

Jerzy JAKUBIEC
Zbigniew POKRYWKA

METODA UZYSKIWANIA CZASOWEGO PRZEBIEGU INTENSYWNOŚCI SPALANIA
KATALITYCZNEGO W MOSTKU PELISTOROWYM

Streszczenie. Opisana metoda polega na wyznaczaniu przebiegu związanego ze spalaniem katalitycznym na podstawie modelu mostka w postaci łańcucha równań nieliniowych, statycznych i dynamicznych oraz wartości chwilowych prądu zasilania i napięcia wyjściowego zmierzonych w stanie nieustalonym mostka.

A RECONSTRUCTION METHOD OF SIGNAL CONNECTED WITH INTENSITY OF
CATALYTIC COMBUSTION IN PELLISTOR BRIDGE

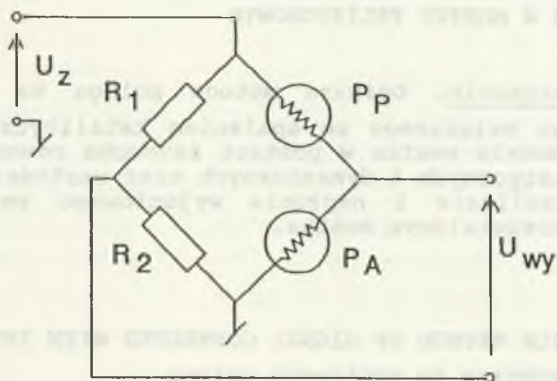
Summary. The described method consists in computing signal connected with catalytic combustion on the base of the bridge model given as a chain of nonlinear static and dynamic equations and instantaneous values of supply current and output voltage measured in transient state of the bridge.

МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВРЕМЕННОГО СИГНАЛА ИНТЕНСИВНОСТИ
КАТАЛИТИЧЕСКОГО СЖИГАНИЯ В ПЕЛИСТОРНОМ МОСТЕ

Резюме. Описан метод получения сигнала связанного с каталитическом сжиганием на основе модели моста в виде цепи нелинейных статических и динамических уравнений и мгновенных значений тока питания и выходного напряжения, измеряемых в переходном состоянии моста.

1. WSTĘP

Jeden z podstawowych sposobów pomiarów stężeń mieszanek palnych wykorzystuje zjawisko spalania katalitycznego. Układem stosowanym z reguły w takich przypadkach do uzyskania sygnału pomiarowego jest mostek pelistorowy [6] przedstawiony na rys.1a.



Rys.1. Budowa mostka pelistorowego

Fig.1. Construction of the pellistor bridge, P_A - catalytic pellistor, P_P - compensation pellistor

Dwa ramiona tego mostka stanowią rezystory R_1 i R_2 , a dwa pozostałe pelistory: aktywny P_A i pasywny P_P . Obydwa pelistory są grzejnikami platynowymi, przy czym pelistor aktywny pokryty jest katalizatorem, który powoduje obniżenie temperatury zapłonu mieszanki palnej do około 200°C . Odpowiednia konstrukcja mostka umożliwia uzyskanie w pewnym zakresie w przybliżeniu liniowej zależności między stężeniem mieszanki palnej a sygnałem wyjściowym mostka w stanie ustalonym, czyli w stanie równowagi termicznej mostka podczas spalania katalitycznego.

Czas ustalania napięcia na wyjściu mostka wynosi od ułamków sekundy do kilkunastu sekund w zależności od konstrukcji mostka pelistorowego. Zjawiska zachodzące podczas spalania mieszanki

powodują tzw. "zatrucie" katalizatora, zmniejszając jego czułość, co w efekcie zmusza, po wykonaniu pewnej liczby pomiarów, do wymiany czujnika. Powyższe powody (i inne nie wymienione tutaj) skłaniają do poszukiwania możliwości szybszego uzyskiwania wyniku pomiaru - jeszcze w czasie trwania stanu nieustalonego po włączeniu zasilania mostka, tym bardziej że zastosowanie mikroprocesora daje techniczne możliwości realizacji tego zadania, a ponadto coraz częściej pojawiają się prace dające teoretyczne podstawy takich działań [2]. Należy przy tym zaznaczyć, że współczesne tendencje w budowie tzw. czujników inteligentnych (ang. smart sensors), polegające na coraz szerszym stosowaniu czujników budowanych na bazie krzemu zintegrowanych z mikroprocesorem, stanowią inspirację do prowadzenia takich badań. Konstrukcję mostka pelistorowego budowanego na bazie krzemu opisano w pracy [1].

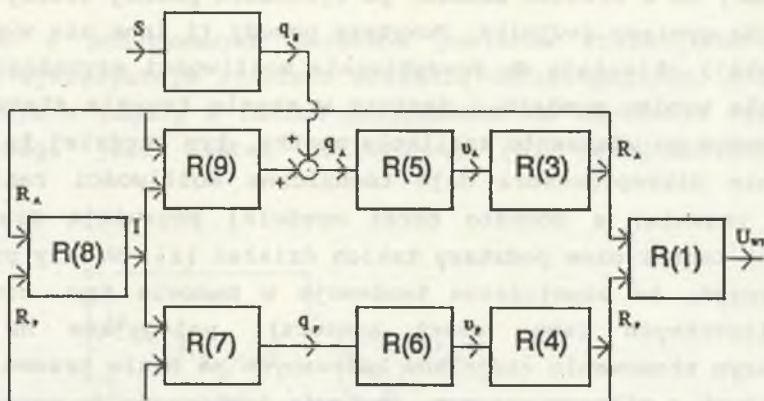
Celem artykułu jest przedstawienie procedury identyfikacji parametrów, modelu mostka pelistorowego, opisanego w pracy [4], a następnie zaproponowanie sposobu uzyskania przebiegu bezpośrednio związanego z intensywnością spalania katalitycznego w stanie nieustalonym mostka. Przewiduje się, że analiza tego przebiegu będzie stanowiła w kolejnych pracach punkt wyjścia do opracowania algorytmu korekcji błędów statycznych i dynamicznych mostka w stanie nieustalonym po włączeniu napięcia zasilania, co umożliwi wyznaczenie stężenia mieszanki palnej tuż po rozpoczęciu spalania katalitycznego.

2. MODEL MOSTKA PELISTOROWEGO W STANIE NIEUSTALONYM PO ZAŁĄCZENIU NAPIĘCIA ZASILANIA

Model mostka w stanie nieustalonym pokazano na rys.2.

Poniżej zestawiono równania opisujące poszczególne elementy tego modelu. Jego bardziej szczegółowy opis zamieszczono w pracy [4].

Napięcie wyjściowe mostka po załączeniu napięcia zasilania opisuje zależność:



Rys.2. Model mostka w stanie nieustalonym po załączeniu zasilania

Fig.2. Model of the bridge in transient state

$$U_{wy} = \frac{U_x}{1 + \frac{R_p}{R_A}} - U_0 \quad (1)$$

gdzie

$$U_0 = \frac{U_x}{R_1 + R_2} R_2 \quad (2)$$

Napięcie U_0 ma wartość stałą przy założeniu stałych wartości rezystorów R_1 i R_2 . Grzejniki pelistorów P_A i P_P wykonane są z platyny, zatem ich rezystancje R_A i R_P opisują odpowiednie równania:

$$R_A(\vartheta_A) = R_{A0} [1 + a\vartheta_A - b\vartheta_A^2], \quad (3)$$

$$R_P(\vartheta_P) = R_{P0} [1 + a\vartheta_P - b\vartheta_P^2], \quad (4)$$

gdzie:

ϑ_A, ϑ_P są odpowiednio temperaturami pelistora aktywnego i pasywnego, R_{A0}, R_{P0} - rezystancjami pelistorów w temperaturze 0°C , a, b - stałymi materiałowymi platyny.

Proces nagrzewania pelistorów na skutek przepływu prądu zasilania opisują równania różniczkowe:

$$T_A \frac{d\vartheta_A}{dt} + \vartheta_A = k_A q_A, \quad (5)$$

$$T_P \frac{d\vartheta_P}{dt} + \vartheta_P = k_P q_P, \quad (6)$$

gdzie:

q_A i q_P są strumieniami ciepła wydzielanego na pelistorach aktywnym i pasywnym, T_A i T_P są współczynnikami dynamicznymi (stałymi czasowymi w przypadku równań liniowych); natomiast k_A, k_P - współczynnikami statycznymi, charakteryzującymi proces nagrzewania w stanie ustalonym.

Strumień ciepła wydzielonego na pelistorze pasywnym opisuje równanie:

$$q_P = R_A I^2, \quad (7)$$

gdzie I jest prądem płynącym przez pelistory określonym zależnością:

$$I = \frac{U_z}{R_A + R_P}. \quad (8)$$

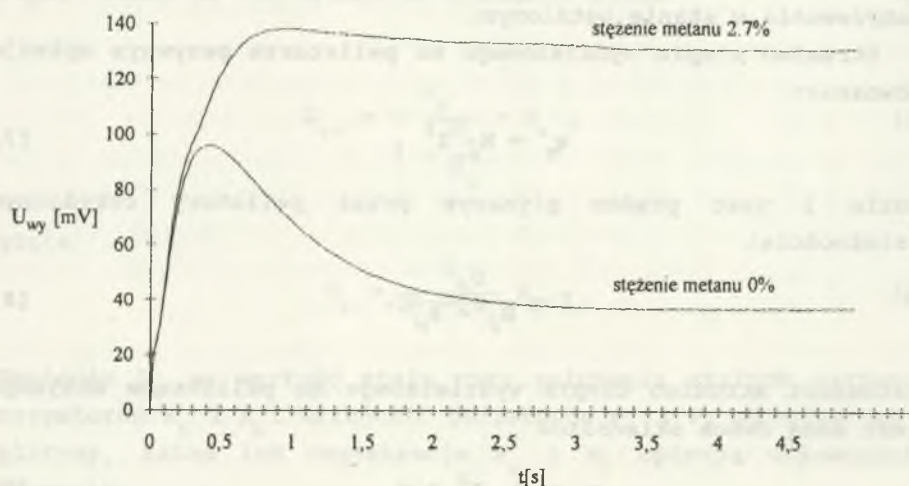
Natomiast strumień ciepła wydzielanego na pelistorze aktywnym jest sumą dwóch składników

$$q_A = R_A I^2 + q_S, \quad (9)$$

w której q_S jest strumieniem ciepła wydzielanym w procesie spalania katalitycznego.

3. IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW MODELU MOSTKA W STANIE NIEUSTALONYM

Opisany model ma złożoną postać. Zestawione powyżej równania składające się na ten model są na ogół nieliniowe, wzajemnie powiązane w różnoraki sposób, a ponadto zawierają człony dynamiczne. Biorąc to pod uwagę, identyfikacja parametrów modelu, czyli współczynników występujących w przedstawionych równaniach, jest problemem złożonym. W tym rozdziale zostanie opisany sposób rozwiązania tego problemu. Sposób ten wymaga użycia odpowiedniego stanowiska pomiarowego, opisanego w pracy [5], umożliwiającego pomiar przebiegów czasowych niezbędnych w procesie identyfikacji. Matematyczne podstawy działań pozwalających na stosunkowo prostą realizację procedur numerycznych w nieliniowych obwodach dynamicznych zaczerpnięto z prac [2], [3].



Rys.3. Przykładowe przebiegi napięcia wyjściowego mostka pelistorowego w stanie nieustalonym po załączeniu zasilania

Fig.3. Exemplary output signals of the pellistor bridge in transient state after switching on supply voltage

Niezbędnym etapem identyfikacji są pomiary w stanie nieustalonym mostka po włączeniu napięcia zasilania przy

zerowym stężeniu mieszanki palnej. Przykładowy przebieg napięcia wyjściowego mostka w tej sytuacji pokazano na rys.3. Aby dokonać identyfikacji parametrów mostka niezbędny jest w przypadku zasilania napięciowego pomiar przebiegu prądu zasilania mostka. Zbudowane stanowisko pozwala na pomiar wartości chwilowych napięcia i prądu zasilania oraz napięcia wyjściowego w tych samych momentach czasu w odstępach 10 ms w ciągu 5 s, co daje 500 równo oddalonych próbek z tych przebiegów. W przypadku napięciowego zasilania mostka ($U_z = \text{const}$), otrzymuje się dwa ciągi próbek:

$$I_z(k), U_{wy}(k), k = 0, 1, \dots, 500; \quad (10)$$

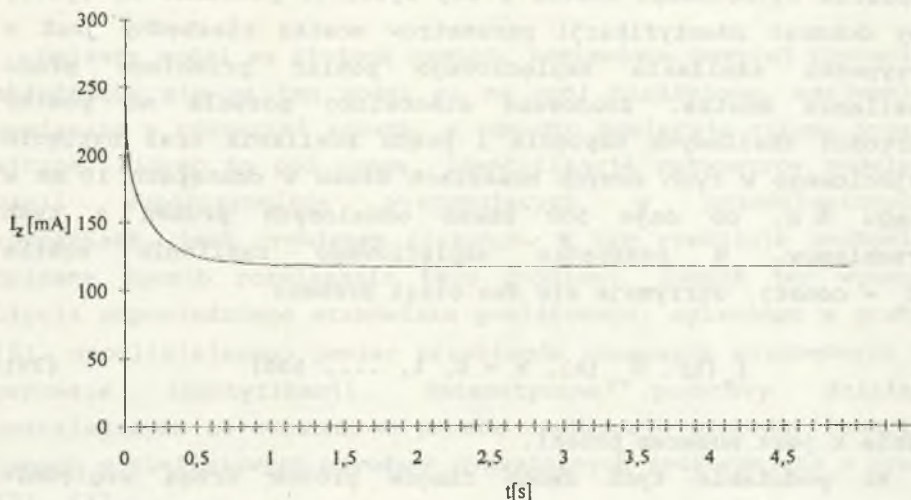
gdzie k jest numerem próbki.

Na podstawie tych dwóch ciągów próbek drogą względnie prostych obliczeń numerycznych - na podstawie zależności (1), (2), (3), (4) dla znanych wartości R_1 i R_2 oraz stałych materiałowych platyny, a także temperatury początkowej - otrzymuje się chwilowe wartości prądu i temperatury pelistorów przy zerowym stężeniu:

$$I(k), \vartheta_A(k), \vartheta_p(k), k = 0, 1, \dots, 500. \quad (11)$$

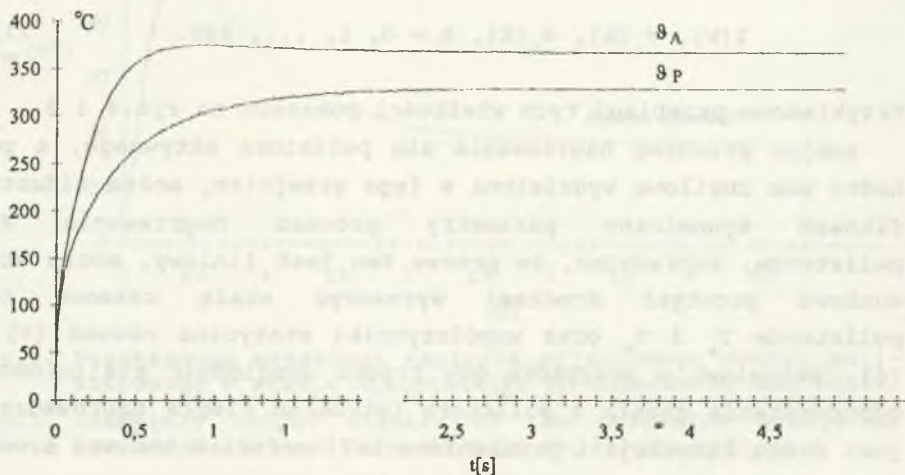
Przykładowe przebiegi tych wielkości pokazano na rys.4 i 5.

Znając przebieg nagrzewania się pelistora aktywnego, a ponadto moc chwilową wydzieloną w jego grzejniku, można zidentyfikować dynamiczne parametry procesu nagrzewania się pelistorów. Zakładając, że proces ten jest liniowy, można stosunkowo prostymi środkami wyznaczyć stałą czasową obu pelistorów T_A i T_p oraz współczynniki statyczne równań (5) i (6). Natomiast w przypadku gdy trzeba uwzględnić nieliniowość odprowadzania ciepła z pelistora (strumień ciepła odprowadzany jest drogą konwekcji i promieniowania), można zastosować środki numeryczne opisane w pracach [2] i [3].



Rys.4. Przebieg prądu zasilania pelistorów

Fig.4. Supply current of the pellistors



Rys.5. Przebiegi temperatur pelistorów

Fig.5. Temperatures of the pellistors: θ_a - the catalytic one,
 θ_p - the compensation one

Zapisując równanie różniczkowe (5) w postaci dyskretnego równania stanu otrzymuje się dla każdej z chwil $k = 0, 1, 2, \dots$

$$\vartheta_A(k+1) = \Phi \vartheta_A(k) + \psi q_A(k), \quad (12)$$

w którym w przypadku nieliniowości równania różniczkowego (5) współczynniki Φ i ψ zależą od "punkty pracy" w przestrzeni stanu. Mając do dyspozycji ciąg wartości chwilowych temperatury $\vartheta_A(k)$ i dostarczanego ciepła $q(k)$ (zależność (9) dla $q_s = 0$), można wyznaczyć wartości współczynników Φ i ψ w funkcji temperatury w poniższy sposób. Jeśli założymy stałość parametrów dla trzech sąsiednich chwil czasowych $k, k+1, k+2$, zachodzi:

$$\vartheta_A(k+1) = \Phi \vartheta_A(k) + \psi q_A(k), \quad (13)$$

oraz

$$\vartheta_A(k+2) = \Phi \vartheta_A(k+1) + \psi q_A(k+1). \quad (14)$$

Stąd

$$\vartheta_A(k+2) - \vartheta_A(k+1) = \Phi \vartheta_A(k+1) - \Phi \vartheta_A(k), \quad (15)$$

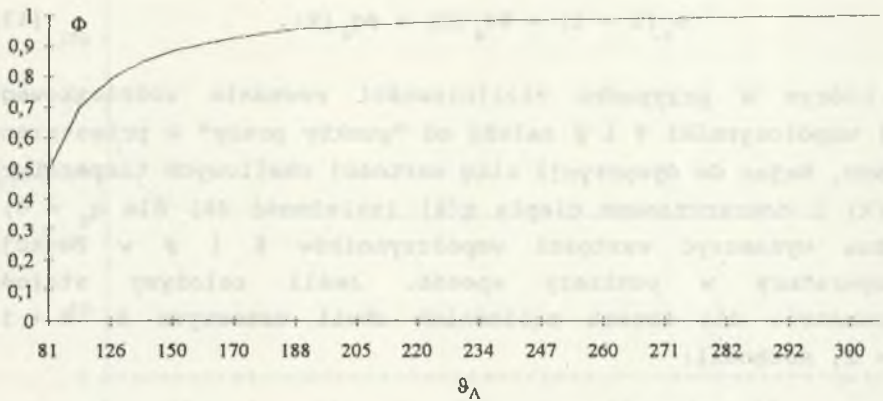
a zatem współczynnik Φ można wyznaczyć jako

$$\Phi(\vartheta_A) = \frac{\vartheta_A(k+2) - \vartheta_A(k+1)}{\vartheta_A(k+1) - \vartheta_A(k)}. \quad (16)$$

Współczynnik ψ w tych samych punktach ma wartość:

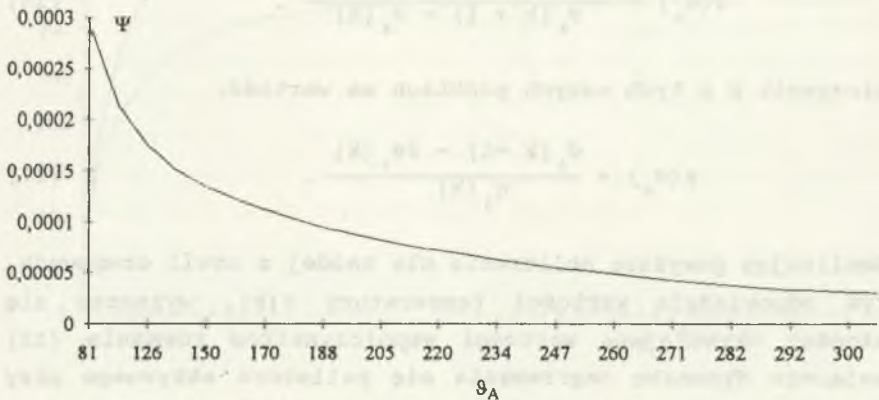
$$\psi(\vartheta_A) = \frac{\vartheta_A(k+1) - \Phi \vartheta_A(k)}{q_A(k)}. \quad (17)$$

Realizując powyższe obliczenia dla każdej z chwil czasowych, którym odpowiadają wartości temperatury $\vartheta(k)$, wyznacza się zależności określające wartości współczynników równania (12) opisującego dynamikę nagrzewania się pelistora aktywnego przy zerowym stężeniu. Przykładowe zależności tych współczynników od temperatury pokazano na rys.6 i 7. Przebiegi te uzyskano na podstawie wyrażeń (15) i (16) stosując dodatkowo aproksymację wielomianem 4 stopnia.



Rys.6. Zależność współczynnika ϕ równania opisującego dynamiczne własności pelistora aktywnego w funkcji temperatury pelistora

Fig.6. Variety of coefficient ϕ from the equation (12) describing dynamic properties of the catalytic pellistor in relation to its temperature



Rys.7. Zależność współczynnika ψ w funkcji temperatury

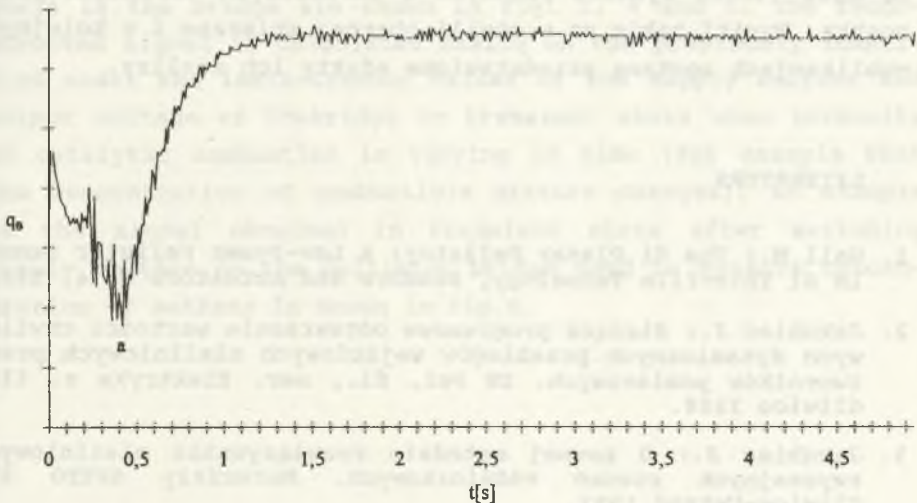
Fig.7. Dependence of coefficient ψ on its temperature

4. WYZNACZANIE SKŁADOWEJ POCHODZĄCEJ OD SPALANIA KATALITYCZNEGO

Przedstawiona procedura identyfikacji pozwala na wyznaczenie dynamicznych parametrów pelistora aktywnego, tj. $\Phi(\vartheta)$ i $\psi(\vartheta)$. Mierzając teraz przebiegi w mostku dla znanego stężenia S można otrzymać przebiegi temperatury pelistora aktywnego dla tego stężenia. Mając do dyspozycji wartości parametrów dynamicznych w funkcji temperatury oraz znając moc chwilową wydzieloną na pelistorze aktywnym na skutek przepływu prądu I , można dla każdego momentu k wyznaczyć moc wydzielaną na skutek spalania katalitycznego na podstawie zależności:

$$q_s(k) = \frac{1}{\psi} [\vartheta(k+1) - \Phi\vartheta(k)] - R_A(k) I^2(k), \quad (18)$$

otrzymanej na podstawie równań (9) i (12). Przykładowy przebieg mocy uzyskany w wyniku realizacji opisaney procedury pokazano na rys.8.



Rys.8. Przykładowy przebieg mocy spalania katalitycznego uzyskany w wyniku opracowanej procedury

Fig.8. Exemplary signal of catalytic combustion intensity obtained as a result of the developed reconstruction procedure

W przebiegu pokazanym na rys.8 można wyróżnić dwie fazy. Pierwsza, do punktu oznaczonego na rysunku literą a, może być interpretowana jako okres przed rozpoczęciem procesu spalania katalitycznego. Przebieg uzyskany w tej fazie odzwierciedla zjawiska zachodzące na pelistorze aktywnym na skutek wolniejszego nagrzewania się w obecności mieszanki palnej (w tym przypadku metanu). W drugiej fazie, począwszy od punktu a, uzyskany przebieg obrazuje proces spalania katalitycznego, który po okresie około 1 s osiąga stałą intensywność.

5. UWAGI KOŃCOWE

Opracowana procedura uzyskiwania przebiegu spalania katalitycznego może być użyta w dwóch sytuacjach: jako podstawa do odtwarzania stężenia mieszanki palnej lub do badania procesu spalania katalitycznego. W chwili obecnej procedura ta jednak jest w początkowej fazie badań, a do jej weryfikacji potrzebne są duże ilości wyników pomiarów w określonych warunkach pracy mostka. Wyniki takie są w chwili obecnej zbierane i w kolejnych publikacjach zostaną przedstawione efekty ich analizy.

LITERATURA

1. Gall M.: The Si Planar Pelistor: a Low-Power Pelistor Sensor in Si Thin-film Tehnology, Sensors and Actuators B, 4, 1991.
2. Jakubiec J.: Bieżące programowe odtwarzanie wartości chwilowych dynamicznych przebiegów wejściowych nieliniowych przetworników pomiarowych. ZN Pol. Śl., ser. Elektryka z. 111, Gliwice 1988.
3. Jakubiec J.: O pewnej metodzie rozwiązywania nieliniowych zwyczajnych równań różniczkowych. Materiały SPETO 93, Gliwice-Ustroń 1993.
4. Jakubiec J., Pokrywka Z.: Model mostka pelistorowego. ZN Pol. Śl. ser. Elektryka z. 134, Gliwice 1994.
5. Pokrywka Z., Roj J.: Stanowisko do badania odpowiedzi mostków pelistorowych. ZN Pol. Śl., ser. Elektryka z. 134, Gliwice 1994.

6. Combustible Gas Detectors. English Electric Valve Company Ltd, Chelmsford, Essex, England 1977.

Recenzeant: prof. dr hab. inż. Michał Szyper

Wpłynęło do Redakcji 15 marca 1994

Abstract

The reconstruction procedure described in the paper is based on the model of the pellistor bridge shown in fig.2 and given as a chain of nonlinear static and dynamic equations numbered from (1) to (9). Parameters of the model are indentified by using the equation (10) and (11) on the base of instantaneous values of the bridge current and output voltage measured in transient state after switching on supply voltage while concentration of the combustible mixture equals zero. Exemplary signals in the bridge are shown in fig. 3, 4 and 5. The reconstructed signal is calculated basing on the previously identified model and instantaneous values of the supply current and output voltage of thebridge in transient state when intensity of catalytic combustion is varying in time (for example when the concentration of combustible mixture changes). An example of the signal obtained in transient state after switching supply voltage on the pellistor bridge used to measure concentration of methane is shown in fig.9.