

# Ogniwa Peltiera, część 1

Ogniwa Peltiera to owiane tajemnicą zakątek elektroniki. Dla wielu wygląda to prawie jak jakaś sztuczka magiczna - zależnie od kierunku przepływu prądu występuje grzanie lub chłodzenie. W artykule przedstawimy zasadę działania ogniw Peltiera.

Wielu elektroników z czystej ciekawości chce się „dotknąć” tego tematu dosłownie i w przenośni.

Poniższy artykuł będzie bezbolesnym wprowadzeniem do tego bardzo „gorącego” tematu.

Temat ogniw Peltiera od dawna fascynuje wielu elektroników. Do tej pory najczęściej było to zainteresowanie czysto teoretyczne; ponieważ jednak pojawiły się na rynku duże ogniwa dostępne po przyzwoitych cenach, czas najwyższy aby na łamach Elektroniki Praktycznej przybliżyć ten temat naszym Czytelnikom. Ponieważ tylko gruntowne poznanie zasady działania umożliwi świadome i efektywne wykorzystanie tych bardzo ciekawych elementów w praktyce, zamieszczamy bogatą część opisową. Jednym z głównych celów artykułu jest też pokazanie czego można się spodziewać dzięki stosowaniu ogniw Peltiera, a czego na pewno nie da się osiągnąć.

Na początku podamy podstawowe zasady i zależności fizyczne. Zapoznanie się z nimi będzie może wymagało trochę wysiłku, jest jednak konieczne, umożliwi bowiem zrozumienie sensu parametrów i charakterystyk katalogowych. Wcale nie będzie to takie trudne - wymaga tylko elementarnych wiadomości ze szkoły i nieco uwagi. Zamieścimy też i omówimy firmowe charakterystyki i parametry niektórych fabrycznych modułów - katalogi producentów są bowiem zazwyczaj dostępne nielicznej grupie specjalistów. Prześledzimy kilka przykładów, które pomogą przeprowadzać własne obliczenia.

## Podstawy fizyczne

Działanie półprzewodnikowych modułów termoelektrycznych potocznie nazywanych ogniwami Peltiera w rzeczywistości opiera się na pięciu podstawowych zjawiskach fizycznych, z których cztery nazywane jest od nazwisk odkrywców.

1. Już w roku 1821 Thomas J. Seebeck odkrył, iż w obwodzie wykonanym z dwóch różnych metali wytwarza się napięcie (płyń prąd), o ile tylko złącza mają różne temperatury - patrz rysunek 1. To napięcie termoelektryczne nosi na cześć odkrywcy nazwę napięcia Seebecka. W praktyce najczęściej napięcie to jest wykorzystywane w czujnikach termoelektrycznych służących do pomiarów temperatury (popularne termopary stosowane choćby w regulatorach temperatury). Napięcie termoelektryczne zależy od temperatury, ale niestety nie jest to zależność liniowa. W ogólnym przypadku zależność tę można zapisać:

$$U = A_1 \cdot DT + A_2 \cdot (DT)^2 + \dots$$

gdzie  $A_1, A_2, \dots$  to współczynniki charakterystyczne dla użytego materiału.

2. W roku 1834 Jean C. A. Peltier odkrył, że na złączu dwóch różnych metali przy przepływie prądu w określonym kierunku wydziela się ciepło, a przy przepływie prądu w odwrotnym kierunku złącze pochłania ciepło - patrz rysunek 2. I to jest najbardziej interesujące nas zjawisko. Ilość wydzielonego lub pochłoniętego ciepła, a ściślej rzecz biorąc moc cieplną takiego złącza (czyli ilość energii w jednostce czasu) można wyrazić wzorem:

$$Q_p = p \cdot I,$$

gdzie  $p$  - współczynnik Peltiera danego złącza.

Okazuje się, że  $p = a \cdot T$  gdzie  $a$ , to współczynnik Seebecka,  $T$  - temperatura bezwzględna [K].

Stąd:

$$Q_p = a \cdot T \cdot I$$

Wzór ten potwierdza to, co wyczuwamy intuicyjnie; interesująca nas moc cieplna jest wprost proporcjonalna do płynącego prądu.

Wiemy już też, iż współczynnik  $a$  nie jest stały, zależy bowiem w nie znany nam na razie bliżej sposób od temperatury. Ze wzoru wynika też kolejny ważny wniosek: moc cieplna jest wprost proporcjonalna do temperatury bezwzględnej - lepiej byłoby więc pracować w wyższych temperaturach. Ale my przecież uparliśmy się zrobić chłodziarkę... cóż trudno!

3. William Thomson (lord Kelvin) badał zjawiska Seebecka i Peltiera. Określił stosowne zależności matematyczne, a także przewidział istnienie kolejnego fenomenu nazwanego potem jego imieniem. Jest to *wydzielanie i pochłanianie ciepła w jednorodnym przewodniku, gdy prąd płynie w kierunku gradientu (różnic) temperatury* - patrz rysunek 3.

Moc cieplną związaną z tym zjawiskiem przy różnicy temperatur  $DT$  na długości  $l$  przedstawia wzór:

$$Q_t = \frac{t \cdot I \cdot DT}{l}$$

gdzie  $t$ , to współczynnik Thomsona, charakterystyczny dla danego materiału.

Wszystkie trzy omówione zjawiska są odwracalne, w przeciwieństwie do czwartego:

4. Wszystkimi dobrze znany ze szkoły efekt Joule'a to *wydzielanie ciepła podczas przepływu prądu przez przewodnik o niezerowej rezystancji*. W praktyce przyjmuje się jakąś średnią temperaturę ogniwa, wypadkową rezystancję całkowitą i oblicza po prostu:

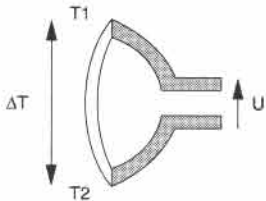
$$Q_j = P = I^2 \cdot R$$

W naszym przypadku w ogniwie występują różnice temperatur. Ponieważ rezystywność materiału zależy od temperatury, więc znów dokładne obliczenie ilości wydzielonego ciepła nie byłoby takie proste. Ścisłej rzecz biorąc, powinniśmy raczej mówić o mocy cieplnej na elementarną jednostkę objętości:

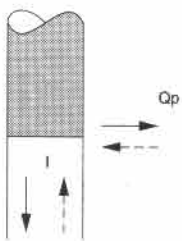
$$q_j = r \cdot J^2$$

gdzie  $r$  - rezystywność, a  $J$ , to gęstość prądu, a następnie obliczyć stosowną całkę. W naszych rozważaniach wystarczą jednak wzory uproszczone.

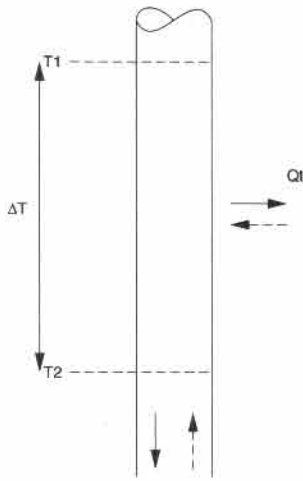
5. Piątym, istotnym dla działania ogniwa termoelektrycznego zjawiskiem jest - *przewodzenie ciepła w objętości materiału*. Decydującym parametrem jest tu przewodność cieplna materiału, oznaczmy ją literą  $k$ , a odpowiadającą moc cieplną



Rys. 1. Sposób indukowania się napięcia Seebecka.



Rys. 2. Rysunek ilustrujący powstanie zjawiska Peltiera



Rys. 3. Zjawisko Kelvina.

$$Q_k = k \cdot \Delta T$$

Pojedyncze ogniwo termoelektryczne przedstawione jest na **rysunku 4**. W praktyce stosuje się złożenie wielu (kilkunastu do kilkuset) takich ogniw w kształcie meandra lub jak kto woli zygżaku. W sumie typowy moduł przypomina kanapkę: z tym, że zamiast kromek chleba mamy dwie kwadratowe płytki ceramiczne, między którymi, niczym kolumny umieszczone są smakowitości - nasze elementarne ogniwa. Płytki ceramiczne zapewniają sztywność mechaniczną, są doskonałą izolacją elektryczną i dobrze przewodzą ciepło.

Pod względem elektrycznym elementarne ogniwa są połączone szeregowo, pod względem cieplnym - równolegle. Materiałami czynnymi w obecnie produkowanych modułach nie są metale, bo wytwarzana różnica temperatur byłaby wtedy bardzo mała - mniejsza od 1°C. Zamiast metali stosuje się materiały półprzewodnikowe - zazwyczaj ogniwa wykonane są z tellurku bizmutu Bi2Te3 typu p oraz n domieszkowanego odpowiednio antymonem i selenem. Połączenia między ramionami kolejnych ogniw wykonane są z płytek miedzianych.

Doszliliśmy do jednego z najważniejszych punktów - przedstawiamy proste wy tłumaczenie głównej zasady działania: mechanizm działania ogniwa Peltiera objaśnimy przy pomocy rysunku 4. W artykule przyjęliśmy oznaczenia oparte na angielskich nazwach: c - cold, zimny, h - hot, gorący (takie oznaczenia występują w katalogach).

Mówi się, że w półprzewodniku typu p nośnikami prądu są dziury. Jak wiadomo dziury nie są realnymi obiektami fizycznymi, w strukturze półprzewodnika brakuje po prostu elektronów do pełnego obsadzenia górnego poziomu (pasma) energetycznego lub jak wcześniej mówiono ostatniej orbity elektronowej. Oczywiście przepływ prądu w rzeczywistości związany jest z ruchem elektronów w tym pasmie - elektrony znajdują się tu na określonym poziomie energetycznym, czyli *mają jakąś energię*. W półprzewodniku typu n występuje nadmiar elektronów, wspomniane wcześniej pasmo energetyczne jest całkowicie wypełnione i *nadmiarowe elektrony* znajdują się z konieczności już w *następnym pasmie energetycznym*, a to oznacza, że *mają one większą energię* niż którekolwiek elektrony znajdujące się w półprzewodniku typu p. Jeśli teraz, jak pokazano na rysunku 4, elektrony płyną od półprzewodnika typu p do n, to na złączu p-n (obecność pomiędzy nimi miedzianej płytki niczego tu nie zmienia) elektrony o niższej energii z półprzewodnika p przechodzą do półprzewodnika n, gdzie stają się z konieczności elektronami nadmiarowymi (bo pasmo podstawowe jest wypełnione), muszą więc zwiększyć swą energię. Jak mogą to zrobić? Oczywiście *pobierając energię (ciepłą) z otoczenia*. Tak więc przy takim kierunku przepływu prądu, złącze p-n pochłania energię ciepłą. Przy odwrotnym kierunku prądu (od n do p) elektrony nadmiarowe „spadają” na niższe pasmo energetyczne - na złączu wydziela się ciepło.

Prawdopodobnie część Czytelników zwiędzona popularnymi określeniami zastanawiała się jak to jest, że ogniwo Peltiera chłodzi, czyli odbiera ciepło, a więc niejako „produkuje zimno”. Gdzie się podziwiałoby pobrane ciepło? Tymczasem nie ma tu nic z magii!

Zauważmy bowiem, że w każdym module mamy wiele ogniw. Według rysunku 4, przy

**Moduł Peltiera nie jest przyrządem, który pochłania lub wydziela ciepło. Może on tylko służyć jako pompa ciepła transportująca ciepło w kierunku zależnym od kierunku przepływającego prądu.**

zaznaczonym kierunku przepływu prądu, na górnej stronie modułu mamy same złącza p-n, a na dolnej - złącza n-p. Ciepło jest pobierane na stronie górnej, ale jednocześnie wydzielane na stronie dolnej. Przy zmianie kierunku przepływu prądu kierunek przepływu ciepła się odwróci. Teraz widzimy, że potoczne sformułowania typu: „bateria Peltiera chłodzi lub grzeje zależnie od kierunku przepływu prądu” są nie tylko nieprecyzyjne, ale wręcz wprowadzają w błąd!

*Moduł Peltiera jest tylko pompą ciepłą transportującą ciepło w kierunku zależnym od kierunku prądu.*

Działanie ogniwa termoelektrycznego przypomina działanie domowej chłodziarki (lodówki) sprężarkowej, gdzie dostarczana jest pewna moc elektryczna P, w parowniku następuje pochłanianie ciepła, suma tych mocy zgodnie z zasadą zachowania energii wy-

dziela się jako ciepło, głównie w kondensorze (radiatorze). Zauważmy też, że zarówno w lodówce, jak i w module Peltiera moc uzyskana na stronie gorącej Qh jest większa od dostarczonej mocy elektrycznej P - część ciepła otrzymujemy za darmo! Sposób taki wykorzystuje się już w praktyce, potrzebne są tylko środowiska o różnych temperaturach np. jedną „stronę” instalacji umieszcza się pod powierzchnią ziemi lub w wodach jeziora. Znakomity pomysł na tanie ogrzewanie domu!? No... niezupełnie. Baterie ogniw Peltiera byłyby tu znakomitym i niezawodnym rozwiązaniem; ze względu na prostą konstrukcję nie ma ograniczeń wielkości, przeszkodą jest natomiast wysoka cena. Na razie koszty takich instalacji są wysokie i bardzo pomalą wchodzą one do szerszego użytku. Dla celów militarnych i kosmicznych wykonuje się jednak „peltiery” o mocach rzędu kilowatów.

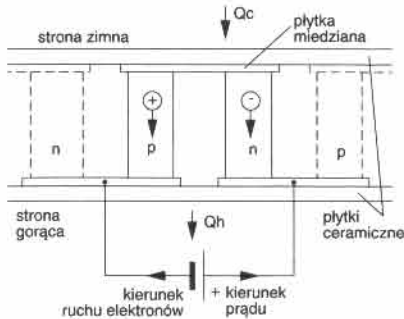
Ale jak by nie było, przy przepływie prądu jedna strona ogniwa (górną na naszym rysunku 4) będzie miała temperaturę niższą niż druga strona. Strona zimna może więc chłodzić, czyli pobierać ciepło ze swego otoczenia, a o to nam przecież chodzi. Ilość tego ciepła jest, jak należało oczekiwać, wprost proporcjonalna do natężenia płynącego prądu. Chcielibyśmy więc maksymalnie zwiększać ten prąd, aby nasze ogniwo chłodziło jak najbardziej skutecznie.

Pomyślmy jednak o ograniczeniach. Nasze ogniwo ma przecież niezerową rezystancję, przepływ prądu spowoduje więc wydzielenie się w całej objętości czynnego materiału pewnej ilości ciepła (ciepło Joule'a). Ciepło to też trzeba odprowadzić. Możemy sobie w uproszczeniu wyobrazić, że połowa tego ciepła „chce płynąć” w kierunku strony zimnej, połowa w kierunku gorącej. Choć więc przy danym prądzie nasz moduł mógłby przepompować z jednej strony na drugą określoną ilość, powiedzmy, „użytecznego” ciepła, to jednak musi on także „wypompować” powstające w module ciepło Joule'a.

Przypomnijmy też, że materiał ramion ogniwa ma pewną przewodność cieplną. Zgodnie z zasadami termodynamiki ciepło będzie przechodzić ze strony gorącej na zimną w stopniu zależnym od różnicy temperatur i od wartości przewodności cieplnej materiału półprzewodnika. Ponieważ w czasie pracy dwie strony naszego modułu mają różne temperatury i ciepło w naturalny sposób „chce” przechodzić ze strony gorącej na zimną, nasze ogniwo musi zużyć część „możliwości” na „wypchnięcie” tego ciepła z powrotem na stronę gorącą.

I tu już chyba wszyscy widzą barierę możliwości ogniwa. W miarę zwiększania prądu rośnie co prawda transport ciepła - wynikający ze zjawisk Peltiera i Thomsona) - to nas bardzo cieszy. Jednocześnie jednak rośnie ilość wydzielanego ciepła Joule'a. Połowa tego ciepła płynie w kierunku strony zimnej, a to już się nam zupełnie nie podoba. W tę samą „złą” stronę przechodzi ciepło wskutek przewodzenia materiału.

Ponieważ ze wzrostem prądu te szkodliwe ilości ciepła rosną szybciej niż ilości ciepła „pompowanego” przez moduł, więc przy zwiększaniu prądu wystąpi w pewnym momencie szczególna sytuacja, gdy ilość pompowanego ciepła pożytecznego będzie



Rys. 4. Budowa ogniwa termoelektrycznego.

równa ilości ciepła „szkodliwego” - strona zimna ogniwa nie będzie już wtedy chłodzić, czyli pobierać ciepła z zewnątrz, bo wszystkie możliwości modułu będą wykorzystane na wypompowanie z modułu ciepła „szkodliwego”. W tym momencie otrzymamy najniższą możliwą temperaturę strony zimnej. Niższej uzyskać się nie da - przy dalszym wzroście prądu temperatura strony zimnej znacznie wzrastać. W powyższych rozważaniach nie uwzględniliśmy co dzieje się po stronie zimnej - zaniedbaliśmy mianowicie wymianę ciepła strony zimnej z otoczeniem. Jednak przedstawione ogólne wnioski są słuszne: istnieje jakaś maksymalna wartość prądu, przy której można osiągnąć największą różnicę temperatur strony zimnej i gorącej. Interesują nas też praktyczne możliwości transportu energii, czyli odpowiednie moce. Będą to: moc strony zimnej  $Q_c$  (moc chłodzenia), moc strony gorącej  $Q_h$  (moc grzania) i doprowadzona moc elektryczna  $P$ . Oczywiście chcielibyśmy znać też sprawność chłodzenia, czyli stosunek mocy  $Q_c$  do  $P$ , ewentualnie też sprawność grzania czyli stosunek  $Q_h$  do  $P$ . Sprawności te oznaczymy odpowiednio  $COP_c$  i  $COP_h$  (od angielskich określeń *Coefficient Of Performance*):

$$COP_c = \frac{Q_c}{P} \quad \text{oraz} \quad COP_h = \frac{Q_h}{P}$$

Odpowiedź nie jest tak prosta, ponieważ jak mówiliśmy wcześniej, większość zachodzących procesów silnie zależy od temperatury. Dla celów praktycznych w dużym uproszczeniu możemy przyjąć, że dla danego ogniwa wszystkie te parametry zależą od temperatury strony gorącej.

**Ponieważ podstawowe zjawiska zachodzące w ogniwie Peltiera mają silny związek z temperaturą, więc parametry użytkowe modułu zależą od warunków pracy. Ten sam moduł w zależności od zastosowania może mieć różną efektywność. Aby określić możliwe do uzyskania efekty należy przeprowadzić niezbędne obliczenia uwzględniające konkretne warunki pracy.**

Tak czy inaczej trzeba zagłębić się w zależności między przedstawionymi wielkościami.

Spróbujmy jakoś obliczyć interesujące parametry. Niestety nie obejdzie się bez wzorów. Dla pojedynczego ogniwa termoelektrycznego powinniśmy zgodnie z wcześniejszymi danymi napisać równania różniczkowe i całkowite wyrażające odpowiednie jednostkowe moce składowe w punktach obu ramion, bo przecież prawie wszystkie współczynniki w równaniach były zależne od temperatury, a na długości ramion ogniwa temperatura zmienia się od  $T_h$  do  $T_c$ . Praktycznie gustują specjalnie w analizie równań różniczkowych, nawet przy pomocy komputera, dlatego bazując na wcześniej podanych wzorach wprowadzmy zależności uproszczone:

$$Q_c = Q_{pc} + 0,5 \cdot Q_t - 0,5 \cdot Q_j - Q_k$$

$$Q_h = Q_{ph} - 0,5 \cdot Q_t + 0,5 \cdot Q_j - Q_k$$

gdzie kolejne składniki wzorów reprezentują ciepło związane z poszczególnymi zja-

wiskami: Peltiera, Thomsona, Joule'a i ciepło przewodzenia. We wzorze na efektywne ciepło chłodzenia strony zimnej  $Q_c$ , „pozytywne” ciepło Peltiera i Thomsona jest pomniejszone o „szkodliwe” ciepło Joule'a i ciepło przewodzenia.

Jeśli teraz przyjmiemy w równaniach jakieś średnie wartości  $t_m$ ,  $R_m$ ,  $k_m$  ( $m$  - mean, średni) to możemy napisać:

$$Q_c = a_1 \cdot T_c \cdot I + 0,5 \cdot t_m \cdot I \cdot DT / l - 0,5 \cdot R_m \cdot I^2 - k_m \cdot DT$$

$$Q_h = a_2 \cdot T_h \cdot I - 0,5 \cdot t_m \cdot I \cdot DT / l + 0,5 \cdot R_m \cdot I^2 - k_m \cdot DT$$

Dla określonych temperatur  $T_h$  i  $T_c$  wprowadzamy średni współczynnik  $a_m$ , który w przybliżeniu jest równy

$$\frac{(a_1 + a_2)}{2}$$

Wtedy nie popełniając wielkiego błędu dwa pierwsze składniki obu wzorów możemy zsumować otrzymując fundamentalne zależności ogniwa termoelektrycznego:

$$a) \quad Q_c = a_m \cdot T_c \cdot I - 0,5 \cdot R_m \cdot I^2 - k_m \cdot DT$$

$$b) \quad Q_h = a_m \cdot T_h \cdot I + 0,5 \cdot R_m \cdot I^2 - k_m \cdot DT$$

Natomiast dostarczona moc elektryczna to  $P = U_{zas}$ . Moc ta, zgodnie z zasadą zachowania energii musi być równa różnicy  $Q_h$  i  $Q_c$  stąd po odjęciu:

$$c) \quad P = Q_h - Q_c = I^2 \cdot R + a_m \cdot DT \cdot I$$

I dalej:

$$d) \quad U_{zas} = P / I = I \cdot R_m + a_m \cdot DT$$

Tu może niektórzy zapytają, dlaczego nie napisaliśmy po prostu  $P = I^2 \cdot R$ . Otóż dlatego, że w ogniwie pojawia się napięcie Seebecka ( $a_m \cdot DT$ ) i prąd płynie przez ogniwo nie równa się  $I = U_{zas} / R$

Cztery ostatnie wzory oznaczone a)...d) wyrażają podstawowe zależności parametrów ogniwa termoelektrycznego.

Obliczenia dotyczyły w zasadzie jednego ogniwa, ale ponieważ w module ogniwa pod względem termicznym połączone są równolegle, a elektrycznie w szereg, to należy po prostu obie strony równania pomnożyć przez ilość ogniw - wzory pozostaną te same, zmieniają się tylko współczynniki.

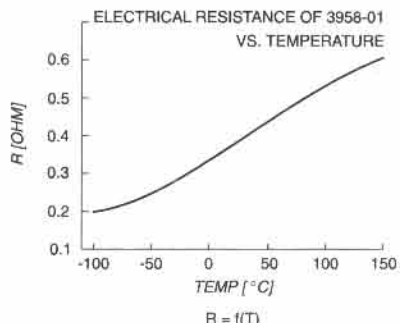
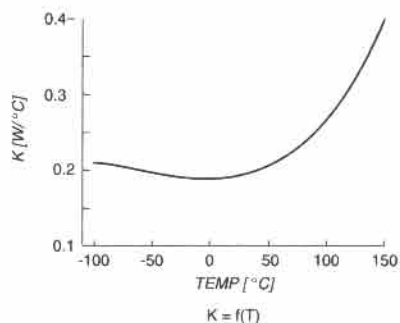
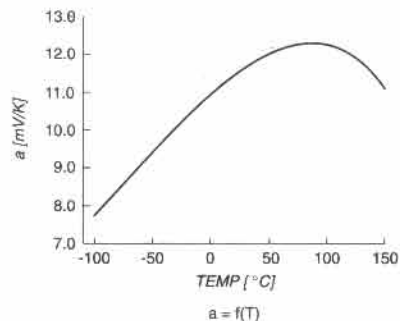
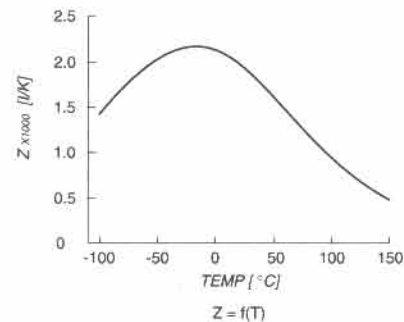
Z analizy wzorów a) i b) wynika, iż materiał użyty do budowy ogniw powinien mieć jak największy współczynnik Seebecka  $a_m$  oraz jak najmniejsze wartości rezystywności i przewodności cieplnej  $k_m$ . Niestety są to wymagania wzajemnie sprzeczne; z dotychczas znanych materiałów najlepiej spełniają je wspomniane wcześniej półprzewodniki.

Aby w prosty i wymierny sposób scharakteryzować dany materiał pod kątem m. in. przydatności do budowy ogniw Peltiera, wprowadzono współczynnik  $Z$ :

$$Z = \frac{a_m^2}{R_m \cdot k_m}$$

Wartość tego parametru jest często spotykana w literaturze technicznej.

Praktyczne obliczanie rzeczywistych parametrów na podstawie podanych wzorów nie jest proste, ponieważ jak wielokrotnie pod-



kreślaliśmy występuje silna zależność parametrów od temperatury. Ogromnie komplikuje to matematyczną analizę i utrudnia praktyczną interpretację uzyskanych wyników. Rysunki 5...8 pokazują zależność współczynników  $Z$ ,  $a$ ,  $k$ ,  $R$  od temperatury. Występuje tu wiele zmiennych i różne firmy w odmienny sposób charakteryzują swoje wyroby zamieszczając inne rysunki i tabele. Zanim przedstawimy sposoby praktycznych obliczeń, podamy jeszcze kilka dalszych ogólnych wiadomości i spróbujemy utrwalić podstawowe zależności.

Piotr Görecki, AVT