

Marian KAMPIK

## WYNIKI WSTĘPNYCH BADAŃ TERMICZNEGO PRZETWORNIKA WARTOŚCI SKUTECZNEJ NAPIĘCIA NA CZĘSTOTLIWOŚĆ

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki wstępnych badań termicznego przetwornika wartości skutecznej napięcia o wyjściu częstotliwościowym, w którym do detekcji temperatury grzejnika wykorzystano filtr z akustyczną falą powierzchniową. Filtr ten stabilizuje częstotliwość drgań generatora w.cz. Zależność parametrów filtru od temperatury umożliwia przetworzenie przyrostu temperatury grzejnika na odpowiedni przyrost częstotliwości wyjściowej generatora. W pracy zamieszczono także zależności teoretyczne umożliwiające określenie podstawowych właściwości przetwornika.

## THE RESULTS OF PRELIMINARY INVESTIGATIONS OF THERMAL RMS TO FREQUENCY CONVERTER

**Summary.** The results of preliminary investigations of thermal RMS to frequency converter are presented. The SAW filter is utilised to indicate the temperature rise of the converter's heater. This filter controls the oscillation's frequency of HF oscillator. The temperature-dependent SAW filter parameters allow to convert the temperature rise of the converter's heater to corresponding frequency increment. The basic equations of the new converter are presented in this paper.

## DIE RESULTATE DER EINFUHRUNESFORSCHUNGEN DES THERMOKONVERTERS EFFEKTIVWERT/FREQUENZ

**Zusammenfassung.** In der Arbeit wurde die Resultate der Einfuhrunesforschungen des Thermokonverters Effektivwert/Frequenz vorgestellt. Die Detektion der Heizerstemperatur wurde mit Anwendung des akustischen Oberflächenwellenfilters ausgeführt. Der Filter stabilisiert die Hochfrequenz der Generatorschwingungen, wobei die Abhängigkeit zwischen Filterparametern und Heizerstemperatur macht die weitere Verarbeitung des Temperaturinkrements auf entsprechenden Generatorsfrequenz zunahme möglich. Die theoretische Abhängigkeiten, die Grundigenschaften vom Thermokonverter wurden in der Arbeit auch präsentiert.

## 1. WPROWADZENIE

Do precyzyjnego zdeterminowania wartości skutecznej napięcia i prądu stosuje się termiczne przetworniki wartości skutecznej (TPWS). Typowy TPWS zbudowany jest z grzejnika oraz sprzężonego z nim termicznie czujnika termometrycznego. Zasada działania transferu AC/DC zbudowanego w oparciu o TPWS wynika z definicji wartości skutecznej i polega na porównaniu przyrostu temperatury AC grzejnika, przez który przepływa prąd o nieznanej wartości skutecznej  $I_{AC}$  z przyrostem temperatury DC grzejnika przy przepływie przez grzejnik prądu stałego o znanej wartości  $I_{DC}$ . Detekcja temperatury grzejnika realizowana jest za pomocą pojedynczej termopary (przetworniki jednozłączowe), wielu (max 200) termopar połączonych szeregowo (przetworniki wielozłączowe) lub tranzystora.

Porównanie właściwości TPWS, konstrukcje oraz definicje podstawowych parametrów metrologicznych przedstawiono w pracy [1]. Bardziej szczegółową analizę TPWS znaleźć można w pracy [2].

W niniejszym artykule zaproponowano oryginalny sposób detekcji temperatury grzejnika, wykorzystujący piezoelektryczny czujnik temperatury [3]. Zasadniczym elementem przetwornika jest generator w.cz., w którym do stabilizacji drgań wykorzystano filtr z akustyczną falą powierzchniową (AFP).

## 2. UPROSZCZONA ANALIZA PRACY GENERATORA

Generator składa się z filtru z AFP oraz ze wzmacniacza w.cz. (rys. 1). Jest to klasyczny układ generatora z linią opóźniającą. W układzie powstają drgania sinusoidalne, jeżeli jest spełniony warunek generacji:

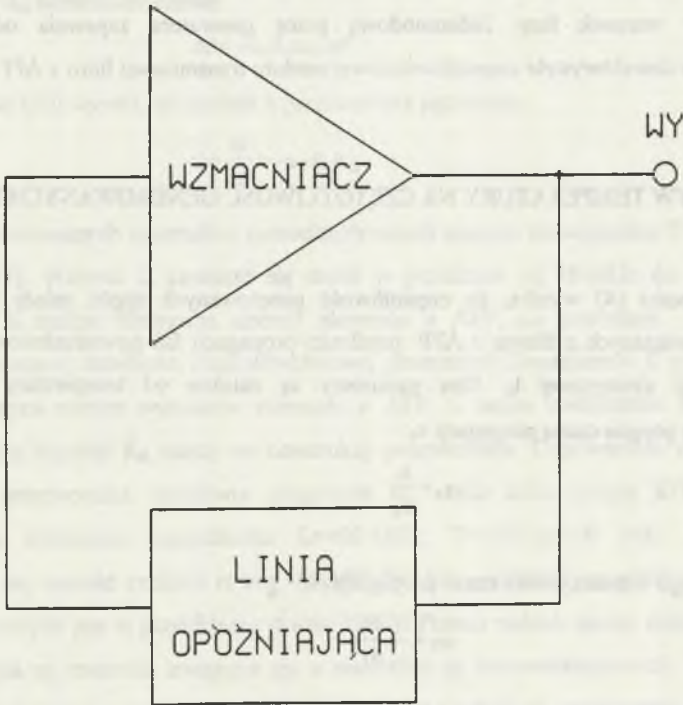
$$K_w(j\omega) \cdot K_f(j\omega) = 1, \quad (1)$$

gdzie:

$$K_w(j\omega) = |K_w(j\omega)| \exp(j\varphi_w) \dots \text{transmitancja wzmacniacza}$$

$$K_f(j\omega) = |K_f(j\omega)| \exp(j\varphi_f) \dots \text{transmitancja filtru}$$

Z równania (1) wynikają dwa warunki:



Rys.1. Schemat blokowy generatora z linią opóźniającą  
 Fig.1. Schematic diagram of delay line oscillator.

1) warunek fazy:

$$\varphi_w + \varphi_f = 2k\pi, \quad (2a)$$

gdzie  $k$  jest liczbą całkowitą,

2) warunek modułu:

$$|K_w(j\omega)| \cdot |K_f(j\omega)| = 1 \quad (2b)$$

Przesunięcie fazy  $\varphi_f$  filtru o długości drogi akustycznej  $l_0$ , prędkości propagacji AFP równej  $v_0$ , przy częstotliwości  $f_0$  jest równe:

$$\varphi_f = 2\pi l_0 \frac{f_0}{v_0} \quad (3)$$

Z warunku fazy obliczyć można częstotliwość generowanych drgań:

$$f_0 = \frac{2k\pi - \varphi_w}{2\pi l_0} v_0 \quad (4)$$

Z równania (4) wynika, że istnieje nieskończenie wiele wartości częstotliwości dla których jest spełniony warunek fazy. Jednomodową pracę generatora zapewnia odpowiednie ukształtowanie charakterystyki częstotliwościowej modułu transmitancji filtra z AFP.

### 3. WPŁYW TEMPERATURY NA CZĘSTOTLIWOŚĆ GENEROWANYCH DRGAŃ

Z zależności (4) wynika, że częstotliwość generowanych drgań zależy od dwóch parametrów związanych z filtrem z AFP: prędkości propagacji fali powierzchniowej  $v_0$  oraz długości drogi akustycznej  $l_0$ . Oba parametry są zależne od temperatury substratu. Wprowadzając pojęcie czasu propagacji  $\tau_0$ :

$$\tau_0 = \frac{l_0}{v_0} \quad (5)$$

oraz termicznego współczynnika czasu propagacji  $\alpha_T$ :

$$\alpha_T = \frac{1}{\tau_0} \frac{d\tau}{dT} \quad (6)$$

otrzymuje się wyrażenie na częstotliwość  $f$  generowanych drgań:

$$f = \frac{2\pi k - \phi_w}{2\pi} \frac{1}{\tau_0(1 + \alpha_T \Delta T)}, \quad (7)$$

gdzie  $k$  jest modą generowanych drgań,  $T$  przyrostem temperatury substratu. Ponieważ iloczyn  $\alpha_T \Delta T$  jest w danym przypadku znacznie mniejszy od 1, bezwzględny przyrost częstotliwości w funkcji temperatury jest w przybliżeniu równy:

$$\Delta f = -f_0 \alpha_T \Delta T \quad (8)$$

### 4. CZUŁOŚĆ PRZETWORNIKA

Korzystając z termicznego odpowiednika prawa Ohma

$$\Delta P = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (9)$$



zależność (8) można powiązać z wartościami mocy  $P$  wydzielanej w grzejniku oraz rezystancji termicznej  $R_{th}$  substrat-otoczenie:

$$\Delta f = -\alpha_T f_0 R_{th} \Delta P \quad (10)$$

Z zależności (10) wynika, że czułość  $S$  przetwornika jest równa:

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta P} = -\alpha_T f_0 R_{th} \quad (11)$$

Dla stosowanych materiałów piezoelektrycznych wartość bezwzględna  $T$  nie przekracza 120 ppm [4]. Wartość  $f_0$  zawierać się może w przedziale od 10 MHz do ok. 2 GHz (ze wzrostem  $f_0$  maleje efektywna dobroć elementu z AFP, co powoduje zmniejszenie krótkoterminowej stabilności częstotliwościowej generatora). Zmniejszenie  $f_0$  pociąga za sobą między innymi wzrost wymiarów elementu z AFP, a zatem zwiększenie stałej czasowej przetwornika. Wartość  $R_{th}$  zależy od konstrukcji przetwornika. Odpowiednio zaprojektowana obudowa przetwornika umożliwi osiągnięcie  $R_{th}$  rzędu kilku tysięcy K/W [5]. Zatem przyjmując arbitralnie częstotliwość  $f_0=100$  MHz,  $T=-100$  ppm/K oraz  $R_{th}=5000$  K/W otrzymuje się wartość czułości równą  $-50$  MHz/W. Dla porównania czułość przetworników wielozłączowych jest w przybliżeniu równa 10 V/W. Pomiar niskich napięć stałych (rzędu  $10^{-8}$  V) napotyka na trudności związane np. z istnieniem sił termoelektrycznych. Przetwornik o wyjściu częstotliwościowym może zapewnić podobną czułość jak przetwornik wielozłączowy przy mniejszym wpływie zakłóceń (ze względu na wyjście częstotliwościowe).

## 5. DOŚWIADCZALNY MODEL TERMICZNEGO PRZETWORNIKA WARTOŚCI SKUTECZNEJ NAPIĘCIA NA CZĘSTOTLIWOŚĆ

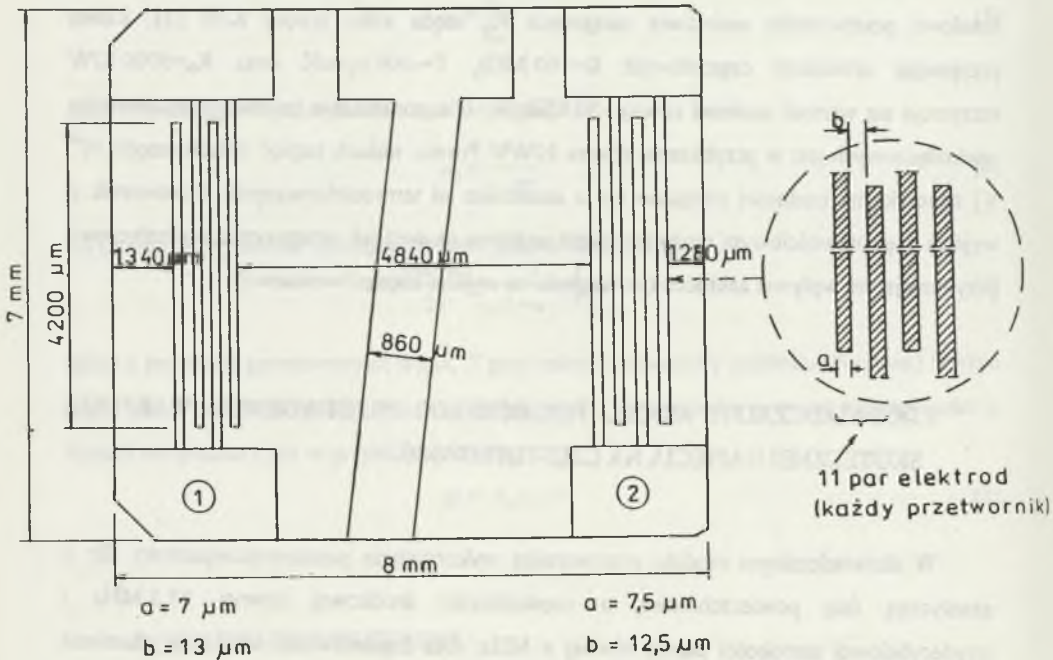
W doświadczalnym modelu przetwornika wykorzystano pasmowoprzepustowy filtr z akustyczną falą powierzchniową o częstotliwości środkowej równej 83,3 MHz i trzydecybelowej szerokości pasma równej 4 MHz. Dla częstotliwości środkowej tłumienie filtru wynosiło 34 dB. Filtr wykonano na płytce LiNbO<sub>3</sub> o wymiarach 8x8x0,5 mm. Właściwości LiNbO<sub>3</sub> zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Wybrane właściwości  $\text{LiNbO}_3$ 

Właściwość	Wartość	Jednostka
Temperaturowy współczynnik czasu propagacji AFP	-87	ppm/K
Prędkość fazowa AFP	3,48	km/s
Gęstość	4640	kg/m <sup>3</sup>
Ciepło właściwe	0,645	J/(g·K)
Przewodność cieplna	0,42	J/(m·s·K)

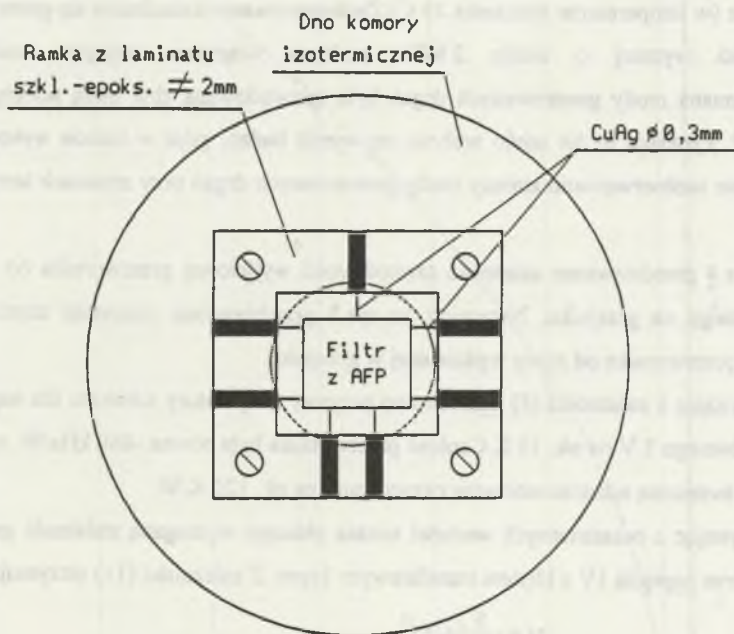
Dwa identyczne przetworniki międzypalczaste - nadawczy i odbiorczy, składały się z 11 par elektrod wykonanych metodą naparowania aluminium w próżni (rys.2).



Rys.2. Widok aktywnej powierzchni filtra z AFP  
Fig.2. View of active layer of SAW filter

Przetworniki te naparowano na aktywną, wypolerowaną powierzchnię płytki niobianu litu. W celu zminimalizowania zjawiska "potrójnego echa" krawędzie płytek szfrazowano pod kątem ok. 45. Dodatkowo pomiędzy przetwornikami palczastymi naparowano pasek

aluminium o szerokości 860  $\mu\text{m}$ . Na bierną powierzchnię przetwornika naparowano warstwę Al (ekran). Doprowadzenia wykonano z przewodu CuAg o średnicy 0,3mm, przyklejając je do płytki filtru za pomocą kleju przewodzącego prąd elektryczny. Grzejnik przetwornika wykonano z manganinu o średnicy 0.1 mm, skręcając bifilarnie odcinek drutu oporowego o długości ok. 1 m. Rezystancja grzejnika dla prądu stałego była równa 83,70  $\Omega$ . Skrętkę zwiniętą spiralnie przyklejono od spodu filtru z AFP za pomocą kleju przewodzącego ciepło. Filtr z doprowadzeniami umieszczono w ramce wykonanej z laminatu szklano-epoksydowego o grubości 2mm (rys.3). Następnie ramka została przykręcona do dna komory izotermicznej wykonanej z mosiądzu.



Rys.3. Sposób zamocowania filtru z AFP

Fig.3. SAW filter fixture

W celu zminimalizowania rezystancji termicznej ramka-komora spód ramki posmarowano smarem silikonowym. Wzmacniacz w.cz. umieszczono nad ramką filtrem w odległości ok. 20mm. Z uwagi na duże tłumienie wprowadzane przez filtr z AFP we wzmacniaczu zastosowano monolityczny wzmacniacz szerokopasmowy o tak dobranej transmitancji, aby zminimalizować wpływ pasożytniczego rezonansu filtru z AFP przy

częstotliwości 4,6 MHz. W ścianach komory izotermicznej umieszczono trzy złącza koncentryczne typu UCY (czteroprzewodowe doprowadzenie grzejnika), wyjście generatora oraz złącze LDB9 (zasilanie).

## 6. WŁAŚCIWOŚCI DOŚWIADCZALNEGO MODELU FIZYCZNEGO PRZETWORNIKA

Częstotliwość wyjściowa przetwornika dla napięcia grzejnika równego zero wynosiła 83,389 MHz (w temperaturze otoczenia 19 C). Zaobserwowano wzbudzenie się generatora na częstotliwości wyższej o około 2 MHz podczas włączania napięcia zasilającego generator. Zmiana mody generowanych drgań była spowodowana zbyt małą selektywnością filtra z AFP. Zjawisko to nie miało wpływu na wyniki badań, gdyż w trakcie wykonywania pomiarów nie zaobserwowano zmiany mody generowanych drgań przy zmianach temperatury substratu.

Na rys.4 przedstawiono zależność częstotliwości wyjściowej przetwornika od wartości napięcia stałego na grzejniku. Natomiast na rys.5 przedstawiono zależność częstotliwości wyjściowej przetwornika od mocy wydzielanej w grzejniku.

Korzystając z zależności (8) oszacowano przyrost temperatury substratu dla napięcia na grzejniku równego 3 V na ok. 13 K. Czułość przetwornika była równa -860 kHz/W, natomiast rezystancję termiczną substrat-otoczenie oszacowano na ok. 120 K/W.

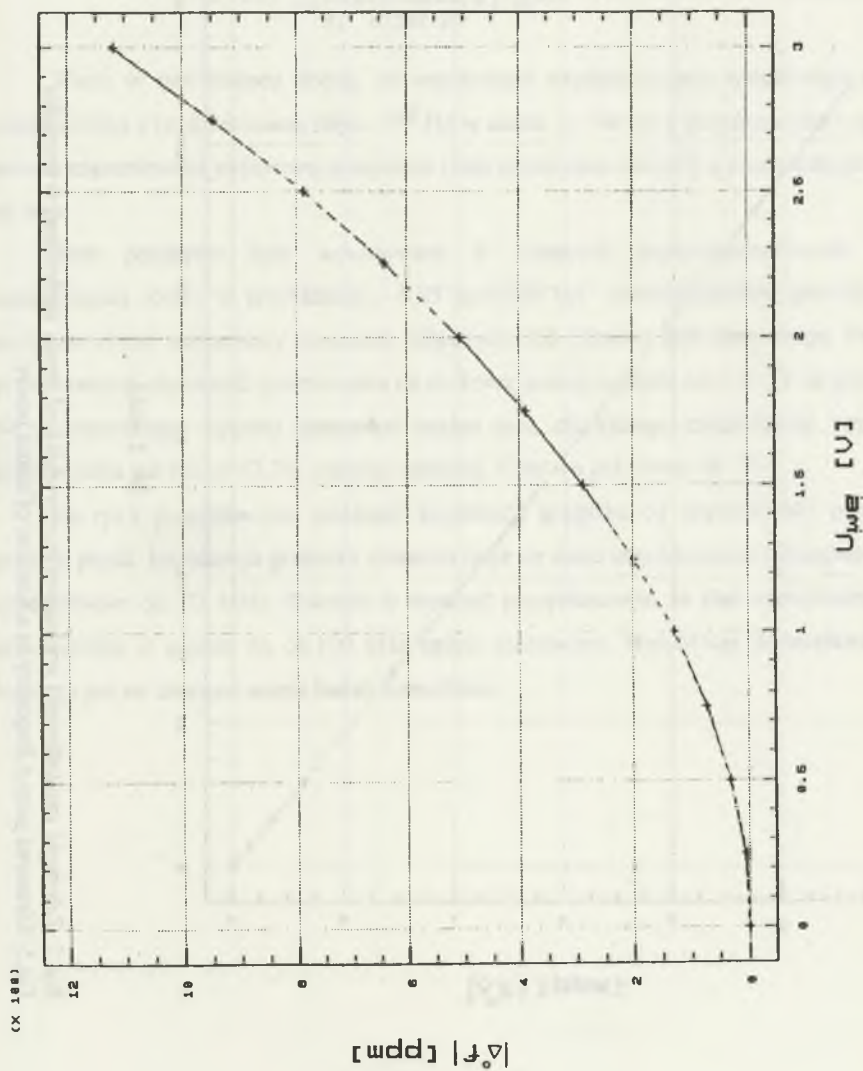
Korzystając z oszacowanych wartości można obliczyć wymaganą stabilność generatora przy transferze napięcia 1V z błędem transferowym 1ppm. Z zależności (11) otrzymuje się:

$$\Delta f = -\frac{S}{R_g} (\Delta U_g)^2, \quad (12)$$

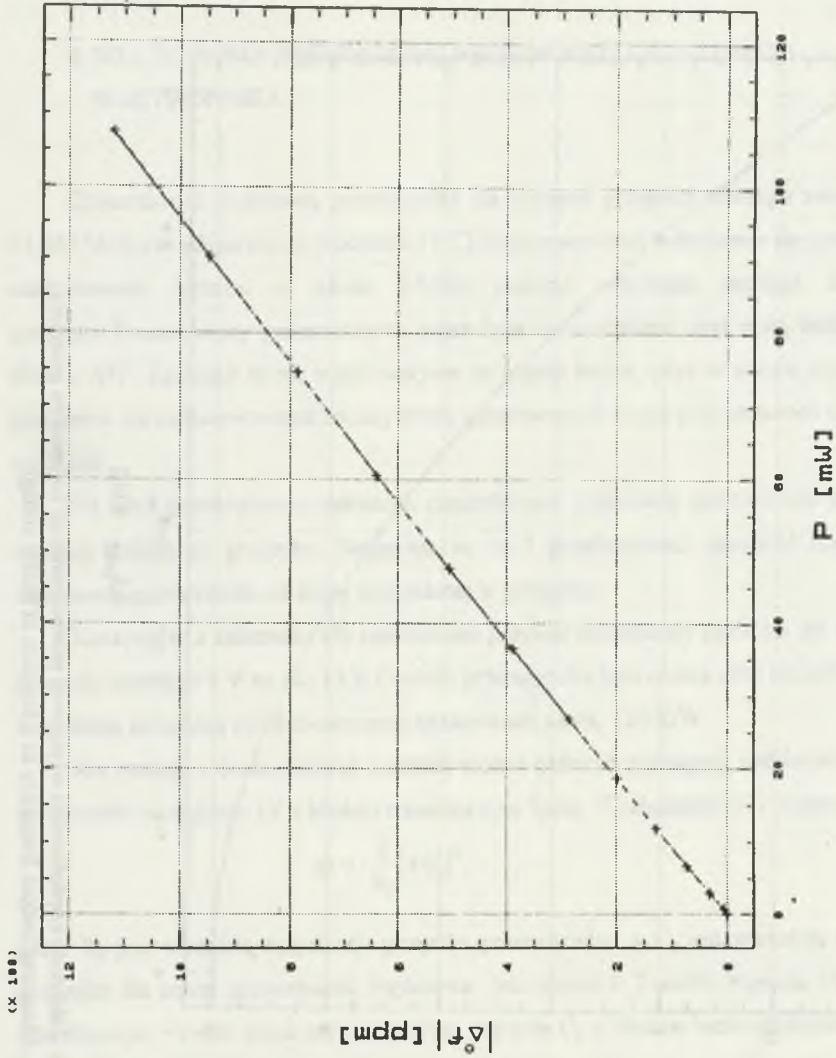
gdzie  $R_g$  jest wartością rezystancji grzejnika przetwornika, a  $U_g$  jest wartością napięcia na grzejniku dla której częstotliwość wyjściowa jest równa  $f$ . Transfer napięcia 1V z błędem transferowym <1ppm wiąże się z pomiarem napięcia  $U_g$  z błędem bezwzględnym mniejszym od  $dU_g < 1$  V, zatem:

$$\Delta f + df = -\frac{S}{R_g} (\Delta U_g + dU_g)^2 \quad (13)$$





Rys. 4. Zależność częstotliwości wyjściowej przetwornika od napięcia na grzejniku  
Fig. 4. Measured output frequency as a function of heater voltage



Rys. 5. Zależność częstotliwości wyjściowej przetwornika od mocy wydzielanej w grzejniku  
Fig. 5. Measured output frequency as a function of heater power

Przyrost częstotliwości  $df$  odpowiadający zmianie napięcia grzejnika na poziomie  $dU_g=1$  V jest w przybliżeniu równy:

$$df \approx -2 \frac{S}{R_g} \Delta U_g \cdot dU_g = -2 \frac{860 \cdot 10^3}{83,7} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \approx -21 \text{ mHz} \quad (14)$$

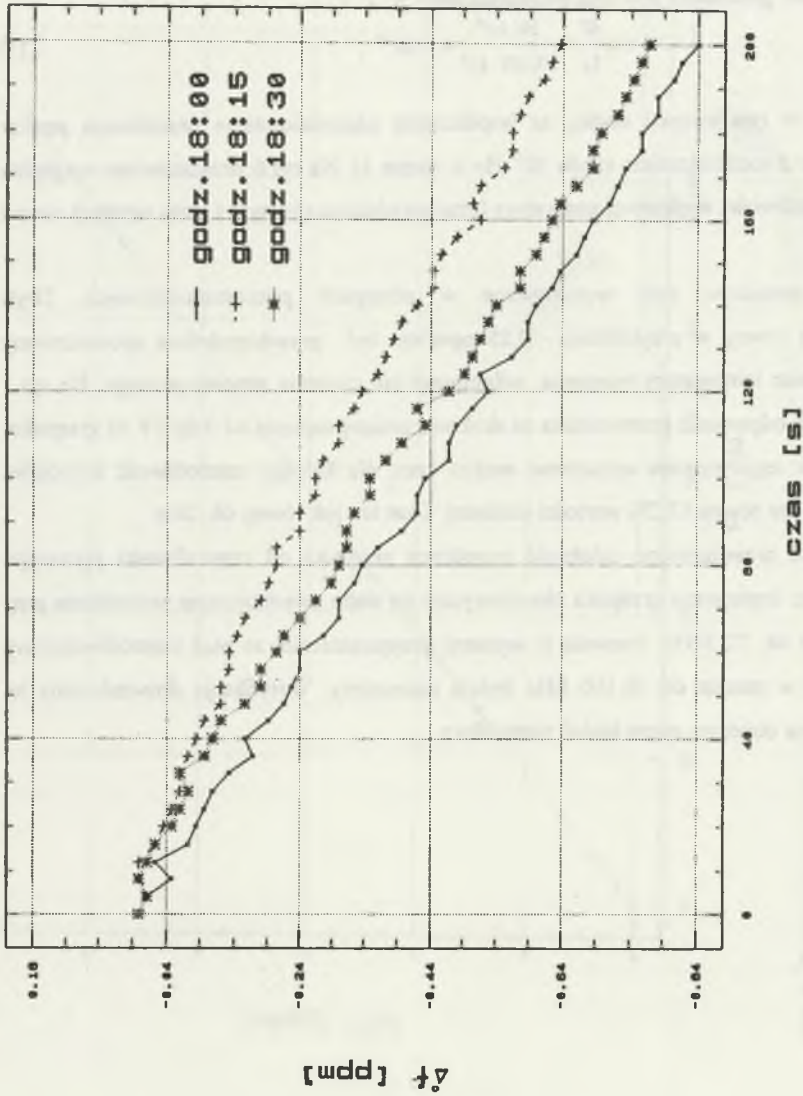
Stąd stabilność generatora powinna być lepsza niż:

$$\sigma \leq \frac{df}{f_0} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{83,389 \cdot 10^6} \approx 2 \cdot 10^{-10} \quad (15)$$

Warto w tym miejscu dodać, że współczesne częstotliczniki umożliwiają pomiar częstotliwości z rozdzielczością rzędu  $10^{-2}$  Hz w czasie 1s. Na rys.6 przedstawiono względne zmiany częstotliwości wyjściowej generatora (czas uśredniania równy 2 s, czas repetycji równy ok.4 s).

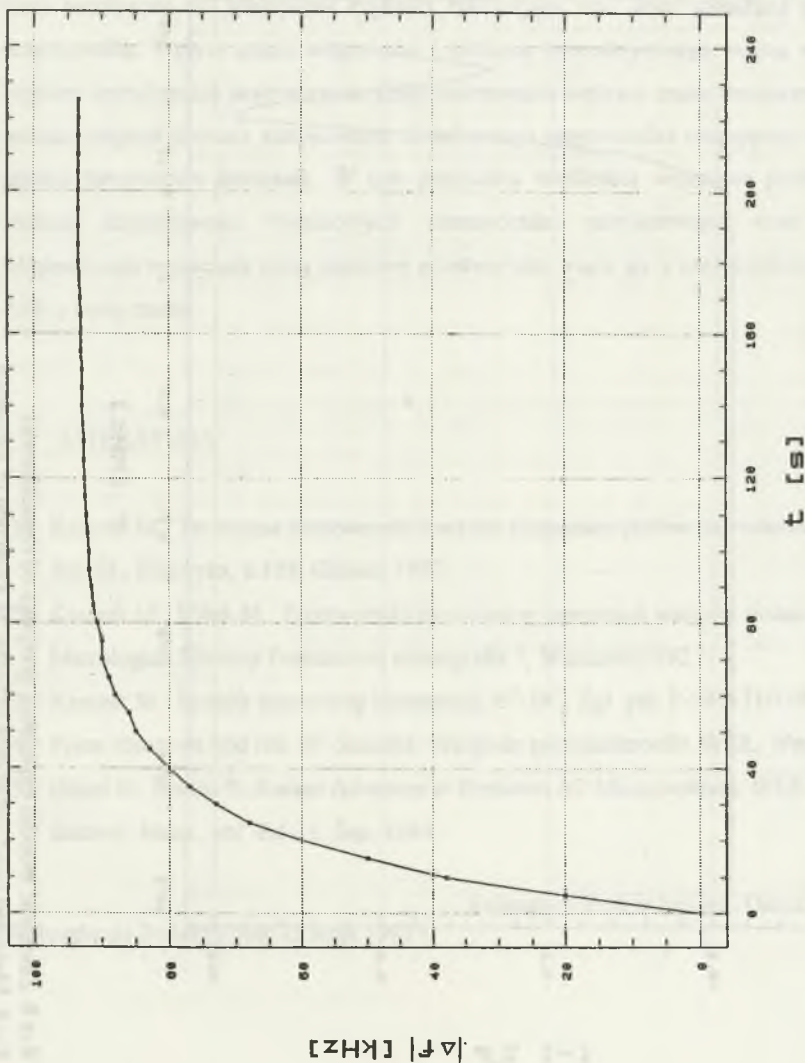
Serie pomiarów były wykonywane w odstępach piętnastominutowych. Dryft częstotliwości równy w przybliżeniu - 0,25 ppm/min był prawdopodobnie spowodowany wpływem zmian temperatury otoczenia, wilgotności lub ciśnienia atmosferycznego. Na rys.7 przedstawiono odpowiedź przetwornika na skokową zmianę napięcia od 0 do 3V na grzejniku. Na podstawie tego wykresu oszacować można czas, dla którego częstotliwość wyjściowa przetwornika jest równa 63,2% wartości ustalonej. Czas ten jest równy ok. 20 s.

Na rys.8 przedstawiono zależność impedancji grzejnika od częstotliwości płynącego prądu. Impedancja grzejnika charakteryzuje się słabo uwydatnionym rezonansem przy częstotliwości ok. 22 MHz. Pozwala to wysunąć przypuszczenie, że błąd częstotliwościowy przetwornika w pasmie do ok.100 kHz będzie nieznaczny. Weryfikacja doświadczalna tej hipotezy jest na obecnym etapie badań niemożliwa.

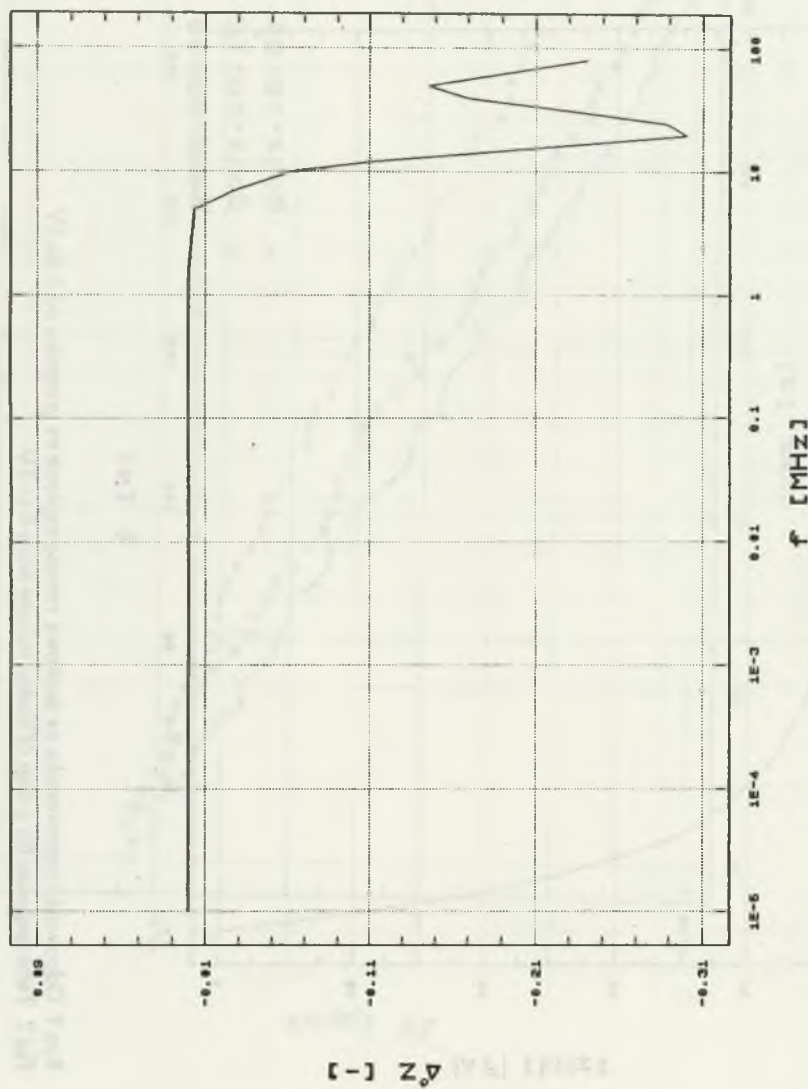


Rys. 6. Względne zmiany częstotliwości wyjściowej generatora w funkcji czasu. Prąd grzejnika był równy zero  
 Fig. 6. Relative frequency changes of oscillator as a function of time. Heater's current was equal zero





Rys.7. Odpowiedź przetwornika na skokową zmianę napięcia na grzejniku od 0 do 3V  
Fig.7. Time response for a step of heater voltage from 0 to 3V



Rys. 8. Zależność modułu impedancji grzejnika od częstotliwości  
Fig. 8. Measured input impedance of heater as a function of frequency

## 7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania doświadczalnego modelu fizycznego potwierdziły przewidywaną dużą czułość przetwornika, porównywalną z czułością przetworników wielozłączowych. Czułość przetwornika może być zwiększona poprzez zwiększenie rezystancji termicznej substrat-otoczenie. Niekorzystną właściwością opisanego modelu jest duża wrażliwość na zewnętrzne czynniki zakłócające oraz duża termiczna stała czasowa przetwornika. Wpływ zmian wilgotności i ciśnienia atmosferycznego można wyeliminować poprzez hermetyzację przetwornika. Zminimalizowanie wpływu zmian temperatury otoczenia można osiągnąć poprzez zastosowanie dodatkowego przetwornika reagującego wyłącznie na zmiany temperatury otoczenia. W tym przypadku wielkością wyjściową przetwornika jest różnica częstotliwości wyjściowych przetwornika pomiarowego oraz odniesienia. Minimalizacja termicznej stałej czasowej przetwornika wiąże się z opracowaniem elementu z AFP o małej masie.

## LITERATURA

- [1] Kampik M.: Termiczne przetworniki wartości skutecznej-porównaniewłaściwości. ZN Pol. Śl., Elektryka, z.128, Gliwice 1992.
- [2] Kampik M., Miłek M.: Przetworniki termiczne w pomiarach wartości skutecznej prądu. Metrologia i Systemy Pomiarowe, monografia 7, Warszawa 1992.
- [3] Kampik M.: Sposób wzorcowej komparacji AC-DC. Zgł. pat. P-294171/1992.
- [4] Praca zbiorowa pod red. W. Solucha: Wstęp do piezoelektroniki. WKŁ, Warszawa 1980.
- [5] Goyal R., Brodie B.: Recent Advances in Precision AC Measurements. IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-33, Sep. 1984

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Danuta Turzeniecka

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 maja 1993 r

## Abstract

A new thermal RMS to frequency converter has been developed. It makes use of the Surface Acoustic Wave (SAW) filter, which is in close thermal contact with the heater. The temperature-dependent delay time of the SAW filter determines the frequency of oscillation of HF oscillator. Hence, the temperature rise of the heater can be converted to corresponding frequency increment. Besides experimental work, basic converter equations are derived. They enable to calculate some converter parameters.

The SAW filter has been made on 8mmWx7mmHx0.5mmT LiNbO<sub>3</sub> substrate. The two identical interdigital transducers have had 11 pairs of aluminium fingers. The IDT's apertures and acoustic lengths between transducers have been ca. 100  $\lambda$  and 120  $\lambda$ , respectively. The sustaining amplifier has been wide-band monolithic amplifier. The frequency of oscillations has been 83.3MHz. The twisted heater has been made from manganinum wire (diameter 0.06mm). It has been attached to the non-active layer of LiNbO<sub>3</sub> plate using thermally conducting glue. The responsivity of this converter has been -860kHz/W and the thermal resistance from heater to ambient has been roughly 120K/W. The time constant (63.2% of constant output) has been ca. 20 seconds. All experiments have been performed in air, therefore the main sources of frequency instability have changes of ambient temperature, pressure and humidity.