

Zbigniew RACZYŃSKI

Instytut Elektryfikacji
i Automatykacji Górniczo-
Politechniki Śląskiej

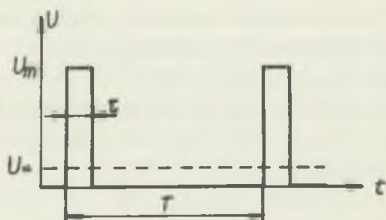
ANALIZA ZJAWISK TERMOKINETYCZNYCH ZACHODZĄCYCH W TENSOMETRZE ZASILANYM NAPIĘCIEM IMPULSOWYM

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę różnicową analizy pola temperatur w stanie cieplnie nieustalonym tensometru zasilanego napięciem impulsowym. W metodzie tej model cieplny tensometru odwzorowano w postaci analogu elektrycznego dwuwymiarowej siatki skupionych rezystancji i pojemności cieplnych. Przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych cyklicznie nagrzewanego i chłodzonego tensometru dla różnych wartości stosunku okresu napięcia impulsowego do cieplnej stałej czasowej tensometru. Posłużyło to do weryfikacji dokładności wzorów przedstawionych w literaturze, a opisujących proces nagrzewania i chłodzenia drutów tensometru zasilanego napięciem impulsowym o małej częstotliwości impulsowania. Niska częstotliwość impulsowego napięcia zasilającego pozwala znacznie zwiększyć amplitudę impulsów, a tym samym czułość, przy zachowaniu dużej dokładności przetworzenia. Uzyskane wyniki obliczeń numerycznych potwierdziły celowość stosowania dokładniejszej analizy do rozwiązywania zagadnień cieplnych tensometru zasilanego napięciem impulsowym o okresie impulsowania wielokrotnie większym, niż cieplna stała czasowa tensometru.

1. WPROWADZENIE

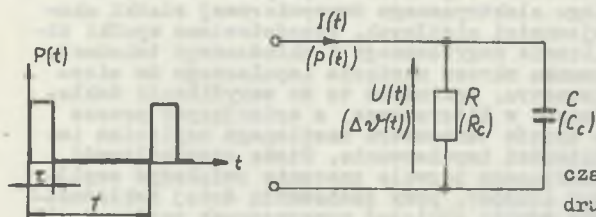
Znaczny wzrost czułości przetwornika tensometrycznego można uzyskać stosując zasilanie impulsowe. Wykorzystuje się tu możliwość zwiększenia mocy chwilowej impulsów prądowych zasilających mostek tensometryczny tak, żeby jednak średnia moc za okres impulsowania nie przekroczyła mocy dopuszczalnej. Przy impulsowym zasilaniu amplituda impulsów może być wielokrotnie większa, niż przy zasilaniu ciągłym (rys. 1) i w takim samym stosunku wzrośnie czułość napięciowa (chwilowa) przetwornika tensometrycznego.

Wiele publikacji [2, 4, 8] poświęconych jest zagadnieniu termokinetycznych stanów nieustalonych w tensometrze zasilanym impulsowo. Uproszczone analiza cieplnych procesów dynamicznych zachodzących w tensometrze nagrzewanym impulsem prądowym prowadzi do prostego analogu elektrycznego w postaci obwodu RC (rys. 2), dla którego wzory na przyrosty temperatur drutów tensometru są następujące [2]



Rys. 1

Przebieg napięcia impulsowego
Course of the pulses voltage



Rys. 2

Dwójnik RC
Two-terminal network RC

$$\Delta v_{\max}^{\delta} = v_m \frac{1 - \exp(-\beta)}{1 - \exp(-\beta f)} \quad (1)$$

$$\Delta v_{\min}^{\delta} = \Delta v_{\max}^{\delta} \exp[-\beta(1-f)], \quad (2)$$

gdzie:

$\beta = \frac{T}{T_c}$ - stosunek okresu impulsu do cieplnej stałej czasowej tensometru,

$f = \frac{\tau}{T}$ - współczynnik wypełnienia impulsu,

v_m - ustalona temperatura drutów tensometru przy działaniu stałej mocy P_m .

Zakładając jednakową dopuszczalną temperaturę nagrzewania drutów tensometru przy zasilaniu napięciem stałym i impulsowym, otrzymuje się wzór (3) określający krotność dopuszczalnej amplitudy napięcia impulsowego w stosunku do dopuszczalnego napięcia stałego

$$N \stackrel{\text{def}}{=} \frac{U_{\text{mdop}}}{U_n} = \sqrt{\frac{1 - \exp(-\beta)}{1 - \exp(-\beta f)}} \quad (3)$$

Warto zauważyć, że przy $T \ll T_c$ (tzn. $\beta \ll 1$), krotność napięcia wynikająca z wzoru (3) wynosi

$$N = \sqrt{\frac{\tau}{T}} \quad (4)$$

Z analizy wzoru (3) wynika, że w zakresie zasilania impulsowego o $\beta < 1$ zwiększenie czułości wymaga znacznego skrócenia czasu τ trwania impulsu, a więc do warunków, w których pogorsze się dokładność przetwarzania ze względu na elektryczne zjawiska nieustalone. Na przykład dla tensometru typu LP 21-10/600 f-my Hottinger naklejonego na podłożu dobrze przewodzą-

cym ciepło cieplna stała czasowa T_c wynosi ok. 3,6 ms [6]. Dziesięciokrotne zwiększenie czułości (przy $\beta = 0,4$), ograniczy czas trwania impulsu do wartości $\bar{t} = 12 \mu s$ przy częstotliwości impulsowania $f = 700$ Hz.

Znaczne zwiększenie amplitudy impulsów, a tym samym czułości przy zachowaniu dużej dokładności przetwarzania możliwe jest przy znacznym zmniejszeniu częstotliwości impulsowania [6]. Wymaga to jednak przejścia do zasilania impulsowego o $\beta > 1$ (onkożenie tensometru po impulsie praktycznie do temperatury otoczenia).

W literaturze [4, 7] zakres zasilania impulsowego $\beta > 1$ analizowany jest również w oparciu o model cieplny tensometru, jak na rys. 2. Wyniki analizy tak uproszczonego modelu cieplnego istotnie różnią się od danych doświadczalnych, uzyskanych przy zasilaniu impulsowym o $\beta > 1$.

2. METODA RÓŻNICOWA ANALIZY POŁA TEMPERATUR W STANIE CIEPLNYM NIEUSTALONYM

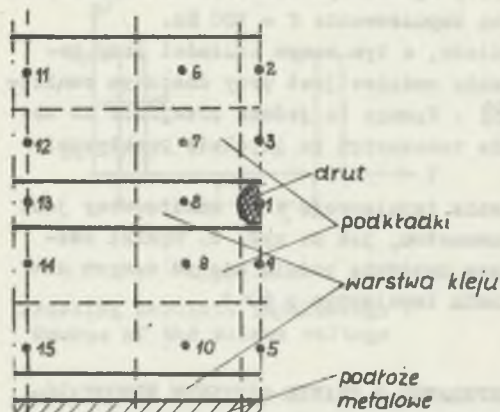
Zjawisko przewodzenia ciepła w stanie cieplnym nieustalonym w ciele niejednorodnym, zawierającym wewnętrzne źródła ciepła, opisuje równanie różniczkowe cząstkowe Fouriera [9]

$$c_p \rho \frac{d\vartheta}{dt} - \dot{q}_v = \lambda_x \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2}, \quad (5)$$

gdzie:

- c_p - średnie ciepło właściwe ciała,
- $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ - wypadkowe przewodności cieplne właściwe w kierunkach osi współrzędnych x, y, z ,
- \dot{q}_v - ilość ciepła wydzielająca się w jednostce czasu i jednostce objętości,
- ρ - średnie gęstość właściwe ciała.

Tensometr stanowi jednak dość skomplikowany układ cieplny ze względu na kształt i występowanie kilku warstw przewodzących o różnych właściwościach. Dlatego najskuteczniejszym uproszczonym rozwiązaniem równania (5) jest zastąpienie stałych rozłożonych uproszczonym układem stałych skupionych. W tym celu należy przeprowadzić dyskretyzację pola cieplnego, a więc przejście z ośrodka ciągłego, opisanego równaniami różniczkowymi przewodnictwa cieplnego, na siatkę przestrzenną opisaną równaniami różnicowymi [9]. Ponieważ tensometr jest obiektem, w którym pole temperatur w kierunku drutów tensometru praktycznie jest jednorodne, wystarczy więc rozważyć zagędnienie cieplne dwuwymiarowe.



Rys. 3

Podział różnicowy wycinka tensometru
LP 21 - 10/600
Differential division of the sector
strain gauge LP 21 - 10/600

Rys. 3 przedstawia schemat różnicowego podziału pola temperatur wycinka tensometru LP 21-10/600 (służącego jako model do obliczeń numerycznych). Ze względu na symetrię pola temperaturowego względem osi drucików, wystarczy rozważyć połowę pola elementu grzejnego drutu i tylko dla jednego drucika.

Dokładność przetworzenia przetwornika zależy od temperatury drutów tensometru. Mniej istotny jest rozkład pola temperatur w podkładkach tensometru. Z tego względu dokonano różnicowego podziału wycinka pola tensometru na 15 elementów, zagęszczając liczbę elementów w otoczeniu drutu.

Przy danym podziale tworzone są równania różnicowe (metoda Waniczewska [10]) na zasadzie bilansu przepływu energii dla poszczególnych elementów różnicowych.

Równanie różnicowe temperatury ψ w chwili $\tilde{t} + 1$ dla każdego węzła jest następujące

$$\psi_{i,\tilde{t}+1} = p_{ii} \psi_{i,\tilde{t}} + \sum_j p_{ij} \psi_{j,\tilde{t}} + p_{iF} \psi_{Fi,\tilde{t}} + b_{i,\tilde{t}} \quad (6)$$

gdzie współczynniki równania różnicowego są następujące:

$$p_{ii} = 1 - \frac{\Delta \tilde{t}}{C_{ci} R_{iF}} \left[\frac{1}{R_{iF}} + \sum_j \frac{1}{R_{ij}} \right], \quad p_{ij} = \frac{\Delta \tilde{t}}{C_{ci} R_{ij}}$$

$$p_{iF} = \frac{\Delta \tilde{t}}{C_{ci} R_{iF}}, \quad b_{i,\tilde{t}} = \frac{\Delta \tilde{t}}{q_i C_{pi}} \left[\dot{q}_{vi,\tilde{t}} + \frac{F \alpha_i}{V_i} \dot{q}_{pi,\tilde{t}} \right]$$

gdzie:

$F_{\alpha i}$ - pole zewnętrznej powierzchni i-tego elementu różnicowego,

V_i - objętość i-tego elementu różnicowego,

$\dot{Q}_{Fi, \tau}$ - średnia gęstość objętościowa ciepła dopływającego z zewnętrznej powierzchni ciała do węzła i w chwili τ ,

$\dot{Q}_{vi, \tau}$ - średnia gęstość objętościowa wewnętrznych źródeł ciepła w węźle i w chwili τ .

Równania (6) są liniowe dla każdego z węzłów i zawierają tylko jedną niewiadomą $\psi_{i, \tau+1}$. Liczba równań odpowiada liczbie węzłów i wymaga zastosowania maszyny cyfrowej, gdy liczba węzłów jest duża.

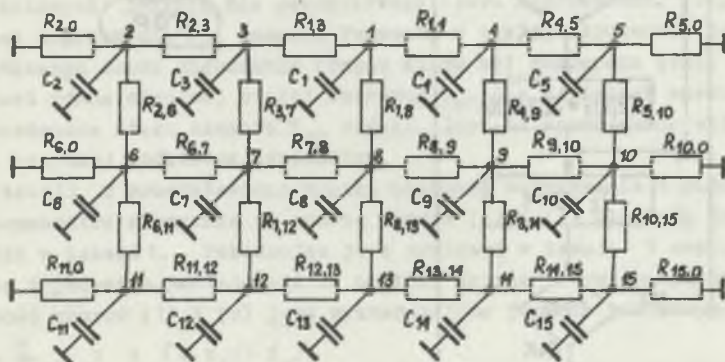
Rozwiązanie różnicowe zagadnienia nieustalonego przewodnictwa ciepła powinno spełniać warunki zbieżności i stabilności [1].

Obliczenia numeryczne stanów cieplnie nieustalonych przeprowadzono dla tensometru typu LP 21-10/600 firmy Hottinger [3] o rezystancji ok. 600Ω. Stałe materiałowe zaczerpnięto z pracy [5]. Jest to tensometr używany w krajowych czujnikach nacisku typu CN klasy 0,1.

Rozpatrywany tensometr naklejony jest na podłożu metalowym dobrze przewodzącym ciepło.

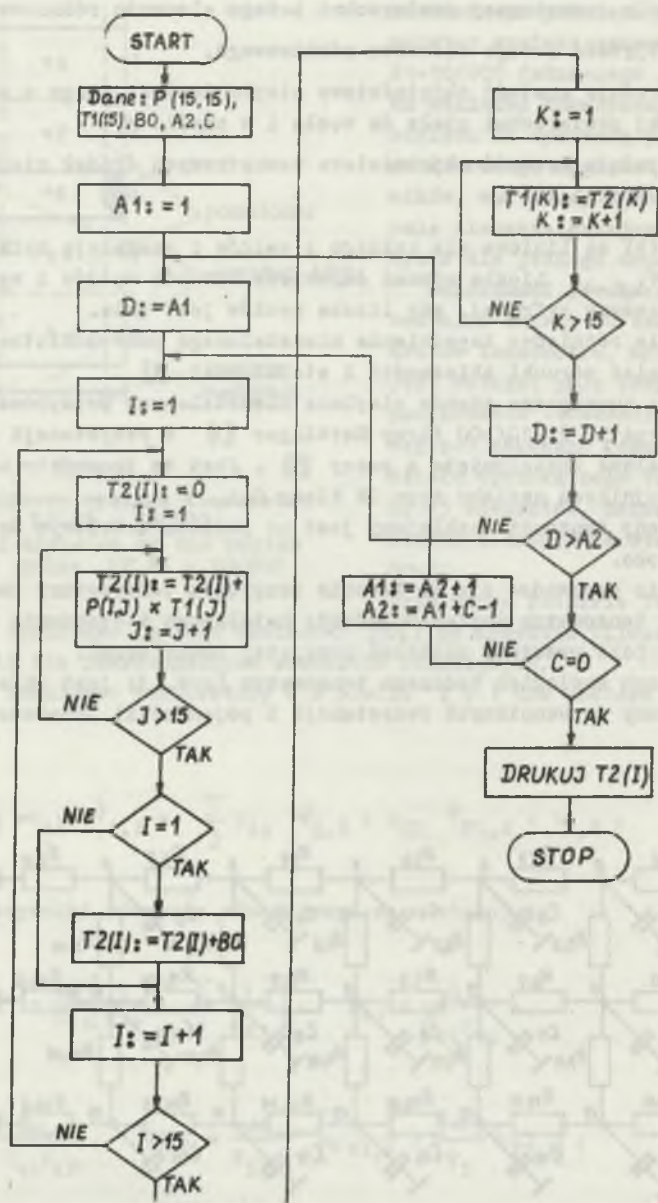
Zagadnienie sprowadza się do badania przyrostu temperatury poszczególnych punktów tensometru względem podłoża metalowego i otoczenia o stałej temperaturze (dla prostoty obliczeń przyjętej równą zero).

Elektrycznym analogiem badanego tensometru (rys. 3) jest układ elektryczny (zbudowany ze skupionych rezystancji i pojemności) przedstawiony na rys. 4.



Rys. 4

Schemat zastępczy wycinke pola tensometru
 Substitutional scheme of the sector-field strain gauge



Rys. 5

Schemat blokowy obliczeń numerycznych
Block scheme of the numerical calculations

Schemat działań, według którego przeprowadzone zostały obliczenia numeryczne, pokazano na rys. 5.

Weryfikację dokładności wzorów (1) i (2) dla różnych wartości β przeprowadzono, badając numerycznie proces cyklicznie nagrzewanego i chłodzonego tensometru. Równocześnie przeprowadzono obliczenia wykorzystując wzory (1) i (2). Ciepła stała czasowa tensometru określona została ze wzoru

$$T_c = R_c C_c \approx 3,6 \text{ ms}, \quad (1')$$

gdzie:

C_c - pojemność cieplna drutów tensometru określona z danych materiałowych,

R_c - zastępcza rezystancja cieplna od drutów tensometru do podłoża metalowego.

Wyniki obliczeń przedstawione są w tablicach 1 i 2.

3. INTERPRETACJA WYNIKÓW OBLICZEŃ

Przy kroku obliczeń maszynowych $\Delta t = 50 \mu\text{s}$ analiza cyklicznego nagrzewania i chłodzenia tensometru jest bardzo czasochłonna. Z tego powodu ograniczono się do 35 cykli nagrzewania i chłodzenia dla pozycji 1 i 2 oraz 7 cykli dla pozycji 3 (tabl. 1). Można przyjąć, że następne cykle nagrzewania i chłodzenia drutów tensometru są procesem ustalonym.

Z analizy wyników podanych w tabeli 1 dla ustalonego stanu nagrzewania i chłodzenia tensometru widać, że zastępcza cieplna stała czasowa nagrzewania T_{z1} jest równa cieplnej stałej czasowej T_c (wyznaczonej z danych materiałowych) jedynie dla początkowego czasu nagrzewania. Przy większych czasach nagrzewania T_{z1} rośnie. Podobnie w cyklu chłodzenia, jedynie dla początkowego czasu chłodzenia (rzędu kilku ms) zastępcza stała czasowa T_{z2} jest równa cieplnej stałej czasowej T_c . Dla dłuższego czasu chłodzenia zastępcza stała czasowa T_{z2} rośnie. Jest to spowodowane wpływem pojemności cieplnej podkładek tensometru.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń nagrzewania i chłodzenia drutów tensometru otrzymane za pomocą wzorów (1) i (2) dla tych samych warunków jak w tabeli 1. Porównując je z wynikami w tabeli 1 można stwierdzić, że dla tensometru naklejonego na podłożu dobrze przewodzącym ciepło, dokładność wzorów (1) i (2) jest wystarczająca jedynie dla przypadku

$$\beta = \frac{T}{T_c} < 1 \quad \text{i} \quad \tau = \tau_1 \ll T_c.$$

Tabela 1

Wyniki obliczeń numerycznych cyklicznego nagrzewania i chłodzenia drutów tensometru

Lp	Nr cyklu	Nagrzewanie				Chłodzenie			
		U_m	t_1	$\psi_1(t_1)$	T_{z1}	t_2	$\psi_1(t_2)$	T_{z2}	ψ_{ust}
		V	ms	r	ms	ms	K	ms	K
1	1	100	0,05	2,31	3,57	3,5	0,30	1,71	166
	2	100	0,05	2,60	3,57	3,5	0,44	1,96	166
	19	100	0,05	3,44	3,56	3,5	1,16	3,22	166
	20	100	0,05	3,46	3,56	3,5	1,18	3,26	166
	34	100	0,05	3,70	3,55	3,5	1,40	3,62	166
	35	100	0,05	3,70	3,55	3,5	1,41	3,64	166
2	1	120	0,1	6,50	3,62	10	0,29	3,20	239
	2	120	0,1	6,79	3,62	10	0,46	3,71	239
	15	120	0,1	7,68	3,61	10	1,20	5,38	239
	16	120	0,1	7,70	3,61	10	1,22	5,42	239
	34	120	0,1	7,84	3,61	10	1,35	5,67	239
	35	120	0,1	7,84	3,61	10	1,35	5,67	239
3	1	50	2	13,24	5,20	200	0,04	34,47	41,5
	2	50	2	13,28	5,20	200	0,04	34,45	41,5
	7	50	2	13,28	5,20	200	0,04	34,45	41,5

Tabela 2

Wyniki obliczeń nagrzewania i chłodzenia drutów tensometru z wykorzystaniem wzorów (1) i (2)

Lp	Nagrzewanie				Chłodzenie		
	U_m	t_1	T_{c1}	$\psi_1(t_1)$	t_2	$\psi_1(t_2)$	β
	V	ms	ms	K	ms	K	-
1	100	0,05	3,6	3,68	3,5	1,41	0,99
2	120	0,1	3,6	6,98	10	0,446	2,81
3	50	2	3,6	17,69	200	2,3 E-23	56,1

Wykazano więc, że w przypadku $\beta > 1$ zjawiska termokinetyczne zachodzące w tensometrze rezystancyjnym należy analizować za pomocą innego modelu. W procesie nagrzewania i chłodzenia tensometru w tych warunkach istnieje potrzeba rozróżnienia dwóch ciepłych stałych czasowych, co będzie tematem następnego artykułu.

LITERATURA

- [1] Douglas J.: On the relation between stability and convergence in the numerical solution of linear parabolic and hyperbolic differential equations. J. Soc. Ind. Appl. Math., 4/56.
- [2] Gruzdiev S.W., Proszin E.M.: Impulsnaje tenczometris. Izd. "Energis", Moskwa 1976.
- [3] Hottinger Baldwin Messtechnik GMBH. Dehnungsmesstreifen DMS und Zubehör.
- [4] Ilinaksje L.S., Podmarkov A.N.: Pożuprewodnikowyje tenczodetziki. Izd. Energis, Moskwa 1980.
- [5] Kohlraush F.: Fizyka laboratoryjne t.I. PWN, Warszawa 1959.
- [6] Reczyński Zb.: Tenczometris impulsowa o granicznie małym wypełnieniu okresu impulsów. Rozprawa doktorska Politechniki Śląskiej, Gliwice 1983.
- [7] Skotnikov A.H., Sieroznov A.N.: Wybor parametrow impulsnego pitanije w mostowych tenczometriczeskich schemach. Izv. Techn., 6/1970.
- [8] Stein P.K.: Pulsing strain gage-circuits. Inst. and Control Syst., Febr. 1965.
- [9] Szergut J.: Metody numeryczne w obliczeniach ciepłych pieców przemysłowych. Wyd. Śląsk, Katowice 1977.
- [10] Waniczew A.P.: Pribliżonnyj metod rieszienie zadacz tiepłoprowadnosti. Izv. AN SSSR, 12/46.

Recenzent: doc. dr inż. Zbigniew Kądryna

Wpłynęło do redakcji dn. 15 stycznia 1985 r.

ANALYSIS OF THERMOKINETIC PHENOMENA OF PULSING STRAIN GAUGE

Summary

The paper presents a differential method of analysing of the temperature field in the state of a thermally unstable pulsing strain gauge.

In this method a thermal model of the strain gauge is mapped as an electrical analog of the two dimensional network of concentrated resistances and capacitances. The results of numerical calculations of the cyclically heated and cooled strain gauge are obtained. It is calculated with various impulse voltage periods to the thermal time-constant ratios of the strain gauge. It has made it possible to verify the accuracy of these formulas presented in literature which describe processes of the heating and cooling of the strain gauges wires, supplied by pulsive low frequency voltage. The low frequency of the pulsive voltage permits to increase significantly the amplitude of impulses which involves an increase of sensitivity keeping a high accuracy of converting. The obtained numerical results confirmed the expediency of applying an accurate analysis to the solution of thermal questions of a pulsing strain gauge, when the pulse period is considerably greater than the thermal time-constant of the strain gauge.

АНАЛИЗ ЯВЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРА ПИТАЕМОГО ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НАПРЯЖЕНИЯ

Резюме

В статье представлен дифференциальный метод анализа теплопроводности в состоянии неопределённой тепловой тензорезистора с импульсным питанием. В этом методе тепловая модель тензорезистора моделируется электрическим аналогом двухразмерной сети сосредоточенных резисторов и ёмкостей. Представлены результаты машинных вычислений циклически нагреваемого и охлаждаемого тензорезистора для различных значений соотношения периода импульсного напряжения к тепловой постоянной времени тензорезистора. Это послужило к проверке точности образцов формул приведенных в литературе, описывающих процесс нагрева и охлаждения проволоки тензорезистора питаемого импульсами напряжения с низкой частотой импульсирования. Низкая частота напряжения питающих импульсов позволяет значительно увеличить амплитуду импульсов а вместе с тем и чувствительность при сохранении большой точности преобразования. Полученные результаты машинных вычислений подтвердили целесообразность применения точного анализа к решению задач теплопроводности тензорезистора питаемого импульсным напряжением с периодом импульсов питания на много большим нежели тепловая постоянная времени тензорезистора.