

## Wyznaczanie parametrów cieplnych przyrządów półprzewodnikowych dużej mocy metodą eksperymentalną

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono eksperymentalną metodę wyznaczania parametrów cieplnych przyrządu energoelektronicznego  $R_{th}$  i  $Z_{th}$ . Podano wyniki pomiarów tych danych wykonane dla diody dużej mocy. Omówiono problemy występujące w trakcie realizacji procedury pomiarowej. Przedstawiono także autorską metodę obliczania parametrów czteroczołowego modelu cieplnego przyrządu na podstawie zależności  $Z_{th}(t)$  uzyskanej eksperymentalnie.

**Abstract.** The paper presents experimental method of marking out of the semiconductor power devices thermal parameters –  $R_{th}$  and  $Z_{th}$ . The results of the measuring these parameters for high power diode are presented also. Problems which appeared during of the measuring this procedure are discussed. The authors method of calculating of semiconductor power device four-part thermal model is exposed. This calculations are based on function thermal impedance performed by experimental method. **Problems of appointing of the semiconductor power devices thermal parameters by experimental method.**

**Słowa kluczowe:** przyrządy energoelektroniczne, parametry cieplne, metody eksperymentalne i analityczne.

**Keywords:** semiconductor Power devices, thermal parameters, experimental and analytical methods.

### 1. Wprowadzenie

Wszystkie właściwości przyrządów energoelektronicznych takich jak diody i tyrystory, a także tranzystory w istotny sposób zależą od temperatury struktury półprzewodnikowej. Wyznaczenie temperatury struktury przyrządu dla danych warunków pracy wynikających z działania przekształtnika, w którym dany element jest zainstalowany, stanowi główne kryterium poprawności doboru tego przyrządu do danego zastosowania.

Odpowiednie obliczenia odniesione zarówno dla obciążenia ciągłego, przeciążeń roboczych oraz możliwych do wystąpienia stanów awaryjnych powinny być wykonane na etapie projektowania urządzenia [2,3,8].

Warunkiem prowadzenia tego rodzaju obliczeń jest znajomość parametrów cieplnych przyrządu półprzewodnikowego, których wyznaczenie i udostępnienie użytkownikom stanowi obowiązek wytwórcy tych przyrządów. Parametry cieplne przyrządów energoelektronicznych takie jak rezystancja cieplna  $R_{th}$ , przejściowa impedancja cieplna  $Z_{th}$ , mogą być wyznaczone metodą obliczeniową oraz eksperymentalną [6].

Metoda analityczna bazuje na rezystancyjno-pojemnościowych modelach cieplnych Cauera oraz Fostera [4,5,14]. Parametry modelu cieplnego Cauera obliczane są na podstawie właściwości fizycznych poszczególnych materiałów konstrukcyjnych, z których zbudowany jest przyrząd półprzewodnikowy [1,6].

Dane do powszechnie stosowanego obecnie w obliczeniach temperatury struktury modelu Fostera uzyskiwane są w wyniku przeliczeń matematycznych parametrów modelu Cauera [6].

Przy wyznaczaniu przejściowej impedancji i rezystancji cieplnej przyrządów wykorzystuje się zasady właściwe dla analizy obwodów elektrycznych. Zakłada się wtedy analogię przepływu energii cieplnej i elektrycznej [1].

Jeżeli przez  $Q$  oznaczyć ilość ciepła wydzieloną w czasie  $t$  to iloraz  $Q/t$  równoważny stratom mocy  $\Delta P$  odpowiada prądowi elektrycznemu, rezystancja cieplna  $R_{th}$  – rezystancji elektrycznej  $R$ , pojemność cieplna  $C_{th}$  – pojemności elektrycznej  $C$  a temperatura  $T(t)$  – napięciu  $u(t)$ .

Metoda obliczeniowa jest szczególnie przydatna na etapie projektowania przyrządów i może zapewnić dużą dokładność przy dopracowanej a więc powtarzalnej technologii ich wytwarzania.

Nie uwzględnia ona natomiast niedoskonałości wykonawczych jak na przykład zanieczyszczenia użytych materiałów, niedokładności obróbki powierzchni poszczególnych elementów, niepełne pokrycie lutem łączonych elementów itp. Czynniki te o określonym wpływie na wartości parametrów cieplnych przyrządów półprzewodnikowych uwzględnia doświadczalna metoda wyznaczania tych wartości.

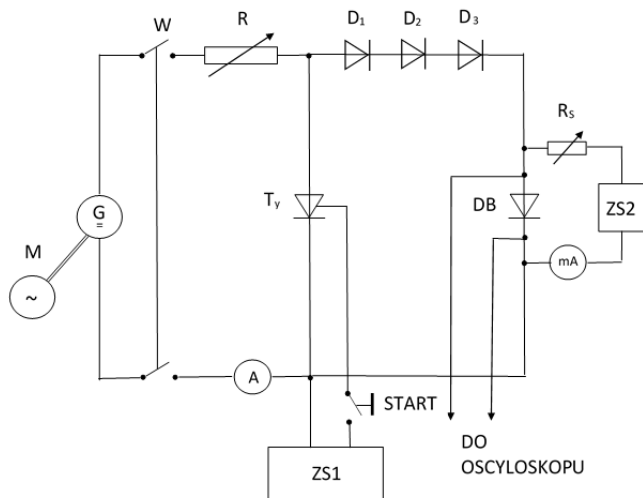
Metoda ta może więc stanowić także istotny element weryfikacji obliczeń oraz oceny jakości procesu technologicznego stosowanego przy wytwarzaniu przyrządów półprzewodnikowych.

Zagadnienia te są szczególnie aktualne w odniesieniu do przyrządów o prądach przewodzenia wynoszących kilkaset do kilku tysięcy amperów a więc o dużych powierzchniach struktur półprzewodnikowych nazywanych powszechnie przyrządami energoelektronicznymi. Przy wytwarzaniu elementów tego rodzaju, zarówno defekty materiałowe jak i niedoskonałości procesu technologicznego są zdecydowanie bardziej aktualne niż to ma miejsce w przypadku elementów elektronicznych o niewielkiej mocy.

Zależność określająca wartości przejściowej impedancji cieplnej w funkcji czasu wyznaczona eksperymentalnie podawana jest w postaci graficznej. Przy obliczeniach temperatury prowadzonych w sposób analityczny można zastąpić funkcję  $Z_{th}(t)$  ekstrapolowaną krzywą schodkową wpisując do programu obliczeniowego kolejne wartości  $Z_{th}(t)$ . Bardziej efektywny jest jednak zapis w postaci sumy funkcji wykładniczych możliwych do wyznaczenia na podstawie schematu Fostera (wzór 3). Rezystancje i pojemności cieplne –  $R_i$ ,  $C_i$  poszczególnych członów tego schematu można określić rozkładając funkcję  $Z_{th}(t)$  wyznaczoną w wyniku pomiarów na przebiegi składowe odpowiadające tym członom. Parametry modelu cieplnego według Fostera są obecnie deklarowane w katalogach. Teoretyczne zasady obliczeń cieplnych odniesionych do przyrządów półprzewodnikowych zostały opublikowane w latach 60-tych i 70-tych ubiegłego wieku [14]. Jednak zagadnienia związane głównie z eksperymentalnym wyznaczeniem impedancji i rezystancji cieplnej zwłaszcza przyrządów dużej mocy oraz obliczaniem na tej podstawie parametrów modeli cieplnych tych elementów, nie są w sposób wyczerpujący publikowane w dostępnej literaturze dotyczącej przedmiotu.

## 2. Eksperymentalna metoda wyznaczania parametrów cieplnych przyrządu energoelektronicznego

Wartość rezystancji  $R_{th}$  i impedancji  $Z_{th}(t)$  przyrządu energoelektronicznego można uzyskać w sposób doświadczalny. Badania zostały przeprowadzone w układzie jak na rys.1. [6].



Rys. 1. Schemat układu do wyznaczania przejściowej impedancji cieplnej przyrządów energoelektronicznych. G - generator prądu stałego 30V, 1000A, R - rezystor obciążenia,  $D_1 \div D_3$  - diody pomocnicze,  $T_y$  - tyristor pomocniczy, DB - dioda badana, ZS2 - źródło prądu pomiarowego.

Układ pomiarowy zasilany jest z prądnicy prądu stałego o prądzie regulowanym w granicach 10÷1000 A. Zapewnia to możliwość prowadzenia badań parametrów cieplnych przyrządów energoelektronicznych o dużym prądzie przewodzenia. W przypadku wyznaczania impedancji cieplnej tych elementów istotne jest uzyskanie nie zakłóconego pomiaru temperatury struktury a więc nie zniekształconego prądu pomiarowego w czasie rzędu 1ms po wyłączeniu zasilania. Uzyskuje się to dzięki zastosowaniu tyristora  $T_y$ , który zwiera obwód z przyrządem badanym po stronie zasilania powodując zanik prądu głównego w czasie kilkudziesięciu mikrosekund.

Przyrząd badany DB nagrzewany jest stratą mocy  $\Delta P$  wynikającą z zadanego prądu diody  $I_F$ , do ustalonej temperatury obudowy lub radiatora  $T_c$ ,  $T_{hs}$  oraz struktury półprzewodnikowej  $T_j$ . W odniesieniu do przyrządów o obudowie pastylkowej, deklarowana jest zwykle rezystancja cieplna  $R_{th(j-hs)}$  między złączem a punktem referencyjnym na radiatorze usytuowanym w pobliżu elektrody głównej na przykład w odległości 3 mm.

Tak więc parametry cieplne przyrządu wyznaczane są łącznie z rezystancją cieplną przejścia element półprzewodnikowy-radiator. Różnica temperatur między złączem a punktem referencyjnym określana jest w tym ujęciu jako  $\Delta T_{(j-hs)}$ . Rezystancję cieplną przyrządu opisuje wtedy wzór:

$$(1) \quad R_{th(j-hs)} = \frac{\Delta T_{(j-hs)}}{\Delta P}$$

Pomiar temperatury struktury dokonywany jest bezpośrednio po wyłączeniu obciążenia metodą pośrednią przy wykorzystaniu zależności napięcia przewodzenia diody od temperatury, dla prądu pomiarowego o małej wartości na przykład 100 mA.

Funkcja ta wyznaczona jest indywidualnie dla badanego przyrządu w procesie skalowania systemu pomiarowego. W trakcie stygnięcia przyrządu wyznaczana jest różnica temperatur  $\Delta T'_{j-hs}$  w funkcji czasu. Przejściowa impedancja cieplna przyrządu  $Z_{th(j-hs)}(t)$  określona jest wtedy zależnością:

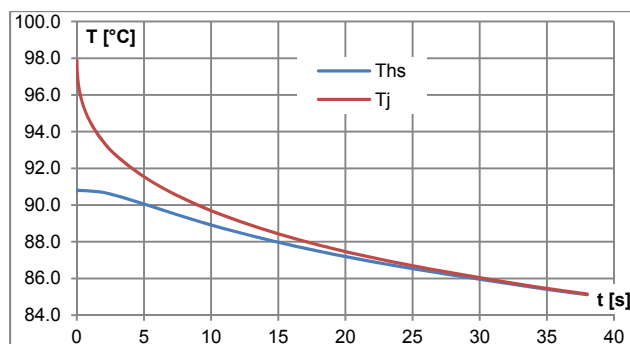
$$(2) \quad Z_{th}(t) = \frac{\Delta T_{(j-hs)} - \Delta T'_{(j-hs)}(t)}{\Delta P}$$

W celu poprawnego przeprowadzenia badań przyrządów dużej mocy, należy spełniać warunki zapewniające stosunkowo dokładne wyznaczenie parametrów cieplnych tych elementów.

Niezbędne jest regulowane źródło prądu stałego o prądzie ciągłym od kilkuset do około 1000A. Rezystancja przyrządów dużej mocy o średnicach struktur półprzewodnikowych wynoszących 2÷3 cali jest rzędu 0,01°C/W. Przy obciążeniu takiego przyrządu prądem 1000A i stracie mocy w przyrządzie około 800W, różnica temperatur między strukturą półprzewodnikową a obudową w warunkach ustalonych, wyniesie około 8°C. Błąd w wyznaczeniu tej wartości wynoszący 1°C spowoduje odpowiedni uchyb w wyznaczonej wartości  $R_{th}$  na poziomie 12%. Uchyb ten będzie się zwiększał procentowo w miarę stygnięcia przyrządu kiedy maleje wartość  $\Delta T'_{(j-hs)}(t)$ .

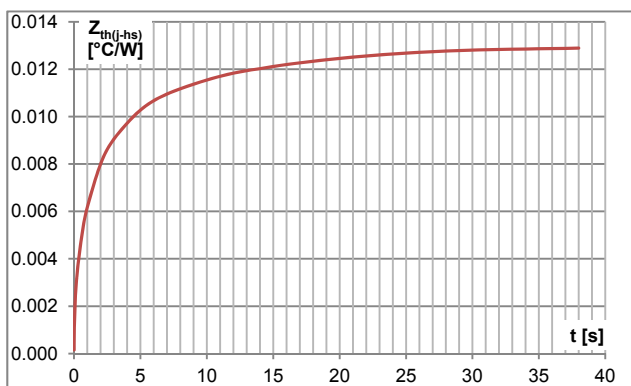
Należy podkreślić, że pomiary zarówno temperatury złącza jak i temperatury obudowy dokonywane są metodami pośrednimi dwoma różnymi systemami rejestrującymi: napięcie termopary (temperatura obudowy) oraz przyrządu badanego (temperatura struktury). Istotne jest tutaj staranne skalowanie tych systemów przy wykorzystaniu tego samego wzorca temperatury.

Badania mające na celu wyznaczenie parametrów cieplnych prowadzono na diodzie pastylkowej o prądzie granicznym  $I_{FAV}=8200$  A i średnicy struktury krzemowej wynoszącej 73,2 mm. Jako element chłodzący zastosowano typowy dwustronny radiator RY-300 o masie 4,8 kg. W trakcie prób dioda obciążona była prądem stałym o wartości około 650 A, co powodowało wydzielanie strat mocy w tym przyrządzie na poziomie 500 W. Różnica temperatur między strukturą półprzewodnikową a punktem referencyjnym w warunkach cieplnie ustalonych wynosiła 7,8°C. Na rys. 2 przedstawiono wyniki pomiarów temperatury obudowy diody oraz struktury półprzewodnikowej w trakcie stygnięcia po nagraniu do ustalonej temperatury pracy i wyłączeniu obciążenia. Badania przeprowadzono w warunkach chłodzenia powietrznego o obiegu naturalnym.

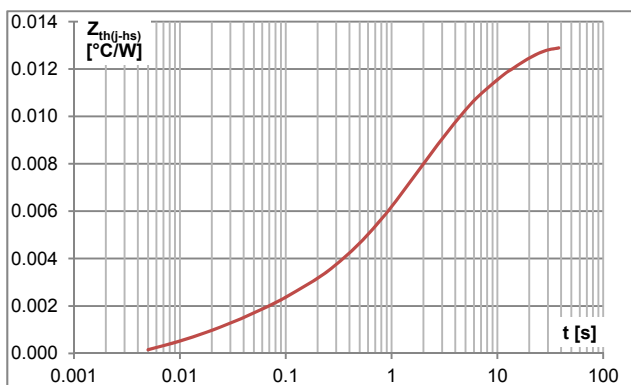


Rys. 2. Przebieg temperatury struktury ( $T_j$ ) i punktu referencyjnego radiatora ( $T_{hs}$ ) w procesie stygnięcia po wyłączeniu obciążenia.

Na podstawie tych wyników oraz pomierzonych strat mocy w diodzie wyznaczono przebieg czasowy przejściowej impedancji cieplnej przyrządu, który przedstawiono na rys. 3 w skali liniowej oraz na rys. 4 w skali logarytmicznej na osi czasu oraz liniowej na osi  $Z_{th}$ .



Rys. 3. Charakterystyka wyznaczona metodą eksperymentalną impedancji cieplnej diody DB-5 w skali liniowej;  $R_{th}=0,01296$  [°C/W].



Rys. 4. Charakterystyka impedancji cieplnej diody DB-5 w skali logarytmicznej na osi czasu oraz liniowej na osi  $Z_{th}$ ;  $R_{th}=0,01296$  [°C/W].

### 3. Rozkład krzywej przejściowej impedancji cieplnej na elementy czteroczołowego modelu Fostera

W dalszej części pracy omówiony zostanie sposób rozkładu uzyskanej eksperymentalnie zależności  $Z_{th}(t)$  na krzywe składowe określające parametry modelu cieplnego przyrządu półprzewodnikowego według Fostera.

Dane te stanowią podstawę analitycznego zdefiniowania przebiegu czasowego przejściowej impedancji cieplnej przyrządu zgodnie z zależnością:

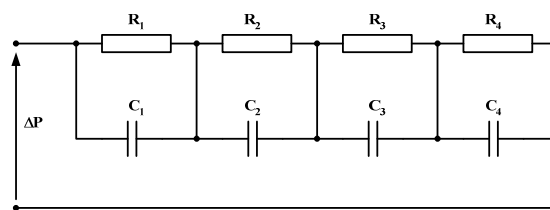
$$(3) \quad Z_{th}(t) = \sum_1^n R_{thi} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right]$$

gdzie:  $R_{thi}$  - rezystancja termiczna i-tego członu modelu cieplnego,  $\tau_i$  - stała czasowa i-tego członu modelu cieplnego,  $n$  - liczba członów modelu cieplnego. Przyrost temperatury struktury półprzewodnikowej względem obudowy przyrządu określa wówczas zależność:

$$(4) \quad \Delta T_{j-hs} = \Delta P(t) \sum_n^1 (Z_{thi(1:n)})$$

$\Delta P(t)$  - przebieg strat mocy w przyrządzie w funkcji czasu.

Na rys. 5 przedstawiono czteroczołowy model cieplny przyrządu energoelektronicznego według Fostera.

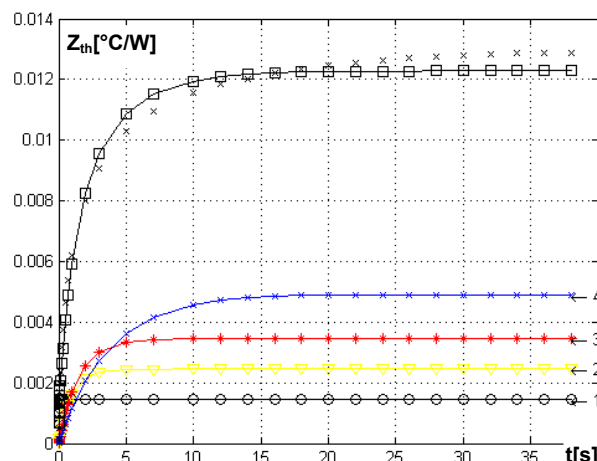


Rys. 5. Czteroczołowy model cieplny przyrządu energoelektronicznego według Fostera

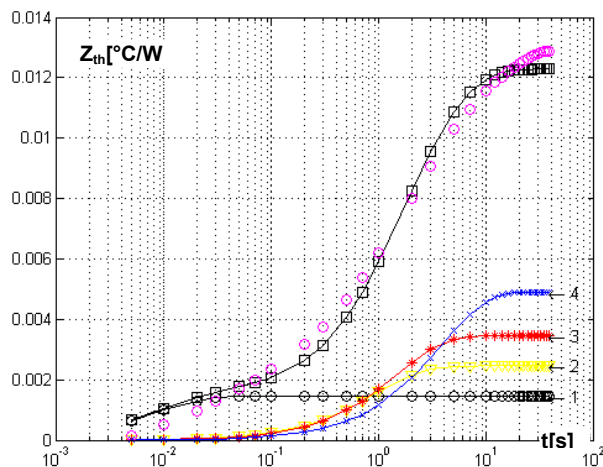
Parametry tego modelu odniesione do badanego przyrządu zostały wyznaczone poniżej w wyniku rozkładu zależności  $Z_{th}(t)$  (rys.3 i 4) na krzywe składowe.

### 4. Numeryczna metoda wyznaczania parametrów cieplnych przyrządu energoelektronicznego

Dysponując charakterystyką diody DB5 wyznaczoną metodą eksperymentalną opisaną w punkcie 3, możemy dokonać jej aproksymacji [13] a następnie rozłożyć ją na cztery składniki odpowiadające czterem członom modelu Fostera. Najczęściej do tego celu używana jest metoda graficzna [6], dająca dobre rezultaty lecz pracochłonna i z trudnością poddająca się procesowi automatyzacji. Dlatego w artykule zaproponowano metodę numeryczną, wykorzystując do tego celu platformę MATLAB-a [12].



Rys. 6. Aproksymacja parametrów cieplnych diody DB5 wzorem (3) i jej poszczególne składniki w skali liniowej.



Rys. 7. Aproksymacja parametrów cieplnych diody DB5 wzorem (3) i jej poszczególne składniki w skali logarytmicznej na osi czasu oraz liniowej w odniesieniu do impedancji cieplnej.

Na podstawie rozkładu charakterystyki przejściowej impedancji cieplnej, można wyznaczyć parametry cieplne modelu Foster'a. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Dane wyjściowe do wyznaczenia impedancji cieplnej diody energetycznej DB5 w warunkach chłodzenia dwustronnego

Rezystancja elektryczna – cieplna [ $\Omega \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ ] Pojemność elektryczna – cieplna [ $\text{F} - \text{Ws}/^\circ\text{C}$ ]			
$R_1=0.0076$	$R_2=0.0028$	$R_3=0.0016$	$R_4=0.0006$
$C_1=529.0$	$C_2=287.6$	$C_3=21.1$	$C_4=41.0$
$\tau_1 = 4.0061$	$\tau_2 = 0.8014$	$\tau_3 = 0.0335$	$\tau_4 = 0.0240$

Wyznaczone współczynniki pozwoliły na przedstawienie charakterystyki przejściowej impedancji cieplnej diody w funkcji czasu w postaci czterech składników zgodnie ze wzorem (3), których suma daje charakterystykę całego przyrządu.

Warto podkreślić, że przy innych ograniczeniach nałożonych na stałe czasowe, rozkład byłby diametralnie różny od tego przedstawionego na rys.6 czy rys.7, jednak suma poszczególnych składowych będzie zawsze odpowiadała krzywej uzyskanej w drodze pomiarów.

Opisaną powyżej procedurą można wyznaczać współczynniki dla dowolnego typu diody, pod warunkiem, że będą dostępne dane dotyczące zależności  $Z_{th}(t)$ .

## 5. Omówienie wyników pomiarów

W trakcie badań eksperymentalnych mających na celu wyznaczenie  $R_{th}$  i  $Z_{th}$  przyrządu, kluczowe znaczenie dla prawidłowego wyznaczenia tych wartości ma dokładność pomiaru temperatury struktury półprzewodnikowej  $T_j$  przyrządu oraz temperatury punktu odniesienia  $T_{hs}$  [7].

Należy podkreślić, że pomiary te wykonywane są w czasie stygnięcia przyrządu po wyłączeniu obciążenia, a więc w warunkach cieplnie dynamicznych.

Dodatkowe utrudnienia występujące w przypadku przyrządów wieloprądowych stanowi niewielka różnica temperatur między strukturą a radiatorem, która zmienia się w trakcie pomiaru w granicach około  $(10 \div 0)^\circ\text{C}$ . Tak więc uchyb pomiaru jednej z wartości na poziomie  $1^\circ\text{C}$  może spowodować istotny błąd przy wyznaczaniu  $Z_{th}(t)$  [10].

Należy także zaznaczyć, że obydwie wymiennie wartości temperatury -  $T_j$  i  $T_{hs}$  wyznaczone są metodą pośrednią, dwoma różnymi sposobami -  $T_j$  jako napięcie  $U_F(T_j)$  dla prądu stałego o małej wartości np. 100 mA, natomiast  $T_{hs}$  jako napięcie termopary.

Poprawne wyniki pomiarów zależą, w tym przypadku głównie od dokładnego skalowania elementów pomiarowych przy wykorzystaniu tego samego punktu odniesienia. Fakt, że pomiary temperatury  $T_j$  i  $T_{hs}$  wykonywane są dwoma różnymi sposobami, może powodować dodatkowe uchyby (oprócz wynikających ze skalowania) wywołane przez możliwe do wystąpienia różne stałe czasowe zastosowanych systemów pomiarowych.

W tych okolicznościach, najkorzystniejsze byłoby utrzymanie temperatury punktu referencyjnego  $T_{hs}$ , jako punktu odniesienia, na stałym poziomie przez czas  $(20 \div 30)$  s po wyłączeniu obciążenia. Jest to jednak praktycznie niemożliwe, ponieważ nagrzany do temperatury wyższej niż temperatura otoczenia przyrząd półprzewodnikowy stygnie po wyłączeniu obciążenia. Temperatura  $T_{hs}$  dąży do temperatury otoczenia.

W przypadku pomiarów cieplnych diody DB-5 umieszczonej w radiatorze firmowym RY-300 niekorzystny dla dokładności pomiarów spadek temperatury  $T_{hs}$  w ciągu

30 sek po wyłączeniu obciążenia wyniósł

$$\Delta T_e = (90,8 - 86)^\circ\text{C} = 4,8^\circ\text{C}.$$

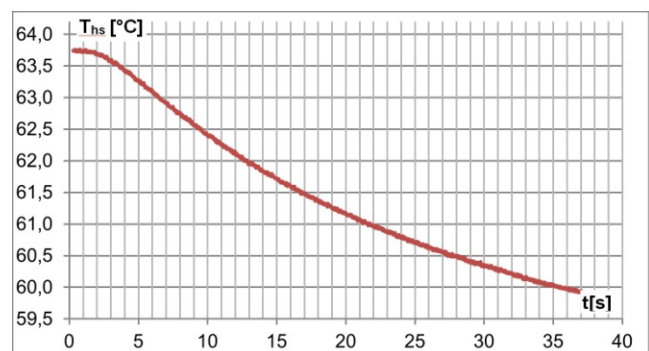
Wymieniony spadek temperatury  $T_{hs}$  uwarunkowany jest stratami mocy wydzielonymi w przyrządzie w trakcie jego nagrzewania, oraz przejściową impedancją cieplną  $Z_{th(hs-A)}$  punkt referencyjny – otoczenie.

W celu ograniczenia tego spadku temperatury zanurzono diodę z radiatorem w zbiorniku z wodą destylowaną o pojemności 100 l, przy jednostkowej pojemności cieplnej tego czynnika wynoszącej  $4190 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ .

Można więc było traktować wodę jako otoczenie o ustalonej, niezmiennej temperaturze w trakcie trwania pomiarów  $T_j$  i  $T_c$ , po wyłączeniu obciążenia. Temperatura wody w ciągu 30 sekund obniżyła się o  $0,1^\circ\text{C}$ .

Założono, że w tym rozwiązaniu ze względu na mniejszą niż w układzie radiator-powietrze rezystancję cieplną radiator-woda, wystąpi mniejsza różnica temperatur tych elementów, a więc wolniejsze obniżanie temperatury obudowy przyrządu w trakcie jego stygnięcia. Powinno to poprawić dokładność przy wyznaczaniu różnicy temperatur  $\Delta T_{(j-hs)}$ .

Zarejestrowany w tych warunkach przebieg temperatury obudowy przedstawiono na rys. 8



Rys. 8. Temperatura punktu referencyjnego radiatora diody DB-5 przy chłodzeniu wodnym w trakcie stygnięcia po wyłączeniu obciążenia

Występująca wówczas różnica temperatur obudowy na początku i końcu procesu stygnięcia (po 30 sek.) wyniosła  $(63,7-60,3)^\circ\text{C}=3,4^\circ\text{C}$ . Jest to poprawa w stosunku do chłodzenia powietrznego, jednak trudno uznać ten wynik jako w pełni zadowalający.

Większą stabilizację temperatury obudowy można uzyskać przez kolejne zmniejszenie rezystancji cieplnej między radiatorem a czynnikiem chłodzącym, co stanowi przedmiot obecnie prowadzonych badań w tym zakresie.

Obniżenie wartości rezystancji cieplnej radiator-otoczenie pozwala także na zwiększenie mocy wydzielanej w przyrządzie badanym co pozwala uzyskać większą różnicę temperatur  $T_j - T_{hs}$  przy zachowaniu temperatury przyrządu na określonym poziomie. Poprawia to dokładność pomiarów  $\Delta(T_j - T_{hs})$ .

Ważne jest, żeby odpowiednie pomiary wykonać w warunkach chłodzenia naturalnego, ponieważ tylko takie warunki zapewniają dokładność i powtarzalność wyników, zarówno w warunkach cieplnie ustalonych jak i dynamicznych.

Należy podkreślić, że zagadnienie poprawnego wyznaczania rezystancji i przejściowej impedancji cieplnej przyrządów energoelektronicznych ma istotne znaczenie praktyczne, umożliwia bowiem weryfikację wyników analiz i obliczeń teoretycznych a także stanowi element oceny jakości produkcji przyrządów energoelektronicznych.

## 5. Wnioski końcowe

Przedstawiona w niniejszej pracy eksperymentalna metoda wyznaczania parametrów cieplnych przyrządów energoelektronicznych przydatna w ocenie ich właściwości oraz jakości jest jednak kłopotliwa w realizacji. Wymaga stanowiska pomiarowego o prądzie stałym nie mniejszym niż kilkaset amperów.

Istotne problemy sprawia równoczesny pomiar temperatury złącza półprzewodnikowego i referencyjnego punktu radiatora w stanie cieplnym nieustalonym, po wyłączeniu obciążenia. Temperatury te mierzone są dwoma różnymi metodami pośrednimi, przy czym dla prawidłowego określenia przejściowej impedancji cieplnej, istotne jest dokładne wyznaczenie różnicy temperatur złącza i określonego punktu odniesienia  $\Delta T_{j-hs}$ .

Różnica ta w odniesieniu do przyrządów dużej mocy w trakcie pojedynczego pomiaru zmienia się w granicach od około 10 do 0 stopni Celsjusza, przy temperaturze tych elementów na poziomie 100°C.

Uzyskanie w tych warunkach prawidłowych wyników badań wymaga spełnienia następujących wymogów:

- starannego skalowania elementów pomiaru temperatury złącza i obudowy w oparciu o ten sam wzorzec odniesienia,
- zastosowania precyzyjnych urządzeń pomiarowych i rejestrujących najnowszej generacji,
- fachowej obsługi stanowiska pomiarowego o odpowiednim doświadczeniu i wysokich kwalifikacjach merytorycznych.

W pracy przedstawiono autorski sposób rozkładu wyznaczonej eksperymentalnie zależności przejściowej impedancji cieplnej diody krzemowej dużej mocy na wykładnicze krzywe składowe.

W wyniku prowadzonych badań eksperymentalnych i analiz obliczeniowych, wyznaczone zostały dane w zakresie rezystancji i pojemności cieplnej schematu zastępczego, przyrządu energoelektronicznego według Fostera.

Wyniki te pozwalają na obliczenie przebiegu temperatury struktury przyrządu dla strat mocy wydzielanych w tym elemencie o wartościach zmiennych w czasie.

**Autorzy:** Mgr inż. Andrzej Domino jest pracownikiem Zakładu Przekształtników Mocy Instytutu Elektrotechniki. Adres: ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, e-mail: [a.domino@tlen.pl](mailto:a.domino@tlen.pl)  
Mgr inż. Piotr Mazurek pracuje w Zakładzie Przekształtników Mocy Instytutu Elektrotechniki. Adres: ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, e-mail: [maziks@poczta.onet.pl](mailto:maziks@poczta.onet.pl)  
Prof. Dr hab. inż. Jan Sikora jest pracownikiem Politechniki Lubelskiej oraz Instytutu Elektrotechniki w Samodzielnej Pracowni

Obliczeń Numerycznych. Adres: ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, e-mail: [sik59@wp.pl](mailto:sik59@wp.pl)  
Dr hab. inż. Krzysztof Zymmer prof. IEL kieruje Zakładem Przekształtników Mocy Instytutu Elektrotechniki. Adres: ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, e-mail: [k.zymmer@iel.waw.pl](mailto:k.zymmer@iel.waw.pl)  
Podziękowania: Praca finansowana przez NCBiR w ramach projektu Gekon2/02/266561/11/2015.

## LITERATURA

- [1] Janke W.: Zjawiska w elementach i układach półprzewodnikowych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1992.
- [2] Januszewski S., Świątek H., Zymmer K.: Półprzewodnikowe przyrządy mocy. Właściwości i zastosowania. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności WKiŁ Warszawa 1999.
- [3] Januszewski S., Świątek H., Zymmer K.: Przyrządy energoelektroniczne i ich zastosowania. Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa 2008.
- [4] Tunia H., Winiarski B.: Podstawy energoelektroniki. WNT, Warszawa, wyd. I - 1975; wyd. II - 1980; wyd. III - 1987 r.
- [5] Tunia H., Winiarski B.: Energoelektronika. WNT, Warszawa 1994.
- [6] Zymmer K.: Zagrożenia zwarciove i przetężeniowe w półprzewodnikowych przyrządach energoelektronicznych. Prace Instytutu Elektrotechniki Zeszyt 219 Warszawa 2004.
- [7] Domino A., Zymmer K.: Wyznaczanie temperatury struktury przyrządu półprzewodnikowego w warunkach przeciążeń i zwarc. Przegląd Elektrotechniczny nr 10/2013 r. 219 Warszawa 2004.
- [8] Januszewski S., Świątek H.: Nowoczesne przyrządy półprzewodnikowe w energoelektronice. WNT Warszawa 1994.
- [9] Januszewski S., Świątek H., Zymmer K.: Półprzewodnikowe przyrządy mocy. Właściwości i zastosowania. Zarys encyklopedyczny. WKiŁ - Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Warszawa 1999, 280 stron.
- [10] Zymmer K., Maścibrodzki I.: Analiza stanów zwarciowych w przekształtnikach dużej mocy, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 258, 2012.
- [11] Zymmer K., Mazurek P.: Comparative investigation of SiC and Si power electronic devices operating at high switching frequency, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, Vol. 59, No. 4, 2011, DOI: 10.2478/v10175-011-0068-0.
- [12] César Pérez López: MATLAB Differential and Integral Calculus. Apress Academic, Matlab Solution Series, ISBN-13 (pbk):978-1-4842-0305-7, ISBN-13 (electronic): 978-1-4842-0304-0, 2014.
- [13] Pańczyk B., Łukasik E., Sikora J., Guziak T.: Metody numeryczne w przykładach. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2012.
- [14] Hofman A., Stocker K.: Thyristor-Handbuch. Siemens-Schuckertwerke Aktiengesellschaft-Berlin-Erlangen 1965.