

ĆWICZENIE 10

OPTYMALIZACJA STRUKTURY CZUJKI TEMPERATURY W ASPEKCIE NIEZWODNOŚCI

Cel ćwiczenia:

- zapoznanie z metodami optymalizacji wewnętrznej struktury mozaikowej czujki temperatury stosowanej w systemach sygnalizacji pożaru;
- wyznaczenie wartości wybranych parametrów mozaikowych czujek temperatury, tj. nieuszkodzalności i czułości dla różnych struktur połączeń elementów półprzewodnikowych, które realizują pomiar temperatury;
- wyznaczenie optymalnej struktury czujki ze względu na niezawodność i czułość.

Przedmiot ćwiczenia:

- wirtualne modele elementów półprzewodnikowych zaimplementowane w symulacyjnym programie komputerowym *PSpice* i wykorzystywane do wyznaczenia czułości tj. charakterystyki zmiany napięcia wyjściowego czujki w funkcji temperatury otoczenia;
- modele niezawodnościowe mozaikowej czujki temperatury.

Narzędzia wspomagające realizację ćwiczenia:

- komputerowy program do symulacji i analizy układów elektronicznych *PSpice*.

10.1. Podstawy teoretyczne i założenia

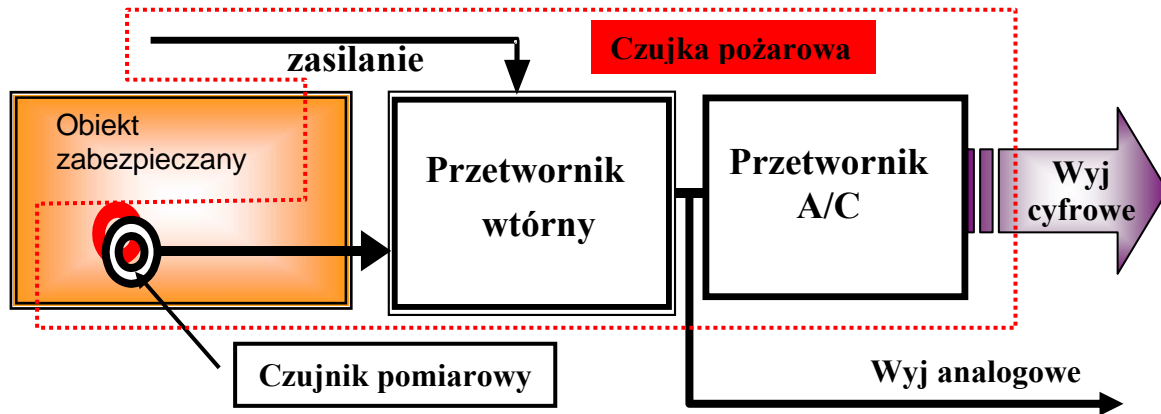
Temperatura jest jedną z wielkości fizycznych charakteryzujących właściwości energetyczne każdej materii, a więc wielkością określającą średnią energię kinetyczną molekuł danego ciała.

J. C. Maxwell sformułował następującą definicję temperatury: „*temperatura ciała jest jego stanem cieplnym, rozpatrywanym w odniesieniu do jego zdolności przekazywania ciepła innym ciałom*”.

Wynalezienie urządzenia do pomiaru „stopnia ciepła” lub „stopnia zimna” zwanego obecnie termometrem, przypisuje się Galileuszowi (w latach 1592 – 1603). Pomiar temperatury metodami elektrycznymi są realizowane przez wytwarzanie wielkości elektrycznej (lub zmianę jej wartości) wskutek oddziaływania temperatury. Urządzenia do uzyskiwania odpowiednich informacji elektrycznych są nazywane czujnikami pomiarowymi. Czujnik wskutek działania na niego wielkości nieelektrycznej, zmienia swoje właściwości elektryczne (np. rezystancję) albo wytwarza energię elektryczną, której parametry są zależne od mierzonej wielkości nieelektrycznej. Zamiana temperatury na wielkość elektryczną w czujniku odbywa się w przetworniku pomiarowym. Przetwornikiem pomiarowym nazywa się taki element układu pomiarowego, który przetwarza z określoną dokładnością, jedną wielkość w drugą (lub w tę samą wielkość, lecz o innej postaci) celem uzyskania żądanej zależności funkcjonalnej między tymi wielkościami. Często w układzie pomiarowym stosuje się nie jedno, lecz kilka

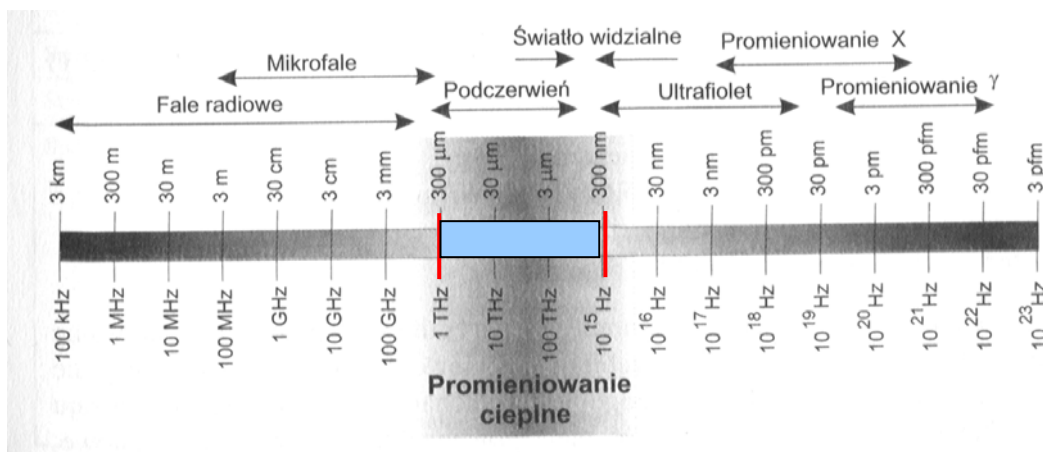
przetworzeń sygnału pomiarowego. Nazywamy to przetwarzaniem wielokrotnym lub wielostopniowym. Jeżeli do tego celu stosuje się oddzielne przetworniki, wówczas pierwszy przetwornik nazywa się przetwornikiem pierwotnym, a następne przetwornikami wtórnymi (Rys. 10.1).

W praktyce pomiarowej przetworniki pierwotne nazywamy czujnikami, a przetworniki wtórne – po prostu przetwornikami.



Rys. 10.1. Schemat ogólny układu do pomiaru temperatury metodami elektrycznymi wykorzystywanego w czujkach sygnalizacji pożarowej

Wiele czujników reaguje na zmiany temperatury obiektu w sposób bezdotykowy bo opiera się na zjawisku promieniowania energii cieplnej w postaci fali elektromagnetycznej (Rys. 10.2). Promieniowanie cieplne zawiera się w zakresie fal o długości od 0,1 μm do 400 μm . Źródłem tego promieniowania są drgania atomów wokół stanu równowagi. Dla ciał stałych atomy drgają w siatce krystalicznej, natomiast dla gazów w ramach jednej cząsteczki. Strumień wypromieniowanej energii jest zależny od temperatury oraz od rodzaju wiązań elektronowych w ramach cząsteczek.



Rys. 10.2. Widmo fal elektromagnetycznych

10.1.1. Półprzewodnikowe czujniki temperatury

Temperatura jest jedną z ważniejszych wielkości charakteryzujących proces powstawania pożaru. Pomiar temperatury metodami elektrycznymi, wykazuje wiele zalet, do których można

zaliczyć: łatwość przetwarzania, wzmacniania i przekazywania sygnałów pomiarowych. Wprowadzenie techniki cyfrowej umożliwiło nie tylko przesyłanie danych pomiarowych nieomal bez zakłóceń, ale dodatkowo umożliwiło akwizycję i ułatwiło sterowanie procesem. Jako czujki pomiarowe mogą być użyte:

- rezystancyjne przetworniki temperatury,
- półprzewodnikowe przetworniki temperatury,
- przetworniki termoelektryczne (termopary).

Parametrycznymi przetwornikami temperatury są złącza półprzewodnikowe. Napięcie przewodzenia złącza jest funkcją temperatury. Jeżeli prąd płynący przez złącze ma stałą wartość (Rys. 10.3), to zmiana napięcia przewodzenia diody krzemowej jest w przybliżeniu proporcjonalna do temperatury złącza. Stosowane do pomiaru temperatury diody mogą być spolaryzowane w kierunku przewodzenia lub zaporowym. W przypadku spolaryzowania diody w kierunku przewodzenia napięcie złącza osiąga wartość bariery potencjału – dla krzemu wynosi to około 0,7V, a dla germanu około 0,2V.

Warstwa zaporowa zostaje zlikwidowana, nośniki większościowe (dziury i elektrony) swobodnie przepływają przez złącze. Wartość tego napięcia zwanego dyfuzyjnym można obliczyć wg wzoru:

$$U_D = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_d}{n_i^2} \quad (10.1)$$

gdzie: q - ładunek elektronu, k - stała Boltzmanna, T - temperatura bezwzględna [K], N_A - koncentracja akceptorów, N_d - koncentracja donorów, n_i - koncentracja samoistna półprzewodnika.

Stała $kT/q = U_T$ nosi nazwę potencjału elektrokinetycznego, który zależy od temperatury i dla $T=300K$ wynosi $U_T=26mV$.

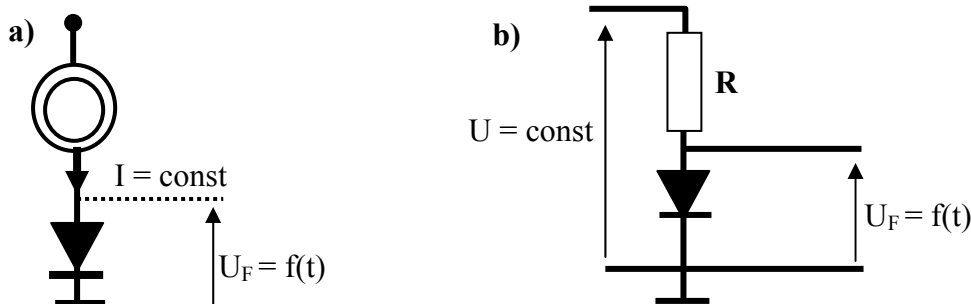
Charakterystykę napięciowo-prądową diody półprzewodnikowej opisuje równanie:

$$I_F = I_R \left[\exp\left(\frac{U_F}{U_T}\right) - 1 \right] \quad (10.2)$$

gdzie: I_F - prąd diody w kierunku przewodzenia, I_R - prąd złącza, który płynie w kierunku zaporowym przy doprowadzeniu napięcia o polaryzacji wstecznej. Przy założeniu, że $I_F \gg I_R$ można zapisać równanie:

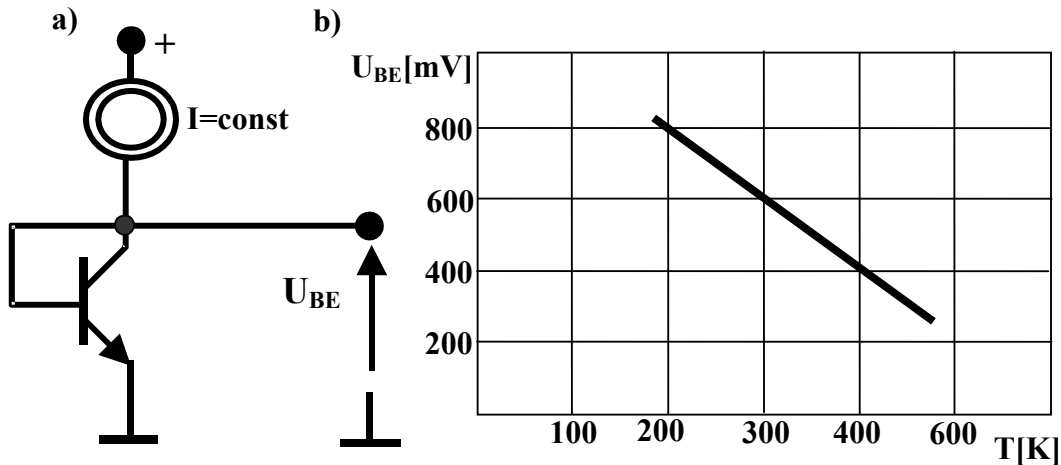
$$U_F = U_T \ln \frac{I_F}{I_R} \quad (10.3)$$

Dla większości diód krzemowych temperaturowy współczynnik zmiany napięcia wynosi około $S_T = -2$ [mV/K]. Do pomiaru temperatury w zakresie od 170 K do 420 K wykorzystuje się często diody krzemowe, zasilane stałą wartością prądu (ze źródła prądowego), spolaryzowanego w kierunku przewodzenia.



Rys. 10.3. Diodowe przetworniki temperatury

Ze względu na swoją budowę wewnętrzną tranzystor bipolarny jest elementem o charakterystyce zależnej od temperatury. Jego prąd zerowy podwaja się przy wzroście temperatury o około 10 K, a napięcie baza-emiter maleje o około 2 [mV/K]. Te, na ogół niekorzystne, efekty można wykorzystać do pomiaru temperatury. Na rysunku 10.4a tranzystor w układzie diodowym pracuje przy stałym prądzie. Uzyskuje się wtedy zależność temperaturową napięcia baza-emiter przedstawioną na rysunku 10.4b.



Rys. 10.4. Tranzystor w układzie diodowym (a);
zależność napięcia baza-emiter od temperatury (b)

W temperaturze pokojowej napięcie U_{BE} osiąga wartość około 600mV. Przy wzroście temperatury o 100 K maleje o 200 mV, a przy spadku temperatury odpowiednio wzrasta. Współczynnik temperaturowy wynosi zatem:

$$\frac{\Delta U_{BE}}{U_{BE} \Delta T} = 0,3[\%/K] \quad (10.4)$$

Rozrzut napięć przewodzenia i współczynników temperaturowych tranzystorów jest dosyć znaczny. Z tego względu pojedyncze tranzystory stosuje się obecnie do pomiarów temperatury tylko w przypadku niewielkich wymagań co do dokładności. Lepszym rozwiązaniem są układy, których zasada pracy oparta jest na pomiarze różnicy napięć U_{BE} dwóch tranzystorów pracujących przy różnych prądach.

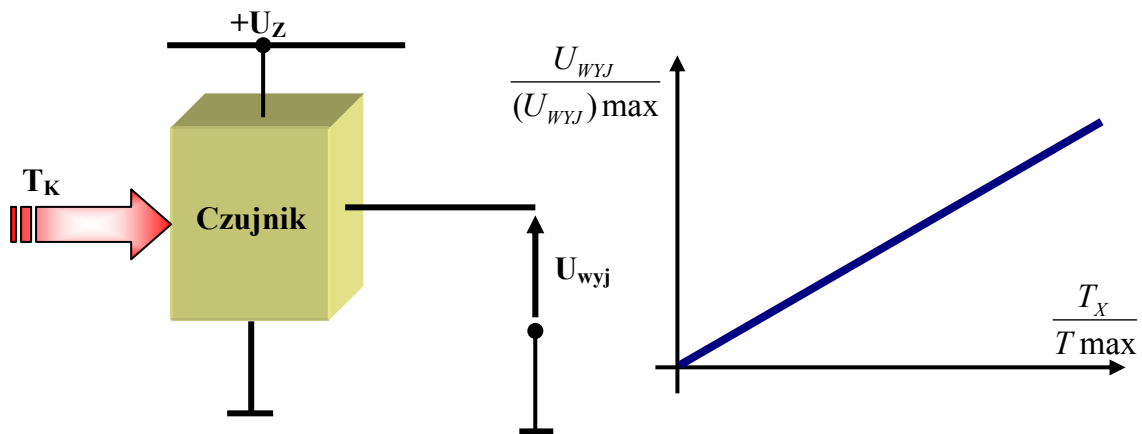
Scalone czujniki temperatury budowane są na bazie krzemu. Krzem charakteryzuje się wieloma cechami, które predestynują go do roli precyzyjnego i liniowego czujnika temperatury. Niemniej ma on także wady – jest wrażliwy nie tylko na temperaturę, ale także na światło i na naprężenia (jest piezorezystywny).

Idealny czujnik analogowy generuje napięcie wyjściowe będące liniową funkcją temperatury (Rys. 10.5). Powszechnie stosowanym czujnikiem temperatury o wyjściu analogowym jest element półprzewodnikowy: termistor lub krzemowy czujnik temperatury.

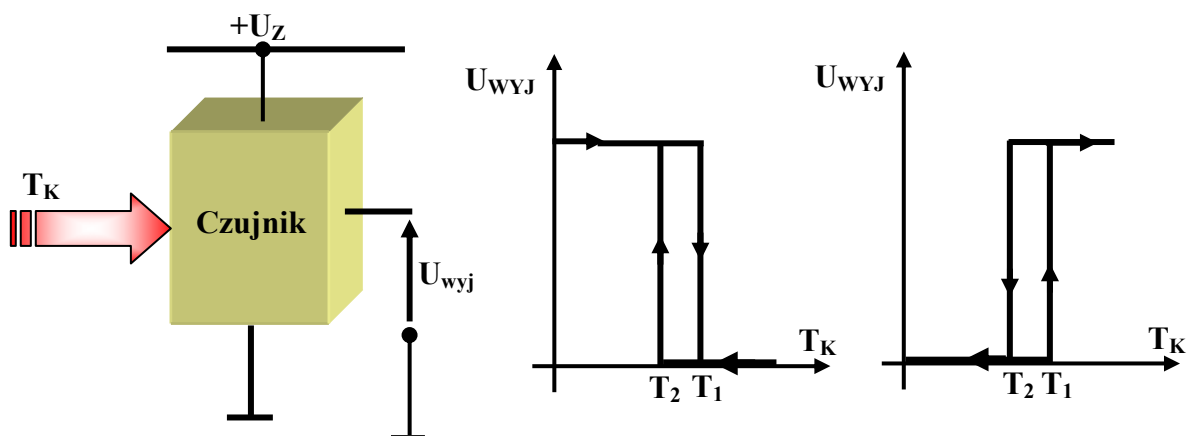
W niektórych wykonaniach czujniki są wyposażone dodatkowo w wyjścia dwustanowe, sygnalizujące przekroczenie wartości progowych. **Jest to zazwyczaj temperatura progowa, po przekroczeniu której czujnik ma generować sygnał alarmu.**

Spotykanym rozwiązaniem w pomiarach temperatury są scalone czujniki temperatury z wyjściami progowymi. Generowane przez nie (pod wpływem temperatury) logiczne sygnały wyjściowe są przekazywane pojedynczą linią (Rys. 10.6). W najprostszym przypadku czujnik

zmienia stan wyjścia logicznego przy przekroczeniu progu temperaturowego. Jedne sygnalizują w ten sposób wzrost temperatury powyżej progu, a inne jej spadek poniżej progu. Układy te nazywa się czujnikami ze sprecyzowanym wewnętrznym progiem temperaturowym.



Rys. 10.5. Czujnik z wyjściem analogowym

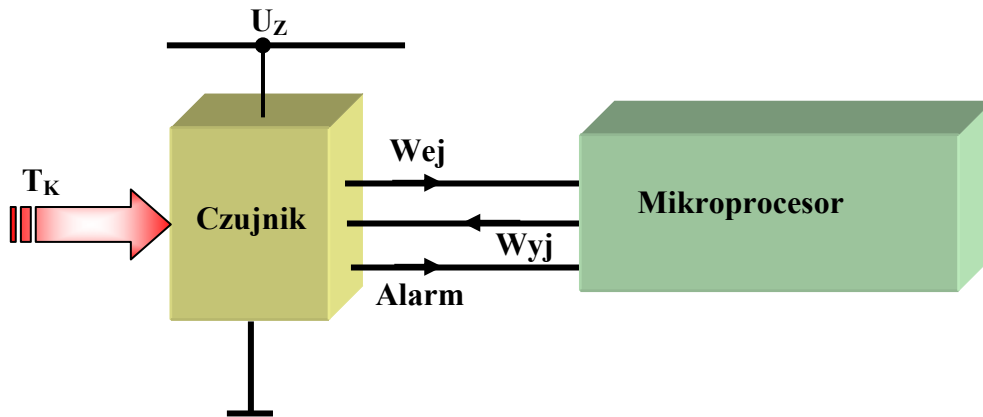


Rys. 1.6. Czujnik z wyjściem analogowym progowym

Na początku 2000 roku pojawiły się scalone czujniki temperaturowe o cyfrowych wejściach i wyjściach. Zawierają one cyfrowy interfejs, pozwalający na komunikację z mikrokontrolerem (Rys. 10.7). Zazwyczaj jest to szeregowy magistrala I²C lub SMBus. Oprócz przesyłania wyników temperatury z czujnika, magistrala służy do przekazywania rozkazów z mikrokontrolera. Są to zwykle wartości progów temperaturowych, których przekroczenie wywołuje wysyłanie określonych sygnałów przez czujnik, np. wywołujące przerwanie w mikroprocesorze. Ten rodzaj czujników może spełniać rozmaite zadania, na przykład zdalne monitorowanie temperatury (np. w systemach bezpieczeństwa).

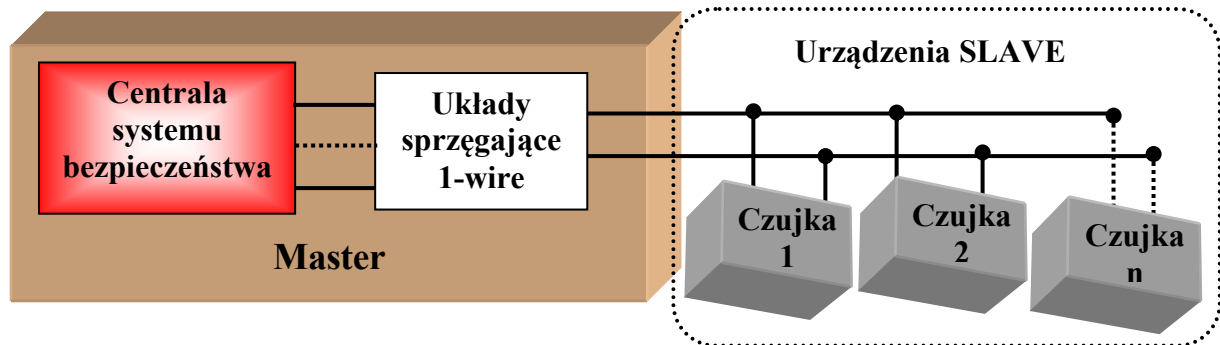
W tym celu większość zaawansowanych mikroprocesorów jest wyposażona w tranzystor, dostarczający analogowego napięcia zależnego od temperatury (używane jest jedno z dwóch złącz p-n tranzystora). Inną ważną funkcją takich czujników jest wywoływanie przerwania mikrosterownika, gdy temperatura wychodzi poza granice zakresu wyznaczonego jako próg dolny i górny.

W innych czujnikach przerwanie jest generowane, gdy mierzona temperatura wychodzi albo poza górny, albo dolny próg (ale nie oba). W przypadku tego rodzaju czujników granice te są ustalane za pośrednictwem interfejsu. Jeżeli temperatura przekroczy w górę (lub w dół) zadany zakres, to sygnał alarmowy wywołuje przerwanie w procesorze.

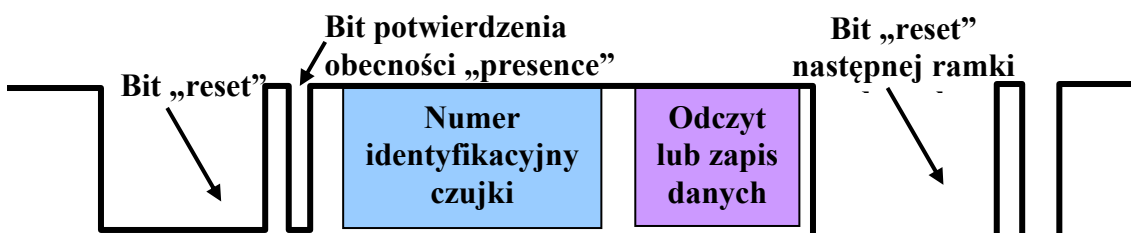


Rys. 10.7. Scalony czujnik temperatury z wyjściem cyfrowym

Do wymiany informacji między czujnikiem a mikrokomputerem (centralą alarmową) może służyć magistrala 1-wire, która jest standardem magistrali szeregowych do przesyłu danych między urządzeniami „slave” i „master” (rys. 10.8). Każde urządzenie „slave” (czujnik) jest wyposażone w unikalny numer nadany w trakcie instalowania systemu bezpieczeństwa.



Rys. 10.8. Budowa magistrali 1-wire



Rys. 10.9. Ramka przesyłania danych w systemie bezpieczeństwa

Magistrala 1-wire może zawierać tylko jeden układ *master* i może nadawać lub odczytywać informację z innych układów – jest więc układem dwukierunkowym. Na rys. 10.9 przedstawiono ramkę transmisji danych w interfejsie 1-wire. Każda ramka rozpoczyna się

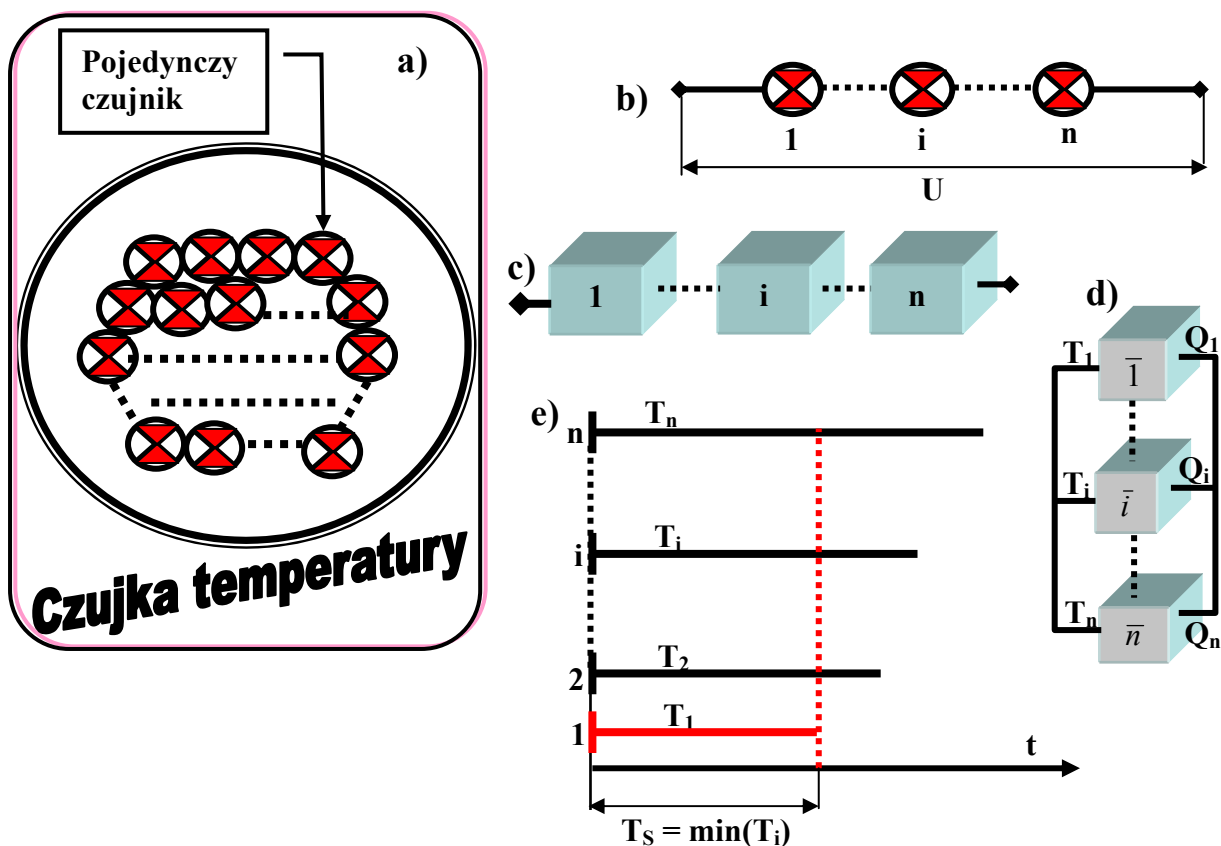
wysłaniem przez układ *master* sygnału „reset”, na który czujka - układ *slave* odpowiada sygnałem „presence”, a następnie jest transmitowany unikalny dla każdej czujki numer identyfikacyjny. Po przesłaniu następuje odebranie lub przesłanie danych, a po zakończeniu transmisji następuje czas przerwy.

10.1.2. Niezawodność czujek temperatury

A. Czujka temperatury o konstrukcji mozaikowej jako model fizyczny obiektu szeregowego

Obiektem o strukturze szeregowej (obiektem szeregowym, rys. 10.10) przyjęto nazywać taki obiekt, który funkcjonuje poprawnie jedynie wówczas, gdy funkcjonują poprawnie wszystkie jego elementy składowe; natomiast staje się niezdatny z chwilą uszkodzenia się któregośkolwiek z tych elementów.

Mechanizm tworzenia tego rodzaju obiektów (czujek) oparty jest na tzw. zasadzie parsimonii (z łac. *parsimonia* – oszczędność). W myśl tej zasady najlepszym obiektem z określonego zbioru obiektów funkcjonalnie równoważnych jest obiekt produkcyjnie najtańszy, tj. obiekt (czujka) zawierająca najmniejszą liczbę elementów.



Rys. 10.10. Czujka temperatury o konstrukcji mozaikowej jako model fizyczny obiektu szeregowego

gdzie: a) czujka temperatury; b) sposób połączenia czujników wewnątrz czujki temperatury; c) struktura niezawodnościowa czujki w zapisie pozytywowym (zdatnościowym); d) struktura niezawodnościowa czujki w zapisie negatywowym (niezdatnościowym); e) wykres trwałości czujki

Zgodnie z zasadą parsimonii przyjmuje się, że elementy, których znaczenie dla funkcjonowania obiektu jest znikome, należy eliminować jako zbędne. W wyniku takiego postępowania z obiektu (tj. czujki) zostaje wyeliminowany wszelki nadmiar strukturalny, co powoduje, że uszkodzenie się któregokolwiek z elementów czujki pociąga za sobą przejście tego obiektu do stanu niezdatności.

Niezawodność (nieuszkodzalność) R_s czujki o strukturze szeregowej, zawierającej n czujników temperatury, w przypadku uszkodzeń wzajemnie niezależnych, wyraża się wzorem:

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i = R_1 \dots R_i \dots R_n \quad (10.5)$$

gdzie: R_i ($i=1, \dots, n$) oznacza nieuszkodzalność i -tego elementu.

W szczególnym przypadku, gdy wszystkie czujniki (elementy półprzewodnikowe) posiadają taką samą **nieuszkodzalność** to czujka jest obiektem statystycznie jednorodnym i wówczas niezawodność można wyznaczyć za pomocą wzoru:

$$R_s = R_s(R_i | R_i = R; \quad i = 1, \dots, n) = R^n \quad (10.6)$$

Cechą charakterystyczną czujki zbudowanej z połączenia szeregowego elementów jest to, że staje się on obiektem praktycznie wysoce zawodnym ($R_s \rightarrow 0$) już przy stosunkowo niewielkiej liczbie elementów składowych – czujników.

Często, zamiast wyznaczać wartość R_s , znacznie efektywniej jest wyznaczyć wartość Q_s , tj. **zawodność** obiektu szeregowego, według wzoru:

$$Q_s = 1 - R_s = 1 - (1 - Q)^n \quad (10.7)$$

gdzie: Q oznacza zawodność elementu (czujnika półprzewodnikowego) w strukturze mozaikowej – w tym przypadku to czujka pożarowa.

Obiekt o strukturze szeregowej można analizować również w aspekcie trwałości. Przyjmuje się wówczas, że obiektem o strukturze szeregowej, albo – krótko – obiektem szeregowym, jest każdy obiekt, którego trwałość T_s jest zdeterminowana trwałością najsłabszego (najmniej trwałego) elementu:

$$T_s = \min(T_i) = \min(T_1, \dots, T_i, \dots, T_n) \quad (10.8)$$

gdzie: T_i oznacza trwałość i -tego elementu (tj. czujnika).

B. Czujka temperatury o konstrukcji mozaikowej jako model fizyczny obiektu równoległego

Obiektem o strukturze równoległej (obiektem równoległym, rys. 10.11) przyjęto nazywać taki obiekt (czujkę o strukturze mozaikowej), który poprawnie funkcjonuje dotąd, dopóki poprawnie funkcjonuje chociażby jeden dowolny jego element.

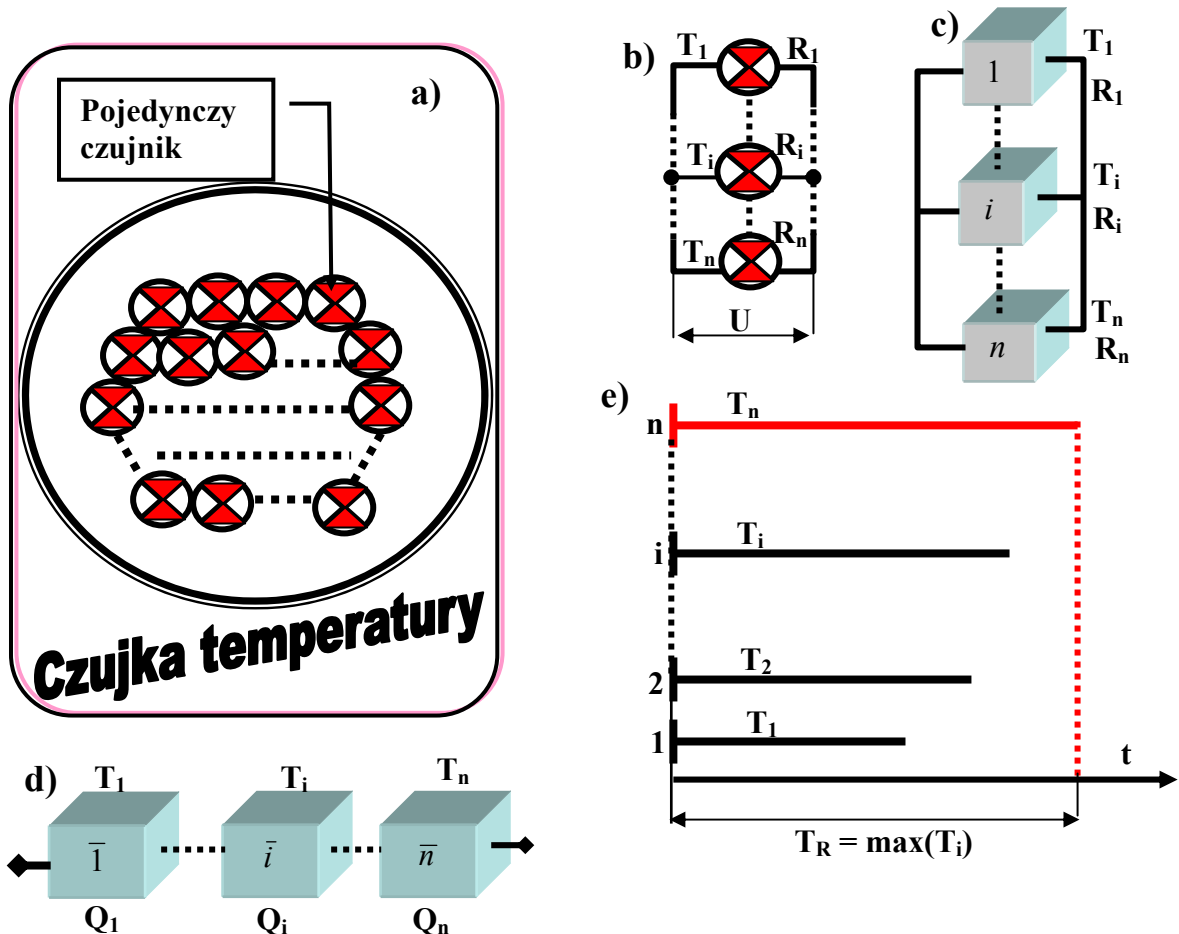
Mechanizm tworzenia tego rodzaju obiektów (czujek) oparty jest na tzw. zasadzie redundancji (z łac. *redundantia* – nadmiar), w myśl której do obiektu wprowadza się celowo pewną liczbę elementów nadmiarowych, których zasadniczym i podstawowym zadaniem jest zwiększenie niezawodności i trwałości czujki. Obiektami równoległymi są w zasadzie wszystkie organizmy biologiczne oraz większość obiektów technicznych (w tym np. systemy bezpieczeństwa). Zgodnie z przytoczoną definicją obiekt równoległy uznaje się za niezdatny wówczas, gdy ulegają uszkodzeniu wszystkie jego elementy składowe. Zatem zawodność Q_r n -elementowego obiektu równoległego w przypadku, kiedy uszkodzenia jego elementów składowych są uszkodzeniami wzajemnie niezależnymi, można wyrazić wzorem:

$$Q_R = \prod_{i=1}^n Q_i = Q_1 \dots Q_i \dots Q_n \quad (10.9)$$

gdzie: Q_i , ($i = 1, \dots, n$) oznacza zawodność i-tego elementu.

W przypadku obiektu jednorodnego można stosować wzór:

$$Q_R = Q_R(Q_i \mid Q_i = Q; \quad i = 1, \dots, n) = Q^n \quad (10.10)$$



Rys. 10.11. Czujka temperatury o konstrukcji mozaikowej jako model fizyczny obiektu równoległego

gdzie: a) czujka temperatury; b) sposób połączenia czujników wewnątrz czujki temperatury; c) struktura niezawodnościowa czujki w zapisie pozytywowym (zdatnościowym); d) struktura niezawodnościowa czujki w zapisie negatywowym (niezdatnościowym); e) wykres trwałości czujki

Niezawodność (nieuszkodzalność) R_R obiektu (czujki) o strukturze niezawodnościowej równoległej wyznacza się ze wzoru:

$$R_R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad \text{oraz} \quad R_R = 1 - (1 - R)^n \quad (10.11)$$

Z podanych zależności wynika, że niezawodność obiektu równoległego wzrasta nie tylko ze wzrostem niezawodności jego elementów składowych (rys. 10.11), ale również, że wzrostem liczby elementów.

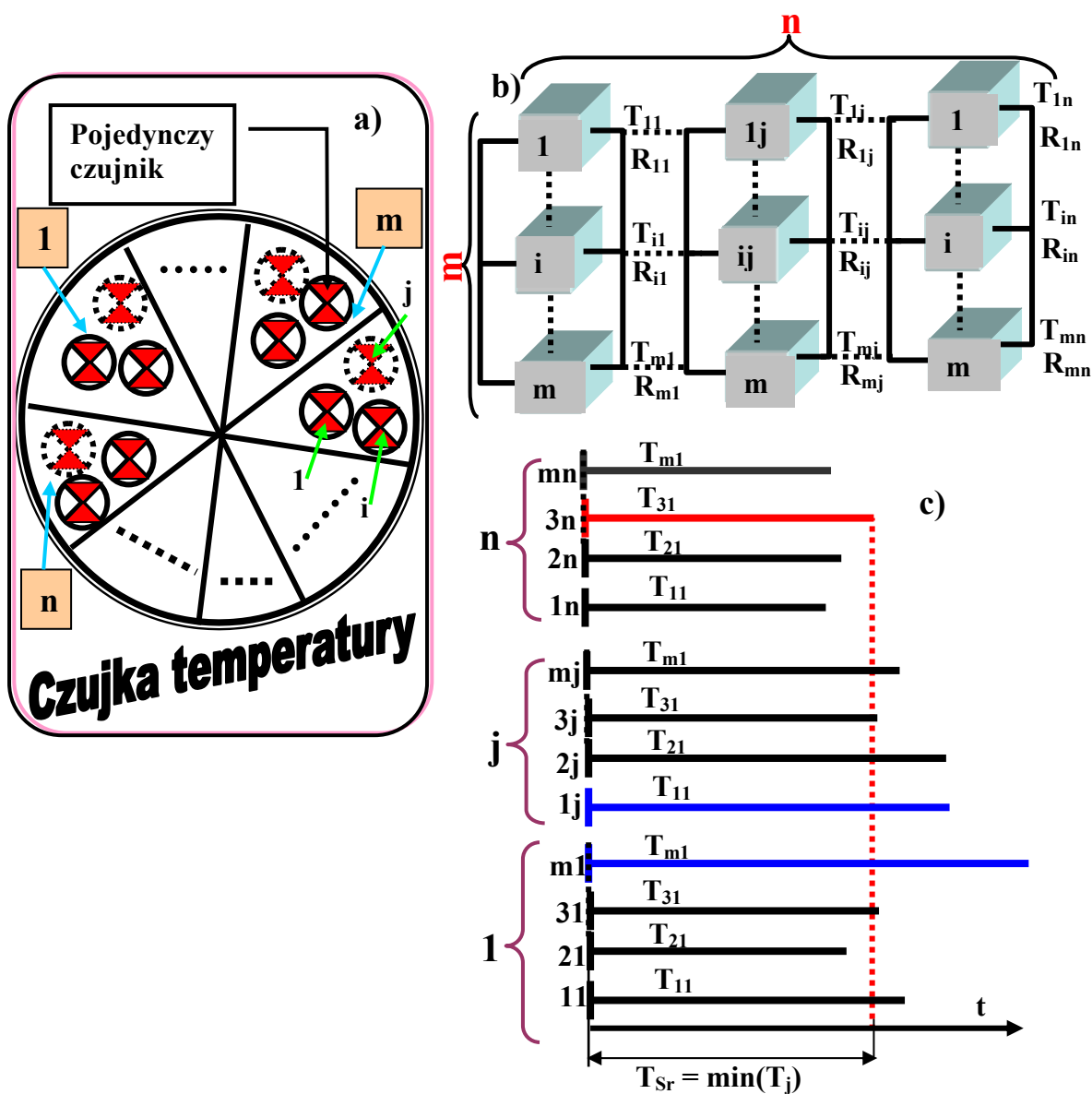
Obiekt o strukturze równoległej można charakteryzować również w aspekcie trwałości. Przyjmuje się wówczas, że obiekt (czujka), ma trwałość T_R która jest zdeterminowana trwałością najmocniejszego (najtrwalszego) elementu

$$T_R = \max_i(T_i) = \max(T_1, \dots, T_i, \dots, T_n) \quad (10.12)$$

gdzie: T_i oznacza trwałość i – tego elementu.

C. Niezawodność obiektów szeregowo – równoległych

Obiektem szeregowo – równoległym (Rys. 10.12) przyjęto nazywać taki obiekt (czujkę), który funkcjonuje poprawnie wówczas, gdy wszystkie jego n zespoły o równoległym połączeniu m elementów funkcjonują poprawnie. Zespół (podsystem czujki mozaikowej), rozumiemy w tym przypadku, jako podzbiór pewnej liczby elementów np. półprzewodnikowych o określonej strukturze niezawodnościowej.



Rys. 10.12. Czujka temperatury o konstrukcji mozaikowej jako model fizyczny obiektu szeregowo – równoległego
gdzie: a) czujka temperatury; b) struktura niezawodnościowa czujki; c) wykres trwałości czujki

Niezawodność (nieuszkodzalność) R_{sr} obiektu szeregowo – równoległego mającego n zespołów o m równoległe połączonych elementach wynosi:

$$R_{sr} = \prod_{j=1}^n \left[1 - \prod_{i=1}^m (1 - R_{ij}) \right] \quad (10.13)$$

gdzie: R_{ij} oznacza nieuszkodzalność i -tego elementu znajdującego się w j -tym zespole.

W przypadku gdy rozważany obiekt jest obiektem jednorodnym i regularnym, tj. obiektem o jednakowej liczbie elementów półprzewodnikowych w poszczególnych zespołach wówczas **niezawodność** (nieuszkodzalność) można wyrazić następującym wzorem:

$$R_{sr} = [1 - (1 - R)^m]^n \quad (10.14)$$

Odpowiednio **zawodność** obiektu, czujki jednorodnej można wyrazić jako:

$$Q_{sr} = 1 - [(1 - Q)^m]^n = 1 - [1 - (1 - R)^m]^n \quad (10.15)$$

Czujka temperatury (zbudowana według rys. 10.12b) ma tę właściwość, że uszkodzenie się któregokolwiek zespołu jest traktowane jako uszkodzenie się (niezdatność) całej czujki.

Obiekt szeregowo-równoległy można opisać także w aspekcie trwałości. Przyjmuje się wówczas, że jest to taki obiekt (czujka), którego trwałość T_{sr} jest zdeterminowana trwałością T_j ($j=1, \dots, n$) najsłabszego zespołu (podsystemu).

$$T_{sr} = \min_j(T_j) = \min(T_1, \dots, T_j, \dots, T_n) \quad (10.16)$$

przy czym trwałość każdego j -tego zespołu (podsystemu) jest zdeterminowana trwałością jego najmocniejszego elementu, to znaczy:

$$T_j = \max_i(T_{ij}) = \max(T_{1j}, \dots, T_{ij}, \dots, T_{mj}) \quad (10.17)$$

Zatem trwałość T_{sr} czujki jako obiektu szeregowo – równoległego można zapisać jako:

$$T_{sr} = \min_j[\max_i(T_{ij})] = \min_j[\max_i(T_{i1}), \dots, \max_i(T_{ij}), \dots, \max_i(T_{in})] \quad (10.18)$$

D. Niezawodność obiektów równoległo - szeregowych

Obiektem równoległo – szeregowym (Rys. 10.13) przyjęto nazywać taki obiekt (czujnik), który funkcjonuje poprawnie wówczas, gdy przynajmniej jeden spośród n jego zespołów (podsystemów) funkcjonuje poprawnie.

Niezawodność (nieuszkodzalność) R_{rs} obiektu równoległo – szeregowego (Rys. 10.13) mającego n zespołów o m szeregowo połączonych elementach można zapisać jako:

$$R_{rs} = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - \prod_{i=1}^m R_{ij}) \quad (10.19)$$

gdzie: R_{ij} oznacza nieuszkodzalność i -tego elementu znajdującego się w j -tym zespole.

W przypadku, gdy rozważany obiekt jest obiektem jednorodnym i regularnym, tj. obiektem o jednakowej liczbie elementów w poszczególnych zespołach (np. diody półprzewodnikowe tego samego typu) wówczas **niezawodność** wyraża się wzorem:

$$R_{rs} = 1 - (1 - R^m)^n \quad (10.20)$$

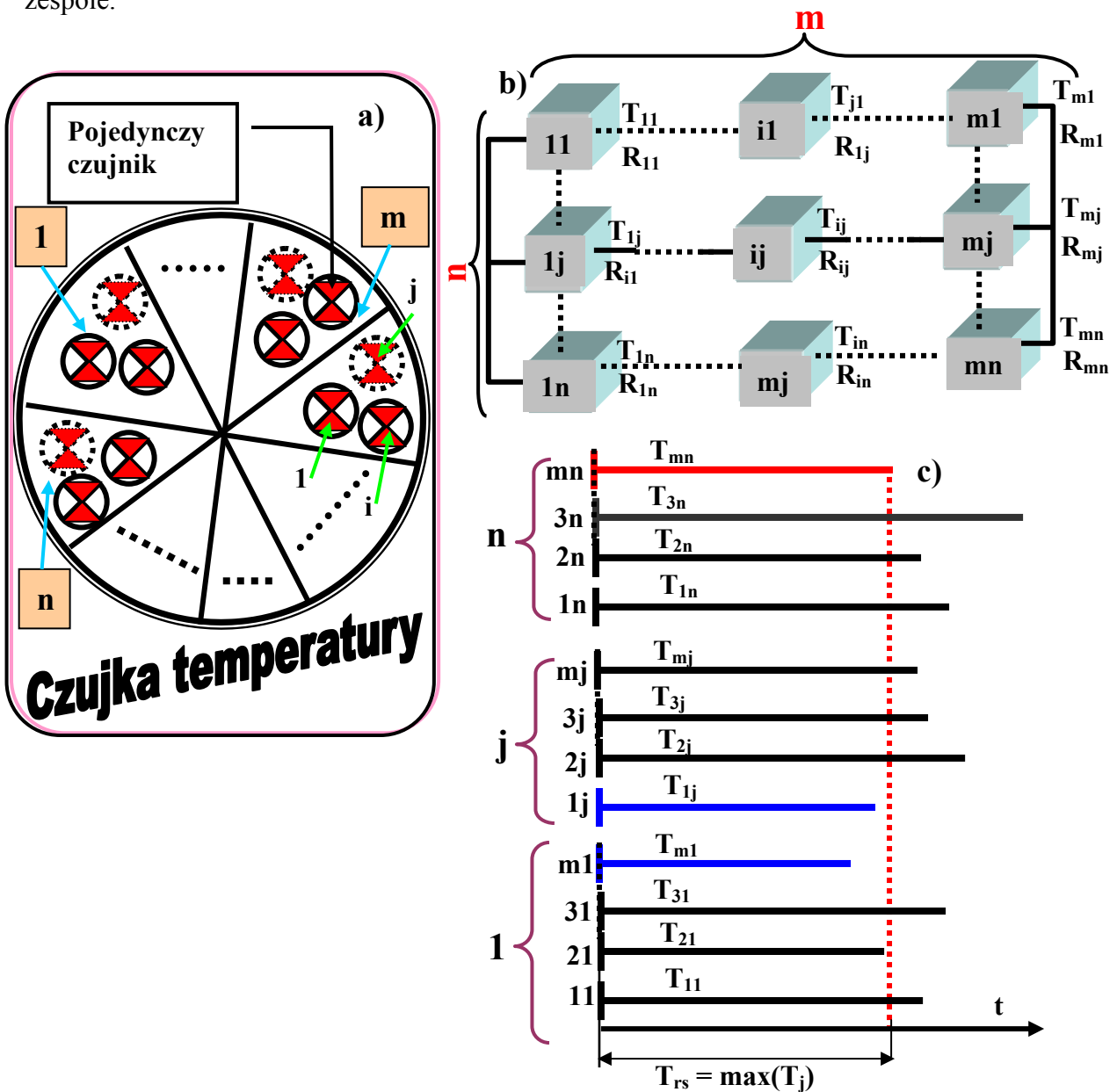
Odpowiednio **zawodność** rozważanego obiektu jednorodnego można wyrazić jako:

$$Q_{rs} = [1 - (1 - Q)^m]^n = [1 - R^m]^n \quad (10.21)$$

Obiekt równoległo-szeregowy można opisać także w aspekcie trwałości. Przyjmuje się wówczas, że jest to taki obiekt (czujka), którego trwałość T_{rs} jest zdeterminowana trwałością najsłabszego elementu w najtrwałszym zespole (podsystemie):

$$T_{rs} = \max_j [\min_i (T_{ij})] = \max_j [\min_i (T_{i1}), \dots, \min_i (T_{ij}), \dots, \min_i (T_{in})] \quad (10.22)$$

przy czym T_{ij} ($i=1, \dots, m$; $j=1, \dots, n$) oznacza trwałość (czas życia) i -tego elementu w j -tym zespole.



Rys. 10.13. Czujka temperatury o konstrukcji mozaikowej jako model fizyczny obiektu równoległo – szeregowego
gdzie: a) czujka temperatury; b) struktura niezawodnościowa czujki; c) wykres trwałości czujki

10.2. Przykład rozwiązania mikroprocesorowej czujki dymu i temperatury

Funkcję czujnika temperatury może pełnić np. układ cyfrowy z serii MAX do wielokanałowego, precyzyjnego pomiaru temperatury. Zdalny pomiar temperatury mogą realizować tranzystory w połączeniu diodowym, np. tranzystory p-n-p typu 2N3904, które zastępują konwencjonalne termistory lub termopary.

W układzie laboratoryjnym zastosowano dwuprzewodowy interfejs szeregowy SMBus. Jego standardowe protokoły Write Byte, Read Byte, służą do programowania poziomów alarmowych oraz odczytu wyników pomiarów temperatury. Format danych: 7 bitów + znak, przy czym waga 1 bitu odpowiada wartości 1°C w zapisie uzupełnień do 2. Układy te powinny pracować z mikroprocesorem lub komputerem generującym odpowiednie instrukcje dla interfejsu SMBus.



Rys. 10.14. Widok czujki firmy TEXECOM

Tabela 10.1. Parametry techniczne czujki firmy Texecom

Parametry techniczne	
Wyjście alarmowe	NC 24VDC/50mA
Wejście sterowania pamięcią alarmu	
Zasilanie	9.....16VDC
Pobór prądu	15mA
Temperatura pracy	-20.....+80 °C
Wymiary	105 x 55 mm

Podstawowe parametry układu cyfrowego:

- Liczba kanałów: 4 zdalne; 1 lokalny;
- Kalibracja układu – automatyczna;
- Interfejs SMBus;
- Programowalne sygnały alarmu przy przekroczeniu granicznych wartości temperatury;
- Niedokładność:
 - o ± 2 °C pomiar lokalny, (+60 ÷ +100)°C;
 - o ± 3 °C pomiar lokalny, (-40 ÷ +125)°C;
 - o ± 3 °C pomiar zdalny, (+60 ÷ +100)°C;
- Prąd zasilania w stanie spoczynku 3μA;
- Napięcie zasilania od -0,3V do 6V;
- Prąd na wejściach Alarm -1mA do +50mA;
- Zakres temperatury pracy (-55 ÷ +125)°C;
- Dopuszczalna temperatura struktury +150°C.

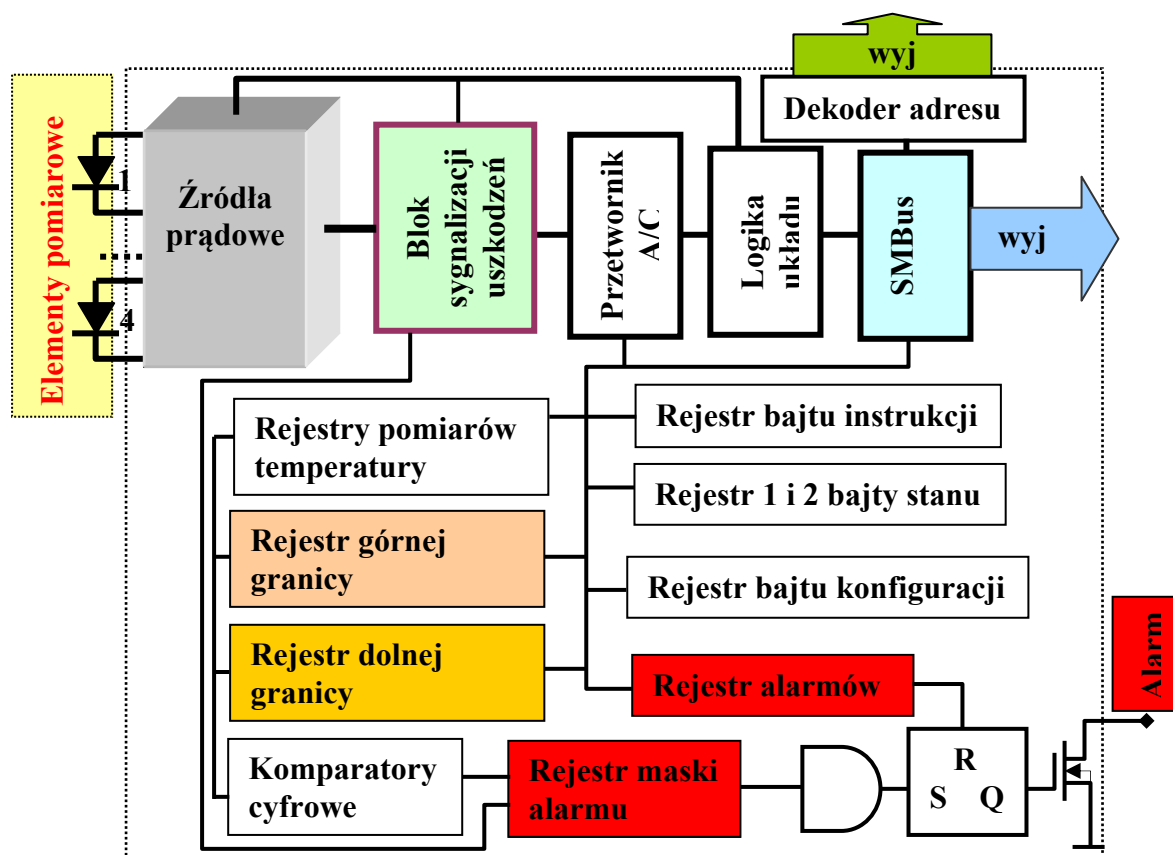
Niedokładność pomiaru temperatury zależy w znacznym stopniu od właściwego doboru tranzystora, który w połączeniu diodowym (baza zwarta z kolektorem) jest czujnikiem temperatury. Powinien to być tranzystor małosygnałowy (n-p-n lub p-n-p), o względnie dużym spadku napięcia w kierunku przewodzenia U_{BE} (ze względu na dopasowanie do zakresu napięcia wejściowego przetworników A/C). Napięcie to powinno być większe niż 0,25V dla prądu 10μA (przy największej spodziewanej temperaturze), oraz mniejsze niż 0,95V dla prądu 100μA (przy najmniejszej spodziewanej temperaturze).

W torach gdzie przyłączony jest czujnik do pomiaru temperatury następuje ciągle sprawdzanie stanu technicznego i funkcjonalnego tego elementu (zwarcie, rozwarcie). Diody są sprawdzane na początku każdego przetwarzania i wtedy następuje uaktualnienie stanu zawartości bajtu. Detektor uszkodzenia diody jest prostym detektorem napięcia. Jeśli napięcie na końcówce diody wzrasta powyżej wartości $U_{cc} = -1V$, to następuje sygnalizacja uszkodzenia. Przerwania alarmowe pojawiają się wtedy, gdy temperatura wykracza poza zadany zakres lub któraś z diód zdalnego pomiaru ulega uszkodzeniu (pojawia się przerwa w obwodzie). Przerwanie nie wstrzymuje od razu przetwarzania A/C, następuje to dopiero po zatwierdzeniu sygnału alarmu.

Podstawowym elementem układu jest 8-bitowy szeregowy przetwornik analogowo-cyfrowy ze specjalnymi układami wejściowymi (Rys. 10.15). Ponadto układy zawierają przełączane źródła prądowe, multiplekser, interfejs SMBus i związane z nim układy logiczne. W układzie tym dane z pomiarów temperatury są wprowadzane do 5 rejestrów danych, gdzie są automatycznie porównywane z danymi zapisanymi uprzednio w 10 rejestrach alarmu (sygnalizacja temperatury zbyt małej lub zbyt dużej – poza ustawionym zakresem).

Zastosowano integracyjne przetworniki A/C, które uśredniają sygnał wejściowy w okresie 64 ms (w każdym kanale), co daje dobre tłumienie zakłóceń zwłaszcza pochodzących od sieci zasilającej. Multiplekser automatycznie przełącza prądy polaryzujące diód pomiarowych: lokalnych lub zdalnych oraz ich napięcia w kierunku przewodzenia, które po przetworzeniu A/C dają cyfrowe wyniki pomiaru temperatury.

Po rozpoczęciu procesu przetwarzania kanały są automatycznie kolejno przełączane.



Rys. 10.15. Schemat funkcjonalny mikroprocesorowego układu pomiaru temperatury

Typowa szybkość przetwarzania to trzy przetworzenia na sekundę. Przetwarzanie A/C następuje także w kanałach nieużywanych. Te wyniki powinny więc być ignorowane przez

użytkownika. Dwuprzewodowy interfejs szeregowy SMBus opiera się na architekturze i poleceniach I²C. Pod względem sposobów adresowania i organizacji ramki przesyłania danych występuje pełna zgodność. Zmodyfikowano jedynie pewne parametry elektryczne co umożliwiło uzyskanie większej szybkości przesyłania danych.

10.3. Zadanie laboratoryjne

Korzystając z programu *PSpice* wykonać symulacyjne badania właściwości użytkownicznościowych różnych struktur półprzewodnikowych stosowanych do budowy czujników temperatury. Wyniki badań i stosownych obliczeń zamieścić w tabeli 10.2.

Tabela 10.2. Wyniki badań różnych struktur czujek temperaturowych

Rodzaj struktury		Czułość [mV/°C]	Wartość prawdopodobieństwa zdatności R (wyliczona dla poszczególnych struktur)
Tranzystory	Pojedynczy tranzystor		
	Połączenie szeregowe		
	Połączenie równoległe		
Diody	Pojedyncza dioda		
	Połączenie szeregowe		
	Połączenie równoległe		
Struktury mieszane dioda - tranzystor	Równoległo-szeregowe diody		
	Równoległo-szeregowe tranzystory		

10.4. Uwagi końcowe

W wyniku wykonania ćwiczenia należy przedstawić sprawozdanie, które powinno zawierać:

- wyniki symulacji i obliczeń (tabela 10.2);
- wnioski z przeprowadzonych badań i dyskusji.

Przygotowanie do ćwiczenia powinno obejmować zapoznanie z treścią rozdziału 3 (a szczególnie pkt. 3.1) oraz z treścią rozdziału 4 podręcznika: L. Będkowski, T. Dąbrowski „Podstawy eksploatacji, cz. 2. Podstawy niezawodności eksploatacyjnej”, Wyd. WAT 2006.

10.5. Zagadnienia kontrolne

1. Omówić bezstykowy sposób pomiaru temperatury.
2. Jakie właściwości diody i tranzystora wykorzystuje się do pomiaru temperatury ?
3. Omówić pracę tranzystora w układzie diodowym stosowanym do pomiaru temperatury.
4. Jak działają scalone analogowe czujniki temperaturowe z wyjściem analogowym i progowym ?
5. Omówić sposób transmisji informacji w magistrali 1-wire.
6. Jak wyznacza się niezawodność czujek temperatury pracujących w układzie mozaikowym szeregowym ?
7. Jak wyznacza się niezawodność czujek temperatury pracujących w układzie mozaikowym równoległym ?
8. Jak wyznacza się nieuszkodzalność czujek temperatury pracujących w układzie mozaikowym szeregowo-równoległym ?
9. Jak wyznacza się nieuszkodzalność czujek temperatury pracujących w układzie mozaikowym równoległo-szeregowym ?
10. Określić wypadkową trwałość czujek w układzie szeregowym oraz równoległym.
11. Określić wypadkową trwałość czujek w układzie szeregowo-równoległym.
12. Omówić przykładowe parametry techniczne mikroprocesorowej czujki temperatury.
13. W jaki sposób następuje pomiar i przetwarzanie sygnału w mikroprocesorowym czujniku pomiaru temperatury ?
14. Jakie właściwości elementów półprzewodnikowych wykorzystywane są w pomiarach temperatury ?
15. Jakie są sposoby zwiększenia dokładności pomiaru temperatury w czujkach analogowych ?