceniu bezpośrednio na zaciskach prostownika;
- prostownika 6-cio pulsowego, zasilanego z trzech transformatorów 1-fazowych, dwuzwojowych, przy zwarceniu w obwodzie obciążenia DC w znacznej odległości od zacisków wyjściowych prostownika;
- jednofazowego łącznika półprzewodnikowego AC w układzie odwrotnie równoległym, przy zwarceniu bezpośrednio na wyjściu łącznika.

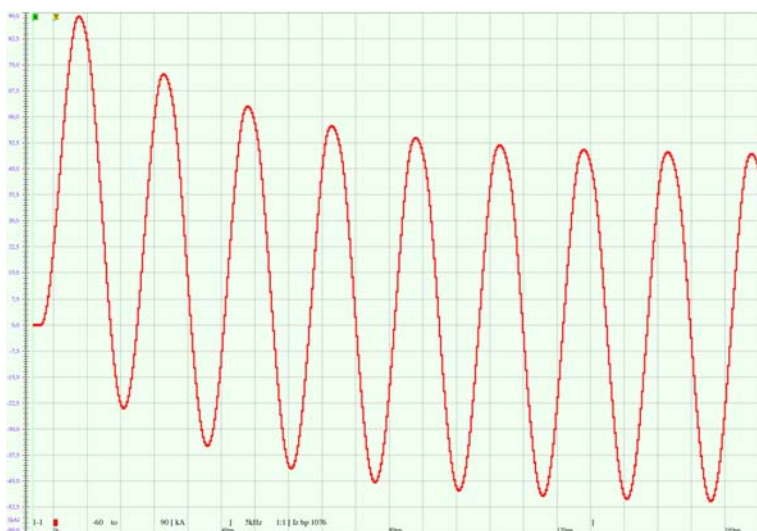
Do najbardziej istotnych z punktu widzenia wytrzymałości zwarciowej wielkości charakterystycznych elementów półprzewodnikowych zaliczyć należy wspomniany już wyżej niepowtarzalny graniczny prąd szczytowy (I_{TSM}) oraz przejściową impedancję termiczną złącze-obudowa w funkcji czasu ($Z_{thj-c}(t)$). Aby praktycznie skorzystać z impedancji termicznej Z_{thj-c} elementu półprzewodnikowego niezbędna jest znajomość jego dalszych, powiązanych ze sobą, istotnych parametrów jak: zależność spadku napięcia na złączu (V_T) od wartości przepływającego przez nie prądu (i_T), i dalej rezystancji dynamicznej złącza półprzewodnikowego (r) dla konkretnego zakresu prądowego (i_T). Renomowane firmy zajmujące się produkcją i/lub dystrybucją diod i tyrystorów mocy zamieszczają te informacje w kartach katalogowych elementów. Tu jednak zaczyna się poważny praktyczny problem, gdyż informacje



Rys. 1. Przebiegi prądu zwarciowego przy zwarceniu na zaciskach prostownika 12-pulsowego



Rys. 2. Przebiegi prądu zwarciovego przy zwarciu na obciążeniu prostownika 6-pulsowego



Rys. 3. Przebiegi prądu zwarciovego przy zwarciu na wyjściu tyrystorowego łącznika AC

techniczne zawarte w kartach katalogowych odnoszą się do wartości średnich i/lub granicznych dla całej populacji elementów danego typu, lub – co jest najgorsze – są po prostu niewiarygodne. Zdarza się również, że kolejne partie elementów tego samego typu mają zdecydowanie różne parametry elektryczne, a nawet mechaniczne. Jest to sytuacja bardzo niekorzystna, gdyż nieposiadanie odpowiednich prawidłowych

parametrów technicznych elementów półprzewodnikowych może prowadzić do ich uszkodzenia [4] w przypadku, na przykład badania wytrzymałości zwarciowej.

2.1. Obliczenia dla przykładowego półprzewodnika

W literaturze dostępnych jest wiele informacji [5, 6] dotyczących sposobu wykonywania obliczeń dla elementów półprzewodnikowych. Na potrzeby niniejszej pracy posłużymy się przykładem typoszeregu tyrystora mocy TCS4_340HDH firmy POWEREX o prądzie znamionowym $I_{TAVG} = 3400$ A i napięciu wstecznym $V_{DRM} = V_{RRM}$ do 2800 V. Już w tym miejscu należy zaznaczyć, że autorzy dysponują dwoma wersjami kart katalogowych [7, 8] producenta dla tego typoszeregu tyrystorów:

- z roku 2004, w którym prąd $I_{TSM} = 56,6$ kA, a przybliżona masa elementu = 2,09 kg,
- z roku 2010, w którym prąd $I_{TSM} = 75,4$ kA, a przybliżona masa elementu = 1,45 kg.

Warto zauważyć, że różnice podanych wartości prądu i wagi elementu przekraczają 30%.

Katalogowa zależność na impedancję cieplną tyrystora opisana jest równaniem:

$$Z_{thj-c}(t) = \sum_{i=1}^n R_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \quad [^{\circ}\text{C/W}] \quad (1)$$

gdzie, dla struktury obustronnie chłodzonej:

$n =$	1	2	3	4	
$R_i =$	1,43E-04	9,08E-04	2,37E-03	4,60E-03	[$^{\circ}\text{C/W}$]
$\tau_i =$	2,62E-03	2,31E-02	5,00E-01	8,00E-03	[s],

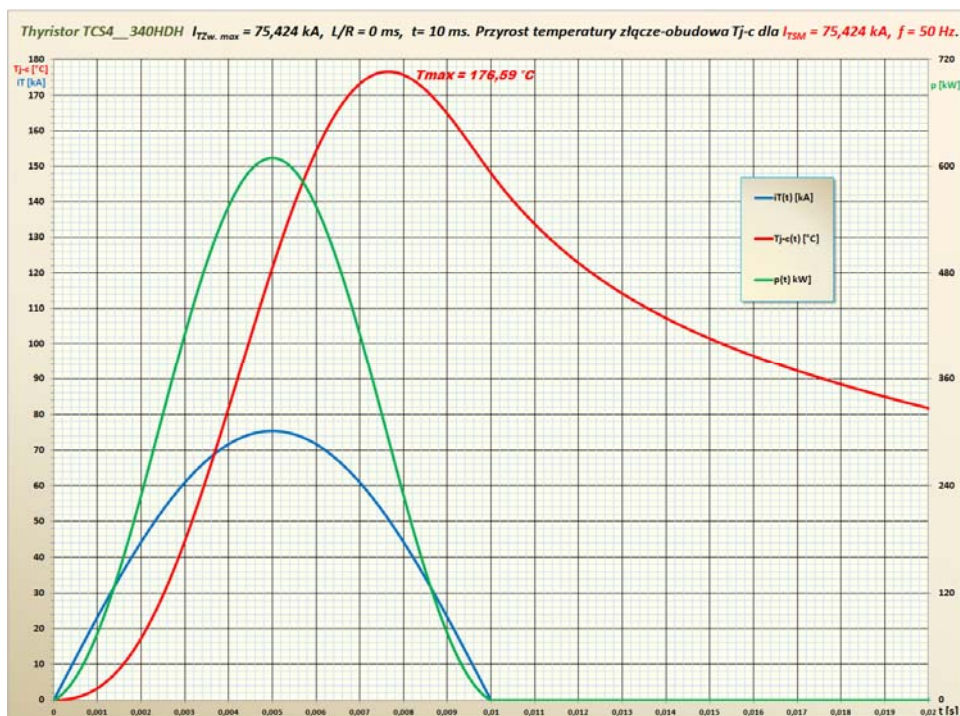
natomiast spadek napięcia na elektrodach elementu wyrażono zależnością:

$$V_{TM} = 0,262 + 0,101 \cdot \ln(i_{TM}) + 9,64 \cdot 10^{-5} \cdot i_{TM} - 2,12 \cdot 10^{-3} \cdot i_{TM}^{\frac{1}{2}} \quad [\text{V}] \quad (2)$$

W równaniu tym występuje uśredniona wartość rezystancji dynamicznej złącza $r = 96,4$ [$\mu\Omega$].

Znając te zależności charakterystyczne elementu półprzewodnikowego można przystąpić do wyznaczenia termicznej odpowiedzi impulsowej tyrystora na pobudzenie mocą traconą w złączu w postaci skoku jednostkowego $p(t) = P_0 \cdot 1(t)$ [W], czyli wyznaczyć temperaturę złącza wg wzoru:

$$T_j(t) = T_c + \int_{-\infty}^t p(\vartheta) * Z'_{thj-c}(t - \vartheta) d\vartheta \quad [^{\circ}\text{C/W}] \quad (3)$$



Rys. 4. Przebiegi przyrostu temperatury T_{j-c} , mocy traconej w złączu p oraz prądu I_{TSM} wywołującego ten efekt cieplny

Aby umożliwić wyznaczanie przebiegów czasowych przyrostów temperatury między złączami elementów półprzewodnikowych a ich obudowami ($T_{j-c} = f(t)$) przy przepływie rzeczywistych prądów zwarciovych, autorzy opracowali program obliczeniowy aproksymujący zmienny w czasie przebieg mocy strat w strukturze półprzewodnikowej superpozycją odpowiednich, zgodnych z definicją impedancji termicznej, impulsów prostokątnych mocy w postaci skoków jednostkowych. Należy podkreślić, że warunkiem koniecznym dla umożliwienia tych obliczeń jest podanie przez producenta wiarygodnej zależności na przejściową impedancję termiczną $Z_{thj-c}(t)$.

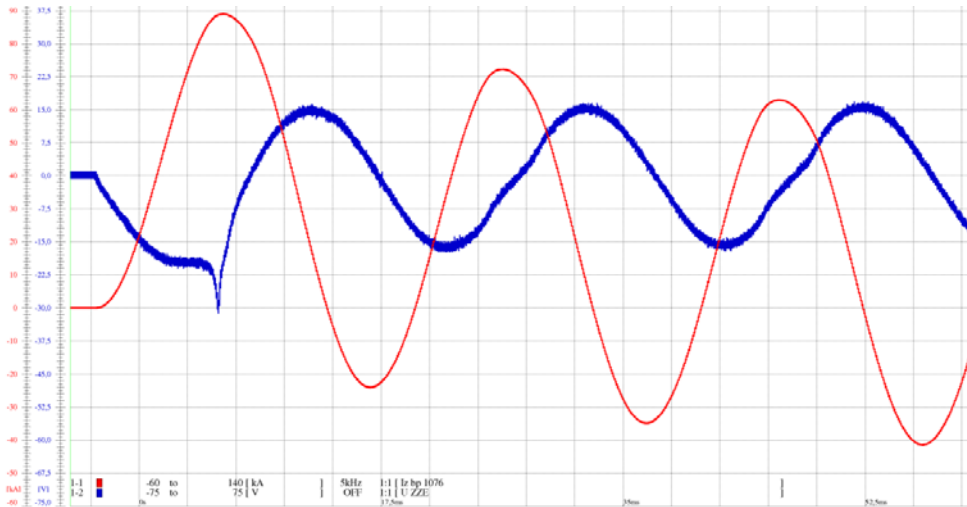
Ilustrację graficzną wyników takich obliczeń dla katalogowego impulsu prądowego $I_{TSM} = 75,4$ kA (przebieg koloru niebieskiego) przedstawiono na rysunku 4. Końcowym rezultatem oddziaływania tego prądu jest ciepło opisywane przyrostem temperatury złącze-obudowa T_{j-c} elementu półprzewodnikowego (przebieg koloru czerwonego) zależne bezpośrednio od przebiegu mocy chwilowej traconej w złączu (przebieg zielony) wyznaczonego z katalogowej zależności na V_{TM} . Dla katalogowego niepowtarzalnego granicznego prądu szczytowego ($I_{TSM} = 75,4$ kA) otrzymano maksymalny przyrost temperatury złącze-obudowa około 177°C. Jest to istotny wskaźnik graniczny – obok katalogowej dopuszczalnej temperatury pracy złącza – pomocny przy określaniu zwarciovych wytrzymałości cieplnej elementów półprze-

wodnikowych. Należy pamiętać, że maksymalna temperatura złącza wywołana przepływem prądu zwarciowego jest sumą maksymalnego przyrostu temperatury złącze-obudowa oraz temperatury początkowej złącza. Dla zwarć krótkotrwałych (do ok. 1 s) występujących bezpośrednio po załączeniu zasilania (zwarcie w stanie zimnym) można przyjąć, że w warunkach cieplnie ustalonych przed wystąpieniem zwarcia temperatura początkowa złącza jest równa temperaturze obudowy i jednocześnie temperaturze otoczenia, oraz, że w czasie trwania zwarcia temperatury te nie zmieniają swojej wartości (występująca pojemność cieplna elementu półprzewodnikowego uniemożliwia w tak krótkim czasie podgrzanie obudowy przez złącze). W przypadkach, gdy przed wystąpieniem zwarcia urządzenie pracuje lub gdy nie znamy temperatury obudowy półprzewodnika, nie jesteśmy w stanie określić temperatury początkowej złącza. Wyznaczenie choćby przybliżonej wytrzymałości zwarciowej urządzenia w tych warunkach jest możliwe jedynie poprzez szacunkowe przyjęcie temperatury początkowej złącza. Najskuteczniejszym potwierdzeniem prawidłowości określenia wytrzymałości zwarciowej metodą obliczeniową jest wykonanie zwarcia probierczego. Trzeba mieć świadomość, że w przypadku przeszacowania wytrzymałości urządzenia sprawdzenie za pomocą zwarcia probierczego będzie dla niego próbą niszczącą.

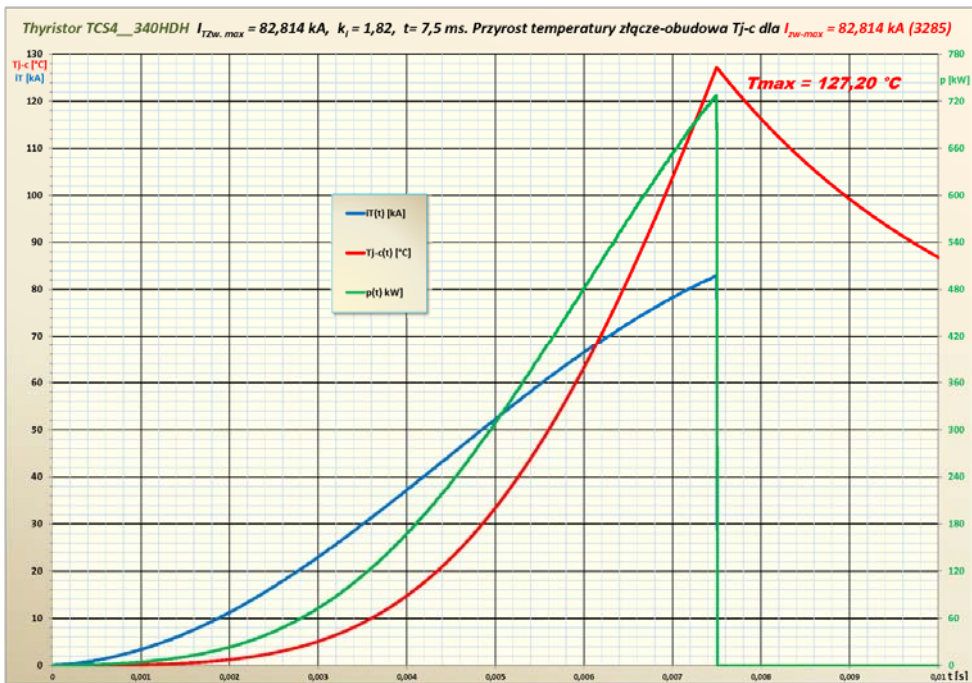
2.2. Sytuacje awaryjne

Przydatne dla oceny wytrzymałości elementów półprzewodnikowych są również sytuacje awaryjne, gdy dochodzi do występowania przypadkowych zwarć w obwodach z eksploatowanymi urządzeniami półprzewodnikowymi. Analiza termiczna narażonego przepływem prądu zwarciowego elementu pozwala niejednokrotnie sformułować wnioski odnośnie faktycznego stanu odporności urządzenia na zwarcia. Warunkiem niezbędnym dla dokonania takiej oceny jest dysponowanie rejestracją przebiegów przynajmniej podstawowych wielkości elektrycznych jak prąd i napięcie w czasie wystąpienia zwarcia. Poniżej zamieszczono przykładową analizę rzeczywistego, przypadkowego zwarcia awaryjnego w laboratorium Instytutu Energetyki skutkującego zniszczeniem elementu półprzewodnikowego.

Na rysunku 5 zamieszczono przebiegi prądu zwarciowego tyrystora i napięcia zasilającego AC zarejestrowane podczas wystąpienia zwarcia niszczącego w łączniku półprzewodnikowym. Na rysunku 6 przedstawiono wynik obliczeń przyrostu temperatury złącze-obudowa T_{j-c} uszkodzonego tyrystora dla fragmentu przebiegu prądu zwarciowego płynącego przez tyrystor do momentu poprzedzającego jego uszkodzenie. Największa zarejestrowana wartość chwilowa prądu zwarciowego (przebieg czerwony na rys. 5) wynosi ok. 89 kA i występuje po ok. 9 ms od załączenia obwodu i jednocześnie wystąpienia zwarcia awaryjnego. Moment uszkodzenia tyrystora w łączniku półprzewodnikowym określono na podstawie przebiegu napięcia (kolor niebieski na rys. 5). Definitywne uszkodzenie tyrystora wystąpiło w momencie, gdy napięcie osiągnęło minimum (charakterystyczna „szpilka”), co miało miejsce ok. 0,5 ms przed osiągnięciem wartości maksymalnej przez prąd zwarciowy.



Rys. 5. Przebiegi prądu zwarcowego I_{zw} i napięcia zasilającego U_z łącznika podczas wystąpienia zwarcia



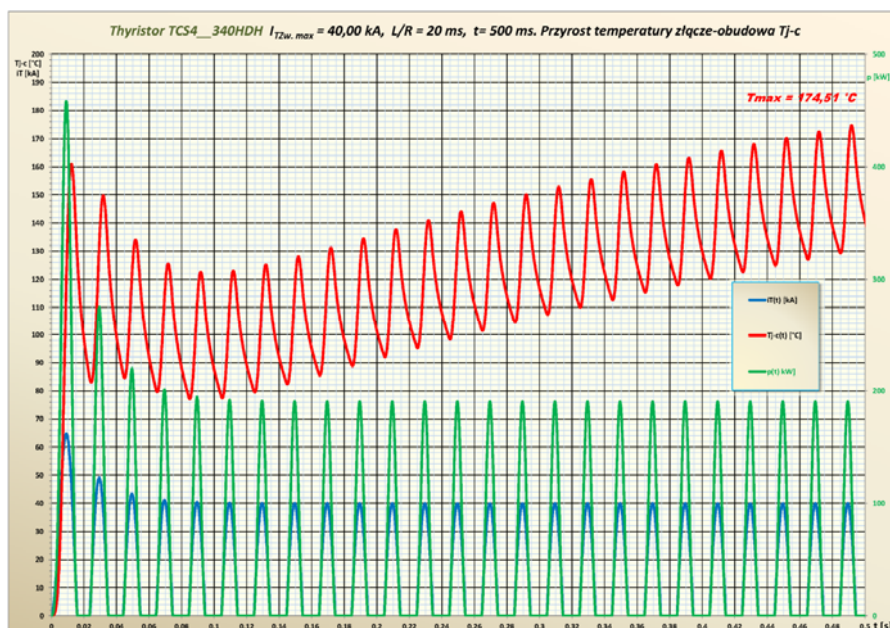
Rys. 6. Przebiegi przyrostu temperatury T_{j-c} i prądu zwarcowego I_T (niszczącego tyristor)

Z zachowaniem pewnego obszaru bezpieczeństwa uznano, że do ok. 7,5 ms od momentu wystąpienia zwarcia tyrystor przewodził poprawnie. Chwilowa wartość prądu zwarciowego w tym momencie wynosiła 82,8 kA. Ten początkowy fragment zarejestrowanego, rzeczywistego prądu zwarciowego (kolor niebieski na rys. 6) przeniesiono w postaci dyskretnej do wspomnianego wyżej programu obliczeniowego. Korzystając z katalogowych zależności na napięcie tyrystora w funkcji przepływającego przez niego prądu oraz na przejściową impedancję termiczną wyznaczono przebiegi strat mocy w złączu (kolor zielony na rys. 6) i przyrostu temperatury złącze-obudowa (kolor czerwony na rys. 6). Uzyskany maksymalny przyrost temperatury złącze-obudowa wynoszący 127°C jest mniejszy od odpowiedniego przyrostu dla impulsu prądowego I_{TSM} mimo, że relacja między wartościami szczytowymi prądu jest odwrotna. Na podstawie analizy można wnioskować, że wytrzymałość graniczna dla tego konkretnego tyrystora i pojedynczego impulsu prądu zwarciowego o przebiegu zbliżonym do przedstawionego na rys. 6 wynosi ok. 80 kA. Tyrystor nie mógł więc bezawaryjnie przewodzić nawet tylko pierwszego impulsu rzeczywistego prądu zwarciowego o wartości maksymalnej ok. 89 kA. Niestety wiedzę o tym uzyskano dopiero po fakcie zniszczenia tyrystora w wyniku niezamierzonego zwarcia awaryjnego.

Zdecydowanie efektywniejszym jest wykonanie tego typu analizy dla elementu półprzewodnikowego na etapie projektowania urządzeń. Przedstawiony poniżej przykład odnosi się do tego samego typu tyrystora pracującego w gałęzi wielkopiętrowego łącznika prądu przemiennego o częstotliwości sieciowej. Obliczenia mają na celu sprawdzenie możliwości przewodzenia dodatniej połówki prądu zwarciowego (rys. 3) o wartości maksymalnej 40 kA i czasie trwania zwarcia 0,5 s. Wyniki analizy zaprezentowano na rysunku 7.

Z uwagi na tętniący charakter prądu (kolor niebieski) przebieg mocy chwilowej (kolor zielony) traconej w tyrystorze jest również tętniący, natomiast przebieg przyrostu temperatury [9] złącze-obudowa (kolor czerwony) oscyluje względem zmiennej w czasie wartości średniej tej temperatury. Dla przyjętych parametrów prądu zwarciowego maksymalna wartość przyrostu temperatury nie występuje w pierwszej fazie zwarcia gdy prąd i moc osiągają wartości maksymalne, lecz na jego końcu. Uzyskana w tych obliczeniach maksymalna temperatura wynosząca ok. 175°C jest porównywalna z wartością uzyskaną dla prądu I_{TSM} (rys. 4). Na tej podstawie można zakładać z dużym prawdopodobieństwem, że tyrystor przetrzyma zwarcie o przyjętych do analizy parametrach. W razie konieczności zwiększenia wartości szczytowej prądu zwarciowego wytrzymawanego przez łącznik półprzewodnikowy oparty na tego typu tyrystorach, należy pojedyncze tyrystory zastąpić blokami tyrystorów równoległych, dbając aby największy prąd w jednej z gałęzi równoległych nie był większy od wartości użytej w analizie.

Równoległe łączenie tyrystorów wymaga zachowania ogólnie znanych warunków, które można w dużym uproszczeniu wyrazić jedną zasadą, że tyrystory powinny być identyczne. Wiadomo, że w praktyce nie jest to możliwe więc dąży się do wyboru elementów o zbliżonych charakterystykach zewnętrznych. Zdarza się, że elementy półprzewodnikowe można zamówić u producentów z przeznaczeniem do pracy równoległej i określeniem ich charakterystyk prąd-napięcie. Z naszych doświadczeń wynika jednak, że dobór przeprowadzany jest dla prądu z zakresu pracy



Rys. 7. Graficzna prezentacja wyników wyznaczania odporności zwarciowej tyrystora pracującego w łączniku AC dla prądu maks. 40 kA i czasu zwarcia 0,5 s

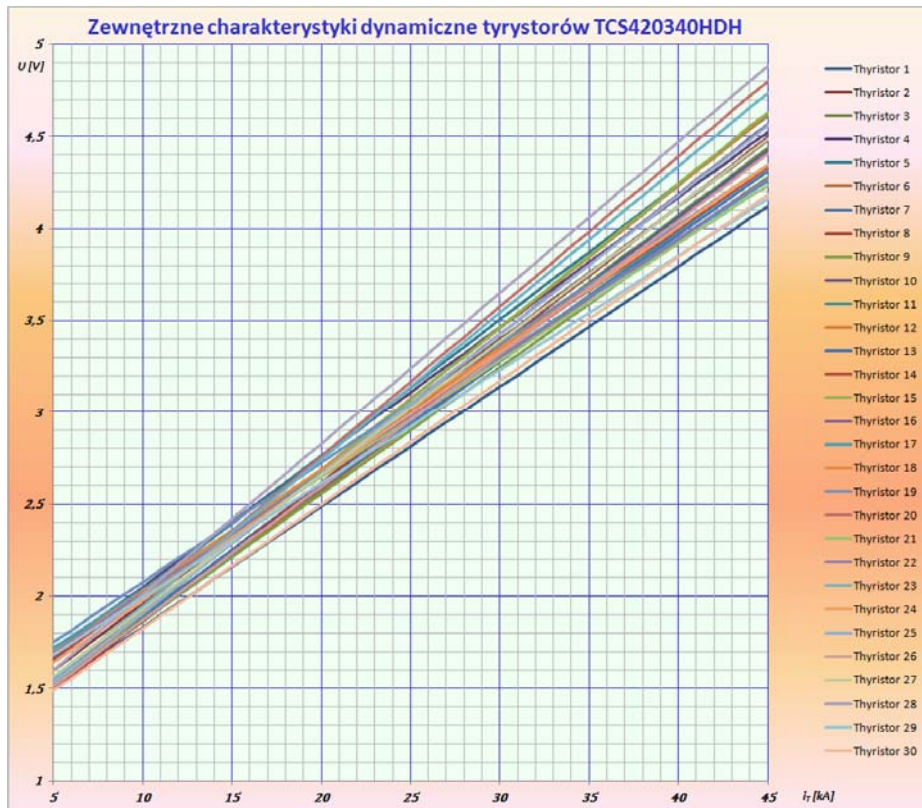
długotrwałej a informacja n/t charakterystyk sprowadza się do podania wartości prądów i napięć dla jednego punktu pracy usytuowanego poniżej prądu znamionowego ciągłego.

Jest to zasadne i zrozumiałe z punktu widzenia wytwórcy elementów, jednakże dla konstruktora tego typu informacje niestety nie dają poglądu odnośnie zachowania się elementów w zakresie prądów przeciążeniowych.

2.3. Wyznaczanie zewnętrznych charakterystyk dynamicznych tyrystorów

Aby sprawdzić dopasowanie elementów w tym zakresie pracy w laboratorium Instytutu Energetyki wykonywane są ich dynamiczne charakterystyki zewnętrzne prądem przemiennym o amplitudzie 20 – 40 kA. Charakterystyki doświadczalne są aproksymowane regresją liniową i ekstrapolowane do wartości prądu przyjętego jako maksymalny zwarciowy dla pojedynczego elementu. Na rysunku 8 przedstawiono wykonane w laboratorium IEn charakterystyki zewnętrzne dla 30 tyrystorów tego samego typu zamówionych z przeznaczeniem do pracy równoległej.

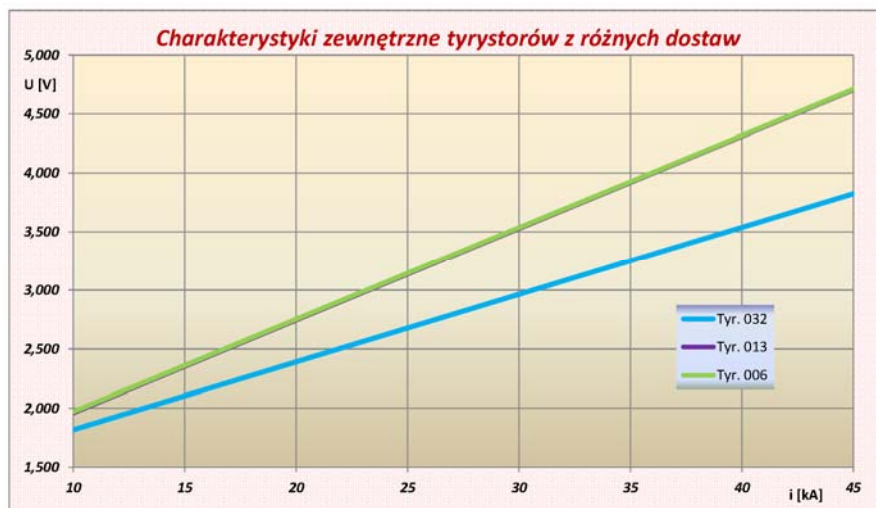
Charakterystyki liniowe są ekstrapolowane do przyjętej jako graniczna dla tych tyrystorów wartości prądu zwarciowego równej 45 kA. Łatwo zauważyć, że dla tej wartości prądu spadki napięć na poszczególnych tyrystorach różnią się od siebie



Rys. 8. Graficzna prezentacja wyników wyznaczania odporności zwarciowej tyrystora pracującego w łączniku AC dla prądu maks. 40 kA i czasu zwarcia 0,5 s

w skrajnym przypadku o ok. 0,9 V. Zakładając, że wszystkie tyrystory pracowałyby w bezimpedancyjnych gałęziach równoległych to dla spadku napięcia na tyrystorach, np. 4 V prądy gałęziowe różniłyby się maksymalnie o ok. 9 kA. W praktycznych rozwiązaniach urządzeń z tyrystorami równoległymi narażonymi na występowanie prądów zwarciowych stosuje się równoważenie rozplywów prądów poprzez dobór impedancji połączeń w gałęziach do charakterystyk zewnętrznych pracujących w nich tyrystorów.

Powyższy przykład dotyczył jednej dostawy 30 tyrystorów tego samego typu, pochodzących od jednego producenta a ponadto selekcjonowanych do pracy równoległej. Na rysunku 9 zamieszczono charakterystyki zewnętrzne w zakresie pracy przeciążeniowej 3 losowych tyrystorów tego samego typu, tego samego producenta, lecz pochodzących z różnych dostaw. Charakterystyki dwóch z nich (Tyr. 006 i Tyr. 013) pokrywają się, natomiast charakterystyka trzeciego różni się o ok. 10 kA dla 3,5 V. Oba przykłady uzasadniają celowość wykonywania charakterystyk przeciążeniowych elementów półprzewodnikowych narażonych na występowanie prądów zwarciowych, szczególnie gdy elementy pracują w układach równoległych.



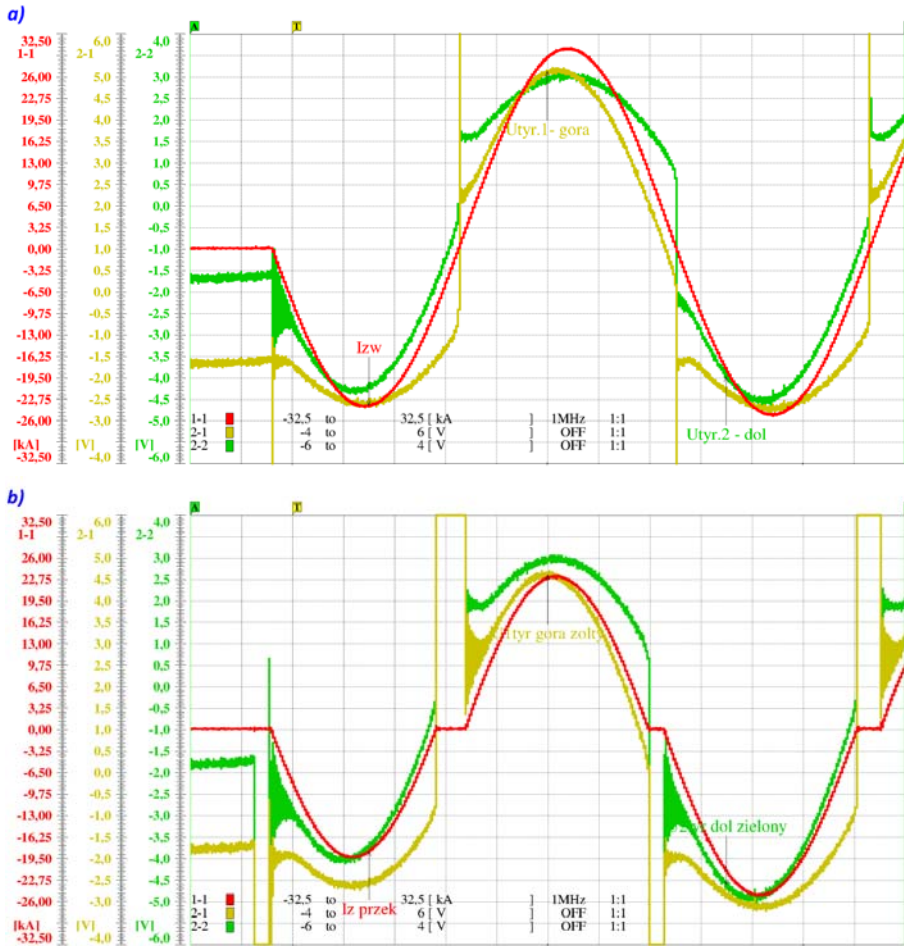
Rys. 9. Charakterystyki zewnętrzne tyrystorów tego samego typu, z różnych dostaw

3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na zakończenie pozostał jeszcze przykład różnic jakie mogą występować między parametrami katalogowymi a rzeczywistymi elementów a jednocześnie między rzeczywistymi parametrami elementów tego samego typu lecz z różnych dostaw. Przykładowe rozbieżności dotyczą przywoływanych już tyrystorów TCS4_340HDH. W karcie katalogowej producent określa maksymalny prąd bramki na poziomie 150 mA. W trakcie empirycznego wykonywania przeciążeniowych charakterystyk zewnętrznych zauważono diametralnie różne zachowania grup tyrystorów z różnych dostaw przy takiej samej wartości prądów bramek. Mimo wysterowania obwodów bramek maksymalnym prądem katalogowym 150 mA grupa tyrystorów z jednej z dostaw pracowała niepoprawnie.

Dopiero po zwiększeniu prądu bramek do 200 mA, czyli powyżej wartości maksymalnej deklarowanej przez wytwórcę, tyrystory zaczęły pracować poprawnie. Ilustracją opisanego przypadku jest rysunek 10. Oscylogram na rysunku 10a dotyczy dwóch tyrystorów działających poprawnie, natomiast na rysunku 10b odnosi się do dwóch tyrystorów działających źle. Prąd bramek wynosił 150 mA – maksymalną wartość określoną w katalogu.

Na każdym z tych oscylogramów zamieszczono przebieg prądu (kolor czerwony) płynącego przez badane tyrystory połączone odwrotnie równolegle oraz przebiegi spadków napięć (kolory żółty i zielony) na tyrystorach. Wyraźne różnice przebiegów na tych oscylogramach widoczne są gołym okiem. Prąd zwarciovowy na rysunku 10b nie dość, że ma obniżone w stosunku do 10a wartości szczytowe, to na dodatek – mimo tak dużej wartości – ma przebieg nieciągły w obszarach przechodzenia przez zero.



Rys. 10. Przebiegi podczas wyznaczania charakterystyk zewnętrznych tyrystorów tego samego typu lecz z różnych dostaw przy tym samym prądzie bramki ($I_G = 150 \text{ mA}$)

Opisana powyżej sytuacja potwierdza jedynie problemy z jakimi można spotkać się podczas projektowania i konstruowania nowo wprowadzanych do eksploatacji urządzeń opartych o różnego rodzaju półprzewodniki. Z tego powodu słusznym rozwiązaniem jest wykonywanie rzeczywistych badań wytrzymałości zwarciowej takich obiektów, gdyż jak już wspomniano, jest to najskuteczniejsza droga potwierdzenia prawidłowości określenia wytrzymałości zwarciowej metodą obliczeniową. Należy pamiętać, że w przypadku błędnego oszacowania wytrzymałości zwarciowej urządzenia sprawdzenie za pomocą rzeczywistej próby zwarciowej będzie dla niego próbą niszczącą. Dla oceny wytrzymałości elementów półprzewodnikowych przydatne mogą być również sytuacje awaryjne. Na podstawie zdobytych doświadczeń można śmiało stwierdzić, że produkowane elementy tej samej serii potrafią się znacznie od siebie różnić co ma wpływ na ich działanie podczas normalnej eksploatacji.

LITERATURA

1. PN-EN 60947-1:2010+A1:2011+A2:2014-12, PKN, Warszawa, 2010 do 2014.
2. Jang S.R., Ahn S.H., Ryoo H.J., Rim G.H.: A comparative study of the gate driver circuits for series stacking of semiconductor switches, Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), s. 322–326, IEEE, 2010.
3. Meckler P., Ho W.: Does an electronic circuit breaker need electrical contacts?, Electrical Contacts, 2004. Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts, s. 480–487, 2004.
4. Januszewski S., Świątek H., Zymmer K.: Consequences of internal short-circuits in very high power converters. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE '96, vol. 1, s. 519–524, 1996.
5. Zymmer K.: Zagrożenia zwarciove i przetężeniowe półprzewodnikowych przyrządów elektroenergetycznych, Prace Instytutu Elektrotechniki, vol. 51, z. 219, s. 1–115, Instytut Elektrotechniki, Warszawa, 2004.
6. Mainka K.: Modelowanie modułów IGBT dużej mocy z uwzględnieniem oddziaływań elektrotermicznych do celów szybkiej symulacji obwodowej i systemowej, Politechnika Opolska, Soest, 2010.
7. Karta katalogowa: TCS4_340H Phase Control Thyristor, Powerx, wydanie: 8/11/2010.
8. Karta katalogowa: TCS4_340H Phase Control Thyristor, Powerx, wydanie: 7/1/2004.
9. Januszewski S., Świątek H., Zymmer K.: Przyrządy energoelektroniczne i ich zastosowanie, Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa, 2008.

Przyjęto do druku dnia 23.10.2015 r.

PRACTICAL ASPECTS OF SHORT-CIRCUIT WITHSTAND OF THE POWER SEMICONDUCTOR DEVICES

Jerzy PRZYBYSZ, Maciej OWSIŃSKI, Zbigniew PIĄTEK

ABSTRACT *Short-circuit withstand of electric power system equipment is a part of the tests carried out by Institute of Power Engineering in Warsaw. In this article we have gathered our experience gained during the research of the power semiconductor devices. It shows the behavior of devices equipped with semiconductor components during short-circuit currents flow in case of nominal and emergency operation. The advantages of such solutions and method of obtaining the dynamic characteristics of semiconductor devices were shown as well. Attention was also drawn to the advantages of the use of transient thermal impedance based on semiconductor structures during the designing stage.*

Keywords: *semiconductors, thyristors, diodes, short circuit withstand, research*

Dr hab. inż. Jerzy PRZYBYSZ, prof IEn – wieloletni pracownik Instytutu Energetyki, Kierownik Pionu Elektrycznego, Przewodniczący Rady Naukowej IEn, specjalizuje się w tematyce generatorów.

Mgr inż. Maciej OWSIŃSKI – pracownik Pionu Elektrycznego IEn, Kierownik p. o. Laboratorium Wielkopiędowego, członek PKN w KT nr 53, specjalizuje się w badaniach osprzętu kablowego oraz osprzętu do linii napowietrznych.

Inż. Zbigniew PIĄTEK – pracownik Pionu Elektrycznego, Laboratorium Urządzeń Rozdzielczych, specjalizuje się w dziedzinie wykonywania prób wytrzymałości zwarciowej oraz pomiarach elektrycznych.

