

Politechnika Gdańska
Wydział Elektrotechniki i Automatyki

Borys Semenowicz

*Bezpiecznik krótkotopikowy jako element bezstykowego
hybrydowego ogranicznika prądów zwarciovych*

Rozprawa doktorska

Promotor
prof. dr hab. inż. Andrzej Wolny

Gdańsk – 2008



Gdynia ok. 1938 r.

SPIS TREŚCI

	Str.
Wykaz oznaczeń	3
1. Wstęp	6
2. Teza i cel pracy.....	16
3. Program i metodyka badań	17
3.1. Model bezstykowego, hybrydowego ogranicznika prądów do badania BKT	18
3.2. Program badań BKT	20
3.2.1. Czas przedłukowy w warunkach quasi statycznego nagrzewania	20
3.2.2. Charakterystyki przedłukowe $t - I$	21
3.2.3. Obliczenia czasu rozpadu topika poprzez wytapianie	21
3.2.4. Odbudowa wytrzymałości przerwy połukowej	21
4. Czas przedłukowy BKT	22
4.1. Proces nagrzewania BKT	23
4.2. Nagrzewanie długotrwałe BKT	28
4.2.1. Własności modelu BKT	29
4.2.2. Pomiar rezystancji przejścia	31
4.2.3. Układ do badania obciążalności długotrwałej bezpiecznika	34
4.2.4. Obciążalność długotrwała BKT	36
4.2.4.1. Założenia do obliczeń	39
4.2.4.2. Dobór siatki	39
4.2.5. Porównanie wyników obliczeń z pomiarami obciążalności długotrwałej	42
4.3. Modelowanie cylindrycznej wkładki krótkotopikowej	43
4.4. Wpływ warunków chłodzenia na obciążalność długotrwałą. Ogólna budowa BKT	47
4.5. Praca BKT przy szybkim wzroście temperatury	51
4.5.1. Opis modelu i obliczenia charakterystyk $t - I$	51
4.5.2. Wpływ intensywności chłodzenia na charakterystykę $t - I$ BKT	64
4.6. Porównanie znormalizowanych charakterystyk $t - I$ BKT oraz bezpiecznika klasycznego	66
5. Wytrzymałość powrotna BKT	67
5.1. Określenie wytrzymywanego napięcia przerwy międzystykowej	67
5.1.1. Opis modelu BKT dla statycznych prób napięciowych	68

5.1.2. Komora próżniowa	69
5.1.3. Pomiary długotrwałej wytrzymałości napięciowej	70
5.2. Określenie czasu rozpadu topika	72
5.2.1. Pomiary i wyniki czasu wytapiania topika	72
5.2.2. Modelowanie czasu wytapiania topika	79
5.3. Odbudowa wytrzymałości powrotnej przerwy połukowej BKT	91
5.3.1. Układ pomiarowy	92
5.3.2. Model BKT do prób napięciowych	92
5.3.3. Pomiary dynamicznej wytrzymałości napięciowej	93
5.3.4. Modelowanie odbudowy wytrzymałości powrotnej BKT.....	96
5.3.5. Eksperymentalna ocena szybkości odbudowy wytrzymałości powrotnej	102
6. Podsumowanie i wnioski	107
7. Osiągnięcia	113
8. Literatura	113
Z1. Załącznik 1: Modelowanie rozwiązania okuć chłodzących BKT w programie FLUX	118
Z2. Załącznik 2: Skalowanie przetwornika elektrooptycznego do sterowania tranzystora IGBT	122
Z3. Załącznik 3: Skalowanie bocznika miniaturowego do pomiaru prądu w gałęzi tranzystora IGBT hybrydowego ogranicznika prądów	125
Z4. Załącznik 4: Części składowe modelu bezpiecznika	127
Z5. Załącznik 5: Przegląd metod łączenia topików	132
Z6. Załącznik 6: Przykład wyznaczenia wartości współczynników użytych w funkcji aproksymującej punkty pomiarowe przy pomocy programu Gnuplot	134

Wykaz oznaczeń

A	- obwód przekroju poprzecznego
c	- prędkość światła
c_c	- ciepło właściwe cieczy
c_t	- ciepło właściwe topika
C	- pojemność elektryczna
C_{onvR}	- współczynnik konwekcji
$C_{th r}$	- pojemność cieplna okuć
$C_{th t}$	- pojemność cieplna topika
d	- średnica
E	- energia
g	- przewodność elektryczna łuku elektrycznego
h	- stała Plancka
H_{vap}	- entalpia parowania
i	- wartość chwilowa prądu
I	- prąd
I_{gr}	- prąd graniczny bezpiecznika krótkotopikowego
I_{max}	- amplituda prądu
I_n	- prąd znamionowy
I_{SOK}	- przewodność cieplna używana w programie FLUX
j	- gęstość prądu
k	- stała Boltzmanna
k_w	- współczynnik wypierania prądu,
K	- współczynnik przewodzenia ciepła używany w programie FLUX
K_m	- stała Meyera
l	- długość topika
L	- indukcyjność
m	- masa
m_c	- masa cieczy
m_t	- masa topika
p_0	- ciśnienie otoczenia
p_p	- ciśnienie plazmy
P_c	- straty odprowadzone przez powierzchnię boczną topika
P_q	- straty w topiku
P_r	- straty oddawane do otoczenia z powierzchni bocznej okucia BKT
P_λ	- straty ciepła odprowadzone osiowo z topika przez przewodzenie

q	- strumień ciepła
q_v	- czynnik opisujący gęstość mocy
Q_t	- ciepło pobrane na stopienie obszaru topika
Q_{rad}	- czynnik opisujący gęstość mocy wypromieniowanej
Q_p	- ciepło pobrane na odparowanie ciekłego obszaru topika
r	- promień
r_p	- promień stopy plazmy stykającej się z okuciem
r_t	- promień topika
R	- rezystancja
R_{20}	- rezystancja w temperaturze 20 °C
R_p	- rezystancja przejścia
R_t	- rezystancja topika
$R_{th\ r-a}$	- rezystancja cieplna przejścia pomiędzy okuciem chłodzącym a otoczeniem
$R_{th\ r}$	- rezystancja cieplna okuc
$R_{th\ t}$	- rezystancja cieplna topika
$R_{th\ t-r}$	- rezystancja cieplna pomiędzy topikiem a okuciem chłodzącym
R_{adR}	- współczynnik promieniowania
R'	- rezystancja folii topika wyznaczona wg spadku napięcia
s_{Cu}	- przekrój styków
S	- pole przekroju poprzecznego
S_Z	- pole przekroju poprzecznego zwarciovego topika
$t1$	- czas wytapiania topika
$t2$	- czas dejonizacji przestrzeni po topiku
t_l	- czas łukowy
t_p	- czas przedłukowy
t_s	- czas stygnięcia plazmy
t_w	- czas do osiągnięcia temperatury wrzenia
T	- temperatura
T_a	- temperatura otoczenia
T_p	- temperatura plazmy
T_t	- temperatura topnienia
T_{max}	- temperatura maksymalna
T_U	- temperatura ustalona
T_w	- temperatura wrzenia
U	- napięcie
U_{ac}	- spadek napięcia
v	- prędkość

v_{bb}	- prędkość wytapiania
v_p	- prędkość czoła rozprzestrzeniającej się plazmy
V_p	- objętość rozprzestrzeniającej się plazmy
V_0	- objętość otoczenia, przestrzeni okołotopikowej bezpiecznika
w	- wektor prędkości unoszenia
α	- współczynnik funkcji aproksymującej charakterystykę $t - I$ dla czasów długich
α_r	- temperaturowy współczynnik rezystancji,
β	- współczynnik funkcji aproksymującej charakterystykę $t - I$ dla czasów krótkich
δ	- gęstość materiału topika
γ_m	- gęstość materiału w temperaturze wrzenia
λ	- współczynnik przewodzenia ciepła
λ_t	- współczynnik przewodzenia ciepła topika
λ_a	- współczynnik przewodzenia ciepła otoczenia
λ_{max}	- maksymalna długość fali dla emitowanego widma rozgrzanej plazmy
ν	- częstotliwość fali elektromagnetycznej
ρ	- rezystywność
ρ_{Cu}	- rezystywność miedzi
ρ_t	- rezystywność topika
σ	- współczynnik oddawania ciepła do otoczenia
τ	- stała czasowa

Wykaz użytych skrótów:

2D	- dwuwymiarowy
3D	- trójwymiarowy
BKT	- bezpiecznik krótkotopikowy
CHCL	- bezstykowy ogranicznik prądu (z ang. contactless hybrid current limiter)
CH	- kanał pomiarowy oscyloskopu
EO	- elektrooptyczny
EM	- elektromagnetyczny
F	- bezpiecznik
FEM	- metoda elementów skończonych
PPF	- bezpiecznik wielokrotnego działania (z ang. permanent power fuse)
UDZ	- układ detekcji zwarcia
WKT	- wkładka krótkotopikowa

1. Wstęp

Rozwój cywilizacji wiąże się z rosnącą liczbą zainstalowanych urządzeń elektrycznych i zwiększającym się zapotrzebowaniem na energię elektryczną. Wzrost liczby zainstalowanych urządzeń powoduje, że prądy robocze stacji elektroenergetycznych stają się coraz większe, a spodziewane prądy zwarciovych w sieciach niskiego napięcia często już przekraczają poziom 200 kA. Ponadto rozwój telekomunikacji i informatyki wiąże się z ze wzrastającą liczbą urządzeń elektronicznych i zaostrzeniem wymagań stawianych jakości dostarczanej energii [5], [12], [41], której zasadniczym, z punktu widzenia odbiorcy, parametrem jest ciągłość zasilania i długość przerw. Pojawiające się zwarcia powodują wyłączenia i zapady napięcia [63], [34], które w zależności od konfiguracji sieci mogą przenosić się na innych odbiorców [31]. W związku z tym dąży się do możliwie jak najszybszego odłączenia obwodu powodującego zakłócenie w sieci elektroenergetycznej. Do ograniczania skutków zwarć, przy zapewnieniu zdolności do przewodzenia dużych prądów roboczych, używa się różnorodnych urządzeń zabezpieczających. Ich czas działania od chwili wykrycia zakłócenia do wyłączenia może dochodzić nawet do ok. 80 ms. Powoduje to nie tylko obniżenie jakości energii, ale i znaczne narażenie elektrodynamiczne i cieplne urządzeń rozdzielczych, co w konsekwencji może spowodować ich uszkodzenie i potrzebę remontu.

Podstawowym zadaniem układów zabezpieczających jest wyłączenie prądu zwarciovego. Aby ograniczyć skutki elektrodynamiczne i cieplne przepływu prądu zwarciovego należy dokonać wyłączenia prądu w czasie krótszym niż 5 ms, co nie dopuszcza do pojawienia się maksymalnej wartości prądu spodziewanego.

Zasadą działania układów ograniczających prąd zwarciovych, niezależnie od tego czy jest to układ ograniczający półprzewodnikowy, czy wykorzystujący łuk elektryczny, jest wytworzenie napięcia na ograniczniku o wartości przekraczającej napięcie zasilania. Wynika to z faktu, że prąd zwarciovych płynie pod wpływem napięcia zasilającego zaś ogranicznik wytwarza napięcie kompensujące w obwodzie napięcia zasilania. Stąd ograniczenie prądu i w konsekwencji sprowadzenie go do zera jest możliwe tylko po wytworzeniu na ograniczniku dostatecznie wysokiego napięcia.

Obwody nn zabezpieczane są różnorodną aparaturą [62]. Często stosuje się urządzenia ograniczające. Najprostszym i skutecznym ogranicznikiem jest bezpiecznik topikowy piaskowy [37]. W czasie zwarcia działa on bardzo szybko i skutecznie ogranicza prądy, ale ze względu na to, że wytwarza znaczne straty mocy przy obciążeniach roboczych, jego zastosowanie jest ograniczone do prądów ciągłych rzadko przekraczających 1000 A.

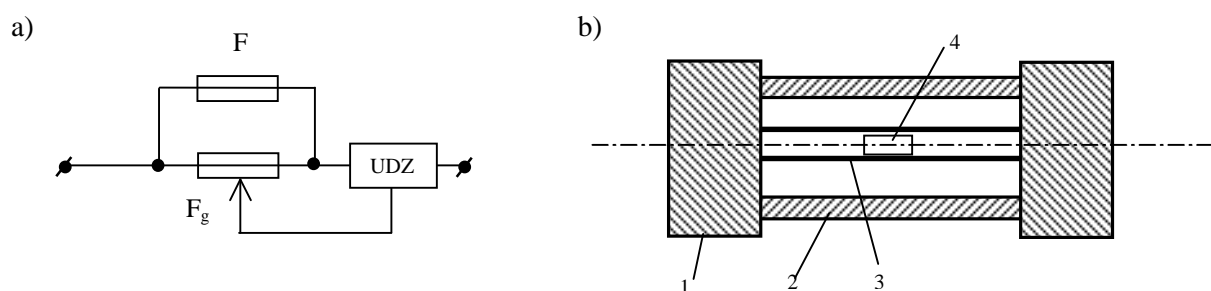
Aparatami, które mogą pracować przy prądach ciągłych powyżej 1 kA, przy małych stratach mocy, są wyłączniki. Szybkość działania wyłącznika jest zależna od skomplikowanego napędu. W przypadku zastosowania napędu klasycznego, czas działania wyłącznika jest wielokrotnie dłuższy od czasu działania bezpiecznika, co nie zapewnia ograniczenia prądu zwarciovego i szybkiego odłączenia uszkodzonego obwodu od zasilania. Buduje się wyłączniki ograniczające ze specjalnym, elektrodynamicznym otwieraniem styków, wyposażone w kosztowne napędy dynamiczne. Stosuje się je jednak stosunkowo rzadko ze względu na wysoką cenę i duże wymiary.

Ograniczanie prądów zwarciovych przy zachowaniu zdolności przewodzenia dużych prądów roboczych w oparciu o klasyczne konstrukcje jest trudne. Duże nadzieje wiązano z wyłącznikami statycznymi. Jednak powstające w nich duże straty mocy w normalnych warunkach pracy, koszt i gabaryty powodują, że stosuje się je stosunkowo rzadko, tylko wówczas, gdy częstość łączenia jest duża. Próby zmniejszenia strat mocy doprowadziły do powstania wyłączników (ograniczników) hybrydowych, w których oddzielono, najczęściej zestykowy, główny tor prądowy łącznika od obwodu zawierającego łącznik statyczny, lub inny zdolny do jak najszybszego wyłączenia prądu. Taka idea dała początek różnym typom ograniczników hybrydowych. Obwód główny ogranicznika hybrydowego może być łatwo dostosowany do przewodzenia nawet bardzo dużych prądów roboczych, przy niewielkich stratach mocy. Nie musi on, bowiem, posiadać zdolności wyłączalnej większej, niż to jest konieczne do przerwania wyłączanego prądu do równoległego łącznika pomocniczego. Ze względu na to, że urządzenia półprzewodnikowe nie są w stanie pochłoniąć dużej energii wyłączania prądu z ograniczaniem, gdy konieczne jest rozproszenie energii pola magnetycznego wytwarzanego przez prąd (zwarciovowy) zazwyczaj łącznik pomocniczy jest wyposażony w warystorowe absorbery energii. Wymuszane przez nie napięcie wywołuje redukcję prądu. Równoległy obwód zawierający łącznik pomocniczy, najczęściej statyczny, bierze pomijalny udział w przewodzeniu prądów roboczych.

Istnieje wiele typów ograniczników hybrydowych. Ważniejsze z nich, o cechach, które należy wziąć pod uwagę przy analizowaniu własności bezpiecznika krótkotopikowego, będącego przedmiotem niniejszej pracy, scharakteryzowano poniżej. Dla porównania przedstawiono również spodziewane własności ogranicznika hybrydowego opartego na bezpieczniku krótkotopikowym.

Ograniczniki eksplozyjne

Należą do najstarszych ograniczników, wykorzystujących własności ograniczające bezpiecznika piaskowego [24], [39]. Składają się z równolegle połączonych bezpieczników: głównego F_g , oraz pomocniczego F (rys. 1.1), przy czym F_g nie w pełni zasługuje na nazwę „bezpiecznik”, bo nie przetapia się samoczynnie. Przewodzenie dużych prądów roboczych przy małych stratach jest możliwe, gdy bezpiecznik w torze głównym posiada duży przekrój poprzeczny. Jednak wtedy przetopienie nie nastąpi samoczynnie pod wpływem prądu zakłóceniewego. Aby przyspieszyć jego działanie, zastosowano ładunek wybuchowy, sterowany z układu zapalającego. Po przerwaniu obwodu głównego prąd jest następnie przewodzony przez bezpiecznik pomocniczy, który działając powoduje jego ograniczenie. Z racji stosowania ładunków wybuchowych ograniczniki eksplozyjne nie mogą być używane w miejscach o szczególnym zagrożeniu. Ograniczenie prądu jest opóźnione zgodnie z charakterystyką bezpiecznika pomocniczego przejmującego prąd z obwodu głównego. Główną wadą eksplozyjnego ogranicznika, przedstawionego w pkt. 1.1, jest jednokrotne działanie, po którym konieczna jest wymiana i utylizacja obydwu bezpieczników.

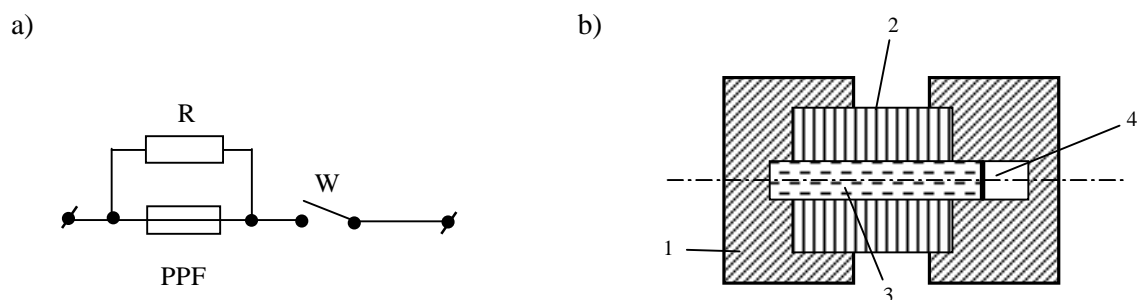


Rys. 1.1. Ogranicznik wybuchowy: a) schemat: F_g – bezpiecznik główny z ładunkiem wybuchowym, F – bezpiecznik pomocniczy, b) szkic przekroju bezpiecznika eksplozyjnego, 1 – zacisk doprowadzający prąd, 2 – obudowa izolacyjna, 3 – tor prądowy, 4 – materiał wybuchowy

Bezpiecznik wielokrotny PPF

Konkurencyjny ogranicznik wykorzystujący bezpiecznik wielokrotnego działania (PPF) (rys. 1.2) [25] zbudowany w ten sposób, że w izolacyjnym cylindrze umieszczono topik z łatwotopliwego metalu (sód) poddanego bardzo wysokiemu ciśnieniu, który pod wpływem nagrzewania wywołanego przez prąd zakłóceniewy topi się, a później odparowuje. Pod wpływem bardzo wysokiego ciśnienia, przewodność plazmy łuku zmniejsza się i wytworzone wysokie napięcie łukowe wymusza przerzut prądu do równoległego rezystora. Po przerzuceniu prądu do rezystora bezpiecznik PPF stygnie, a kondensujący sól jest wciskany wysokim

ciśnieniem do kanału izolacyjnego odbudowując topik. Żeby przerwać prąd płynący przez rezystor i zapobiec ponownemu załączeniu uszkodzonego obwodu stosuje się szeregowy wyłącznik W, rys. 1.2.

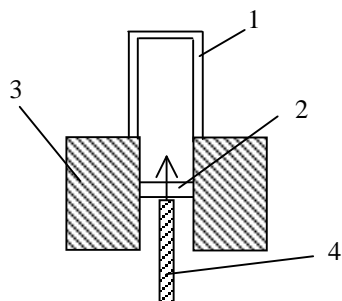


Rys. 1.2. Ogranicznik z bezpiecznikiem PPF, a) schemat ogranicznika, PPF – bezpiecznik wielokrotny R – równoległa gałąź, W – wyłącznik, b) przekrój bezpiecznika PPF, 1 – zacisk doprowadzający prąd, 2 – obudowa izolacyjna, 3 – topik z niskotopliwego metalu, 4 – komora kompensacyjna

Gęstość prądu w warunkach długotrwałego obciążenia PPF wynosi około 100 A/mm^2 , a przy prądach znamionowych o wartości od 200 A do 500A powstają straty ok. 500 W. Aby szybkie działanie bezpiecznika i ucięcie prądu nie wywoływało przepięć, zastosowany rezystor R musi pochłonąć energię pola magnetycznego wyłączanego obwodu. Ograniczniki tego typu są kosztowne, wymagają dodatkowego wyłącznika, a ich trwałość jest niewielka.

Bezpiecznik dwuścieżkowy

Bezpiecznik dwuścieżkowy jest w swej istocie dwubezpiecznikowym ogranicznikiem prądu. Miał on być pomysłem na opanowanie dużych prądów znamionowych przy niewielkich stratach i efektywnym ograniczaniu prądu zapewnianym przez bezpiecznik piaskowy. Posiada dwa równoległe tory prądowe: [30], [57], [51] główny, utworzony przez topik krótki, przewodzący prądy robocze oraz równoległy tor pomocniczy będący umieszczonym we wspólnej obudowie długim, piaskowym bezpiecznikiem ograniczającym (rys. 1.3).



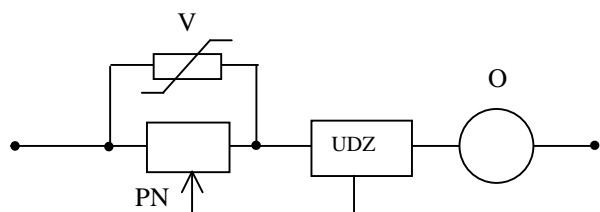
Rys. 1.3. Bezpiecznik dwuścieżkowy: 1 – topik pomocniczy, 2 – topik główny, 3 – okucie mocujące topiki, 4 – ruchoma przegroda izolacyjna

Zagwarantowanie dużej obciążalności topika głównego przy równoczesnej minimalizacji jego przekroju prowadzi do istotnego skrócenia jego długości, pozwalającego na wykorzystanie

efektywnego chłodzenie przez przewodnictwo. W literaturze można znaleźć informację, że daje się osiągnąć w warunkach roboczych gęstość prądu zbliżoną do 5 kA/mm^2 . Wówczas jednak, po rozpadzie topika, odstęp między stykami jest niewielki i trudno szybko odbudować niezbędną wytrzymałość powrotną, która początkowo powinna przewyższyć minimalne napięcie przerzutu prądu ($100\div 200 \text{ V}$), a następnie napięcie na łuku bezpiecznika pomocniczego i w końcu napięcie powrotne sieci. Warto przy tym pamiętać, że bezpiecznik pomocniczy powinien ograniczyć wyłączany prąd, a więc wytworzyć napięcie na łuku istotnie przewyższające napięcie sieci. Stwarza to trudne do spełnienia wymagania napięciowe dla krótkotopikowego bezpiecznika w torze głównym. Dlatego w bezpiecznikach dwucieżkowych Krasuskiego [30] stosowano przesłone izolacyjną 4, wsuwaną mechanicznie między styki bezpiecznika po rozpadzie topika, co jednak istotnie pogarszało własności takiego bezpiecznika.

Ogranicznik półprzewodnikowy

Działanie wyżej pokazanych ograniczników prądu opiera się na wytworzeniu przeciwnapięcia przez palący się łuk i przerzuceniu prądu wyłączanego do gałęzi pomocniczej. Odmianą szybko działającego ogranicznika działającego bez łuku jest ogranicznik statyczny (rys. 1.4).

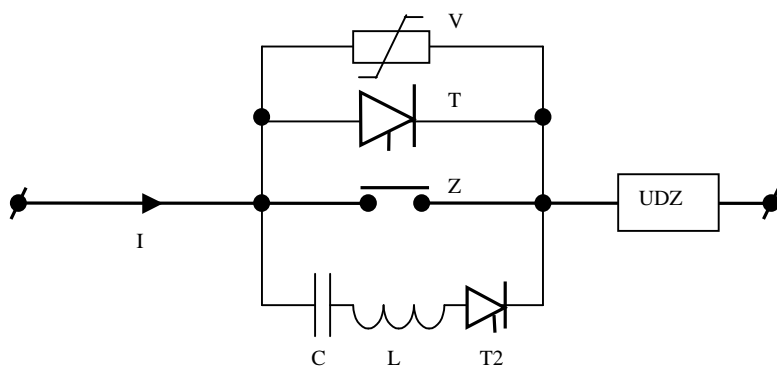


Rys. 1.4. Ogranicznik półprzewodnikowy, PN – łącznik półprzewodnikowy, O – odbiornik, V – warystor, UDZ – układ detekcji zwarcia

Funkcje łącznika może spełniać tyrystor lub tranzystor [53]. W przypadku użycia tyrystora konieczny jest dodatkowy układ redukujący do zera prąd wyłączany. Podobnie jak w przypadku innych ograniczników, po wyłączeniu obwodu głównego prąd zostaje przerzucony do gałęzi pomocniczej z warystorowym absorberem energii V, który powoduje jego ograniczenie. Ogranicznik półprzewodnikowy mimo dużej szybkości działania niezbyt chętnie jest stosowany w obwodach o dużych obciążeniach ciągłych ze względu na duże straty mocy.

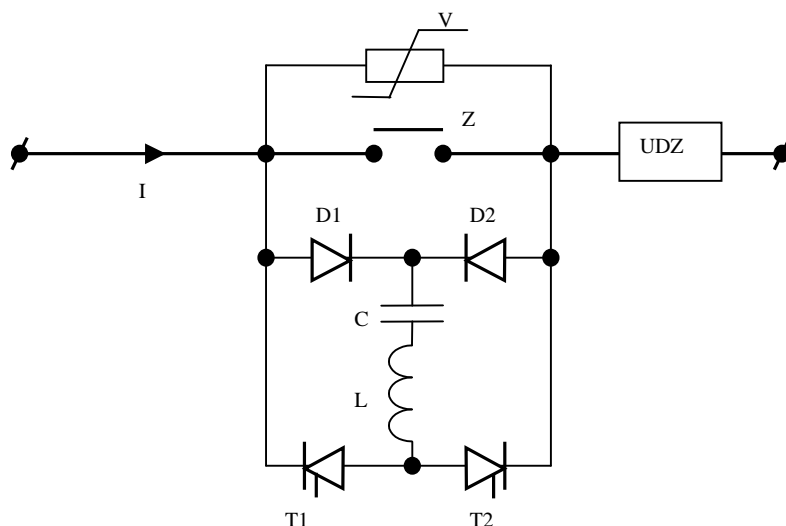
Zestykowy ogranicznik hybrydowy

Czas działania zwykłych wyłączników zestykowych jest zbyt długi, aby mogły one ograniczać prądy zwarciove. Znaczne przyspieszenie działania jest możliwe przez zmianę napędu styków z elektromechanicznego na elektrodynamiczny [44]. Taka zmiana umożliwia skrócenie czasu działania wyłącznika nawet poniżej 0,5 ms. Należy jednak pamiętać, że tak krótki czas jest ściśle związany z odstępem między stykami w stanie otwarcia. Krótkie czasy są możliwe do osiągnięcia tylko dla bardzo małych odstępów, wówczas, gdy nie wymaga się od łącznika zdolności gaszenia łuku elektrycznego. Schemat ogranicznika zestykowego wykorzystującego napęd elektrodynamiczny pokazano na rys. 1.5. Zestyk Z napędzany napędem elektrodynamicznym jest połączony z równoległą gałęzią łącznika półprzewodnikowego T , do której przetrucany jest prąd zwarciovy, gdy na styku głównym napięcie osiąga poziom ok. 2 V, co uniemożliwia zapalenie się łuku. Po otwarciu styku głównego i powstaniu przerwy izolacyjnej, gałąź z łącznikiem półprzewodnikowym T zostaje wyłączona przez układ pomocniczy (L , C , $T2$). Po tym czasie zestyk główny musi być rozwarty na taką odległość, aby powstała przerwa wytrzymała napięcie powrotne. Przepięcie powstałe podczas wyłączania prądu jest ograniczane przez warystor V , który musi pochłonąć energię wyłączania. Czas ograniczania zależy od szybkości otwierania zestyku głównego i zwykle przekracza 200 μ s.



Rys. 1.5. Zestykowy łącznik hybrydowy, Z – styk główny, T – tyrystor mostkujący styk Z , V – warystor, C , L , $T2$ – układ komutacyjny do wyłączenia tyrystora T

Ograniczniki hybrydowe mogą być budowane jako symetryczne – dla układów prądu przemiennego [18], [22] (rys. 1.6). W takim przypadku, w zależności od polaryzacji prądu głównego I włączony zostaje tyrystor $T1$ lub $T2$. Prąd z układu L , C przepływając przez diodę np. $D2$ powoduje jej przejście do stanu przewodzenia. Następuje wtedy przetrucenie prądu I z gałęzi zestyku do gałęzi diod $D1$ i $D2$ co powoduje, że napięcie na otwierającym się zestyku przekracza 2 V.



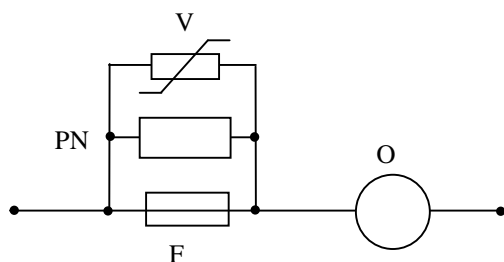
Rys. 1.6. Symetryczny zestykowy łącznik hybrydowy [9]

Zaletą hybrydowego ogranicznika jest jego duża obciążalność i szybkość działania. Taki układ może być stosowany w obwodach prądu stałego (w układach np. trakcyjnych) w których występuje problem szybkiego wyłączenia ze względu na problemy gaszenia stałoprądowego łuku elektrycznego. Wadą jest potrzeba utrzymania zasobnika energii napędu w stanie gotowości do pracy, oraz rozmiary napędu elektrodynamicznego.

Krokiem w kierunku zmniejszenia kosztów ograniczania prądów zwarciovych, przez uproszczenie budowy ogranicznika, jest hybrydowy ogranicznik bezstykowy, nie posiadający napędu, którego głównym elementem jest bezpiecznik krótkotopikowy, będący przedmiotem niniejszej rozprawy.

Bezstykowy, hybrydowy ogranicznik prądu

Bezstykowy ogranicznik prądu (CHCL), rys. 1.7, powstał przez modyfikację bezpiecznika dwuścieżkowego, lub ogranicznika hybrydowego zawierającego łącznik zestykowy. Zastępując w bezpieczniku dwuścieżkowym bezpiecznik pomocniczy łącznikiem statycznym, lub w ograniczniku hybrydowym łącznik zestykowy – bezpiecznikiem, uzyskuje się beznapędowy ogranicznik hybrydowy o specjalnych właściwościach.



Rys. 1.7. Bezstykowy, hybrydowy ogranicznik prądów: F – bezpiecznik, PN – łącznik półprzewodnikowy, V – warystor, O – odbiornik

W torze głównym CHCL znajduje się specjalny bezpiecznik F. Po osiągnięciu określonej wartości prądu i po zadziałaniu tego bezpiecznika zostaje włączony równoległy łącznik półprzewodnikowy (PN) przejmujący prąd z toru głównego. Wyłączenie PN i włączenie tym samym znacznej impedancji do obwodu zwarciovego powoduje ograniczenie prądu zwarciovego. W chwili wyłączenia łącznika półprzewodnikowego powstaje przepięcie ograniczone do bezpiecznego poziomu przez warystor. Dzięki temu, że bezpiecznik F jest zwierany łącznikiem półprzewodnikowym, może on posiadać znikomą zdolność wyłączenia. Bezpiecznik F nie musi mieć zdolności gaszenia łuku i dzięki temu może posiadać topik o bardzo małej długości (bezpiecznik krótkotopikowy), umożliwiając przewodzenie dużych prądów roboczych przy małych stratach mocy.

Ogranicznik CHCL posiada, więc wiele zalet:

- Brak kosztownego napędu elektrodynamicznego z dużym, pojemnościowym zasobnikiem energii.
- Samoczynnie reaguje na pojawienie się prądu zwarciovego, dzięki czemu wzrasta niezawodność działania i upraszcza się budowa.
- Przejmowanie prądu z bezpiecznika przez łącznik półprzewodnikowy nie wymaga dużego napięcia. Wystarczy kilkanaście woltów gwarantowanych przez minimalne napięcie łuku (około 16 V), a nie np. 100÷200 V, jak w przypadku bezpiecznika dwuścieżkowego, wymagających efektywnego chłodzenia łuku.
- Możliwość użycia bezpiecznika o bardzo krótkim topiku pozwala na dopuszczenie bardzo dużej gęstości roboczej prądu topika (znacznie większej niż w klasycznym bezpieczniku), dzięki czemu redukuje się straty mocy (mniejsze niż ogranicznika PPF).
- Małe rozmiary i masa topika gwarantują bardzo szybkie działanie w warunkach zwarciovych.
- Istnieje łatwość kontroli przepięć dzięki warystorowi będącemu integralną częścią CHCL.
- CHCL jest ogranicznikiem, który może pracować zarówno w obwodach prądu stałego jak i przemiennego.
- CHCL nie posiada komór gaszeniowych, a więc pozwoli na znaczną oszczędność miejsca, szczególnie gdy zastosuje się go w obwodzie prądu stałego.

Do wad CHCL można zaliczyć następujące cechy:

- CHCL musi posiadać układ sterujący łącznikiem półprzewodnikowym wraz ze źródłem zasilania.
- Łącznik półprzewodnikowy w CHCL przystosowanym do pracy w obwodach prądu przemiennego musi posiadać podwójną liczbę elementów półprzewodnikowych.

- Charakterystyka $t - I$, wynikająca z własności bezpiecznika krótkotopikowego jest bardzo szybka, co może być niekorzystne, gdy w zabezpieczanym obwodzie długotrwanie płyną duże prądy rozruchowe.

Biorąc pod uwagę niewielkie rozmiary niskie koszty i dużą niezawodność działania stosowanie CHCL może poprawić jakość energii elektrycznej w takich obwodach w których użycie innych ograniczników może być utrudnione. Wiele własności CHCL zależy od zastosowanego bezpiecznika krótkotopikowego. Wymienić tu można przede wszystkim obciążalność roboczą, prąd ograniczony i czas ograniczania prądu, szybkość działania (charakterystyka $t - I$) i wytrzymałość napięciową. Dlatego dobre poznanie własności takiego bezpiecznika i umiejętność ich kształtowania mają duże znaczenie praktyczne.

Bezpiecznik krótkotopikowy

Biorąc pod uwagę przedstawione wyżej własności CHCL można spróbować określić niektóre cechy bezpiecznika krótkotopikowego (BKT) będącego integralną częścią tego ogranicznika:

- Przewodzenie prądów roboczych i przeciążeniowych nie może wywoływać znacznych strat mocy (poniżej 50 W).
- Działanie pod wpływem prądów zwarciovych powinno być jak najszybsze.
- Nie stawia się wymagań dotyczących napięcia łukowego – chłodzenie łuku nie jest istotne.
- Założenie przewodzenia dużych prądów roboczych wymaga dopuszczenie znacznej gęstości prądu topika, a w konsekwencji bardzo skutecznego chłodzenia. Im krótszy jest topik w stosunku do swej zastępczej średnicy, tym łatwiej oddaje ciepło przez przewodnictwo.
- Bezpiecznik po zadziałaniu musi wytrzymać napięcie powrotne oraz napięcie probiercze wynikające ze znamionowych warunków pracy. Dużą wytrzymałość elektryczną można uzyskać przez zwiększanie odstępów między stykami, czyli długości topika, lub stosując odpowiednie medium (próżnia, gaz sprężony). Pierwszy ze sposobów prowadziłby do redukcji dopuszczalnej gęstości prądu topika, co jest niekorzystne.
- Po rozpadzie topika krótki łuk pali się między masywnymi stykami. Jego zgaśnięcie i dejonizacja obszaru połukowego następuje po przejęciu prądu przez łącznik półprzewodnikowy. Proces dejonizacji musi być zdominowany przez dyfuzję, bo konwekcja jest pomijalna, a procesy jonizacyjne nie występują wskutek ograniczenia napięcia powrotnego do kilku woltów (napięcie przewodzenia tranzystora).
- Zmniejszenie masy topika wpływa korzystnie na proces dejonizacji, bo zmniejsza się zawartość metalu w plazmie łukowej.

- Mocowanie bardzo krótkiego topika między masywnymi stykami przystosowanymi do przewodzenia dużych prądów ogranicza możliwość chłodzenia topika przez konwekcję. Dlatego należy przyjąć, że całe ciepło wytwarzane w bezpieczniku jest rozpraszane wyłącznie przez zaciski i odprowadzenia. W granicznych przypadkach może istnieć konieczność stosowania specjalnego chłodzenia.

Istotne różnice cech bezpiecznika krótkotopikowego oraz bezpiecznika klasycznego (o długim topiku)

Bardzo krótki topik w BKT o małym przekroju, masywne styki przystosowane do pochłaniania i rozpraszania całego ciepła wydzielanego w topiku, brak gasiwa, lub jakichkolwiek innych środków gaszenia łuku, powodują, że BKT różni się zasadniczo od bezpiecznika klasycznego. W szczególności można wymienić następujące różnice:

- Gęstość prądu w topiku BKT jest prawie o dwa rzędy większa niż w bezpieczniku klasycznym.
- W BKT dominuje osiowy przepływ ciepła, podczas gdy w bezpieczniku klasycznym – promieniowy.
- Bliskość okuć powoduje osiowy przepływ ciepła i bardzo nierównomierny rozkład temperatury wzdłuż osi topika BKT, niezależnie od wartości prądu i szybkości jego zmian.
- Ze względu na rozkład nierównomierny temperatury można się spodziewać jednego obszaru w którym będzie maksymalna temperatura (topnienia). Nawet przy bardzo stromo narastającym prądzie trudno oczekiwać prążkowego rozpadu topika w BKT, charakterystycznego w przypadku bezpieczników klasycznych. Rozpad topika w takim przypadku będzie w skutek wytapiania.
- Mała masa topika BKT powoduje, że jego charakterystyki $t - I$ są szybkie.
- Dejonizacja obszaru połukowego jest zdominowana dyfuzją przy znikomym napięciu zewnętrznym, równym napięciu urządzenia półprzewodnikowego w stanie przewodzenia.
- Z wyżej wymienionych cech wynika, że nie można oczekiwać budzących niepokój przepięć, również ze względu na współdziałanie BKT z równoległym warystorem.

Wymienione wyżej różnice muszą wpłynąć istotnie na sposób modelowania BKT, w porównaniu ze spotykanymi modelami bezpiecznika klasycznego. W modelu BKT powinno się szczególnie zwrócić uwagę na:

- dominację cieplnego przewodnictwa osiowego oraz przemieszczania się strefy zmiany stanu skupienia wzdłuż topika,
- istotny wpływ styków, okuć i zacisków na charakterystyki $t - I$,
- rozpad topika przez wytapianie niezależnie od wartości wyłączanego prądu,

- dominację dyfuzji w procesie odbudowy wytrzymałości powrotnej, której towarzyszy znikomy wpływ pola elektrycznego wymuszanego napięciem przewodzenia równoległego urządzenia półprzewodnikowego.

Z wyżej przedstawionego porównania wynika, że mechanizmy działania BKT nie pokrywają się z mechanizmami uwzględnianymi w modelowaniu bezpieczników klasycznych. Z drugiej strony, wcześniejsze rozważania pokazują, że umiejętność kształtowania własności BKT może mieć duże znaczenie dla projektowania i aplikacji tych bezpieczników do bezstykowych ograniczników CHCL, które z kolei powinny pomóc w działaniach zmierzających do poprawy jakości energii. Z tego właśnie powodu podjęto niniejszą pracę.

2. Teza i cel pracy

Analizowany bezpiecznik krótkotopikowy stanowi główny tor prądowy bezstykowego ogranicznika prądu (CHCL) i jego własności wpływają na cechy tego ogranicznika. Dla zachowania poprawnej pracy BKT jako aparatu składającego się z topika o małej długości połączonego ze stykami, które doprowadzają prąd i odbierają ciepło musi być zachowane właściwe chłodzenie okuć. Z drugiej strony, warunki działania BKT wynikają z własności pozostałych części składowych CHCL, tj. równoległego łącznika statycznego i warystora przejmującego energię wyłączenia w procesie ograniczania prądu. W niniejszej pracy uwagę skupia się na analizie topika w samym BKT, przyjmując, że przerzut prądu następuje w najodpowiedniejszym momencie, za co jest w pełni odpowiedzialny łącznik statyczny CHCL wraz z układem sterowania.

Analizując dobór bezpieczników klasycznych wyróżnia się dwa charakterystyczne przypadki ich działania: wyłączenie przeciążeń i zwarć, które związane są z różnymi mechanizmami zarówno rozpadu topika jak i odbudowy wytrzymałości powrotnej. W przypadku BKT wydaje się, że mechanizm rozpadu topika jest niezależny od wartości prądu wyłączanego, po przekroczeniu prądu granicznego.

Pomijalne chłodzenie konwekcyjne łuku oraz bardzo wąska szczelina pomiędzy masywnymi i dobrze chłodzonymi stykami, w którą jest wciśnięta plazma, przy jednocześnie niskim i praktycznie stałym napięciu międzystykowym stwarzają zupełnie odmienne warunki pracy BKT w porównaniu z bezpiecznikami klasycznymi.

Można by szukać podobieństwa warunków palenia się łuku w BKT i w komorze z płytkami dejonizacyjnymi, jednak różnice są dość wyraźne, bo w tym ostatnim przypadku łuk przemieszcza się szybko w porównaniu z praktycznie statycznie palącym się łukiem BKT, zaś proces dejonizacji następuje przy znacznie wyższym napięciu powrotnym. W przypadku BKT

napięcie powrotne jest praktycznie stałe i wynosi zaledwie kilka woltów wymuszanych przez przewodzący prąd łącznik statyczny.

W rozprawie zamierza się wykazać, że:

„Bezpiecznik krótkotopikowy pracujący w układzie bezstykowego hybrydowego ogranicznika prądu jest poprawnie opisany modelem zdominowanym przez osiowy przepływ ciepła w czasie przedlukowym i lukowym, a także w okresie połukowym podczas odbudowy wytrzymałości powrotnej”

Niniejszej pracy postawiono następujące cele:

- eksperymentalne zbadanie własności BKT dla zbudowania modelu obliczeniowego,
- przedstawienie metody obliczeniowej służącej stworzeniu bazy danych pomocnych w projektowaniu bezstykowych ograniczników prądu, w tym do wyznaczania ich charakterystyk $t - I$,
- określenie warunków wytapiania topika i odbudowy wytrzymałości powrotnej BKT, niezbędnych do prawidłowego sterowania ogranicznika CHCL.

Należy zaznaczyć iż nazwa „bezpiecznik krótkotopikowy” podana w tezie dotyczy samego topika krótkiego, który faktycznie spełnia rolę zabezpieczenia, natomiast skrót BKT używany w dalszej części rozprawy jest traktowany już jako cały aparat łącznie z okuciami odbierającymi ciepło z topika i doprowadzającymi prąd. Aby odtworzyć rzeczywiste warunki pracy topika i poznać działanie CHCL w pracy badano BKT jako cały aparat.

Udowodnienie tezy i osiągnięcie zamierzonych celów ułatwi poszukiwanie najkorzystniejszych warunków zastosowania CHCL do ograniczania skutków zwarć w sieciach nn oraz SN. Warto też wspomnieć, że zbudowany model BKT może być użyteczny w pracach nad bezpiecznikiem dwuścieżkowym, jeśli chodzi o charakterystyki przedlukowe.

3. Program i metodyka badań

Opisanie własności bezpiecznika krótkotopikowego i udowodnienie tezy wymaga przeprowadzenia nie tylko badań eksperymentalnych, ale też symulacji. W programie pracy uwzględniono obydwie części. Część eksperymentalna służy zarówno do stworzenia bazy danych pozwalającej zbudować model symulacyjny BKT, jak również do weryfikacji prowadzonych obliczeń. Ze względu na to, że opis bezpiecznika musi uwzględniać wszystkie charakterystyczne stany jego pracy i działania, przewidziano następujące badania BKT:

- Praca bezpiecznika w warunkach roboczych i przy niewielkich przeciążeniach, gdy można definiować quasi statyczne warunki nagrzewania.

Badania te mają na celu określenie sposobu wyznaczenia prądu granicznego, który spowoduje zadziałanie bezpiecznika, prądu znamionowego, wpływu na te parametry rozmiaru styków, zacisków, okuć i szyn łączących oraz temperatury otoczenia.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że prąd graniczny jest osiąganym, gdy nastąpi przetopienie topika w którymkolwiek punkcie. Tak więc badania dotyczą procesu nagrzewania przy zmieniających się własnościach materiału, z uwzględnieniem wpływu połączenia między cienkim topikiem, a masywnymi stykami bezpiecznika.

- Praca bezpiecznika przy silnym przeciążeniu, lub zwarciu, gdy występuje znacząca akumulacja ciepła w topiku i części styków, gdy model quasi statyczny nie obowiązuje.

W tym przypadku bezpiecznik nagrzewa się powyżej temperatury topnienia, stąd też potrzebna jest znajomość wpływu konstrukcji bezpiecznika (długości i średnicy topika) na charakterystykę $t - I$. Jak wcześniej wspomniano masa topika będzie wpływać na własności dynamiczne bezpiecznika tj. prędkość wytapiania topika i czas dejonizacji.

- Wytrzymałość powrotna bezpiecznika.

Odbudowa wytrzymałości napięciowej BKT przebiega w warunkach różniących się znacząco od występujących w innych bezpiecznikach. Z jednej strony napięcie powrotne jest zredukowane do pomijalnej wartości, z drugiej – brakuje wymuszonego chłodzenia obszaru połukowego. Można założyć, że decydująca jest osiowa dyfuzja nośników ładunku, której towarzyszy kondensacja par metalu topika na stykach bezpiecznika. Badania powinny pozwolić na określenie korelacji między czasami rozpadu topika oraz dejonizacji przerwy po wytopionym topiku. Zależność ta powinna być funkcją wyłączanego prądu. Wpływa ona na szybkość działania CHCL i sterowanie łącznika półprzewodnikowego będącego częścią tego ogranicznika.

- Wytrzymałość napięciowa długotrwała bezpiecznika. Po zadziałaniu bezpiecznik powinien wytrzymać napięcie sieci oraz spełnić wymagania stosownych norm, a więc przejść próby napięciowe z wynikiem pozytywnym. W związku z tym konieczne jest określenie niezbędnej długości odstępu międzystykowego. Zwiększanie napięcia znamionowego bezpiecznika może prowadzić do konieczności zastosowania wytrzymalszego medium, np. próżni lub sprężonych gazów. Wymaganie uzyskania określonej wytrzymałości napięciowej może być sprzeczne z minimalizacją długości topika dla zapewnienia żądanej obciążalności BKT.

3.1. Model bezstykowego, hybrydowego ogranicznika prądów do badania BKT

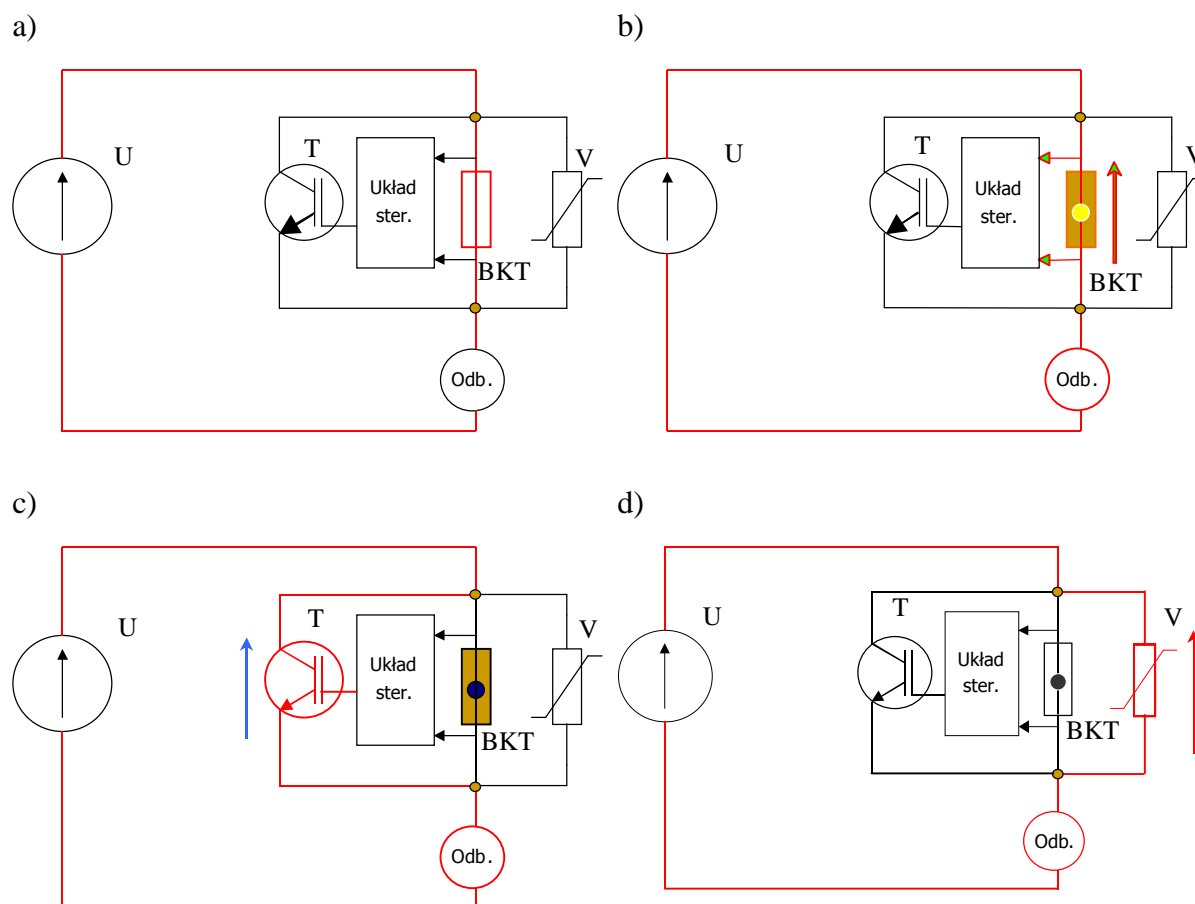
Badanie własności BKT należy prowadzić w warunkach zbliżonych do tych, które wystąpią w praktyce. Dlatego okazało się konieczne zbudowanie odpowiedniego modelu ogranicznika CHCL, którego schemat ideowy przedstawiono na rys. 3.1.

Koncepcję i założenia do budowy modelu CHCL opracowano w Katedrze Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych Politechniki Gdańskiej, w ramach poszukiwań nowych, doskonalszych hybrydowych ograniczników prądów zwarciovych [18], [19], [20]. Przyjęto, że łącznik półprzewodnikowy współpracujący z BKT jest zbudowany z tranzystorów IGBT, ze względu na ich dużą szybkość działania, łatwość sterowania i dużą obciążalność, a także dlatego, że należą do urządzeń półprzewodnikowych rozwojowych. Jest to najprostszy sposób zagwarantowania szybkiego bocznikowania BKT oraz odpowiedniego napięcia powrotnego. Bezpiecznik BKT jest instalowany w torze głównym ogranicznika. Należy mu zagwarantować stabilność docisku w czasie prób, aby uniknąć zmian warunków zarówno nagrzewania, jak i przepływu ciepła. Podczas pracy w warunkach normalnych prąd roboczy płynie wyłącznie przez BKT (rys. 3.1. a), a w czasie zwarcia następuje rozpad topika i pojawia się napięcie łukowe [32], wykorzystywane do sterowania łącznika półprzewodnikowego (tranzystora T) ogranicznika (rys. 3.1. b). Stosując właściwie dobrane czasy sterowania można oceniać szybkość wytapiania topika w badanych warunkach (włączenie tranzystora T, rys. 3.1. c). Tranzystor zwiera bezpiecznik BKT i ogranicza napięcie na zaciskach bezpiecznika do około 3 V. Napięcie to nie wystarcza do utrzymania łuku elektrycznego w bezpieczniku. Po włączeniu tranzystora przejmuje on cały prąd z toru głównego CHCL, a plazma powstała z topika ulega dejonizacji.

Czas przewodzenia tranzystora powinien być odpowiednio długi, aby uzyskać pełną dejonizację przerwy powstałej po topiku. W czasie, gdy przerwa ulega dejonizacji i odzyskuje własności izolacyjne, prąd zwarciovowy cały czas narasta, przepływając przez tranzystor.

Wprowadzając w stan blokowania tranzystor łącznika półprzewodnikowego ogranicznika wymusza się przerzut prądu do równoległego, warystorowego absorbera energii. Dobierając moment zablokowania można kontrolować czas potrzebny do odbudowy wytrzymałości BKT (rys. 3.1. d – wyłączenie tranzystora). Podsumowując, przyjęto, że wyżej scharakteryzowany model ogranicznika CHCL przewidziany do badania BKT wyróżnia się następującymi cechami:

- podstawę BKT przewidziano dla obciążenia do 600 A;
- zaciski do instalowania topika w BKT posiadają kontrolę siły docisku;
- integralny w CHCL łącznik półprzewodnikowy jest zbudowany z tranzystora IGBT 1,2 kV, 2,4 kA;
- układ sterowania wykrywa zapłon łuku w BKT, mierzy prąd ograniczany oraz posiada możliwość opóźniania załączania i wyłączania łącznika półprzewodnikowego o czas zadany lub uzależniony od parametrów prądu ograniczanego;
- równoległy warystor ogranicza napięcie na poziomie 1 kV;



Rys. 3.1. Stany pracy CHCL: a) praca znamionowa, b) zakłócenie – wytapianie topika, c) włączenie IGBT i dejonizacja przerwy połukowej, d) wyłączenie IGBT i początek procesu ograniczania prądu zwarciovego. Kolorem czerwonym zaznaczono aktualnie czynny tor prądowy

3.2. Program badań BKT

Badania mają dać odpowiedź na wyżej postawione podstawowe pytania dotyczące działania bezpiecznika w różnych warunkach pracy, a ich zakres został pogrupowany chronologicznie z uwzględnieniem kolejności zjawisk zachodzących w BKT.

3.2.1. Czas przedłukowy w warunkach quasi statycznego nagrzewania

W przypadku określenia obciążalności długotrwałej zbudowano układ probierczy oraz model laboratoryjny BKT. Wyniki badań modelu wykorzystano następnie do opracowania metody obliczeniowej. W przypadku BKT istotne jest poznanie dopuszczalnej gęstości prądu, wpływu mocowania topika do zacisków i wpływu sposobu mocowania topika na obciążalność BKT. Z racji tego, że topik jest intensywnie chłodzony, to BKT musi skutecznie odprowadzić ciepło do otoczenia, potrzebne jest więc też określenie wpływu chłodzenia na obciążalność. Uzyskane z pomiarów wyniki posłużyły do weryfikacji metody obliczeniowej.

3.2.2. Charakterystyki przedłukowe $t - I$

W przypadku analizy pracy dynamicznej i wyznaczaniu charakterystyk $t - I$, użyto metody FEM. Różnica w tym przypadku polega na prowadzeniu obliczeń dla stanu przejściowego. Aby dodatkowo uzyskać informację na temat własności BKT i różnic pomiędzy nim a bezpiecznikiem zwykłym porównano ich charakterystyki $t - I$ odnosząc je do prądu granicznego. W przypadku metod obliczeniowych, zgodnie z przedstawioną tezą dokonano założeń co do sposobu chłodzenia osiowego BKT.

3.2.3. Obliczenia czasu rozpadu topika poprzez wytapianie

Jeżeli znana jest już obciążalność topika i jego geometria to następnie należy zbadać szybkość jego rozpadu, a następnie czas dejonizacji plazmy. Od czasów rozpadu topika i dejonizacji zależy sposób sterowania łącznikiem półprzewodnikowym tak aby uzyskać jak najszybsze działanie CHCL. Impuls sterujący należy opóźnić tak, by topik mógł się wytopić na odpowiednią odległość, a powstała szczelina powinna wytrzymać napięcie powrotne. W dalszej kolejności należy określić czas przewodzenia tranzystora IGBT. Dłuższy czas jest korzystny dla procesów dejonizacyjnych, ale nie jest pożądany ze względu na narastanie prądu zwarciovego płynącego przez tranzystor i wydzielanie się w nim ciepła.

3.2.4. Odbudowa wytrzymałości przerwy połukowej

Zjawisko dejonizacji po włączeniu tranzystora (rys. 3.1) przebiega przy małym napięciu ok. 3 V, więc prąd płynący przez plazmę jest pomijalny i ciepło nie jest wytwarzane. Ciepło zawarte w plazmie oddawane głównie do okuć BKT. Proces ten jest nieco zbliżony do chłodzenia łuku w komorze płytkowej z tym, że w przypadku komory płytkowej wpływ napięcia łukowego jest znacznie silniejszy. Obliczenia czasu dejonizacji w przypadku pracy BKT można sprowadzić do obliczeń chłodzenia pewnej masy gazu. Zasadność przyjętych założeń do modelu obliczeniowego sprawdzić można poprzez wykonanie eksperymentu polegającego na narażaniu napięciem przerwy po topiku i sprawdzeniu czy BKT po zadziałaniu odzyskał już własności izolacyjne.

Obliczenia czasu wytapiania topika są trudne ze względu na przemieszczającą się strefę topnienia (model Stefana). W przypadku podziału topika na materiały o różnych stanach skupienia i następnie korygując ich parametry fizyczne można problem ruchomej granicy sprowadzić do stosunkowo prostego obliczenia rozkładu ciepła w warunkach nieustalonych, przy różnych materiałach o odpowiednich własnościach fizycznych. Bezpośrednią możliwością sprawdzenia modelu obliczeniowego jest porównanie czasów wytapiania szczeliny: obliczonego i pomierzonego. Oczekuje się, że efektem wykonanych eksperymentów będzie dodatkowo zdobycie informacji na temat pracy BKT, istotnych do zastosowań praktycznych.

W dalszej części niniejszej rozprawy opierając się o przyjęty zakres badań przedstawiono analizę cech BKT jako głównego elementu CHCL. Przedstawiono metodę obliczania charakterystyki $t - I$, czasów wytapiania topika i dejonizacji oraz omówiono wpływ zdolności rozpraszania ciepła przez doprowadzenia prądu na pracę BKT, poparte odpowiednimi eksperymentami. Uzyskano dość jednolity (podobnie opisujący) cieplny model obliczeniowy obejmujący pozornie różne zjawiska zachodzące w BKT. Jako kryterium udowodnienia tezy przyjęto zgodność wyników otrzymanych na drodze eksperymentalnej z wynikami otrzymanymi w drodze symulacji komputerowej.

4. Czas przedłukowy BKT

W czasie przedłukowym topik bezpiecznika jeszcze nie uległ rozpadowi i proces nagrzewania można opisać w sposób klasyczny posługując się równaniem Fouriera – Kirchhoffa. Dla powolnych zmian, gdy daje się określić temperaturę styków wynikającą ze zdolności odprowadzania ciepła przez szyny przyłączone, można się także posłużyć warunkiem brzegowym Dirichleta. W innym przypadku – temperatura styków rośnie w miarę akumulacji ciepła dopływającego z topika. Problematyka nagrzewania się topika przed jego rozpadem obejmuje dwa procesy różniące się sposobem obliczania: określenie prądu granicznego zdolnego wywołać zadziałanie bezpiecznika w quasi statycznych warunkach nieznacznych przeciążeń oraz doprowadzenie do rozpadu w przypadku szybko narastającego prądu zwarciovego. Pierwszy z nich jest opisany bilansem ciepła wytwarzanego i oddawanego bez akumulacji w materiale topika i styków, podczas, gdy w drugim przypadku – przeważa akumulacja ciepła. Analizując zmiany temperatury topika od temperatury otoczenia do temperatury topnienia przy przeciążeniach, lub do temperatury wrzenia w przypadku rozpadu w czasie zwarcia, parametry materiału topika takie jak przewodności (cieplna i elektryczna), pojemność cieplna, gęstość, zmieniają się nieliniowo w funkcji temperatury i czasu, co uniemożliwia analityczne rozwiązanie opisujących te zmiany równań. Dlatego konieczna jest budowa modelu symulacyjnego do określenia procesów przedłukowych w bezpieczniku krótkotopikowym.

Własności BKT są wynikiem dwóch procesów: chłodzenia oraz generacji strat ciepła wywołanych przepływem prądu. Zmieniając wymiary BKT można wpływać na te procesy i tym samym na charakterystyki bezpiecznika. Istotnymi cechami i własnościami BKT wynikającymi z procesów cieplnych są:

- dopuszczalna gęstość prądu dla topika krótkiego,
- wpływ sposobu chłodzenia na obciążalność długotrwałą,
- wpływ ograniczeń które wnosi sposób montażu topika na obciążalność długotrwałą,

- charakterystyka $t - I$,
- wpływ wymiarów topika na charakterystykę $t - I$. Od wymiarów topika zależy nie tylko obciążalność, ale i wytrzymałość powrotna BKT oraz szybkość jej odbudowy, co omówiono w rozdziale 5.

W kolejnych podrozdziałach przeanalizowano własności BKT. Określono dopuszczalną gęstość prądu, którą wyznaczono w oparciu o eksperyment, następnie dokonano symulacji porównawczej, aby potwierdzić zgodność metody obliczeniowej z wynikami pomiarów. Pomiarów wykonano wykorzystując skonstruowany do tego celu model bezpiecznika, a w wyniku analizy opracowano metodę umożliwiającą obliczanie różnych konstrukcji BKT. W rzeczywistym układzie, aby bezpiecznik mógł poprawnie pracować, powinien mieć zapewnione odpowiednie warunki chłodzenia. W związku z tym w dalszej kolejności sprawdzono wpływ chłodzenia na obciążalność BKT.

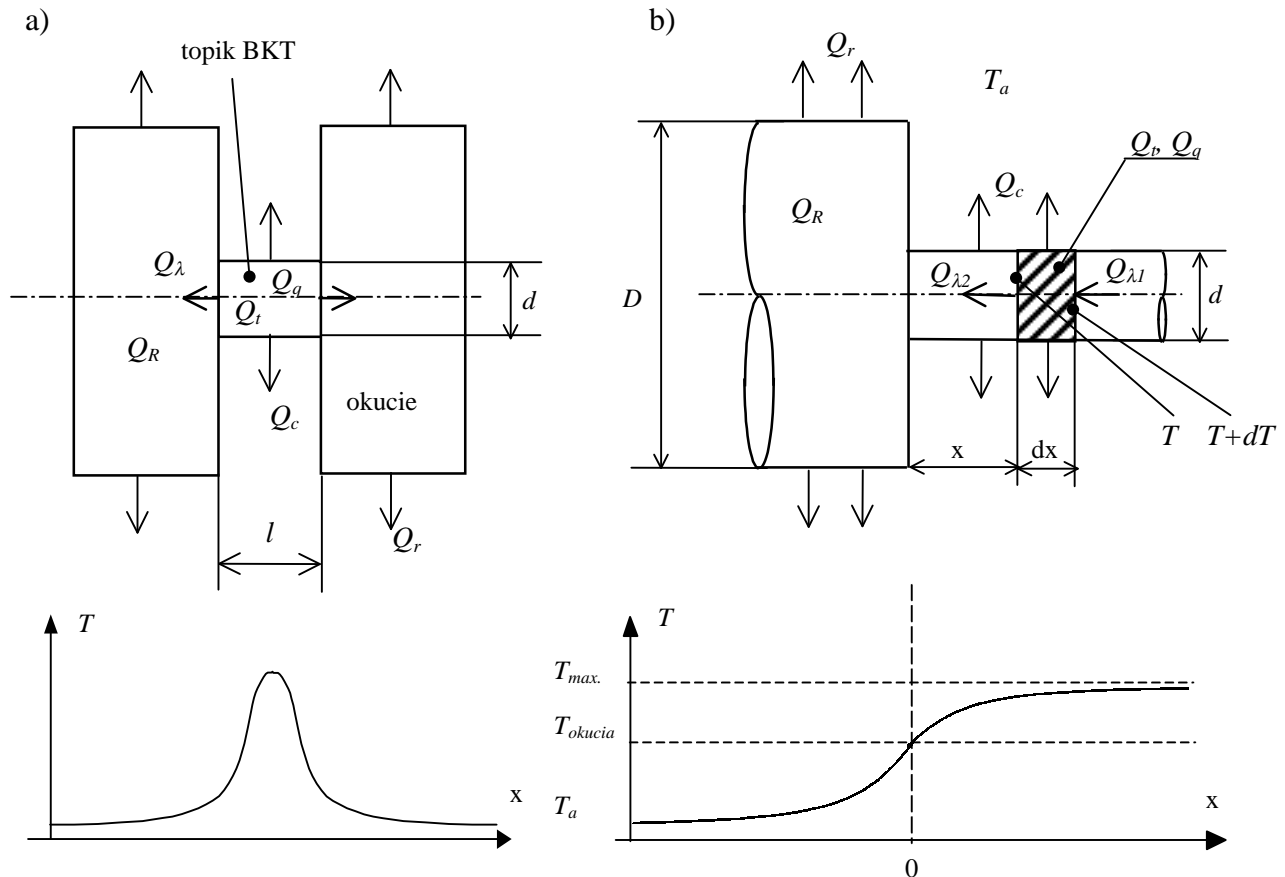
Analizy dokonano już dla specjalnej wkładki krótkotopikowej wykonanej dla potrzeb ogranicznika CHCL. Ograniczenie obciążalności BKT wynika z warunków chłodzenia oraz ze sposobu montażu topika. W przypadku badanej wkładki krótkotopikowej topik był lutowany. Zbadano wpływ lutu miękkiego i twardego na dopuszczalną obciążalność BKT przez wprowadzenie warstwy przejściowej. Aby nie komplikować przejrzystości analizy przez rozważanie wpływu lutu to założono nieskończenie dobre osiowe odprowadzanie ciepła. Podobnie, jeżeli badano wpływ chłodzenia zewnętrznego to założeniem był idealny (bez warstwy przejściowej) montaż topika do okuć wkładki. Korzystając ze sprawdzonej wcześniej metody wyznaczono charakterystyki $t - I$, oraz sprawdzono w jaki sposób długość i średnica topika wpływa na dopuszczalny prąd wkładki. Założeniem w tym przypadku było idealne chłodzenie i montaż topika. W rzeczywistym obiekcie model będzie musiał uwzględniać wszystkie czynniki (chłodzenie, montaż i wymiary topika) jednocześnie.

4.1. Proces nagrzewania BKT

Jak wcześniej wspomniano, BKT jest specyficznym bezpiecznikiem o bardzo krótkim topiku, pracującym w gazie lub próżni, umieszczonym pomiędzy masywnymi stykami. Dlatego najprostszym modelem do analizy procesu nagrzewania takiego bezpiecznika może być przewodnik o dużej skokowej zmianie przekroju poprzecznego, np. 1:1000, rys. 4.1., a w warunkach zwarciovych, cienki pręt łączący dwie półkule rozciętej kuli o bardzo dużym promieniu. Uproszczenie takie zaniedbuje, jednak, strefę przejściową między stykiem i topikiem.

Jeśli średnica przewężenia będzie najwyżej kilkakrotnie mniejsza od jego długości, to oczekuje się, że proces nagrzewania przewężenia (topika) będzie zdominowany osiowym odpływem ciepła drogą przewodzenia, nawet wówczas, gdy jego temperatura zacznie się zbli-

żać do temperatury topnienia i zwiększy się znacząco odpływ ciepła drogą promieniowania, z kolei oddawanie ciepła na drodze konwekcji też jest utrudnione ze względu na małą szczelinę między masywnymi stykami co uniemożliwia swobodny przepływ gazu. Łatwo zauważyć, że w takim modelu ciepło wytwarzane w topiku w warunkach quasi-ustalonych jest oddawane do otoczenia tylko przez powierzchnię masywnych styków, a w warunkach zwarciovych ($di/dt \gg 0$) – pochłaniane przez te styki.



Rys. 4.1. Rozkład temperatury i rozptył ciepła w BKT a) widok ogólny, b) model nagrzewania topika dla cylindrycznego układu współrzędnych

Dla modelu (rys. 4.1 b) można ułożyć bilans energii, w którym źródłem ciepła jest prąd płynący przez topik, wytwarzający w krótkim przedziale czasu dt , w topiku o grubości dx ciepło Q_q . Część tego ciepła Q_i powoduje zwiększenie temperatury o dT topika o grubości dx , część Q_c jest odprowadzane do otoczenia z jego powierzchni bocznej (cylindrycznej), a pozostałe ciepło Q_λ jest przewodzone do masywnych styków, a następnie, częściowo (Q_r) – oddawane do otoczenia. Pozostała część ciepła dopływającego z topika do styków (Q_R) podnosi ich temperaturę, a także jest przewodzona do przyłączonych przewodów (szyn).

Zmieniając proporcje topika, a więc wskaźnik kształtu l/d [2], będący miarą stosunku powierzchni bocznej do przekroju poprzecznego, trzeba w dalszej części pracy określić warunki dla których da się pominąć oddawanie ciepła Q_c (rys. 4.2). W ogólnym przypadku, bilans cieplny topika można opisać równaniem:

$$Q_q = Q_t + Q_C + Q_\lambda \Rightarrow Q_t + Q_C + Q_r + Q_R \quad (4.1)$$

gdzie: Q_q – ciepło Joule’a w topiku,

Q_t – ciepło akumulowane w topiku,

Q_C – ciepło odprowadzone przez powierzchnię boczną topika,

Q_λ – ciepło przewodzone osiowo z topika,

Q_R – ciepło z topika akumulowane w stykach,

Q_r – ciepło z topika odprowadzane przez styki do otoczenia,

Rozchodzenie się ciepła w topiku można opisać równaniem [15]:

$$-q_v(x, y, z, t) = \delta_t c_t \frac{\partial T_t}{\partial t} - \lambda_t \left(\frac{\partial^2 T_t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_t}{\partial z^2} \right) \quad (4.2)$$

gdzie: q_v – gęstość mocy wewnętrznych źródeł ciepła,

c_t – ciepło właściwe topika,

δ_t – gęstość materiału topika,

T_t – temperatura topika,

λ_t – współczynnik przewodzenia ciepła topika $\lambda_t = const.$,

t – czas,

Zapis równania (4.2) jest przedstawiony z założeniem niezmienniej wartości współczynników (λ_t , c_t , δ_t) w funkcji czasu, temperatury, a także w ogólnym przypadku od położenia w przestrzeni analizowanego ośrodka. W warunkach rzeczywistych podstawową trudnością uzyskania dokładnego rozwiązania (4.2) jest zmienność współczynników zależnych od temperatury, szczególnie jeśli się bierze pod uwagę zmiany stanu skupienia.

W przypadku pracy w warunkach ustalonych całe ciepło wydzielane w topiku jest oddawane do otoczenia, zarówno przez powierzchnię boczną topika, jak i styków, do których topik dostarcza ciepło drogą przewodnictwa. Jednym z zadań postawionych pracy jest sprawdzenie, czy strumień ciepła odpływający z powierzchni bocznej topika może być pominięty. Aby było to możliwe istotna jest duża skuteczność oddawania ciepła z masywnych styków.

Na rys. 4.1. b przedstawiono przebieg temperatury w osi układu topik – okucie, przy założeniu doskonałego połączenia tych elementów. Wprowadzenie w miejscu połączenia zakłóceń struktury materiału (spawanie) lub dodatkowych warstw, np. lutowia, może utrudnić przepływ ciepła z topika do styków, a tym samym, zmienić obciążalność BKT.

Temperaturę w miejscu połączenia (rys. 4.1. b) z uwzględnieniem chłodzenia bocznej powierzchni topika w stanie quasi ustalonym, można wyznaczyć z klasycznego równania nagrzewania toru prądowego ze skokową zmianą przekroju. Wówczas temperatura w płaszczyźnie połączenia jest opisana wzorem [68]:

$$T_{okucia} = \frac{a_{11}T_a + a_{12}T_{max.}}{a_{11} + a_{12}} \quad (4.3)$$

$$a = \sqrt{\frac{\sigma A - j^2 k_w S \alpha_r \rho}{\lambda S}} \quad \text{współczynniki wyznaczone dla okucia (indeks 11) i topika (indeks 12)}$$

gdzie:

σ – współczynnik oddawania ciepła z powierzchni bocznej,

A – obwód przekroju poprzecznego przewodnika,

j – gęstość prądu,

k_w – współczynnik wypierania prądu,

λ – przewodność cieplna materiału topika lub odpowiednio okucia,

α_r – temperaturowy współczynnik rezystancji,

ρ – rezystywność materiału topika i odpowiednio okucia,

S – przekrój poprzeczny,

T_a – temperatura okucia w dostatecznie dużej odległości równa temperaturze otoczenia,

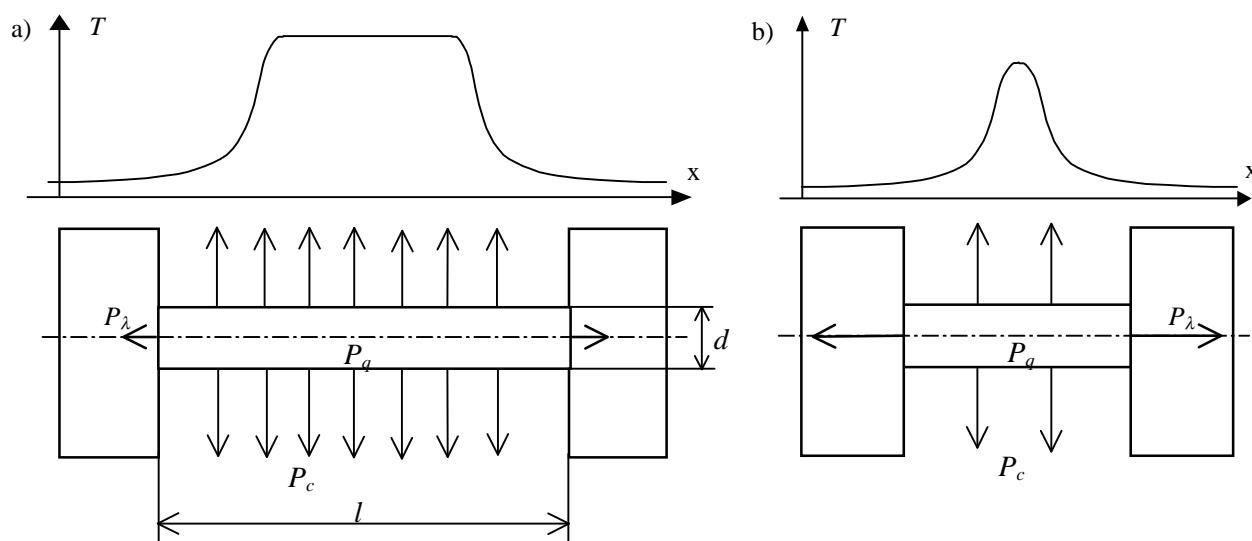
T_{max} – temperatura maksymalna w topiku,

Z (4.3) wynika, że zwiększaniu średnicy styków towarzyszy zmniejszanie temperatury w płaszczyźnie połączenia z topikiem, co może np. ograniczać rodzaj stosowanego lutowia.

Dla analizowanego przypadku potrzebne jest określenie kiedy można zaniedbać promieniowe oddawanie ciepła z topika. Ze względu na to, że ciepło oddawane do otoczenia jest proporcjonalne do powierzchni topika, a więc między innymi do jego długości, zaś przewodzenie ciepła i jego akumulacja w topiku związane są z jego przekrojem, to przebieg nagrzewania topika zależy znacząco od wskaźnika kształtu l/d , czyli stosunku długości do zastępczej średnicy przekroju topika.

Analizując wskaźnik kształtu l/d można stwierdzić, że po przekroczeniu pewnej jego wartości temperatura wzdłuż osi prawie nie zmienia się (rys. 4.2. a), a część środkowa topika jest chłodzona tylko konwekcyjnie, gdyż nie ma osiowego przepływu ciepła. Z kolei zmniejszanie l/d powoduje zwiększający się udział osiowego odpływu ciepła z topika i zmianę kształtu krzywej rozkładu temperatury. Część „płaska” staje się krótsza, a wartość maksymalna maleje (rys. 4.2 b). Jeśli osiowy odpływ ciepła wzrasta, możliwe jest zwiększenie obciążalności topika. Gdy wskaźnik l/d jest bliski jedności – dopuszczalna gęstość prądu topika może wynosić nawet kilka kA/mm^2 , np. 5 kA/mm^2 . Praktyczną definicję bezpiecznika krótkotopikowego można oprzeć na spostrzeżeniu, że przy bardzo krótkim topiku dominuje osiowy odpływ ciepła odbieranego przez przewodnictwo i część płaska rozkładu temperatury, wyrażająca dominację chłodzenia konwekcyjnego, kurczy się do zera. Jeśli, więc rozkład temperatury wzdłuż osi topika przypomina przebieg z rys. 4.2. b, to umownie bezpiecznik nazwano krótkotopikowym.

W klasycznych bezpiecznikach o długim topiku rozkład temperatury jest zbliżony do przedstawionego na rys. 4.2. a. Rozmiary styków mają duży wpływ na zdolność oddawania ciepła z bezpiecznika do otoczenia, jak również zdolność do akumulacji ciepła. Wpływają, więc na stałą czasową procesu odpływu ciepła z topika. Dla poprawnej pracy BKT ważne jest zapewnienie zdolności oddania do otoczenia przez styki całego ciepła wydzielonego w topiku, co może wymagać np. powiększenia ich powierzchni. Ze względu na dużą masę styków i okuć oraz związaną z tym długą cieplną stałą czasową, w przypadku prądów zwarciovych, ich wpływ na czas przetapiania topika jest ograniczony. W obliczeniach przyjęcie warunków brzegowych Dirichleta (określających stałą temperaturę) na granicy topika powoduje uniezależnienie obliczeń od warunków otoczenia i zakłada nieskończenie dużą pojemność cieplną okuć.

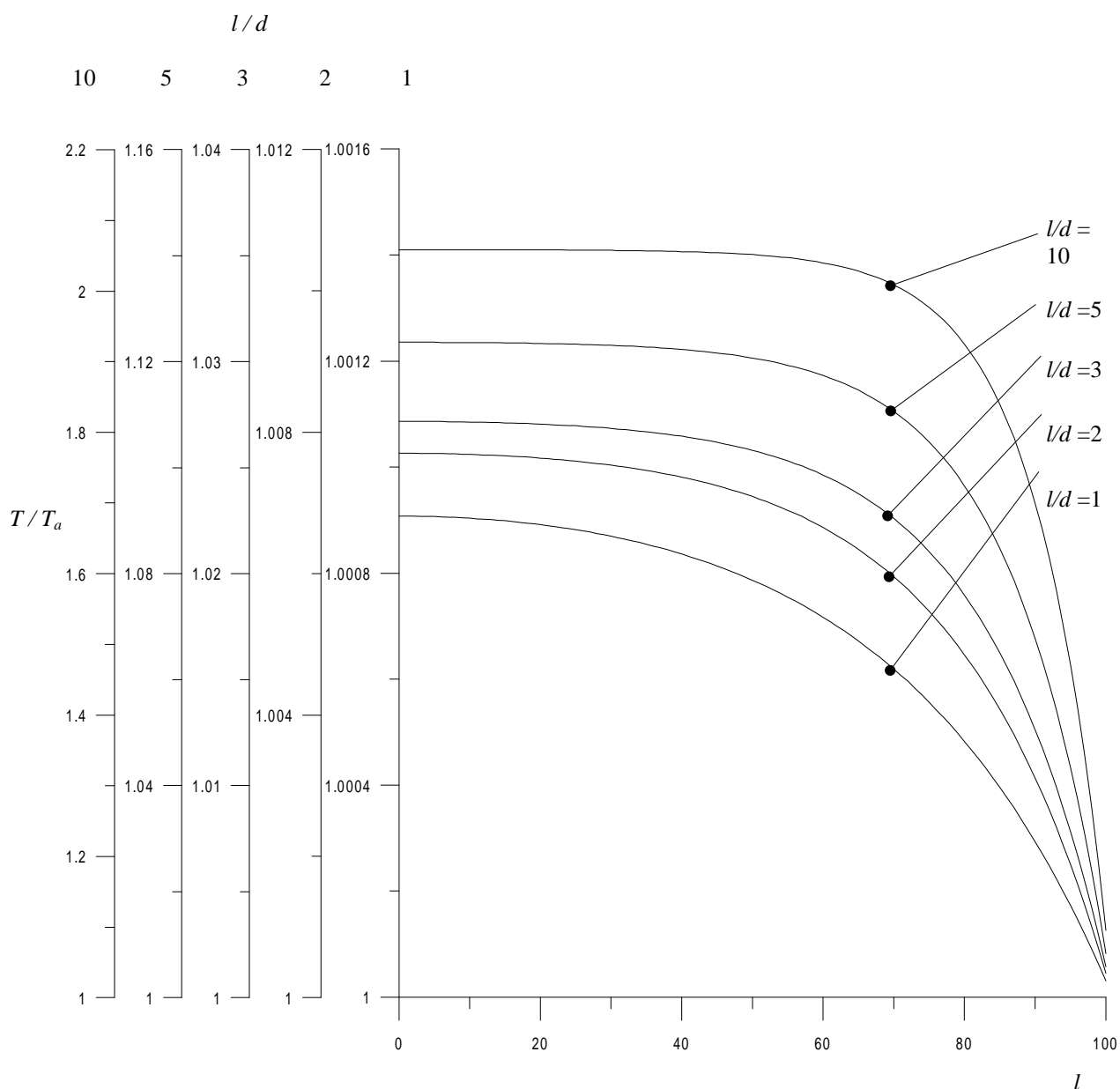


Rys. 4.2. Rozkład temperatury w bezpieczniku dla różnych l/d topika: a) l/d duże i znaczący udział chłodzenia konwekcyjnego, b) l/d małe – dominacja osiowego odprowadzania ciepła przez przewodnictwo; P_q – moc wydzielona w topiku, P_c – moc odprowadzona do otoczenia przez konwekcję i promieniowanie, P_λ – moc odprowadzona do okuć przez przewodnictwo.

Na rys. 4.3. przedstawiono rozkład temperatury wzdłuż osi topika dla różnych wskaźników kształtu l/d , obliczony przy założeniu, że temperatura w przekroju topika jest stała. Jako graniczną wartością tego wskaźnika dla topika krótkiego można przyjąć umownie około $l/d = 3$, gdyż powyżej tej wartości na krzywej rozkładu temperatury zaczyna pojawiać się część płaska. Obliczenia rozkładu temperatury dla różnych wartości l/d wykonano według (4.1), przyjmując wartość współczynnika konwekcyjnego oddawania ciepła $\sigma = 12$ [W/m²K], a temperaturowego współczynnika przewodności cieplnej topika i styków $\lambda = 390$ [W/mK]. Dla obliczenia rozkładu temperatury użyto metody siatek – długość topika podzielono na 100 jednostek długości, a średnicy d przypisywano zmienną liczbę jednostek (od 100 do 10 jednostek), wynikającą z założonego, stałego wskaźnika l/d . Wyznaczoną temperaturę topika dla danego stosunku l/d odnoszono następnie do temperatury otoczenia T_a . Obliczenia te potwier-

dzają wyżej przyjętą definicję, że kryteria bezpiecznika krótkotopikowego może spełniać bezpiecznik z topikiem o $l/d < 3$.

Należy zaznaczyć, że w przypadku innych warunków chłodzenia niż przyjęto w obliczeniach, np. dla pracy topika w próżni, w sprężonym gazie czy też w cieczy, graniczna wartość współczynnika kształtu l/d definiująca topik krótki może ulec zmianie. Tak więc, w szczególnych przypadkach, należy sprawdzić czy topik spełnia przyjęte kryterium, aby móc wykorzystać wnioski wynikające z niniejszej rozprawy.



Rys. 4.3. Rozkład temperatury wzdłuż topika i określenie charakterystycznej wartości l/d do której topik jest topikiem krótkim. Graniczną wartością dla topika krótkiego jest wartość $l/d = 3$, powyżej której na krzywej rozkładu temperatury pojawia się część płaska.

4.2. Nagrzewanie długotrwałe BKT

Nagrzewaniem długotrwałym nazwano proces przepływu ciepła w przypadku powolnych zmian temperatury podczas obciążenia bezpiecznika prądami roboczymi i niewielkimi prą-

dami przeciążeniowymi, kiedy akumulowanie ciepła może być pominięte. Równowagę ustala głównie odpływ ciepła drogą przewodzenia.

Aby bliżej zdefiniować model BKT należy sprawdzić rzeczywisty wpływ konwekcji i promieniowania na zmiany temperatury topika BKT, określić wymagania stawiane stykom i okuciom bezpiecznika odbierającym ciepło z topika oraz wpływ połączenia topik – styk, a także wpływ współczynnika kształtu topika (l/d_z) na graniczny prąd zadziałania.

W tym celu zbudowano model BKT, który umożliwił zebranie informacji dotyczących dopuszczalnego długotrwale prądu oraz wyznaczenie rezystancji przejścia pomiędzy topikiem a zaciskiem, potrzebnej do określenia strat pojawiających się na granicy topika. Następnie, wykorzystano te dane i rozszerzając metodę obliczeniową wyznaczono charakterystyki $t - I$, zbadano wpływ zdolności odprowadzania ciepła wytwarzanego podczas pracy bezpiecznika przez styki oraz wpływ lutowia na obciążalność BKT.

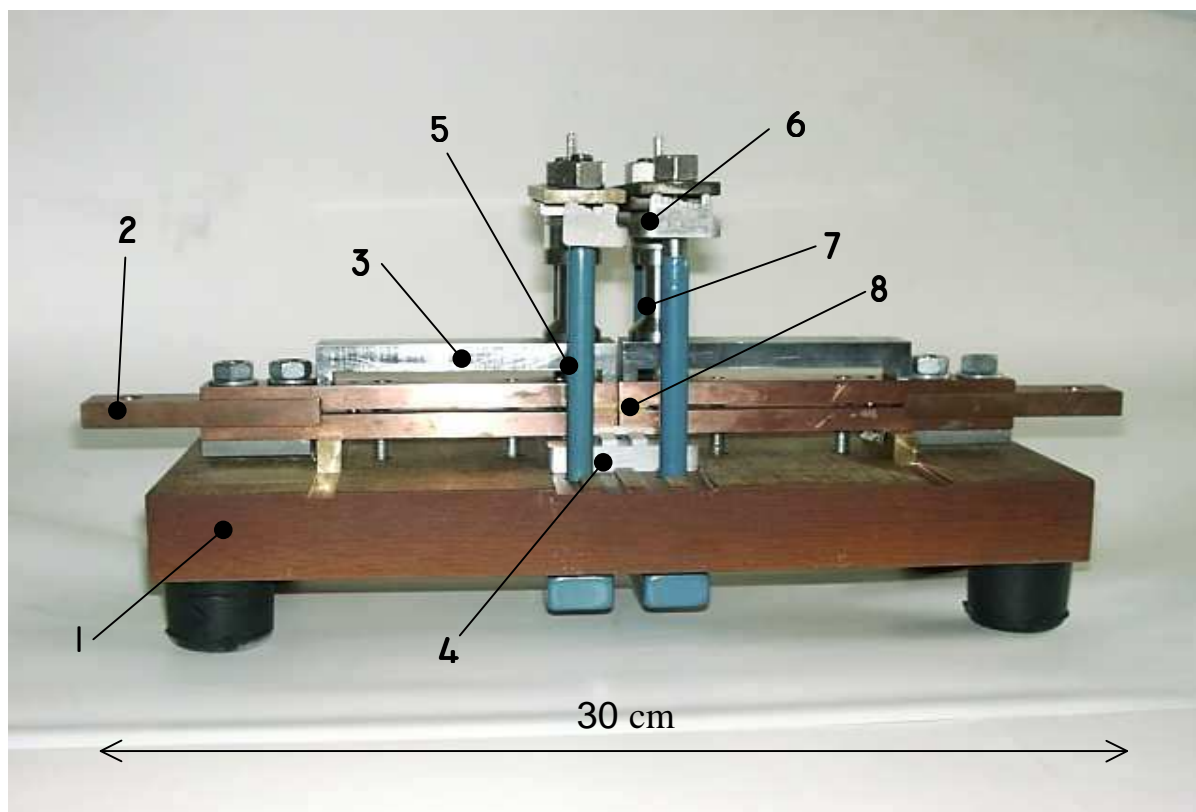
4.2.1. Własności modelu BKT

Ze względu na małą długość topika nie jest jasne, czy większość energii nie wydziela się na połączeniu topika ze stykiem, czy w samym topiku. Odpowiedź między innymi na to pytanie można znaleźć poprzez eksperyment.

Budując do badań model BKT (rys. 4.4) zwracano szczególną uwagę na to, aby utrzymać bardzo duży stosunek przekrojów i mas styków i topika oraz złagodzić zaburzenia wprowadzane przez złącze topik – styk. Dzięki takiej budowie zapewniono skuteczne odbieranie z topika prawie całego ciepła na drodze przewodnictwa pozwalając na stosowanie bardzo dużych gęstości prądu. Model BKT składa się z podstawy (1), na której zamocowano miedziany tor prądowy z zaciskami (2) umożliwiającymi przyłączenie go do układu probierczego. Topik łączony jest ze stykami przez docisk. Siła docisku jest regulowana sprężyną umocowaną na wsporniku (5) działającą za pośrednictwem elementów dociskających (7) i (3). Ustawienie siły docisku (powtarzalność) po wymianie topika (max. 10 kN) jest kontrolowane z wykorzystaniem skali (6) zamocowanej na tym samym wsporniku. Topik jest mocowany w układzie stykowym (8), który pokazano w powiększeniu na rys. 4.6.

W opisanym modelu stykami nazwano końce szyn miedzianych doprowadzających prąd do topika, a także odbierających ciepło w nim wytwarzane podczas przepływu prądu. Przekrój poprzeczny styków wynosi $s_{Cu} = 400 \text{ mm}^2$. Polerowana powierzchnia styku mocującego topik wynosi 200 mm^2 . Zastosowana sprężyna tak została dobrana, aby naprężenia ściskające w topiku osiągały granicę plastyczności materiału, redukując rezystancję zestyku, unikając przy tym istotnych odkształceń topika. Powierzchnie styków kontaktujące się z topikiem zostały pozłoczone, co pozwala dodatkowo zredukować rezystancję połączenia. Topiki wykonywano z

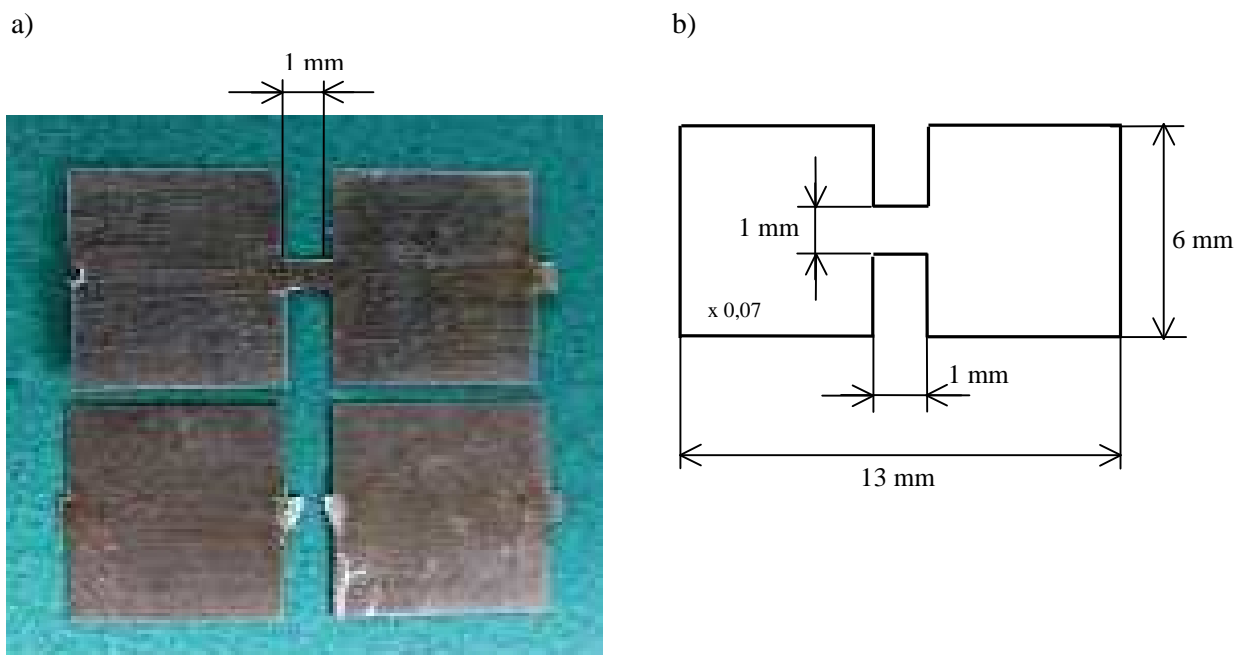
folii srebrnej o grubości 0,07 mm. Czynna długość topika (pomiędzy końcówkami stykowymi) wynosiła $l = 1$ mm, (rys. 4.5).



Rys. 4.4. Model BKT [46]: 1 – podstawa, 2 – zacisk przyłącza, 3 – docisk górny, 4 – docisk dolny, 5 – wspornik, 6 – sprężyna, 7 – element dociskający, 8 – tor prądowy zakończony stykiem do przyłączenia topika



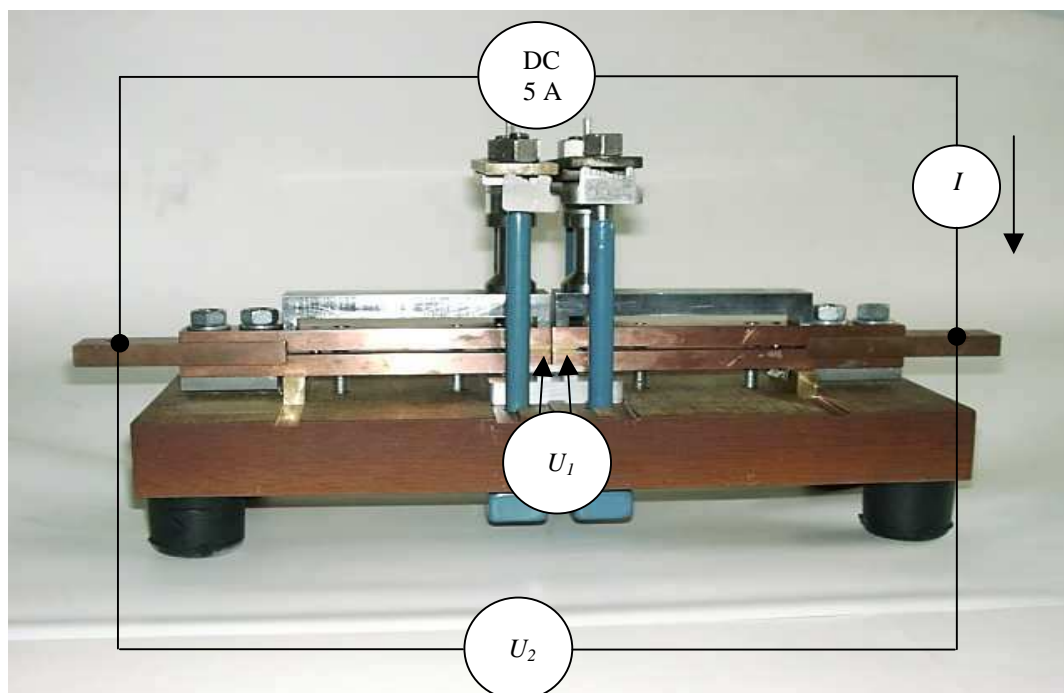
Rys. 4.5. Powiększenie zacisków i szczeliny o długości 1 mm, 1- złożone powierzchnie



Rys. 4.6. a) Topik przed i po zadziaaniu, b) Wymiary topika. Duże powierzchnie doprowadzeń topika są mocowane w zaciskach na rys. 4.5.

4.2.2. Pomiar rezystancji przejścia

Aby określić niezbędny docisk połączenia styki (okucie) – topik pomierzono rezystancję przejścia pomiędzy topikiem a stykami posługując się metodą przedstawioną poglądowo na rys. 4.7. Wyniki zestawiono poniżej. Ustalono, że siła docisku niezbędna do zapewnienia stabilnego połączenia o powtarzalnych własnościach wynosi co najmniej 5 kN.



Rys. 4.7. Rozmieszczenie punktów pomiarowych do wyznaczenia rezystancji przejścia BKT topik – styki

Kolejnym mierzonym parametrem była rezystancja przejścia, jej znajomość jest istotna dla późniejszego modelowania BKT ze względu na potrzebę określenie dodatkowych strat ciepła, i porównanie ich ze stratami w samym topiku.

Mierzono napięcie U_2 między zaciskami BKT oraz napięcie U_1 między końcówkami topika. Ich różnicę stanowiła suma spadków napięcia na rezystancji przejścia i napięcia na okuciu. Schemat zastępczy rezystancji odpowiadający modelowi BKT pokazano na rys. 4.8 i 4.9, zaś rezystancję przejścia R_p pomiędzy złożonym stykiem a topikiem obliczano posługując się zależnością (4.4) i po przekształceniu wzorem (4.5).

$$R_p = R - (R_{Cu} + R') \quad (4.4)$$

$$R_p = \frac{U_2}{I} - \frac{l_{Cu}}{\gamma_{Cu} S_{Cu}} - \frac{U_1}{I} \quad (4.5)$$

gdzie:

R – całkowita rezystancja modelu składająca się z rezystancji przejścia, szyn i topika,

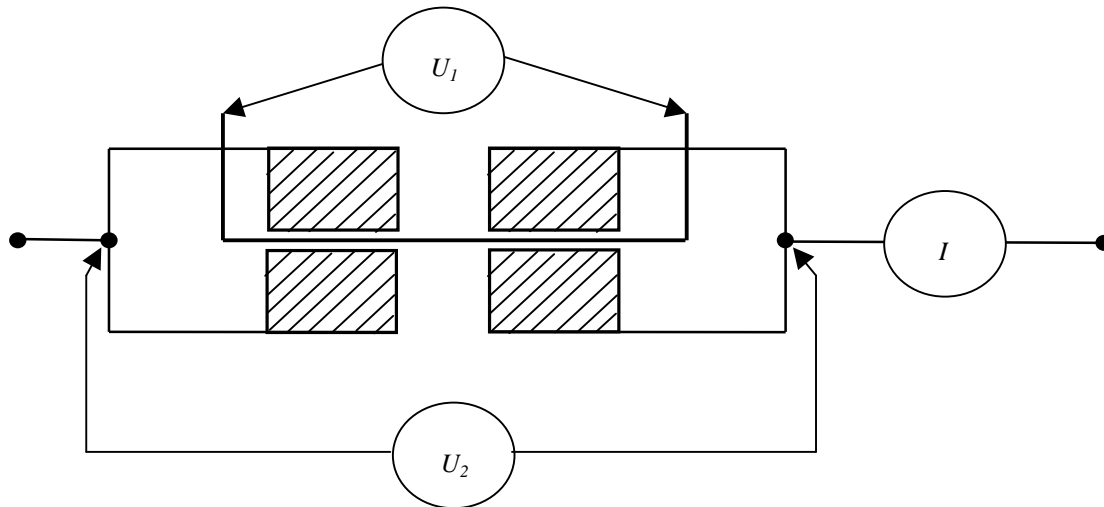
R_{Cu} – rezystancja szyny,

R_p – rezystancja przejścia,

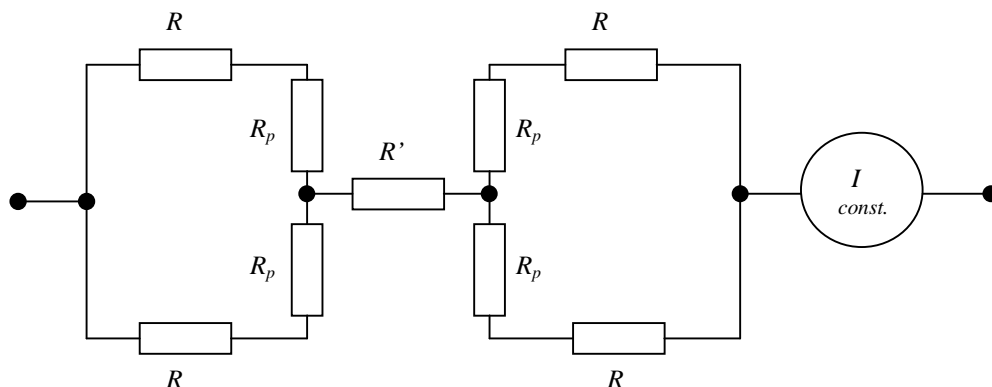
R' – sumaryczna rezystancja folii topika wyznaczona na podstawie spadku napięcia U_1 , wraz ze wzrostem siły nacisku dąży ona do znamionowej rezystancji topika R_t (rys. 4.10)

l_{Cu} – długość szyny miedzianej mierzona pomiędzy punktami środków geometrycznych,

S_{Cu} – przekrój poprzeczny szyny miedzianej,



Rys. 4.8. Schemat pomiaru rezystancji przejścia



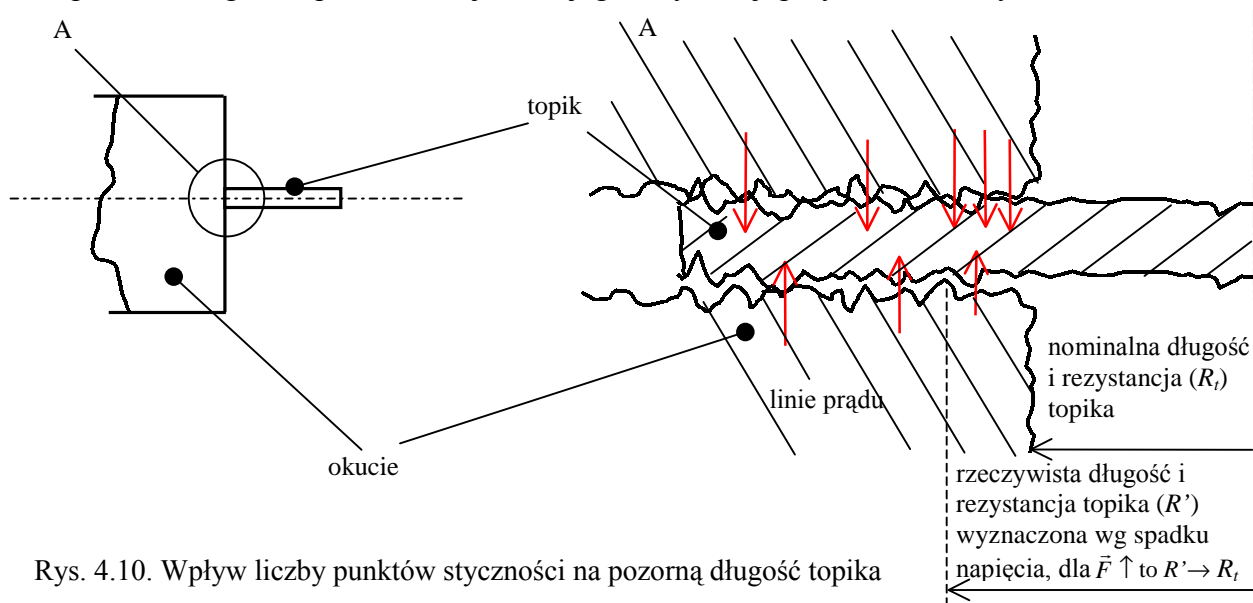
Rys. 4.9. Schemat zastępczy układu do pomiaru rezystancji przejścia

Tab. 4.1. Wyniki pomiaru spadków napięć przy $I = 2,54$ A dla topika z rys. 4.6

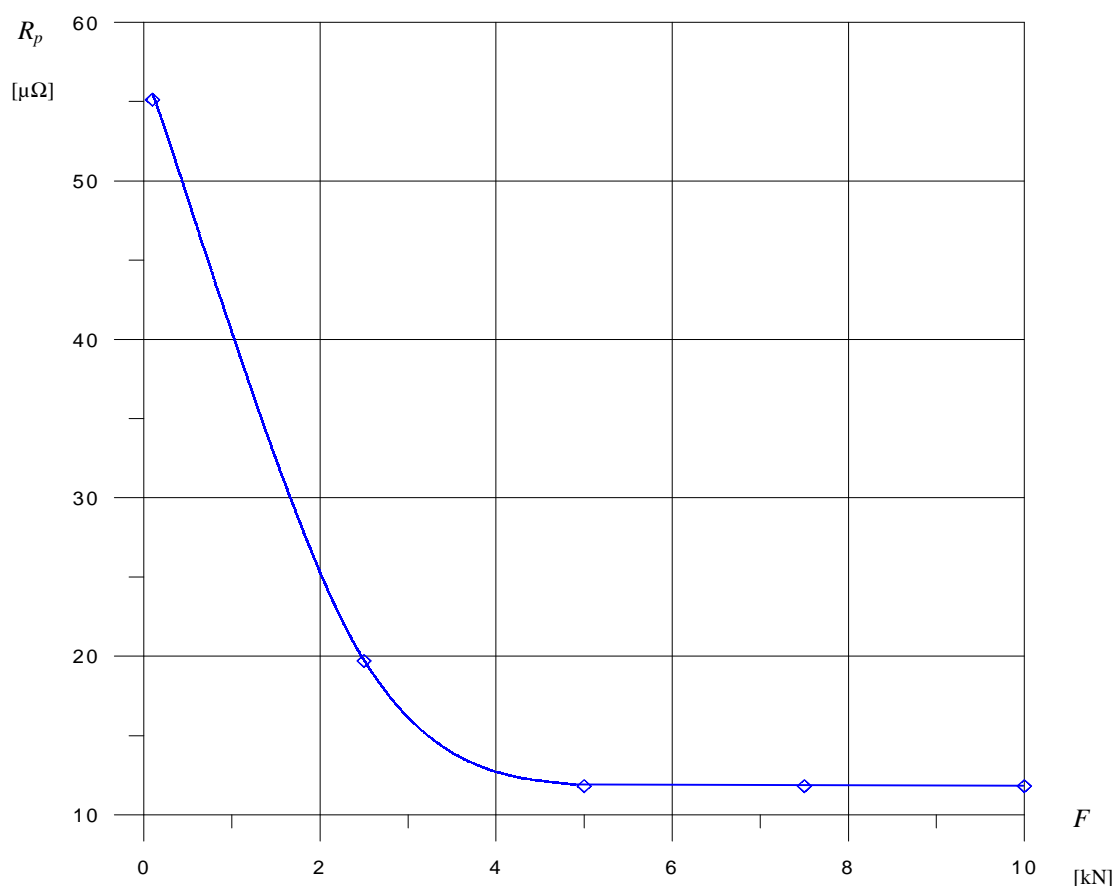
Lp.	F [kN]	0,1	2,5	5	7,5	10
1	U_1 [mV]	1,06	0,44	0,41	0,38	0,36
2	U_2 [mV]	1,23	0,52	0,47	0,44	0,42
3	R_p [$\mu\Omega$]	55,13	19,70	11,80	11,80	11,80
4	R' [$\mu\Omega$]	417,3	173,2	161,4	149,6	141,7
5	R_p/R' [-]	0,132	0,113	0,073	0,078	0,083

Wyniki przedstawione w tab. 4.1 potwierdzają zasadę, że spadek napięcia na zestyku (U_1) maleje ze wzrostem siły docisku. W przypadku topika ściśniętego między stykami zwiększanie siły docisku powoduje też zwiększanie się liczby punktów styczności. Wynikiem zwiększania siły docisku jest to, że prąd wpływa do topika bliżej krawędzi szczęki zaciskowej, występuje więc wtedy mniejszy spadek napięcia na materiale topika – co w pomiarach jest to obserwowane jako zmniejszanie się jego oporności (tab. 4.1 lp. 4) w funkcji siły docisku. Przy małej sile docisku, topik ze względu na małą liczbę punktów styczności okazuje się obliczeniowo dłuższy niż to wynika z jego geometrii (tj. odległości pomiędzy szczękami zaciskowymi wg rys. 4.5 i 4.6). Dopiero, gdy liczba punktów styczności jest bardzo duża, tj. dla siły docisku wywołującej naprężenia mechaniczne w topiku na granicy plastyczności, można przyjąć, że długość topika odpowiada jego rzeczywistemu wymiarowi geometrycznemu. Praktycznie można to określić przez obserwację stabilizowania się rezystancji przejścia pomiędzy zaciskiem, a topikiem (tab. 4.1 lp. 3) oraz przez obserwację zmiany rezystancji R' .

W praktyce uzyskanie idealnego połączenia topika ze stykami jest trudne, zaś wykonanie bezpiecznika, w którym topik i styki byłyby monolitem jest praktycznie niewykonalne przy użyciu „zwykłych” metod mechanicznych ze względu na bardzo dużą różnicę przekrojów. W załączniku 5 zestawiono rozważane metody łączenia topików za pomocą technologii używanych w mikroelektronice. Na rys. 4.10. zilustrowano wpływ liczby punktów styczności na pozorną długość topika i zmniejszenie jego rezystancji przy wzroście siły nacisku.



Rys. 4.10. Wpływ liczby punktów styczności na pozorną długość topika

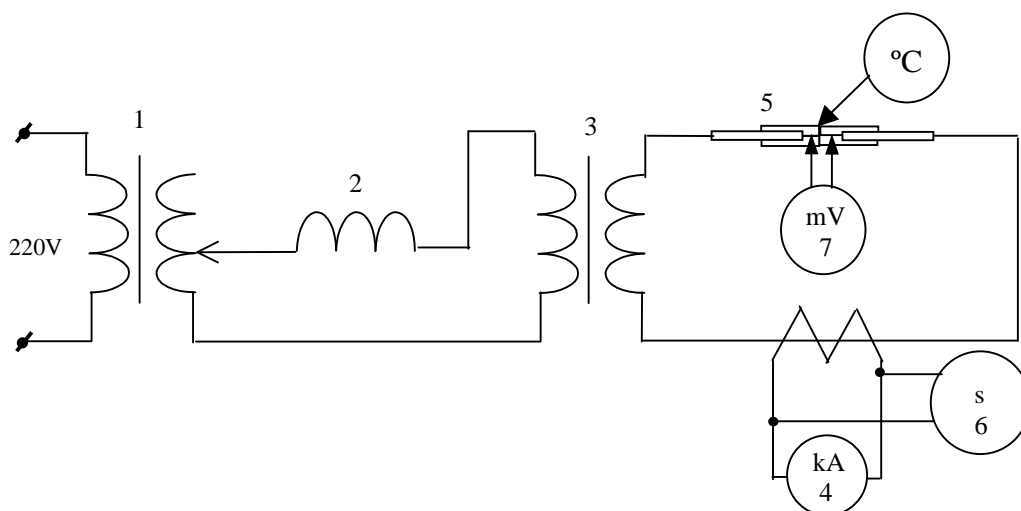


Rys. 4.11. Zależność rezystancji przejścia od siły nacisku. Występuje stabilizowanie się rezystancji przejścia R_p pomiędzy topikiem a okuciem po przekroczeniu siły nacisku 5 kN

Dobór siły docisku był właściwy bowiem przebieg rezystancji przejścia R_p stabilizuje się po przekroczeniu 5 kN (rys. 4.11), która powoduje powstanie naprężeń bliskich granicy plastyczności i lepsze połączenie topika z zaciskiem. W dalszych badaniach stosowano siły docisku przekraczające 5 kN.

4.2.3. Układ do badania obciążalności długotrwałej bezpiecznika

Układ (rys. 4.12 i 4.13) umożliwiał stosowanie prądu probierczego do 1000 A lub 1600 A w czasie t nieprzekraczającym 10 min. Czas próby od włączenia prądu do przetopienia bezpiecznika był rejestrowany przez zegar elektryczny (6) uruchamiany przekaźnikiem zasilanym z przekładnika prądowego. Kontrolowano temperaturę na powierzchni okucia modelu BKT (5). Spadek napięcia na topiku w czasie przedłukowym mierzono woltomierzem (7).



Rys. 4.12. Schemat obwodu probierczego do pomiaru obciążalności długotrwałej BKT: 1 – niskonapięciowy autotransformator regulacyjny 10 kVA; 2 – dławik stabilizujący prąd; 3 – transformator prądowy; 4 – amperomierz, 5 – model BKT z wbudowanym czujnikiem do pomiaru temperatury; 6 – zegar elektryczny; 7 – miliwoltomierz



Rys. 4.13. Układ probierczy do badania obciążalności długotrwałej o maksymalnej wydajności prądowej 1600 A: oznaczenia części układu są zgodne z rys. 4.12.

4.2.4. Obciążalność długotrwała BKT

W p. 4.2.1. przedstawiono w ogólnych warunkach proces nagrzewania BKT. W przypadku obciążalności długotrwałej pomija się akumulację ciepła. Szczególnym przypadkiem jest stan ustalony, gdy temperatura topika nie osiąga temperatury topnienia. W obliczeniach BKT należy jednak pamiętać, że silne nagrzanie topika wywołuje zmiany rezystywności, połączenie topika ze stykami nie jest doskonałe i pojawiają się tam dodatkowe źródła ciepła. Przy zastosowaniu topika o takich wymiarach, aby były zgodne z definicją topika krótkiego przedstawionej w rozdziale 4.1, wydaje się, że chłodzenie konwekcyjne topika jest na tyle słabe w porównaniu z odpływem ciepła do styków drogą przewodzenia, że może być pominięte, lecz wątpliwość może budzić udział promieniowania, szczególnie wówczas, gdy temperatura topika zbliża się do temperatury jego topnienia. Z drugiej strony, sprawny i sprawdzony model obliczeniowy pozwala na szybkie wyznaczanie znamionowych warunków pracy BKT oraz tej części charakterystyki $t - I$, która związana jest z niewielkimi prądami przeciążeniowymi. Analizę dokonano dla modelu z rys. 4.7 dla którego zbudowano model matematyczny opisany w dalszej części niniejszego punktu.

Weryfikacja modelu obliczeniowego na drodze eksperymentalnej jest utrudniona ze względu na bardzo małe wymiary topika. Nie jest łatwe zastosowanie termometrów stykających się z takim obiektem. Dlatego model ten sprawdzono mierząc temperaturę w kontrolnym, łatwo dostępnym punkcie na styku bezpiecznika oraz obliczając i mierząc prąd graniczny bezpiecznika. Rozważano wykorzystanie następujących modeli obliczeniowych:

- Model obwodowy, analogiczny do układu elektrycznego [4], [50] pozwalający obliczać „spadki temperatur” w układzie fizycznym, umożliwiając obliczanie stanów przejściowych. Trudność stanowiło wyznaczenie parametrów zastępczego obwodu elektrycznego. Model taki nie podaje rozkładu temperatury w obiekcie, a więc utrudnia jego weryfikację.
- Model matematyczny oparty o równania różniczkowe [23] opisujące bilans cieplny, umożliwia obliczanie stanów zależnych od czasu oraz od miejsca, jednak należy rozwiązać układy równań różniczkowych zależnych od co najmniej dwóch zmiennych (lub więcej, jeżeli przyjmie się inny układ współrzędnych). Dokładne obliczenia wymagają uwzględnienia dodatkowych czynników takich jak konwekcja, promieniowanie oraz zmiany własności materiałów. W związku z tym współczynniki w równaniach stają się funkcjami np. temperatur co, utrudnia praktycznie użycie takiego modelu.
- Model symulacyjny zwykle opiera się na modelu fizycznym wprowadzając pewne uproszczenia i stosując metody numeryczne rozwiązywania układu równań [23]. Z punktu

widzenia projektanta jest to korzystna metoda umożliwiająca obliczenie parametrów BKT zależnych od czasu i miejsca, przy jednoczesnym korygowaniu parametrów zależnych od temperatury np. materiałowych czy też konwekcji lub promieniowania. Metoda umożliwia łatwe analizowanie zachodzących zjawisk w rzeczywistym modelu o określonej geometrii.

Analiza rozptyłu ciepła w bezpieczniku jest podstawą oceny jego własności, gdyż bezpiecznik jest urządzeniem działającym wskutek wydzielenia ciepła w topiku w czasie przepływu prądu. W BKT warunki nagrzewania topika i styków są krańcowo różne. W stykach i doprowadzeniach, gęstość prądu jest niewielka (w porównaniu z topikiem). Strumień ciepła można opisać równaniem Fouriera:

$$\vec{q}(x, y, z, t) = -\lambda \text{grad } T(x, y, z, t) \quad (4.6)$$

gdzie: $T = f(x, y, z, t)$ pole temperatury w bezpieczniku,

λ – współczynnik przewodności cieplnej,

$\vec{q} = f(x, y, z, t)$ strumień cieplny.

W warunkach ustalonych styk jest dodatkowo nagrzany przepływającym prądem do temperatury wyższej niż temperatura otoczenia. Ciepło, dopływające do styków w warunkach równowagi, a więc przy nagrzewaniu statycznym, jest rozpraszane głównie dzięki konwekcji i odprowadzane przez przewodnictwo przewodów połączeń. Jeśli nie można pominąć ciepła akumulowanego w stykach i generowanego przez przepływający prąd, a także odpływu energii przez promieniowanie, to bilans ciepła opisuje:

$$\text{div}(\lambda \text{grad } T) + q_v = \delta c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{w} \cdot \text{grad } T \right) + Q_{\text{rad}} \quad (4.7)$$

gdzie: q_v – czynnik opisujący gęstość mocy,

\vec{w} – wektor prędkości unoszenia,

Q_{rad} – czynnik opisujący gęstość mocy oddawanej przez promieniowanie,

W analizowanym przypadku możliwe jest wprowadzenie pewnych uproszczeń:

- Jeśli przyjmie się niezmiennosc pola temperatury w bezpieczniku w funkcji czasu (stan ustalony), oraz stałą w funkcji temperatury i położenia wartość współczynnika przewodności cieplnej λ , to opis topika upraszcza się do równania Poissona:

$$\nabla^2 T + \frac{1}{\lambda} q_v = 0 \quad (4.8)$$

- Analizując inny przypadek w którym zakłada się, że zmienność pola temperatury, zachowując jednak stałą wartość stałym współczynnikiem przewodności ciepła λ , to przepływ ciepła w topiku opisuje zależność:

$$\nabla^2 T + \frac{1}{\lambda} q_v = \frac{\rho c_p}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.9)$$

Do wyznaczenia rozkładu temperatury w bezpieczniku pozwalającego na określenie prądów jego zadziałania przy bardzo wolno narastającym prądzie posłużono się programem FLUX, który wykorzystuje metodę elementów skończonych (FEM). Umożliwia on łatwe opisywanie geometrii modelu oraz uwzględnienie wymiany ciepła przez konwekcję i promieniowanie do otoczenia. W rozprawie chodzi o między innymi o pokazanie, że własności BKT zależą głównie od osiowego odpływu ciepła z topika do styków, a chłodzenie z powierzchni bocznych topika jest pomijalne. Należałoby znaleźć granicę, do której taki obraz jest prawdziwy.

Zgodnie z tezą należało wykazać, że działanie BKT w całym zakresie jest uwarunkowane osiowym rozplywem ciepła. Dzięki potwierdzeniu wyników obliczonych z założonej metody z pomiarami można przyjąć, że pierwsza część tezy dotycząca czasu przedłukowego jest udowodniona.

Przyjmując odpowiednie warunki brzegowe opisuje się jakie jest pole temperatury na granicy analizowanego obszaru. Dla rozwiązania problemu używano pierwszego zagadnienia brzegowego (zagadnienie Dirichleta) w przypadku określonej i znanej temperatury na granicy obszaru przyjętej jako 20 °C (np. styki BKT). Na pozostałych powierzchniach gdzie nie można było ustalić temperatury (topik) użyto drugiego zagadnienia brzegowego (zagadnienie Neumanna). Jako warunki początkowe przyjęto stały rozkład pola temperatury we wszystkich punktach badanego modelu.

Przygotowanie modelu obliczeniowego przebiegało w kilku fazach:

- opracowanie założeń i akceptowalnych uproszczeń dla których wyniki obliczeń będą zgodne z eksperymentem,
- budowa modelu geometrycznego, nałożenie siatki elementów skończonych,
- oznaczenie stref i regionów wydzielania ciepła,
- powiązanie ze zjawiskami fizycznymi tj. przypisanie strefom własności materiałowych, wartości prądu itp.,
- definicja warunków brzegowych, zadanie żądanej dokładności i kroku,
- obliczenia,
- analiza i wizualizacja wyników.

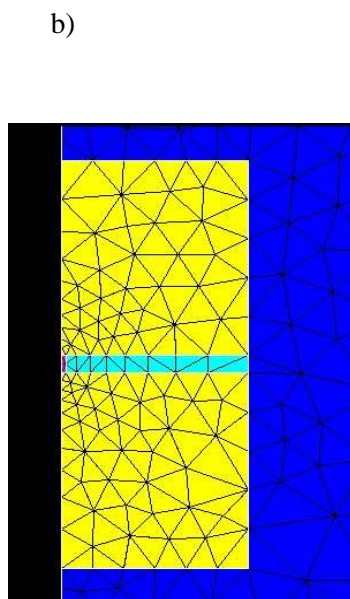
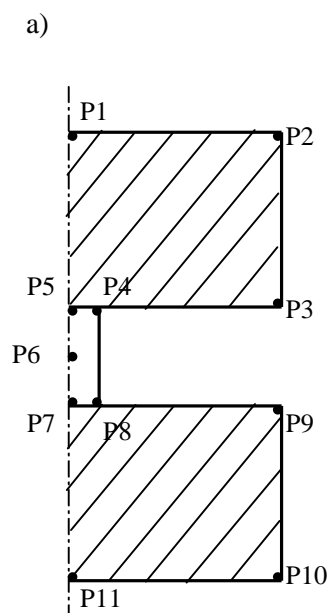
4.2.4.1. Założenia do obliczeń

Obliczenia charakterystyk $t - I$ oraz wyznaczenie prądu granicznego BKT wykonano wykorzystując program komercyjny FLUX 2D firmy Cedrat [13]. Aby uwzględnić wpływ temperatury na parametry materiałowe topika (tj. na rezystywność i tym samym na traconą moc cieplną) użyto moduł Electrothermal [26]. Użyty program jest dwuwymiarowy, więc model bezpiecznika użytego w eksperymentach należy przekształcić w model cylindryczny o układzie współrzędnych (r, z) . W obliczeniach chciano sprawdzić, czy jeżeli pominie się oddawanie ciepła z powierzchni bocznej topika to czy uzyskane wyniki będą zgodne z eksperymentem – co by świadczyło o słuszności tezy. W związku z tym dla sprawdzenia poprawności tezy zakładającej dominację osiowego przepływu ciepła w BKT zbudowano zastępczy model obliczeniowy odpowiadający jej założeniom. Jako kryterium udowodnienia tezy przyjęto zgodność wyników otrzymanych z symulacji i z pomiarów. W obliczeniach dokonano przekształceń upraszczających modele fizyczne do modeli dwuwymiarowych. Parametrem niezmiennym było takie same pole przekroju poprzecznego jak w modelach fizycznych. W modelu fizycznym BKT przekrój styku był prostokątny i wynosił 400 mm^2 . Zastąpiono go, więc cylindrem o promieniu $11,3 \text{ mm}$, zaś topik paskowy o przekroju $0,07 \text{ mm}^2$ zastąpiono drutem o promieniu $0,15 \text{ mm}$.

4.2.4.2. Dobór siatki

Program FLUX, jak większość współczesnych programów polowych, może automatycznie wygenerować siatkę elementów skończonych, jednak duże różnice w wymiarach geometrycznych modelowanego obiektu (np. okucie, topik) powodowały duże zróżnicowanie elementów skończonych, gdyż w przypadku siatki automatycznej program nie zapewniał równomiernego podziału na elementy skończone. Wynikiem złego podziału może się okazać, iż temperatura w interesujących punktach będzie musiała być wyznaczana drogą interpolacji. Przyjęto więc, iż wygodniej jest narzucić arbitralnie początkową siatkę węzłów. Przy tworzeniu arbitralnym siatki podstawowej kierowano się znaną zasadą, że dla zapewnienia dobrej dokładności obliczeń, elementy siatki powinny być zbliżone do trójkątów równobocznych. Aby siatka była prawie równomierna należy tak podzielić krawędzie modelu, aby długość boku elementów siatki była zbliżona do najmniejszego z wymiarów topika, np. jego średnicy. Podziału wstępnego dokonano ręcznie (rys. 4.14 a), a następnie program, w trakcie prowadzonych obliczeń, w trybie automatycznym, generował siatkę elementów skończonych. Ze względu na znaczne różnice w rozmiarach regionów (obszarów), dla węzłów zastosowano podział wykładniczy, który zmniejszał odstęp między węzłami dla regionów o małych roz-

miarach (topik). Dla przykładu na rys. 4.14 b. widać, że na zewnętrznej krawędzi zastosowano podział równomierny węzłów, a na wewnętrznej – wykładniczy, zagęszczony w pobliżu topika (oznaczonego jako obszar różowy). Węzły rozmieszczono w wierzchołkach przekrojów osiowych cylindrycznych styków i topika. Dla użytych w eksperymentach topików paskowych wyznaczono zastępcze promienie przy zachowaniu ich długości równej 1mm (rys. 4.14 a. odległość pomiędzy punktami P8 – P8, P5 – P7 lub P3 – P9).



Tab. 4.2 Współrzędne podstawowych węzłów modelu z rys. 4.14.

P1	(0; 100)
P2	(11,3; 100)
P3	(11,3; 0,5)
P4	(0,15; 0,5)
P5	(0; 0,5)
P6	(0; 0)
P7	(0; -0,5)
P8	(0,15; -0,5)
P9	(11,3; -0,5)
P10	(11,3; -100)
P11	(0; -100)

Rys. 4.14. Przekrój badanego modelu BKT a) podstawowa siatka węzłów definiowana arbitralnie do obliczeń quasi – statycznego pola temperatury cylindrycznego modelu BKT, b) widok modelu z nanięsioną siatką. Współrzędne punktów w mm

Węzły podstawowej siatki połączone liniami prostymi tworzą kształty geometryczne, które są nazywane regionami. Regionom nadano nazwy oraz przyporządkowano wyróżniający je kolor.

W modelu zdefiniowano następujące regiony:

- region intensywnie wytwarzający ciepło topik (różowy),
- regiony przewodzące ciepło z topika opisujące okucie górne (żółte) i dolne (żółte), powierzchnie boczne.

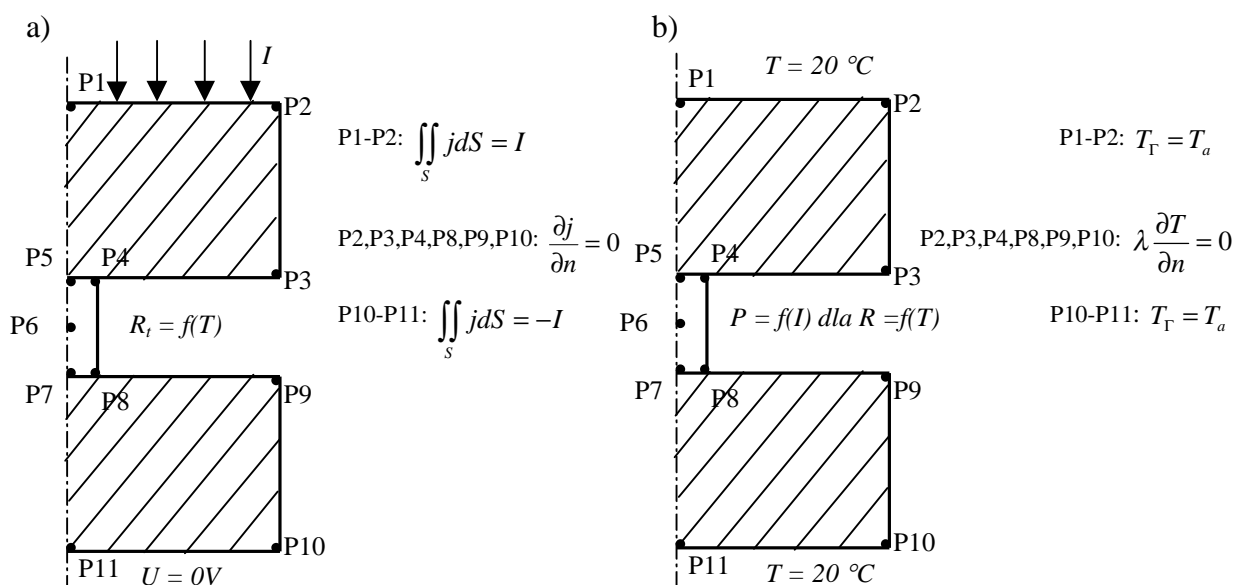
Regionom przypisano materiały, których własności ujęto w bazie (materiałów). Uwzględniono takie własności jak przewodność elektryczna i pojemność cieplna [52], współczynnik konwekcji dla określonego kształtu i usytuowania powierzchni, czy współczynnik promieniowania. Uwzględniono również zależność tych wielkości od temperatury. Przykła-

dowo do opisu wielkości fizycznych określających materiał miedz przyjęto następujące parametry (nazwy zmiennych i ich wartości są zdefiniowane w bazie danych programu FLUX):

Iso K = 390 [W /m K], Ro cp = 0,349 E 7 [J /m³ K], Conv R = 10 [W /m² K], Rad R = 0,8.

Podobnie zdefiniowano parametry pozostałych materiałów np. lutowia, srebra używanych w punkcie 4.3. Opis modelu został zakończony przez zdefiniowanie rodzaju warunków brzegowych (rys. 4.15. b). Były one ustanawiane na węzłach siatki, i umożliwiały określenie wartości danej zmiennej na granicy modelu lub w jakiejś charakterystycznej jego części opisującej np. temperaturę. Warunki brzegowe umożliwi

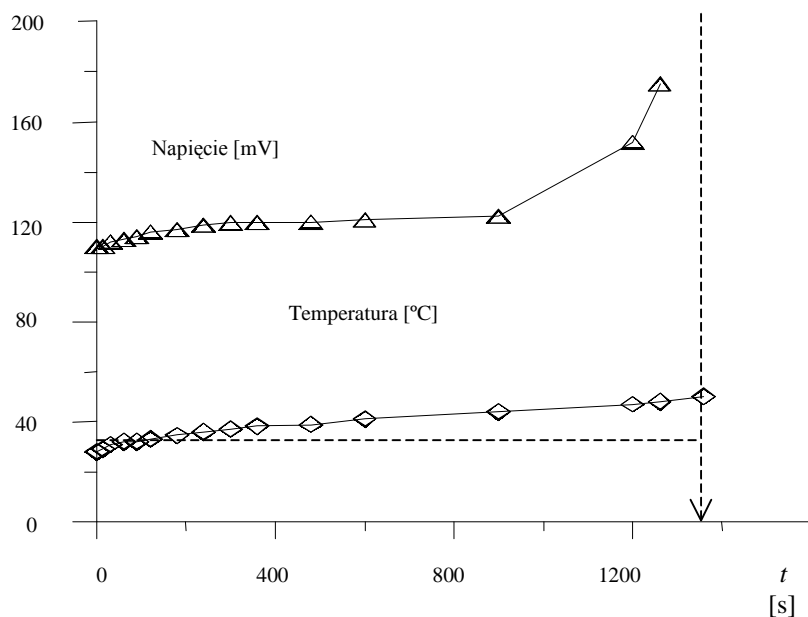
iały też uproszczenie modelowania przez przyjęcie stałej wartości temperatury na odległej od topika części okucia. W badanym przypadku (moduł Electrothermal programu FLUX) należy zdefiniować warunki brzegowe osobno dla części „elektrycznej” i „termicznej” (rys. 4.15). W części „elektrycznej” zdefiniowano warunki brzegowe Dirichleta ustalające potencjał 0 V na powierzchni styku odprowadzającego prąd P10 – P11. Następnie zadawano różne wartości prądów dla których wyznaczano czasy nagrzewania topika. Obszar przez który dopływa prąd to powierzchnia P1 – P2. W części „termicznej” zdefiniowano warunki Dirichleta na powierzchniach P1 – P2, P10 – P11 ustalające temperaturę 20 °C (umożliwia to uniezależnienie analizy obiektu badanego od warunków otoczenia i przyjęcie jakoby był on połączony z obiektem o nieskończenie dużej pojemności cieplnej i małym współczynnikiem przewodzenia ciepła). Wartość temperatury początkowej przyjęto dla całego obiektu też 20 °C. Obszar topika P4, P5, P6, P7, P8 jest obszarem w którym jest źródło strat mocy od prądu wyznaczonego przez program w części „elektrycznej”. Obszar ten miał parametry zależne od temperatury. Pozostałe obliczenia wykonano według tej samej procedury.



Rys. 4.15. Warunki brzegowe i parametry dla modelu BKT a) dla zagadnienia „elektrycznego”, b) dla zagadnienia „termicznego”

4.2.5. Porównanie wyników obliczeń z wynikami pomiarów obciążalności długotrwałej

Obciążalność długotrwałą BKT wyznaczono metodą eksperymentalną dla jednego topika, traktując wyniki jako sprawdzian wiarygodności symulacji. Celem pomiarów było określenie granicznego prądu BKT oraz wyznaczenie temperatury w kontrolnym punkcie na styku dla porównania z wynikami obliczeń rozkładu temperatury. Obrano miejsce o dobrym dostępie, w odległości 10 mm od zamocowania topika. Pomierzona w eksperymencie wartość graniczna prądu wynosiła 176 A, natomiast prąd 180 A powodował przetopienie topika po 1360 s. Przyjmując równomierny rozkład prądu w stosowanym topiku o przekroju $0,07 \text{ mm}^2$ można stwierdzić, że graniczna gęstość prądu wynosiła 2571 A/mm^2 . Przy prądzie probierczym 180 A, temperatura w punkcie kontrolnym osiągnęła $50 \text{ }^\circ\text{C}$, gdy temperatura otoczenia wynosiła $21 \text{ }^\circ\text{C}$. Pomierzone wartości napięcia z topika i temperatury z punktu kontrolnego układu probierczego zostały przedstawione na rys. 4.16. Na rysunku zaznaczono czas zadzia-łania BKT (a więc czas do osiągnięcia temperatury topnienia) równy 1360 s. Krzywa napięcia pokazuje niestabilny wzrost rezystancji topika na skutek wzrostu temperatury od prądu granicznego.



Rys. 4.16. Pomierzone przebiegi spadku napięcia na topiku oraz temperatury w punkcie kontrolnym na okuciu dla prądu 180 A [46] w funkcji czasu. Pomierzony czas zadzia-łania BKT wynosił 1360 s i został zaznaczony pionową strzałką

Obliczenia elektrotermiczne polegały na ustaleniu prądu I granicznego BKT 180 A, (rys. 4.15 a) w przypadku osiowego chłodzenia topika, następnie wyznaczono czas osiągnię-cia przez topik temperatury topnienia.

Porównując wartości pomierzone w układzie wg pkt. 4.2.3 i obliczone wg pkt. 4.2.4 można stwierdzić, że obliczony czas przetopienia wynosił 1305 s, wyznaczony z eksperymentu 1360 s, temperatura w punkcie kontrolnym umieszczonym na powierzchni okucia w odległości 10 mm od topika wyznaczona z obliczeń wynosiła 56 °C, a pomierzona w chwili przetopienia topika 50 °C. Wyniki były więc dość zgodne. Można przypuszczać, że różnica temperatur wynikała głównie z wpływu połączenia pomiędzy sondą pomiarową temperatury, a powierzchnią styku, dodatkowo sonda odprowadzała część ciepła i w ten sposób wpływała na pomiar obniżając mierzoną temperaturę.

Można stwierdzić, że zastosowany model matematyczny umożliwił dokładne określenie czasu zadziałania topika i potwierdzenie pomierzonego prądu granicznego. Tak więc w opisie rozptyłu ciepła w BKT można przyjąć głównie osiowy przepływ ciepła w stanie przedlukowym przy nagrzewaniu quasi statycznym i już na etapie założeń pominąć chłodzenie promieniowe topika uzyskując zgodne z pomiarami wyniki obliczeń. To, wydaje się potwierdza słuszność tezy. Na podstawie sprawdzonych w ten sposób założeń, w dalszej części użyto tego samego sposobu modelowania BKT, aby wyznaczyć inne parametry BKT.

4.3. Modelowanie cylindrycznej wkładki krótkotopikowej

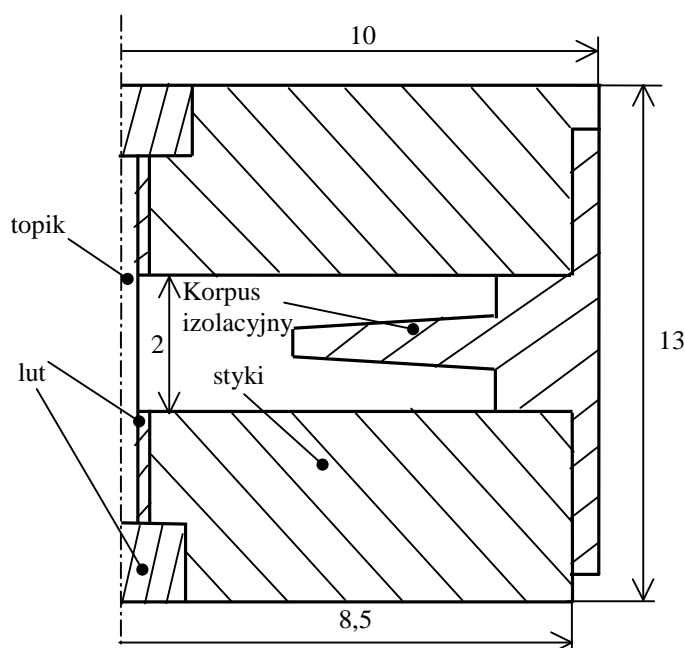
W poprzednim rozdziale przedstawiono wyniki obliczeń dotyczących czasu działania laboratoryjnego modelu BKT. W wykonaniu umożliwiającym praktyczne stosowanie topik musi być umieszczony w obudowie którą nazwać można wkładką krótkotopikową (WKT). Modelowaną wkładkę krótkotopikową przedstawiono na rys. 4.17. Celem obliczeń było stwierdzenie jaką temperaturę osiągnie topik w miejscu styku z lutem. Temperatura topika w przypadku długotrwałego obciążenia powinna być mniejsza niż temperatura topnienia lutu, gdyż w przeciwnym przypadku może wystąpić ograniczenie obciążalności długotrwałej.

Styki wkładki były wykonane z miedzi, topik wewnątrz wkładki został dolutowany do doprowadzeń. Celem modelowania było stwierdzenie długotrwałej obciążalności wkładki w zależności od zastosowanego lutowia. Rozpatrzono przypadek gdy temperatura topika w miejscu połączenia ze stykiem nie przekracza 200 °C, aby nie powodować topnienia lutowia. Taki warunek miał na celu sprawdzenie ograniczeń powodowanych przez stosowanie lutu miękkiego do mocowania topika. Sprawdzono też mocowanie topika za pomocą lutu twardego srebrnego (LS70F) [45], którego temperatura topnienia wynosiła 800 °C. Grubość zastosowanego lutu w obu przypadkach wynosiła 0,05 mm. Warunki chłodzenia zostały założone jako idealne czyli takie, że temperatura na powierzchni styków P1 – P3, P12 – P14 wkładki wynosiła 20 °C obliczenia przeprowadzono dla topika o długości 2 mm i średnicy 0,9 mm.



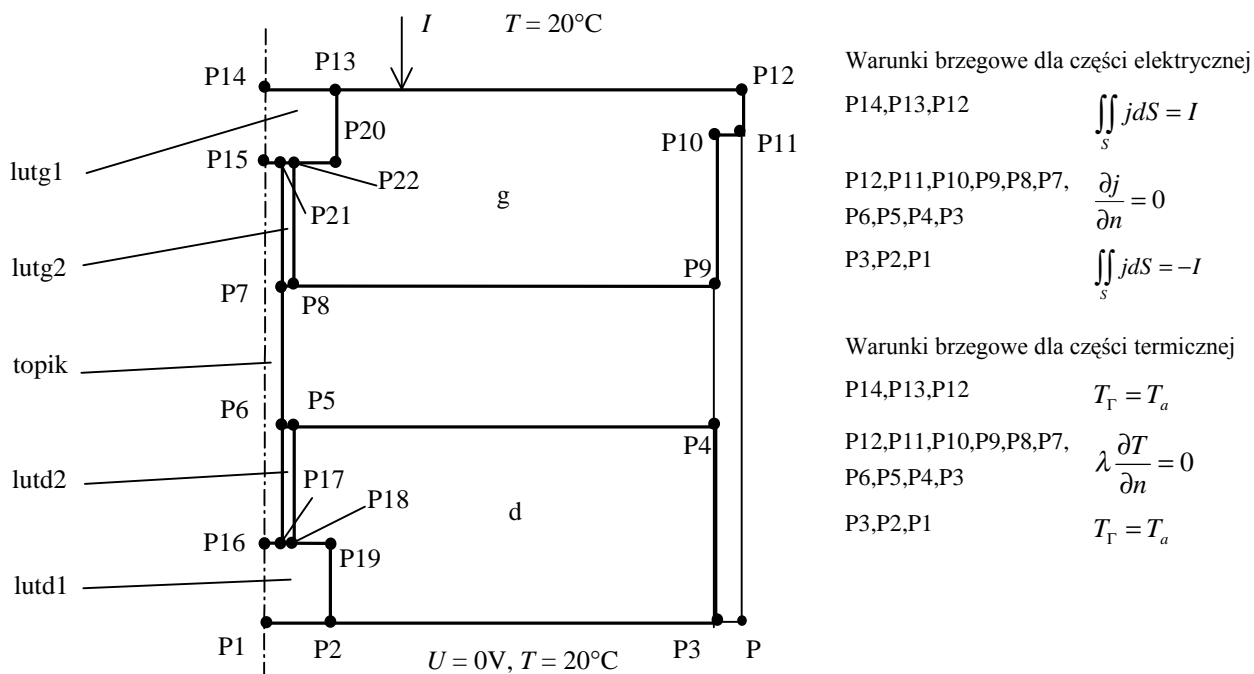
Rys. 4.17. Fotografia wkładki krótkotopikowej wykonanej w Katedrze Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych PG

Ze względu na istniejącą bardzo dużą różnicę przekroju poprzecznego pomiędzy topikiem a okuciem i małą długością topika, warto zwrócić uwagę na pewne podobieństwo między BKT, a zestykiem. Jeśli pominie się wpływ połączeń topik – styk BKT, to model bezpiecznika można oprzeć na modelu zestyku Holma oraz łącznika przewodzącego (topika) generującego ciepło przepływające osiowo. Holm pokazał, że przy pewnych założeniach (np. dla jednorodnej rezystywności przewodzącego materiału półprzetrzni) powierzchnie ekwipotencjalne i izotermiczne są pokrywającymi się elipsoidami. Taka analiza jest jednak łatwa tylko dla prostych przypadków. Gdy istnieje konieczność wprowadzenia warstw przejściowych (lutowie) model się komplikuje. Dlatego analizy rozkładu temperatury w pobliżu połączeń dokonano posługując się metodą elementów skończonych. Stosując sprawdzoną z eksperymentem i podaną wcześniej metodę obliczeń wprowadzono wymiary geometryczne wkładki i podano warunki brzegowe dla programu FLUX (moduł Electrothermal).



Rys. 4.18. Wymiary wkładki krótkotopikowej

Poniżej (rys. 4.19) przedstawiono model wykorzystywany do tej analizy. W tab. 4.3. podano współrzędne punktów uwidocznionych na rys. 4.19.

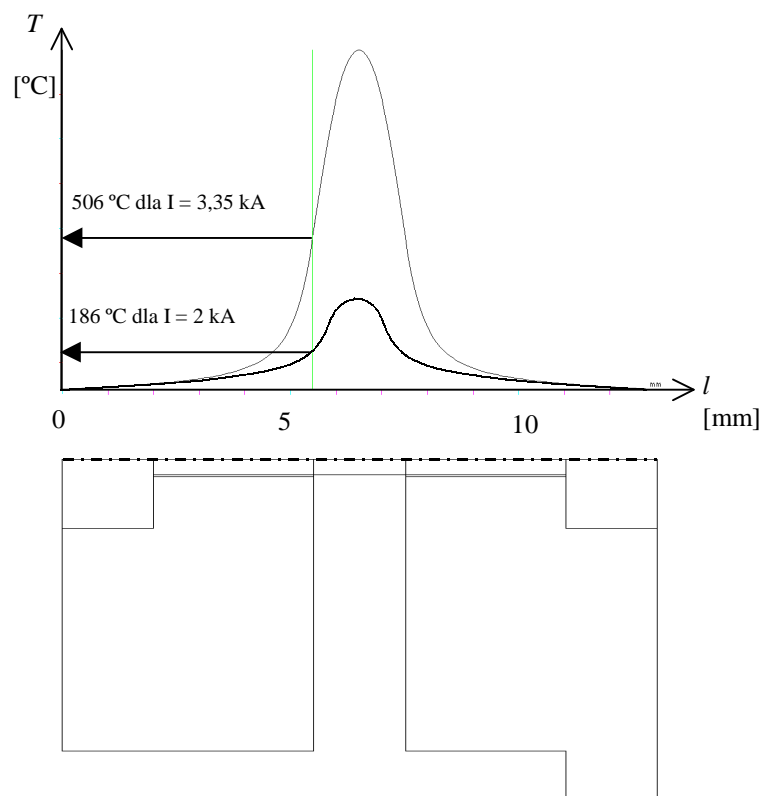


Rys. 4.19. Przekrój wkładki krótkotopikowej z nazwanymi regionami i określonymi warunkami brzegowymi dla modułu elektrotermicznego programu FLUX

Tab. 4.3 Współrzędne punktów wkładki z rys. 4.19.

P1	(0; -6,5)	P12	(10; 6,5)
P2	(2; -6,5)	P13	(2; 6,5)
P3	(8,5; -6,5)	P14	(0; 6,5)
P4	(8,5; -1)	P15	(0; 4,5)
P5	(0,5; -1)	P16	(0; -4,5)
P6	(0,45; -1)	P17	(0,45; -4,5)
P7	(0,45; 1)	P18	(0,5; -4,5)
P8	(0,5; 1)	P19	(2; -4,5)
P9	(8,5; 1)	P20	(2; 4,5)
P10	(8,5; 4,5)	P21	(0,45; 4,5)
P11	(10; 4,5)	P22	(0,5; 4,5)

Obszar ograniczony przez punkty P3, P4, P9, P10, P11, P, jest obudową izolacyjną wkładki. Nie jest ona uwzględniana w obliczeniach, ze względu na jej własności izolacyjne istotnie utrudniające oddawanie ciepła ze styków przez obudowę do otoczenia. Obliczenia stanu ustalonego wykonano dla dwóch przypadków, dla lutu twardego i miękkiego (materiał cyna i srebro, różne temperatury topnienia). Wynikiem tych obliczeń są rozkłady temperatury wzdłuż osi wkładki przedstawione na rys. 4.20.



Rys. 4.20. Rozkład temperatury wzdłuż przekroju wkładki krótkotopikowej. Pionową linią zaznaczono wartość temperatury na styku topika z lutem dla dwóch wartości prądów roboczych

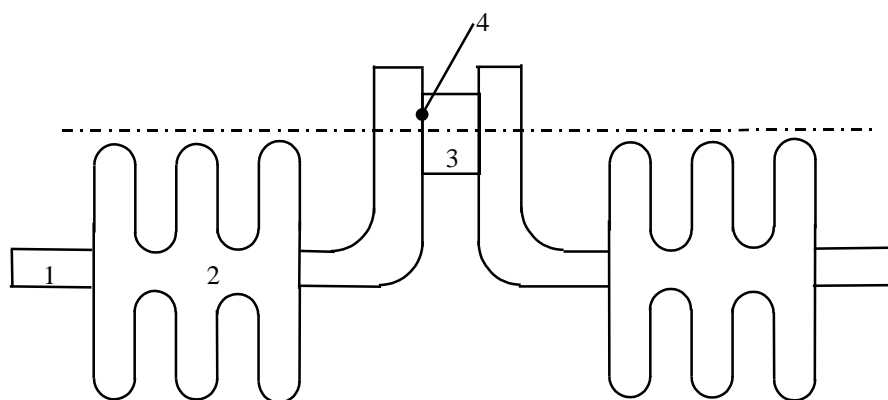
Dla prądu 2 kA topik w środkowym punkcie (0, 0) może osiągnąć maksymalną temperaturę 400 °C, a w pobliżu lutowia 186 °C, taki dobór obciążenia może być korzystny z pewnym zapasem na podniesienie się temperatury otoczenia. W przypadku lutowia twardego można zwiększyć obciążalność do 3,35 kA (prąd graniczny BKT) i w takim wypadku topik w pobliżu lutu może osiągnąć temperaturę 506 °C, która jest znacznie mniejsza od temperatury topnienia lutu twardego. Ograniczeniem w obciążeniu wkładki jest wtedy nie temperatura topnienia lutu a temperatura topnienia topika w punkcie środkowym, która wyniosła 1080 °C. W przypadku rzeczywistym temperatura okolicy lutowia będzie wyższa od przedstawionej w symulacji gdyż temperatura na stykach wkładki jest większa od 20 °C i zależy od warunków chłodzenia. W związku z tym rzeczywista obciążalność będzie mniejsza. Można stwierdzić, że aby obciążalność wkładki nie zależała od temperatury topnienia lutowia lecz topika (co może się szczególnie uwidocznic dla gorszych warunków chłodzenia) należałoby stosować lutowanie twarde.

Wydaje się, że mimo iż metoda lutowania jest łatwo dostępna to aby uniknąć dodatkowych warstw pomiędzy topikiem a stykami wkładki lepsze mogą być inne metody łączenia topika (załącznik 5). Ponadto lutowanie może mieć niekorzystny wpływ na obciążalność BKT ze względu na zjawisko dyfuzji lutowia w głąb łączonych metali, co może doprowadzić do konieczności obniżenia dopuszczalnej temperatury pracy topika. Odmianą konstrukcją bezpiecznika, ale pozbawionym lutowia i związanych z tym ograniczeń, jest bezpiecznik warstwowy z topikiem naniesionym na podłoże ceramiczne [58]. Topik też jest intensywnie chłodzony, podobnie jak w BKT, ale z zasadniczą różnicą, bo chłodzenie jest promieniowe przez powierzchnię boczną do podłoża. Technologia bezpieczników warstwowych nadaje się jednak tylko do bezpieczników o niewielkich prądach znamionowych.

4.4. Wpływ warunków chłodzenia na obciążalność długotrwałą. Ogólna budowa BKT

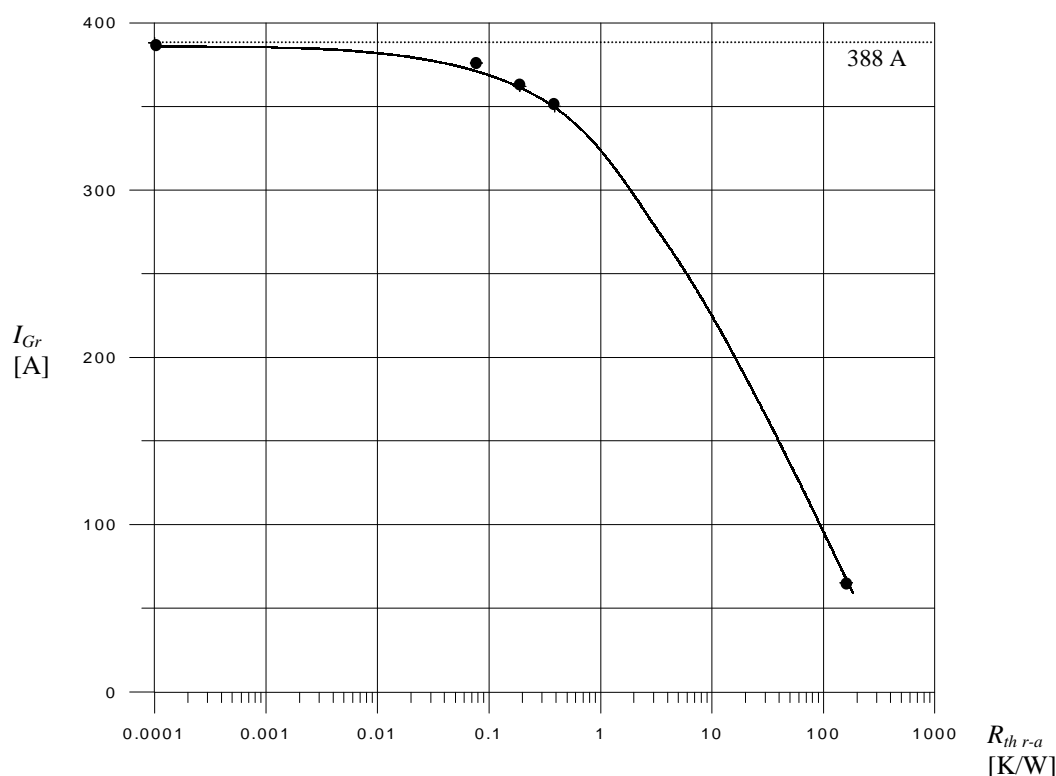
W warunkach rzeczywistych aby BKT miał dużą obciążalność (rzędu 1 – 2 kA/mm²) ciepło z topika musi być skutecznie odprowadzone do styków wkładki i dalej do otoczenia. Częściami współpracującymi bezpośrednio z wkładką są doprowadzenia prądu, w związku z tym muszą spełniać wiele funkcji: umożliwić pewne zamocowanie wkładki krótkotopikowej, zapewnić stałą i powtarzalną siłę docisku do wkładki, umożliwić dołączenie doprowadzeń prądu z układu zasilającego, a najważniejszą funkcją jest skuteczne odprowadzenie ciepła z WKT.

Traktując BKT jako zabezpieczenie „życia” można nie stosować podstawy bezpiecznikowej, a wkładkę zacisnąć między szyny doprowadzające prąd. Szyny te spełniają wówczas rolę „radiatorów” odbierających i rozpraszających ciepło generowane we wkładce. Gdyby ich zdolność rozpraszania ciepła okazała się zbyt mała można użyć specjalnych dodatkowych radiatorów. Rozwiązanie takie przedstawiono schematycznie na rysunku 4.21.



Rys. 4.21. Elementy składowe BKT: 1 – doprowadzenia prądu, 2 – okucia (radiator) chłodzące wkładkę krótkotopikową (WKT) używane w przypadku niedostatecznej wydajności chłodzenia poprzez szyny doprowadzające prąd, 3 – wkładka krótkotopikowa z rys. 4.17, 4 – styk pomiędzy wkładką krótkotopikową a okuciem chłodzącym i doprowadzeniem prądu

Do poprawnej pracy BKT potrzebna jest właściwa współpraca z okuciami chłodzącymi, gdyż w czasie pracy bezpiecznika praktycznie cała wydzielona moc jest do nich oddawana. W rzeczywistym układzie moc jest przekazywana od topika poprzez styki wkładki krótkotopikowej do szyn doprowadzających prąd. Z szyn energia musi być następnie rozproszona do otoczenia. Poprawienie skuteczności odprowadzenia ciepła można dokonać przez zainstalowanie na szynach dodatkowego specjalnego radiatora (rys. 4.21). Z prostego rachunku wynika, że szyny powinny rozpraszać od 30 do 200 W strat dla bezpiecznika pracującego przy prądzie 2,5 kA (dla topika o długości 1 mm i średnicy 0,9 mm). Jak widać przyjęcie założenia, że temperatura topika, a więc działanie BKT zależy wyłącznie od zdolności rozpraszania ciepła przez styki bezpiecznika i stykające się z nimi elementy wyznacza istotną funkcję do spełnienia tym elementom. Przeprowadzona symulacja miała określić wpływ intensywności chłodzenia na obciążalność długotrwałą BKT dla temperatury otoczenia 20 °C. Styki bezpiecznika ze względów ekonomicznych nie powinny być duże, więc na obciążalność BKT wpływają głównie szyny łączące i elementy konstrukcyjne. W takim przypadku utrudnieniem dla przepływu ciepła jest cieplna rezystancja przejścia pomiędzy nimi. W modelu określono wpływ rezystancji cieplnej (intensywności chłodzenia) pomiędzy okuciem a otoczeniem na obciążalność BKT. Modelowano topik długości 1 mm i średnicy 0,3 mm. Obliczenia te dokonano w programie FLUX. Model odpowiadał budowie BKT przedstawionemu na rys. 4.21. z dobudowanymi dodatkowymi radiatorami poprawiającymi intensywność chłodzenia wkładki krótkotopikowej (załącznik 1), radiator posiadał symetrię osiową i średnicę 200 mm, grubość żebra i odległość pomiędzy żebrami wynosiła 10 mm. Przekrój szyny doprowadzającej prąd wynosił 314 mm². W symulacji temperatury otoczenia 20 °C. Badano wpływ powierzchni bocznej na temperaturę topika (o danym współczynniku oddawania ciepła), następnie znając boczną powierzchnię wymiany ciepła z otoczeniem wyznaczono cieplną rezystancję przejścia pomiędzy BKT a otoczeniem.

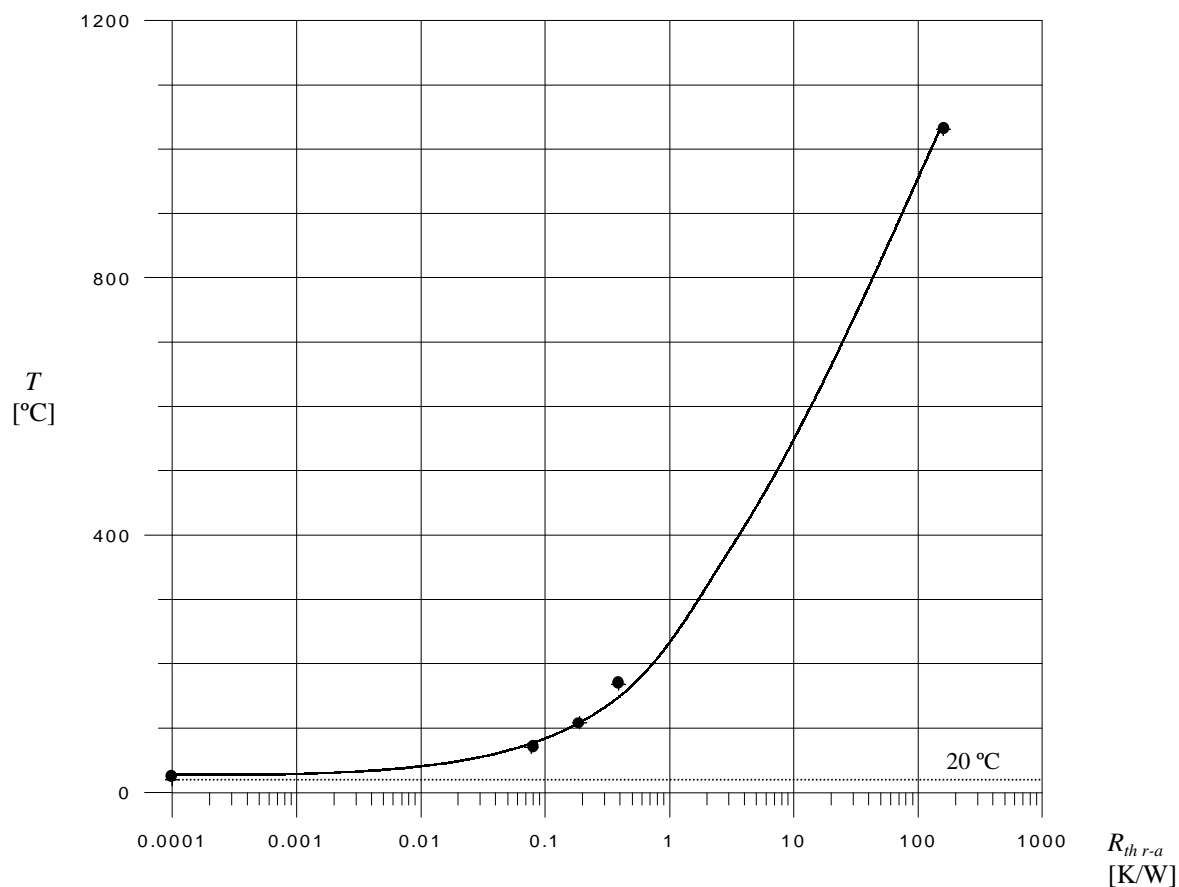


Rys. 4.22. Prąd graniczny BKT w funkcji cieplnej rezystancji przejścia pomiędzy otoczeniem a okuciem BKT

Na rys. 4.22. przedstawiono wpływ cieplnej rezystancji przejścia na prąd graniczny. Linia przerywaną zaznaczono obciążalność BKT w przypadku nieskończonego dobrego odprowadzania ciepła z topika (końce topika mają temperaturę otoczenia). Z wykresu widać, że zastosowanie takiego okucia, które będzie miało rezystancję $R_{th\ r-a}$ mniejszą niż 0,2 K/W nie wpłynie istotnie na obciążalność BKT. W takim przypadku obciążalność BKT z wyżej zdefiniowanym topikiem wynosi ok. 360 A. Bez dodatkowego radiatora wkładka posiada $R_{th\ r-a} = 160$ K/W, co powoduje znaczne ograniczenie oddawania ciepła do otoczenia skutkując tym, że może długotrwale przewodzić prąd o wartości tylko 65 A. Odpowiadająca gęstość prądu topika dla okucia o $R_{th\ r-a} = 0,08$ K/W wynosi 5320 A/mm^2 , a bez dodatkowego chłodzenia tylko 919 A/mm^2 , przy czym teoretyczna maksymalna gęstość prądu przy idealnym odprowadzaniu ciepła wynosi 5489 A/mm^2 .

Zwiększanie skuteczności chłodzenia tak, aby zmniejszyć $R_{th\ r-a}$ poniżej 0,2 K/W nie wpływa istotnie na zwiększenie obciążalności BKT, to jednak ma duży wpływ na temperaturę na powierzchni styków (radiatora) wkładki krótkotopikowej, co pokazano na rys. 4.23. W takim przypadku jeżeli trzeba zachować temperaturę na powierzchni ogranicznika poniżej 100 °C np. w pomieszczeniach o szczególnym obostrzeniu odnośnie bezpieczeństwa aparatów elektrycznych to trzeba zastosować takie rozwiązanie chłodzenia, aby miało ono $R_{th\ r-a}$ poniżej 0,09 K/W. Wówczas powierzchnia ogranicznika nagrzej się do 70 °C. Wkładka bez dodatkowego radiatora nagrzewa się do 1030 °C już przy prądzie tylko 65 A. Poziomą linią zrna-

czono temperaturę otoczenia 20 °C którą mógłby osiągnąć BKT w przypadku nieskończenie dobrego odprowadzania ciepła (dla temperatury końców topika równych 20 °C).



Rys. 4.23. Temperatura na powierzchni BKT w funkcji cieplnej rezystancji przejścia pomiędzy otoczeniem a BKT. Poziomą linią zaznaczono temperaturę otoczenia 20 °C

Intensywność chłodzenia należy dobierać również sprawdzając nie tylko temperaturę topika przy obciążeniu prądem roboczym, ale również sprawdzając, aby przy takim obciążeniu powierzchnia BKT nie przekroczy dopuszczalnej temperatury. W praktyce może się okazać, że temperaturę na powierzchni BKT należy ograniczyć do dopuszczalnej wartości (np. w pomieszczeniach zagrożonych pożarem itp.) to może wymagać zastosowania odpowiednio bardziej skutecznego chłodzenia niż takie, które tylko zapewnią odpowiednią obciążalność BKT. Opierając się na wcześniej opisanych założeniach, że w odbieraniu ciepła z BKT biorą udział głównie doprowadzenia prądu, należy przy projektowaniu BKT uwzględnić gorsze odprowadzanie ciepła ze względu na pogorszenie się warunków zewnętrznych (np. zwiększenie temperatury otoczenia, zabrudzenie itp.). Dla podniesienia skuteczności chłodzenia i zmniejszenia objętości BKT można rozpatrywać inne sposoby chłodzenia np. przez chłodzenie cieczą. Aby rozważania uniezależnić od wpływu zmiennych warunków chłodzenia przyjęto, że styki BKT oddają ciepło do idealnej chłodnicy o nieograniczonej zdolności odbierania ciepła.

4.5. Praca BKT przy szybkim wzroście temperatury

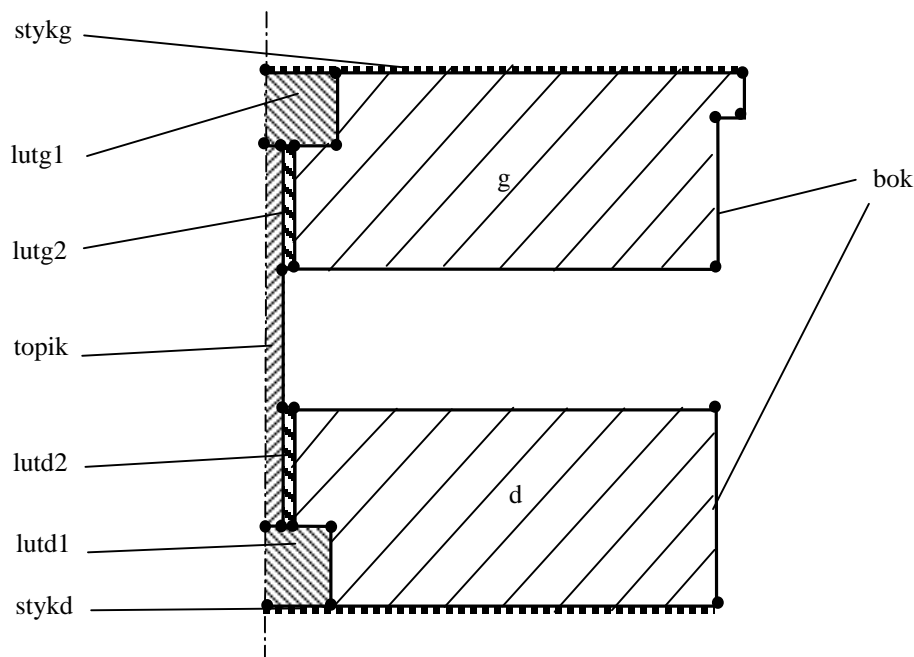
Dla prądów zwarciovych i przeciążeniowych ilość wydzielanego ciepła jest większa od ciepła odprowadzonego do otoczenia co powoduje wzrost temperatury topika aż do jego przetopienia. Poniżej przedstawiono własności BKT dla zwarć i dużych przeciążeń oraz metodę obliczania charakterystyk $t - I$, a także konstrukcyjnych $t = f(I)$; $l = f(I)$ potrzebnych do projektowania wkładki krótkotopikowej.

4.5.1. Opis modelu i obliczenia charakterystyk $t - I$

Zastosowane modelowanie matematyczne miało na celu określenie charakterystyki $t - I$ bezpiecznika i wyznaczenie jej zmian w funkcji długości oraz średnicy topika, co umożliwia dobór bezpiecznika do urządzenia [60]. Założeniem było obliczenie idealnych charakterystyk, niezależnych od warunków otoczenia i ograniczeń spowodowanych technologią wykonania. Charakterystyki $t - I$ można wyznaczać modelując dany bezpiecznik metodą elementów skończonych [43] uwzględniając nieliniowości parametrów materiałowych. W niniejszej pracy zastosowano jednolity sposób obliczeń parametrów BKT więc, aby zastosować ten sam rodzaj modelowania jak w pkt. 4.2.5, model uproszczono do symetrii osiowej prowadzącej problem do układu płaskiego 2D. Rozpatrywano model BKT przedstawiony na rys. 4.19. z tym, że aby uzyskać idealne charakterystyki, pominięto wpływ materiału lutu przez przyjęcie regionów „lut” jako wykonanych z miedzi. Dodatkowo pominięto wpływ otoczenia przez zdefiniowanie stałej temperatury za pomocą warunków brzegowych Dirichleta na powierzchni okucia BKT.

Modelowanie BKT wykonano również w oparciu o moduł elektrotermiczny programu FLUX. Zadano dwa opisy warunków brzegowych wkładki krótkotopikowej: pierwszy spełniający założenia potrzebne dla obliczeń pola elektrycznego, a drugi – pola termicznego (tab. 4.4 6 i 7 kolumna). Sprzężenia pomiędzy zagadnieniami: termicznym i elektrycznym dokonano, definiując straty w topiku dla obliczeń termicznych, które są skutkiem przepływu prądu wyznaczonego w polu elektrycznym. Prąd w obliczeniach elektrycznych wpływa przez region styku górnego i płynie do styku dolnego ze zdefiniowanym potencjałem 0 V. Użyty model (rys. 4.24) był opisany przez parametry materiałowe np. pojemność cieplną, przewodność cieplną oraz rezystywność, która zależała od temperatury. Obliczenia uwzględniały procesy przejściowe i były realizowane dla czasów od 0,1 μ s do 3600 s. Temperatura początkowa otoczenia wynosiła 20 °C i w pierwszym kroku została przyjęta jako początkowa dla całego modelu. Obliczenia kończono gdy topik osiągnął temperaturę topnienia.

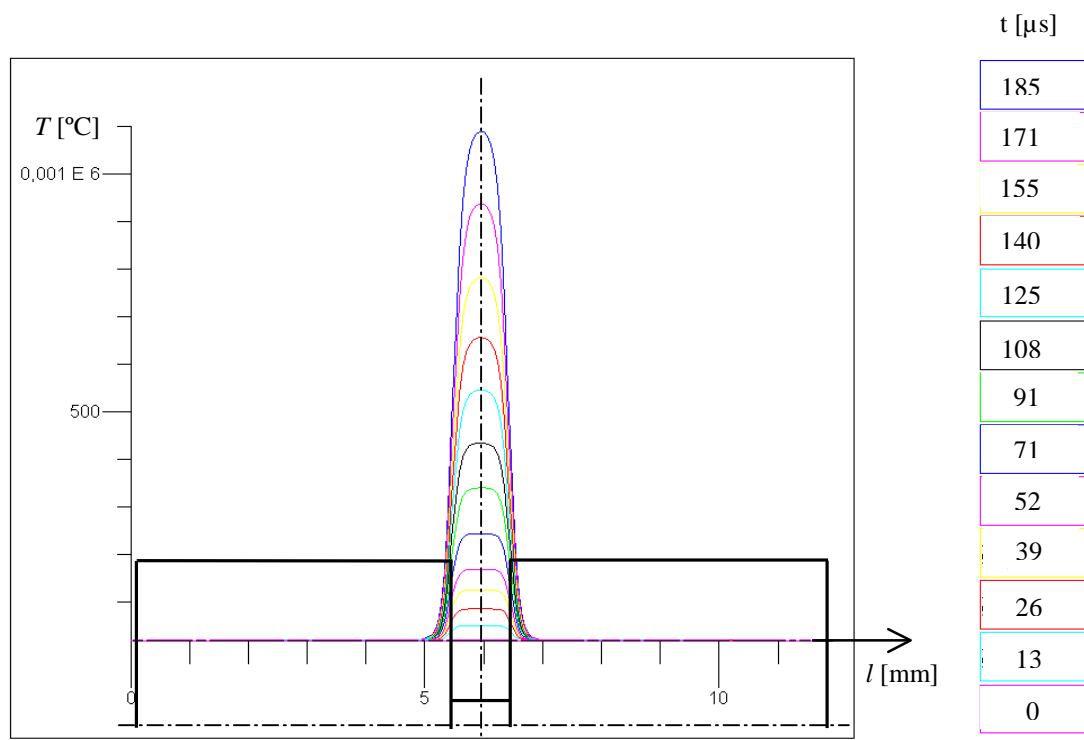
Zestawienie materiałów i głównych własności fizycznych użytych do symulacji przedstawiono w tab. 4.4. W przypadku opisu styków, dla których grubość obszaru wynosi zero, nie nadaje się własności materiałowych, więc są zdefiniowane jako próżnia.



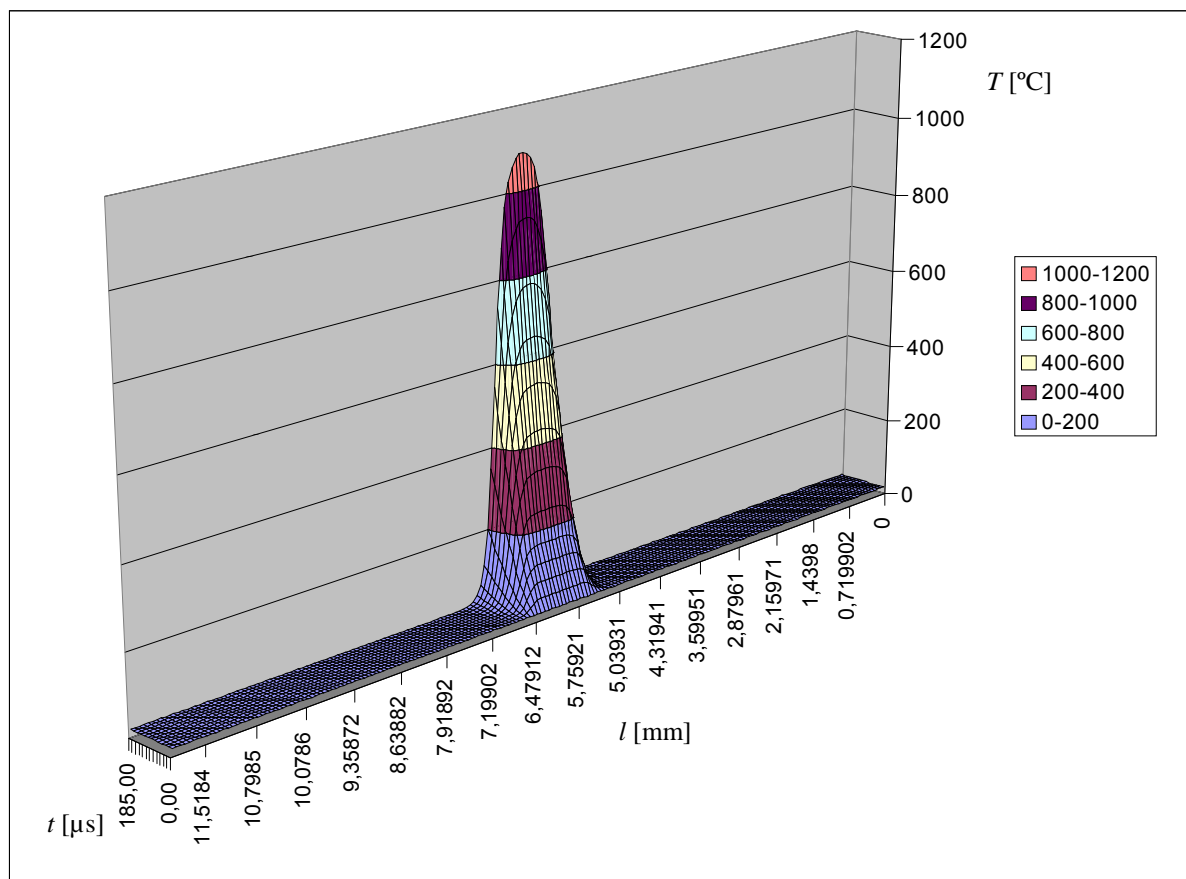
Rys. 4.24. Przekrój BKT z podziałem na obszary używane do obliczeń cieplnych

Tab. 4.4 Własności modelu BKT które przyjęto do obliczeń cieplnych w programie FLUX

Lp	Nazwa regionu	Rodzaj regionu	Materiał i główne własności		Źródło i warunki brzegowe	
			Obliczenia elektryczne	Obliczenia termiczne	Obliczenia elektryczne	Obliczenia termiczne
1	g	powierzchnia	Cu	Cu, K	bez źródła	bez źródła
2	d	powierzchnia	Cu	Cu, K	bez źródła	bez źródła
3	topik	powierzchnia	Cu, $\rho_{Cu} = f(T)$	Cu, K	bez źródła	<u>straty od prądu z obliczeń pola elektrycznego</u>
4	lutg1	powierzchnia	Cu	Cu, K	bez źródła	bez źródła
5	lutg2	powierzchnia	Cu	Cu, K	bez źródła	bez źródła
6	lutd1	powierzchnia	Cu	Cu, K	bez źródła	bez źródła
7	lutd2	powierzchnia	Cu	Cu, K	bez źródła	bez źródła
8	stykg	plaszcz	próżnia	próżnia	<u>badany prąd topika</u>	Dirichleta izoterma 20 °C
9	styk d	plaszcz	próżnia	próżnia	Dirichleta potencjał 0V	Dirichleta izoterma 20 °C
10	bok	plaszcz	próżnia	convcu R _{adR} , C _{onvR}	bez źródła	bez źródła



Rys. 4.25. Nagrzewanie się topika, którego w czasie $t = 0$ obciążono prądem 1500A. Kolejne krzywe przedstawiają rozkłady temperatur w czasie wzdłuż osi wkładki krótkotopikowej na tle jej przekroju: wymiary topika $l = 1\text{mm}$, $d = 0,3\text{ mm}$

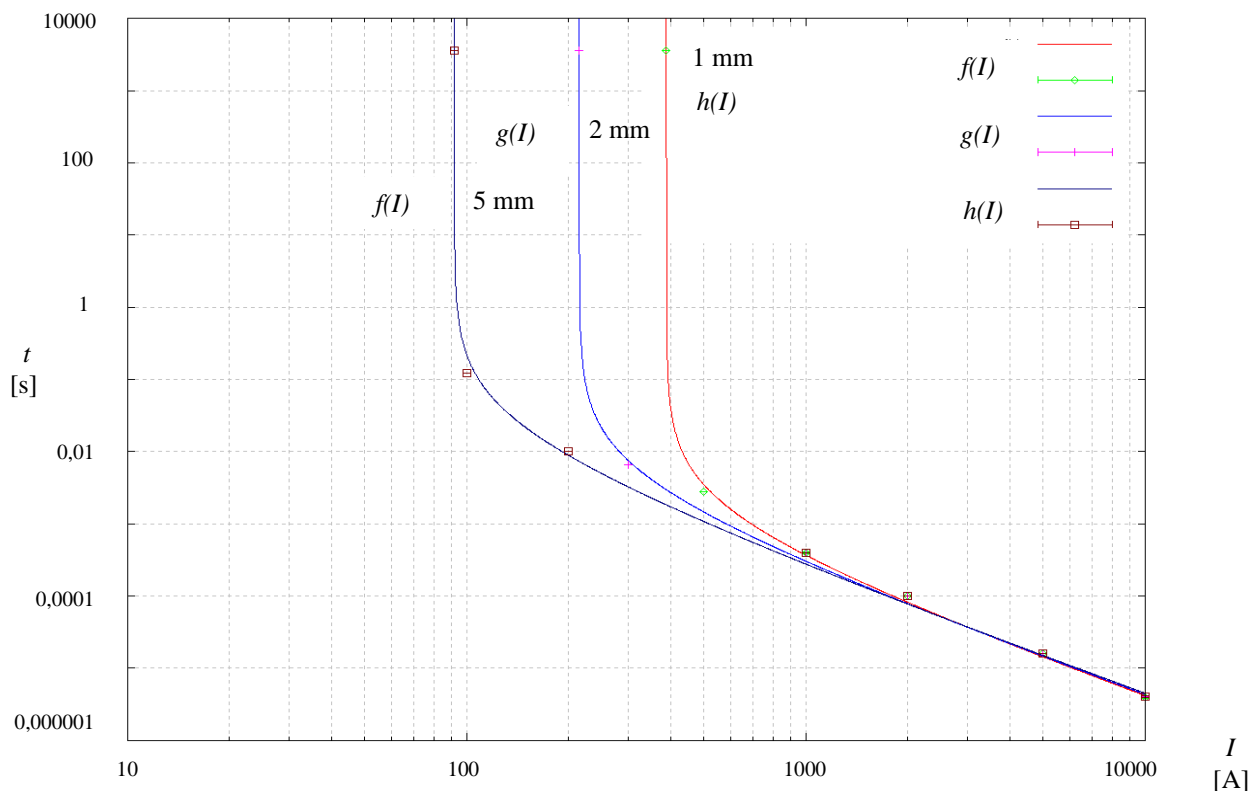


Rys. 4.26. Przykładowy rozkład temperatury wzdłuż osi topika dla różnych czasów: wymiary topika $l = 1\text{mm}$, $d = 0,3\text{ mm}$, prąd obciążenia 1500 A; oś topika podano mierzono od powierzchni zewnętrznej styku

Obliczenia przeprowadzono dla różnych długości, średnic i prądów topika uzyskując wyniki przedstawione w tab. 4.5. Charakterystyki $t - I$ wyznaczano przez założenie określonej wartości prądu, dla której obliczano czas nagrzewania środka topika od wartości początkowej temperatury 20 °C do osiągnięcia temperatury topnienia. Jako czas zadziałania BKT przyjęto czas nagrzania się środkowego punktu topika do temperatury topnienia miedzi. Na rysunkach 4.25 i 4.26 przedstawiono rozkład temperatury wzdłuż osi topika dla czasu nagrzewania od 0 do 120 μ s. Długość wkładki krótkotopikowej (wraz z okuciami) rys. 4.19 wynosiła 12 mm, a prąd obciążający wynosił 1500 A.

Tab. 4.5 Charakterystyki $t - I$ BKT dla różnych długości topików i stałej średnicy 0,3 mm

Lp.	I [A]	t [s]		
		$l = 1$ [mm]	$l = 2$ [mm]	$l = 5$ [mm]
1	92			3600
2	100			0,123
3	200			0,01
4	215		3600	
5	300		0,0065	
6	388	3600		
7	500	0,0028		
8	1 k	0,0004	0,0004	0,0004
9	2 k	0,0001	0,0001	0,0001
10	5 k	16 μ	16 μ	16 μ
11	10 k	4 μ	4 μ	4 μ



Rys. 4.27. Charakterystyki $t - I$ dla topików o średnicy 0,3 mm i różnych długościach

Opisanie przebiegu charakterystyki $t - I$ BKT w oparciu o modele fizyczne jest niezmiernie trudne ze względu na dominację różnych zjawisk fizycznych w różnych etapach pracy bezpiecznika przy różnych prądach wyłączanych. Aby ułatwić zrozumienie własności łączeniowych BKT, a także ich dobór, dokonano aproksymacji wyników przedstawionych na rys. 4.27. Użyto funkcji wyrażonej wzorem (4.10). Funkcje dobierano na podstawie [71] z części poświęconej opracowaniu wyników empirycznych, przy czym kierowano się następującymi warunkami:

- przebieg funkcji powinien być malejący,
- musi posiadać dwie asymptoty,
- dla $i \rightarrow I_{Gr}$ powinna przyjmować wartość nieskończoną,
- dla dużych prądów ($i \rightarrow \infty$) powinna zmierzać do linii nagrzewania adiabatycznego (zależność Meyera).

W (4.10) wydzielono dwa człony funkcji. Pierwszy z nich opisuje część przeciążeniową charakterystyki $t - I$, gdy ciepło wydzielone w topiku jest prawie w całości odprowadzane do otoczenia, drugi – w postaci współczynnika β , odpowiada za część zwarciovą (szybkie działanie bezpiecznika), gdy ciepło jest akumulowane w topiku. Tak skonstruowana funkcja aproksymująca charakterystykę $t - I$, opisująca czas zadziałania bezpiecznika na podstawie obliczonych punktów jest opisana poniższym równaniem, gdy prąd jest podstawiony w amperach:

$$t = f(I) \Rightarrow f(\alpha, I)\beta \Rightarrow \frac{\alpha}{I(I - I_{Gr})} \cdot \beta \Rightarrow \frac{\alpha}{I(I - I_{Gr})} \cdot \frac{\sqrt{I}}{\ln^2 I} \quad \text{dla } I > I_{Gr} \quad (4.10)$$

gdzie: α – współczynnik opisujący część przeciążeniową charakterystyki $t - I$,

β – współczynnik opisujący krótkie czasy działania,

I_{Gr} – prąd graniczny wyznaczony dla danego topika [A],

I – prąd, dla którego jest liczony czas zadziałania [A],

Współczynnik α jest funkcją długości topika, której orientacyjny przebieg wyznaczony dla trzech długości topika przedstawiono na rys. 4.29. Formę współczynnika β będącego członem funkcji aproksymacyjnej odpowiedzialnym za duże wartości prądów (I) i krótkie czasy działania dobrano eksperymentalnie, starano się uzyskać najlepszą aproksymację zależności wyznaczonej obliczonymi punktami (tab. 4.5).

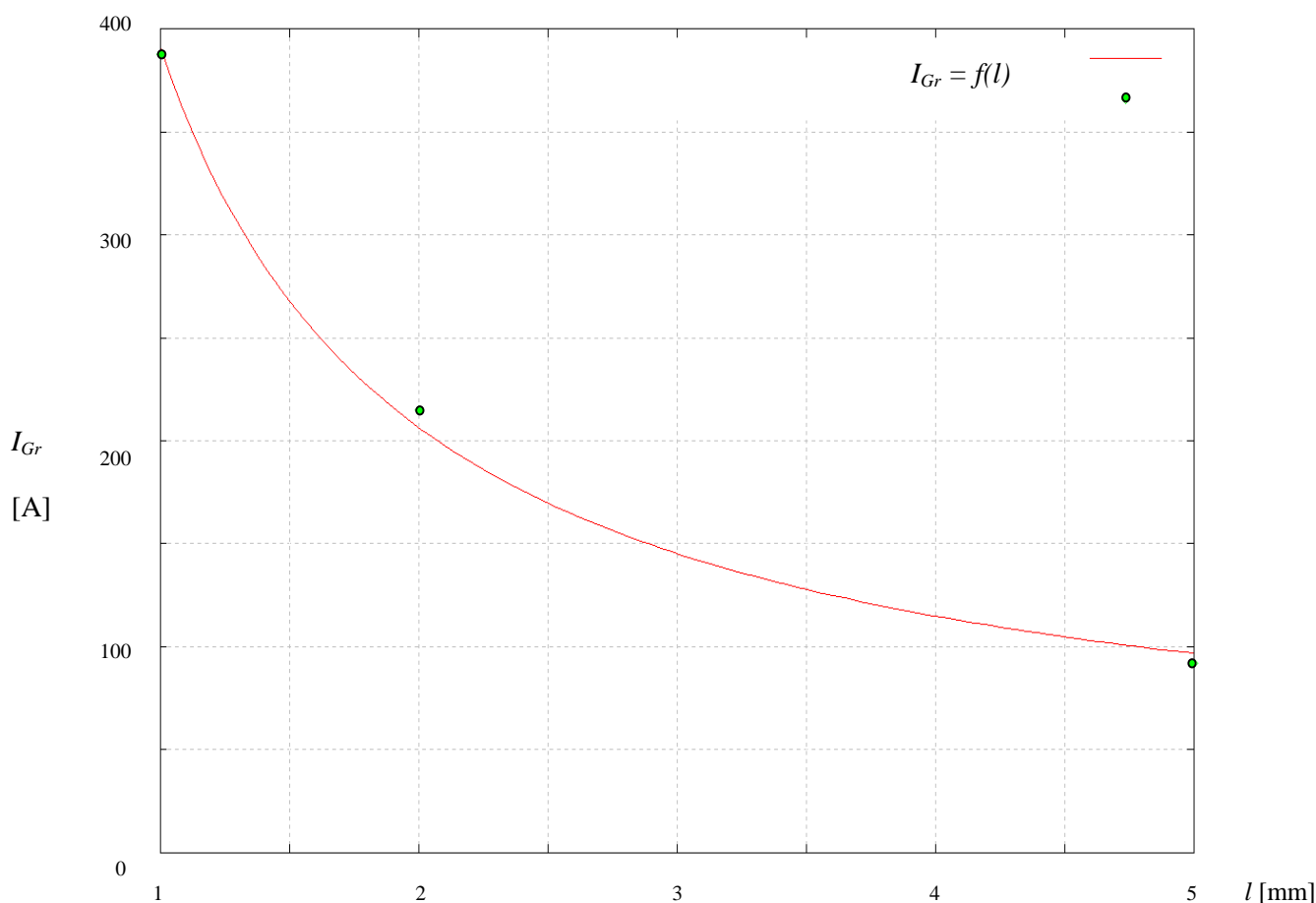
Tab. 4.6. Wartości współczynników α oraz I_{Gr} stosowane w (4.10). Wartości prądów granicznych I_{Gr} pomierzono w układzie wg pkt. 4.2.3

Lp.	α	I_{Gr}	l	Nazwa funkcji aproksymującej z rys. 4.27
	-	[A]	[mm]	
1	340	388	1	$f(I)$
2	360	215	2	$g(I)$
3	380	86	5	$h(I)$

Ponieważ dobierając długość topika BKT musi się uwzględnić nie tylko jego charakterystykę $t - I$ (czy spełnia kryteria BKT), ale także przewidywane napięcie łączeniowe (wytrzymałość napięciowa po wyłączeniu) wzór aproksymujący (4.10) ułatwia to zadanie. Konstruuąc charakterystyki $t - I$ dla różnych średnic d i różnych długości l (rys. 4.30) umożliwia się dobór najkorzystniejszej geometrii topika dla określonego zadania.

W użytych funkcjach aproksymujących zarówno I_{Gr} , jak i α są zależne od długości topika l . Do symulacji należało, więc dobrać funkcje $I_{Gr} = f(l)$ oraz $\alpha = f(l)$, a także określić zakresy ich zmienności. Zestawienie obliczonych wartości parametrów I_{Gr} oraz α przedstawiono w tab. 4.6.

Prąd graniczny w funkcji długości topika $I_{Gr} = f(l)$ daje się dość dobrze opisać funkcją opartą na hiperboli (rys. 4.28) gdyż dla długości $l \rightarrow 0$ prąd graniczny $I_{Gr} \rightarrow \infty$, a gdy $l \rightarrow \infty$, to $I_{Gr} \rightarrow 0$. Do aproksymacji użyto danych zebranych w tab. 4.5. (pomierzone prądy dla trzech długości topika i czasu przetapiania 3600 s).



Rys. 4.28. Przykładowy przebieg $I_{Gr} = f(l)$ opisany formułą (4.11): stałe wyznaczone dla średnicy topika $d = 0,3$ mm oraz trzech długości $l = 1$ mm, 2 mm i 5 mm

Funkcja określająca zmiany prądu granicznego przedstawiona na rys. 4.28. ma postać:

$$I_{Gr} = \frac{a}{1-b^l} \quad (4.11)$$

gdzie: $a = 41,616$,

$b = 0,893$,

l – długość topika [mm],

I_{Gr} – prąd graniczny [A],

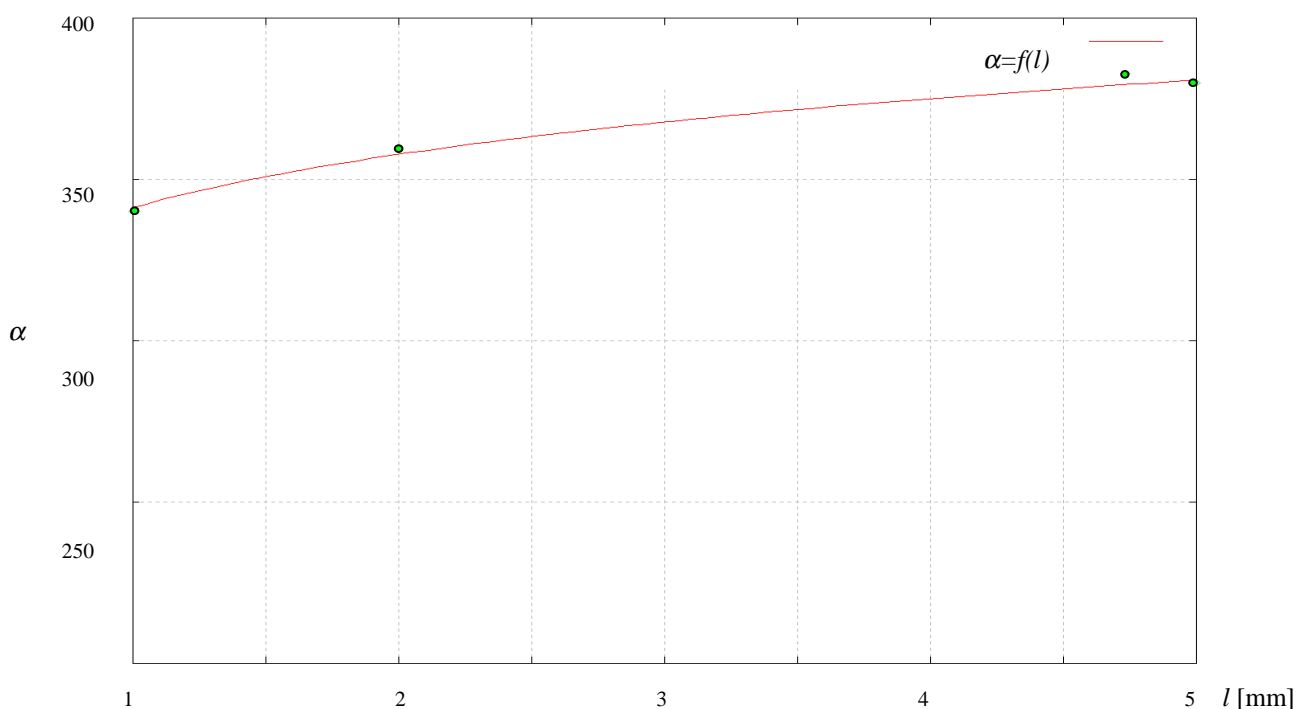
Współczynniki liczbowe a i b funkcji (4.11) zostały wyznaczone według skryptu przedstawionego w załączniku 5.

W przypadku określenia funkcji $\alpha = f(l)$, układ punktów wskazywał, że funkcja aproksymująca będzie miała postać wykładniczą $y = ax^b$ (była to przewidywana postać funkcji gdyż zależności energetyczne są opisywane funkcjami potęgowymi). Do wyznaczenia współczynników a i b użyto funkcji fit $f(x)$ (załącznik 6) programu Gnuplot [72], czyli dopasowania funkcji do punktów α , l z tab. 4.6. Wynikiem obliczeń była funkcja, w której zmienną niezależną była długość topika l (rys. 4.29):

$$\alpha(l) = ax^b = 341,3 l^{0,0682} \quad (4.12)$$

gdzie: l – długość topika [mm],

Warto, jednak zauważyć, że w przedziale interesującym ze względów aplikacyjnych ($l = 1 \div 2$ mm), funkcję $\alpha(l)$ można łatwo linearyzować.



Rys. 4.29. Współczynnik $\alpha = f(l)$ wyznaczony z formuły (4.12): stałe wyznaczono dla $d = 0,3$ mm oraz przykładowych długości topika $l = 1$ mm, 2 mm i 5 mm

Podstawiając otrzymane zależności (4.11) i (4.12) do funkcji (4.10) opisującej $t - I$ uzyskano funkcję $t = f(I, l)$ opisującą płaszczyznę dla stałej średnicy topika $d = 0,3$ mm:

$$f(I, l) = t(I, l) = \frac{\alpha(l)}{I \left(I - \frac{a}{1-b^l} \right)} \cdot \frac{\sqrt{I}}{\ln^2 I} = \frac{341,3 \cdot l^{0,0682}}{I \left(I - \frac{a}{1-b^l} \right)} \cdot \frac{\sqrt{I}}{\ln^2 I} \quad (4.13)$$

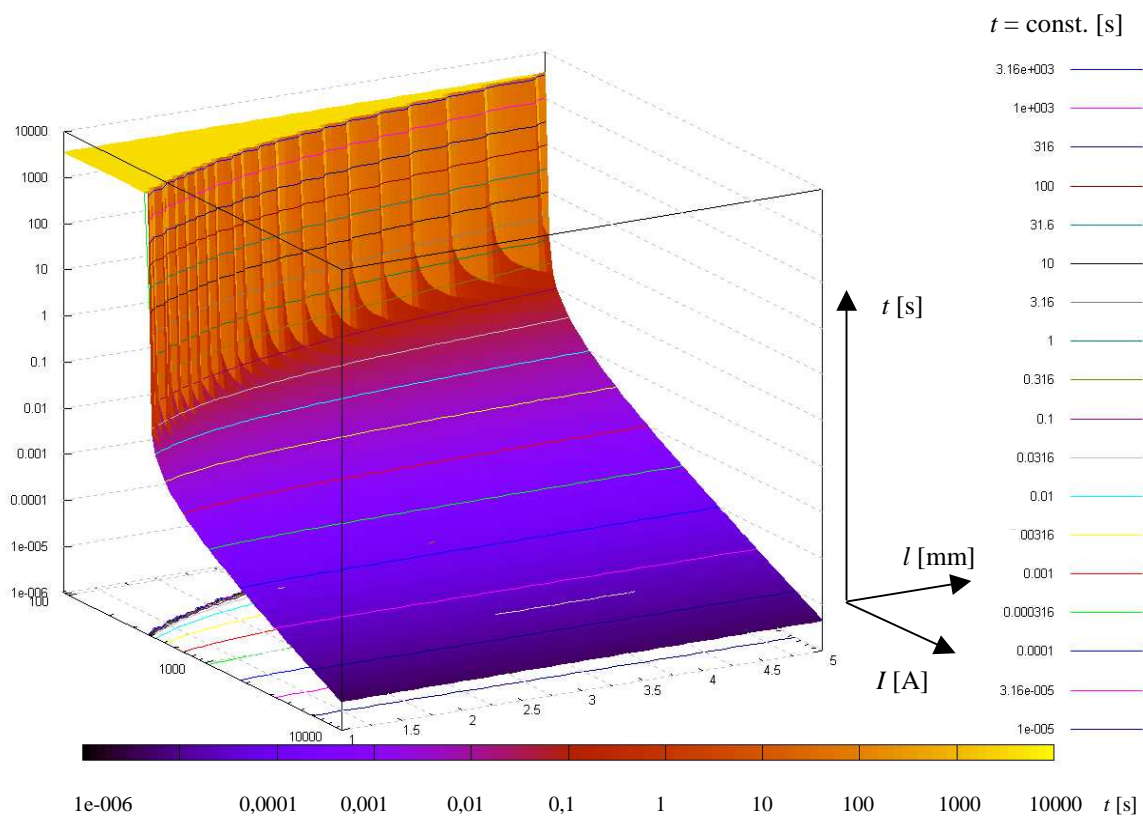
gdzie: $a = 41,616$,

$b = 0,893$,

I – prąd [A],

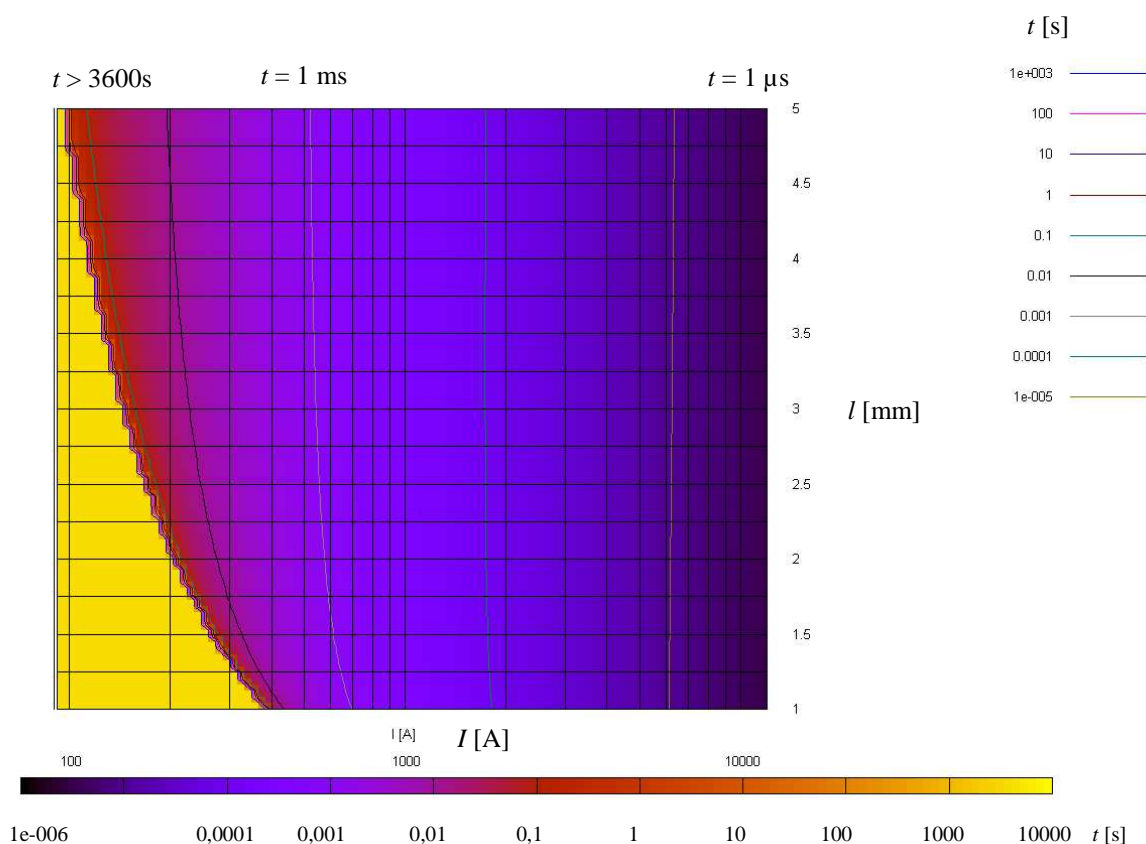
l – długość topika [mm],

Wyznaczając w analogiczny sposób zależności aproksymujące własności innych topików, można zbudować charakterystyki dla całej rodziny BKT ułatwiające dobór bezpiecznika do zadanego celu. Poniżej, na rys. 4.30. przedstawiono przykładowe charakterystyki $t = f(I, l)$ rodziny BKT z topikami o średnicy $d = 0,3$ mm w postaci powierzchni w układzie współrzędnych (I, l, t) . Dla mniejszych średnic, powierzchnie przesuwają się w stronę malejących wartości czasu i prądu. Przyjmując ustalone wartości dla jednej ze zmiennych I, l, t uzyskuje się płaskie wykresy dwóch zmiennych przydatne w doborze, lub konstruowaniu BKT, rys. 4.31. i rys. 4.32. (w związku z tym charakterystyki te nazwano konstrukcyjnymi).



Rys. 4.30. Charakterystyki $t - I$ rodziny BKT z topikami o średnicy $d = 0,3$ mm i różnej długości

Poprzez rzutowanie charakterystyki z rys. 4.30. na płaszczyznę $l - I$ uzyskano zależność prądu wywołującego przetopienie topika w określonym czasie od długości topika.

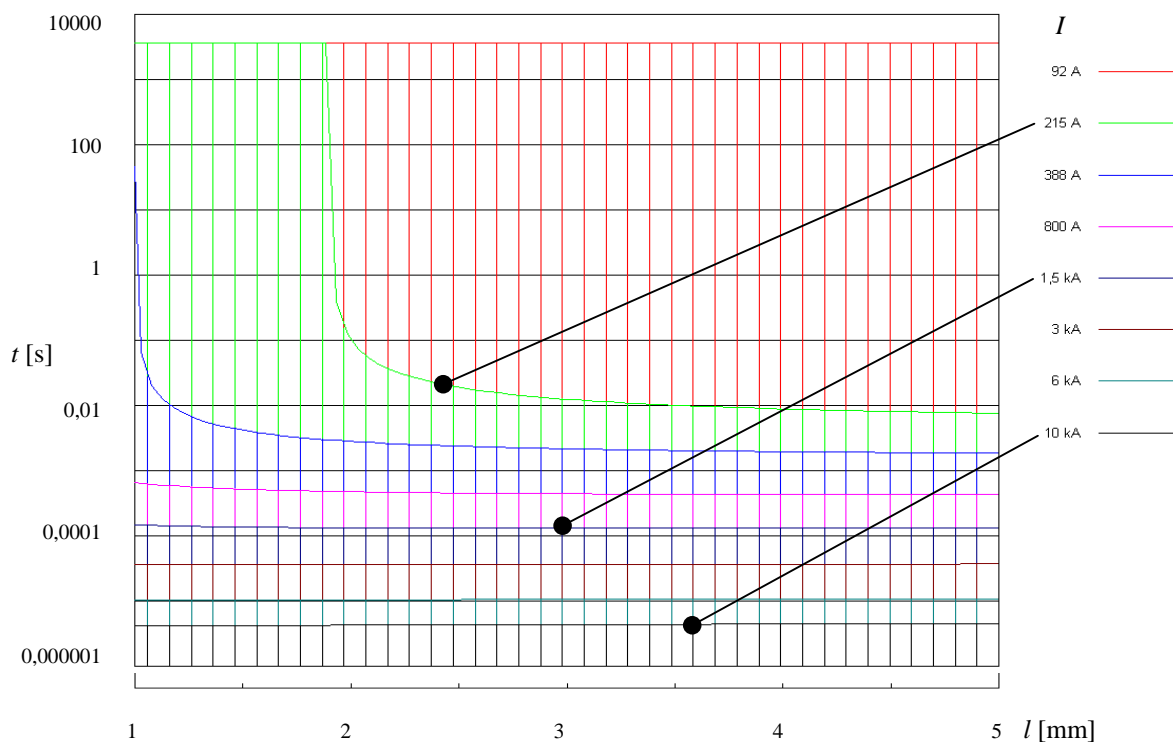


Rys. 4.31. Charakterystyki $l = f(I)$ BKT z topikami o średnicy $d = 0,3$ mm, dla założonych czasów działania $t = \text{const}$.

Np., z charakterystyki przedstawionej powyżej można określić jaka powinna być długość topika, jeśli określony prąd ma spowodować działanie BKT po upływie zadanego czasu. Przyjmując, że prąd 600 A ma spowodować działanie BKT po 1 ms, to z rys. 4.31 wynika, iż potrzebny jest topik o długości 1,5 mm. Dobranie dłuższego topika przyspieszy zadziałanie, ale też zmniejszy prąd graniczny bezpiecznika.

Posługując się powyższymi zależnościami należy także pamiętać o zależności wytrzymałości elektrycznej BKT (po zadziałaniu) od długości topika.

Na rys. 4.32. przedstawiono charakterystyki $t = f(I)$ BKT z topikami o średnicy $d = 0,3$ mm wyznaczone dla wybranych prądów, pomagające dobrać długość topika, gdy znane są prąd i oczekiwany czas działania.

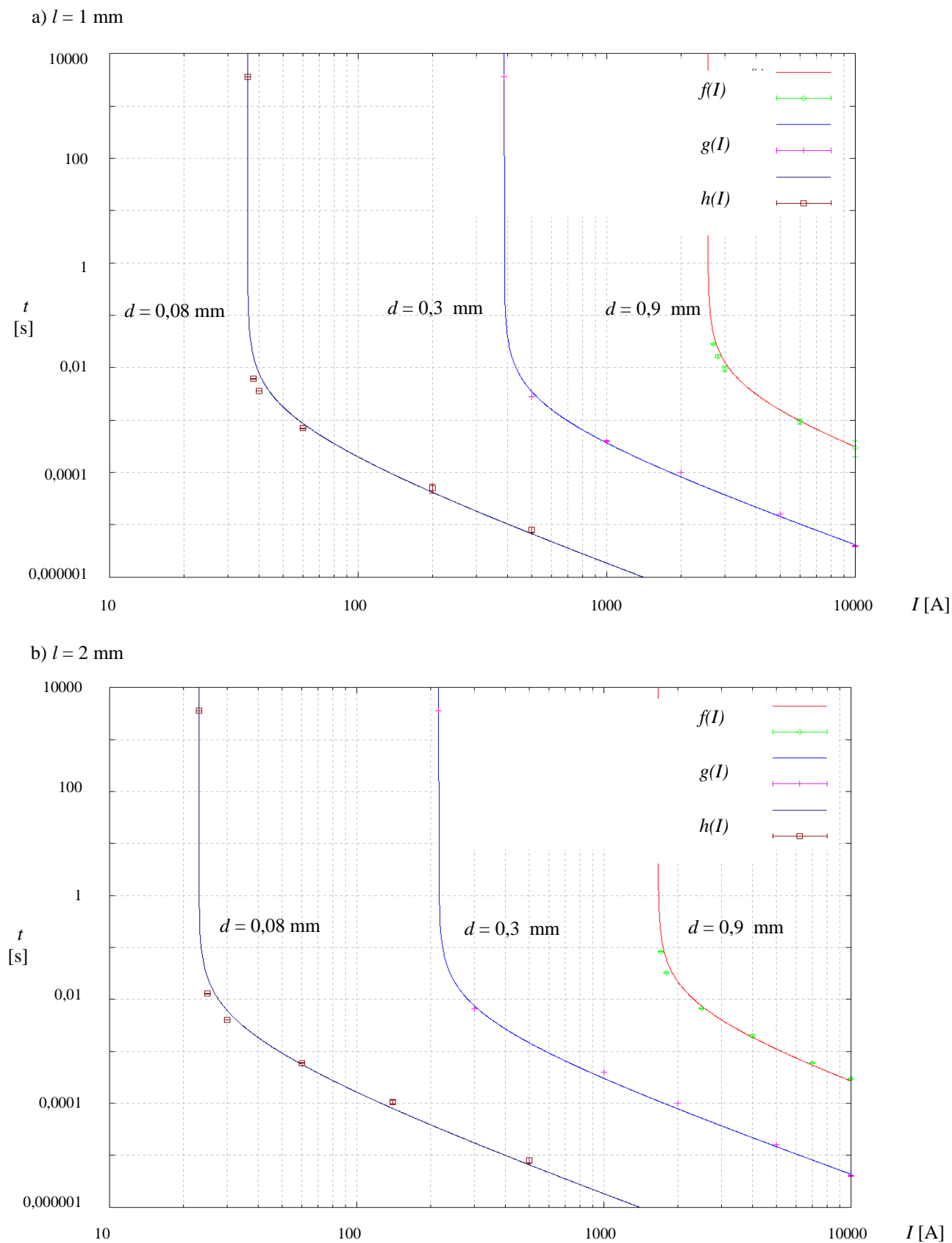


Rys. 4.32. Charakterystyki $t = f(I)$ BKT z topikami o średnicy $d = 0,3$ mm, dla przyjętych prądów wyłączeniowych

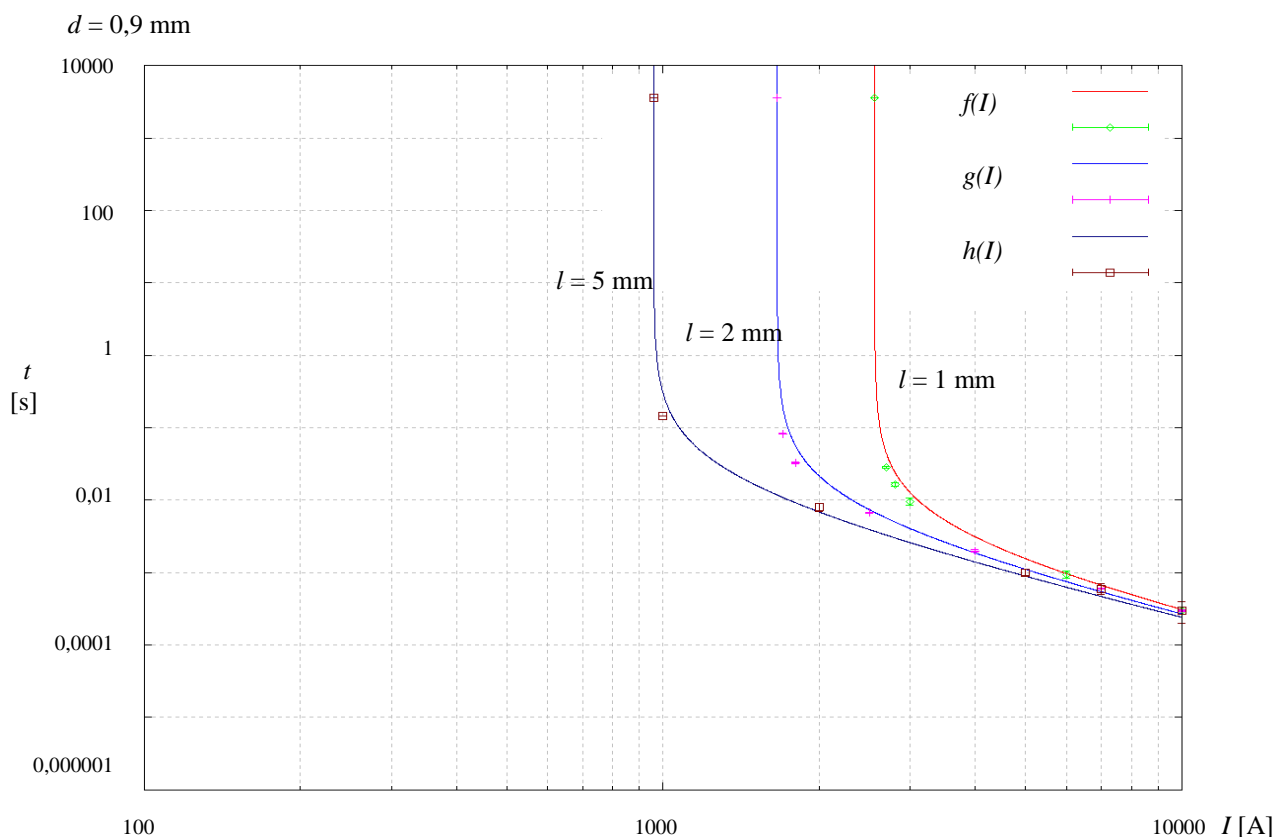
Taki sposób przedstawienia charakterystyki pozwala na określenie jaka powinna być długość topika, aby się przetopił np. dla prądu 215 A w czasie mniejszym od 0,1 s ograniczając w ten sposób energię zwarciovą – topik powinien być dłuższy od 2 mm.

Na rys. 4.33. ÷ 4.35. przedstawiono rodziny charakterystyk $t - I$ dla różnych średnic topika, co umożliwia porównanie wpływu średnicy topika na obciążalność BKT i dobór prądów znamionowych dla zadanej długości topika wynikającej z przyjętego napięcia roboczego. Uwidoczniono na nich wyznaczone punkty charakterystyki $t - I$ oraz aproksymującą je linię. Obliczenia wykonano dla długości $l = 5$ mm, 2 mm, i 1 mm oraz średnic $d = 0,08$ mm, 0,3 mm, 0,9 mm.

Z rys. 4.33. można ocenić zmianę obciążalności BKT przy zmianie średnicy topika, gdy jego długość $l = 1$ mm, 2 mm, lub 5 mm. Widać, że topik krótki ($l = 1$ mm, $d = 0,9$ mm) posiada bardzo dużą dopuszczalną gęstość prądu ($3,9$ kA/mm²), w przypadku konieczności doboru mniejszej obciążalności bezpiecznika można wydłużyć topik lub zmniejszyć jego średnicę. Znając zasadę tworzenia płaszczyzny $t - I$ przedstawioną wyżej, można dobrać funkcję aproksymującą punkty dla czasu 3600 s i w ten sposób zaprojektować bezpiecznik dla określonego prądu i stałej długości np. $l = 1$ mm wynikającej z napięcia układu.

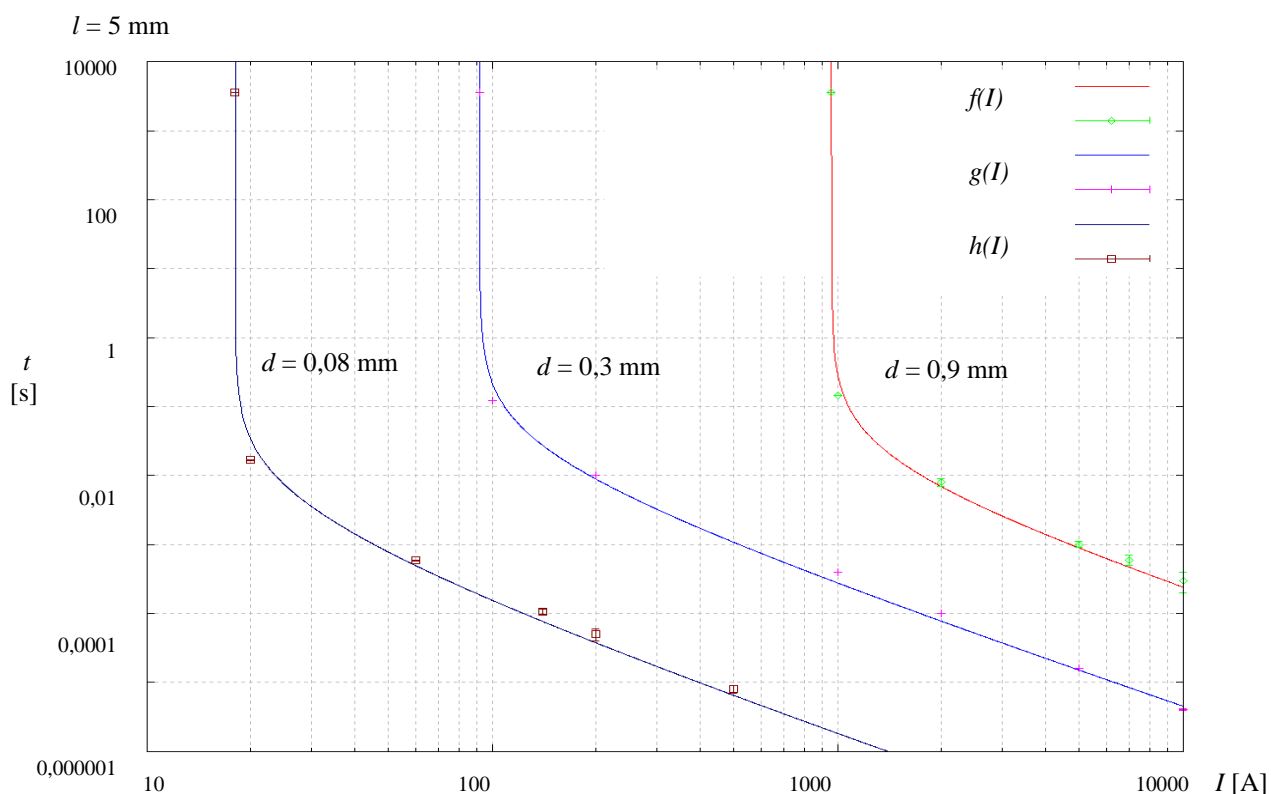


Rys. 4.33. Wpływ średnicy topika na obciążalność BKT przy stałej długości $l = \text{const}$. a) $l = 1 \text{ mm}$, b) $l = 2 \text{ mm}$



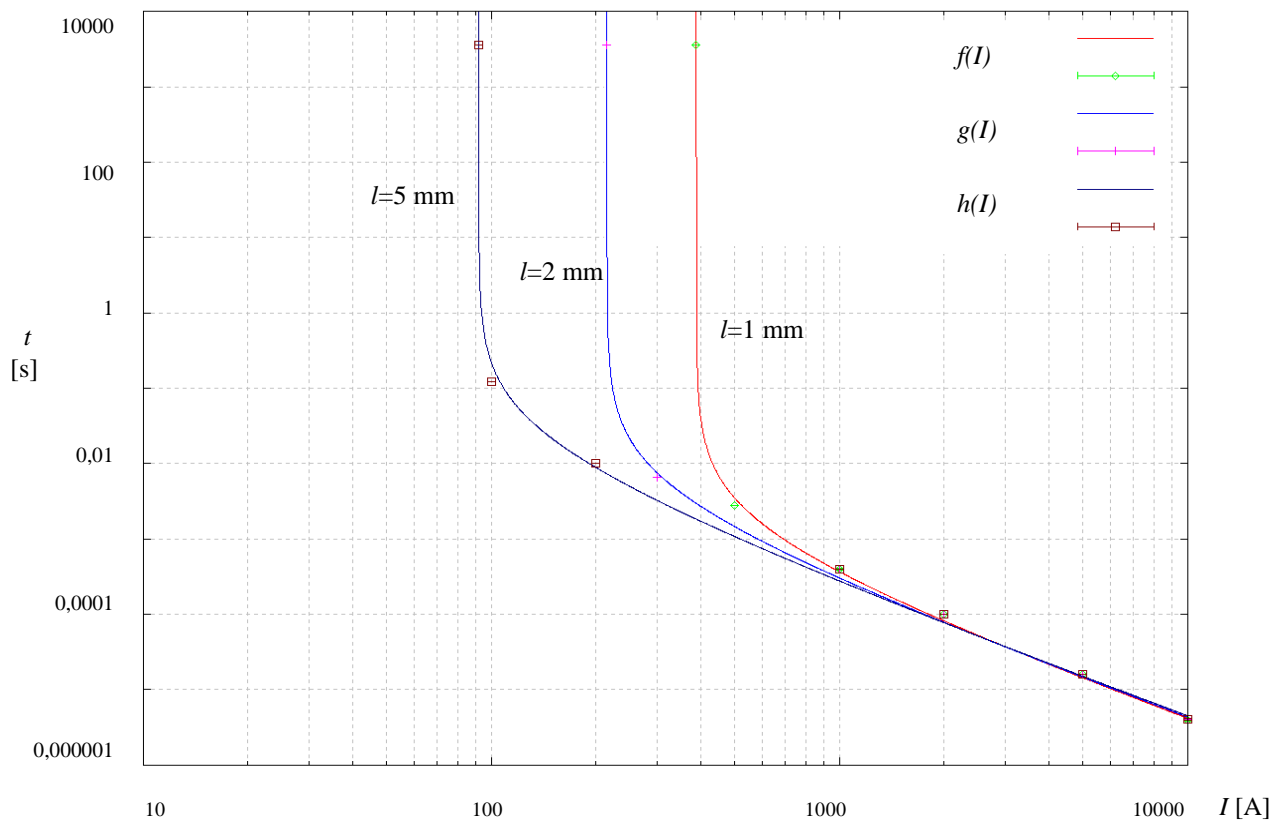
Rys. 4.34. Wpływ długości topika na obciążalność przy stałej średnicy $d = \text{const}$.

Kolejnym przedstawieniem zależności $t - I$ jest przedstawienie jak zmieniała się obciążalność topika w zależności od długości dla stałych średnic $d = 0,9; 0,3; 0,08 \text{ mm}$.

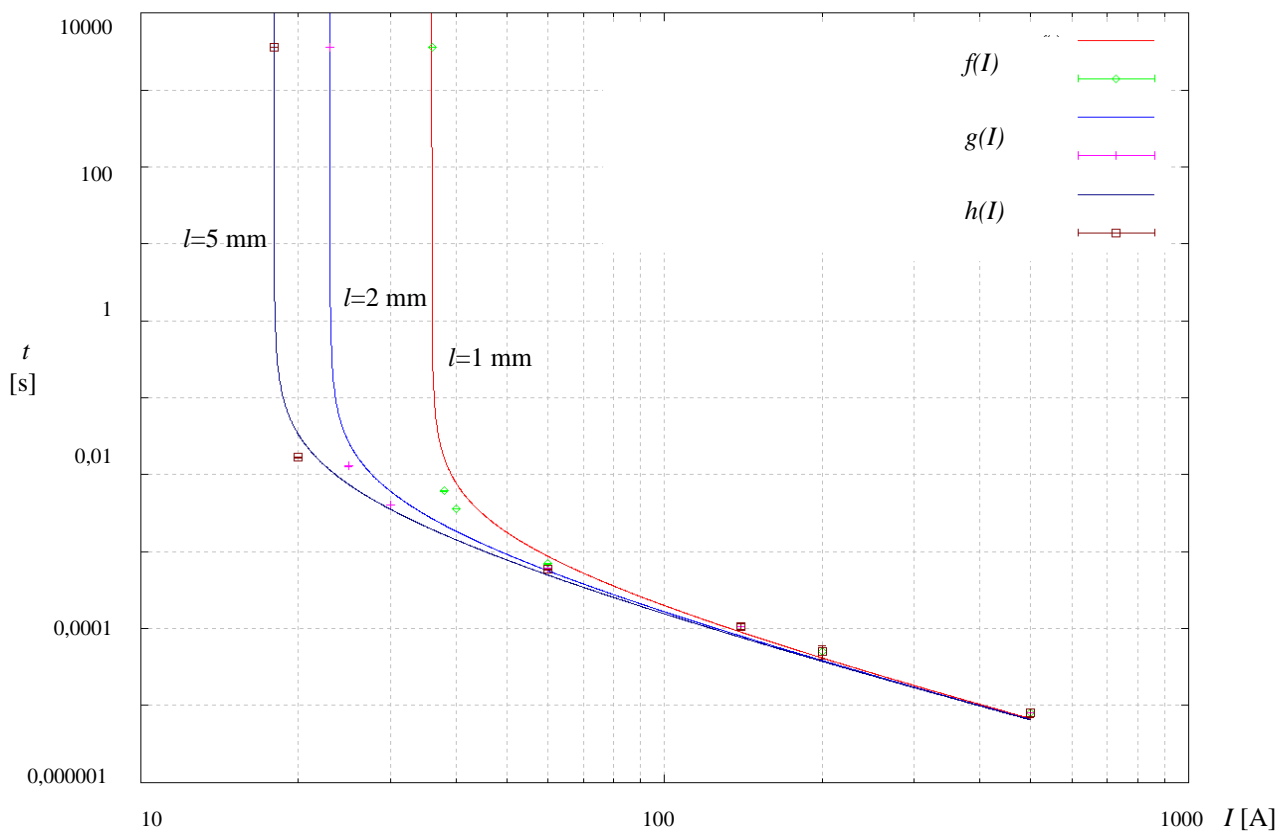


Rys. 4.35. Wpływ średnicy topika na obciążalność BKT przy stałej długości $l = 5 \text{ mm}$

a) $d = 0,3 \text{ mm}$



b) $d = 0,08 \text{ mm}$



Rys. 4.36. Wpływ długości topika na obciążalność BKT przy stałej średnicy $d = \text{const.}$ a) $d = 0,3 \text{ mm}$, b) $d = 0,08 \text{ mm}$

Widać, że dla prądu większego od pewnej, zależnej dla danej średnicy wartości, szybkość zadziałania wkładki nie zależy od długości topika, a tylko od wartości prądu. Jest to związane z adiabatycznym nagrzewaniem szczególnie charakterystycznym dla BKT w warunkach zwarcia. Jest to pewne ograniczenie przy dobieraniu szybkości zadziałania BKT poprzez dobór długości topika.

4.5.2. Wpływ intensywności chłodzenia na charakterystykę $t - I$ BKT

Obliczenia charakterystyk $t - I$ w pkt. 4.5.1. były dokonane z założeniem idealnego chłodzenia tj. z ustaleniem niezmiennej temperatury 20 °C na okuciu BKT. Poniżej sprawdzono, jak intensywność chłodzenia wpływa na kształt charakterystyki $t - I$, czyli jaki będzie jej przebieg przy uwzględnieniu rzeczywistych warunków chłodzenia. Porównanie wykonano dla topika o długości $l = 1$ mm i średnicy $d = 0,3$ mm. Aby zmiany były widoczne obliczenia wykonano dla takiego rozwiązania chłodzenia w którym $R_{th\ r-a} = 0,4$ [K/W] (rys. 4.23). Charakterystyka $t - I$ jest ograniczona dwoma asymptotami: prądu granicznego i nagrzewania adiabatycznego wyznaczonej z równania Meyera.

Na rys. 4.37. przedstawiono zmianę przebiegu charakterystyki $t - I$ BKT w zależności od jego chłodzenia. Wraz ze spadkiem intensywności chłodzenia, co ma miejsce w przypadku rzeczywistym, zwiększa się też termiczna rezystancja przejścia pomiędzy okuciem chłodzącym BKT a otoczeniem. Powoduje to przesunięcie asymptoty określającej prąd graniczny topika. W idealnym przypadku prąd graniczny BKT wynosił 388 A, a w przypadku rzeczywistym spadał do 350 A. Z kolei dla dużych wartości prądu chłodzenie zewnętrzne nie ma istotnego wpływu na charakterystykę, bowiem cała wytworzona w topiku energia cieplna wcześniej spowoduje jego przetopienie niż zostanie oddana do otoczenia. Jest to przypadek nagrzewania adiabatycznego zaznaczony asymptotą M. Charakterystyka BKT bardzo stromo przechodzi od prądu granicznego do krzywej Meyera i można uznać, że jest to jego cechą charakterystyczną.

Asymptotę M wyznaczono ze wzoru (4.14), a obliczone wartości zestawiono w tab. 4.7.

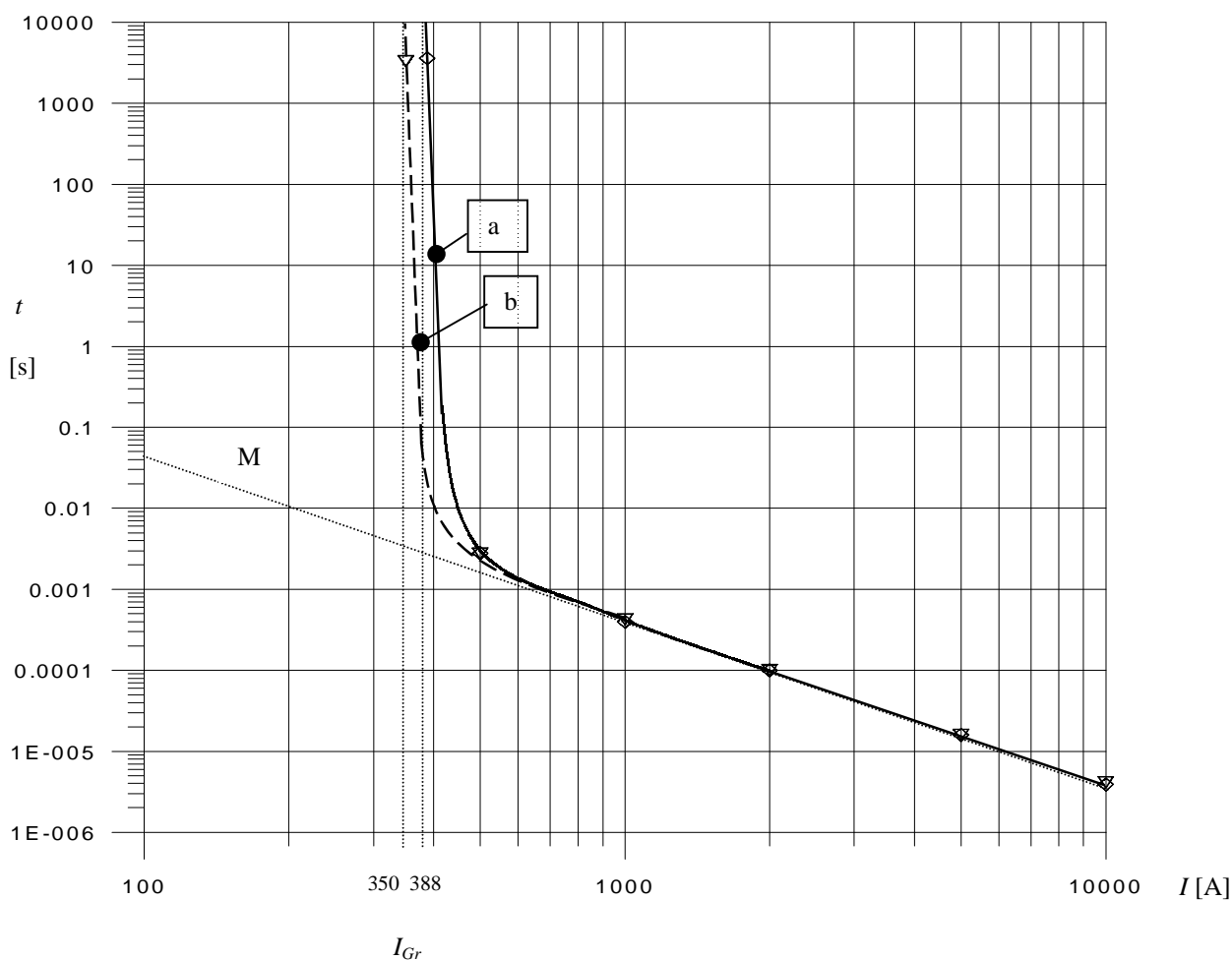
$$\int_0^{t_p} i^2 dt = S_Z^2 K_m = 490 [A^2s] \quad (4.14)$$

gdzie: S_Z – przekrój zwarciovowy topika wynoszący 0,07 [mm²],

K_m – stała Meyera wynosząca dla miedzi 10⁵ [A²s/mm⁴]

Tab. 4.7 Zestawienie wartości obliczonych z równania 4.14

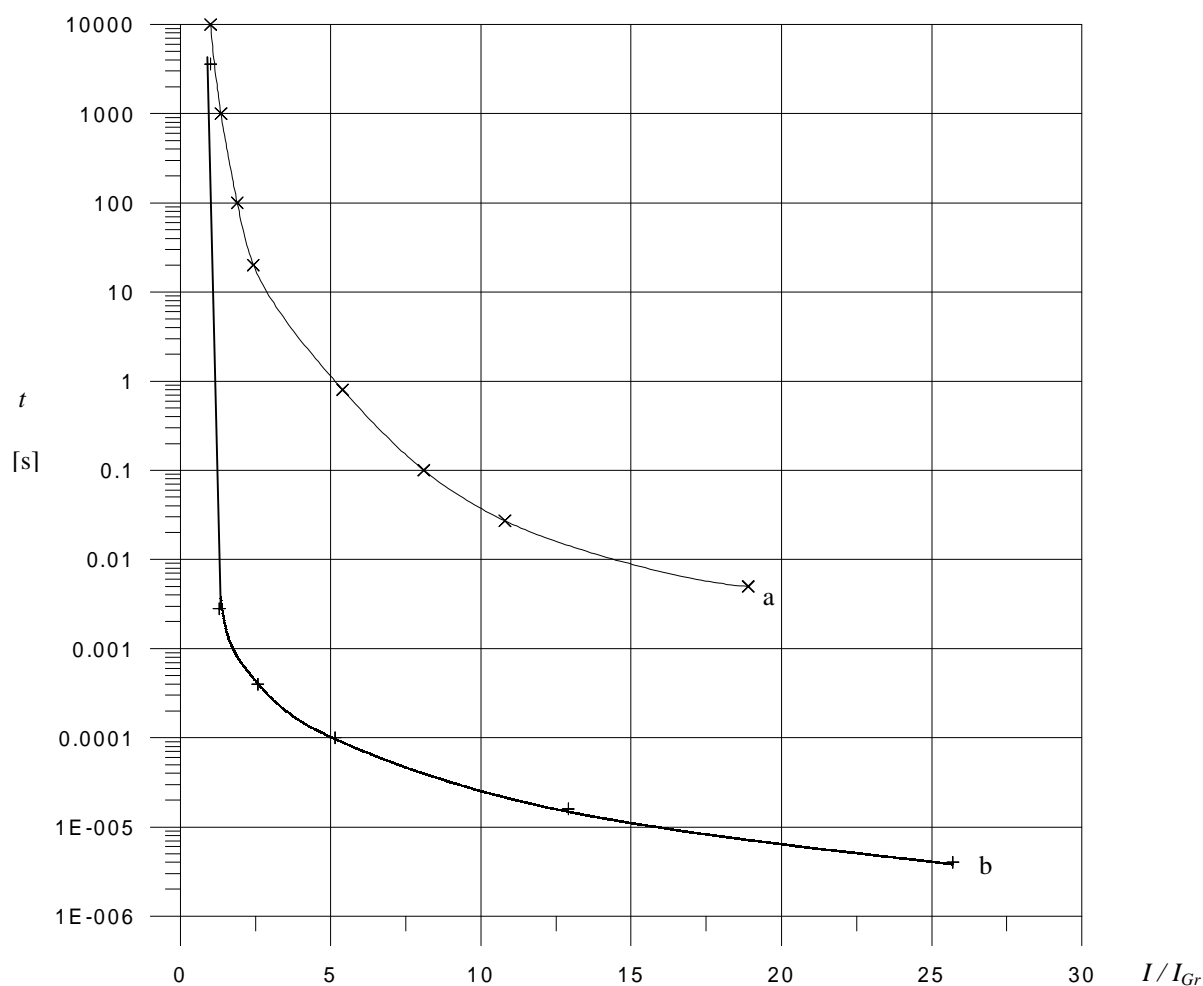
Lp.	$\int i^2 dt$	t	I
	A^2s	s	kA
1	490	0,049	0,1
2		490μ	1
3		$4,9\mu$	10



Rys. 4.37. Porównanie przebiegu charakterystyki $t - I$ dla: a – stałej temperatury na powierzchni styków i $R_{th\ r-a} = 0$ K/W, b – przy utrudnionym przepływie ciepła do otoczenia dla warunku rzeczywistego chłodzenia $R_{th\ r-a} = 0,4$ K/W. Na wykresie oznaczono asymptoty dla prądu granicznego oraz asymptotę M wyznaczoną z równania Meyera

4.6. Porównanie znormalizowanych charakterystyk $t - I$ BKT oraz bezpiecznika klasycznego

Główną zaletą BKT jest charakterystyka $t - I$. Jej kształt wynika z odprowadzania ciepła z topika BKT i bardzo szybko przechodzi pomiędzy asymptotą wynikającą z odprowadzenia ciepła w stanie ustalonym, a asymptotą nagrzewania adiabatycznego. Takiego bezpiecznika praktycznie nie można przeciążyć. Dla bezpiecznika mocy znaczący jest wpływ chłodzenia promieniowego przez korpus wkładki. Na przebiegu charakterystyki objawia się to znaczną w stosunku do BKT przeciążalnością i wydłużeniem czasów zadziałania bezpiecznika. Aby pokazać różnicę pomiędzy bezpiecznikami, porównano charakterystyki BKT (dla długości topika $l = 1\text{ mm}$ z rys. 4.27) z bezpiecznikiem gG NH 250 A firmy FS. Bezpieczniki dobrano ze względu na bardzo zbliżony prąd graniczny, który dla BKT wynosił 388 A, a bezpiecznika mocy ok. 370 A. Charakterystyki znormalizowano odnosząc prąd obciążenia do prądu granicznego (rys. 4.38). Z wykresu widać, że BKT jest o co najmniej 3 rzędy wielkości szybszy od zwykłego bezpiecznika o tym samym prądzie granicznym.



Rys. 4.38. Charakterystyki $t = I/I_{Gr}$: a) bezpiecznika (gG NH 250A, $I_{Gr}=370\text{A}$) firmy FS, b) BKT ($l = 1\text{ mm}$, $d = 0,3\text{ mm}$, $I_{Gr}=388\text{A}$)

5. Wytrzymałość powrotna BKT

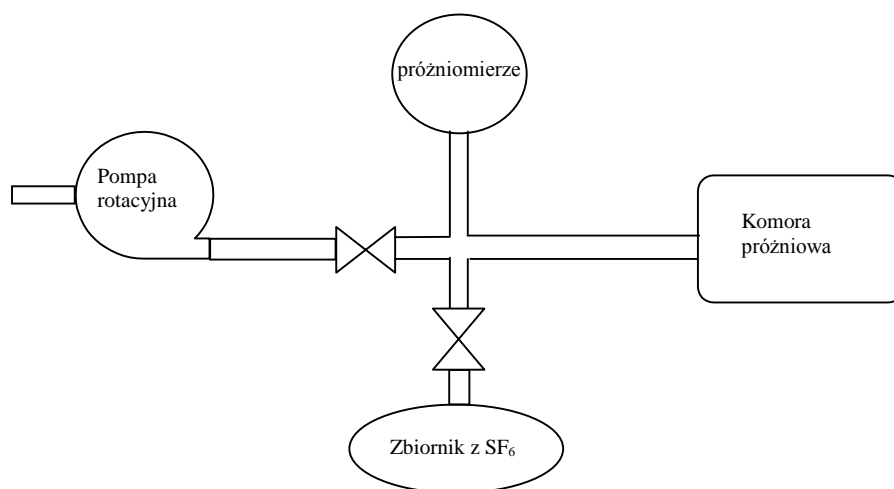
Na przerwie powstałej po wytopieniu topika występuje napięcie powrotne. W klasycznych zastosowaniach bezpiecznika napięcie to jest narzucone przez obwód elektryczny w którym jest zainstalowany bezpiecznik. W przypadku szybkiego zadziałania takiego bezpiecznika powstające na nim napięcie może, ze względu na indukcyjności obwodu, osiągać znaczne wartości. Warunki pracy BKT różnią się od klasycznego bezpiecznika tym, że po zadziałaniu BKT zostaje włączony równoległy tranzystor IGBT ograniczający napięcie na bezpieczniku do kilku woltów. Dzięki włączeniu tranzystora prąd przestaje płynąć przez plazmę, co powoduje zanik strat mocy w plazmie i możliwość traktowania plazmy jako ochładzający się gaz. Po ostygnięciu par metalu poniżej 3000 K BKT musi wytrzymać napięcie statyczne obwodu elektrycznego. W rozdziale opisano zjawiska, które następują w BKT po przetopieniu się topika i są istotne dla ogranicznika prądu, czyli odpowiedzialne za wytrzymałość statyczną oraz dynamiczną związaną ze stygnięciem plazmy. Przedstawiono propozycję metody obliczania czasu wytapiania się topika, która daje możliwość określenia czasu (t_1) opóźnienia włączenia tranzystora IGBT. Przedstawiono metodę wyliczenia czasu ochładzania się plazmy, co jest potrzebne do określenia czasu włączenia (t_2) tranzystora IGBT. Znajomość czasów t_1 i t_2 umożliwi przewidywanie czasu najszybszego ograniczenia prądu zwarciovego przez ogranicznik prądu. Wartości obliczonych czasów t_1 i t_2 potwierdzono przez wykonanie eksperymentów. Celem przedstawionych poniżej obliczeń było nie tyle zbudowanie pełnego matematycznego opisu zjawisk dynamicznych zachodzących w procesie przetapiania się topika, co zbudowanie łatwej do zastosowania i potwierdzonej eksperymentem metody określania czasów t_1 i t_2 .

5.1. Określenie wytrzymywanego napięcia przerwy międzystykowej

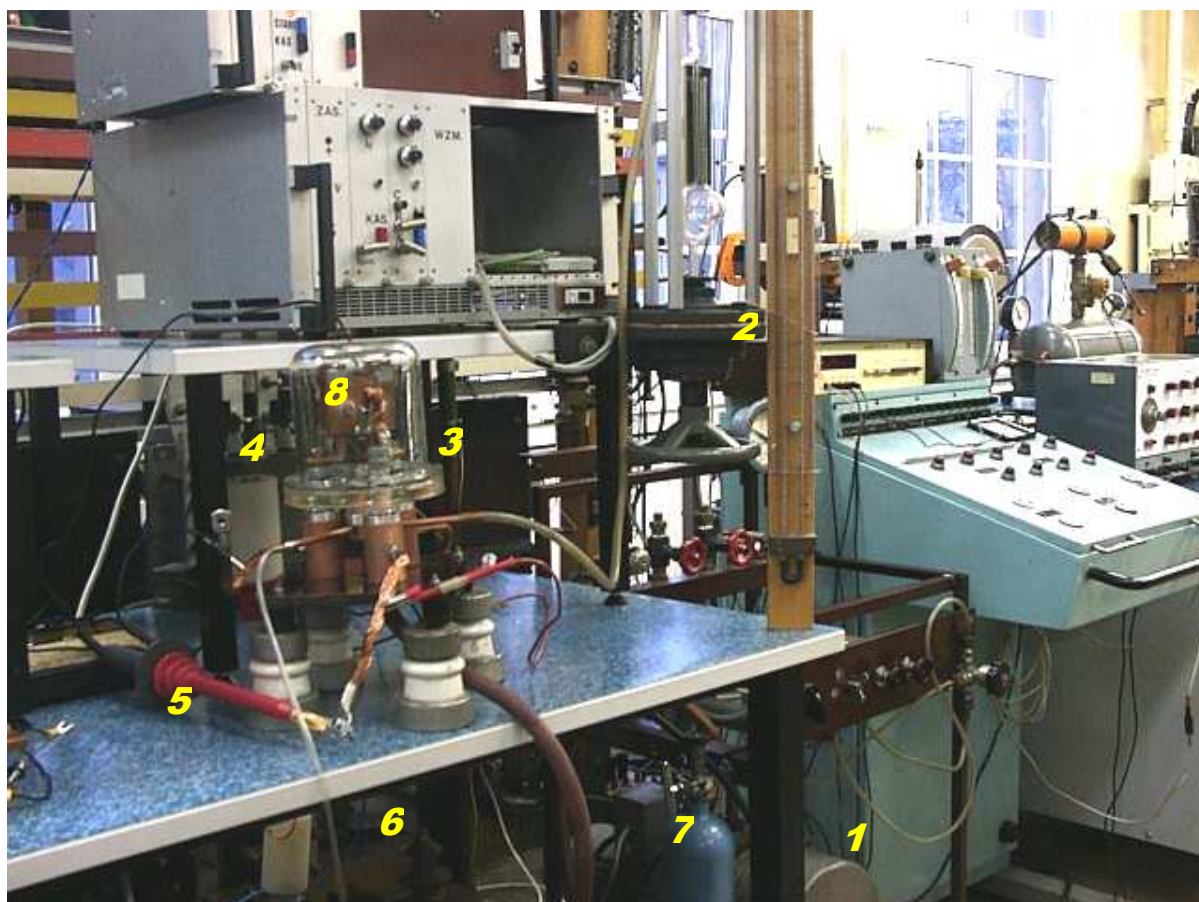
Topik w BKT posiada pewną obciążalność długotrwałą i wynikającą z niej określoną długość. Drugim wymaganiem dla długości topika jest, aby szczelina powstała po jego wytopieniu wytrzymała napięcie powrotne zabezpieczonego obwodu. Tak więc wymaganie napięciowe wymusza zastosowanie minimalnej długości topika. Do określenia znamionowych warunków pracy BKT potrzebne jest określenie jego statycznej wytrzymałości napięciowej po przetopieniu topika. Pomiarów dokonano w powietrzu oraz dla porównania w komorze próżniowej wypełnionej gazem SF₆.

5.1.1. Opis modelu BKT dla statycznych prób napięciowych

Do przeprowadzenia potrzebnych pomiarów potrzebne było umieszczenie BKT w szczelnej komorze probierczej. Zbudowano stanowisko [21] wyposażone w komorę probierczą, którego schemat przedstawiono na rys. 5.1. Korpus komory wykonano ze szkła uszczelnionego na przepustach uszczelkami z gumy próżniowej, a w miejscu łączenia klosza z podstawą, smarem próżniowym. Ciśnienie mierzono próżniomierzem U-rurkowym, a dla małych ciśnień próżniomierzem kompresyjnym McLeoda. Do przeprowadzenia prób z bezpiecznikiem krótkotopikowym w warunkach innych środowisk gazowych niż powietrze użyto SF₆. Podczas pomiarów komora została odpompowana i „przepłukana” kilkukrotnie sześćiofluorkiem siarki. Do pomiaru wytrzymałości napięciowej przerwy powstałej po zadziałaniu bezpiecznika zbudowano układ probierczy wysokiego napięcia (rys. 5.4). W układzie zastosowano pompę rotacyjną która umożliwiała uzyskanie próżni na poziomie 100 Pa.



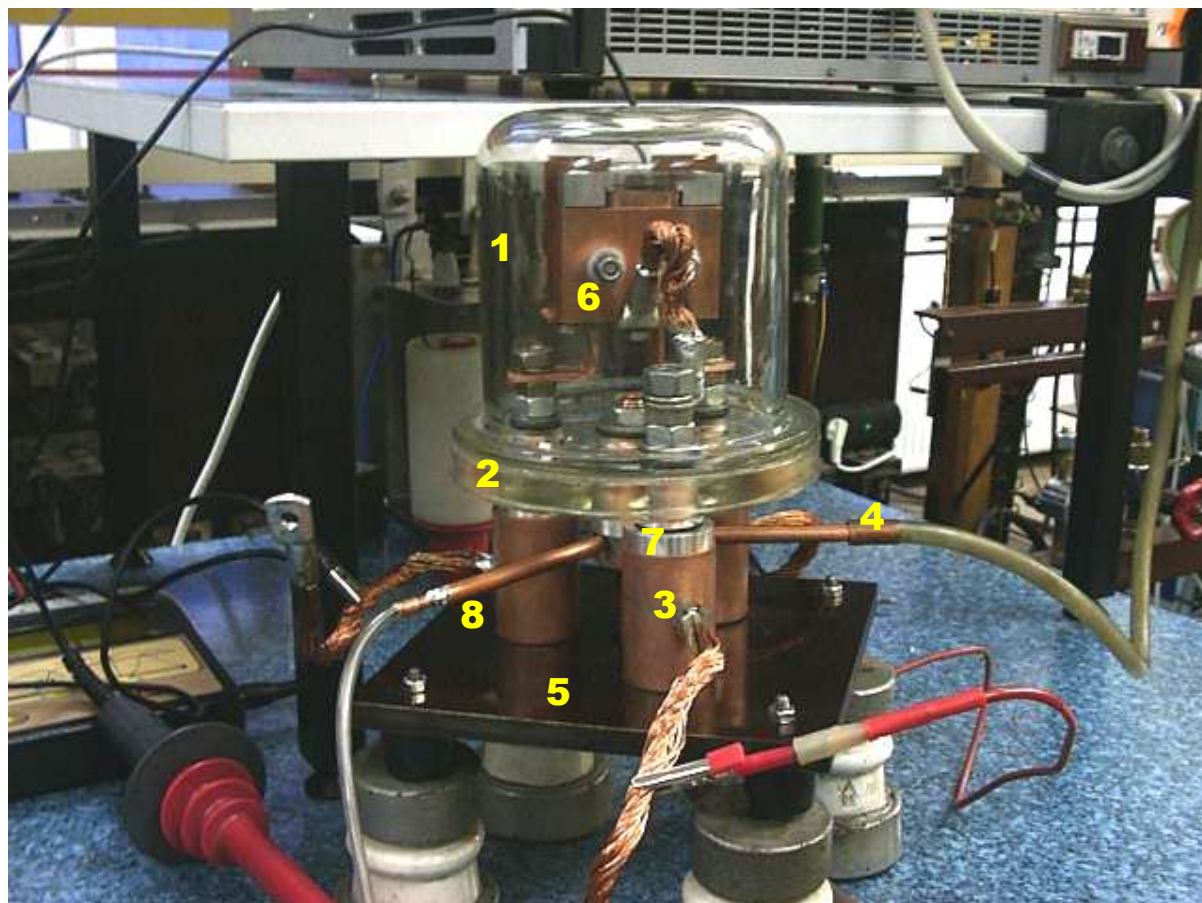
Rys. 5.1. Schemat stanowiska próżniowego



Rys. 5.2. Stanowisko próżniowe: 1 – pompa rotacyjna, 2 – próżniomierze U – rurkowy i kompresyjny, 3 – klosz próżniowy, 4 – kondensator i rezystor ograniczający z układu probierczego WN, 5 – pomiarowa sonda napięciowa, 6 – transformator WN, 7 – zbiornik z SF₆, 8 – BKT

5.1.2. Komora próżniowa

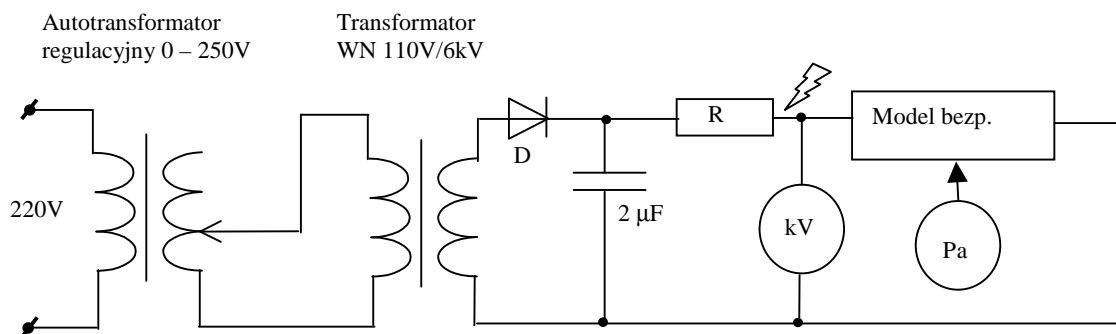
Założeniem eksperymentu było sprawdzenie wpływu atmosfery na wytrzymałość przerwy po stopionym topiku. W związku z tym komora próżniowa miała pomieścić zaciski topika, być łatwa do rozłożenia i szczelna. Komorę wykonano przez adaptację szklanego reaktora z docieranym kloszem [46] (załącznik 4) do którego dorobiono przepusty prądowe, podstawę, króćce do pompy próżniowej i próżniomierzy. Wewnątrz umieszczono okucie umożliwiające zamocowanie topika krótkiego. Klosz szklany i połączenia były uszczelnione smarem próżniowym (Dow Corning). Przepusty prądowe uszczelniono uszczelkami z gumy próżniowej. Dzięki takiemu rozwiązaniu komora uszczelniała się pod wpływem ciśnienia atmosferycznego a po wykonaniu próby łatwo było ją otworzyć. W trakcie prób sprawdzano temperaturę otoczenia i kontrolowano szczelność komory poprzez pomiar próżniomierzami. Wykonano 3 h próbę szczelności i stwierdzono, że ciśnienie w komorze nie zmieniło się więcej niż 2 % ciśnienia pierwotnego, samo wykonanie próby trwało kilka minut i w tym czasie nie rejestrowano zmiany ciśnienia.



Rys. 5.3. Komora próżniowa, 1 – klosz docierany średnica zewnętrzna 160 mm, 2 – podstawa klosza, 3 – wyprowadzenie prądowe, 4 – wylot do próżniomierzy, 5 – podstawa, 6 – okucie BKT, 7 – pierścień z uszczelką próżniową, 8 – wlot SF₆

5.1.3. Pomiary długotrwałej wytrzymałości napięciowej

Układ probierczy, którego schemat przedstawiono na rys. 5.4 umożliwiał sprawdzanie wytrzymałości przerwy w topiku napięciem stałym do 6,5 kV. Do źródła wysokiego napięcia dołączono szeregową rezystancję R o wartości około 60 MΩ w celu ograniczenia prądu do wartości 100 μA. Ograniczenie prądu było potrzebne, aby po przebicium przerwy nie nadtopić ostrza powstałego po topiku (co istotnie wpłynęłoby na powtarzalność pomiarów) i dzięki temu można było wykonać serię pomiarów. Badana przerwa wynosiła 0,5 mm i po przetopieniu topika była w układzie ostrzowym (rys. 5.26).



Rys. 5.4. Schemat układu probierczego do badania wytrzymałości napięciowej przerwy w topiku

W trakcie pomiarów porównano statyczną wytrzymałość napięciową przerwy powstałej po rozpadzie topika w atmosferze SF₆ i w powietrzu. Szczelina powstała po przetopieniu topika wynosiła 0,5 mm. Uśredniona wytrzymałość przerwy dla napięcia stałego w powietrzu wynosiła 1830 V. Dla porównania komorę napełniono gazem SF₆ i tak obniżano jego ciśnienie aby przebicie nastąpiło przy napięciu 1830 V. Wartość ciśnienia gazu SF₆ dla którego nastąpiło przebicie wynosiła 292 hPa to jest 3,36 razy mniej niż początkowe ciśnienie powietrza. Wytrzymałość statyczna dla SF₆ i przerwy 0,5 mm przy założeniu ciśnienia atmosferycznego powinna więc wynosić 5 do 6 kV. W wyniku pomiarów można wnioskować, że bezpiecznik wypełniony SF₆ pod ciśnieniem atmosferycznym mógłby posiadać napięcie znamionowe 1 kV przy uwzględnieniu przepięć i bezpiecznego zapasu.

Tab. 5.1 Porównanie napięcia przeskoku dla powietrza i SF₆ dla temp. otoczenia 21 °C

Lp.	atmosfera	szczelina $l = 0,5$ mm	
		983 hPa *	292 hPa
1	powietrze	1,83 kV	nie mierzono ze względu na obniżoną wytrzymałość napięciową takiego przypadku
2	SF ₆	6,1 kV	1,83 kV

* - Jest to zmierzona wartość ciśnienia atmosferycznego podczas próby

Dzięki użyciu SF₆ można dopuścić mniejszą długość topika (większą obciążalność) przy jednoczesnym zachowaniu wymagań napięciowych. Zgodnie z wynikami obliczeń charakterystyk $t - I$, BKT posiada odpowiednią obciążalność dla topika o długości 1 mm. Wytrzymałość przerwy po całkowitym wytopieniu topika wynoszącej ok. 1 mm jest stosunkowo duża ze względu na małe prawdopodobieństwo wystąpienia elektronów przy elektrodzie [17]. W trakcie pomiarów nie zaobserwowano istotnych różnic obciążeń długotrwałych dla krótkiego topika w stosunku do atmosfery z powietrzem ze względu na mały wpływ chłodzenia przez konwekcję.

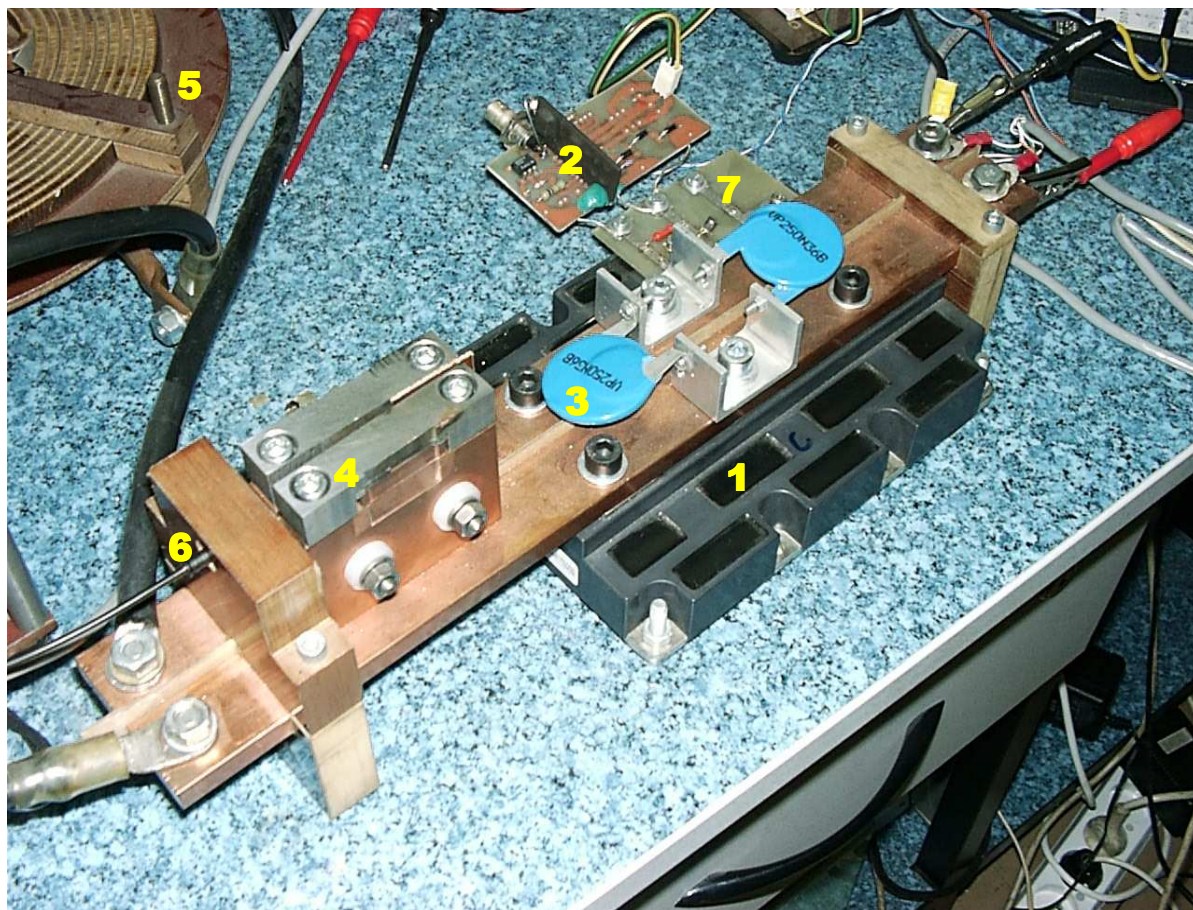
5.2. Określenie czasu rozpadu topika

Jednym z ważniejszych parametrów BKT jest czas rozpadu topika. Uważa się, że w BKT nie może nastąpić klasyczny rozpad topika [40] ze względu na bardzo nierównomierny rozkład temperatury (rys. 4.25). W takim przypadku topik rozpada się poprzez wytapianie od punktu środkowego w kierunku okuć wkładki. Powstaje łuk elektryczny, który jest niezbędny do wytopienia odpowiedniej szczeliny w topiku. Jednak powyższe zjawiska trwające zbyt długo są niekorzystne ze względu na szybkość ograniczania prądu zwarciovego i nadtopienie okuć BKT. W przypadku klasycznego bezpiecznika łuk elektryczny wytapia topik na długości niezbędnej do uzyskania wytrzymałości napięciowej przekraczającej pojawiające się napięcie powrotne. W komorach wyłączników rozchodzenie się styków ma prowadzić też do wydłuzenia i zgaszenia łuku. W obu tych rozwiązaniach gaszenie łuku następuje samorzutnie w określonym czasie kiedy łuk osiągnie odpowiednią długość.

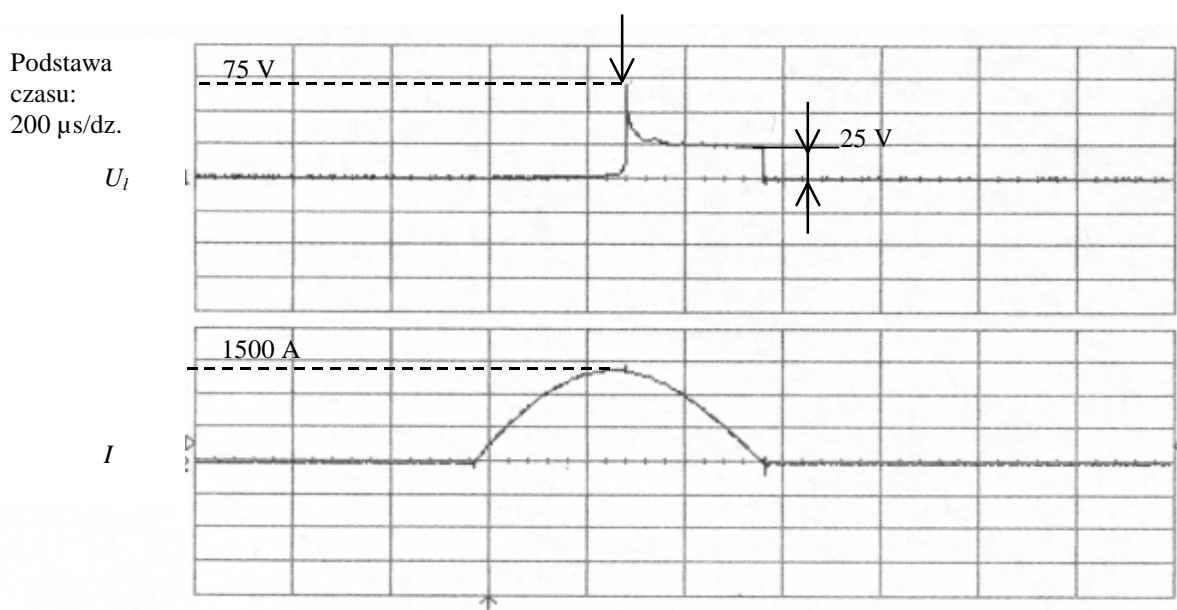
Do określenia warunków pracy CHCL potrzebna jest znajomość minimalnego czasu łukowego t_l zapewniającego całkowite wytopienie się topika, który będzie następnie odmierzanym przez układ sterowania tranzystorem. Dla określenia czasu t_l wykonano pomiary, których wyniki następnie posłużyły do sprawdzenia metody obliczeniowej opisującej wytapianie się topika. Badania wykonano wykorzystując układ ogranicznika z równoległym tranzystorem (rys. 3.1). Pomiary polegały na włączeniu tranzystora IGBT po założonym czasie i następnie na obserwacji rozmiarów obszaru wytopionego w topiku. Modelowanie wytapiania polegało na sprawdzeniu zasadności przyjętych na podstawie tezy założeń, czyli na założeniu, że do poprawnego modelowania BKT wystarczy uwzględnić tylko osiowe przewodzenie ciepła. Następnie porównano tak uzyskane wyniki obliczeń z pomiarami.

5.2.1. Pomiary i wyniki czasu wytapiania topika

Pomiary czasu rozpadu topika wykonano w układzie CHCL, którego schemat przedstawiono na rys. 3.1. a widok na rys. 5.5. Jako źródła energii E użyto kondensatora $C = 400 \mu\text{F}$ ładowanego do 660 V. Amplituda uzyskanego wówczas prądu wynosiła 1500 A. Pomiary wykonano przetwornikiem LEM o przekładni 4 V/1 kA. Do badań użyto topika o przekroju $0,1 \text{ mm}^2$ o długości 1 mm. Napięcie na topiku mierzono sondą napięciową 1:50 z wejściem polowym. Wykorzystano tranzystor IGBT na napięcie 1200 V i prąd 2400 A [28]. Przed pomiarami dokonano skalowania układu, podczas którego ustawiono amplitudę prądu probierczego 1500 A. W trakcie skalowania układu nie włączano tranzystora IGBT i w takim przypadku palący się łuk powodował wytapianie topika tak długo, dopóki prąd łuku nie osiągnął zera (rys. 5.6).

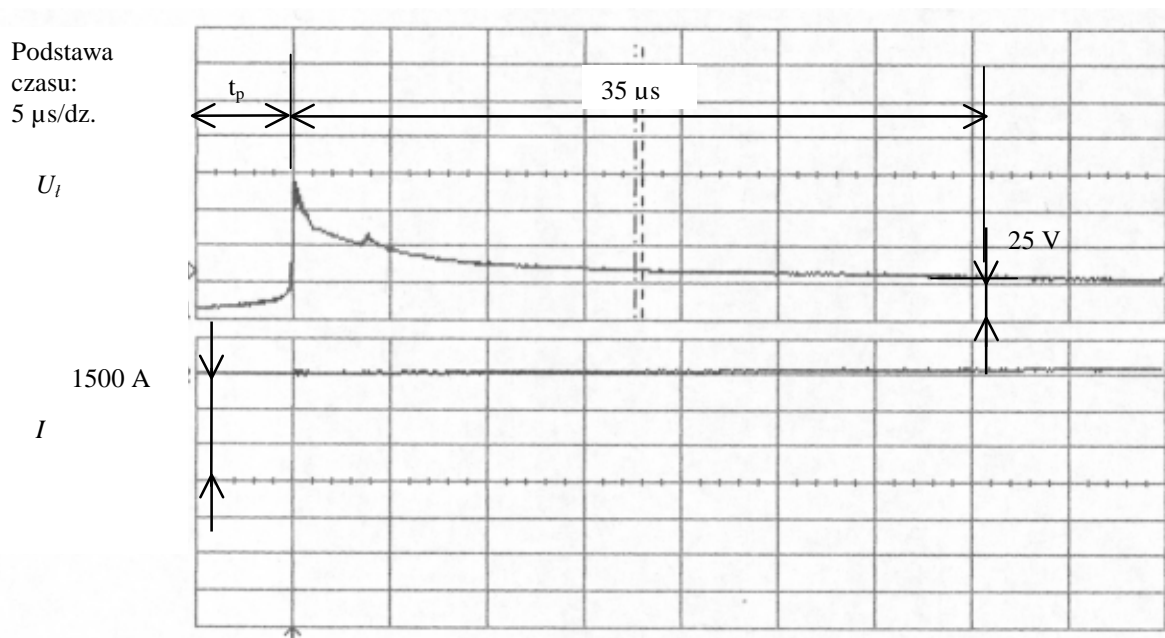


Rys. 5.5. Ogranicznik prądu użyty w układzie szybkiego mostkowania topika, 1 – tranzystor IGBT, 2 – driver tranzystora, 3 – warystory, 4 – zaciski topika, 5 – dławik do regulacji półfali prądu, 6 – światłowód, 7 – układ zabezpieczenia bramki tranzystora przed przebiegami



Rys. 5.6. Napięcie łukowe i prąd w funkcji czasu: na rysunku zaznaczono napięcie łukowe 25 V, a pionową strzałką napięcie w momencie rozpadu topika

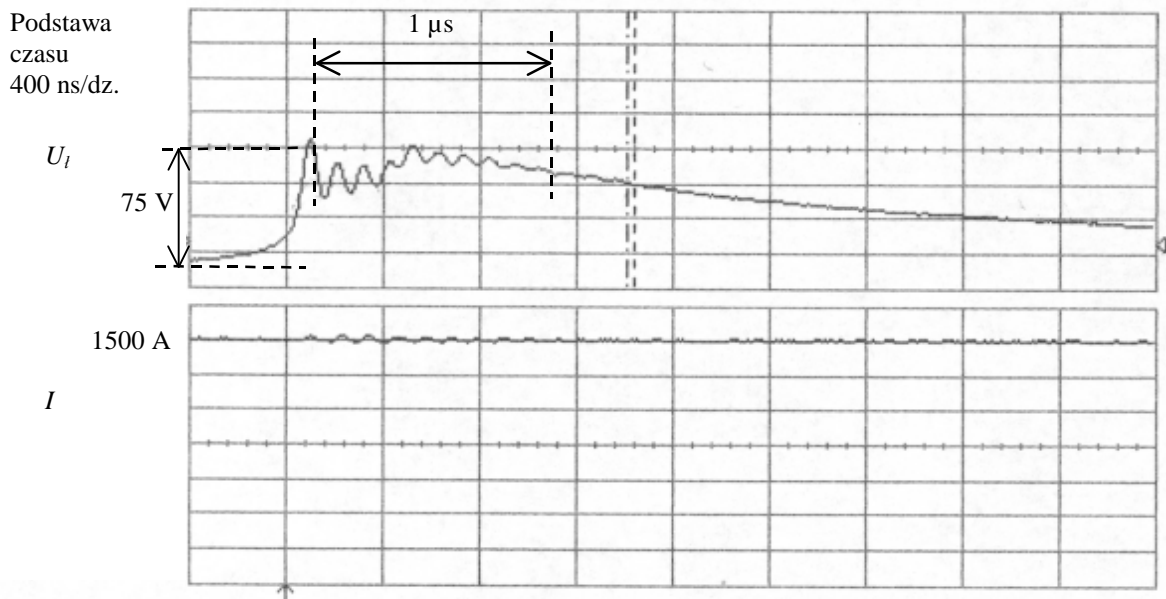
Impuls napięcia widoczny na rys. 5.6. jest wynikiem wzrostu napięcia na mostku (rys. 5.11. b) w topiku powstałego tuż przed jego przetopieniem, palący się łuk następnie ograniczał spadek napięcia do 25 V. Do pomiaru czasu wytapiania topika, w kolejnych próbach rejestrowano sam moment jego rozpadu (na rys. 5.7. powiększono obszar zaznaczony strzałką z rys. 5.6).



Rys. 5.7. Powiększony oscylogram dla czasu rozpadu topika: strzałką oznaczono czas wytapiania topika 35 μs do chwili osiągnięcia przez łuk napięcia 25 V bliskiego ustalonej wartości; t_p – czas przedłukowy podczas którego następuje wzrost napięcia na topiku przed jego rozpadem; rozpad następuje dla praktycznie niezmienniej wartości prądu 1500 A

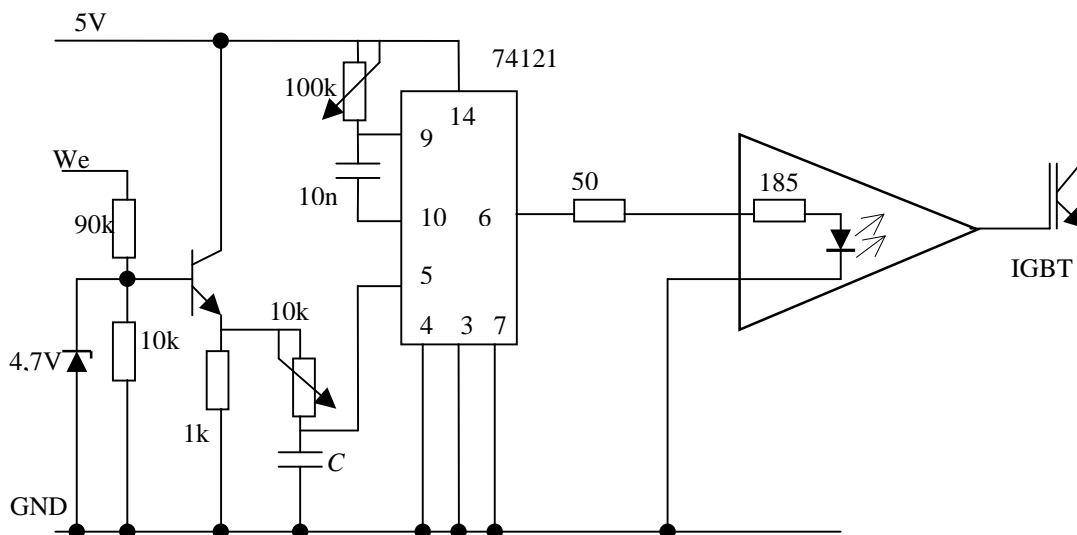
Na rys. 5.7. widać, że czas wytapiania topika wynosi ok. 35 μs tj. czas od impulsu napięcia do osiągnięcia stałej wartości napięcia łukowego 25 V. Przy czym widać, że wytapianie i rozpad następuje tak szybko, że prąd topika posiada praktycznie stałą wartość równą 1500 A. Ta obserwacja pozwala w obliczeniach przyjąć założenie, że straty mocy zależą od zmian rezystywności materiału topika, nie zależąc przy tym od zmian prądu w funkcji czasu. Na rys. 5.7. widać też rozgrzewanie się topika przed rozpadem (w czasie przedłukowym t_p), co powodowało wzrost jego rezystancji i wzrost napięcia.

Na rys. 5.8. przedstawiono impuls napięcia powstający w chwili wytworzenia się mostka, po przerwaniu którego zapala się łuk. Można stwierdzić, że mostek dla badanego topika występuje przez czas ok. 1 μs . Oscylacje mogą być spowodowane zjawiskami odbić w przewodach pomiarowych dla tak dużych stromości sygnałów pomiarowych (dla przypadku braku idealnego dopasowania impedancji falowej przewodu do impedancji wejścia oscyloskopu).



Rys. 5.8. Powiększenie impulsu napięciowego z rys. 5.5. Oscylogram rozpadu topika wykonano dla podstawy czasu 400 ns/dz. na tle prądu 1500 A. Pionowymi liniami kreskowanymi zaznaczono czas powstawania mostka równy ok. 1 μ s

Aby można było zobaczyć wygląd topika i mostka po czasie 1 μ s należało zbudować odpowiedni układ do sterowania tranzystora IGBT. Zbudowano prosty sterownik, który reagował na poziom napięcia i wytwarzał impuls sterujący. Sterownik (rys. 5.9) był zbudowany w oparciu o multiwibrator monostabilny (czas własny propagacji ok. 150 ns). Generowany impuls można było opóźnić od chwili początkowej w granicach do 10 μ s, czas impulsu można było regulować, jednak czas ten musiał być on dłuższy od półfali prądu, aby nie wyłączyć za szybko tranzystora i nie spowodować ponownego zapłonu łuku i dalszego wytopienia topika.

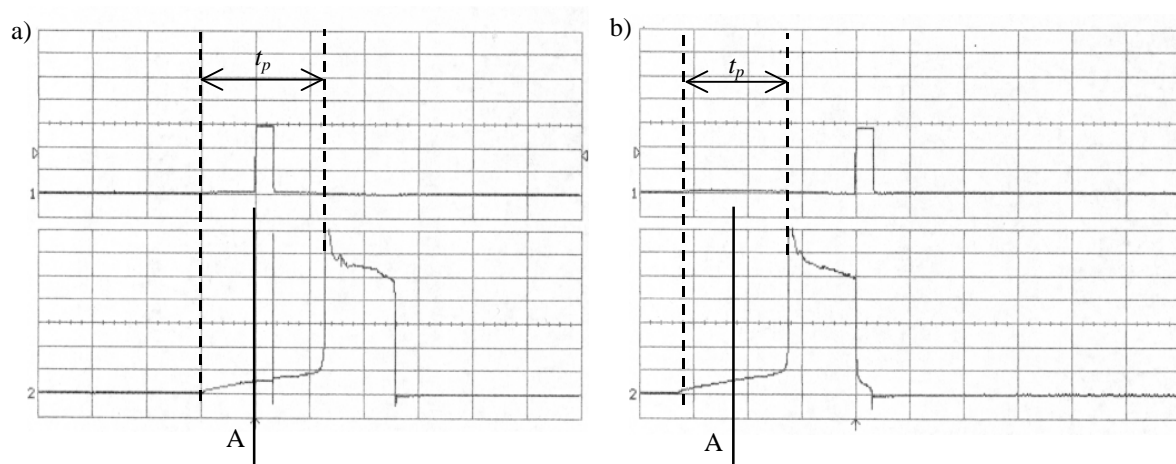


Rys. 5.9. Układ opóźniający do sterowania tranzystora IGBT w zakresie czasów impulsu bramkowego do 10 μ s. Pojemność $C = 100$ nF dobierana

Sterownik posiadał wejście z dzielnikiem 1:10 zabezpieczone diodą Zenera. Impuls dodatni ok. 6 V wyzwał tranzystor, który podawał przez potencjometr napięcie na kondensator 1 nF. Taki układ RC umożliwiał opóźnienie impulsu od 1 do 10 μ s. Napięcie z kondensatora podawane było na wejście Schmidta w multiwibratorze 74121. Wyjściowy impuls prostokątny wyzwał sterownik tranzystora IGBT.

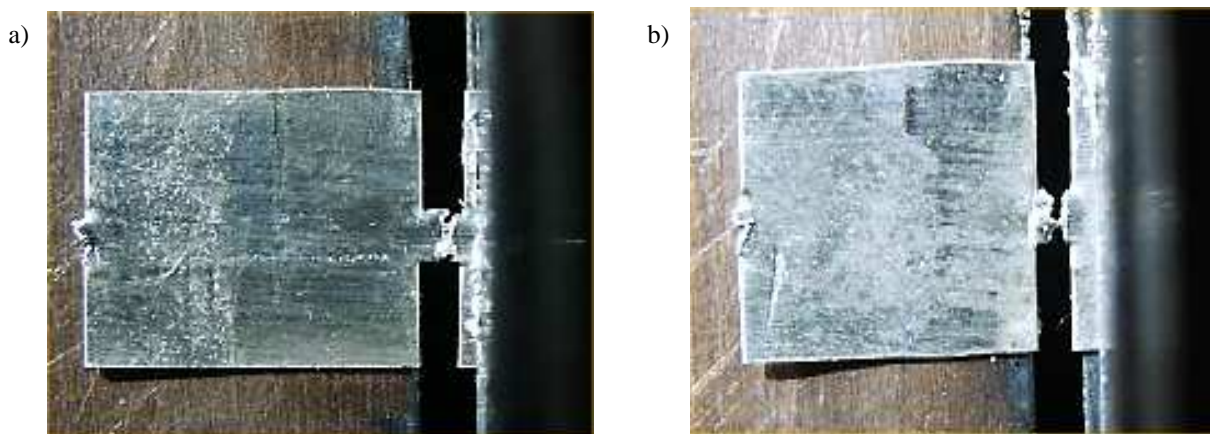
Powyższy układ okazał się szybszy od sterownika mikroprocesorowego planowanego do użycia a którego minimalny czas własny wynosił 40 μ s, a który to sterownik planowano użyć. W trakcie prób okazało się, że tranzystor IGBT posiada czas własny 1 μ s, sterownik tranzystora ze względu na wbudowany transoptor też 1 μ s. W przypadku sterowania na narastającym zboczu napięcia rozpadu topika („szpilka”) uzyskiwano czas ok. 2 μ s do włączenia tranzystora, co było czasem zbyt długim. Należało więc uczulić wejście i wyzwać sterownik w czasie przedłukowym o 2 μ s szybciej na płaskiej części napięcia – w czasie przedłukowym. Z tego względu, że topiki i ich docisk był powtarzalny, można było z wystarczającą dokładnością układ wyregulować i uzyskać potrzebny zakres regulacji opóźnienia.

Wyzwalanie w czasie przedłukowym miało jednak wadę, gdyż przebieg napięcia w czasie był dość „płaski” i brak było wyraźnego punktu odniesienia. Na rys. 5.10. pokazano, jak dobór kondensatora C wpływa na czas opóźnienia impulsu bramkowego. Jeżeli pojemność C była za mała to impuls nie włączał w odpowiedniej chwili tranzystora, zwiększając pojemność można było tak sterować tranzystorem, aby ten zaczął ograniczać czas trwania napięcia łukowego. W badanym przypadku pojemność dobrano tak, że impuls bramkowy powstawał zaraz po pojawieniu się „szpilki”.



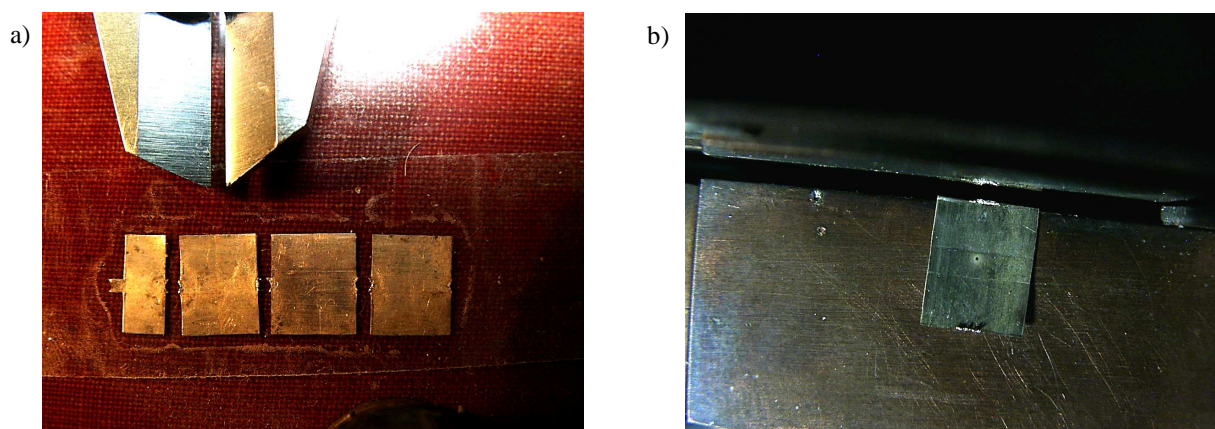
Rys. 5.10. Opóźnienie impulsu bramkowego na tle napięcia łukowego dla podstawy czasu 200 μ s/dz. Ciągłą pionową linią zaznaczono punkt A od którego generowano impuls bramkowy wyzwalający układ napięciem przedłukowym w czasie t_p . a) zbyt mała wartość $C = 100$ nF b) zbyt duża wartość $C = 2$ μ F

Wynikiem eksperymentu jest rejestracja obrazu topika w początkowej fazie przetapiania, co pokazano na rys. 5.11.



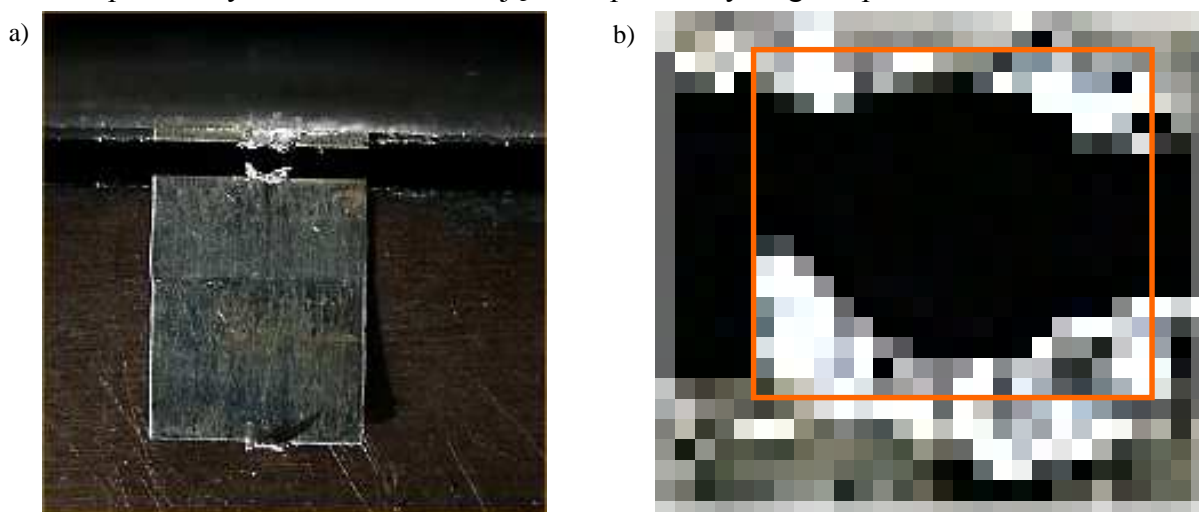
Rys. 5.11. Początkowe stadium przetapiania się topika [48], a) nadtapianie od krawędzi topika, b) mostek po czasie 1 μ s

Na rys. 5.11.a. jest widoczne nadtopienie w środku topika po czasie ok. 1 μ s zapłonu łuku, a na rys. 5.11.b. ostatnią fazę mostka, który powoduje powstanie tak dużego spadku napięcia („szpilki”). Całkowity czas tworzenia się mostka wynosił ok. 1 μ s. Wyniki eksperymentu mogą być zniekształcone z tego względu, że tranzystor przejmował prąd z topika w określonym czasie i początkowo gorący topik zaczynał szybko stygnąć, co mogło powodować naprężenia mechaniczne. Jednak, pomimo tych ograniczeń układ pozwalał „zamrozić” element topika. W powyższym eksperymencie widać, że w stadium początkowym rozpadu, topik zaczyna nadtopiać się od zewnątrz, czyli na zewnątrz była maksymalna temperatura. Na końcu procesu, w środku topika powstaje mostek, a samo zerwanie, zapłon łuku i następnie dalsze wytapianie następuje już od środka. W trakcie wcześniejszych prób obserwowano topiki wytapione w centralnym obszarze (rys. 5.12) co sugerowało, że to w środku temperatura jest maksymalna i że proces rozpadu rozpoczyna się właśnie od środka. Powyższy eksperyment przeprowadzony dla krótkich czasów wyzwalań tranzystora zmienił ten pogląd. Po zerwaniu mostka i zapłonie łuku, w przypadku obliczeń czasu wytapiania topika przyjęto, że maksymalna temperatura jest w środku geometrycznym łuku wytapiającego topik.



Rys. 5.12. Przetopione topiki, a) wytopienie w środku po czasie 15 μ s, b) całkowite stopienie do granicy z okuciem po czasie 30 μ s. Szczęka suwmiarki ustawiona została na 1mm

Znając grubość folii oraz jej wymiary wyznaczono energię potrzebną do rozpadu danej objętości topika. W tym celu określono objętość topika który uległ rozpadowi.



Rys. 5.13. Wytopiony topik po czasie 15 μ s, amplituda prądu spodziewanego wynosiła 1500 A, a) wygląd, b) powiększenie szczeliny. Ramką zaznaczono obszar pierwotny topika

Powiększając zdjęcie obszaru topika i znając jego rozmiary dokonano podziału na prostopadłościanny. Elementarny prostopadłościan miał objętość $175 \times 10^{-6} \text{ mm}^3$, i wysokość równą grubości folii topika 0,07 mm. Stwierdzono, że rozproszeniu uległo ok. 170 prostopadłościanów o łącznej objętości $0,03 \text{ mm}^3$ i masie 0,315 mg (rys. 5.14). Jeżeli założyć, że ich rozpad nastąpił przez stopienie topika, to energia która byłaby potrzebna wynosiłaby 0,112 J. Jednak w rzeczywistości rozpad mógł nastąpić bądź na drodze eksplozji i wyrzuceniu części materiału, bądź stopieniu i elektrodynamicznemu rozerwaniu topika, lub też odparowaniu. Dokładny udział energii na poszczególne zjawiska jest niemożliwy do określenia bez dodatkowych badań, istnieje jednak analogia do łuku spawalniczego dla którego próbowano określić udział poszczególnych zjawisk w bilansie cieplnym i określić ile ciepła jest dostarczane do spawanego obiektu [67]. Dokładna zaś analiza procesu wytapiania jest oparta na równaniach magnetohydrodynamiki [27]. Wykonując fotografie dla różnych czasów wytapiania pomierzono długości przetopienia a wyniki zestawiono w tab. 5.2. (jako długość szczeliny przyjmowano najmniejszą odległość pomiędzy pozostałościami topika, bo to decyduje o wytrzymałości powrotnej).

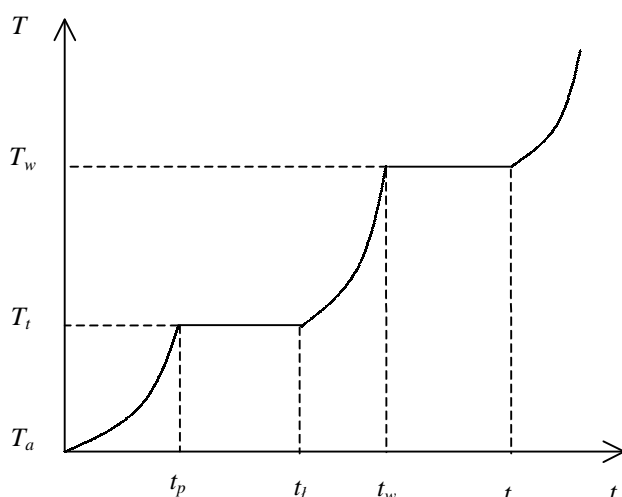
Tab. 5.2. Długość przerwy w topiku zależności od czasu wytapiania tI dla $I = 1,5 \text{ kA}$

Lp.	tI	Długość przerwy
	μ s	
1	5	0,25
2	10	0,35
3	15	0,5
4	30	1

5.2.2. Modelowanie czasu wytapiania topika

Materiał topika nagrzewany prądem podlega przemianom stanu skupienia, związanym z pochłanianiem energii przez topik, której miarą jest temperatura. W przypadku prądu o natężeniu większym od wartości granicznej, temperatura elementu topika o długości dx w funkcji czasu zmienia się tak, jak to pokazano na rys. 5.14.:

- $0 - t_p$ czas nagrzewania do osiągnięcia temperatury topnienia rozpatrywanego elementu topika o długości dx , zależy od wartości prądu,
- $t_p - t_l$ czas roztopiania się elementu topika,
- $t_l - t_w$ nagrzewanie się roztopionego elementu topika do temperatury wrzenia,
- $t_w - t$ czas odparowywania elementu topika o długości dx , kończący się zapłonem łuku,



Rys. 5.14. Przebieg zmiany temperatury w danym punkcie topika w czasie obciążenia prądem zwarciovym, $0 - t_p$ nagrzewanie topika do temperatury topnienia, $t_p - t_l$ roztopianie, $t_l - t_w$ nagrzewanie do temperatury wrzenia, $t_w - t$ parowanie

Ilość energii potrzebnej do odparowania elementarnej objętości topika można opisać następująco:

$$E = c_t m_t (T_t - T_a) + Q_t + c_c m_t (T_w - T_t) + Q_p \quad (5.1)$$

gdzie: E – całkowita potrzebna energia do wytapienia topika,

c_t – ciepło właściwe topika,

c_c – ciepło właściwe cieczy,

m_t – masa elementarnej objętości topika,

Q_t – ciepło pobrane na stopienie obszaru topika,

Q_p – ciepło pobrane na odparowanie ciekłego obszaru topika,

T_a – temperatura otoczenia,

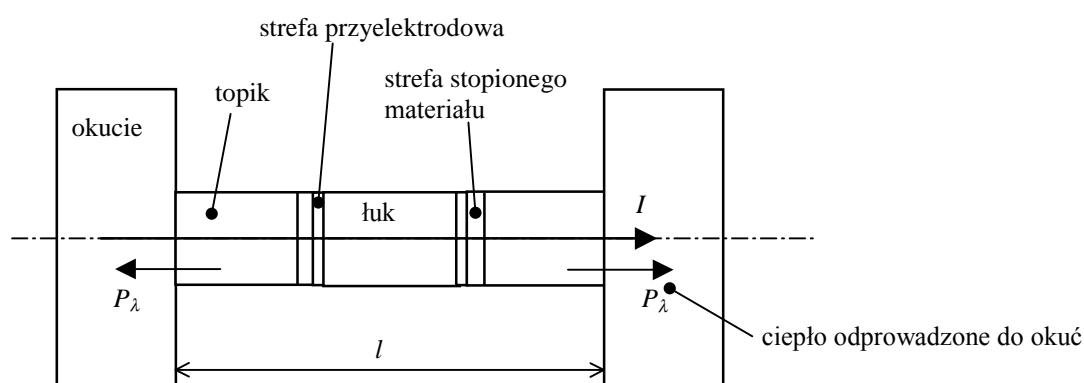
T_t – temperatura topnienia,

T_w – temperatura wrzenia.

Masa badanych topików nie przekracza kilku mg. Mała masa topika i jego wymiary a także duża ilość energii wytwarzanej przez prąd w topiku powodują, że strefy przejściowe zmieniające stan skupienia mają bardzo małe rozmiary, a zachodzące w nich procesy topnienia i wrzenia na tyle krótko trwają, iż można założyć nagrzewanie adiabatyczne i brak wymiany ciepła z otoczeniem. Do określenia czasu tI sterowania tranzystora IGBT potrzebne jest określenie czasu wytopienia i odparowania całego topika, a więc wszystkich elementarnych obszarów. Dla każdego zaś obszaru trzeba określić czasy trwania przemian fazowych. Trudność przy obliczeniu całego czasu wytapiania polega na tym, że obszary te wzajemnie na siebie oddziałują. Jako początek czasu tI można przyjąć osiągnięcie temperatury topnienia przez punkt środkowy topika, a jako koniec – osiągnięcie temperatury wrzenia przez punkt topika będący na granicy styczności z okuciem.

Można zauważyć, że proces wytapianie topika BKT przebiega podobnie do procesu stapiania się elektrody w czasie spawania elektrycznego (inna skala wymiarów). W opracowaniach dotyczących łuku spawalniczego skupiano się m. in. na obliczaniu gęstości prądu w łuku spawalniczym [64]. Stworzono również model opisujący przemieszczanie się stopionego materiału elektrody spawalniczej [65], a także wpływ łuku na anodę (rozkład temperatury [66]).

W innym podejściu wytapianie topika można porównać do erozji styku elektrycznego i na tej podstawie analizować ubytek jego masy [55]. Wydaje się jednak, że topik krótki różni się istotnie od przedstawianych modeli rozkładem temperatury warunkującym sposób jego rozpadu. Na rys. 5.15 przedstawiono schematycznie wytapianie się topika, które następnie poddano analizie.



Rys. 5.15. Model BKT w czasie procesu wytapiania topika

Model użyty do opisanía wytapiającego się topika w BKT zawiera:

- masywne styki odbierające ciepło,

- kolumnę łuku elektrycznego wytwarzającą ciepło dostarczane osiowo do ciekłych i parujących obszarów topika, charakteryzowany rezystancją elektryczną i przewodnością cieplną,
- strefy przyelektrodowe łuku, w których, ze względu na duży spadek napięcia występują duże straty mocy,
- strefy stopionego topika, charakteryzowane przewodnością cieplną i rezystancją,

Obszary topika, w których następuje zmiana stanu skupienia materiału nazwano strefami wytapiania. Przy wzroście długości łuku przemieszczają się one niesymetrycznie ze względu na różne temperatury stref przykatodowej i przyanodowej łuku. W realizacji niniejszej pracy wystarczy posłużyć się prędkością wytapiania [62] sumującą zmiany długości łuku, zarówno od strony katody, jak i anody:

$$v_{bb} = \frac{U_{ac}}{\gamma_m H_{vap}} j \quad (5.2)$$

gdzie: v_{bb} – prędkość wytapiania,

U_{ac} – spadek napięcia pomiędzy anodą i katodą,

γ_m – gęstość materiału,

j – gęstość prądu,

H_{vap} – entalpia parowania,

Analizując przedstawiony na rys. 5.15 model wytapiania warto zauważyć, że topik składa się z obszarów o różnych współczynnikach przewodzenia ciepła i stratach to ciepło wywołujących. Szukaną wielkością jest czas przemieszczenia się strefy ciekłego metalu do końca topika, równy czasowi opóźnienia włączenia tranzystorabocznikującego BKT podczas działania CHCL. Znając przewodność elektryczną obszaru ciekłego oraz prąd można określić stratę mocy. W przypadku strefy przyelektrodowej topika miedzianego spadek napięcia wynosi ok. 12 V. Moc wydzielana w kolumnie łuku zależy od jej zastępczej przewodności, którą wygodnie opisać modelem zaciskowym [54], takim jak np. model Mayra [69]:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P_\lambda} - 1 \right) \quad (5.3)$$

gdzie: g – przewodność łuku,

u – napięcie łuku,

i – prąd łuku,

P_λ – chłodzenie łuku,

τ – stała czasowa łuku wg Mayra,

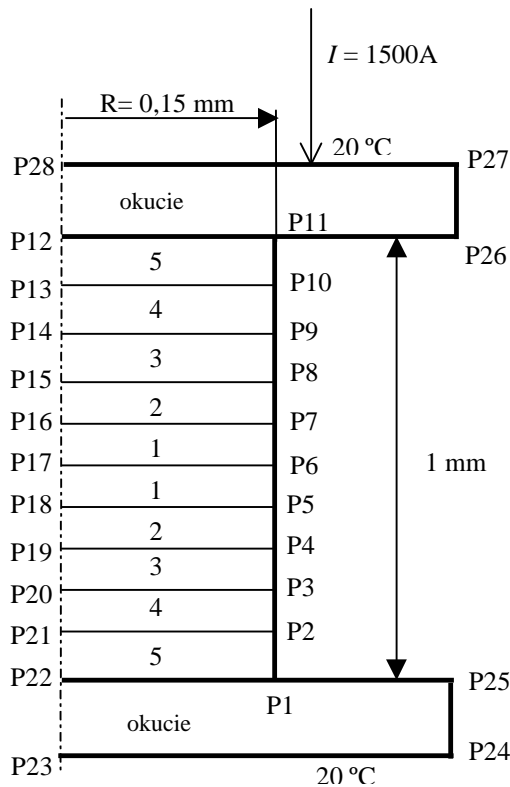
Do modelowania wytapiania topika w BKT, tak jak w przypadku poprzednich obliczeń, użyto metody elementów skończonych (program polowy FLUX). Jednak w tym przypadku model musi uwzględnić zmiany stanu skupienia materiału topika. Zwiększa to nieliniowość modelu.

Podstawowymi trudnościami w obliczeniach były istniejące ograniczenia programu, a także brak szczegółowej dokumentacji opisującej sposób automatyzacji obliczeń iteracyjnych (w których parametry materiału są zmienne i w kolejnym kroku iteracji są podstawiane nowe wartości wyznaczone na podstawie temperatury z kroku poprzedniego – czyli trzeba modyfikować bazę materiałów w trakcie symulacji).

W odróżnieniu od wyżej przedstawionych obliczeń elektrotermicznych (wyznaczających automatycznie wzajemne zależności pomiędzy temperaturą, a własnościami fizycznymi materiału według przyjętej funkcji) niemożliwe było np. wprowadzenie innego modelu rezystywności plazmy niż dostępne w bazie materiałów programu. Potrzebny model rezystywności w funkcji temperatury przedstawiono na rys. 5.27, natomiast dostępne modele opisujące własności materiału to: liniowy, wykładniczy i stały, które były niewystarczające do obliczeń. Należało więc dokonać linearyzacji przedstawionej z rys. 5.27. funkcji, przy jednoczesnym podziale topika na podobszary, umożliwiające uwzględnienie przemieszczania się strefy topnienia.

Podział dawał możliwość wyznaczenia temperatur w różnych obszarach topika, dla których następnie modyfikowano odpowiednie własności fizyczne wynikające ze stanu skupienia. Przyjęto podział na 10 obszarów oznaczonych cyframi od 1 do 5. Dzięki temu było możliwe przypisanie obszarom własności materiału opisanych funkcją liniową (i zmianę tych własności, gdy obszar zmieniał stan skupienia). Układ topika był cylindryczny (rys. 5.16) o współrzędnych zestawionych w tab. 5.3, parametrem niezmiennym przy przekształceniu z układu rzeczywistego do modelu matematycznego był stały przekrój poprzeczny, gdyż on warunkował osiowe odprowadzanie ciepła. Na okuciu przyjęto stałą temperaturę 20 °C.

Tab. 5.3. Współrzędne (r; z) punktów modelu z rys. 5.16.



P1	(0,15; -0,5)	P15	(0; 0,2)
P2	(0,15; -0,4)	P16	(0; 0,1)
P3	(0,15; -0,3)	P17	(0; 0)
P4	(0,15; -0,2)	P18	(0; -0,1)
P5	(0,15; -0,1)	P19	(0; -0,2)
P6	(0,15; 0)	P20	(0; -0,3)
P7	(0,15; 0,1)	P21	(0; -0,4)
P8	(0,15; 0,2)	P22	(0; -0,5)
P9	(0,15; 0,3)	P23	(0; -10,5)
P10	(0,15; 0,4)	P24	(10; -10,5)
P11	(0,15; 0,5)	P25	(10; -0,5)
P12	(0; 0,5)	P26	(10; 0,5)
P13	(0; 0,4)	P27	(10; 10,5)
P14	(0; 0,3)	P28	(0; 10,5)

Warunki brzegowe dla części elektrycznej
P28,P27

$$\iint_S j dS = I$$

P27,P26,P11,P10,
P9,P8,P7,P6,P5,P4,
P3,P2,P1,P25,P24

$$\frac{\partial j}{\partial n} = 0$$

P24,P23

$$\iint_S j dS = -I$$

Warunki brzegowe dla części termicznej
P28,P27

$$T_\Gamma = T_a$$

P27,P26,P11,P10,
P9,P8,P7,P6,P5,P4,
P3,P2,P1,P25,P24

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0$$

P24,P23

$$T_\Gamma = T_a$$

Rys. 5.16. Model geometryczny użyty do obliczeń czasu wytapiania topika

Obliczenia rozpoczęto od zadania początkowego rozkładu temperatury. Do obliczeń rozkładu temperatury w czasie, parametrem wejściowym są straty w danych podobszarach 1 do 5. Są one zależne od własności materiału w danej temperaturze. Jeżeli punkt kontrolny (o współrzędnych podanych w tab. 5.5) w danym elementarnym obszarze przekroczył temperaturę progową z tab. 5.4 to wtedy kończono obliczenia i zapisywano aktualny rozkład temperatury. Następnie zmieniano własności materiałowe i zadawano nowe straty mocy. Kolejny krok rozpoczynał się od wczytania wyliczonego poprzednio rozkładu temperatury i wyznaczeniu nowego przy skorygowanych parametrach. Własności plazmy użytej do obliczeń wyznaczono według opisu w pkt. 5.3.4. Straty mocy w materiałach wyznaczono znając prąd (który ze względu na dużą prędkość zjawiska wytapiania posiadał stałą wartość) i rezystywności materiałów. W obliczeniach uwzględniono dodatkowo obszary przyelektrodowe [14].

Tab. 5.4. Zestawienie wartości parametrów materiałów użytych w modelu obliczeniowym w programie FLUX

T [°C]	Stan skupienia materiał: Cu	P [kW]*	λ [W/mK]	C [J/m ³ K]**	Energia zmiany stanu skup. [kJ/kg]
Do 1080	ciało stałe	0,056	395	$1,9 \cdot 10^6$	212 (en. topn.)
Od 1080 do 2600	ciecz	3,000	8,34	$3,4 \cdot 10^6$	4800 (en. parow.)
Powyżej 2600	plazma	30,00	0,823	213	

)* - straty obliczone dla rezystywności materiału odpowiedniej dla danego stanu skupienia w przypadku przetapiania prądem 1500 A, który czasie przetapiania ma stałą wartość (rys. 5.7),

)** - parametr C przeliczony pojemność cieplna przez gęstość,

Rejestracji temperatur, przy przekroczeniu których zmieniano własności danego podobszaru, dokonano w punktach kontrolnych umieszczonych w ich środkach geometrycznych. Współrzędne punktów zestawiono w tab. 5.5.

Tab. 5.5. Współrzędne punktów kontrolnych

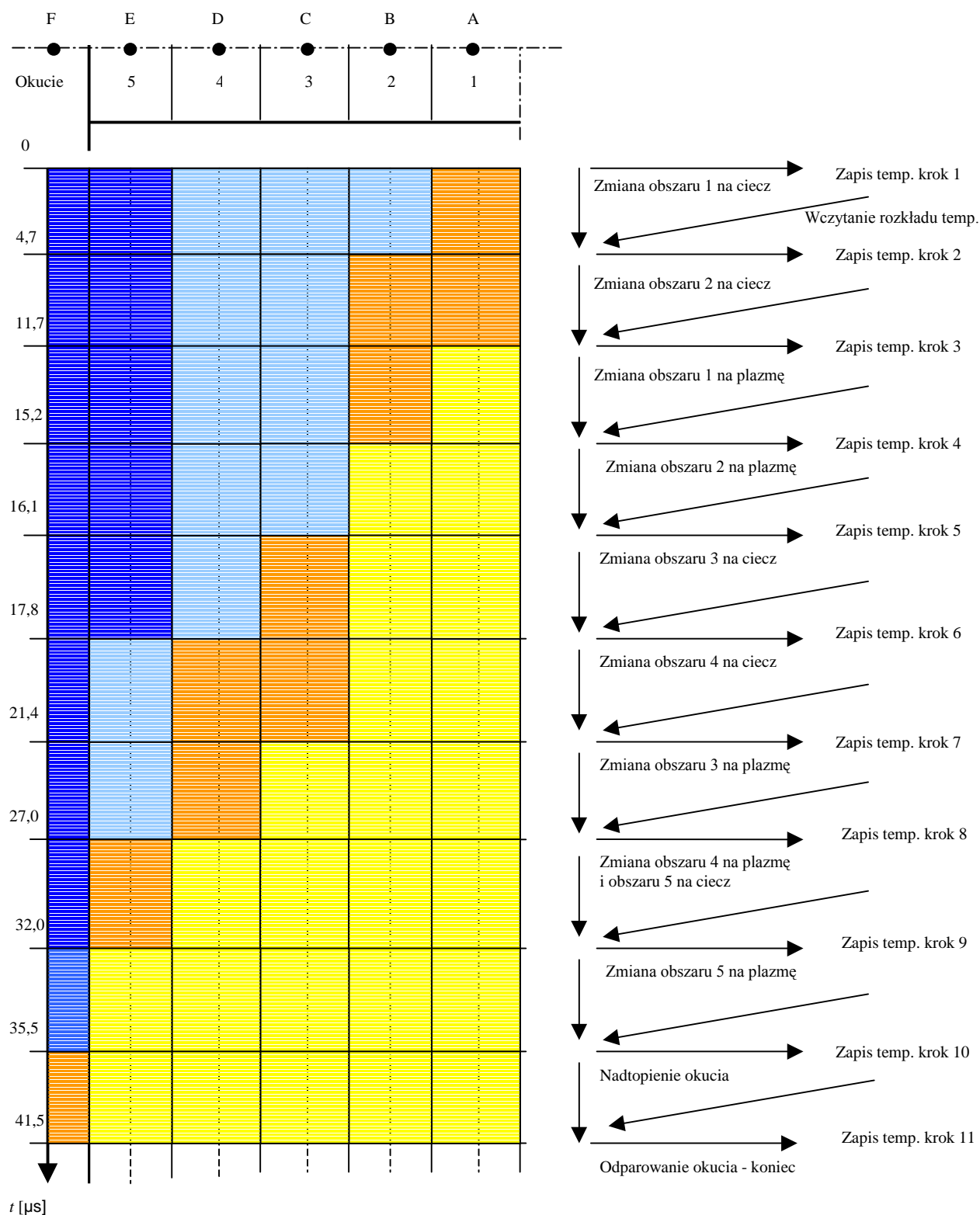
Lp.	Oznaczenie obszaru wg rys. 5.16	Oznaczenie punktu kontrol- nego	Współrzędne punktu kontrolnego
1	1	A	(0; 0,05)
2	2	B	(0; 0,15)
3	3	C	(0; 0,25)
4	4	D	(0; 0,35)
5	5	E	(0; 0,45)
6	Okucie	F	(0; 0,55)

W poszczególnych obszarach mogą występować różne stany skupienia oddziałujące wzajemnie na siebie: obszary 1 mogą być plazmowe, 2 ciekłe, a 3, 4 i 5 to metal o różnej temperaturze. Podział na większą liczbę podobszarów umożliwiłby dokładniejsze wyznaczenie czasu wytapiania topika, jednak znacznie wzrósłby czas obliczeń. Obliczenia zakończono, gdy punkt (0; 0,55) osiągnął temperaturę 2600 °C (czyli wtedy, gdy zostało nadtopione okucie do głębokości 0,05 mm). Obliczenia całego procesu wytapiania składały się z 11 kroków (iteracji głównych) na które składało się ok. 10 iteracji cząstkowych. Iteracje główne były związane z progowymi zmianami temperatur podobszarów (tab. 5.4), których było 11. Obliczenia cząstkowe realizowane w ramach danej iteracji głównej trwały tak długo, aż w którymś z punktów kontrolnych nastąpiła zmiana temperatury.

Masa jednego obszaru topika użytego w modelu z rys. 5.16 ($l = 0,1$ mm, $d = 0,3$ mm) wynosi ok. 60 μg . Energia potrzebna na stopienie takiej masy wynosi ok. 13 mJ. Odparowanie stopionej cieczy, teoretycznie pochłonie ok. 0,3 J. W przypadku parowania materiału topika wiadomo [27], [56], że topik nie pochłonie całej energii parowania gdyż jego rozpad nastąpi wcześniej. W związku z tym przyjęto energię parowania równą 50 % teoretycznej energii parowania określonej dla danego materiału topika.

Czas topnienia badanego obszaru od temperatury otoczenia aż do osiągnięcia temp. 1080 °C, wynosi max. 4 μs (przy dostarczonej mocy 3 kW), a średnio dla punktu kontrolnego umieszczonego w środku obszaru – 2 μs . Teoretyczny maksymalny czas wyparowywania obszaru, który osiągnął już temp. wrzenia równą 2600 °C, wynosi 6 μs , dla dostarczonej mocy 48 kW (30 kW wydzielanej w objętości obszaru i 18 kW dostarczonej ze strefy przyelektrodowej – 1500 A prąd topika i 12 V z przyelektrodowego spadku napięcia). Zakładając jednak, że w warunkach rzeczywistych topik pochłonie max. 50 % energii parowania, czas ten będzie wynosił 3 μs . Ten czas powoduje opóźnienie przemieszczania się stref przyelektrodowych (zmiana barwy pomarańczowej na żółtą na rys. 5.17) łuku w kierunku okuć, gdyż łuk najpierw musi spowodować odparowanie i wyrzucenie do otoczenia całego materiału ze stopionej strefy.

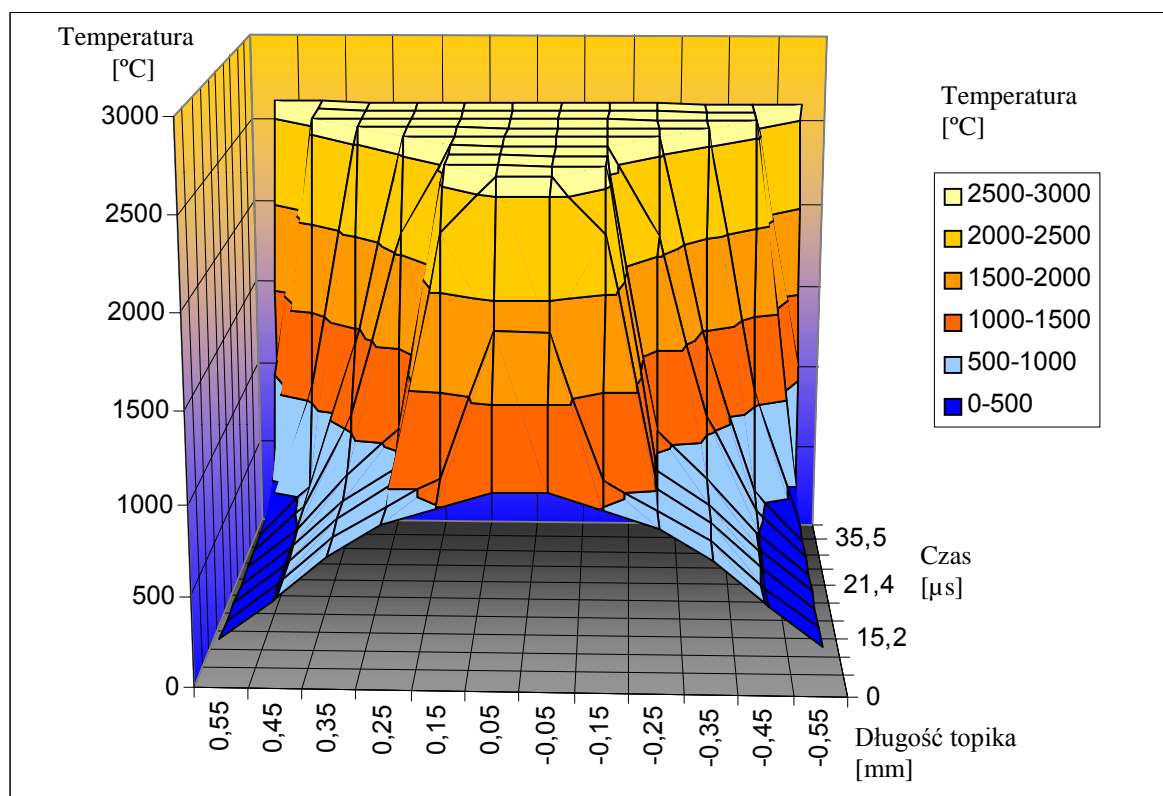
Dzięki przedstawionej metodzie można całe zjawisko wytapiania topika z różnymi obszarami o nieliniowych charakterystykach przekształcić do postaci akceptowanej przez program FLUX. Na rys. 5.17. przedstawiono wizualizację algorytmu obliczeniowego. Użyta barwa granatowa oznacza temperaturę metalu poniżej 500 °C, błękitna – od 500 °C do 1080 °C, pomarańczowa – do 1080 °C do 2600 °C, żółta – powyżej 2600 °C (parametry materiałów w tych przedziałach temperatury są zestawione w tab. 5.4).



Rys. 5.17. Wizualizacja algorytmu obliczeń czasu tI . U góry rysunku przedstawiono topik z zaznaczonymi punktami kontrolnymi o współrzędnych podanych w tab. 5.5. Kolorem granatowym oznaczono zakres temperatur do 500 °C, błękitnym 500 – 1080 °C, czerwonym 1080 – 2600 °C, żółtym powyżej 2600 °C

Tab. 5.5. Rozkład temperatury w [°C] w punktach kontrolnych z tab. 5.5

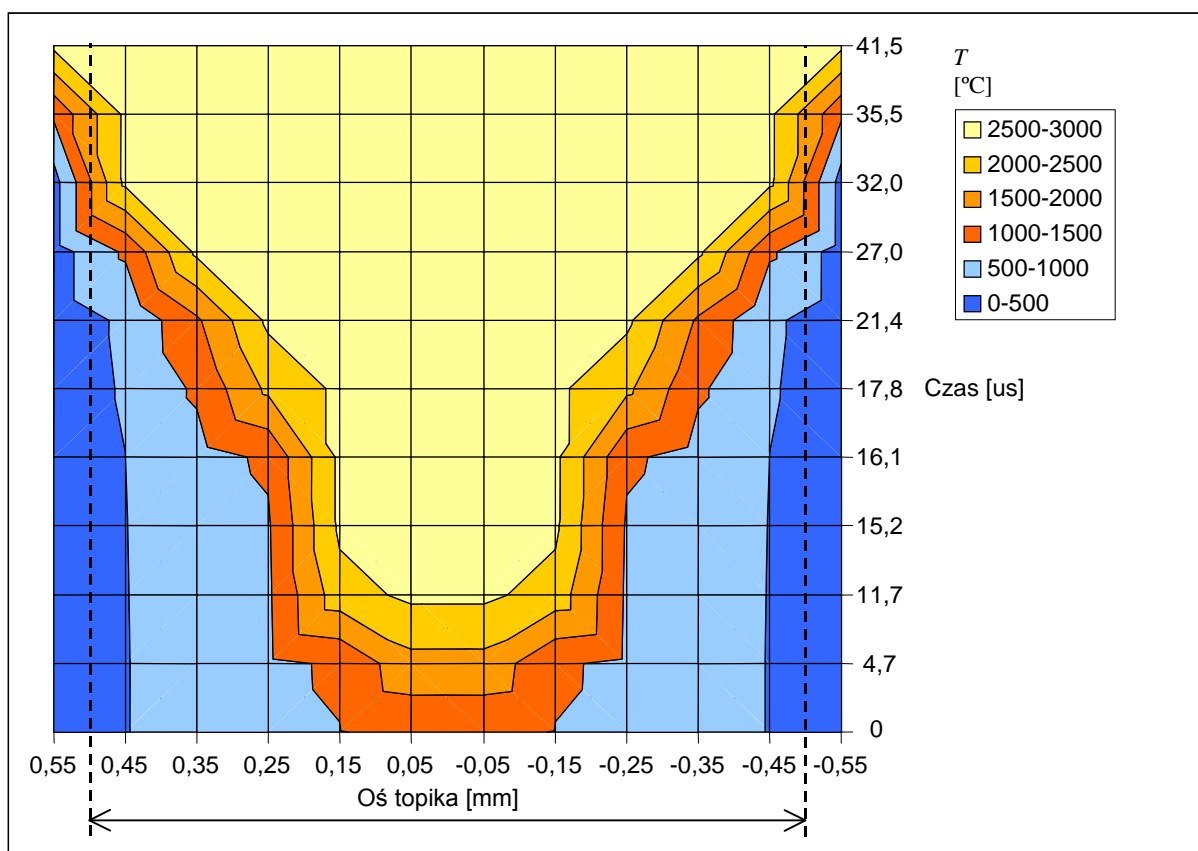
Lp.	t	Temperatura w punktach kontrolnych					
	[μ s]	(0; 0,55)	(0; 0,45)	(0; 0,35)	(0; 0,25)	(0; 0,15)	(0; 0,05)
1	0	265	482	730	898	990	1080
2	4,7	267	482	734	904	1062	1850
3	11,7	268	487	742	933	2300	2600
4	15,2	268	490	750	937	2600	>2600
5	16,1	268	497	810	1080	>2600	>2600
6	17,8	269	540	1080	2100	>2600	>2600
7	21,4	270	564	1420	2600	>2600	>2600
8	27,0	273	1080	2600	>2600	>2600	>2600
9	32,0	273	2600	>2600	>2600	>2600	>2600
10	35,5	1080	>2600	>2600	>2600	>2600	>2600
11	41,5	2600	>2600	>2600	>2600	>2600	>2600



Rys. 5.18. Rozkład przestrzenny temperatury wzdłuż osi topika dla czasu tI , czyli od wytopienia środka topika do nadtopienia okucia

Na wykresie przestrzennym (rys. 5.18) przedstawiono zmianę rozkładu temperatury w czasie tI . Początkowy rozkład temperatury jest wynikiem symulacji dla czasu przedłukowego przedstawionej na rys. 5.24, która kończy się w chwili osiągnięcia przez topik temperatury topnienia. Z kolei obliczenia czasu tI rozpoczynają się od momentu, gdy topik w punkcie (0; 0)

posiada temperaturę topnienia. W miarę upływu czasu temperatura w środkowej części wzrastała aż do osiągnięcia temperatury wrzenia. W modelu nie wzięto pod uwagę wzrostu temperatury wrzenia ze względu na wzrost ciśnienia w szczelinie topika (ciecz przegrzana). Rozchodzenie się stref topnienia i wrzenia przedstawiono na rys. 5.19. Kolor niebieski oznacza materiał stały, żółty plazmę a pozostałe stan ciekły materiału topika (występują jednak pewne rozbieżności w barwieniu obszarów, gdyż zakresy temperatur zaznaczano co 500 °C i nie w pełni się to pokrywa z temperaturami zmian stanu skupienia). Wykonany wykres rozpadu topika jest podobny do ciągłych rejestracji uzyskiwanych w rejestracji pasmowej w fotografii ultrazszybkiej [20], [56].

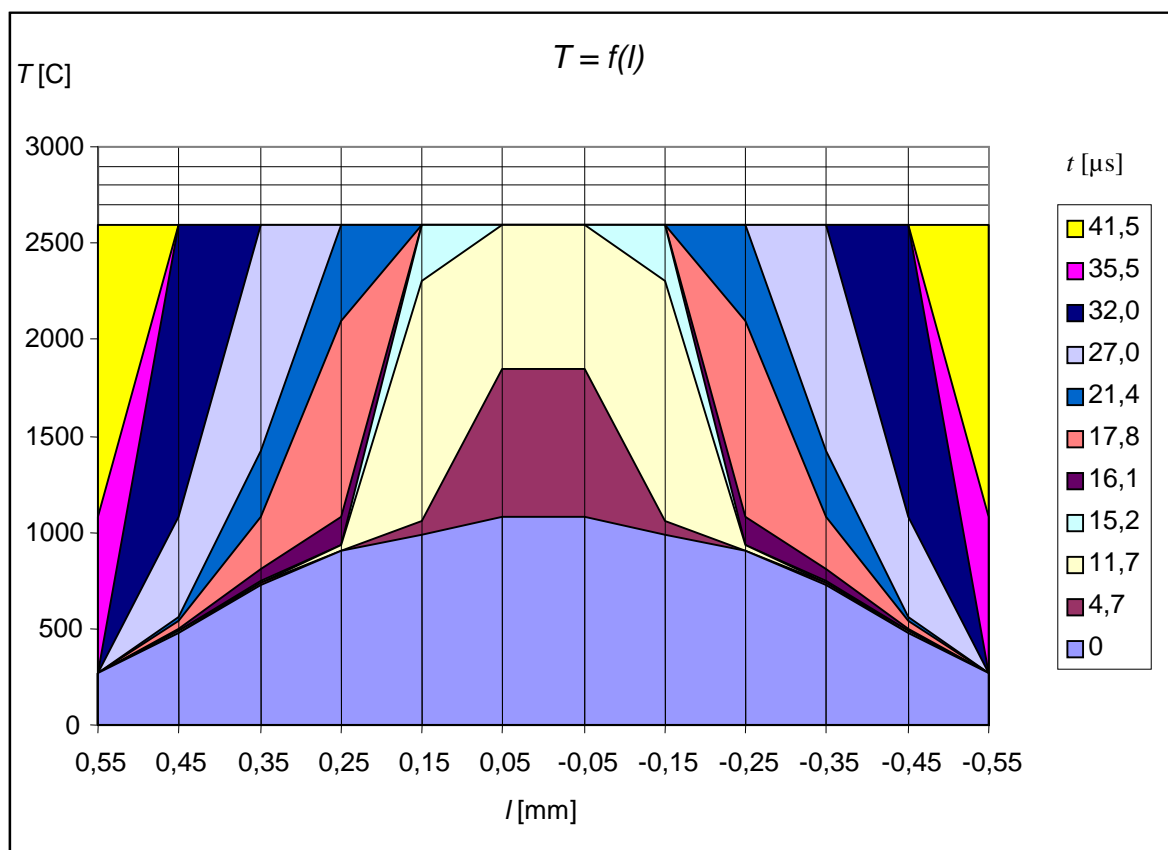


Rys. 5.19. Strefy wytapiania topika w funkcji czasu. Przerywanymi liniami zaznaczono długość topika $l = 1 \text{ mm}$ (-0,5; 0,5)

Modelowany topik posiadał długość 1 mm (od -0,5 mm do 0,5 mm) i został oznaczony linią przerywaną. Według obliczeń wytopienie topika powinno nastąpić po ok. 35 µs, a nadtopienie okucia (na głębokość 0,55 mm) po czasie 41,5 µs. Pomierzony czas wytapiania całego topika jest zbliżony do obliczonego i wynosi ok. 30 µs (tab. 5.2), można więc przyjąć, że założenia dotyczące przyjętego modelowania są słuszne. Prędkość wytapiania topika krótkiego wynosi ok. 29 m/s, i jest większa od prędkości uzyskiwanych dla bezpieczników o długim topiku dochodzących do ok. 6 m/s [10], [6]. Wydaje się, że różnica jest spowodowana tym, że w

zwykłym bezpieczniku jednocześnie występuje wiele rozpadów topika, w których następują przemiany stanu skupienia materiału topika, co wpływa na wydłużenie czasu rozpadu topika.

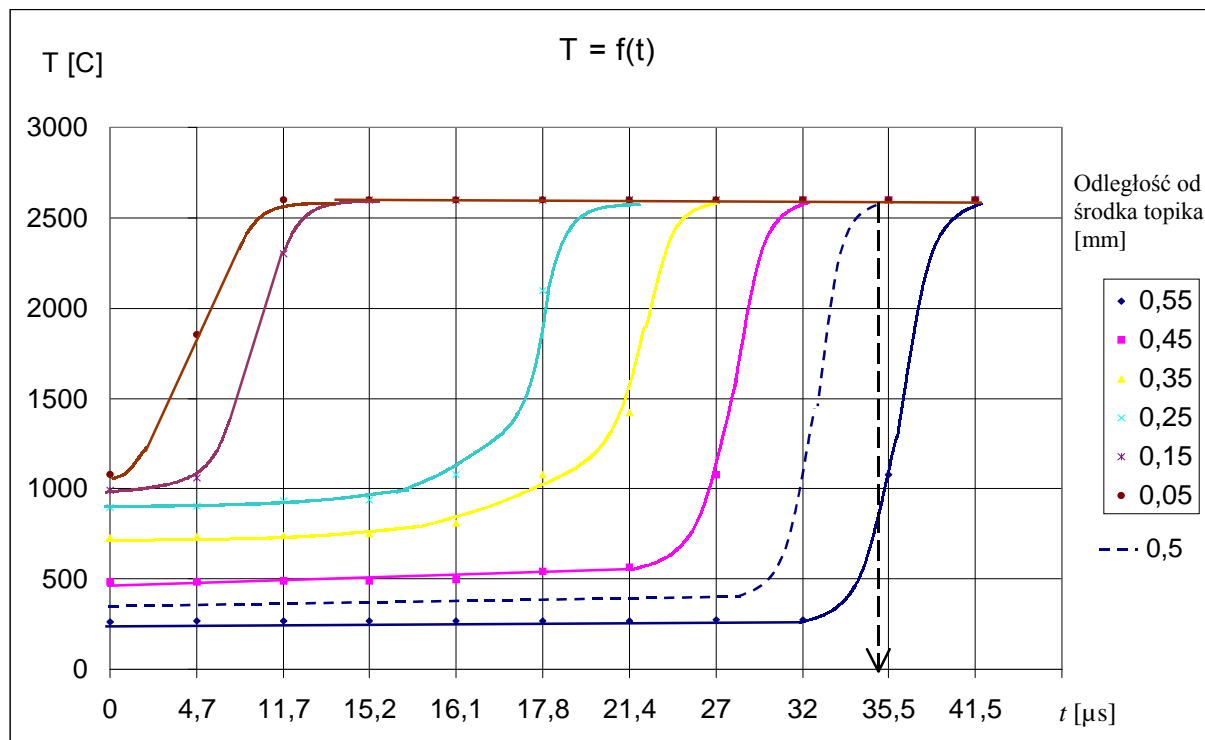
Na rys. 5.19. widać, że optymalny czas wytapiania dla badanego prądu, powodujący stopienie całego topika, wynosi 30 – 35 μs . Tak też należy ustawić czas t_I opóźnienia tranzystora IGBT aby nie dopuścić do stapienia okucia. Rzut wykresu przestrzennego z rys. 5.18. na płaszczyznę $T - l$ pokazuje rozkład temperatury wzdłuż osi topika dla danego czasu wytapiania, co pokazano na rys. 5.20. Czasy są oznaczone w legendzie na rys. 5.20.



Rys. 5.20. Rozkłady temperatur wzdłuż osi topika w procesie nagrzewania, dla czasów znaczonych skokami barw

Przebieg temperatury w punktach kontrolnych topika względem czasu jest przedstawiony na rys. 5.21. Na legendzie są oznaczone odległości punktów kontrolnych od środka topika tj. od punktu (0; 0). Przy doborze bezpiecznika należy tak dobrać intensywność chłodzenia wkładki krótkotopikowej, aby w punkcie 0,55 (tj. punkcie łączenia topika z okuciem) nie przekroczyć w stanie ustalonym temperatury 200 $^{\circ}\text{C}$. Taki poziom temperatury jest ważny ze względu na stosowane lutowie. Kolejnym jak się wydaje istotnym problemem, który też potwierdza konieczność stosowania niskiej temperatury topika krótkiego w warunkach pracy znamionowej jest jego rozszerzalność cieplna i brak konstrukcyjnej możliwości kompensacji zmian jego długości. Pojawiające się cykle pracy (nagrzewania – stygnięcia), w przypadku zastosowania wysokich temperatur roboczych topika mogą powodować mikropęknięcia na granicy łączenia

topika z okuciem, a w efekcie zmianę charakterystyki $t - I$. W trakcie pomiarów obserwowano zjawisko starzenia się topika [37] przy przepuszczaniu dużych prądów tak, że ulegał on przerwaniu przy prądzie znacznie mniejszym niż normalnie wytrzymywany.



Rys. 5.21. Przebieg narastania temperatury od chwili gdy topik osiągnął temperaturę topnienia dla punktów kontrolnych w odległościach od środka topika podanych wg legendy. Linia przerywaną zaznaczono przebieg temperatury na końcu topika, a strzałką czas $35 \mu s$, po którym topik uległ wytopieniu (tj. gdy punkt na powierzchni styku osiągnął temp. $2600 \text{ }^\circ\text{C}$)

5.3. Odbudowa wytrzymałości powrotnej przerwy połukowej BKT

Jak przedstawiono w pkt. 5.1.3. dla napięcia znamionowego do 1kV wystarczy uzyskanie szczeliny 1 mm (dzięki czemu znacznie skraca się czas działania aparatu chroniącego przed skutkami prądu zwarciovego). Sterowanie czasem palenia się łuku (i długością szczeliny) jest możliwe przez zastosowanie sterowanej, równoległej gałęzi z łącznikiem półprzewodnikowym. W przypadku BKT, po wytopieniu topika i włączeniu równoległego tranzystora, powstaje na nim kilkuwoltowy spadek napięcia uniemożliwiający podtrzymanie palenia się łuku. Takie rozwiązanie pozwala na precyzyjne kontrolowanie czasu wytapiania topika poprzez sterowanie czasem łukowym t_1 , wynikającym z opóźnienia włączenia równoległego łącznika półprzewodnikowego. Dokładne sterowanie wytapianiem pozwala na pozostawienie tylko takiej szczeliny, jaka jest wymagana ze względu na wytrzymałość napięciową i powoduje, że zależna od czasu łukowego ilość powstających zjonizowanych par metalu jest możliwie najmniejsza. Aby ograniczyć prąd należy doprowadzić do odzyskania wytrzymałości napięciowej przez BKT, w związku z tym tranzystor musi bocznikować topik tak długo aż pary metalu ulegną dejonizacji.

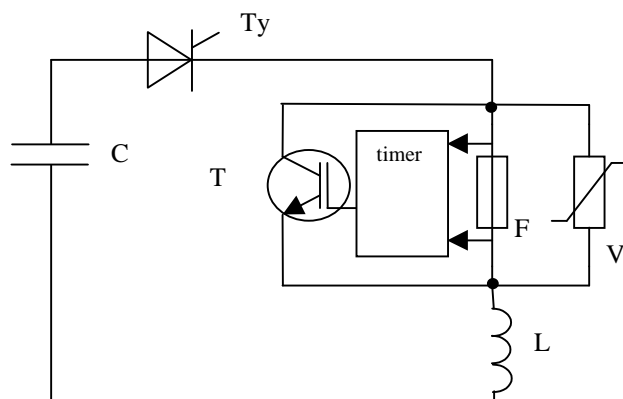
Po wytopieniu topika łuk pali się pomiędzy chłodzącymi go stykami BKT, w kolejnej fazie po włączeniu tranzystora gdy prąd przestaje płynąć przez łuk, a powierzchnia styków chłodzi powstałą z topika i stykającą się ze stykami plazmę. Aby BKT uzyskał pełną wytrzymałość powrotną należy tak długo utrzymywać czas włączenia tranzystora t_2 , aby plazma ochłodziła się poniżej temperatury kiedy staje się nieprzewodząca. W zjawisku chłodzenia plazmy poprzez styki można znaleźć analogię do działania metalowych płytek dejonizacyjnych używanych w komorach łączników. Chłodzenie przez płytki polega na utrzymaniu ich niskiej temperatury dzięki pojemności cieplnej powodującej, że szybko przemieszczający się łuk nie jest w stanie intensywnie nagrzać danego obszaru i spowodować powstania znaczącej emisji termicznej elektronów. W przypadku CHCL czas trwania łuku jest krótki (rzędu 30 μ s), a połączone z okuciem styki posiadają wystarczająco dużą pojemność cieplną, aby w czasie łukowym utrzymać stałą temperaturę.

W dalszej części rozdziału określono, jak długo należy utrzymać czas włączenia tranzystora t_2 , aby doprowadzić do dejonizacji i odbudowy wytrzymałości powrotnej przerwy w BKT. Stwierdzono, że czasy opóźnienia t_1 i dejonizacji t_2 są od siebie zależne i posiadają optimum przy którym można uzyskać najszybsze ograniczenie prądu zwarciovego. Ze względu na przedstawiony sposób działania BKT w układzie CHCL, obliczenia czasu dejonizacji wykonano przyjmując sposób modelowania zjawiska podobnie do poprzednio przeprowadzonych obliczeń.

5.3.1. Układ pomiarowy

Układ probierczy do obserwacji procesu odbudowy wytrzymałości napięciowej przerwy połukowej jest pokazany na rys. 5.22. Użyty tranzystor IGBT sterowano z nastawnika czasowego (timer). Nastawnik czasowy był wyzwalany z komparatora napięciowego, gdy napięcie pomiarowe przekroczyło + 24 V, impuls bramkowy o czasie trwania od 1 μ s do 100 ms mógł być opóźniony w zakresie też od 1 μ s do 100 ms.

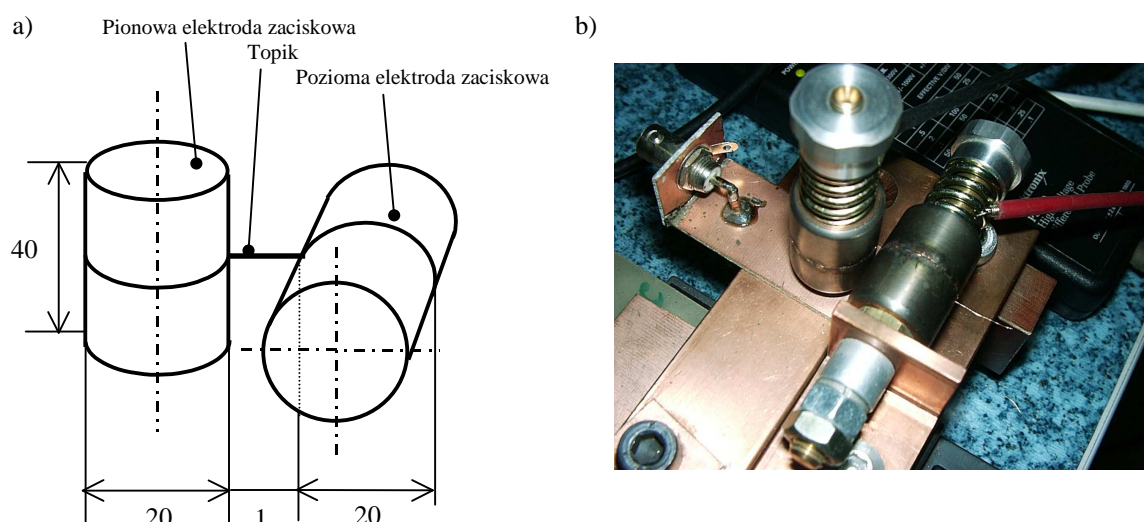
Kondensator (C) o pojemności elektrycznej 2000 μ F był ładowany do napięcia (U) w zakresie 100 – 400 V. Rozładowanie kondensatora następowało przez tyrystor (Ty), cewkę (L) i badany bezpiecznik (F) zmostkowany tranzystorem (T) i warystorem (V) o napięciu $U = 1$ kV. Tranzystor (T) był kluczowany przez hybrydowy układ sterownika Mitsubishi z izolowanym wejściem. Rozwiązanie konstrukcyjne bezpiecznika (F) jest opisane w rozdziale 4.



Rys. 5.22. Układ probierczy do określenia wytrzymałości napięciowej przerwy po topiku: opis elementów zamieszczono w pkt. 5.3.1.

5.3.2. Model BKT do prób napięciowych

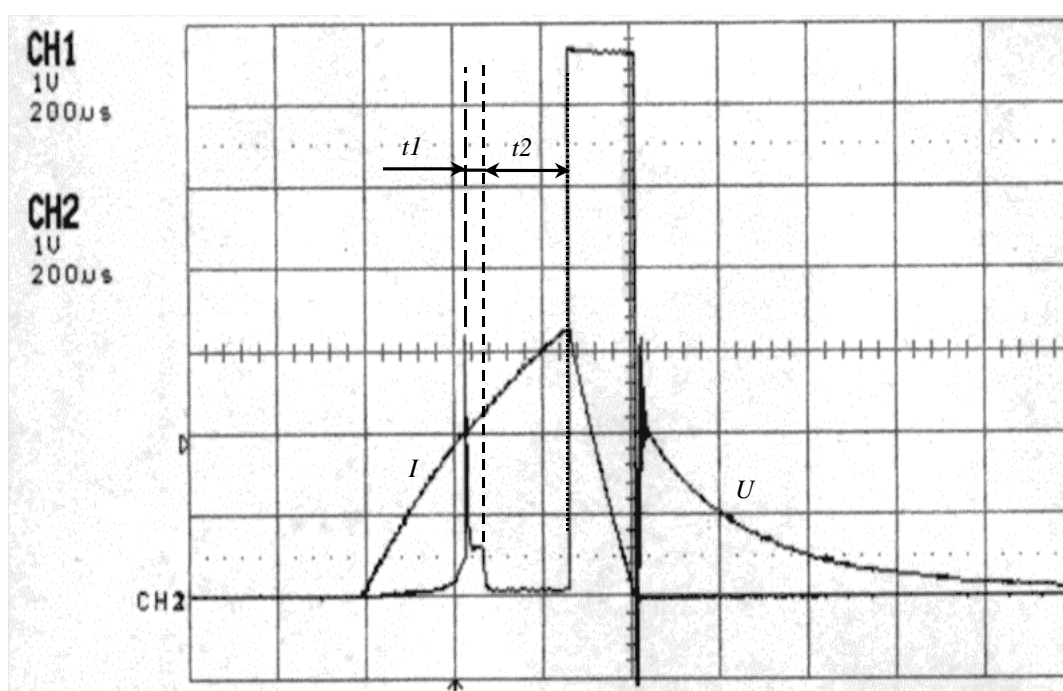
Do badań wytrzymałości elektrycznej zastosowano BKT o stykach cylindrycznych, których osie symetrii były wzajemnie prostopadłe (rys. 5.23). Taki układ zapewniał jednoznaczne określenie odległości międzystykowej. Wpływ efektów krawędziowych był zminimalizowany dzięki przesunięciu krawędzi styków w obszar słabego pola. Aby uzyskać stałą siłę docisku zastosowano sprężyny z ograniczeniem położenia nakrętki napinającej. Cylindryczne elektrody mocujące topik wykonane zostały ze spieków Cu – W 70. Na zdjęciu widoczne jest także gniazdo miniaturowego bocznika (załącznik 3) do pomiaru prądu topika. Powstałe napięcie z przetapiającego się topika mierzono sondą napięciową Tektronix z wejściem polowym.



Rys. 5.23. Zamocowanie topika [49], a) rysunek ideowy, b) widok modelu wraz z bocznikiem miniaturowym wg rys. Z-3.1

5.3.3. Pomiary dynamicznej wytrzymałości napięciowej

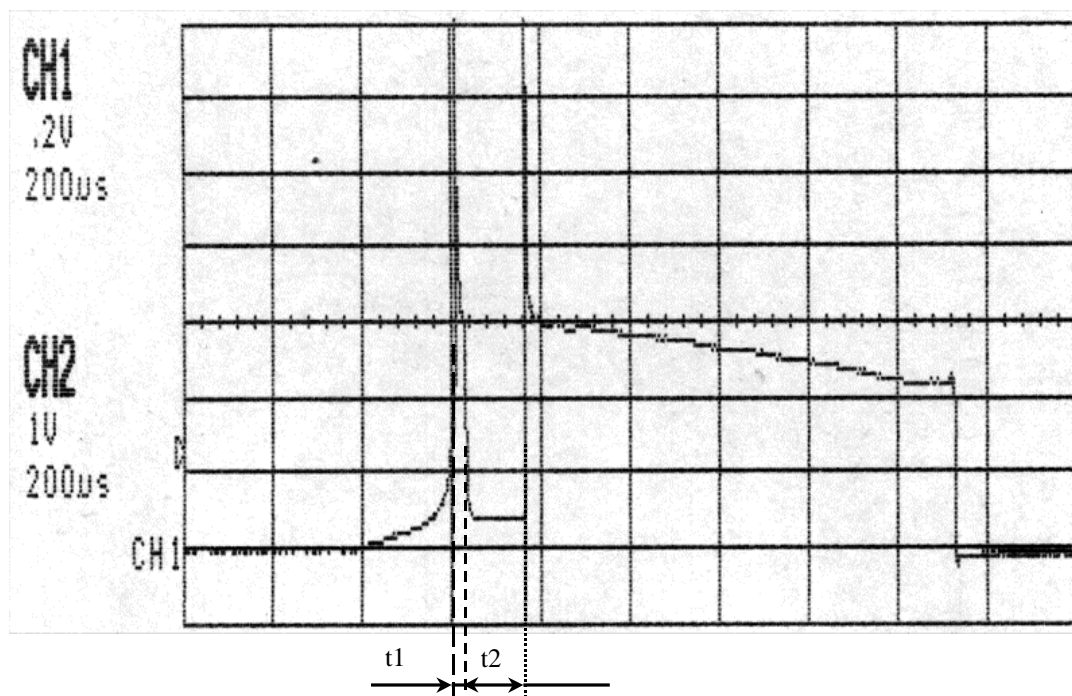
Celem pomiarów było wyznaczenie czasów opóźnienia włączenia (t_1) i czasu przewodzenia (t_2) tranzystora IGBT współpracującego z bezpiecznikiem z rys. 5.23. W eksperymencie użyto topika miedzianego średnicy 0,1 mm i długości $l = 1$ mm. Kondensator (z rys. 5.22) był naładowany do napięcia (U) 100 V, amplituda prądu probierczego wynosiła 2 kA. W trakcie pomiarów zmieniano wartości czasów t_1 i t_2 . Dobór czasu t_1 zależał od szybkości wytapiania się topika, a więc od szybkości powstawania przerwy izolacyjnej. Czas t_2 jest zależny od prędkości dejonizacji plazmy powstałej z topika. Na rys. 5.24. określono czasy t_1 i t_2 .



Rys. 5.24. Przykład ograniczenia prądu z zaznaczonymi czasami t_1 (palenia się łuku wytapiającego topik) i t_2 (włączenia tranzystora przez okres dejonizacji plazmy), I – prąd probierczy BKT, U – napięcie BKT

W czasie prób, między stykami bezpiecznika występowało napięcie probiercze 1 kV powstające przez ograniczenie przepięcia na indukcyjności obwodu przez równoległy warystor. Przepięcie to powstawało z chwilą wyłączenia tranzystora IGBT, a więc po upływie czasu t_2 i jeżeli czas ten był zbyt krótki, to ponownie następował zapłon łuku pod wpływem spadku napięcia na warystorze. Ponowny zapłon następował wtedy, gdy czas wytapiania topika t_1 był zbyt krótki i łuk nie zdążył wytopić pełnej przerwy wytrzymującej napięcie powrotne generowane przez warystor.

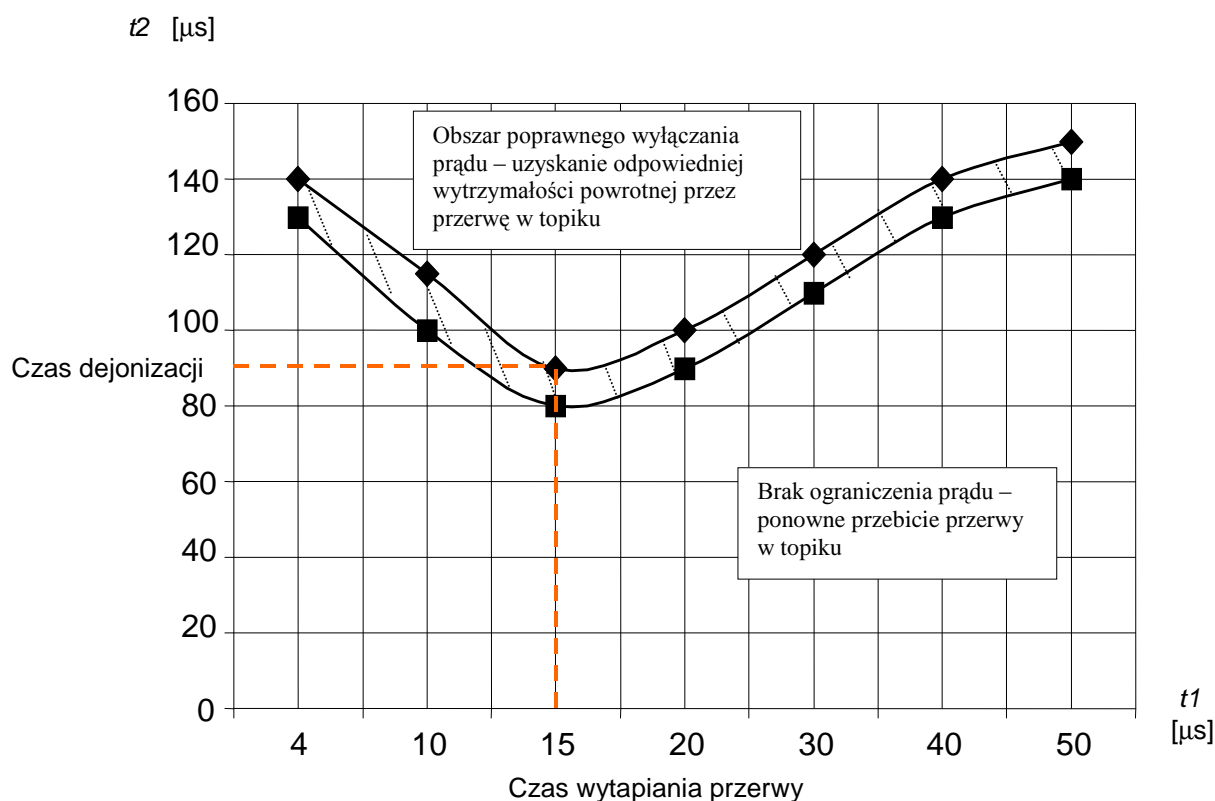
Na rys. 5.24 widać poprawne ograniczenie prądu zwarciovego dla przypadku poprawnie dobranych czasów: t_1 , który był wystarczający do wytopienia przerwy i t_2 , który „czekał” na ostygnięcie plazmy. W przypadku gdy t_1 lub t_2 były za krótkie następowało przebicie przerwy i brak ograniczenia prądu rys. 5.25.



Rys. 5.25. Ponowny zapłon łuku przy zbyt krótkich czasach wytapiania t_1 lub dejonizacji t_2

Czas t_2 jest specyficzny dla danego rozwiązania konstrukcyjnego bezpiecznika i jest tym krótszy im łatwiej uda się odprowadzić pary metali tak, aby ilość nośników w przestrzeni była niewystarczająca do jonizacji. Wydaje się, że czas ten może być znacznie skrócony w komorach próżniowych ze względu na brak przeciwności hamującego rozprzestrzenianie się plazmy. Inną metodą przyspieszenia dejonizacji może być wychwytywanie nośników przez ośrodek gazowy w komorze. Czas t_2 jest zależny od czasu wytapiania topika czyli ilości doprowadzonej energii cieplnej do komory, a więc od ilości odparowanego materiału i im jest krótszy tym szybciej CHCL ograniczy prąd zwarciovoy.

Jak można się spodziewać istnieje optimum czasów, dla którego cały proces ograniczania prądu jest możliwie najkrótszy. Z jednej strony musi być zachowany odpowiedni czas potrzebny do wytopienia topika, ale powoduje to wzrost temperatury par metali i powstanie nośników ładunku. Z drugiej strony czas dejonizacji, który powinien być wystarczający dla ochłodzenia się plazmy. Czas t_2 może być ustawiony jako długi, ale wtedy cały prąd zwarciovych płynie przez tranzystor. Nie obserwuje się więc efektu ograniczenia. Dlatego należy dążyć do skrócenia t_2 , ale tak aby nie spowodować ponownego zapłonu łuku. Poniżej na rys. 5.26. przedstawiono przykładową zależność czasu t_2 od t_1 . Zależność ta obrazuje optimum doboru czasów t_1 i t_2 i ze względu na kształt proponuje się ją nazwać krzywą V.



Rys. 5.26. Odbudowa wytrzymałości powrotnej w funkcji czasu łukowego. Linia przerywaną zaznaczono optymalną współzależność czasów t_1 i t_2 dającą najkrótszy czas ograniczania prądu. Prąd probierczy 2 kA, napięcie probiercze 1 kV, średnica topika 0,1 mm, długość topika 1 mm.

Krzywa V ma charakter pasmowy. Jej powierzchnia reprezentuje obszar działania przypadkowego, gdy może nastąpić ponowne przebicie przerwy połukowej. Od „góry” obszar ten jest ograniczony krzywą pewnego zadziałania, a od „dołu” zawsze następuje ponowne przebicie i brak ograniczenia prądu. Pomierzona szerokość pasma wynosiła ok. 10 µs dla całego przedziału czasu t_1 . Zakres pracy CHCL należy tak dobrać, aby uzyskać najszybsze ograniczenie prądu co jest spełnione dla punktu pracy, który leży w minimum krzywej ograniczającej z „góry” pasmo niepewnego działania. W przedstawionym przypadku łączny czas ograniczenia był najkrótszy dla danego rozwiązania BKT i wynosił 15 + 90 µs. Wzorując się na

podstawie wyżej przedstawionych wyników pomiarów inni autorzy [35] wykonali podobne próby dla dodatkowych topików (np. $d = 0,13$ mm i $l = 1$ mm) uzyskując podobne wyniki, też z silnie zaznaczonym optimum dla czasów $t1$ i $t2$.

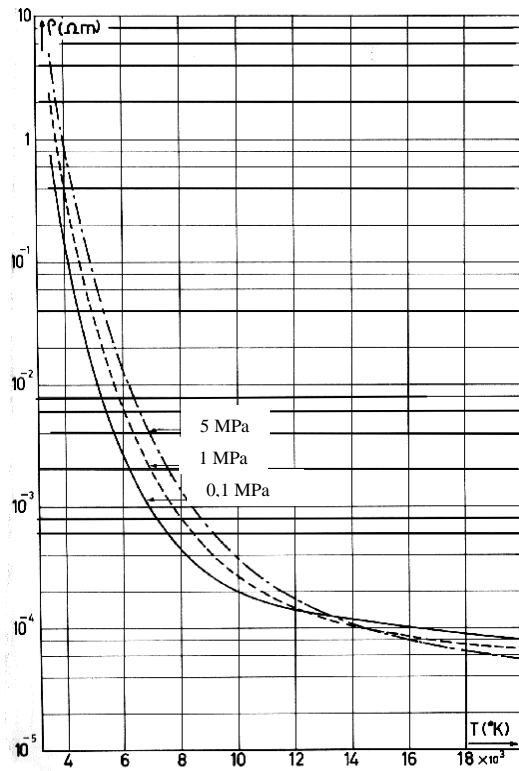
Na podstawie powyższych obserwacji można stwierdzić, że czas wytapiania (opóźnienia włączenia tranzystora) $t1$ powinien być tylko taki jaki jest potrzebny do stopienia i odparowania topika (obliczenia cieplne). Czas dejonizacji $t2$ można określić ze zjawiska chłodzenia się plazmy [36] poniżej 3000 K (obliczenia cieplne). Temperaturę 3000 K przyjmuje się jako graniczną poniżej której plazma staje się nieprzewodząca (rezystywność jej jest duża, rys. 5.27).

Na przebieg charakterystyki z rys. 5.25. nakładają się różne zjawiska: dla czasów krótszych od 1 μ s wytopienie jest niewystarczające i przebicie następuje pomiędzy pozostałościami topika niezależnie od czasu dejonizacji (do opisu tej części krzywej V prawdopodobnie należy użyć modelu silnie niejednorodnego pola elektrycznego). Dla czasów do 10 μ s występuje duża gęstość plazmy i stosunkowo mała prędkość jej rozchodzenia stąd też "dogrzanie" powoduje zwiększenie prędkości rozchodzenia i powstanie minimum. Dalsze zwiększanie czasu wytapiania powyżej 100 μ s powoduje nadmierne wytapianie topika łącznie z okuciami i powstanie zbyt dużej ilości par metali, co skutkuje długim okresem dejonizacji i tym samym potrzebą włączenia tranzystora aby ochłodzić przerwę w topiku.

5.3.4. Modelowanie odbudowy wytrzymałości powrotnej BKT

Mechanizm odbudowy wytrzymałości powrotnej BKT jest nieco inny niż bezpiecznika klasycznego czy łącznika zestykowego, gdyż przebiega w bardzo słabym polu elektrycznym. Po całkowitym wytopieniu topika, aby nie dopuścić do dalszego wytapiania styków w BKT, powinien zostać włączony równoległy tranzystor bocznikujący palący się łuk. Po włączeniu tranzystora łuk zostaje zgaszony i następuje stygnięcie oraz dejonizacja plazmy. Czas przewodzenia tranzystora $t2$ (z rys. 5.9) musi być równy czasowi dejonizacji przerwy powstałej po topiku, z drugiej strony czas przewodzenia tranzystora nie powinien być znacznie większy niż $t2$, bowiem niepotrzebnie wydłuża się czas ograniczenia zwarcia, narażając jednocześnie tranzystor na uszkodzenie od przepływającego prądu zwarciovego.

Po włączeniu tranzystora, wskutek ochładzania się plazma ulega dejonizacji i obszar międzyelektrodowy odzyskuje własności izolacyjne. Jest to możliwe gdy temperatura plazmy spadnie poniżej 3000 K (rys. 5.27). Można więc uznać, że $t2$ jest minimalnym czasem stygnięcia plazmy.



Rys. 5.27. Przebieg rezystywności plazmy połukowej w funkcji temperatury [56]

Przedstawiona poniżej metoda ma na celu wyznaczenie czasu ochładzania się plazmy dając możliwość określenia czasu t_2 , czyli czasu trwania impulsu bramkowego potrzebnego do włączenia tranzystora.

Stan plazmy łukowej po przejściu prądu przez tranzystor opisują prawa magnetohydrodynamiki [15]:

- prawo zachowania masy

$$\frac{\delta \gamma}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5.4)$$

- prawo zachowania pędu

$$\gamma \frac{\delta \vec{v}}{\delta t} = -grad p + \vec{j} \times \vec{B} \quad (5.5)$$

- prawo zachowania energii

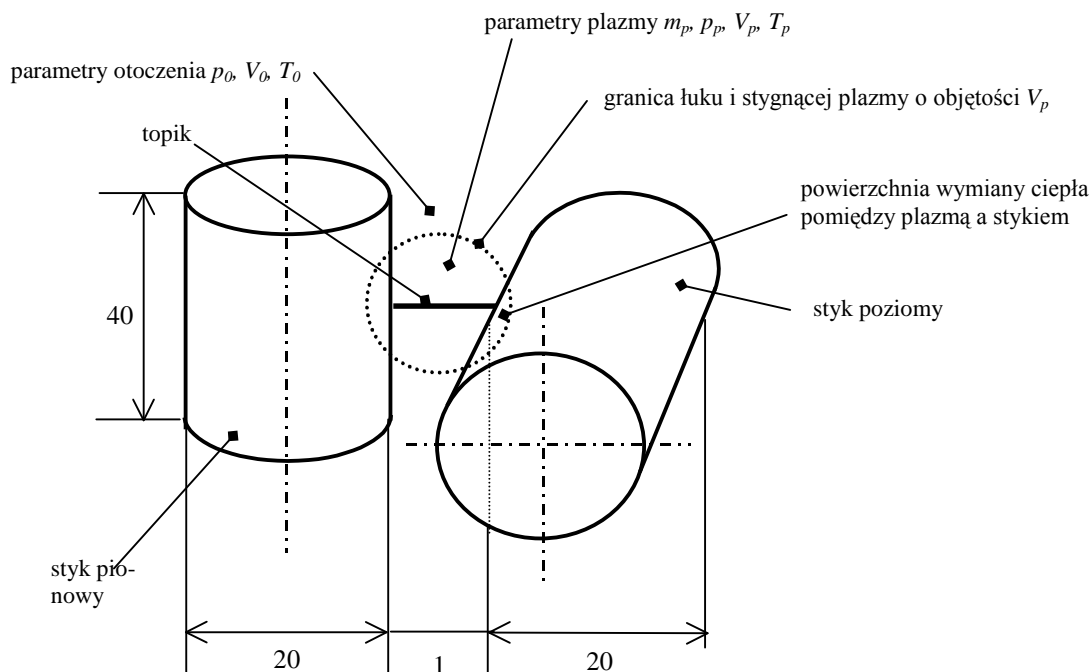
$$\vec{w} \cdot grad \left(h + \frac{v^2}{2} \right) = \nabla \cdot (\lambda grad \vartheta) + \vec{j} \cdot \vec{E} \quad (5.6)$$

- oraz równanie stanu gazu doskonałego [8]

$$p = \gamma R \vartheta \quad (5.7)$$

Układ elektrod, między którymi modelowano proces stygnięcia plazmy jest przedstawiony na rys. 5.28. Do modelowania przyjęto następujące założenia:

- W wyniku załączenia tranzystora IGBT cały topik uległ odparowaniu i plazma łukowa powstała wyłącznie z topika zajmując objętość V_p . Założenie to jest wynikiem zasady działania CHCL, w którym dopuszcza się tylko wytopienie topika, dzięki temu jest dokładnie znana masa plazmy,
- Ciśnienie plazmy jest równe ciśnieniu otoczenia, gdyż po wytopieniu topika rozprzestrzenianie się plazmy nie jest ograniczone – łuk pali się swobodnie,
- Początkową temperaturę plazmy przyjęto jako 10 kK. Temperatura łuku swobodnie się palącego wynosi 8 kK do 14 kK [7], [47], do obliczeń przyjęto wartość średnią,
- Po włączeniu tranzystora (przejmuje on prąd z plazmy) rozpoczyna się proces stygnięcia plazmy z pomijalnym dopływem energii z obwodu (napięcie IGBT),
- Oddawanie ciepła z plazmy do otoczenia następuje przez powierzchnię styku plazmy ze stykami BKT, oraz w ogólnym przypadku przez promieniowanie i konwekcję do otoczenia. Kształt obłoku plazmy przyjęto jako wycinek sfery ograniczonej stykami,
- W chwili włączenia tranzystora plazma zajmuje już całą objętość V_p wyznaczoną z równania 5.8. i w całej tej objętości panuje jednorodna założona temperatura i ciśnienie równe ciśnieniu otoczenia. Jest to założenie opisujące przypadek graniczny, bo w rzeczywistości plazma chłodzi się już w wyniku rozprzestrzeniania,



Rys. 5.28. Model użyty do obliczeń czasu dejonizacji plazmy powstałej po odparowaniu topika (rysunek jest bez zachowania skali)

Do obliczenia objętości plazmy powstałej z topika, przyjęto topik długości $l = 1$ mm i średnicy $r = 0,1$ mm:

$$V_p = \frac{m_p R T_p}{p_p} = \frac{0,28 \cdot 10^{-6} \cdot 8,31 \cdot 10000}{101 \cdot 10^3} = 230 [mm^3] \quad (5.8)$$

gdzie:

V_p – szukana objętość plazmy,

m_p – masa plazmy zgodnie z założeniem równa masie topika 0,28 mg,

p_p – ciśnienie plazmy równe ciśnieniu otoczenia 101 kPa,

T_{pl} – założona temperatura plazmy 10 kK.

Obliczenia czasu t_2 stygnięcia plazmy wykonano w programie FLUX w module Transient Thermal. Układ walców (rys. 5.28) zastąpiono modelem o symetrii osiowej dającej się przedstawić jako układ 2D (rys. 5.29.a), parametrami niezmiennymi podczas zamiany modelu 3D na 2D były powierzchnie zestyków i objętość plazmy. Aby obliczenia uniezależnić od temperatury otoczenia tak, jak w przypadku wyznaczania charakterystyk $t - I$, na granicy styku ustalono warunki Dirichleta i stałą temperaturę 20 °C. W model użyto trzech obszarów:

- styków BKT wykonanych z miedzi (oznaczonej na błękitno na rys. 5.29 a) o parametrach opisanych w bazie materiałów FLUXa,
- przestrzeni międzyelektrodowej wypełnionej plazmą (oznaczonej na żółto) posiadającej własności przedstawione poniżej, a które zdefiniowano na podstawie obliczeń w dodatkowym programie DOSowym,
- bocznej powierzchni wymiany ciepła pomiędzy plazmą a otoczeniem uwzględniającej promieniowanie i konwekcję [11]. Oznaczona jest między punktami P3 i P4.

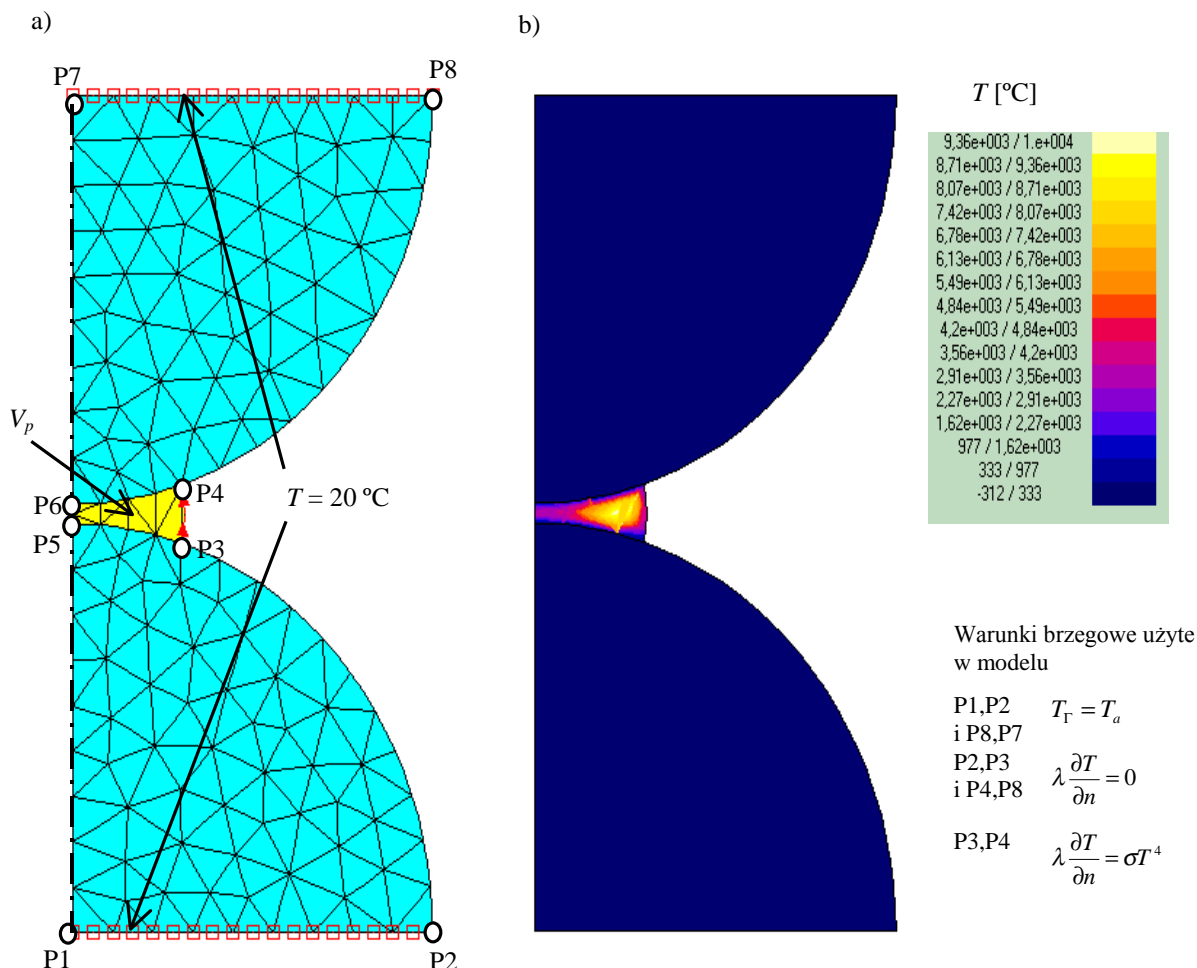
Współrzędne punktów modelu zestawiono w tab. 5.7. Parametry plazmy wyznaczono z zewnętrznego programu opartego na publikacji [70]. Program bazuje na równaniach wielomianowych określających energię pomiędzy składnikami (atomami) gazu plazmowego. Odpowiednie wykładniki równań były stabelaryzowane w pliku pomocniczym. Wejściem do programu był plik tekstowy z podanym składem cząsteczkowym gazu, temperaturą, ciśnieniem. Wyjściem obliczeń był plik z wyliczonymi parametrami: przewodnością cieplną i elektryczną, gęstością gazu, pojemnością cieplną oraz dodatkowymi jak entalpia, entropia, prędkość dźwięku. W analizowanym przykładzie parametrami wejściowymi programu były:

- skład gazu plazmy składający się ze 100 % atomów miedzi,
- temperatura plazmy, którą przyjęto na poziomie 10 kK,
- ciśnienie plazmy, które przyjęto jako 101 kPa.

Parametrami użytymi do opisu właściwości materiałowych plazmy, użytymi w bazie danych programu FLUX, a wyznaczonymi przez zewnętrzny program są:

- pojemność cieplna 4183 [J/ (kg K)],
- gęstość 0,051 [kg/ m³],
- przewodność cieplna 0,823 [W/ (m K)].

Model obliczeniowy został zbudowany na podstawie rys. 5.23. z różnicą, że został uproszczony do symetrii osiowej.



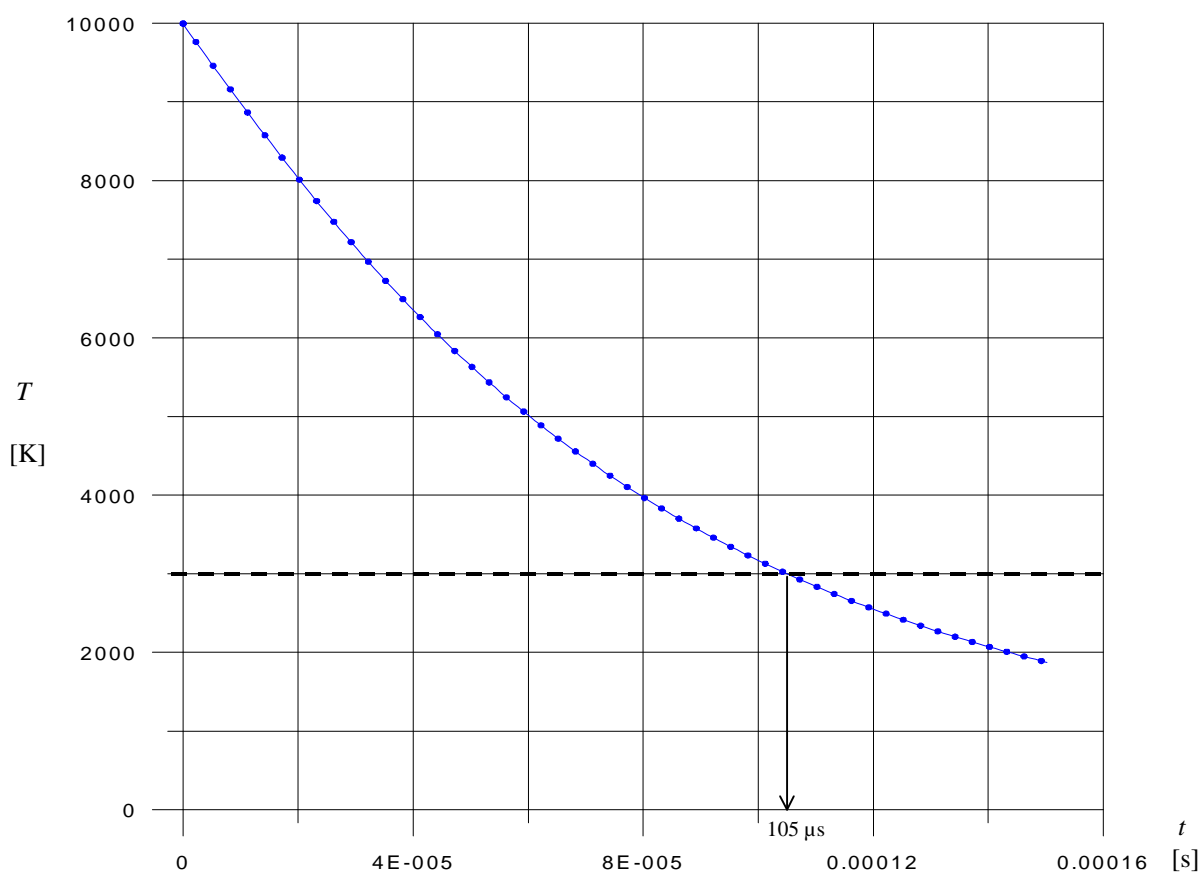
Rys. 5.29. Model wg rys. 5.23 szczeliny BKT dla której wyznaczano czas t_2 stygnięcia plazmy. a) przedstawienie charakterystycznych wymiarów, siatki i zaznaczonych kwadratami warunków brzegowych Dirichleta, b) rozkład pola temperatury dla $t_2 = 0,1 \mu s$ (po zbocznikowaniu szczeliny topika) w którym najgorętszy punkt obszaru plazmy posiada temperaturę 10 kK

Tab. 5.7. Współrzędne punktów modelu z rys. 5.29 a

P1	(0; -10,5)	P5	(0; -0,5)
P2	(10; -10,5)	P6	(0; 0,5)
P3	(6,03; -1,43)	P7	(0; 10,5)
P4	(6,03; 1,43)	P8	(10; 10,5)

Na rys. 5.29 b przedstawiono rozkład temperatury dla czasu kiedy plazma ostygła poniżej 3000 K. Przebieg temperatury w najgorętszym punkcie o współrzędnych (4,58; 0) przedsta-

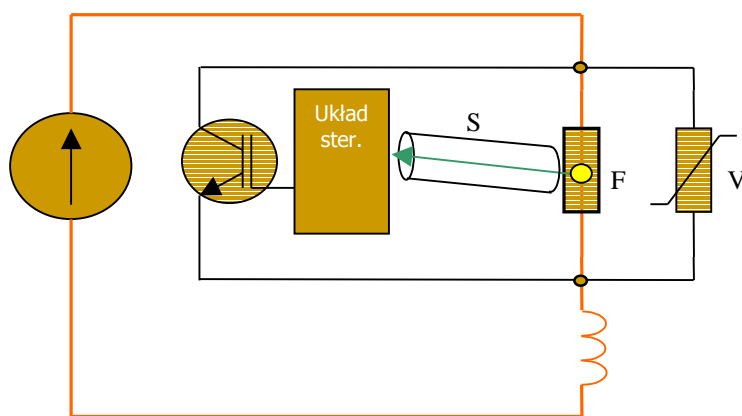
wiono na rysunku 5.30. Widać, że plazma ochładza się po czasie $t_2 > 105 \mu\text{s}$, i tyle też powinien wynosić czas przewodzenia tranzystora. Gdyby uwzględnić chłodzenie plazmy w czasie jej rozprzestrzeniania, to proces chłodzenia nastąpiłby szybciej niż wyznaczono. W rzeczywistości według wyznaczonej krzywej V czas t_2 wynosił optymalnie $90 \mu\text{s}$, a średnio ok. $100 \mu\text{s}$. Zmieniając czasy łuku t_1 (zależne od prądu) a więc i parametry wejściowe gazu [3], [42] można wyliczyć kolejne czasy t_2 , jednak w takim przypadku niewiadoma jest masa plazmy, bowiem nie jest spełnione założenie, że plazma powstała tylko z całego odparowanego topika. Na rys. 5.29.b widać, że najgorętszy punkt obszaru plazmy nie leży w środku geometrycznym modelu, a jest znacznie przesunięty. Spowodowane jest to silnym chłodzeniem przez okucia w części środkowej i stosunkowo małą skutecznością chłodzenia przez powierzchnię boczną plazmy do otoczenia. W przypadku użycia BKT o kształcie cylindrycznym (rys. 5.17) plazma będzie ograniczona płaszczyznami styków tworzącymi wąską szczelinę co powoduje, że w takim układzie jest duża powierzchnia styczności plazmy z powierzchnią chłodzącą i tym samym wystąpi skrócenie czasu t_2 . Stosując powyższy sposób modelowania stwierdzono, że w przypadku BKT cylindrycznego czas t_2 może się skrócić do $36 \mu\text{s}$.



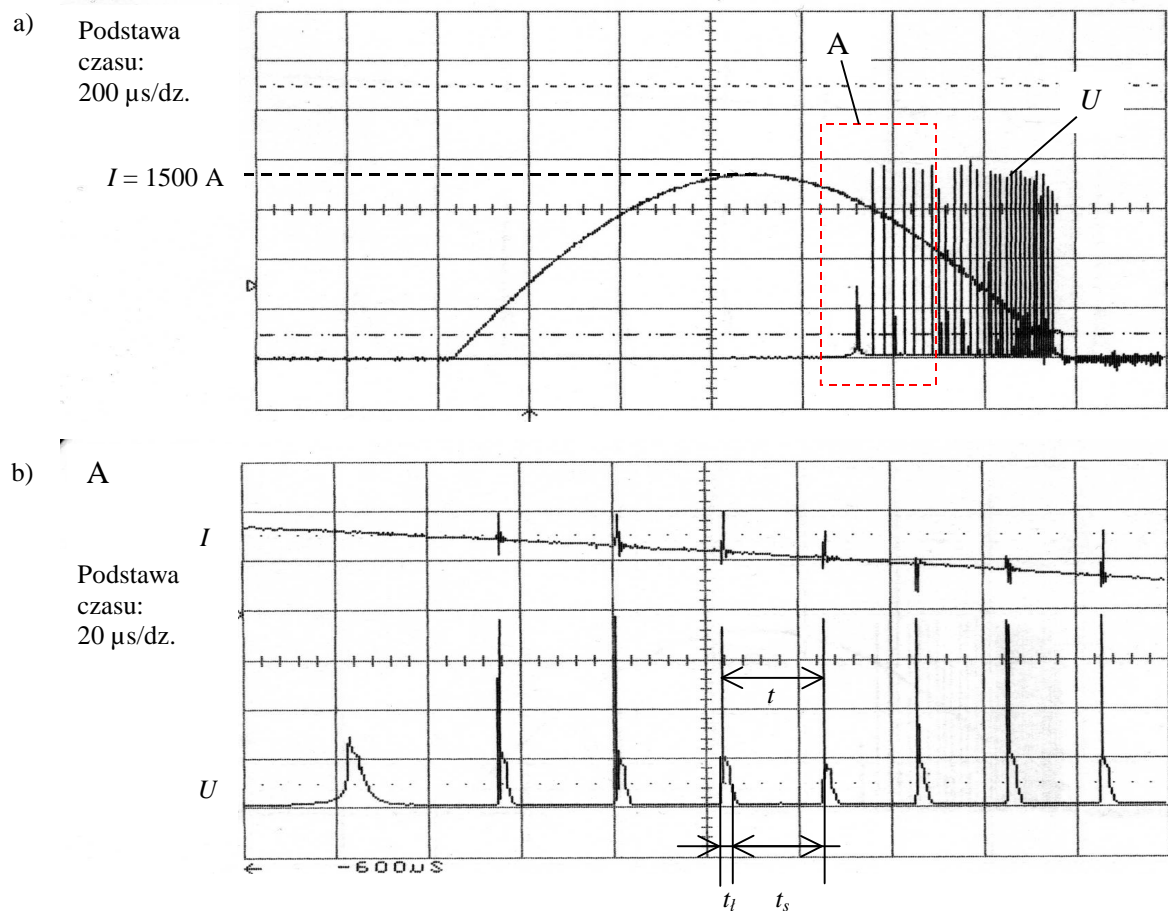
Rys. 5.30. Przebieg temperatury stygnącej plazmy w funkcji czasu. Pionową strzałką zaznaczono czas $t_2 = 105 \mu\text{s}$ po którym plazma osiąga temperaturę 3000 K i staje się elektrycznie nieprzewodząca. Optymalny czas t_2 wyznaczony z krzywej V wynosił $90 \mu\text{s}$

5.3.5. Eksperymentalna ocena szybkości odbudowy wytrzymałości powrotnej

Weryfikacja modelowania przez porównanie z krzywą V dawała dobrą zbieżność wyników. Obliczony czas dejonizacji t_2 wynosił 105 μs , podczas gdy średnie czasy wyznaczone z krzywej „V” wynosiły ok. 100 μs . Rozszerzono jednak weryfikacje modelu obliczeniowego o sprawdzenie zgodności pomiarów na podstawie prawa promieniowania Plancka. Takie podejście umożliwiło potwierdzenie słuszności założeń użytych w modelu obliczeniowym na drodze eksperymentów wykorzystujących dwie drogi weryfikacji (krzywa V i optyczne). Wynikiem zastosowanego modelu pozwalającego obliczyć czas t_2 w szczeliny BKT był przedstawiony przebieg zmian temperatury w czasie (rys. 5.30). Wiadomo, że każde ciało emituje promieniowanie, którego długość fali jest związana z temperaturą tego ciała. W przypadku łuku elektrycznego jest to widmo prążkowe (pobudzonych atomów gazu i materiału topika [67]) na silnym tle ciągłego promieniowania termicznego. Na tej podstawie wykonano dodatkowy eksperyment potwierdzający przyjęty model obliczeniowy. Eksperyment polegał na wyprowadzeniu światła emitowanego przez stygnącą plazmę ze szczeliny bezpiecznika. Światło wyprowadzono za pomocą światłowodu, i poprzez wtórnik emiterowy wysterowano tranzystor IGBT. Dzięki temu było możliwe pomierzenie i porównanie czasu trwania impulsu bramkowego z obliczeniami czasu stygnięcia plazmy dla temperatury pośredniej ok. 5000 K, dając w ten sposób zgodność dla dwóch przypadków. Temperaturę 5000 K wybrano tak, aby długość emitowanej fali wynosząca 720 nm leżała w widmowym zakresie pracy przetwornika fotoelektrycznego użytego w układzie sterowania (zgodnie z notą producenta użyty przetwornik posiadał zakres pracy dla długości fal 600 – 850 nm, co odpowiada przejściu barwy pomiędzy żółtą a czerwoną, przetwornik posiadał maksymalną czułość dla fali 680 nm). Pomiarów dokonano w układzie przedstawionym na rys. 5.31. układ sterowania zmodyfikowano w ten sposób, że reagował na światło i nie posiadał nastawnika czasowego. Pozostałe parametry układu pozostały takie same, jak przy wyznaczaniu krzywej V (rys. 5.22).



Rys. 5.31. Układ ze światłowodem, F – bezpiecznik, S – światłowód wyprowadzający światło z bezpiecznika, V – warystor ograniczający napięcie do 1 kV



Rys. 5.32. Wielokrotne zwieranie bezpiecznika przez tranzystor a) widok całego procesu, b) powiększenie obszaru A. Na wykresie zaznaczono: U – napięcie łukowe, I – prąd dławika którego amplituda wynosiła 1500 A, t – czas pomiędzy kolejnymi zapłonami łuku, t_l – czas łukowy po którym temperatura jest na tyle wysoka, że długość promieniowanej fali jest w zakresie czułości przetwornika, t_s – czas stygnięcia po którym długość promieniowanej fali jest poza zakresem czułości przetwornika ok. 22 μ s

Wynikiem przeprowadzonych pomiarów jest oscylogram wielokrotnego zwierania bezpiecznika i palącego się wewnątrz niego łuku (rys. 5.32). Czas t pomiędzy kolejnymi zapłonami łuku jest sumą czasu łukowego czyli czasu t_l wytapiania topika i nagrzewania się plazmy, oraz czasu t_s stygnięcia plazmy. W czasie t_s przetwornik jest pobudzony – wytwarza impuls bramkowy i tranzystor tym samym zwiera bezpiecznik. Włączenie tranzystora jest możliwe, kiedy plazma osiągnie taką temperaturę dla której długość promieniowanej fali będzie leżała w zakresie czułości przetwornika. Wyłączenie tranzystora i zanik impulsu bramkowego następuje, gdy plazma ochłodzi się i przetwornik przestanie reagować na światło. Należało więc sprawdzić, jaki jest czas trwania impulsu bramkowego i porównać go z wyznaczonym czasem t_2 . Zanik impulsu bramkowego jest związany głównie z zanikiem pobudzenia, ale też z czasem bezwładności układu sterowania i odprowadzaniem ładunków z bazy tranzystora IGBT. Włączenie tranzystora trwa około 1 μ s (według katalogu producenta) plus 3 – 4 μ s na opóźnienie układu sterowania, tak więc łuk musi trwać przynajmniej 4 μ s aby nagrzać szczelinę i

podbudzić układ sterowania tranzystora odpowiednią długością fali (wyznaczanie czasów własnych układu sterowania przedstawiono w załączniku 2). Na rysunku 5.32. widać, że czas łuku t_l trwa ok. 4 μ s, a czas stygnięcia t_s wynosi około 22 μ s. Na końcu półfali prądu czas t_s wynosi ok. 3 – 4 μ s. Zjawisko zmniejszenia się czasu przerwy i tym samym zwiększania częstotliwości powtarzania impulsów wraz z maleniem prądu związane jest z szybszym ochładzaniem się szczeliny, co jest wynikiem mniejszej temperatury początkowej wynikającej z coraz mniejszej wartości prądu.

Do wyznaczenia czasów t_s należy obliczyć, jak zmienia się długość fali dla danego wyznaczonego przebiegu temperatury w czasie. Powyższe wyliczenie można wykonać na podstawie prawa przesunięć Wiena, które wynika z prawa Plancka. Prawo promieniowania Plancka opisane równaniem 5.9. określa rozkład energii E w widmie promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez ciało dla danej częstotliwości fali i temperatury ciała (rys. 5.33).

$$E(\nu, T) = \frac{2h}{c^2} \frac{\nu^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \quad (5.9)$$

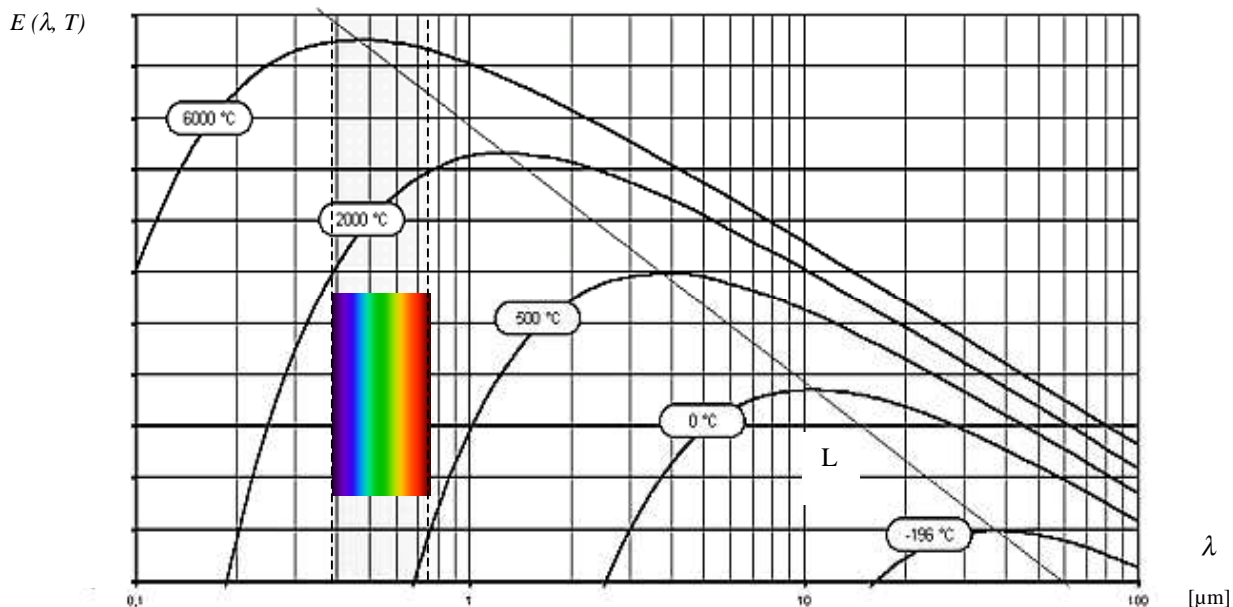
gdzie: h – stała Plancka,

ν – częstotliwość fali dla której jest wyznaczany rozkład energii,

c – prędkość światła,

k – stała Boltzmanna,

T – temperatura ciała.



Rys. 5.33. Wykres rozkładu energii w widmie promieniowania elektromagnetycznego prawa Plancka [38] z zaznaczeniem przedziału długości fali dla światła widzialnego, linia L łączy maksymalne wartości funkcji wyznaczonych dla danych temperatur i przedstawia prawo przesunięć Wiena

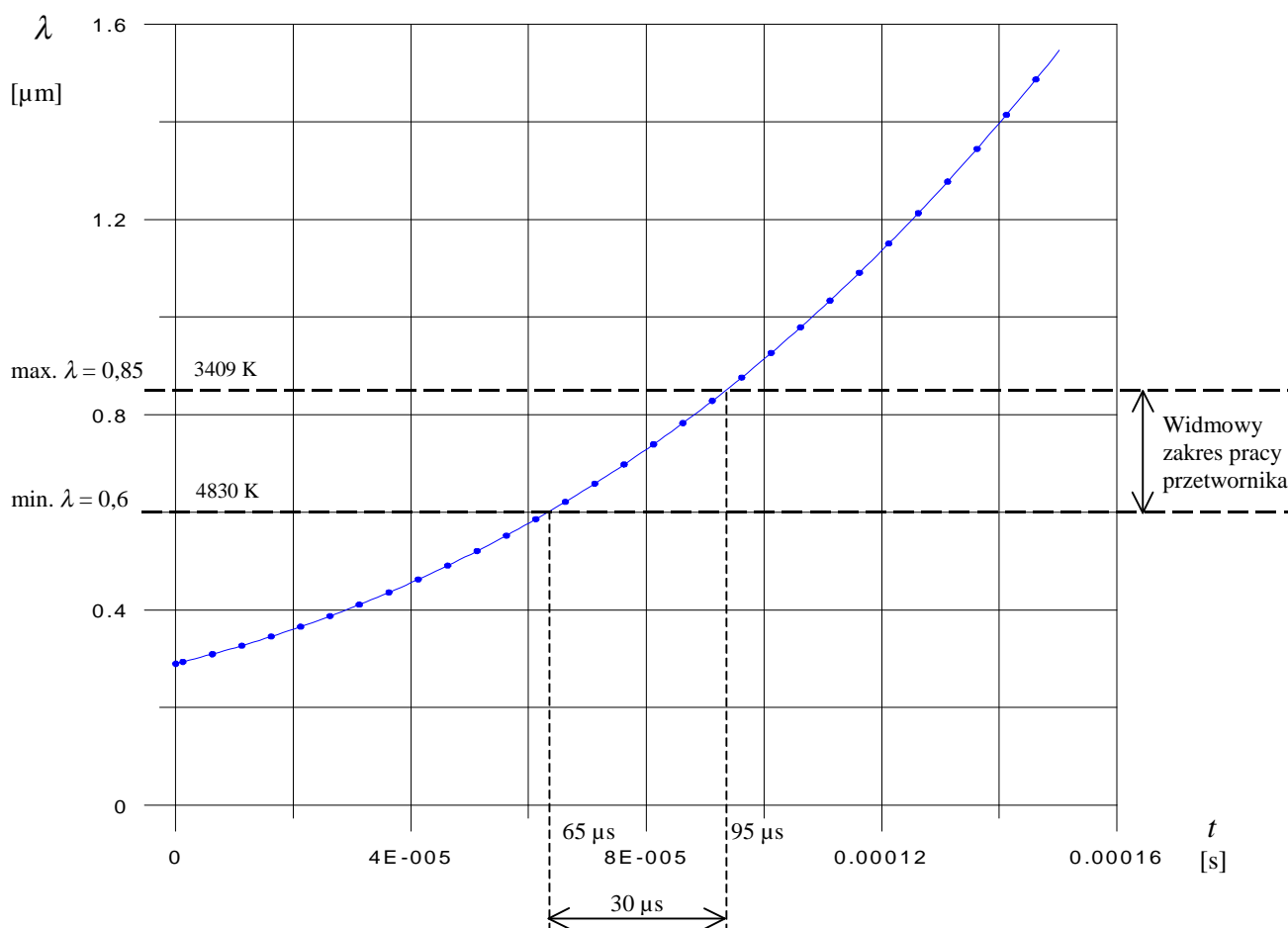
Prawo przesunięć Wiena opisuje relację pomiędzy długością fali, dla której występuje maksymalna amplituda emitowanej energii a temperaturą ciała, które emituje falę (linia prosta L rys. 5.33):

$$\lambda_{max} T = \text{const.} \quad \Rightarrow \quad \lambda_{max} = 2898 / T \quad (5.10)$$

gdzie: λ_{max} – długość fali światła [μm],

T – temperatura ciała emitującego falę [K],

Dla obliczonego przebiegu zmiany temperatury plazmy z rys. 5.30. wyznaczono odpowiadający jej przebieg zmiany długości fali (rys. 5.34). Następnie na wykres naniesiono zakres pracy przetwornika i wyznaczono w ten sposób czas stygnięcia plazmy pomiędzy temperaturami dla których emitowana fala była w zakresie pracy przetwornika. W ostatnim kroku porównano czas wyznaczony z teoretycznego przebiegu funkcji temperatury (czyli odpowiedniej długości fali) z rys. 5.34. z wyznaczonym z pomiarów czasem t_s (rys. 5.32).



Rys. 5.34. Długość fali promieniowanej przez plazmę od czasu, poziomymi liniami zaznaczono granice widmowego zakresu pracy przetwornika (i odpowiadające im temperatury), a pionowymi czasy dla których obliczona temperatura osiąga taką wartość, że promieniowana fala leży w zakresie pracy przetwornika. Teoretyczny czas stygnięcia plazmy dla różnicy temperatur wynosi 30 μs

Pomierzony czas włączenia t_s tranzystora (dla którego emitowana fala ze stygnącej plazmy pobudza przetwornik) według rys. 5.32. wynosił ok. 22 μs . Obliczony zaś czas stygnięcia plazmy pomiędzy temperaturami 4830 K, a 3409 K (co odpowiada powstaniu fali będącej w zakresie czułości widmowej przetwornika) wynosił 30 μs (rys. 5.34).

W rzeczywistości krótszy czas włączenia tranzystora i wcześniejsze ochłodzenie się plazmy niż obliczone spowodowane może być stratą energii na procesy wewnętrznego nagrzewania gazu i oddawanie energii już w czasie rozprzestrzeniania się plazmy, co nie było ujęte w modelu obliczeniowym chłodzenia.

Podobna zgodność występuje przy porównaniu całkowitych czasów stygnięcia (dejonizacji) plazmy: wg krzywej V (wynik eksperymentu rys. 5.26) średnie czasy dejonizacji wynoszą 100 μs , a wyliczone 105 μs (rys. 5.30).

Przedstawione powyżej eksperymenty (w układzie wg rys. 5.31) znajdują potwierdzenie w obliczonym przebiegu zmian temperatury plazmy w funkcji czasu $T = f(t)$ (rys. 5.34) Zaistniałe różnice w wyznaczaniu czasu dejonizacji mogą wynikać z warunków pomiarów tj. przy pracy tranzystora na granicy czasów jego działania, komutacji prądu w układzie, oraz przyjętej wartości temperatury początkowej w obliczeniach.

Na podstawie powyższego wydaje się, że eksperymenty, wykonane w oparciu o odmienne zjawiska fizyczne (elektryczne – krzywa V i optyczne – szybkie zwieranie łuku przez tranzystor) potwierdzają dobre przyjęcie założeń do przedstawionego modelu obliczeniowego do wyznaczania czasu t_2 , przewodzenia tranzystora IGBT w ograniczniku CHCL oraz, że tym samym potwierdzają ostatnią część tezy mówiącą o tym, że BKT jest poprawnie opisany modelem cieplnym z dominującym chłodzeniem wzdłuż jego osi – również w przypadku czasu połukowego.

6. Podsumowanie i wnioski

Podsumowując wykonane eksperymenty i przeprowadzoną analizę można stwierdzić, że w niniejszej rozprawie przedstawiono ideę nowego urządzenia nazwanego CHCL, istotnie różniące się od znanych ograniczników prądów zwarciovych. W pracy można wyróżnić część eksperymentalną z której otrzymano wyniki pomiarów użyte następnie w celu weryfikacji obliczeń mających na celu uogólnienie obserwowanych zależności. W przedstawionych badaniach starano się przeanalizować istotne cechy bezpiecznika krótkotopikowego, jako najważniejszego elementu CHCL. Uzyskane wyniki badań zostały pogrupowane według procesów zachodzących w BKT.

Podczas analizy procesów cieplnych wykonano:

- pomiary czasu działania BKT dla prądu przeciążeniowego nieznacznie większego od prądu granicznego,
- pomiary obciążalności długotrwałej (określono dopuszczalną gęstość prądu dla topika krótkiego),
- obliczenia metodą elementów skończonych istotnych parametrów BKT, m.in. wpływu styku chłodzącego topik BKT na kształt charakterystyk $t - I$, wartości prądu znamionowego BKT w zależności od wyboru rodzaju lutu spajającego topik ze stykiem, prądu granicznego BKT (założenia do metody zweryfikowano porównując obliczony czas zadziałania BKT wynoszący 1305 s, z pomierzonym – równym 1360 s),
- obliczenia charakterystyk $t - I$ BKT dla różnych długości i średnic topika,
- obliczenia czasu zadziałania BKT w funkcji długości topika $t = f(l)$, długości topika w funkcji prądu $l = f(I)$. Takie charakterystyki mogą być pomocne konstruktorowi BKT do określenia rozmiarów topika od obciążalności, a następnie powiązanie parametrów BKT z wytrzymałością napięciową przerwy powstałej po wytopieniu topika,

Do wykonania pomiarów cieplnych zbudowano:

- model BKT,
- stanowisko probiercze o obciążalności prądowej 1600 A,

Podczas analizy procesów napięciowych wykonano:

- badania wytrzymałości statycznej przerwy po topiku,
- badania czasu wytapiania topika,
- badania czasu odzyskania własności izolacyjnych przerwy powstałej po wytopionym topiku w funkcji czasu wytapiania topika. Otrzymano zależność, którą proponuje się nazwać krzywą V – na jej podstawie której można określić optymalny czas zadziałania CHCL i sterowania tranzystora IGBT,

- eksperyment uwidaczniający proces przetapiania mostka topika w ostatniej fazie w czasie 1 μ s.
- obliczenia, które podobnie jak w poprzednim przypadku, opierały się na modelach cieplnych z założeniem osiowego odbierania ciepła z topika i przemieszczającej się strefy jego topnienia. Weryfikację obliczeń uzyskano porównując czasy wytapiania topika obliczonego, wynoszącego 35 – 40 μ s (tab. 5.5, rys. 5.18), z pomierzonym 30 – 35 μ s (tab. 5.2, rys. 5.12). Różnica pomiędzy obliczonym i pomierzonym czasem wytapiania może wynikać z dość zgrubnego podziału topika na 10 podobszarów.
- obliczenia czasu dejonizacji (chłodzenia) plazmy. Weryfikację obliczeń dokonano porównując obliczony czas dejonizacji plazmy wynoszący 105 μ s, z pomierzonym na podstawie krzywej V czasem wynoszącym ok. 90 μ s. Dokonano też dodatkowego sprawdzenia i potwierdzenia modelu obliczeniowego poprzez pomiar czasu trwania impulsu powstającego na wyjściu przetwornika świetlnego podczas stygnięcia plazmy (rys. 5.32), który wynosił ok. 22 μ s, podczas gdy obliczony czas dejonizacji wynosił 30 μ s (rys. 5.34).

Do wykonania badań napięciowych zbudowano:

- stanowisko z komorą próżniową,
- układ sterowania wyzwalany światłem łuku wyprowadzonym z wnętrza BKT za pomocą światłowodu lub też dodatkowo napięciem z topika,
- mikrobocznik umożliwiający pomiary prądów w gałęziach CHCL (załącznik 3),

Poniżej przedstawiono wnioski z rozprawy i wykonanych eksperymentów:

- a) Działanie BKT w CHCL podzielono na etapy związane głównie ze stanem skupienia materiału topika: stan stały dla prądów znamionowych i przeciążeniowych, stan ciekły strefy topnienia dla zagadnienia związanego z wytapianiem topika dla obliczania czasu wytopienia się całego topika, stan gazowy materiału topika dla obliczenia czasu dejonizacji przerwy po topiku. Obliczenia tych stanów przeprowadzono robiąc założenie przyjęte w tezie o pominięciu wpływu chłodzenia promieniowego i porównano z wynikami eksperymentu. Wnioskowano przy tym, iż gdyby założenia tezy, a więc i założenia obliczeń, były błędne, to uzyskane w ten sposób wyniki symulacji znacząco by się różniły od eksperymentalnych. W wyniku pomiarów uzyskano zgodność eksperymentów z obliczeniami, potwierdzając założenia przedstawione w tezie. Potwierdzenie metody obliczeniowej wskazuje na jej przydatność do dalszej analizy BKT.

Można stwierdzić, że dzięki przyjęciu do modelowania założenia iż:

BKT pracujący w układzie bezstykowego hybrydowego ogranicznika jest poprawnie opisany modelem zdominowanym przez osiowy przepływ ciepła w czasie przedlukowym i lukowym, a także w okresie połukowym podczas odbudowy wytrzymałości powrotnej, jest możliwe stworzenie jednolitej metody obliczeniowej opisującej w ten sam sposób pozornie różne procesy zachodzące w BKT. Wykazano tym samym, że przedstawione założenie do obliczeń będące jednocześnie tezą niniejszej pracy jest prawdziwe.

- b) Podczas pracy dla obciążenia długotrwałego bardzo istotne jest dobre połączenie topika ze stykiem wkładki krótkotopikowej. Obiecującym wydaje się zastosowanie technik montażu wyprowadzeń z obwodów układów scalonych, które powodują jednolite połączenie materiału topika z stykiem (załącznik 5).
- c) Skuteczne odprowadzanie ciepła jest warunkiem poprawnej pracy BKT, a tym samym i całego CHCL. W czasie pracy długotrwałej w BKT wydziela się istotna moc strat. Ze względu na małe rozmiary obiektu może to powodować znaczne lokalne zwiększenie temperatury i tym samym ograniczyć obciążalność BKT ze względu na temperaturę lutowia.
- d) Ze względu na potrzebę zachowania dobrej skuteczności chłodzenia BKT, styki odgrywające rolę chłodnicy należy dobrać z nadmiarem zdolności do rozpraszania ciepła.
- e) Zakres stosowalności funkcji (wzór 4.9) określającej charakterystykę $t = f(l, I)$ BKT przeanalizowano dla średnic topika $d = <0,08; 0,9>$ [mm] i długości $l = <1; 5>$ [mm].
- f) Na podstawie pomiarów stwierdzono, że długość przerwy izolacyjnej może wynosić 1 mm, w przypadku zastosowań BKT w warunkach niskiego napięcia do 1 kV. Zmniejszenie długości przerwy jest ograniczone technologią montażu topika, ale może poprawić szybkość dejonizacji dzięki wąskiej szczelinie w której znajduje się plazma.
- g) Czas $t1$ opóźnienia włączenia tranzystora IGBT, a więc czas wytapiania topika powinien być tylko tak długi, aby wytopić topik i uzyskać w ten sposób odpowiednią przerwę izolacyjną. Dalsze zwiększanie opóźnienia powoduje nadtopienie styków doprowadzających prąd i szkodliwe dla procesu wyłączania powstawanie dodatkowych par metalu. Czas wytapiania i opóźnienia włączenia tranzystora IGBT można określić na podstawie przedstawionej w pracy metody obliczeniowej.
- h) Czas dejonizacji $t2$ przerwy dla BKT pracującego w układzie CHCL można obliczać traktując plazmę jako obszar stygnący gazu o danej objętości. Jako warunek określający czas $t2$ można przyjąć obniżenie się temperatury plazmy poniżej 3000 K. Dzięki odpowiedniemu dobraniu konstrukcji wkładki krótkotopikowej można uzyskać szybkie ochłodzenie plazmy przez styki i tym samym skrócić czas $t2$.

- i) Cykl projektowania BKT dla sieci do 1 kV powinien zawierać następujące kroki: z analizy sieci należy wyznaczyć wartość prądu zwarciovego, z mocy odbiornika należy wyznaczyć obciążalność długotrwałą i dla tej obciążalności dobrać odpowiednią średnicę (długość) topika (ze względu na możliwość normalizacji wymiarów geometrycznych wkładek krótkotopikowych – proponuje się przyjmować stałą długość topika np. 1 mm, a obciążalność dobierać zmieniając średnicę topika).

Z przedstawionych charakterystyk w rozdziale 5 trzeba dobrać wstępnie średnicę i wykonać obliczenie sprawdzające czy temperatura w środku topika w stanie długotrwałego obciążenia nie przekracza wartości założonej (dla topików lutowanych $T < 200$ °C, przy innej technologii łączenia topika możemy założyć wyższą temperaturę). Wstępne obliczenia obciążalności długotrwałej topika są oparte o warunki brzegowe Dirichleta ustalające stałą temperaturę na okuciach BKT (idealne chłodzenie). W przypadku kiedy wyliczona temperatura jest wyższa od założonej, trzeba skorygować średnicę topika, aby uzyskać założoną temperaturę w jego środku.

Kolejne obliczenia muszą sprawdzić wpływ chłodzenia przez styki uwzględniając jednocześnie wpływ temperatury otoczenia na temperaturę topika. Rozwiązanie styków przyjmując należy według własnego projektu dostosowanego indywidualnie do warunków w rozdzielnii. W przypadku kiedy ustalona zostanie już odpowiednia średnica topika i sprawdzona skuteczność chłodzenia topika dla warunków znamionowej pracy BKT trzeba korzystając z metody z punktu 4.5.1. wyznaczyć czasy do osiągnięcia temperatury topnienia dla różnych wartości prądów w tym i dla prądu zwarciovego obwodu ogranicznika (tzn. wyznaczyć charakterystykę $t - I$). Charakterystykę można skorygować długością topika, chociaż ze względu na możliwość standaryzacji wkładek lepiej korygować przez dobór średnicy topika.

Znając wymiary topika, można według punktu 5.2.2. wyliczyć czas jego wytapiania dla prądu zwarciovego w zabezpieczanym obwodzie (czyli określić czas t_1 opóźnienia włączenia tranzystora IGBT). Ciepłne stałe czasowe topika są wielokrotnie mniejsze od stałych czasowych układu zabezpieczanego decydujących o przebiegu prądu zwarciovego, tak więc w obliczeniach można przyjąć wartość stałą prądu i traconej w topiku mocy. Korzystając z metody z punktu 5.3.4 wyznaczyć należy czas t_2 dejonizacji, czyli przewodzenia tranzystora IGBT (chłodzenia się plazmy). Całkowity czas ograniczenia jest sumą czasu wytapiania i dejonizacji. Znając całkowity czas ograniczania można wyznaczyć wartość prądu ograniczonego, energię oraz inne parametry zwarciove w danym punkcie sieci elektroenergetycznej, i dzięki temu ocenić czy CHCL jest wystarczająco skutecznym zabezpieczeniem.

Wynikiem projektu jest ogranicznik posiadający określoną obciążalność, wyliczoną charakterystykę $t - I$, i czas ograniczania dla prądu zwarciovego.

- j) Zasada działania ogranicznika CHCL stanowi o jego przydatności do zastosowania w układach prądu stałego w których występują istotne problemy z gaszeniem łuku stałoprądowego (przy czym CHCL może też być łatwo przekształcony do pracy w układzie symetrycznym przemiennoprądowym [61]). Obszarem zastosowań mogą być trakcyjne sieci zasilające prądu stałego. Z tego względu, że są one o dużych stałych czasowych to prąd w czasie działania tranzystora (przy czasie dejonizacji około 100 μ s) nie zdąży istotnie narosnąć powyżej wartości granicznej dla modułu IGBT 2400 A. W związku z tym można dopuścić z zapasem bezpieczeństwa prąd znamionowy ogranicznika (i BKT) ok. 1800 A (przy napięciu do 1 kV). Jest to główna zaleta CHCL, gdyż klasyczne wyłączniki muszą być dużych rozmiarów, aby mogły wyłączać łuk elektryczny prądu stałego o takich parametrach. Jednak wadą CHCL jest ciągły pobór energii potrzebny do pracy układu sterowania, jak i konieczność zapewnienia skutecznego chłodzenia topika.
- k) Najefektywniejsze ograniczenie prądu zwarciovego uzyskuje się starannie dobierając czasy sterowania tranzystora IGBT. Właściwy dobór czasów jest istotny ze względu na szybkość ograniczania prądu zwarciovego przez CHCL, co z kolei jest potrzebne dla uzyskania właściwych parametrów energii elektrycznej i ochrony urządzeń od skutków zwarc. Graficznym przedstawieniem powiązania czasu dejonizacji z czasem wytopiania jest krzywa V o danym nachyleniu. Można zauważyć, że zjawiskami fizycznymi łączącymi te dwa czasy są:
- temperatura plazmy (temperatura zależna jest od ilości wydzielonego ciepła i warunków chłodzenia, a więc czasu przepływu prądu). Do obliczeń przyjęto średnią wartość temperatury swobodnie palącego się łuku,
 - masa plazmy (masa plazmy która jest sumą masy odparowanego topika i nieokreślonej masy styków. Masę styków należy określić, jeżeli analiza jest prowadzona dla czasu większego od czasu optymalnego równego wytopieniu topika),

Analityczne wyliczenie całego przebiegu krzywej V jest skomplikowane gdyż należałoby znać m.in. jak zmienia się temperatura plazmy od wydzielonego ciepła, która jest miarą czasu palenia się łuku. Jeżeli jednak zgodnie z założeniem liczymy tylko optimum zadziałania BKT, czyli minimalny punkt krzywej V, to dopuszczamy jedynie do wytopienia topika. W takim przypadku parametr wejściowy do obliczeń dejonizacji, jak masa plazmy (topika), jest ściśle określony. Pozostałe wielkości fizyczne są przyjęte z uproszczeniem jednak obliczenia czasu dejonizacji, jak wcześniej wykazano, dają dobrą zbieżność z eksperymentem. Celem pracy było określenie czasów $t1$ i $t2$ służących takiemu sterowaniu

pracą ogranicznika aby uzyskać jak najszybsze wyłączenie prądu zwarciovego stąd też nie starano się opisać analitycznie całego przebiegu krzywej V.

Poniżej przedstawiono alternatywne konstrukcje ogranicznika których idea powstała w trakcie prac eksperymentalnych:

- a) Bezstykowy ogranicznik posiada wadę polegającą na potrzebie skutecznego i ciągłego od prowadzanie ciepła, dlatego możliwa byłaby odmiana polegająca na zastosowaniu topika o dużym przekroju i tym samym małych stratach. Przy detekcji prądu zwarciovego następowaloby „dopalenie” topika impulsem prądowym z wewnętrznego układu ogranicznika np. kondensatorów impulsowych (odmiana podobna do wybuchowego ogranicznika).
- b) Odmiana nadprzewodząca, w której topik krótki jest intensywnie chłodzony, dzięki czemu nie potrzeba odprowadzać ciepła bezpośrednio z styków o dużej powierzchni, a tylko lokalnie z małej objętości topika. W przypadku zwarcia bezpiecznik wychodzi z nadprzewodnictwa i przetapia się, dalszy cykl pracy jest taki jak przy bezstykowym ograniczniku prądu z bezpiecznikiem krótkotopikowym. Układem chłodzącym może być odpowiednio przystosowane ogniwo Peltiera. Takie ogniwa obecnie są łatwo dostępne i łatwo je zastosować. Topikiem może być nadprzewodnik wysokotemperaturowy.
- c) Rozpad topika może być przyspieszany dzięki siłom elektrodynamicznym. Konstrukcję CHCL można tak zaprojektować aby wykorzystać oddziaływanie sił elektrodynamicznych na topik. Można to osiągnąć przez instalowanie wkładki krótkotopikowej w torze prądowym wykonanym w kształcie pętli lub też przez odpowiednie ukształtowanie topika we wkładce.

Bardzo istotnym eksperymentem dla poznania rozpadu topika w BKT, a który to eksperyment ze względu na koszt, nie był przeprowadzony, byłaby obserwacja rozpadu topika przez kamerę ultraszybką. Pomierzony czas rozpadu topika i tworzenia się mostka wynosił 1 μ s, kamera powinna więc wykonywać około 10 klatek na 1 μ s, co przeliczając daje prędkość 10 mln klatek na sekundę. Proponowane rozwiązanie zastępcze mogłoby polegać na poklatkowej szybkiej fotografii przez odpowiednio synchronizowaną komórkę Kerra. W tym przypadku jednak trzeba rozwiązać problem użycia dość szkodliwego nitrobenzenu polaryzowanego bardzo krótkotrwałymi (100 ns) impulsami wysokiego napięcia (ok. 30 kV).

7. Osiągnięcia

Zdaniem Autora, osiągnięciami pracy są:

1. Wcielenie w czyn idei BKT powstałej w Katedrze Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych Politechniki Gdańskiej. Eksperymentalne zbadanie i opisanie istotnych własności BKT.
2. Zbudowanie stanowiska próżniowego i probierczego na 1600 A wraz z modelem BKT.
3. Opracowanie głównych punktów, które należy uwzględnić przy obliczeniu BKT dla pracy w układzie CHCL. Obliczenia sprowadzają opis procesów: przedłukowego, wytapiania topika, dejonizacji, do analizy odpowiedniego modelu cieplnego tj. pola termicznego przy chłodzeniu osiowym poprzez styki BKT. Rozwinięcie metody i znaczne jej ulepszenie można dokonać przez stworzenie jednej funkcji opisującej przebieg rezystywności i pojemności cieplnej materiału topika dla różnych stanów skupienia. Zastosowanie przedstawionej metody umożliwia niekorzystanie ze skomplikowanych wzorów przybliżonych, powstałych na podstawie wyników eksperymentów innych autorów.
4. Wyznaczenie możliwych kierunków dalszych badań innych rozwiązań BKT i CHCL opisanych w rozdziale 6 pracy doktorskiej, a także przedstawienie metody obliczeniowej, która może być udoskonalona przez innych autorów.

8. Literatura

1. Akademia Nauk Ukrainy SSR: Silnotocznyje elektriczeskije kontakty. Izdatelstwo „Naukowa Dumka”, Kiev 1970
2. Au A., Maksymiuk J., Pochanke Z.: Podstawy obliczeń aparatów elektroenergetycznych, WNT, Warszawa 1976
3. Ayyaswamy P. S., Das G. C., Cohen I. M.: Thermal and electrical characteristics of a two-dimensional tanh-conductivity arc. Dept. Of Mechanical and Applied Mechanics, Univ. of Pennsylvania, Philadelphia 6 Jan 1977
4. Borkowski A.: Zasilanie urządzeń elektronicznych, WK i Ł Warszawa 1990
5. Brauner G., Hennerbichler Ch.: Voltage dips and sensitivity of consumers in low voltage networks, Conference publications No. 482, Cigred 2001
6. Bussiere W.: Estimation of the burn-back rate in high breaking capacity fuses using fast imagery. 2001 J. Phys. D: Appl. Phys. 34 1007-1016
7. Chase W. G., Moore H.K.: Exploding Wires. Plenum Press NY 1959 vol 1
8. Ciok Z.: Ćwiczenia z termodynamiki łączników. Wydawnictwo PW. Warszawa 1969

9. Collart P., Pellichero S.: „A new high speed DC circuit breaker: the DHR”. IEE Colloquium organised by Professional Group P6 and P2. Digest No. 1989/137 22 Nov. 1989
10. Daalder J.E. : The arcing voltage in high voltage fuses. Int. Conf. On Electr. Fuses and Their Appl. June 1984 Trondheim Norway
11. Dauby B., Defise J. M., Legros W., Scarpa P.: Numerical simulation of an arc column. SAP VI Int. Symposium 12-15 Sep. Łódź 1989
12. Dmochowski Z.: Możliwe zakłócenia w pracy systemów informatycznych związane z niedostateczną jakością energii elektrycznej, Energotest – Energopomiar
13. Dokumentacja programu FLUX
14. Dołęgowski M.: Obliczanie przebiegów wielkości wyłączeniowych bezpieczników ograniczających prąd. Praca doktorska. Politechnika Gdańska. Gdańsk 1978
15. Encyklopedia fizyki. PWN Warszawa 1972
16. Encyklopedia techniki: Elektronika. WNT Warszawa 1983
17. Flisowski Z.: Technika wysokich napięć, WNT, Warszawa 1988
18. Grant 8 8244 9203 „Wyłączanie prądu zwarciovego metodą wstrzykiwania prądu obwodowego” Gdańsk 1994
19. Grant 8 T10A 029 08 „Ogranicznik prądu zwarciovego, hybrydowy AC/DC ze stykiem plastycznym i wstrzykiwaniem prądu obwodowego” Gdańsk 1997
20. Grant 8 T10A 038 14 „Superszybki łącznik GTO – zestykowy o wielkiej zdolności wyłączalnej” Gdańsk 2000
21. Groszkowski J.: Technologia wysokiej próżni. PWT Warszawa 1955
22. Hasan S., Żyborski J., Lipski T., Pikoń M., Wittstock J.: A hybrid current limiter device for DC circuit protection
23. Hering M.: Termokinetyka dla elektryków, WNT Warszawa 1980
24. I_s – Limiter Handbook, ABB Calor Emag Schaltanlagen AG 1966
25. Itoh T., Miyamoto T.: Permanent Power Fuse. IEEE Summer Power Meeting, Los Angeles 1970 No CP 0-601-PWR
26. Jakubiuk K., Aftyka W.: Heating of fuse – elements in transient and steady – state. 7th International Conference on Electrical Fuses and Their Application, Gdańsk – Jurata, September 2003
27. Jakubiuk K.: Secondary stritration during fuse – elements disintegration, Technical University of Gdańsk, Gdańsk
28. Karty katalogowe tranzystorów IGBT Mitsubishi Semiconductors dostępne w wersji elektronicznej 2000
29. Katalog: Power module MOS. Mitsubishi Semiconductors 1995

30. Koc L.: Badanie elementu izolacyjnego w bezp. dwusieczkowym, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1985
31. Kumpulainen L., Hautala J., Kauhaniemi K.: Voltage dip migration possibilities in industrial distribution systems
32. Leśniewski P., Holc A., Semenowicz B.: The effect of arc model on simulation of a hybrid circuit breaker operation, 10th International Symposium on Short-Circuit Currents in Power Systems, Łódź 2002
33. Leśniewski P., Semenowicz B., Gohra K.: Influence of circuit parameters on the process of current transfer in the hybrid circuit breaker, 13th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, Plovdiv, Bulgaria, May 2003
34. Leśniewski P., Semenowicz B., Partyka R.: Effect of contactless hybrid current limiter on voltage dips in power system, 7th International Conference on Electrical Fuses and Their Application, Gdańsk- Jurata, September 2003
35. Leśniewski P., Thustochowicz Ł.: Wpływ sterowania ogranicznika prądów zwarciovych na jakość energii elektrycznej. Zeszyty naukowe wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 21, Gdańsk 2005
36. Linhart J. G.: Fizyka plazmy. WNT Warszawa 1963
37. Lipski T.: Bezpieczniki niskonapięciowe. WNT Warszawa 1968
38. Materiały dostępne w sieci Internet
39. Mioshi N., Fukushima O.: Ultra – high speed protection device – Fuji Ultrup Fuse. Fuji Electric Review, vol. 18, No 1
40. Nasiłowski J.: Badanie podziałki rozpadu drutów topikowych. Praca doktorska. IEL. 1965 Warszawa
41. Norma PN – EN 50160 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych. PKN 1998
42. Ogurtsova N. N., Podmoshenskii I. V., Rogovtsev P. N.: Calculation of the parameters of an optically dense plasma obtained by a discharge with an evaporating wall. Plenum Press NY 1971
43. Penuelas C., Fernandez L., Gonzales R.: Minimum breaking current obtaining in fuses. Universidad Politecnica de Valencia
44. Pikoń M., Żyborski J., Lipski T.: „Urządzenie do szybkiego ograniczania i wyłączania prądów zwarciovych” Pat. Nr Pl 173 366 B1
45. Praca zbiorowa: Poradnik materiałoznawstwa elektrycznego. PWT Warszawa 1959
46. Grant 4 T10A 079 22 „Bezpiecznik krótkotopikowy budowa modelu fizycznego i matematycznego” Politechnika Gdańska, Gdańsk 2003

47. Ruchti C. B.: Cylindricity of Ablation-Controlled Arcs. IEEE Transactions on plasma science, vol 16 No. 1. Feb. 1988
48. Semenowicz B., Leśniewski P., Gohra K.: Operation of an ultra-short fuse shunted by semiconductor device, 13th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, Plovdiv, Bulgaria, May 2003
49. Semenowicz B., Partyka R.: Dielectric strenght of the ultra-short fuse, 7th International Conference on Electrical Fuses and Their Application, Gdańsk- Jurata, September 2003
50. Slot J., Van Herel J., Meng X.: Thermal modeling of a miniature fuse with pspice. Proceedings of 2nd Intern. Conference on Eletr. Contacts, arcs, apparatus and applications. May 1993
51. Stenc K.: Two – pass fuse with variety of insulations gases. University of Technology in Gdansk 2001
52. Tablice wielkości fizycznych – Internet
53. Tennakoon S. B., McEwan P. M.: Circuit topologies for thyristor circuit breakers. Proceedings of 2nd Intern. Conference on Eletr. Contacts, arcs, apparatus and applications. May 1993
54. The Mathworks: Power system blockset for use with Simulink – User’s Guide (ver. 1, Jan. 1998, The Mathworks, Inc., 24 Prime Park Way Natick, MA 01760-1500
55. Turner H. W., Turner C.: Calculation of the burn – back rate of a fuse element and its relation to contact erosion, III Międzynarodowe sympozjum Elektryczny łuk łączeniowy, Łódź 1977
56. Vermij L., Daalder J.E.: Energy balance of fusing silver wires surrounded by air. TH-Report 68-E-05, University of Technology of Eindhoven, Nov. 1968
57. Wesołowski W.: Opracowanie konstrukcji i badania toru prądowego bezp. dwuścieżkowego prądu stałego, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1999
58. Wilniewicz M., McEwan P. M.: Finite – element analysis of thermally – induced film de – bonding in single two – layer thick – film substrate fuse. Sheffield Hallam Univ. UK
59. Wolny A., Semenowicz B., Leśniewski P.: Features of a short fuse, as a main current path of a contactless hybrid current limiter, 10th International Symposium on Short-Circuit Currents in Power Systems, Łódź 2002
60. Wolny A., Semenowicz B.: Hybrid contactless short-circuit current limitation 10th International Symposium on Short-Circuit Currents in Power Systems, Łódź 2002
61. Wolny A.: A new method of current limitation, 7th International Conference on Electrical Fuses and Their Application, Gdańsk- Jurata, September 2003
62. Wolny A.: Current breaking through commutation. TUG Publishing. Gdańsk 2001

63. Żyborski J., Holc A.: Energy quality improvement by ultra rapid l.v. fault current limiting and interrupting, 10th International Symposium on Short-Circuit Currents in Power Systems, Łódź 2002
64. Fan H. G., S – J Na, Y. W. Shi: Numerical simulation of current density in gas tungsten arc welding including the influence of the cathode Proc, Instn. Mech. Engrs Vol. 211 part B 1997
65. Wang F., W. K. Hou, S. J. Hu, E. Kannatey – Ashibu, W. W. Schultz, P. C. Wang: Modelling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding, Institute of physics publishing J. Phys. D: Appl. Phys. 36 (2003) 1143 – 1152
66. Lago F., Gonzales J. J., Freton P., Gleizes A., A numerical modelling of an electric arc and its interaction with anode: Part I The two-dimensional model, Jurnal of Physics D: Appl. Phys. 37 883 – 897 2004
67. Quigley M. B. C., Richards P. H., Swift – Hook D. T., Gick A. E. F.: Heat flow to the workpiece from a TIG welding arc, J. Phys D: Appl. Phys., Vol 6 1973 GB
68. Au A., Ciok Z., Aparaty Elektryczne cz. I Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej Warszawa 1975
69. Ciok Z., Procesy łączeniowe w układach elektroenergetycznych, WNT Warszawa 1976
70. Kovitya P.: Thermodynamics and transport properties of ablated vapors of PTFE, alumina, perspex and PVC in the temperature range 5000 – 30000 K. IEEE Trans., vol. PS –12, No 1, 1984, pp. 38 – 42
71. I. Bronsztejn, K. Siemiendiajew Poradnik Encyklopedyczny Matematyka PWN Warszawa 1959
72. Strona domowa programu <http://www.gnuplot.info>

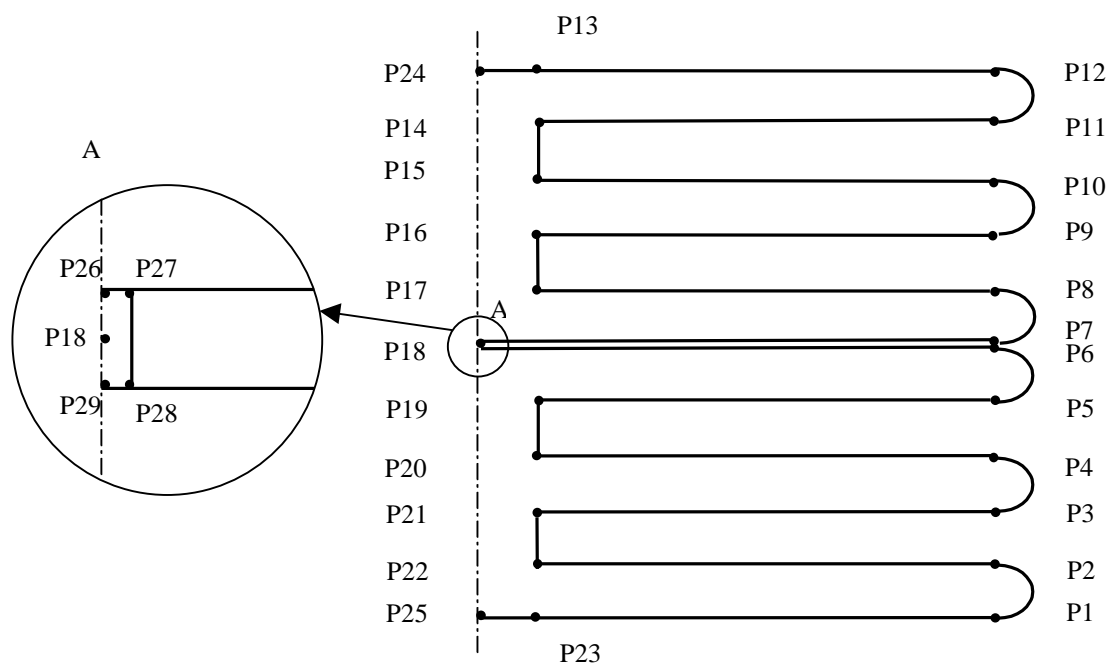
Załącznik 1

Modelowanie rozwiązania okuć chłodzących BKT w programie FLUX.

Poniżej przedstawiono etapy przygotowania modelu:

1. Geometria.

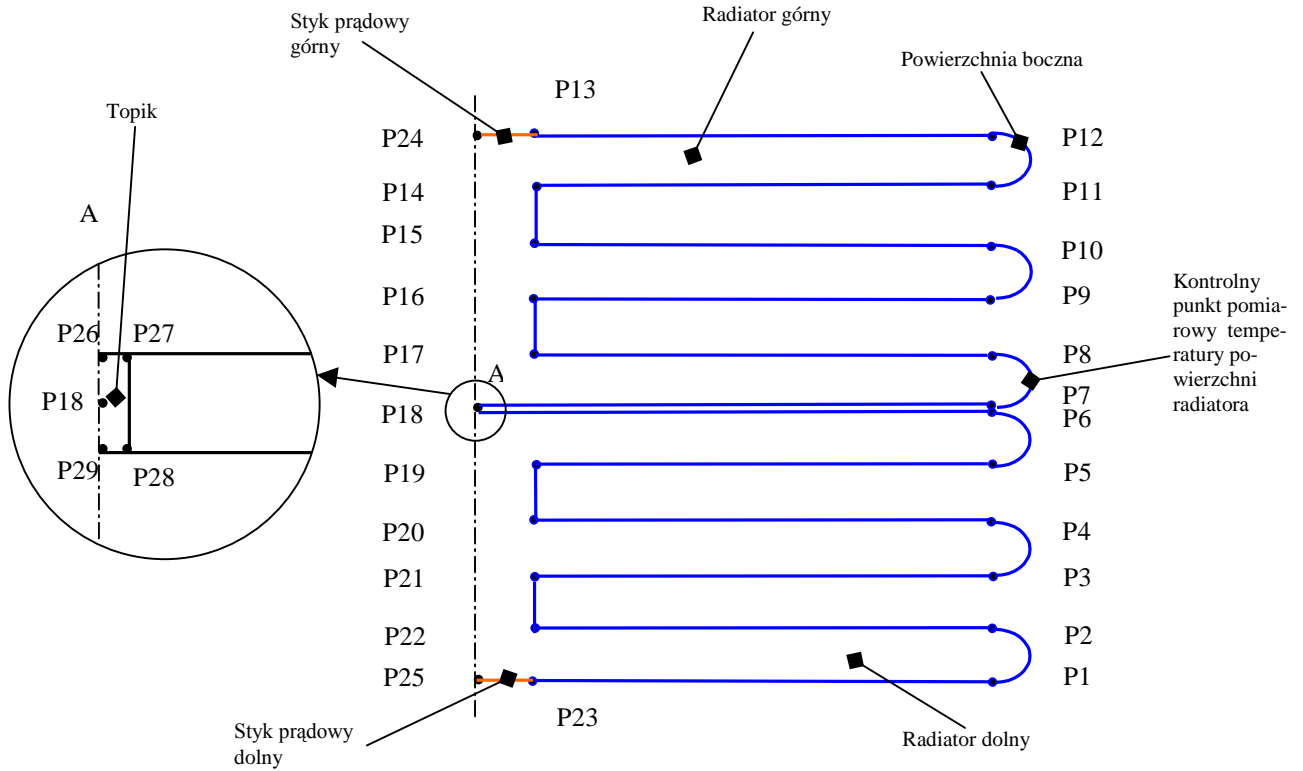
Symulacji dokonano przyjmując, rozwiniętą powierzchnię boczną okuć. Analizy dokonano dla trzech i sześciu żeber aby sprawdzić wpływ ilości żeber na temperaturę topika.



Tab. Z1 – 1 Współrzędne punktów w modelu

P1	(95; -50,5)	P11	(95; 40,5)	P21	(10; -30,5)
P2	(95; -40,5)	P12	(95; 50,5)	P22	(10; -40,5)
P3	(95; -30,5)	P13	(10; 50,5)	P23	(10; -50,5)
P4	(95; -20,5)	P14	(10; 40,5)	P24	(0; 50,5)
P5	(95; -10,5)	P15	(10; 30,5)	P25	(0; -50,5)
P6	(95; -0,5)	P16	(10; 20,5)	P26	(0; 0,5)
P7	(95; 0,5)	P17	(10; 10,5)	P27	(0,15; 0,5)
P8	(95; 10,5)	P18	(0; 0)	P28	(0,15; -0,5)
P9	(95; 20,5)	P19	(10; -10,5)	P29	(0; -0,5)
P10	(95; 30,5)	P20	(10; -20,5)		

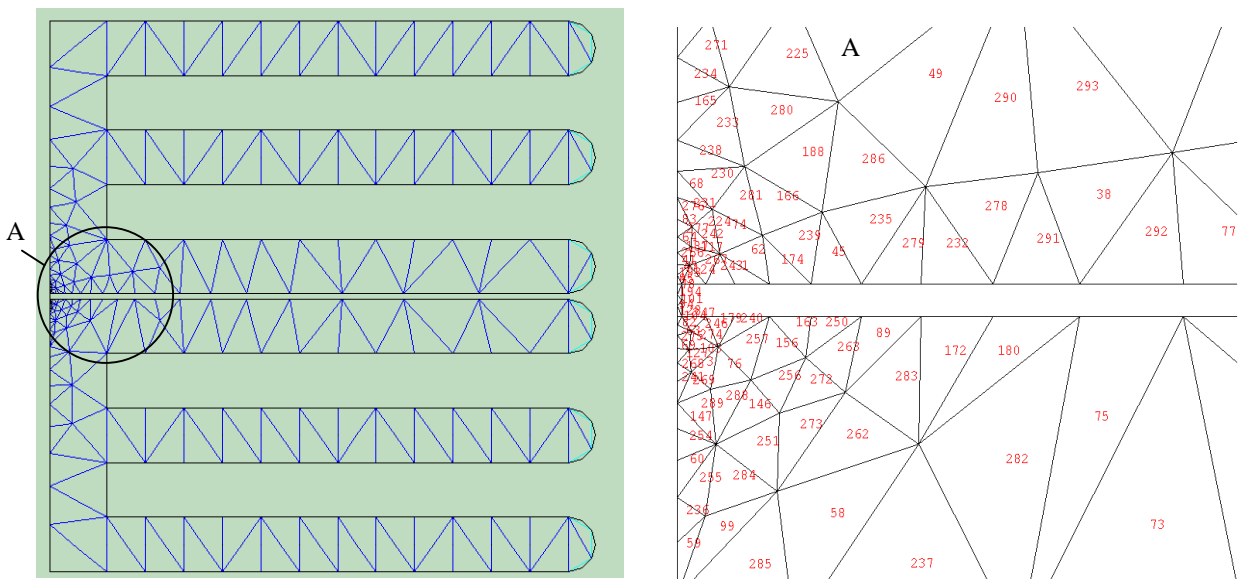
2. Regiony używane w modelu



Rys. Z-1.1 Model okucia chłodzącego

Użyto trzech regionów powierzchniowych wypełniających przekrój poprzeczny modelu, oraz trzech regionów liniowych opisujących boczne powierzchnie wymiany ciepła z otoczeniem i szynami doprowadzającymi prąd do bezpiecznika.

4. Siatka FEM



Rys. Z1-2. Siatka elementów skończonych na okucie wkładki krótkotopikowej i powiększenie obszaru topika z ponumerowanymi elementami siatki

5. Własności fizyczne użytych regionów.

Zdefiniowanym w poprzednim etapie regionom przypisano własności przedstawione w tab. Z1-2.

Tab. Z1-2 Zestawienie własności regionów

Lp	Region	Opis	Materiał	Najważniejsze własności	Straty mocy
1	G	okucie górne	miedź	$K = 380 \text{ W/m}^2\text{K}$	
2	D	okucie dolny	miedź	$K = 380 \text{ W/m}^2\text{K}$	
3	T	topik	miedź	$K = 380 \text{ W/m}^2\text{K}$	Zależne od prądu
4	Sg	styk górny	Brak materiału	Grubość 1 mm	
5	Sd	styk dolny	Brak materiału	Grubość 1 mm	
6	B	powierzchnia boczna	convcu	$K = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$ Rad = 0,8 Konwekcja = 20 $\text{W/m}^2\text{K}$	

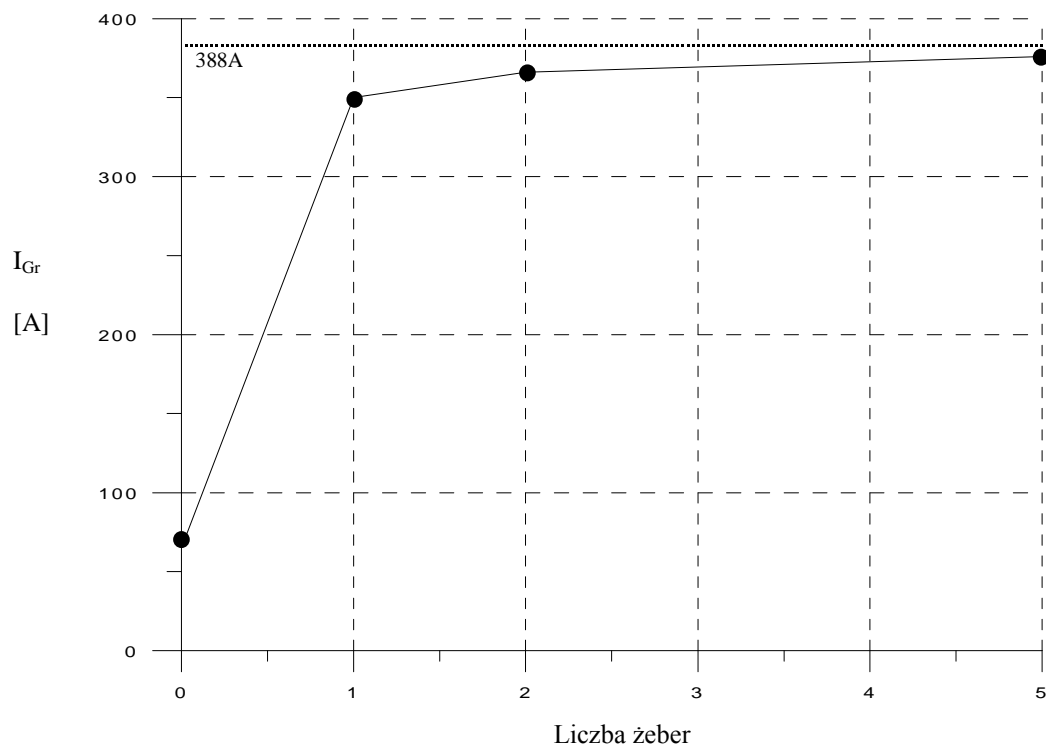
5. Obliczenia

Obliczenia wykonano dla przypadku stanu ustalonego aby stwierdzić jaki jest wpływ chłodzenia na długotrwałe obciążenie wkładki krótkotopikowej. Wyniki obciążalności i temperatury na powierzchni okucia w zależności od jego powierzchni są przedstawione na rys. Z-1.3 i Z-1.4. W głównej części opisowej pracy przedstawiono prąd graniczny wkładki i temperaturę na okuciu w zależności od rezystancji termicznej pomiędzy okuciem a otoczeniem co stanowi uogólnienie wyników obliczeń. Rezystancja termiczna jest bezpośrednio związana z powierzchnią okucia przez którą następuje wymiana ciepła z otoczeniem. Przy znajomości wymiarów i współczynnika oddawania ciepła możliwe było wyznaczenie rezystancji termicznej.

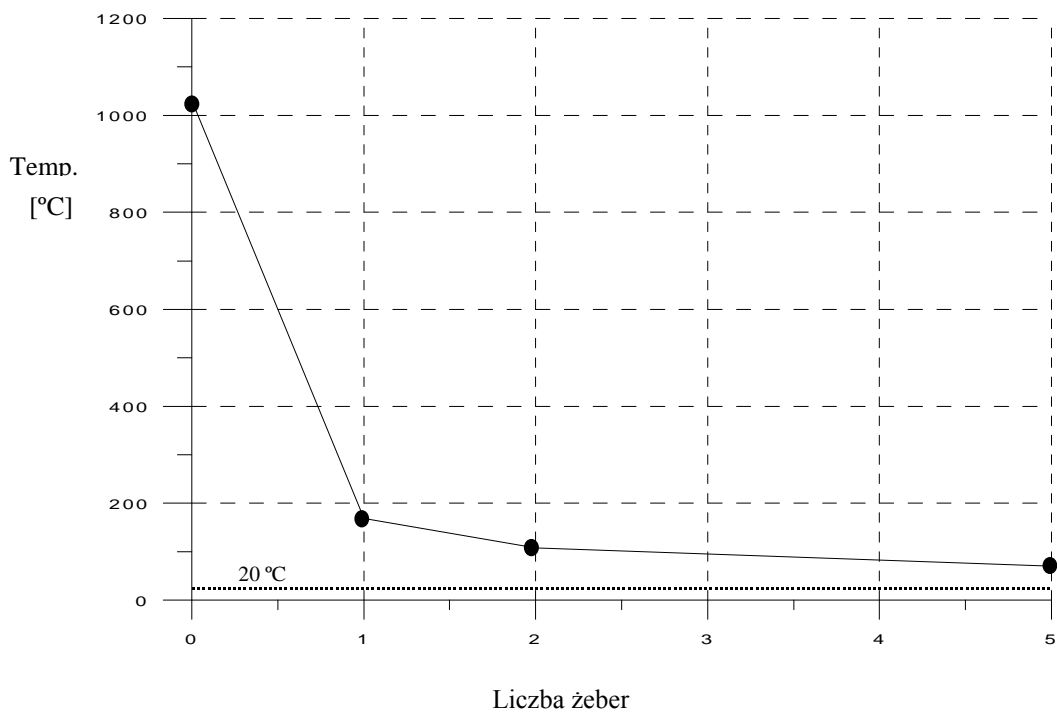
7. Wyniki

Na podstawie przedstawionego na rys. Z-1.3. przebiegu można stwierdzić, że zastosowanie więcej niż dwóch żeber nie wpłynie istotnie na poprawienie obciążalności BKT. Teoretyczna maksymalna obciążalność BKT w przypadku nieskończenie dobrego odprowadzania ciepła z topika wynosiła 388 A i została zaznaczona poziomą linią. W przypadku użycia okucia z 5 żebrami obciążalność BKT wynosi 376 A, natomiast bez dodatkowego chłodzenia wkładka może przewodzić tylko 65 A. Mimo, że liczba żeber powyżej 2 nie wpływa istotnie na zwiększenie obciążalności BKT to jednak ma duży wpływ na temperaturę na powierzchni okucia chłodzącego, rys. Z-1.4. Dla 2 żeber powierzchnia w punkcie kontrolnym oznaczonym na rys.

Z-1.1 osiąga 106 °C, a dla 5 żeber już tylko 70 °C. Wymagania dotyczące temperatury na powierzchni mogą być decydujące dla doboru wielkości okucia chłodzącego.



Rys. Z-1.3. Prąd graniczny BKT w funkcji liczby żeber

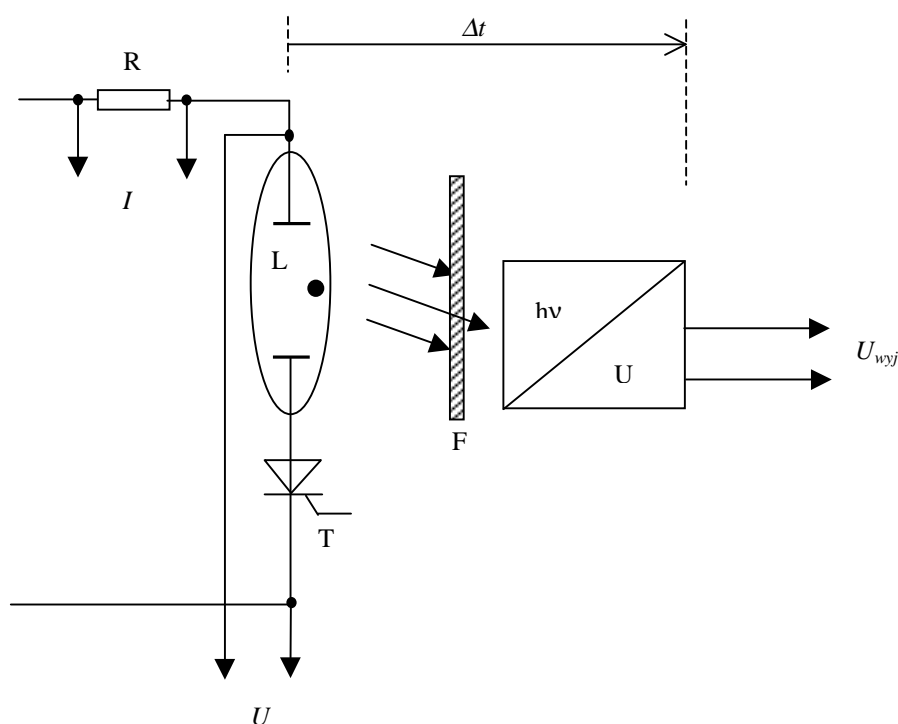


Rys. Z-1.4. Temperatura na powierzchni okucia chłodzącego w zależności od liczby żeber

Załącznik 2

Skalowanie przetwornika elektrooptycznego do sterowania tranzystora IGBT

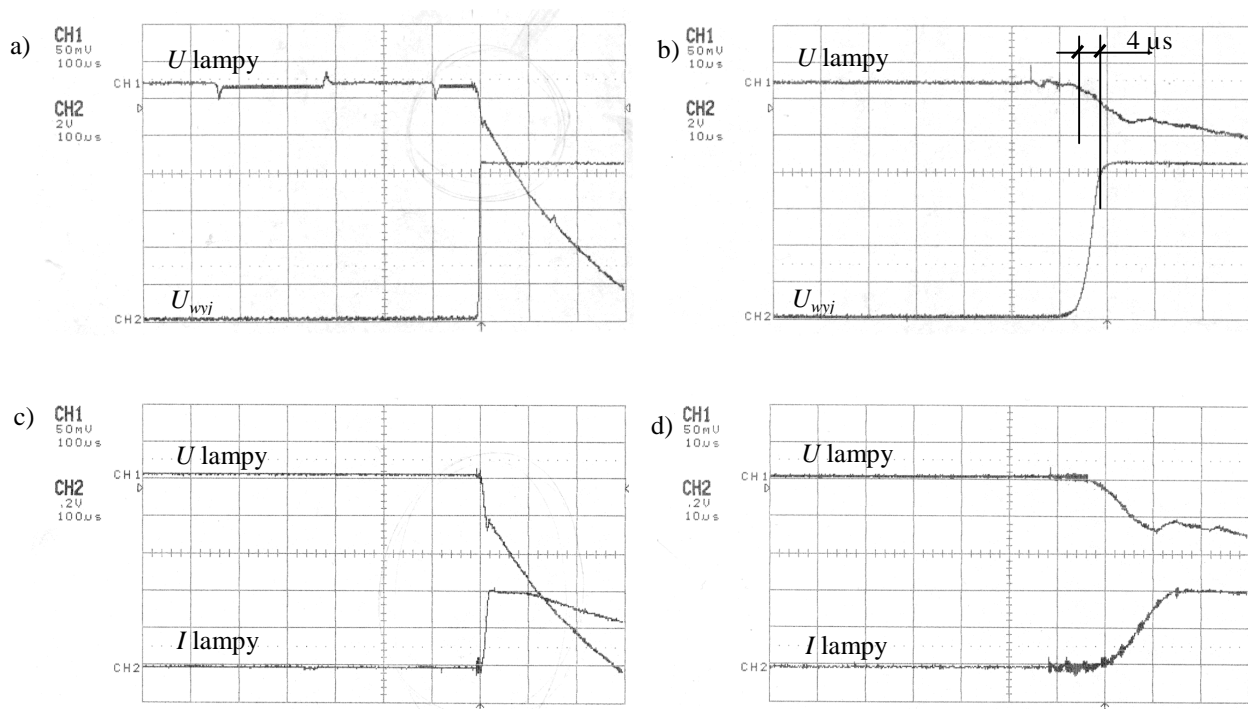
Celem pomiarów było stwierdzenie szybkości czasów propagacji układu przetwornika świetlnego i o ile to możliwe wyznaczenie czasu zerowego (progowego) od którego będzie można mierzyć kolejno zachodzące zjawiska w topiku. Fotodetektora używano do wykrywania światła łuku elektrycznego wyprowadzonego ze szczeliny BKT. Sygnał świetlny po pobudzeniu czujnika był zamieniony na sygnał elektryczny sterujący tranzystor. Ze względu na potrzebę uzyskania stromego impulsu światła do skalowania układu użyto lampy błyskowej oświetlającej fotelement i następnie rejestrowano sygnał wychodzący. Po wyzwoleniu lampy błyskowej wewnątrz niej pojawia się łuk elektryczny którego napięcie było mierzone oscyloskopem. Tyrystor lampy błyskowej był wyzwalany z zewnętrznego układu sprzęgniętego z wyzwaniem podstawy czasu oscyloskopu. Do identyfikacji czasów mierzono prąd i napięcie palnika błyskowego. Aby sprawdzić czułość przetwornika świetlnego używano filtrów światła (rys. Z-2.1).



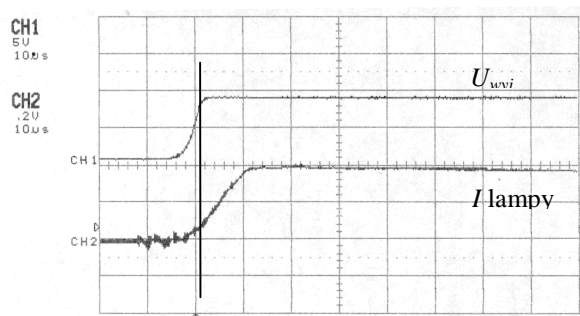
Rys. Z-2.1. Układ do pomiar czasów własnych przetwornika elektrooptycznego (EO). R – rezystor do pomiaru prądu lampy błyskowej, L – lampa błyskowa, T – tyrystor wyzwalany impulsem zapłonowym, F – filtr światła, I – prąd lampy błyskowej, U – napięcie na lampie, $h\nu/U$ – przetwornik EO, U_{wyj} – Napięcie wyjściowe, Δt – czas własny przetwornika EO

Na rys. Z-2.2.a. przedstawiono przebieg napięcia wyjściowego z przetwornika EO w zestawieniu z napięciem lampy, a na rys. Z-2.2.c. przedstawiono przebieg prądu lampy zestawiając napięciem na lampie. Napięcie z przetwornika EO stanie nasycenia osiągało 8 V. Zauważono,

że czas od którego można wyznaczać opóźnienie własne przetwornika EO jest nieoznaczony i z pomiarów nie można było go jednoznacznie wyznaczyć bowiem nie było możliwe stwierdzenie w którym momencie przebiegu prądu wyładowania w lampie błyskowej e na wyjściu przetwornika EO (czyli przy jakim już prądzie lampa świeci na tyle aby zadziałał przetwornik). Przy rozciągnięciu podstawy czasu (rys. Z-2.2.b) można zauważyć, że napięcie wyjściowe z przetwornika osiąga 90 % napięcia nasycenia (8 V) po około 4 μ s od rozpoczęcia się przepływu prądu w palniku błyskowym. Moment ten objawiał się spadkiem napięcia na lampie do napięcia łukowego. Tak samo na rys. Z-2.2.d. przebieg prądu lampy jest opóźniony względem spadku napięcia na lampie co prawdopodobnie było związane z rozwojem wyładowania łukowego. Pomiarów czasu własnego dokonano bez użycia filtru tak aby przetwornik szybko wchodził w stan nasycenia.

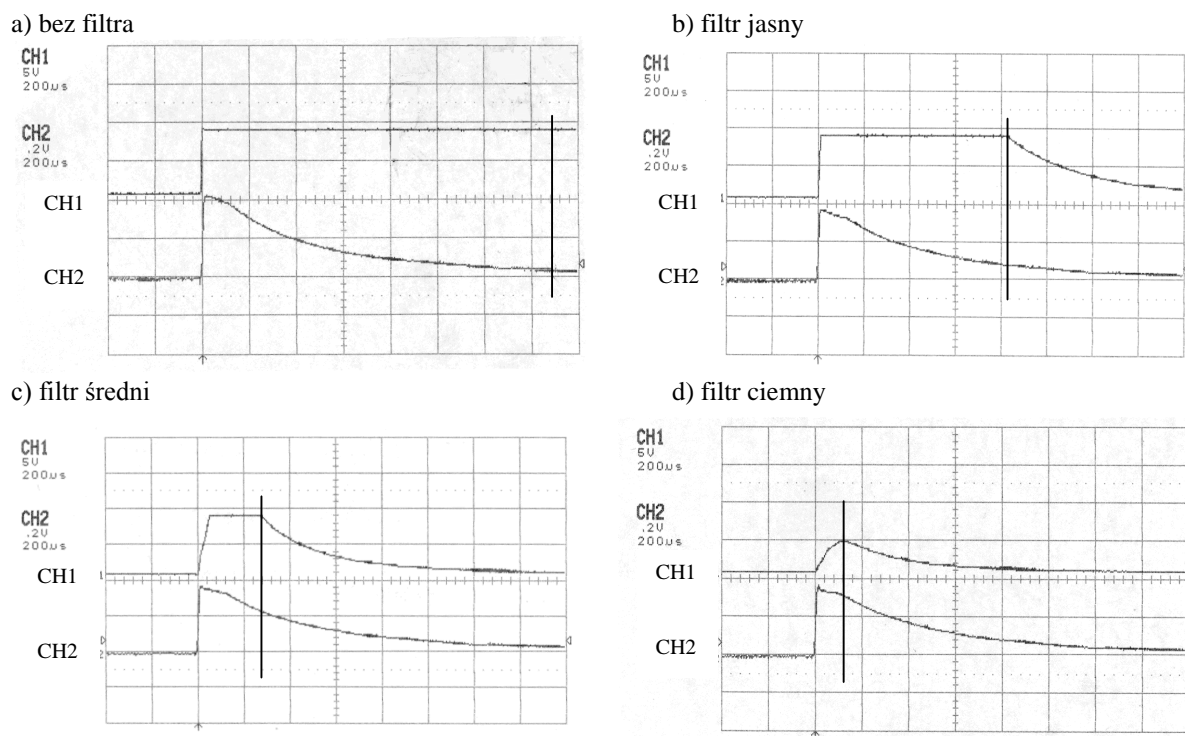


Rys. Z-2.2. Oscylogramy z układu na rys. Z-2.1, po prawej stronie powiększenie podstawy czasu 10x



Rys. Z-2.3. Oscylogramy z układu na rys. Z-2.1, przebieg napięcia wyjściowego przetwornika z prądem lampy. Linia zaznaczono wartość prądu przy której napięcie przetwornika EO ma pełną wartość. Pomiarów dokonano bez użycia filtru aby uzyskać maksymalną czułość

Na rys. Z-2.3. przedstawiono sygnał wyjściowy z przetwornika EO na tle prądu lampy, sygnał osiąga już pełną wartość dla prądu wyładowania lampy wynoszącego dopiero około 1/5 amplitudy (zaznaczone pionową linią). Mimo, niemożliwe było dokładne określenie czasu początkowego to można stwierdzić, że całkowite opóźnienie przetwornika nie przekraczało 4 μ s. Znając wnoszone opóźnienie można wnioskować, że w rzeczywistym układzie w chwili powstania impulsu bramkowego tranzystora IGBT łuk elektryczny w szczeliny topika musiał istnieć co najmniej 4 μ s.



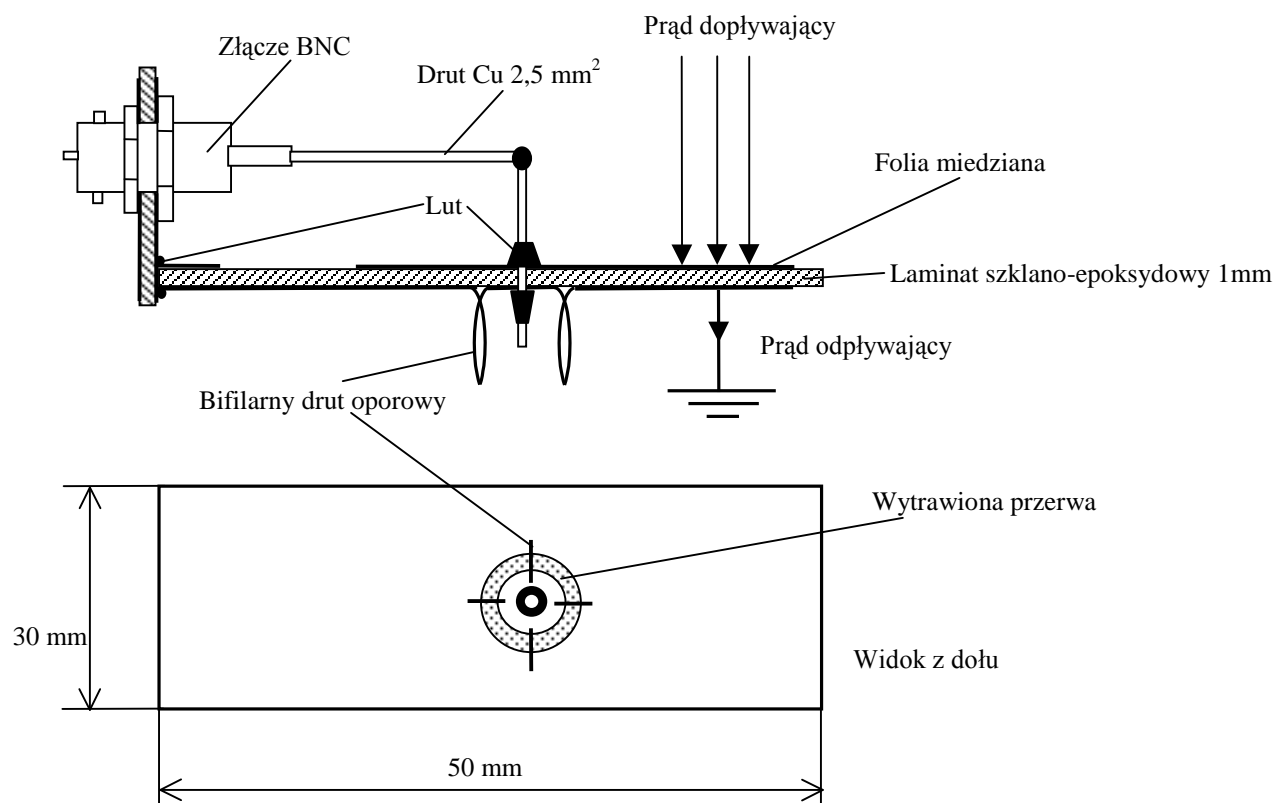
Rys. Z-2.4. Sygnał z przetwornika świetlnego w zależności od przezroczystości filtra. Pionową linią zaznaczono wartość prądu dla której jest pełna wartość napięcia przetwornika EO. CH1 – pomiar sygnału wyjściowego przetwornika, CH2 – pomiar prądu wyładowania lampy błyskowej

Na rys. Z-2.4. przedstawiono przebieg sygnału uzyskanego z przetwornika w zależności od użytego filtra. Dodatkowy filtr używano aby zmniejszyć czułość przetwornika do pomiaru światła bez wprowadzenia układu w nasycenie. Widać, że w przypadku potrzeby szybkiego wykrycia światła pojawiającego się już we wczesnej fazie rozpadu należy używać przetwornika bez filtra, opóźnienie wtedy wynika tylko z opóźnienia własnego przetwornika. Układ rejestruje światło łuku już przy bardzo małych wartościach prądu wyładowania w lampie (linia pionowa) rzędu $0,1 I_{max}$. Dla filtru ciemnego rys. Z-2.4.d. sygnał max. był uzyskany dla amplitudy prądu $0,9 I_{max}$ (dla filtru jasnego $0,25 I_{max}$, a dla średniego $0,5 I_{max}$). Dzięki wysokiej czułości układ wykrywał już wczesną fazę rozpadu topika. Do sterowania tranzystora IGBT używano przetwornika bez filtra aby uzyskać dużą szybkość i prostokątny przebieg sygnału bramkowego.

Załącznik 3

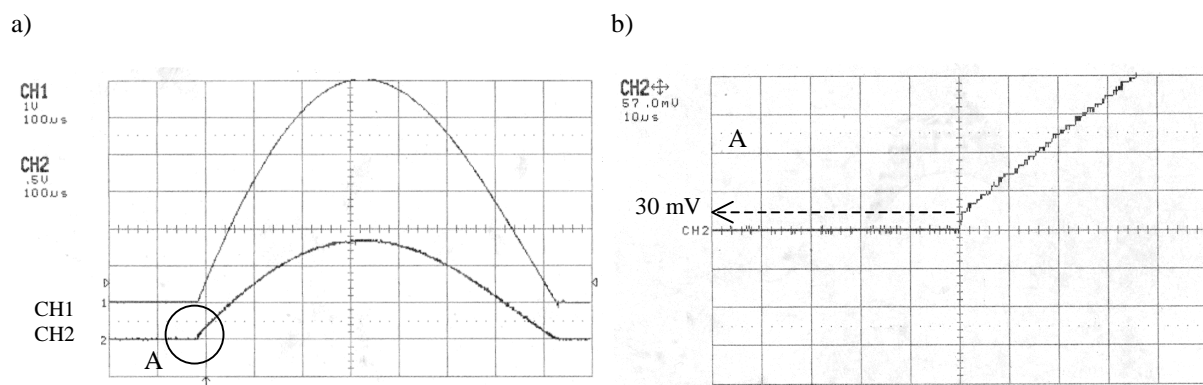
Skalowanie bocznika miniaturowego do pomiaru prądu w gałęzi tranzystora IGBT hybrydowego ogranicznika prądów

Do pomiaru prądów składowych w poszczególnych gałęziach ogranicznika zbudowano miniaturowe boczniki (rys. 5.6). Prądy mierzono w gałęzi bezpiecznika, tranzystora IGBT, warystora. Główny prąd zasilający ogranicznik był mierzony przez LEM prądowy 2 kA. Napięcie na ograniczniku było mierzone sondą polową (pokazaną na rys. 5.6 na drugim planie). Bocznik został zbudowany na płycie drukowanej dwuwarstwowej (rys. Z-3.1). Rozwiązanie takie umożliwiało zastosowanie bocznika jako „podkładki” pod np. zacisk topika czy też pod mocowanie tranzystora, wtedy prąd wpływał jedną płaszczyzną a wypływał drugą dociśniętą do uziemionej szyny.



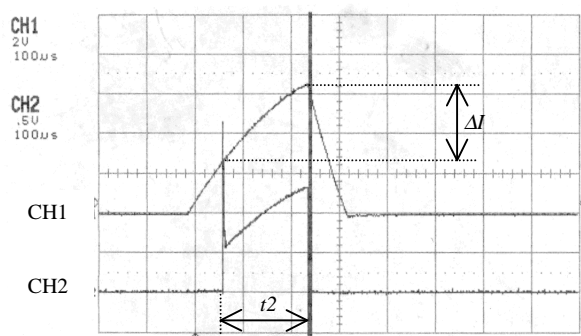
Rys. Z-3.1. Bocznik miniaturowy

Bocznik składał się z czterech równoległych bifilarnych skrętek o całkowitej długości 20 mm każda wykonanych z drutu oporowego średnicy 0,5 mm, rozmieszczonych symetrycznie na obwodzie pola lutowniczego. Sprawdzono, że obciążalność bez istotnego nagrzania wynosiła 3 kA dla półfali 500 μs , a półfala prądu 5 kA, $t = 1 \text{ ms}$ powodowała już nagrzanie powyżej 250 $^{\circ}\text{C}$ i uszkodzenie bocznika.



Rys. Z-3.2. Skalowanie bocznika miniaturowego i powiększenie części przebiegu zaznaczonej okręgiem dla sygnału uzyskanego z bocznika (wejście CH2). Strzałką zaznaczono napięcie 30 mV wynikające z indukcyjności własnej bocznika. Kanał CH1 mierzył prąd z LEMa, a CH2 prąd z bocznika

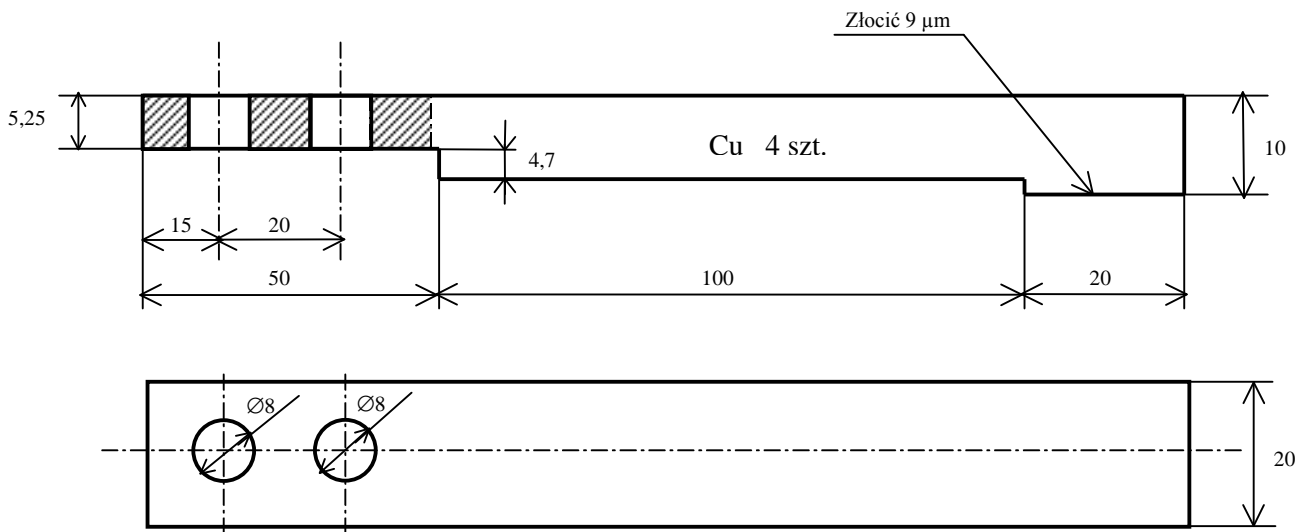
Skalowanie bocznika przeprowadzono porównując kształt przebiegu sygnału otrzymanego z LEMa z sygnałem bocznika. Na rys. Z-3.2. kanał 1 (CH 1) mierzył prąd z LEMa, amplituda prądu po przeliczeniu wynosiła 1,5 kA (6 V) i odpowiadający jej sygnał z bocznika (CH 2) wynosił 1,3 V. Na rys. Z-3.2 b. powiększono część narastającą przebiegu. Widać, że amplituda sygnału związana z indukcyjnością bocznika wynosi 30 mV co było wartością pomijalną w stosunku do 1,3 V. Wyliczona rezystancja bocznika wynosiła około 860 $\mu\Omega$, indukcyjność 4,8 nH, stała czasowa 5,5 μ s. Uzyskany przebieg prądu z gałęzi tranzystora IGBT ukazano na rys. Z-3.3. Maksymalna wartość prądu pomierzonego w kanale CH 1 wyniosła 1,6 kA (7 V) i był to główny prąd ogranicznika. Topik przetopił się po czasie około 40 μ s przy prądzie 500 A. Po tym czasie włączył się tranzystor. Czas włączenia tranzystora wynosił 180 μ s i był to czas zwierania bezpiecznika i dejonizacji przerwy połukowej w przetopionym topiku. Wartość prądu głównego w czasie dejonizacji zdążyła wzrosnąć od 500 A (CH 1 – 2 V) do 1600 A (CH 1 – 7 V). Na przykładzie widać jak ważna jest szybka dejonizacja szczeliny. W układzie zastosowano duże stromości prądów, tak więc przy pracy w sieci 50 Hz lub prądu stałego prąd zwarciovyy nie wzrośnie tak istotnie, należy jednak dążyć do jak najkrótszego czasu przewodzenia tranzystora.



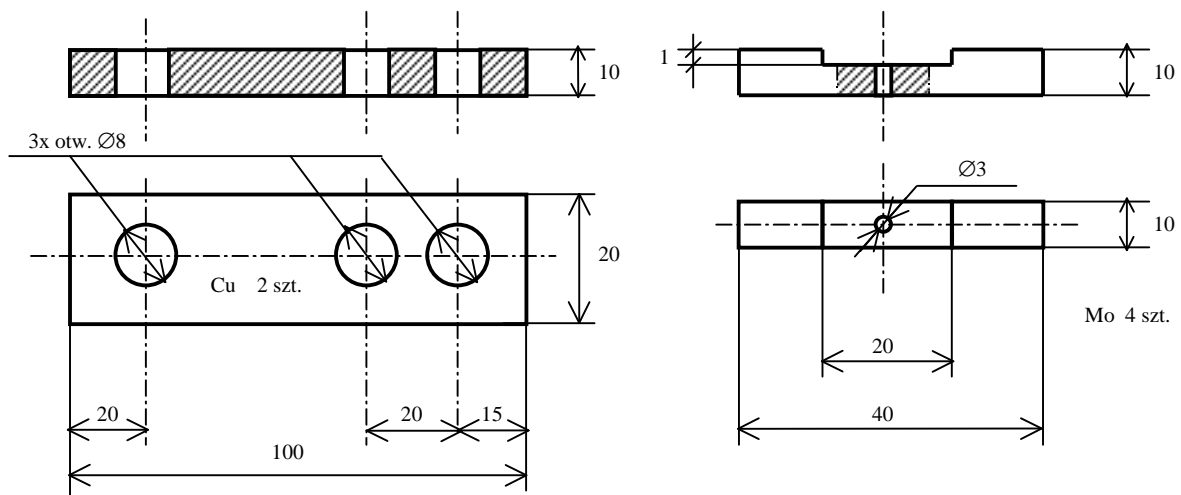
Rys. Z-3.3. Przebieg prądu tranzystora IGBT (CH 2) względem prądu głównego ogranicznika (CH 1) uzyskany z miniaturowego bocznika. Na oscylogramie zaznaczono wzrost prądu zwarciovego ΔI narastającego przez czas t_2 przewodzenia tranzystora IGBT

Załącznik 4

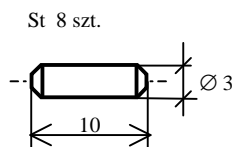
Części składowe modelu bezpiecznika



Zacisk prądowy topika (5)



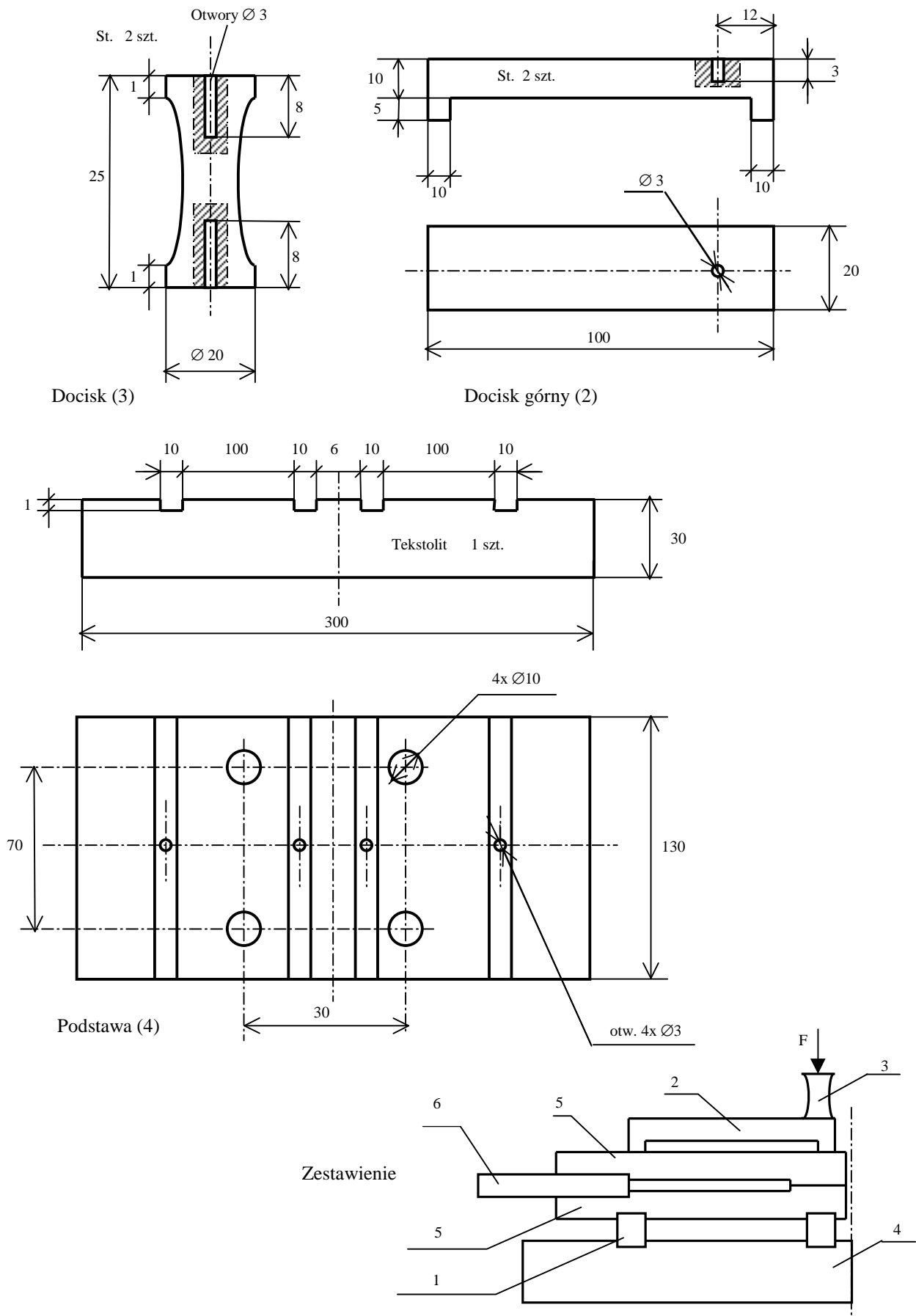
Doprowadzenie prądu do zacisku topika (6)



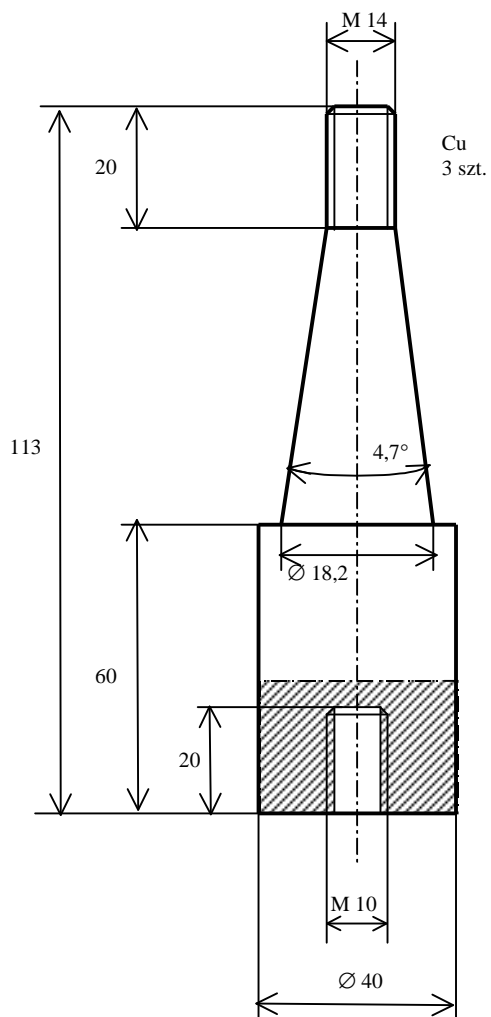
Kołek montażowy

Wspornik zacisku prądowego (1)

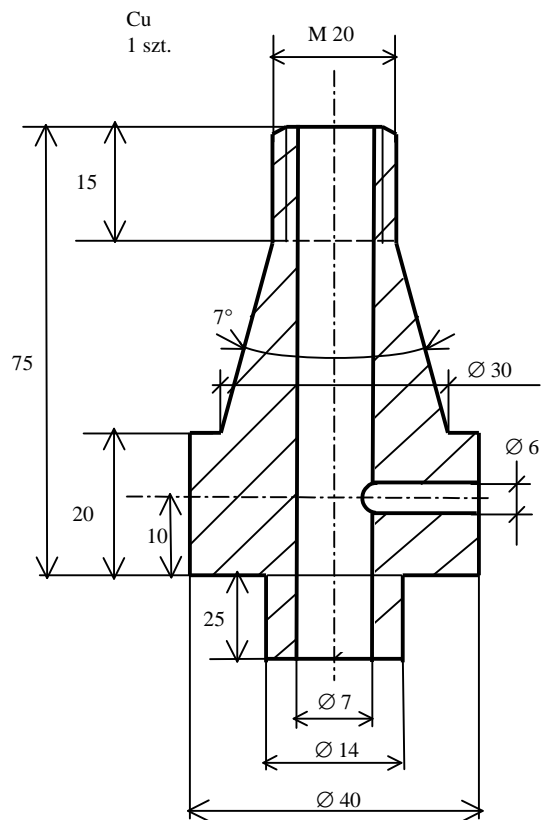
Rys. Z-4.1. Elementy modelu BKT używanego do prób długotrwałych



Rys. Z-4.2. Elementy modelu BKT używanego do prób długotrwałych

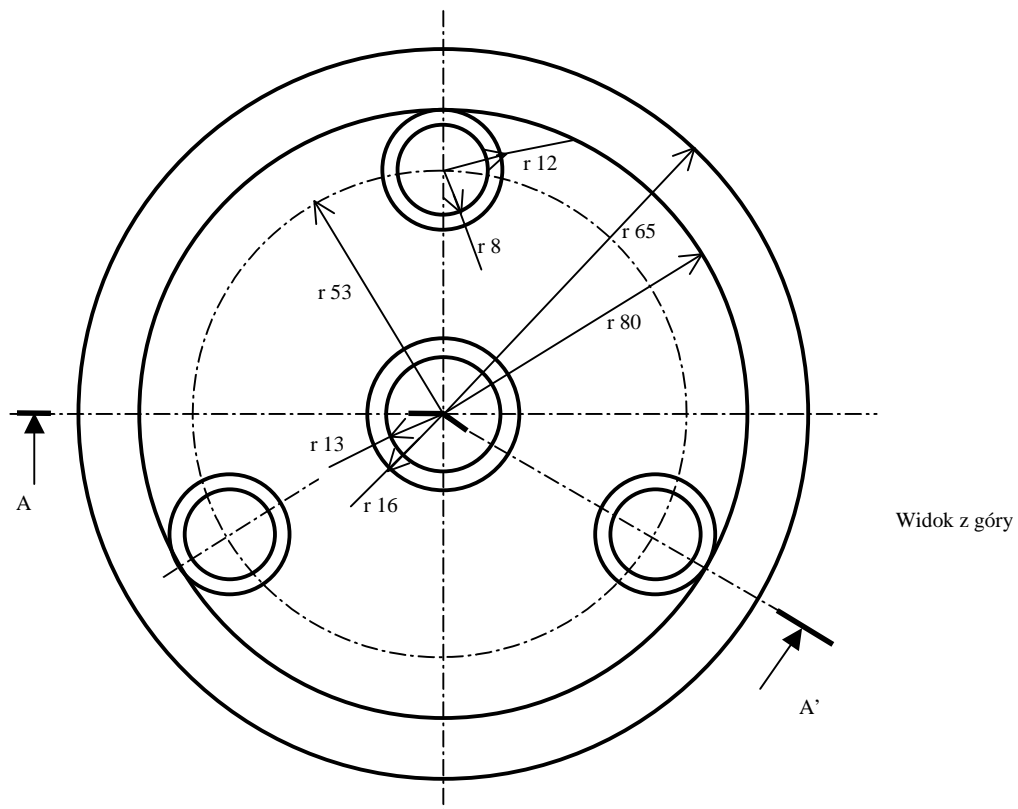


Doprowadzenie prądu (1)

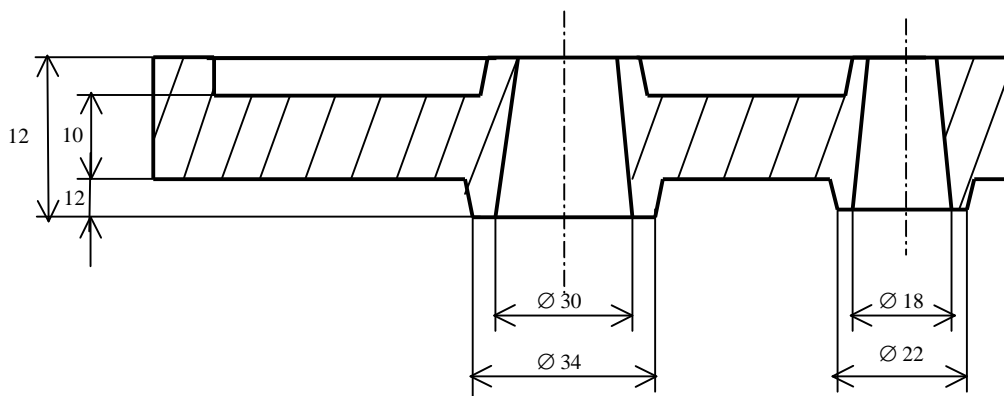


Doprowadzenie pompy próżniowej (2)

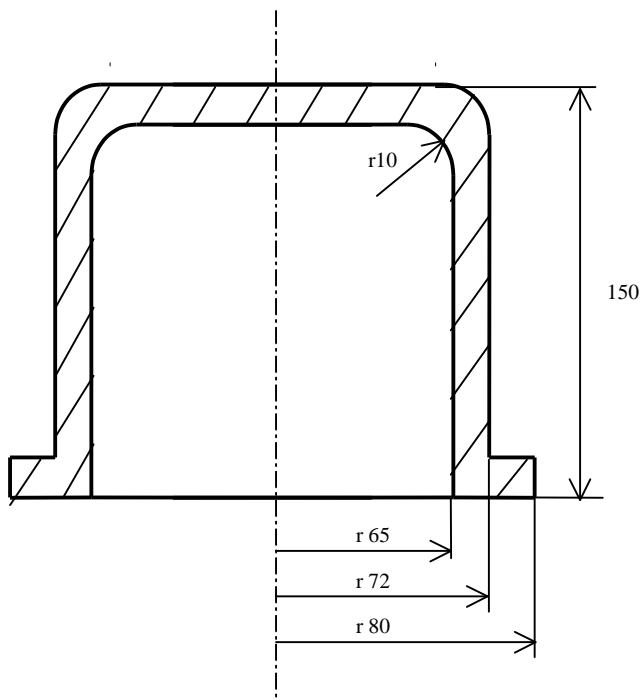
Rys. Z-4.3. Elementy komory próżniowej



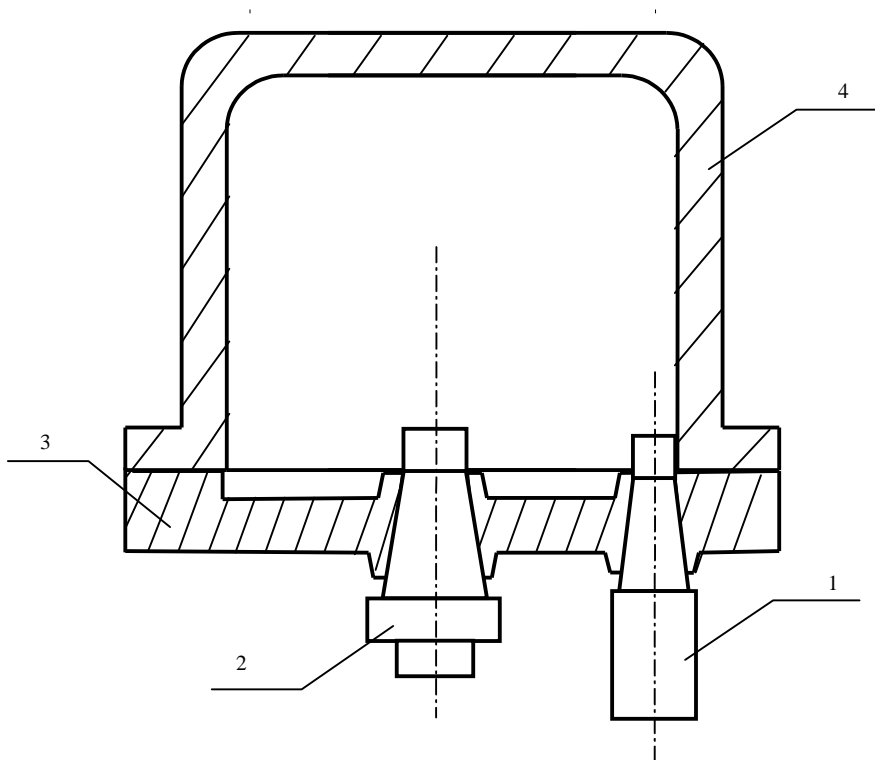
A-A'



Rys. Z-4.4. Podstawa klosza próżniowego (3)



Rys. Z-4.5. Klosz próżniowy (4)



Rys. Z-4.5. Komora próżniowa

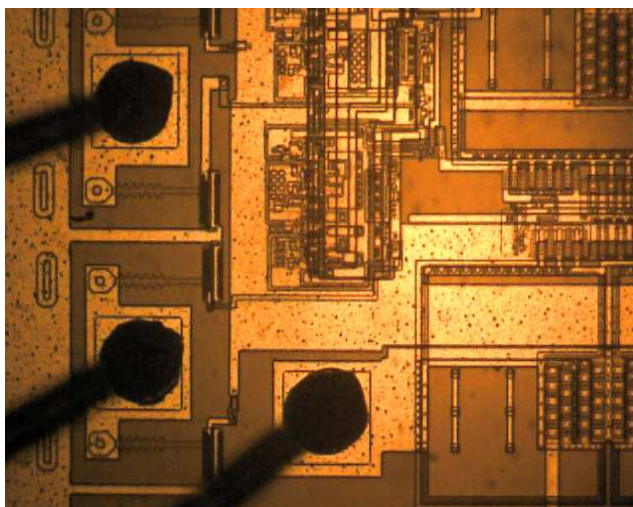
Załącznik 5

Przegląd metod łączenia topików

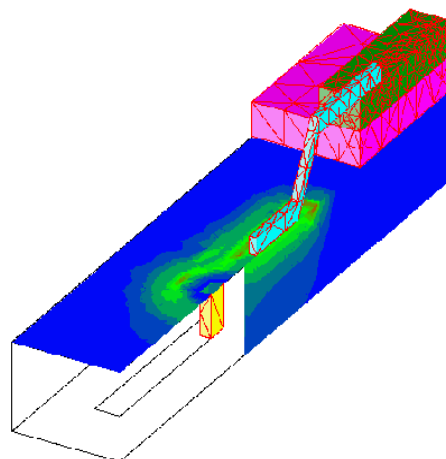
Ze względu na trudność jednorodnego połączenia małego topika do dużych styków przy zachowaniu dobrych parametrów elektrycznych i cieplnych zwykle metody mechanicznego montażu będą niewystarczające. Wydaje się, że odpowiednią jakość połączenia można uzyskać dzięki zastosowaniu metod mikromontażu [16] używanych powszechnie przy produkcji elementów półprzewodnikowych:

- termokompresja,
- ultrakompresja,
- mikrogrzewanie oporowe,
- spawanie laserowe,
- spawanie wiązką elektronową,
- „hodowanie” metalicznych warstw topika,

a)



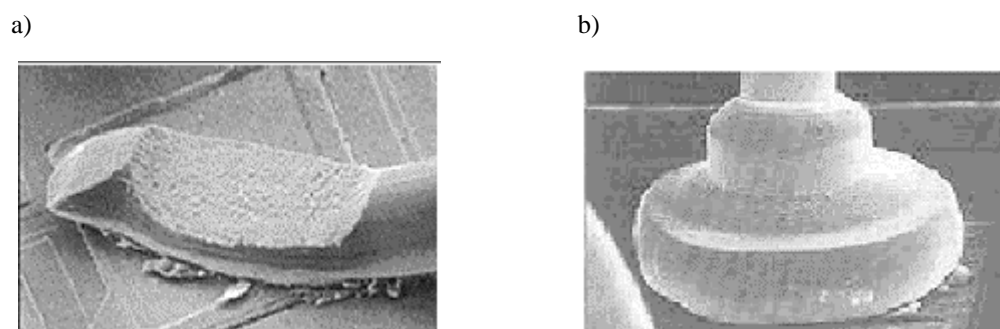
b)



Rys. Z-5.1. Doprowadzenia pól kontaktowych w układzie scalonym, a) widok doprowadzeń czołowych w procesorze Intel 80286 – mikrofotografia Autora wykonana przy użyciu mikroskopu PZO Biolar wraz z zaadaptowaną nasadką do światła odbitego firmy Olympus, powiększenie ok. 75x b) przykład zdefiniowanej siatki elementów skończonych [38]

Na doprowadzenia są używane druty złote i aluminiowe (również miedziane i srebrne, ale materiał należy dobierać w zależności od podłoża aby metale były w odpowiedniej parze metalurgicznej). Materiały na doprowadzenia są miękkie i przy wzajemnym współdziałaniu temperatury i wywieranego docisku poddają się w ten sposób, że łączą się jednolicie z metalizowanym podłożem. Doprowadzenia mają dobrą przewodność elektryczną i cieplną.

Początki technologii opracowano w roku 1957 w Laboratorium Bella a następnie w latach 70 dopracowywano metodę i rozwijano głównie sposoby diagnostyki połączeń, wytrzymałości przy zmieniających się napięzeniach i obciążeniach, dopracowano też sposoby na wykonanie powtarzalnych łączy. Obecnie większość wykonywanych połączeń (90%) w układach scalonych jest wykonana jako połączenia czołowe kuliste a pozostałe jako boczne.



Rys. Z-5.2. Obraz mikroskopowy połączeń w układzie scalonym [38]: a) boczne, b) czołowe

Na połączenia czołowe używa się złota, a na połączenia boczne złota lub aluminium.

Termokompresja – potrzebuje dużego docisku przy temperaturze 300 °C, drutem jest złoto podłożem też złoto lub aluminium. Termokompresja daje dobre połączenia. Powstała w 1957 roku.

Ultrakompresja – łączy aluminium w temperaturze otoczenia używając docisku i energii drgań sondy dociskowej. Powstała w połowie lat 60 – tych XX w.

Termodźwiękowa – obecnie najczęściej używana, stosowana do połączeń czołowych. Zakres stosowanych temperatur 100 do 240 °C. Drut jest złoty.

Tab. Z-5.1 Zestawienie metod łączenia wyprowadzeń

Metoda łączenia	Temperatura	Materiały drutu	Materiały podłoża	Uwagi
Termokompresja	300-500°C	Au	Al, Au	Wysokie ciśnienie w temperaturze
Ultrakompresja	25°C	Au, Al	Al, Au	Niskie ciśnienie przy energii ultradźwiękowej
Termodźwiękowe	100-240°C	Au, Cu	Al, Au	Niskie ciśnienie przy energii ultradźwiękowej w obecności temperatury

Załącznik 6

Przykład wyznaczenia wartości współczynników użytych w funkcji aproksymującej punkty pomiarowe przy pomocy programu Gnuplot

Komendy skryptów można zapisać w pliku tekstowym i następnie „wkleić” całość do okna terminala programu Gnuplot [72],

- Dla użycia funkcji „fit” ważne jest aby wstępnie dobrze określić wartości współczynników a , b dla zadanej funkcji $f(x)$, za pomocą której opisuje się punkty pomiarowe wczytane z pliku dat. Podczas przetwarzania kolejnych linii skryptu program wyznacza wartości współczynników a i b , oraz wykreśla przebieg funkcji $f(x)$ (rys. 4.28).

```
set grid
set title "Charakterystyka Igr = f (l) bezpiecznika r= 0.15 mm" 0.000000,0.000000 font ""
set yrange [ 0 : 400 ] noreverse nowriteback
set ylabel "Igr" 1.500000,0.000000 font ""
set xlabel "l [mm]" 0.000000,2.000000 font ""
a=10
b=10
f(x)=a/(1-(b**(x)))
fit f(x) "bezp015_3600.dat" using 1:2 via a,b
plot f(x), "bezp015_3600.dat" using 1:2
```

Zawartość pliku: bezp015_3600.dat (plik umieszczony w katalogu *\bin\bezp015_3600.dat).

5	92
2	215
1	388

- Dodatkowy przykład skryptu dla wykonania wykresu przestrzennego z rys. 4.30

```
set key outside
set view 71, 60, 1.1, 1
set ticslevel 0.000001
set colorbox horiz user origin .1,.12 size .8,.015
set cblabel "[s]" 0.000000,1.200000 font ""
set grid x
set mytics 2
set grid mytics
set grid z
set border 4095 lt -1 lw 1.000
set ylabel "y [mm]" 0.000000,0.000000 font ""
set xlabel "x [A]" 0.000000,0.000000 font ""
set zlabel "z [s]" 0.000000,0.000000 font ""
set pm3d
#set style line 10 lt -1 lw 0.01
#set pm3d flush begin noftriangles hidden3d 10 solid implicit corners2color mean
set logscale x 10
set logscale zcb 10
set samples 50, 50
set isosamples 70, 70
set xrange [ 50 : 12000 ] noreverse nowriteback
set yrange [ 0.5 : 5.5 ] noreverse nowriteback
set zrange [ 0.000001 : 10000 ] noreverse nowriteback
set contour both
set cntrparam levels auto 20
set hidden3d
set title "Charakterystyka bezpiecznika d= 0.15 mm      f(x,y)=
(sqrt(x)/(log(x)*log(x)))*(341.3*(y**(0.0682)))/(x*(x-(41.6168/(1-(0.893632**y)))))"
0.000000,0.000000 font ""
f(x, y)= (x < (41.6168/(1-(0.893632**y))) ? 3600 :
(sqrt(x)/(log(x)*log(x)))*(341.3*(y**(0.0682)))/(x*(x-(41.6168/(1-(0.893632**y))))))
splot [x=92:10000] [y=1:5] f(x, y) title ""
```