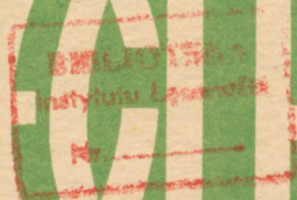


1 9 6 8
Nr 12 (87)

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
WARSZAWA — MIEDZESZYN

PRZECIĄG
ZAGADNIENI
ŁĄCZNOŚCI



MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

PRZEGLĄD
ZAGADNIEŃ
ŁĄCZNOŚCI

BIBLIOTKA
Instytutu Łączności

ROK 8

WARSZAWA 1968

NR 12(87)

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

Branżowy Ośrodek

Informacji Naukowo-Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja
Problemów Łączności i Przeglądu Zagadnień Łączności

Redaktor Naczelny - prof. Zenon Szpigler

Redaktorzy działów:

**mgr inż. Władysław Cetner, mgr inż. Adam Moniuszko,
mgr inż. Józef Możejko, dr Stanisław Włoszczowski**

Adres Redakcji:

Instytut Łączności

Branżowy Ośrodek

Informacji Naukowo-Technicznej i Ekonomicznej

Warszawa-Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

NA PRAWACH RĘKOPISU - DO UŻYTKU SŁUŻBOWEGO

Redaktor: J. Borkowska

Montaż tekstu: B. Drabik

Dział Wydawniczy Instytutu Łączności
Format B5. Nakład 560. Druk ukończono
w maju 1969 r.

**PRZEGLĄD
ZAGADNIENÍ ŁĄCZNOŚCI**

Wzorce częstotliwości

SPIS TREŚCI

	Str.
1. McCoubrey A.O.: Względne zalety atomowych wzorców częstotliwości - Opracował H. Helbing	1
2. Gerber E.A., Sykes R.A.: Kwarcowe wzorce częstotliwości - Opracował H. Kalita	36
3. Dowsett J.: Opracowanie wzorca częstotliwości 2,5 MHz - Opracował H. Helbing	

WZGLĘDNE ZALETY ATOMOWYCH WZORCÓW CZĘSTOTLIWOŚCI

Opracował H. Helbing na podstawie artykułu:
McCoubrey A.O., senior member: The relative
merits of atomic frequency standards. Pro-
ceedings of the IEEE, 1967, t. 55, nr 6, s.
805-814.

Względne zalety atomowych wzorców częstotliwości działających na zasadzie cząsteczkowych rezonansów w wodorze, rubidzie lub czie, zależą od rodzaju zastosowania i specyficznych wymagań na każdą z wielu charakterystycznych cech wzorca przy uwzględnieniu jego fizycznych właściwości. Chociaż własności idealnego atomowego wzorca częstotliwości mogą być określone, to jednak w praktyce odbiegają one od ideału w wyniku potrzeby stosowania kompromisowych rozwiązań układowych i konstrukcyjnych. Ważnym elementem każdego omawianego urządzenia jest linia rezonansowa, której dobroć powinna być szczególnie duża, chociaż mogą być jeszcze inne czynniki mające większy wpływ na zasadnicze cechy wzorca. Do takich należą pola magnetyczne i zderzenia atomów między sobą lub ze ścianami, wywołujące właściwe każdemu urządzeniu odchylenie częstotliwości. Natężenie rezonansowych drgań zalicza się również do podstawowych własności, określających zalety urządzenia. Wszystkie te czynniki są rozpatrzone i wyciągnięte z praktycznych osiągnięć wnioski o względnych zaletach atomowych wzorców częstotliwości, wykorzystujących: mase-

ry wodoru, komórki gazu rubidu i strumienie cezu. Prawdopodobne zalety wzorca częstotliwości, wykorzystującego strumień atomów talu, zostały również przedstawione, chociaż brak obszerniejszych doświadczeń eksploatacyjnych z tym rodzajem wzorca ograniczają rozpoznanie.

1. WSTĘP

Już od piętnastu lat wzorce częstotliwości, wykorzystujące bardzo stabilne rezonanse atomów, są w stałym rozwoju i od tego czasu datuje się ciągły postęp w ich praktycznym zastosowaniu. Różne metody prowadzące do wykrycia rezonansu atomów są ulepszone, dając podstawę do opracowania odpowiednich urządzeń. W wyniku, szybko rośnie liczba eksploatowanych atomowych wzorców częstotliwości, które działają na zasadzie występujących rezonansów w strumieniu cząsteczek cezu, maserze cząsteczek wodoru, gazowej komórce cząsteczek rubidu oraz zwiększa się coraz bardziej zainteresowanie w praktycznym wykorzystaniu rezonansu strumienia cząsteczek talu. Celem tej publikacji jest rozpatrzenie względnych zalet poszczególnych rodzajów atomowych wzorców częstotliwości, aby dać w wyniku naświetlenie tych charakterystycznych cech, które mają ważne znaczenie dla użytkowników. W związku z tym poruszona będzie sprawa różnych przypadków zastosowań atomowych wzorców częstotliwości z wyszczególnieniem wymaganych do tego zalet. W zakończeniu przedstawione zostaną widoki dalszego rozwoju atomowych wzorców częstotliwości.

2. ZALETY I ODPOWIADAJĄCE IM ZASTOSOWANIA

Należy stwierdzić, że kolejność ważności szeregu różnorodnych cech, które charakteryzują atomowe wzorce częstotliwości jest różna dla różnych przypadków zastosowań. Rozpatrzenie względnych zalet musi więc uwzględniać zależność, jaka istnieje pomiędzy charakterystycznymi cechami a zastosowaniem.

2.1. Charakterystyczne cechy atomowego wzorca częstotliwości

Nie ma dotychczas ogólnie przyjętego zbioru określeń podstawowych własności atomowych wzorców czasu i wzorców częstotliwości. Niżej podane definicje mają na celu możliwie dokładne wyjaśnienie podstawowych terminów używanych przy rozpatrywaniu charakterystycznych cech wzorca, a mianowicie:

D o k ł a d n o ś ć - w jakim stopniu częstotliwość danego wzorca jest taka sama jak częstotliwość pierwotnego wzorca lub też, w jakim stopniu częstotliwość danego wzorca odpowiada zaakceptowanej definicji częstotliwości. Stwierdzeniu dokładności powinno towarzyszyć powołanie się na źródło pierwotnego wzorca lub przyjętą definicję częstotliwości.

O d t w a r z a l n o ś ć - w jakim stopniu częstotliwości wzorców tego samego typu, lecz różnych egzemplarzy pracujących dorywczo, są jednakowe. Definicja ta dotyczy również wzorców, których częstotliwość może być korygowana przy cechowaniu.

I s t o t n a o d t w a r z a l n o ś ć - w jakim stopniu wzorzec odtwarza daną częstotliwość bez potrzeby korygowania jej przy cechowaniu zarówno podczas produkcji wzorca, jak i potem w czasie jego eksploatacji. Ta właściwość jest cechą odpowiedniego opracowania, a nie charakterystyczną cechą rezonansu wzorca.

S t a b i l n o ś ć - w jakim stopniu wzorzec wytwarza tę samą częstotliwość w ciągu pewnego okresu czasu ciągłej pracy. Przy określeniu stopnia stabilności powinien być podany okres czasu, w którym wykonywany jest pomiar, a do kompletnej charakterystyki stabilności wymagany jest wykres zależności, w którym odstęp czasu wykonywanych pomiarów są zmienną niezależną.

C z y s t o ś ć w i d m o w a - wyraża tę samą informację w dziedzinie częstotliwości co stabilność w dziedzinie czasu.

Poza podstawowymi własnościami do przeprowadzenia możliwie pełnych porównań różnego typu wzorców częstotliwości potrzebne są jeszcze wiadomości o wpływie czynników zewnętrznych i ponadto o fizycznych cechach urządzeń. Odpowiedni komplet charakterystycznych cech wzorca częstotliwości przedstawia poniższy wykaz:

- a) istotna odtwarzalność,
- b) długoterminowa stabilność,
- c) krótkoterminowa stabilność,
- d) niezależność częstotliwości od stanu regulacji elektronicznych urządzeń (wzmocnienia, przesunięć fazowych itp.) oraz starzenia się elementów składowych,

- e) niezależność częstotliwości od zmian zewnętrznej temperatury, ciśnienia atmosferycznego itp.,
- f) niezależność częstotliwości w czasie przy istniejących zakłócających procesach fizycznych i chemicznych,
- g) niezależność częstotliwości od mechanicznych wstrząsów i wibracji,
- h) objętość i ciężar,
- i) pobór mocy,
- k) okres czasu użytecznej eksploatacji,
- l) cena.

Na wszystkie przytoczone cechy ma wpływ przyjęta zasada rozwiązania wzorca, przy czym niektóre cechy są wzajemnie zależne od siebie. Dokładność może być uważana za stan wiedzy, na który mają wpływ zarówno udoskonalenia w pomiarze częstotliwości, jak i postęp w zbliżeniu podstawowych cech do ideału. Można również przyjąć, że ekonomiczna cecha - cena jest przede wszystkim zależna od poziomu aktywności producenta. Tym nie mniej przy tym samym poziomie aktywności producenta występują różnice w koszcie różnych typów wzorców częstotliwości z przyczyn przyjętych zasad rozwiązania.

2.2. Odpowiednie zastosowania

W ramach tej publikacji nie przewidziano rozpatrzenia wszystkich rodzajów zastosowań i instalacji atomowych wzorców częstotliwości w szczególności, aby można było na tej podstawie ustalić wymagania dla poszczególnych

Wpływ rodzaju instalacji na wymagane cechy atomowego wzorca częstotliwości

1 Rodzaj instalacji	2 Kolejność wymaganych cech	3 U w a g i
Stacje stałe	Istotna odtwarzalność Długoterminowa stabilność Krótkoterminowa stabilność Cena	Zaniejszone wpływy czynników po wstępnym cechowaniu Zaniejszona potrzeba okresowych cechowań Szczególnie wymagana do szybkich odczytów częstotliwości Zależna od właściwych wymagań na ponowne cechowanie itp.
Stacje przelotowe: Okrętowe	Istotna odtwarzalność Długoterminowa stabilność Krótkoterminowa stabilność	Uproszczona eksploatacja, konserwacja i cechowanie Okresy wykorzystania ograniczone do najwyżej 3 miesięcy Szczególnie wymagana do odczytów częstotliwości

c.d. tabl. 1.

1	2	3
Samolotowe	<p>Niezależność środowiskowa</p> <p>Niezależność środowiskowa</p> <p>Długoterminowa stabilność</p> <p>Krótkoterminowa stabilność</p> <p>Objętość, ciężar i pobór mocy</p> <p>Cena</p>	<p>Większe wymagania niż dla stacji stałych</p> <p>Wymagana odporność na wibracje, zmiany temperatury i ciśnienia atmosferycznego</p> <p>Okresy wykorzystania ograniczone do najwyżej 12 godzin</p> <p>Wymagana do szybkich odczytów czułość i odporność na wibracje zależy od tych samych czynników</p> <p>Szczególne wymagania dla małych samolotów</p> <p>Ważna cecha przy większej liczbie egzemplarzy</p> <p>Wymagana odporność na wibracje</p>
<p>Pojazdów kosmicznych (z napędem)</p>		

1	2	3
	Krótkoterminowa stabilność	Ważna w systemach Dopplera. Odporność na wibracje zależy od tych samych czynników.
	Długoterminowa stabilność	Ograniczony do minimum wpływ zwiększanych mocy napędowych
	Objętość, ciężar i pobór mocy	Ważne cechy dla wszystkich pojazdów kosmicznych
Pojazdów kosmicznych (balistycznych)	Objętość, ciężar i pobór mocy	Bezpośrednio wpływa na koszty umieszczenia na orbicie
	Długoterminowa stabilność	Zależy od zastosowania. Okres wykorzystania może trwać nieskonczenie długo
	Krótkoterminowa stabilność	Ważna w niektórych zastosowaniach, jak np. w systemach Dopplera
	Niezależność środowiskowa	W większości przypadków prawdopodobnie nie istotna, lecz muszą być uwzględnione przyspieszenia Coriolisa

T a b l i c a 2

Wpływ zastosowania na wymagane cechy atomowego wzorca częstotliwości

Zastosowanie	Najważniejsze cechy	U w a g i
1	2	3
Wzorzec pierwotny	Istotna odtwarzalność, długoterminowa stabilność	Niezbędne do określenia częstotliwości i jednostki czasu
Wzorzec wtórny	Istotna odtwarzalność	Zmniejszone wpływy czynników po wstępnym cechowaniu
	Długoterminowa stabilność	Zmniejszona potrzeba okresowych cechowań
	Objętość i ciężar	Wymagana przenośność do cechowania względem wzorca pierwotnego
Wzorzec roboczy	Krótkoterminowa stabilność	Wymagana do szybkich odczytów częstotliwości
	Objętość i ciężar	Często wymagana przenośność
	Długoterminowa stabilność	Zmniejszona potrzeba okresowych cechowań

1	2	3
Wzorcowy czasomierz i odnośnik fazy	Długoterminowa stabilność	Szczególnie wymagana w stacjach stałych do użytku nawigacyjnego
	Pobór mocy	Stosowanie rezerwowego źródła zasilania jest konieczne
	Niezależność środowiskowa	Szczególnie wymagana przy użyciu w pojazdach
Czasometryczny przekątnik	Długoterminowa stabilność	Wystarczy by była odpowiednia do przekazywanego przedziału czasu
	Krótkoterminowa stabilność	Wymagana do szybkiej regulacji tempa
	Objętość i ciężar	Wymagana przenośność
	Pobór mocy	Wymaga przystosowania do różnych rodzajów źródeł zasilających z bateryjnymi włącznikami

1	2	3
	Niezależność środowiskowa	Wymagana odporność na wibracje, wstrząsy, zmiany temperatury i ciśnienia atmosferycznego
Komunikacyjne	Krótkoterminowa stabilność	Ważna ze względu na czystość widmową w bardzo wąskopasmowych systemach łączności o małym tempie przesyłania danych (dalekiego zasięgu kosmicznego)
	Długoterminowa stabilność	Ważna w długoterminowych systemach korelacji czasowej (dalekiego zasięgu kosmicznego). Ważna również do cechowania widma
Systemy śledzenia	Krótkoterminowa stabilność	Ważna do pomiarów częstotliwości w systemach Dopplera
	Długoterminowa stabilność	Zmniejszona zależność od sobieś cechowania. Zwiększona zdolność utrzymania stanu gotowości koordynacji między oddległymi stacjami sieci

przypadków. Tym niemniej tabl. 1 i 2 podają zakres zastosowań i uwagi dotyczące różnych wymagań dla przypadków instalacji stałych, przewodnych i będących aktualnie w eksploatacji. Tablica 2 zawiera ogólne zestawienie najważniejszych cech charakterystycznych, którymi się legitymuje większość wzorców częstotliwości dotychczas zainstalowanych. Poza tym są dodatkowe zastosowania, które nie były dotąd wyszczególniane, a które wydają się równie ważne. Między nimi jest szereg naukowych zastosowań, takich, jak na przykład: odnośniki fazy w interferometrach radioteleskopowych, krótkoterminowe i długoterminowe systemy korelacji czasowej w dalekosiężnej astronomii radarowej i prace doświadczalne w zagadnieniu ogólnej teorii względności. Jest prawdopodobne, że w tych zastosowaniach najbardziej cenioną cechą będzie stabilność. Z tablic 1 i 2 wynika, że zalety tego lub innego typu wzorca częstotliwości zależą od poszczególnych kombinacji cech charakterystycznych ocenianych w stosunku do rodzaju zastosowania. Należy spodziewać się, że we wszystkich przypadkach będzie znalezione najlepsze kompromisowe rozwiązanie.

3. WIADOMOŚCI OGÓLNE

3.1. Idealne i praktyczne wzorce atomowe

Idealny atomowy wzorzec częstotliwości wytwarzałby ciągle, dokładnie powtarzający się przebieg o radiowej częstotliwości, która odpowiada ściśle separacji poziomów, jaką ma para charakterystycznych stanów energii wytypowanego atomu, umieszczonego pojedynczo w wolnej prze-

strzeni, bez wpływu zakłócających sił wywołanych: polami elektrostatycznymi, polami oscylującymi i zderzeniami cząsteczek. Oczywiście, jest niemożliwością stworzenie tak idealnych warunków i wszystkie typy atomowych wzorców częstotliwości odbiegają w pewnym stopniu od ideału. W każdym razie należy stosować środki pobudzające do uwolnienia istotnych energii atomowych podczas okresu czasu, w którym atom jest uchwytany i może ją przekazać urządzeniu, Ten proces wymagający zastosowania oscylującego pola prowadzi do poszerzenia pasma częstotliwości wzorcowej, które jest odwrotnie proporcjonalne do rozporządzalnego czasu, w jakim się odbywa przekazywanie energii atomu. Ponadto okazało się, że wchodzące w grę atomy mają zawsze różne poziomy energii skierowane z różną orientacją atomów w polu magnetycznym i że większość tych poziomów zmienia się wprost proporcjonalnie do wartości pól. Wobec tego, że obecności pola magnetycznego w praktycznie wykonanych urządzeniach nie da się uniknąć z winy występującego pola magnetyzmu ziemskiego i niedoskonałych sposobów ekranowania - jest konieczne stosowanie małego pola o znanej wartości z wyregulowanym kierunkiem działania w celu uzyskania dostatecznej separacji różnych poziomów energii, aby móc tym sposobem wyłowić odpowiednią parę, która jest w rezonansie z oscylującym polem. Zależność optymalnej pary poziomów od pola magnetycznego jest jedynie drugiego rzędu i wynika z tego powodu odchylenie częstotliwości może być ściśle obliczone z teoretycznych zależności (wzór Breit-Rabi). Tak więc w praktyce występują co najmniej

dwie zakłócające siły, wywołane przez oscylujące pole i przez statyczne pole magnetyczne, które wymagają stosowania kompromisowych rozwiązań w atomowych wzorcach częstotliwości. W związku z powyższym, wzorce częstotliwości wykorzystujące rezonans strumieni atomów cezu i talu zbliżają się najbardziej do ideału, gdyż tylko te dwie zakłócające siły występują w tego typu urządzeniach. Oczywiście, wzorce te nie są wolne od dodatkowych niedociągnięć wywołanych ograniczoną liczbą atomów, biorących w jednostce czasu udział w rezonansie i związanych z tym statystycznych fluktuacji (szumów), które prowadzą do poszerzenia pasma częstotliwości wzorca ("Zasada błędzenia"). Niedociągnięcie wywołane obecnością oscylującego pola o częstotliwości radiowej może być zmniejszone w urządzeniach wykorzystujących rezonans strumieni atomów przez zwiększenie drogi i przez to czasu przekazywania energii. Oczywiście, ten sposób postępowania ma swoje ograniczenia praktyczne.

Istnieje ponadto możliwość zmniejszenia niedociągnięć wynikających z "Zasady błędzenia", tj. poszerzenia pasma częstotliwości wzorcowej przez wykorzystanie zderzeń atomów, aby tym sposobem przedłużyć czas przekazywania energii bez potrzeby konstruowania urządzeń o dużych wymiarach. Dodatkowe siły zakłócające wymagają jednak pewnych kompromisów. W przypadku maserów cząsteczek wodoru zderzenia ze ścianami prowadzą do bardzo znacznego zawężenia pasma rezonansu, lecz temu towarzyszy dodatkowe odchylenie częstotliwości wzorcowej. W przypadku wzorca z gazową komórką cząsteczek rubidu zderzenia atomów wy-

wołują stosunkowo duże odchylenie częstotliwości wzorcowej, które jest zależne ponadto od istniejących warunków pracy urządzenia. Tym niemniej uzyskiwana w powyższy sposób zwartość i prostota budowy wzorca jest bardzo cennie-
na i ma szerokie zastosowanie.

3.2. Kształt linii rezonansowej

Zarówno szerokość jak i symetria atomowej linii rezonansowej są czynnikami, które mają wpływ na stabilność i istotną odtwarzalność wzorca. W każdym typie częstotliwość pracy wzorca zależy od pewnej średniej odmiany kształtu linii rezonansowej i im bardziej jest ona równomierna (o dużej selektywności rezonansowej), tym mniejszy jest zakres błędzących częstotliwości występujących w procesie uśredniania. Ponadto przy braku symetrii w linii nie występuje wyróżniająca się częstotliwość środkowa i proces uśredniania jest czuły na zmiany charakterystyk współpracujących układów elektronicznych.

3.3. Widmo pobudzającego pola o częstotliwości radiowej

Podane wyżej uwagi dotyczą w równej mierze symetrii i szerokości pasma pobudzającego pola. Na charakterystykę widmową tego oscylującego pola o częstotliwości radiowej mają wpływ - w przypadku pasywnych rezonatorów (cezowy wzorzec częstotliwości i rubidowy wzorzec częstotliwości) układy elektroniczne, które generują drga-

nia, zaś w przypadku aktywnych maserów (wodorowy wzorzec częstotliwości) szumy ciepłone elektromagnetycznych węgk rezonansowych.

3.4. Odchylenia częstotliwości w urządzeniach wzorcowych

Odchylenie częstotliwości, które występuje w różnych wzorcowych urządzeniach atomowych jest podstawową własnością wzorców świadczącą o ich cechach: istotnej odtwarzalności i długoterminowej stabilności. Od stopnia odchylenia częstotliwości wzorcowej zależy sposób rozwiązania konstrukcyjnego urządzeń, mający na celu uzyskanie stałej wartości odchylenia. Ogólnie biorąc, należy się spodziewać, że wzorce o mniejszym odchyleniu częstotliwości będą miały mniejsze potrzeby na regulacje i konstrukcyjne tolerancje w urządzeniach.

We wszystkich atomowych wzorcach występuje odchylenie częstotliwości wywołane przez stałe pole magnetyczne. W przypadku wzorców ze strumieniem atomów cezu typowe względne odchylenie częstotliwości wynosi 1×10^{-10} , gdy w przypadku wzorców z maserem atomów wodoru - 5×10^{-13} , a w przypadku wzorców z gazową komórką atomów rubidu - 1×10^{-9} . Oprócz tego występuje w każdym wzorcu atomowym odchylenie częstotliwości wywołane drugorzędnym efektem Dopplera. W przypadku wzorców z atomami cezu i rubidu odchylenie to jest stosunkowo małe, gdyż wynosi zaledwie parę części na 10^{13} i może być pominięte. Natomiast we wzorcach z maserem wodorowym drugiego rzędu efekt Dopple-

ra wywołuje stosunkowo znaczne odchylenie częstotliwości, wynoszące około czterech części na 10^{11} , które musi być wzięte pod uwagę w postaci korekcji. Towarzyszący temu współczynnik temperatury wynosi $1,4 \times 10^{-13}$ na jeden stopień Celsjusza. Zderzenia atomów prowadzą do dodatkowych odchyłek częstotliwości. W przypadku wzorców z mascrem wodoru odchylenie to wynosi około 2×10^{-11} , w związku z czym powinno być ono wzięte w rachubę przy korekcji. W przypadku wzorców z gazową komórką rubidu zderzenia atomów wywołują odchylenie częstotliwości rzędu 3×10^{-7} , co stwarza potrzebę stosowania dodatkowych regulacji. Wzorce ze strumieniem cząsteczek cezu nie mają dodatkowych odchylen częstotliwości wywołanych przez zderzenia atomów.

3.5. Natężenie rezonansowych drgań

Natężenie rezonansowych drgań w stosunku do nieodłącznych szumów oraz selektywność rezonansowej linii atomowej są podstawowymi czynnikami, mającymi wpływ na krótkoterminową stabilność atomowego wzorca częstotliwości. Tablica 3 zawiera zestawienie czynników i przyczyn praktycznych niedociągnięć, które decydują o jakości atomowych wzorców częstotliwości.

Ogólny wykaz czynników, które mają wpływ na jakość atomowych wzorców częstotliwości

1	2	3
Decydujący czynnik	Przyczyna praktycznych niedociągnięć	Wpływ na cechę
Rezonans atomowy: Szerokość pasma Symetria	"Zasada błędzenia" (Czas przekazywania energii) 1. Różne poziomy energii atomów 2. Zależności fazowe pomiędzy pobudzającym polem i rezonansowymi drganiami atomów	(Patrz na wykaz cech p. 2.1) a, b, c a, b, d a, b, d
Pobudzające pole o częstotliwości radiowej: Szerokość pasma	1. Szumy i pasywna modulacja występujące w elektronicznych wielo- czach, mieszaczach, generatorach itp. 2. Szumy w mikrofalowych wnękach rezonansowych	a, b, c a, b, c

c.d. tabl. 3

1	2	3
<p>Śymetria</p>	<p>Niesymetria wstęp bocznych przy modulacji użytecznej bądź też pasywniczej</p>	<p>a, b, d</p>
<p>Odchylenia częstotliwości:</p>	<p>Efekt optymalnej pary poziomów (Wzór Breit-Rabi)</p>	<p>a, b</p>
<p>Pole magnetyczne</p>	<p>Zakłócenia poziomów energii</p>	<p>a, b, e, f</p>
<p>Zderzenia atomów</p>	<p>Ciepłna szybkość atomów</p>	<p>a, b, e</p>
<p>Drugiego rzędu efekt Dopplera</p>	<p>1. Ilość atomów biorąca udział w rezonansie 2. Sprawność detektora rezonansu 3. Jakość układów elektronicznych</p>	<p>c, g c, g c, g</p>
<p>Stosunek natężenia rezonansowych drgań do szumów</p>		

4. STAN ZAAWANSOWANIA OPRACOWAŃ

W ocenie względnych zalet atomowych wzorców częstotliwości wzięty został za podstawę poziom charakterystycznych cech, osiągniętych w wyniku dotychczasowych prac rozwojowych nad poszczególnymi typami. Należy jednak uważać, że znaczenie różnic w charakterystycznych cechach wzorców zależy nie tylko od stanu zaawansowania opracowań, lecz również od potencjalnych możliwości wprowadzenia dalszych ulepszeń.

4.1. Atomowe wzorce częstotliwości ze strumieniem cząsteczek cezu

Jest obecnie w użyciu stosunkowo znaczna liczba atomowych wzorców częstotliwości ze strumieniem cząsteczek cezu, które zostały w szczególności opracowane przez kilku badaczy. W wyniku produkcji przemysłowej można uzyskać statystyczne dane z eksploatacji przeszło 100 egzemplarzy wzorców tego typu. Uzyskane wyniki świadczą, że przenośne urządzenia wzorców, które wykorzystują lampy cezowe o długości 16 cali osiągają w istotnej odtwarzalności wartość $\pm 5 \times 10^{-12}$, podczas gdy podawana przez producenta wynosi 1×10^{-11} , zaś istniejąca w rzeczywistości dokładność większości egzemplarzy jest lepsza od 1×10^{-11} w stosunku do definicji częstotliwości atomowej, ustanowionej przez Narodowe Biuro Wzorców (USA). W indywidualnych badaniach prowadzonych przez okresy dłuższe od 1 miesiąca została również zmierzona długo-

terminowa stabilność. Pomiar wykazał, że długoterminowa stabilność tych egzemplarzy atomowych wzorców cezowych przekracza znacznie na lepsze wartość, jaką uzyskano dla istotnej odtwarzalności. Stosowany w metodzie statystycznej pomiar długoterminowej stabilności w okresach jednodniowych dał wynik o średniej wartości 3×10^{-13} . Krótkoterminowa stabilność atomowych wzorców cezowych produkcji przemysłowej przy obserwacji w odstępach jednosekundowych wynosi od $1,5 \times 10^{-11}$ do 1×10^{-10} , zależnie od doboru parametrów pracy układów elektronicznych z uwzględnieniem wpływu wibracji i wstrząsów mechanicznych. Niezawodność produkowanych fabrycznie cezowych wzorców częstotliwości, ujęta statystycznie jako średni czas pracy całego urządzenia bez awarii wynosi 13.000 godzin. Czas ten się zwiększa w miarę nabywanych doświadczeń i wprowadzanych ulepszeń do produkcji.

Eksploatacja stałych instalacji cezowych wzorców częstotliwości o stosunkowo długich lampach strumieniowych dała również obszerny materiał doświadczalny. Najbardziej gruntownie został zbadany egzemplarz NBS III, którego dokładność wytwarzania zdefiniowanej częstotliwości atomowej, uważa się, że wynosi $\pm 1,1 \times 10^{-12}$. Atomowe wzorce częstotliwości o długich cezowych lampach strumieniowych są już od szeregu lat w eksploatacji, w związku z czym zastosowane w międzyczasie udoskonalenia w mniejszych egzemplarzach wzorców nie mogły jeszcze znaleźć pełnego wykorzystania w instalacjach stałych. Niedawno zaplanowano budowę czterostopowego, cezowego rezonatora strumieniowego, do którego konstrukcji mają być wprowadzone naj-

nowsze osiągnięcia. Jednak istnieją wciąż duże możliwości dalszych ulepszeń cezowych wzorców częstotliwości. Zostało stwierdzone, że niedociągnięcia, które prowadzą do statystycznego rozrzutu poziomu istotnej odtwarzalności w przemysłowej produkcji cezowych lamp strumieniowych są co najmniej w części wywołane termoelektrycznymi prądami, powstającymi z winy gradientów temperatury w miejscach połączeń różnych metali. Powyższe prądy, które dzięki niedawnym udoskonaleniom zostały zmniejszone, modyfikują statyczne pole magnetyczne wprowadzając mały, dodatkowy składnik, zależny od temperatury. Inne czynniki, jeszcze nie rozpoznane wpływają również w pewnym stopniu na rozrzut wartości istotnej odtwarzalności. Prawdopodobnymi czynnikami są przesuwany fazy w mikrofalowych wnękach oraz oddziaływania układów elektronicznych.

4.2. Atomowe wzorce częstotliwości z maserem cząsteczek wodoru

Chociaż przeprowadzono szczegółowe badania stosunkowo małej grupy, około ośmiu atomowych wzorców częstotliwości z maserem wodorowym, to już na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że urządzenia tego typu zapewniają najwyższy stopień stabilności, który dotychczas dało się uzyskać w zakresie uśrednionych odstępów czasu począwszy od niecałej sekundy do przeszło doby, a są również poważne argumenty świadczące o tym, że dotyczy to również okresów dłuższych od miesiąca. Istotna odtwarzalność jest również doskonała. Z badań wynika, że istnieją-

ce urządzenia wzorcowe z maserem wodoru, przy troskliwej eksploatacji, są zdolne wytwarzać tę samą częstotliwość z biegiem czasu i w różnych miejscach zainstalowania z tolerancją lepszą od pięciu części na 10^{13} . Przy nieprzerwanej pracy urządzenia jest ponadto możliwość utrzymania wzorcowej częstotliwości przez szereg miesięcy w granicach trzech części na 10^{13} . Podane wartości uwzględniają pewne odchylenia w obsłudze i eksploatacji urządzeń, jednak nie mają one statystycznego znaczenia, gdyż do tego celu potrzebne są dane z pomiarów dużej liczby niezależnych egzemplarzy.

Z analizy przyczyn odchyień częstotliwości we wzorcach z maserem wodorowym wynika, że są dwa główne źródła ich pochodzenia, a mianowicie: dostrajana wnęka mikrofalowa oraz pokrycie ścianek komory akumulacyjnej. Co się tyczy wnęki mikrofalowej to zostało stwierdzone, że istnieją precyzyjne sposoby kompensacji wpływu zderzeń między atomami wodoru, zezwalające na zmniejszenie odchyień częstotliwości do nieznacznej wartości. Jednak w zastosowaniu praktycznym nie dają one właściwych wyników ze względu na niedoskonałą stabilność konstrukcji wnęki i zmiany wymiarów wywołane zjawiskiem rozszerzalności cieplnej. Ważniejsze elementy wnęki są wykonane z kwarcu.

Czynnikiem, który wywołuje największe, wynoszące około 2×10^{-11} odchylenie częstotliwości w istniejących urządzeniach wzorcowych z maserem wodorowym są zderzenia atomów ze ściankami. Pomiar był wykonywany za pomocą wzorca cezowego z dokładnością 2×10^{-12} , a na wynik miały wpływ wymiary komory akumulacyjnej i temperatura.

Należy się spodziewać, że w przyszłości urządzenia wzorców częstotliwości z maserem atomów wodoru będą udoskonalone. Przewidziane jest zastosowanie ulepszanego, elektronicznego sposobu automatycznej regulacji strojenia wnęki mikrofalowej w celu zmniejszenia niedociągnięć, wywołanych wahaniami temperatury i zmianami wymiarów wnęki. Wartość odchylenia częstotliwości powstałego od zderzeń atomów ze ściankami, jak również wywołanego ewentualnym starzeniem się wzorca, może być zmniejszona przez opracowanie typu o większej atomowej-komorze akumulacyjnej. Odpowiedni typ jest już w projekcie.

4.3. Atomowe wzorce częstotliwości z gazową komórką cząsteczek rubidu

Podobnie jak wzorce cezowe, wzorce rubidowe są produkowane w stosunkowo znacznej liczbie. Niezawodność produkowanych fabrycznie rubidowych wzorców częstotliwości, ujęta statystycznie dla więcej niż 150 egzemplarzy jako średni czas pracy jednego urządzenia bez awarii wynosi 23.000 godzin. Krótkoterminowa stabilność jest również doskonała. Natomiast długoterminowa stabilność nie jest tak znaczna, o czym świadczą wyniki niedawno przeprowadzonych dokładnych pomiarów.

Stosunkowo znaczne odchylenie częstotliwości, dochodzące do 3 części na 10^7 , które jest wywołane przez zderzenia cząsteczek gazu w rubidowych wzorcach częstotliwości z gazową komórką, wymaga cechowania i regulacji urządzeń w czasie produkcji bądź też eksploatacji. W związ-

ku z tym, istotna odtwarzalność rubidowego wzorca jest nie nadzwyczajna i najważniejszym miejscem zastosowania urządzeń tego typu jest takie, w którym ta cecha nie ma zasadniczego znaczenia. Głównym czynnikiem wpływającym na długoterminową stabilność jest termochemiczna równowaga zespołu składającego się z wewnętrznej powierzchni gazowej komórki rubidu, ładunku gazów, par rubidu i zanieczyszczeń, które mogą występować. Drugim ważnym źródłem, dającym odchylenie częstotliwości rzędu paru części na 10^6 jest zespół lampy par rubidu i superdrobny filtr komórki. Zachodzące w urządzeniu różne procesy oraz ich stosunkowy wpływ na niedociągnięcia rubidowego wzorca nie zostały jeszcze dostatecznie wyjaśnione. Jednak praktyka wykazała, że produkcja jednolitych wzorców rubidowych napotyka na trudności, dając egzemplarze o różniących się wartościach długoterminowej stabilności. Jedynie starannie przeprowadzone próby stabilności z doбором rubidowej komórki mogą dać w wyniku rezonator, którego systematyczna zmiana częstotliwości nie przekracza 2×10^{-13} na dobę, traktując ten wynik jako średni z okresów od jednego do czterech miesięcy. Taka wartość stabilności wzorca wydaje się, że spełni ograniczenie 5×10^{-11} w stosunku rocznym. Bez selekcji natomiast można spotkać egzemplarze rubidowego wzorca, których systematyczna zmiana częstotliwości wynosi aż 1×10^{-12} na dobę. Jedną z najbardziej cenionych cech rubidowych wzorców częstotliwości jest ich krótkoterminowa stabilność, która z łatwością osiąga w pracujących egzemplarzach urządzeń wartość 5×10^{-12} średnio na jedną sekundę. Jest

to znacznie lepiej od wartości, jaką ma odpowiednia cecha obecnie wykonanego urządzenia cezowego wzorca częstotliwości.

Ze wszystkich, obecnie produkowanych atomowych wzorców częstotliwości, urządzenia z komórką gazową rubidu mają najmniejsze wymiary i wagę. Najmniejsze, będące w produkcji egzemplarze, zasilane z 24-woltowego źródła w energię elektryczną, mają objętość mniejszą niż pół stoły sześcienniej i ważą około 20 funtów.

W przyszłości należy się spodziewać lepszego rozeznania fizycznych i chemicznych procesów zachodzących w rezonansowej komórce wzorca, które powinno doprowadzić do poprawniejszego rozwiązania technologicznego i w wyniku do wyrównania długoterminowej stabilności na najwyższym poziomie, jaki dziś daje się uzyskać. Postęp w konstrukcji urządzeń powinien zmniejszyć wpływ zmian temperatury środowiska i doprowadzić do większej stabilności wzorca dla uśrednionych okresów od paru minut do paru godzin. Poza tym przewiduje się zmniejszenie wymiarów i wagi urządzenia. Realizowany jest już plan budowy urządzenia wzorcowego z gazową komórką cząsteczek rubidu, które łącznie z dzielnikiem częstotliwości będzie mogło służyć jako zegar, mieszczący się w objętości mniejszej od 300 cali sześciennych. Waga tego egzemplarza będzie wynosić około 15 funtów, a całkowity pobór mocy nie przekracza 20 watów.

4.4. Atomowe wzorce częstotliwości ze strumieniem cząsteczek talu

Rozwój wzorców częstotliwości ze strumieniem atomów talu nie osiągnął jeszcze takiego stanu, aby móc w sposób pewny podać ich względne zalety w oparciu o przeprowadzone pomiary. O ile wiadomo, działają obecnie jedynie trzy wstępne modele, z których dwa znajdują się w USA, a jeden w Szwajcarii.

Główną zaletą tego typu wzorca jest możliwość uzyskania nieznacznego tylko wpływu stałego pola magnetycznego na częstotliwość wzorcową. W związku z powyższym, przewaga, jaką ewentualnie może mieć wzorzec talowy nad wzorcem cezowym, wynika z niedociągnięć tego ostatniego, wywołanych przez wpływ stałego pola magnetycznego na nie dające się korygować odchylenie częstotliwości wzorcowej. Jednak jest jeszcze za wcześnie, aby móc określić stopień, w jakim ta zaleta wpłynie na poprawę charakterystycznych cech wzorca w praktyce, licząc się z działaniem innych czynników wywołujących niedociągnięcia.

5. PORÓWNANIE WZGLĘDNYCH ZALET

Ocena liczbowa względnych zalet różnych atomowych wzorców częstotliwości w całym zakresie charakterystycznych cech jest nierealna i mija się z celem ze względu na skomplikowaną formę informacji i brak pełnych danych. Ogólnie biorąc, najpraktyczniejszym rozwiązaniem tych trudności będzie prawdopodobnie przedstawienie zalet po-

Porównanie względnych zalet atomowych wzorców częstotliwości, produkcji przemysłowej (marzec 1967 r.)

Cecha	K o l e j n o ś ć			
	pierwsza	druga	trzecia	4
1	2	3	4	
Istotna odtwarzalność	Maser wodorowy $\pm 5 \times 10^{-13}$	Strumień cezu $\pm 3 \times 10^{-12}$	Komorówka gazu rubidu	Komorówka gazu rubidu
Długoterminowa stabilność (1 doba)	Maser wodorowy 2×10^{-14}	Strumień cezu 2×10^{-13}	Komorówka gazu rubidu 5×10^{-12}	Komorówka gazu rubidu 5×10^{-12}
Krótkoterminowa stabilność (1 sekunda)	Maser wodorowy 5×10^{-13}	Komorówka gazu rubidu 1×10^{-11}	Strumień cezu 5×10^{-11}	Strumień cezu 5×10^{-11}
Systematyczna zmiana częstotliwości	Strumień cezu (nie wykrywalna przy czułości 3×10^{-12} na rok)	Maser wodorowy (nie wykrywalna przy czułości 1×10^{-12} na rok)	Komorówka gazu rubidu (mniej sza od 3×10^{-11} na mie- siąc)	Komorówka gazu rubidu 3×10^{-11} na mie- siąc)
Niewrażliwość na wpływy elektro- dynamiczne	Maser wodorowy	Strumień cezu	Komorówka gazu rubidu	Komorówka gazu rubidu

1	2	3	4
Niewrażliwość na zmiany środowiskowe			
Temperatura	Maser wodorowy (1 x 10 ⁻¹³ na °C)	Strumień cezu	Komórka gazu rubidu
Ciśnienie	Strumień cezu (nie wykrywalna)	Maser wodorowy (nie wykrywalna)	Komórka gazu rubidu
Niewrażliwość na wpływ vibracji i wstrząsów	Komórka gazu rubidu	Strumień cezu	Maser wodorowy
Objętość (z zasilaczem 115 wolt)	Komórka gazu rubidu 0,6 stopy ³	Strumień cezu 1,4 stopy ³	Maser wodorowy 16 stopy ³
Ciężar (z zasilaczem 115 wolt)	Komórka gazu rubidu 40 funtów	Strumień cezu 63 funty	Maser wodorowy 300 funtów
Pobór mocy	Komórka gazu rubidu	Strumień cezu	Maser wodorowy
Okres czasu użytk. tecznej ekspl. (ciąglej)	Komórka gazu rubidu	Strumień cezu	Maser wodorowy
Cena	Komórka gazu rubidu 10.000 dol.	Strumień cezu 15.000 dol.	Maser wodorowy 55.000 dol.

szczególnych typów w sposób porównawczy, uzupełniony wyjaśnieniami i niektórymi danymi.

5.1. Tabelaiczne porównanie atomowych wzorców częstotliwości, produkcji przemysłowej

Tablica 4 przedstawia kolejność względnych zalet różnych, obecnie produkowanych atomowych wzorców częstotliwości: wzorca maser wodorowy w wykonaniu Varian Associates Model H-10, wzorca cezowego (16-calowa lampa strumieniowa) w wykonaniu Hewlett-Packard Model 5060A, wzorca rubidowego w wykonaniu General Technology Model 304B, bądź też Varian Associates Model R-20. Cechy, których wartość jest dostatecznie pewnie ustalona mają w tablicy przytoczone odpowiednie dane. Dane te nie zostały wzięte z dokumentacji producenta, lecz uzyskane z pomiarów kontrolnych.

6. WNIOSKI

Poza wymienionymi w tym artykule typami atomowych wzorców częstotliwości były w przeszłości badane również inne typy, a można się spodziewać, że w przyszłości zostaną zgłoszone jeszcze nowe pozycje. Maser strumienia cząsteczek amoniaku, który był dokładnie zbadany jako jeden z pierwszych możliwych do wykorzystania źródeł atomowych wzorców częstotliwości, obecnie nie wchodzi w rachubę ze względu na trudności, jakie sprawia stosunkowo skomplikowana struktura widna promieniowania, związa-

nega z przemianą cząsteczek. Były również próby znalezienia takiej przemiany cząsteczek, którą dałaby promieniowanie fal milimetrowych, jednak żadne z doświadczeń nie dało zadowalających rezultatów. Bardziej współcześnie dokonano próby wykorzystania gazowej komórki rubidu jako aktywnego masera i wydaje się bardzo prawdopodobne, że tym sposobem da się uzyskać pewną poprawę cech, szczególnie krótkoterminowej stabilności i niewrażliwości wzorca na wibracje i wstrząsy mechaniczne. Badania próbnych egzemplarzy masera gazowej komórki rubidu są w toku, lecz z braku dostatecznych doświadczeń z tym typem wzorca nie można w sposób pewny podać jego specjalnych zalet.

Wprowadzone już do techniki atomowe wzorce częstotliwości: wodorowe, cezowe i rubidowe będą z pewnością w dalszym ciągu udoskonalane. Powyższe udoskonalenia mogą oczywiście w pewnym stopniu wpłynąć na kolejność tej czy innej cechy wzorców, lecz wyłonił się już pewien schemat typowych zalet wzorca, który można się spodziewać nie ulegnie specjalnym zmianom w przyszłości. A więc, można się spodziewać pewnej poprawy długoterminowej stabilności atomowego wzorca częstotliwości z gazową komórką rubidu, natomiast nie ma żadnych podstaw, aby spodziewać się, że dorówna on pod tym względem wzorcowi częstotliwości ze strumieniem atomów cezu. Mimo tego długoterminowa stabilność wzorca rubidowego będzie prawdopodobnie lepsza od uzyskiwanej przez najlepszy wzorec z rezonatorem kwarcowym o jeden lub nawet dwa rzędy wielkości bez potrzeby stosowania dłuższego czasu nagrzewania. Po-

za tym, według wszelkiego prawdopodobieństwa, ruχidowe wzorce częstotliwości będą w dalszym ciągu wyróżniać się krótkoterminową stabilnością i łączyć w sobie takie zalety, jak: szczególna zwartość budowy, najmniejszy ciężar i najniższy koszt. W szeregu zastosowaniach ten typ wzorca jest bezkonkurencyjny, dotyczy to w szczególności urządzeń pokładowych dla samolotów i pojazdów kosmicznych.

Z drugiej strony, maser wodorowy będzie prawdopodobnie w dalszym ciągu charakteryzował się takimi zaletami, jak: najwyższy stopień krótkoterminowej stabilności, długoterminowej stabilności oraz istotnej odtwarzalności. Jeżeli wzorce tego typu będą dostępne nawet po znacznie niższej cenie, to jednak jest prawdopodobne, że pozostaną one w dalszym ciągu najdroższymi i najpotężniejszymi urządzeniami atomowych wzorców częstotliwości. Co się tyczy wzorców cezowych to należy się spodziewać, że będą one produkowane w szerokim zakresie rozmiarów począwszy od małych przenośnych urządzeń do wielkich o dużej precyzji zestawów dla stacji stałych. Ostateczne porównanie zalet wzorca wodorowego z zaletami dużego wzorca cezowego pozostaje jeszcze do wykonania.

WYKAZ LITERATURY

1. Bechler R.E.: A historical review of atomic frequency standards. Proc. IEEE 1967, t. 55, nr 6, s. 792-805.
2. McCoubrey A.O.: A survey of atomic frequency standards. Proc. IEEE, 1966, t. 54, nr 2, s. 116-135.

3. Richardson J.M., Hudson G.E.: Private communication reflecting considerations of the Consultative Committee for the Definition of the Second.
4. Lacey R.F., Helgesson A.L., Holloway J.H.: Short-term stability of passive atomic frequency standards. Proc. IEEE, 1966, t. 54, nr 2, s. 170-176.
5. Kleppner D., Goldenberg H.M., Ramsey N.L.: Theory of the hydrogen maser. Phys. Rev., 1962, t. 126, s. 503.
6. Cutler L.S., Searle C.L.: Some aspects of the theory and measurement of frequency fluctuations in frequency standards. Proc. IEEE, 1966, t. 54, nr 2, s. 136-154.
7. Holloway J.H., Lacey R.F.: Factor which limit the accuracy of cesium atomic beam frequency standards. Proc. Internat'l Conf. on Chronometry. Lausanne, Switzerland, 1964, s. 317.
8. Beehler R.E., Mockler R.C., Richardson J.M.: Cesium beam atomic time and frequency standards. Metrologia, 1965, t. 1, s. 114-131.
9. Essen L., Parry J.: The cesium resonator as a standard of frequency and time. Phil. Trans. Roy. Soc. (London), 1957, t. 250, nr 6, s. 54.
10. Bodily L.N.: A summary of some performance characteristics of a large sample of cesium beam frequency standards. Hewlett-Packard J., 1966, październik, s. 16-19.
11. Hewlett-Packard Co., Model 5060A Data Sheet, October 1, 1966.

12. Bodily L., Hartke D., Hyatt R.: World wide time synchronization. 1966, Hewlett-Packard J., 1966, sierpień, t. 17, s. 13-20.
13. Bodily L.N.: Performance characteristics of a portable cesium beam standard. Proc. 20th Annual Frequency Control Symp. 1966.
14. Beehler R., Halford D., Harrach R., Allan D. i inni: An intercomparison of atomic frequency standards. Proc. IEEE (Letters) 1966, t. 54, nr 2, s. 310-312.
15. Vessot R., Peters H., Vanier J. i inni: A intercomparison of hydrogen and cesium frequency standards. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. 1966 grudzień, t. IM-15, s. 165-176.
16. Vessot R.F.C.: Frequency stability measurements between several atomic hydrogen masers. Quantum Electronics III, P. Grivet and M. Bloembergen. Eds. New York: Columbia University Press, 1964.
17. Barnes J.: National Bureau of Standards, private communication.
18. Vessot R.F.C., Levine M., Hewlett-Packard Co, private communication.
19. Ramsey M.F.: Recent developments in hydrogen masers. Proc. 20th Annual Frequency Control Symp., 1966, s. 987.
20. Kleppner D. et al.: Hydrogen maser principles and techniques, Phys. Rev. 1965, t. 138, nr 4A, s.A972.

21. Chi A.R., NASA Goddard Space Flight Center, private communication.
22. Bonanomi J.: A thallium beam frequency standard. IRE Trans. on Instrumentation, 1962, grudzien, t. I-11, nr 3-4, s. 212-215.
23. Beehler R., Glaze D.: Experimental evaluation of a thallium beam frequency standard. Proc. 17th Annual Frequency Control Symp., 1963, s. 392.
24. Lacey R.F.: A thallium atomic beam tube for frequency control. Proc. 20th Annual Frequency Control Symp., 1966, s. 416.
25. Strauch R.G., Cupp E.E., Gallagher J.J.: Excitation of millimeter wave transitions for frequency control. Proc. 17th Annual Frequency Control Symp., 1963, s. 409.
26. Davidovits P., Novick R.: The optically pumped rubidium maser. Proc. IEEE, 1966, t. 54, nr 2, s. 155-170.
27. Noyes A.: General Technology Corp., private communication.

KWARCOWE WZORCE CZĘSTOTLIWOŚCI

Opracował H. Kalita na podstawie artykułu:
Gerber E.A., Sykes R.A.: Quartz Frequency
Standards. Proceedings of the IEEE, 1967,
t. 55, nr 6, s. 783-791.

W artykule dokonano przeglądu postępu w dziedzinie kwarcowych wzorców częstotliwości w ciągu kilku ostatnich lat. Szereg osiągnięć, które uznano za specjalnie ważne, przedyskutowane zostały szczegółowo. Między innymi, zwrócono uwagę na oprawki do wibratorów kwarcowych, rodzaje ruchów i drgań, łącznie z koncepcją pułapek energetycznych, i na studia materiałów kwarcowych.

Wykazano, że można uzyskać wartość dobroci Q kwarców syntetycznych bliską wartości Q kwarców naturalnych. Zwraca się uwagę na postęp, który został dokonany w odniesieniu do długoterminowej stałości precyzyjnych kwarców; w artykule przedyskutowano także różne powody starzenia się tego rodzaju jednostek.

Dokonano przeglądu charakterystyk precyzyjnych oscylatorów kwarcowych uwzględniając kompensację wpływu zmian temperatury i wpływy szeregu przyczyn zewnętrznych. Opisano własności bardzo precyzyjnych kwarcowych wzorców częstotliwości, ze specjalnym zwróceniem uwagi na starzenie się, i przedyskutowano problemy krótkoterminowej stałości tego rodzaju wzorców.

Wyniki badań umożliwiły wytwarzanie precyzyjnych wzorców częstotliwości z dobowym względnym odchyleniem czę-

stotliwości kilka na 10^{11} i krótkoterminową stałością lepszą od kilku na 10^{10} w okresie jednej milisekundy.

1. WSTĘP

W ciągu ostatnich kilku lat przeprowadzono wiele badań w celu poprawienia długo i krótkoterminowej stałości precyzyjnych, kwarcowych oscylatorów w różnych warunkach otoczenia.

W wyniku tych prac można dziś wytwarzać precyzyjne oscylatory o małych odchyleniach dobowych rzędu kilku 10^{-11} i krótkoterminowej stałości lepszej niż kilka 10^{-10} w czasie 1 milisekundy.

Głównym czynnikiem, od którego uzależniona jest długo i krótkoterminowa stałość częstotliwości jest w szczególności rezonator kwarcowy.

Zastosowanie bardzo słabego sprzężenia łącznie z bardzo dużą wartością Q , osiągalną w precyzyjnych rezonatorach, umożliwiło zredukowanie wpływu innych elementów obwodu na częstotliwość drgań; wpływ ten jest pomijalny w przypadku zastosowania najlepszych elementów i właściwie zaprojektowanego układu.

Przypadki, w których warunki te nie są dokładnie spełnione przedyskutowane zostaną w rozdziale o oscylatorach. Dlatego większość omówień w niniejszym opracowaniu dotyczyć będzie charakterystyk i własności różnych rozwiązań i typów precyzyjnych rezonatorów kwarcowych.

2. REZONATOR KWARCOWY

2.1. Rezonator kwarcowy i jego obudowa

Obecnie, prawie wyłącznie stosuje się we wzorcach częstotliwości płytki kwarcowe cięcia AT, wykorzystując ich częstotliwości podstawowe lub jedną z ich mechanicznych harmonicznych. Zwykle płytki kwarcowe mają kształt płytek płasko-wypukłych, polerowanych, z elektrodami napyłanymi w próżni.

Na charakterystyki i własności rezonatora kwarcowego wpływa w dużym stopniu sposób zmontowania w oprawce i rodzaj konstrukcji tej obudowy. Największym problemem w każdym rodzaju obudowy jest zanieczyszczenie płytki kwarcowej, powstałe przy zamykaniu oprawki pokrywką. Dla uniknięcia tej trudności w rezonatorach wzorców częstotliwości stosuje się oprawki szklane typu HC-30 i ich odpowiednik T 11 (rys. 1)^{x)}.

Główną zaletą szklanych oprawek jest to, że są bardzo dogodne przy procesie oczyszczania. W związku z tym w normalnym procesie występuje mała zanieczyszczalność spowodowana obudową.

Postęp w dziedzinie oprawek cechuje zastosowanie zimnego spawania i stosowanie obudowy w wymiarach odpowiadających obudowie tranzystora, jak to pokazano na rys.1.

^{x)} Wszystkie rysunki są zamieszczone na końcu artykułu.

2.2. Materiał kwarcowy

W ciągu ostatnich kilku lat do wykonania płytek rezonatorów rozpoczęto stosować kwarc syntetyczny. Ostatnio dokonany został znaczny postęp w próbach poprawienia dobroci Q płytek z kwarcu syntetycznego. Uzyskiwane maksymalne wartości Q są ograniczone wewnętrznym tarcieniem materiału. Rysunek 2 przedstawia pewne wcześniejsze wyniki pomiarów wewnętrznego tarcia naturalnego kwarcu w szerokim zakresie temperatur. Wyniki te uzyskano przy określaniu Q rezonatora 5 MHz o ciężciu AT zamkniętego w szklanej obudowie, pracującego na piątej harmonicznej.

Wspomniane wyżej konstrukcje zespołu rezonatora kwarcowego zastosowano zarówno do płytek z kwarcu syntetycznego i naturalnego przeznaczonych do badań współczynnika Q . Wyniki pomiarów wskazują na to, że największa część pomierzonych strat ma swe źródło w materiale rezonatora, a nie w jego obudowie. Występuje ostry szczyt charakterystyki strat przy 50°K i dodatkowe ogólne tło, posiadające swe maksimum przy 20°K . Wykazano, że ten szczyt przy 50°K jest wywołany zanieczyszczeniem sodowym. Ten szczyt zmienia się przy różnych okazach materiału i może być usunięty przez elektrolityczne wnelimowanie zanieczyszczeń lub zastąpienie ich przez lit podczas hodowli z roztworu.

Współczynnik Q syntetycznego kwarcu może być poprawiony do wartości Q dla naturalnego kwarcu. Przyczyny szczytów zanieczyszczeń i tła, jaką odgrywają sól, lit i potas zostały wyjaśnione przez ustalenie modelu tego

efektu. Skutki braku elastyczności tych jonów alkalicznych zostały przestudiowane w zakresie temperatur od temperatury ciekłego helu do temperatury bliskiej punktowi inwersji kwarcu przy 573°C . Relaksacje tła, wskazane na rys. 2, zostały wyjaśnione jako straty wskutek bezpośredniej zamiany energii fal akustycznych w energię cieplną. Ostatnie prace wykazały, że większość strat akustycznych, w normalnych zakresach temperatur pracy, jest wywołana powiązaniem wodoru w siatce krystalicznej. Wykazano także, że te powiązania wodoru powodują charakterystyczną absorpcję światła w zakresie bliskiej podczerwieni i prowadzą do gwałtownego wzrostu zawartości wodoru, a stąd i do obniżenia wartości Q w nowo hodowanym materiale. Metody węglanosodowe hodowli kwarców prowadzą do kryształów o bardzo małej zawartości wodoru, jak to wykryto przy prześwietlaniu podczerwienią i o współczynniku Q rzędu $2 \cdot 10^6$ przy 5 MHz.

Bardziej szybki wzrost kryształów z zastosowaniem wodorotlenku sodu w procesie hodowli doprowadza do wartości Q znacznie mniejszych od miliona, natomiast Q o wartości 10^6 do $2 \cdot 10^6$ można otrzymać przy stosowaniu dodatków do roztworu w procesie hodowli.

Ponieważ straty akustyczne w rezonatorze są odwrotnie proporcjonalne do współczynnika sprężystości, to rezonatory cięcia BT ze współczynnikiem sprężystości ponad dwukrotnie wyższym od współczynnika sprężystości rezonatora cięcia AT zapewniają wyższe wartości Q . Uzyskano wartość $Q = 1 \cdot 10^6$ przy częstotliwości 15 MHz.

2.3. Rodzaje drgań

Od szeregu lat przeprowadzano pomiary charakterystyk rezonansowych kryształów rezonatorów w celu eksperymentalnego określenia rodzaju drgań płytek i lepszego zrozumienia kompleksowych zjawisk obserwowanych w poszczególnych zespołach rezonatorów. Te prace umożliwiły matematykom ustalenie granicznych warunków do rozwiązania tego złożonego problemu. Bardzo duży postęp osiągnięto w Columbia University (Stany Zjednoczone), gdzie zajmowano się różnymi rodzajami drgań płytek kwarcowych i określeniem rozkładu amplitud. Rozwinięto obszerną teorię drgań prętów i płytek krystalicznych, wykorzystując do rozwiązywania równań nowoczesne metody i narzędzia matematyczne.

Rysunek 3 przedstawia porównanie wyników eksperymentalnych i teoretycznych badań rodzajów drgań zgięciowych i ścinających, łącznie z tymi, które są spowodowane w rezonatorach kwarcowych skrętami trójwymiarowymi. Rysunek ten ilustruje postęp, jaki został dokonany w identyfikowaniu i opisywaniu bardziej złożonych form grubościowych drgań zgięciowych i ścinających.

Wyniki tych badań są ściśle związane z wieloma aktualnymi problemami praktycznymi, np. tłumieniem niepożądanых reakcji w rezonatorach przez profilowanie lub przez sterowanie elektrodami stanowiącymi pułapki energii. Koncepcja pułapki energetycznej polega na tym, że energia wibratora w rejonie elektrod płytek kryształu poddana jest zjawisku odcięcia. Jeśli bardziej zewnętrzna porcja energii ma częstotliwość wyższą od porcji energii przy-

elektrodowej, wynikowa energia wi bratora jest w zasadzie ograniczona do porcji energii przyelektrodowej i zmniejsza się eksponencjalnie z odległością od elektrody. Ta koncepcja jest podstawą do projektowania rezonatorów o pojedynczym rezonansie kryształu. Ponieważ energia jest ograniczona głównie do porcji przyelektrodowej, struktura oprawki nie może przeciwdziałać wibracjom płytki.

Krytycznymi parametrami przy stosowaniu koncepcji pułapek energii są średnica i grubość elektrody w porównaniu z grubością płytki kwarcowej. Wynaleziono dokładne metody eksperymentalne do pomiaru rozkładu amplitud lub naprężenia w drgającej płytce kwarcowej. Jedną z nich jest technika sondowania elektrycznego, która pozwala uzyskać wyniki pokrywające się bardzo dobrze z teorią. Inny eksperymentator mierzył stopień modulacji strumienia świetlnego odbitego od powierzchni kryształu kwarcu, którego drgania są rodzaju grubeściowego, ścinającego.

Istotne osiągnięcia uzyskano ostatnio przy zastosowaniu promieni rentgenowskich do wykrywania rys lub przemieszczeń w drgających płytkach krystalicznych. Ta technika wykazuje także niedoskonałość materiału jak wynik uszkodzenia siatki krystalicznej, jak także rysy w cienkich metalowych pokryciach kwarcu. Każdy ruch wynikający z nielinearności siatki może być łatwo wykryty rentgenowską metodą topograficzną, a rys. 4 ilustruje stopnie czułości, jakie mogą być uzyskane tą metodą. Rysunek ten przedstawia różne rodzaje drgań rezonatora 3,2 MHz o cięciu grubościowym i odpowiednie jego reakcje.

Każda fotografia płytki kwarcowej przedstawia tę samą płytkę przy różnych reakcjach łącznie z reakcją rezonatora przy podstawowej 3,2 MHz. Wzdłuż linii oznaczonej -20 dB znajdują się te reakcje przy pobudzaniu płytki, które są funkcją przede wszystkim występującą w kierunku osi X. Te, które są wzdłuż linii 0 dB są reakcjami związanymi z osią Z', podczas gdy grupa na górze rysunku stanowi odpowiedzi, związane z obu kierunkami X i Z'. Wszystkie z zaobserwowanych charakterystyk pokazanych na tym rysunku wykazują nagłe zakończenie tych reakcji powyżej 3,852 MHz.

Oznacza to, że mechanizm pułapek energetycznych jest wywołany kombinacją średnicy elektrody i jej masy, jak również konturem płytki krystalicznej. Stosując tę technikę można łatwo i szybko przeprowadzić badania rozkładu naprężeń w drgających płytkach kwarcowych. Bardzo precyzyjne rezonatory kwarcowe, opisane poprzednio, są pobudzane polem elektrycznym (Y), które jest prostopadłe do głównej powierzchni płytki kwarcowej. Natomiast może być zastosowane pole elektryczne równoległe do głównej płaszczyzny, sprzężone z drganiem rodzaju grubościowego, ścinającego. Może temu towarzyszyć usunięcie elektrod, które nie pokrywają środkowej części, określającej podstawową częstotliwość płytki kwarcowej. Ponieważ najbardziej aktywna środkowa powierzchnia wibratora kwarcowego nie jest pokryta metalem, otrzymujemy wyższe Q i lepsze zachowanie wibratora przy gwałtownych zmianach temperatur.

3. STAŁOŚĆ CZĘSTOTLIWOŚCI JAKO FUNKCJA RÓŻNYCH PARAMETRÓW

3.1. Temperatura

Główne zmiany częstotliwości większości rezonatorów kwarcowych są wynikiem zmian temperatury otoczenia. Jest znanym faktem, że charakterystyki częstotliwościowo-temperaturowe rezonatorów o cięciu AT mogą być przedstawione w postaci wielomianu trzeciego stopnia i są całkowicie regulowane przez orientację płytki kwarcowej względem osi krystalicznych. Dwa punkty o zerowym współczynniku leżą symetrycznie w pobliżu temperatury pokojowej. Stąd wynika, że orientacja może być tak wybrana, aby w małych zakresach zmian temperatury uzyskać małe, ogólne zmiany częstotliwości. W szerokim zakresie zmian temperatury od -55° do $+105^{\circ}\text{C}$ całkowite odchylenie względne częstotliwości wynosi $\pm 0,002\%$. Przy zastosowaniu ostatnio opracowanych metod kompensacji temperatury, ogólne zmiany mogą być znacznie zredukowane. Sprawa ta zostanie omówiona szczegółowiej w rozdz. 4.

3.2. Starzenie się

Zmianie częstotliwości rezonatora kwarcowego w funkcji czasu, określanej jako zmiana długoterminowa, poświęca się wiele uwagi i ocenia się jako bardzo ważny parametr dla postępu w poprawie stabilności. Duży krok zrobiono w ostatnich latach w kierunku wyizolowania różnych procesów fizycznych i mechanicznych, które przyczy-

niają się do starzenia się wibratorów grubościowych, co pozwoliło na opracowanie rezonatorów z poprawioną stałością częstotliwości. Wskaźniki starzenia się precyzyjnych rezonatorów grubościowych, jak np. cięcia typu AT zredukowano w ciągu kilku ostatnich lat w stosunkowo niezłym stopniu. Stosowanie opravek szklanych zmuszało do stosowania procesów oczyszczania (szkło jako materiał daje się łatwo oczyścić); wyniki z tych procesów wskaźniki starzenia się są małe w porównaniu z najlepszymi, uzyskiwanymi w konwencjonalnych oprawkach metalowych.

W oprawkach natryskiwanych na zimno o konstrukcji pozwalającej na wygrzewanie w wysokiej temperaturze przed uszczelnieniem uzyskujemy najmniejsze współczynniki starzenia. Rysunek 5 przedstawia osiągnięcia ostatnich lat łącznie z wynikami uzyskanymi w poszczególnych przypadkach przy wprowadzeniu getterów.

Zgodnie z ostatnimi wynikami badań, starzenie się rezonatorów z kwarcami o cięciach grubościowych spowodowane jest głównie czterema procesami: 1) zjawiskiem przyrostu temperatury utrzymującym się w ciągu kilku minut do kilku godzin po zakończeniu termicznym; 2) zjawiskiem rozkładu naprężenia w funkcji poprzedzających zjawisk termicznych, trwającym od trzech dni do trzech miesięcy; 3) zjawiskiem zmiany masy, wywołanym przez zysk lub stratę masy przez powierzchnię płytki krystalicznej, a najczęściej wywołanym pochłanianiem powierzchniowym lub uwolnieniem gazów, trwającym kilka tygodni do kilku lat i 4) zmianą strukturalną kwarcu, wywołaną niedoskonałością siatki krystalicznej. Są to także zjawiska długo-

terminowe. Mogą one być wywołane zmianą gęstości spowodowaną ujściem nadmiaru gazu z powierzchni kryształu. Charakterystyka częstotliwościowo-czasowa precyzyjnych rezonatorów kwarcowych wydaje się podzielona na dwie różne części: 1) właściwy okres stabilizacji, w którym mogą wystąpić zmiany częstotliwości $1 \cdot 10^{-8}$ w ciągu jednego do pięciu tygodni i 2) okres znacznie wolniejszych zmian, w których całkowita zmiana częstotliwości może być rzędu 1 do $3 \cdot 10^{-10}$ na miesiąc. Wykazano eksperymentalnie, że zjawiska pochłaniania powierzchniowego i wydalania pozostałych gazów oraz relaksacje temperatury wywołujące siły mogą kompensować w pewnych granicach procesy starzenia.

Krótkoterminowe zmiany częstotliwości są także spowodowane bądź pochłanianiem powierzchniowym i wydalaniem gazów, bądź naprężeniami powstałymi między kryształem i jego elektrodami. Rysunek 6 pokazuje skutki odłączenia grzejnika i przerwania pracy rezonatora kwarcowego na okres trzech dni. Jak można spostrzec, skutki powrotu po przerwie do stanu regulacji temperatury lub skutki włączenia zasilania po przerwie mogą być w znacznym stopniu osłabione przez zastosowanie próżniowej konstrukcji oprawki płytki kwarcowej i zastosowanie wyżej opisanych, spawanych na zimno oprawek. Konstrukcja wsporcza rezonatora kwarcowego w metalowej obudowie pozwala na zastosowanie stopów wiążących w wysokiej temperaturze w przeciwieństwie do rezonatorów w oprawkach szklanych, tak że kompletny rezonator może być odpompowany na pompie olejowej, a następnie spawany na zimno w próżni. To wpływa

na mniejsze zanieczyszczenia i naprężenia w konstrukcji związanych ze skróceniem właściwego czasu ustabilizowania. Rysunek 7 przedstawia skutki małych, nagłych zmian temperatury dla rezonatorów z polem prostopadłym i równoległym. Chwilowe odchylenie częstotliwości spowodowane nagłą zmianą temperatury o 1°C maleje o ponad jeden rząd w rezonatorze o polu równoległym, ze względu prawdopodobnie na to, że nie występuje wspólna powierzchnia pomiędzy czynną częścią kryształu a elektrodą, ponieważ środek wibratora jest wolny od powłoki metalowej.

Ostatnie zainicjowane badania wpływu następujących czynników na starzenie się płytek kwarcowych: zanieczyszczeń kwarcu, sprawdzenie roli zjawiska pochłaniania lub uwalniania gazów i naprężeń powodowanych zmianami termicznymi, tzn. przedsięwzięto wytwarzanie rezonatorów kwarcowych, których zmiany częstotliwości w czasie są mniejsze od kilku części na 10^{11} . Badania rozróżnienia wpływów termicznych i masy przeprowadzono z trzema wibratorami kwarcowymi w zwykłej obudowie próżniowej.

Wyniki badań potwierdziły rolę zanieczyszczeń, szczególnie jonów alkalicznych. Wodór może być przyczyną krótkotrwałych niestabilności, ponieważ w obecności tego gazu zapis częstotliwości wykazywał zwiększenie zakresu zmian częstotliwości z $1,5 \cdot 10^{-10}$ do $12 \cdot 10^{-10}$. Obecność tlenku węgla także wpływa na stałość częstotliwości. Ten wpływ może być zmniejszony przez zastosowanie rezonatora o polu równoległym.

Krótkoterminowe fluktuacje częstotliwości o czasie

próbkowania 1 s lub krótszym spowodowane są w zasadzie wyłącznie przez oscylator i zostaną przedyskutowane w rozdz. 4.

3.3. Naprężenia, wibracje, przyspieszenia

Dodatkowe wymagania występują w przypadkach, gdy rezonator musi utrzymywać swą stałość częstotliwości przy oddziaływaniu wibracji i przyspieszeń.

O ile rezonanse własne konstrukcji rezonatora będą znajdować się powyżej częstotliwości wibracji mechanicznych, to będzie można uniknąć pogorszenia stałości częstotliwości, wywołanego tymi wibracjami mechanicznymi. Wykazano w przypadku rezonatora kwarcowego 100 MHz, że szerokość pasma pomierzona w zakresie X może być zredukowana z 2400 Hz dla rezonatora zmontowanego w standardowej, metalowej oprawce HC-18 do 70 Hz w przypadku rezonatora zmontowanego na taśmach i zamkniętego w oprawce tranzystorowej T0-5, spawanej na zimno.

Czułość na statyczne przyspieszenia jest bardziej trudna do pokonania. Eksperymenty dokonane z pomocą centryfugi wykazały, że jest możliwe zaprojektowanie i wykonanie rezonatorów kwarcowych, które posiadają przyspieszeniowy współczynnik częstotliwości rzędu 10^{-10} /g w jednym uprzywilejowanym kierunku. Dla sił przyspieszających przyłożonych we wszystkich kierunkach, uzyskiwana stałość częstotliwości wynosi ok. 10^{-9} /g. Zbadano eksperymentalnie i teoretycznie zachowanie się wibrujących płytek kwarcowych pod wpływem różnego rodzaju zewnętrznych

sił i naprężeń. Wyniki są raczej skomplikowane i przeciwstawne, podobnie jak dociągania teoretyczne. W szczególności trudno jest raczej rozdzielić różne rodzaje naprężeń, z wyjątkiem sił rozciągających. W tym przypadku udowodniono, że zmiana częstotliwości jest zawsze liniowo zależna od sił rozciągających. W przypadku kombinacji pól sił rozciągających odchylenie częstotliwości wywołane przez nakładanie się pól jest równe sumie algebraicznej odchyień częstotliwości wywołanych przez pola składowe. Na rysunku 8 podano przykład z wielu wybranych pomiarów.

Wskazuje on także, że zmiana częstotliwości zależy nie tylko od wartości i kierunku siły, ale także od punktu przyłożenia. Siły rozciągające i ściskające także wpływają na zmiany w zależności od azymutu kąta mierzonego od cięcia AT wibratora i były stosowane do uzyskania kompensacji zmian częstotliwości wskutek zmian temperatury.

3.4. Poziom wzbudzania

Innym zakłócającym efektem jest zależność częstotliwości rezonatora od amplitudy wibracji, proporcjonalna do prądu kwarcu. Dwie typowe krzywe przedstawione na rys. 9. Zamiast amplitudy lub prądu odłożono na osi odciętej ich kwadraty, które są proporcjonalne do mocy wydzielonej w kwarcu. Dolna część krzywej poczynająca się od 10 μW do 1 mW przebiega liniowo w zależności od mocy i wyjaśniana jest jako wywołana gradientem termicznym

między obszarami wibrującymi i peryferiami płytki kwarcowej. Zaleca się, aby bardzo precyzyjny rezonator pracował przy możliwie najniższym poziomie wzbudzenia. Zmiany prądu kwarcu (lub amplitudy drgań) w kwarcach 5 i 2,5 MHz przy pracy na 5-tej harmonicznej zmieniają także przebieg starzenia. Wzrost prądu z $75 \mu\text{A}$ o jeden rząd zmienia miesięcznie starzenie z $1 \cdot 10^{-10}$ do $1,5 \cdot 10^{-9}$.

4. BARDZO PRECYZYJNE OSCYLATORY KWARCOWE

4.1. Oscylatory z kompensacją temperaturową

Ponieważ temperatura jest najbardziej poważnym czynnikiem ograniczającym stałość oscylatorów, w praktyce rezonatory kwarcowe pracują zwykle w termostatach o regulowanej temperaturze. Ostatnio rozwiązano układy z kompensacją temperatury z zastosowaniem stałych termistorów. Są trzy określone zalety kompensacji temperaturowej. Potrzebna jest bardzo mała moc, bądź wcale nie jest ona potrzebna, starzenie rezonatorów nie uwydatnia się, ponieważ znajdują się one zawsze w temperaturze otoczenia i nie jest potrzebny czas do podgrzania. Rysunek 10 przedstawia prosty układ kompensacji. Dla przykładu możliwe jest zmniejszenie odchylenia częstotliwości rezonatora "owertonowego" 30 MHz cięcia AT do $1 \cdot 10^{-6}$ w zakresie temperatur od -30 do $+60^\circ\text{C}$. W bardziej wyszukanych rozwiązaniach układów osiągane są wartości $1 \cdot 10^{-7}$ w zakresie temperatur od -30 do $+50^\circ\text{C}$ przy 3 MHz. Przy tak wysokiej precyzji kompensacji nie jest możliwa standaryzacja układów kompensacji, lecz pożądana jest indywi-

dualna synteza obliczeniowa. Oczywiście dla bardzo precyzyjnych zastosowań wymagane jest dodatkowe zastosowanie termostatu o regulowanej temperaturze. Jednakże termostat taki będzie miał raczej prostą konstrukcję.

4.2. Precyzyjne oscylatory w surowych warunkach otoczenia

Źródła o stabilnej częstotliwości poddawane silnym wstrząsom i wibracjom, jak to ma miejsce w raketach i pojazdach kosmicznych, przedstawiają zupełnie inne zagadnienie. Utrzymywanie fazy i czystości spektralnej mają pierwszorzędne znaczenie. Wszystkie części składowe tych oscylatorów powinny być przystosowane do przeciwstawienia się narzuconym surowym warunkom zewnętrznym, a szczególnie uwagę należy zwrócić na montaż. W przypadku rezonatorów kwarcowych rozwiązanie problemu jest kompromisowe. Dla najwyższej stabilności, wibrator powinien być utrzymywany w warunkach bez naprężeń, lecz te warunki otoczenia wymagają umiarkowanie sztywnej konstrukcji podtrzymującej. Oddziaływanie sił przyspieszających (g) jest przenoszone na wibrator, w wyniku czego następuje przesunięcie częstotliwości. Także sztywność podtrzymującej konstrukcji ulega odprężeniu w czasie, przyczyniając się do większego wpływu starzenia. Z różnych rozwiązań rezonatorów w.c.z. wibrator o konstrukcji wsporczej z potrójną wstążką w obudowie tranzystorowej T0-5 uznano za najbardziej odpowiedni. Przy częstotliwościach 10 MHz i wyższych, stabilność jest rzędu $1 \cdot 10^{-10}$ na g , o ile często-

tliwości udarów i wibracji są mniejsze niż częstotliwość rezonansu mechanicznego konstrukcji montażowej wibratora kwarcowego.

Wartości odchyień częstotliwości i wpływu starzenia zależą także od wartości częstotliwości, np. niestaość $1 \cdot 10^{-10}$ na dobę przy częstotliwości 10 MHz wzrasta do wartości $1 \cdot 10^{-8}$ na dobę przy częstotliwości 150 MHz. Pomiar krótkookresowej niestaości częstotliwości źródła sterowanego kwarcem w zakresie X poddanego warunkom zewnętrznym wibracji wykazują, że udział spowodowany oscylatorem może być zredukowany do poziomu sygnału innych zakłócających źródeł, o ile w rezonatorze kwarcowym zastosowano montaż wstążkowy ze spawaniem na zimno.

4.3. Oscylatory najwyższej precyzji

Jeśli chcemy uzyskać najwyższą stałość i najmniejsze odchylenia częstotliwości, należy zastosować najbardziej precyzyjne rezonatory kwarcowe, zwracając szczególną uwagę na rozwiązanie obwodu oscylatora. Rysunek 11 przedstawia niezbędne urządzenia kontrolno-sterujące, które jako typowe stosowane są obecnie w precyzyjnych oscylatorach. Nie tylko należy utrzymywać stałą temperaturę rezonatora, lecz także nie może występować gradient temperatury w płytce kwarcowej. Dlatego stosuje się podwójny termostat z odpowiednimi termoregulatorami. W pewnych przypadkach obwód oscylatora jest umieszczony w zewnętrznym termostacie, aby utrzymywać w stałej temperaturze części składowe obwodu. Jak już

wspomniano poprzednio, jednym z czynników stabilizacji rezonatora kwarcowego jest utrzymywanie stałej amplitudy drgań: stąd stosowanie we wzmacniaczu bardzo silnego sprzężenia zwrotnego, jak również automatycznej regulacji wzmocnienia. Ze względu na postęp dokonany w układach regulacji temperatury i w rozwoju obwodów, jak również ze względu na bardzo słabe sprzężenie zapewnione w rozwiązaniach rezonatorów 2,5 i 5 MHz (owertonowych na 5-tej harmonicznej), własności precyzyjnych oscylatorów są określone przez własności zastosowanych w nich rezonatorów. Obecnie stosowane typy szklanych opraw próżniowych, po okresie stabilizacji od jednego do trzech miesięcy, wykazują wybitnie małe starzenie, tzn. małe odchylenia częstotliwości. Oscylatory, w których zastosowano rezonatory 2,5 MHz do stabilizacji częstotliwości nadajników marynarki Stanów Zjednoczonych w zakresie bardzo długich fal, jak również w obserwatoriach marynarki Stanów Zjednoczonych wykazują przeciętne dobowe odchylenie rzędu kilku 10^{-13} , z prawdopodobnym przeciętnym dobowym odchyleniem częstotliwości oscylatora tego typu rzędu 10^{-11} . Po trzech tygodniach pracy, starzenie jest mniejsze od $1 \cdot 10^{-9}$ na tydzień. Powyższe dane uzyskano w optymalnych warunkach otoczenia i w warunkach pracy ciągłej. Typowa wstępna stałość i odchylenie częstotliwości po 180 dniach pracy przedstawione są na rys. 12. Jak już wspomniano wyżej, po okresie ciągłej pracy chwilowe wyłączenie oscylatora lub termostatu spowoduje zmianę częstotliwości i jest konieczny okres nowej stabilizacji częstotliwości.

To zjawisko jest zmienne dla poszczególnych rezonatorów, lecz przeciętne zmiany są tego rodzaju jak przedstawiono już wyżej na rys. 6. O ile rezonatory owertonowe cięcia AT są zamontowane w spawanych na zimno obudowach tranzystorowych na podtrzymujących wstążkach, to należy zwrócić uwagę na poprawę materiału wpływającą na stałość oscylatora, a w szczególności na doświadczenia z wyłączeniem termostatu. Potrzeba ok. 5 godzin dla ustalenia się temperatury, a przy końcu tego okresu częstotliwość różni się o mniej niż $1 \cdot 10^{-9}$ od częstotliwości przed wyłączeniem termostatu. Porównanie z wynikami przedstawionymi na rys. 6 wskazuje na korzyści z zastosowania wysokiej próżni i szerokie możliwości tego rodzaju rozwiązania. Przy zastosowaniu tego rodzaju rezonatorów kwarcowych należy oczekiwać poprawy stałości precyzyjnych oscylatorów sterowanych kwarcem o jeden lub dwa rzędy.

4.4. Stałość krótkoterminowa

Spotykane w praktyce oscylatory okazują się trzema rodzajami źródeł szumów związanych z fluktuacjami częstotliwości:

- 1) szумы termiczne i śrutowe w samym oscylatorze, które aktualnie zakłócają oscylację;
- 2) dodatkowe szумы towarzyszące pomocniczym obwodom, które nie zakłócają oscylacji, lecz jedynie dodają się do sygnału;

3) fluktuacje częstotliwości oscylatora, spowodowane bądź przez rezonator bądź przez zmianę parametrów obwodów układu.

Rysunek 13 przedstawia różne przeliczone składniki fluktuacji częstotliwości oscylatora jako funkcje próbek czasu τ . Jak można spostrzec, szumy wewnętrzne oscylatora zmieniają się proporcjonalnie do $\frac{1}{\sqrt{\tau}}$ dla małych i dużych czasów integracji. Przy przejściu szumów $\frac{1}{\sqrt{\tau}}$ od wyższego do niższego poziomu nachylenie zmienia się proporcjonalnie do $\frac{1}{\tau}$. Udział drugiego składnika zmienia się proporcjonalnie do $\frac{1}{\tau}$ i zależy od własności filtra wyjściowego. Jeżeli skuteczny współczynnik dobroci filtra nie jest bardzo duży, to ten drugi składnik stanowi dominantę oddziaływującą na krótkoterminową stałość oscylatora. Fluktuacje częstotliwości powodowane przez wspomniane powyżej źródło posiada spektralną gęstość mocy $\frac{1}{f}$. Zawily mechanizm prawdopodobnie różni się w rozmaitych oscylatorach i zależy od typu rezonatora kwarcowego i zastosowanego układu. Pomiarzy bardzo precyzyjnego oscylatora 5 MHz sterowanego kwarcem wykazały, w bardzo dobrej zgodności z teorią, linearny wzrost stabilności ze wzrostem próbkowanego czasu, mianowicie od $2 \cdot 10^{-9}$ dla 1 ms do $3 \cdot 10^{-12}$ dla 1 s. Podobne wyniki uzyskano ostatnio w rezonatorach kwarcowych w oprawkach spawanych na zimno i stranzystorowanych oscylatorach, a mianowicie stałość $1 \cdot 10^{-11}$ dla 1 s, $3 \cdot 10^{-12}$ dla 10 s i $1,5 \cdot 10^{-12}$ dla 100 s próbkowanego czasu.

Rysunek 14 przedstawia szumy fazowe 5 MHz precyzyjnego oscylatora w odniesieniu do szerokości pasma 1 Hz w

zakresie 100 Hz do 5 kHz. Należy zauważyć, że szумы są o ok. 8 dB niższe dla tranzystora płaszczyznowego (2N 3823) niż dla krzemowego planarnego tranzystora (2N 2222), stosowanych w oscylatorze i stopniach wzmacniających. Szумы fazowe podczas wibracji są tylko nieznacznie wyższe niż w stanie spokojnym. Ważność zagadnienia krótkoterminowej stałości poświadczona jest wielką liczbą artykułów, omawiających to zagadnienie, m.in. w materiałach z sympozjum stałości częstotliwości i specjalnego wydania Proc. IEEE odnoszącego się do stałości częstotliwości.

W końcu można stwierdzić, że o ile współczynnik droboci rezonatora jest najbardziej istotny do poprawienia stałości częstotliwości z uwzględnieniem przypadkowych zmian parametrów układu, to krótkoterminowa stałość oscylatora jest bezpośrednio określona tylko przez Q rezonatora, gdy dodatkowe składniki szumów są zadowalająco wytłumione przez wąskopasmowe filtry w stopniu wyjściowym.

5. WNIOSKI

Osiągalna obecnie średnia wartość odchylenia częstotliwości precyzyjnych wzorców kwarcowych jest dla bardzo wielu aktualnych zastosowań zupełnie zadowalająca. Wyższe wymagania odnośnie wartości odchylenia częstotliwości mogą być spełnione przez zastosowanie atomowych i molekularnych wzorców częstotliwości lub przez kalibrację w zakresie bardzo małych częstotliwości, wobec czego

poprawienie charakterystyk niestalości częstotliwości bardzo precyzyjnych oscylatorów kwarcowych nie ma pierwszorzędno znaczenia na przyszłość.

Natomiast istnieje nadal potrzeba rozwoju procesów kontroli zabezpieczających powtarzalność bardzo stabilnych rezonatorów kwarcowych o krótkich okresach ustalania się częstotliwości. Możliwości wykonania takich rezonatorów zostały potwierdzone i obecnie należy oczekiwać znacznego postępu w ich produkcji na skalę przemysłową.

Ponieważ istnieje potrzeba rozwoju precyzyjnej stabilizacji częstotliwości w zakresie fal metrowych, w szczególności w surowych warunkach zewnętrznych, wiele jeszcze trzeba dokonać, aby spełnić wymagania o pierwszorzędnym znaczeniu, jakimi są czystość widma i koherentność fazy.

Ulepszenia te mogą wyniknąć z całkowicie nowego podejścia do rozwiązań i możliwości zastosowania materiałów innych niż kwarc. Ulepszenia w zakresie czystości widma mogą być osiągnięte przez zastosowanie materiałów, które mogą pracować przy dużych amplitudach. Wyższe częstotliwości można otrzymać przez zastosowanie wyższych harmoniczných (owertonów) materiałów ze zwiększonymi współczynnikami sprzężenia piezoelektrycznego.

WYKAZ LITERATURY

1. Gerber E.A., Sykes R.A.: State of the art-quartz crystal units and oscillators. Proc. IEEE, 1966, t. 54, nr 2, s. 103-116.

2. Sykes R.S., Smith W.L., Spencer W.J.: Performance of precision quartz-crystal controlled frequency generators. IRE Trans. on Instrumentation 1962, t.I-11, nr 3-4, s. 243-247.
3. - , Studies on high precision resonators. Proc 17th Annual Symp. on Frequency Control 1963, s. 4-27.
4. Byrne R.J., Reynolds R.L.: Design and performance of a new series of cold welded crystal unit enclosure. Proc. 18th Annual Symp. on Frequency Control 1964, s. 166-180.
5. Bommel H.E., Mason W.P., Warner A.W., Jr: Disclosure, relaxations and anelasticity of crystal quartz. Phys. Rev. 1956, t. 102, April, s. 64-71.
6. Mason W.P.: Developments in ultrasonics. Proc. 18th Annual Symp. on Frequency Control, 1964, s. 12-42.
7. King J.C.: The anelasticity of natural and synthetic quartz at low temperatures. Bell Syst. Techn. J. 1959, t. 38, nr 2, s. 573-602.
8. Fraser D.B.: Anelastic effects of alkali ions in crystalline quartz. J. Appl. Phys. 1964, t. 35, nr 10, s. 2913-2918.
9. Stevels J.M., Volger J.: Futher experimental investigations on the dielectric losses of quartz crystals in relation to their imperfections. Philips Res.Rept. 1962, t. 17, nr 3, s. 283-314.

10. King J.C., Ballman A.A., Laudise R.A.: Improvement of the mechanical Q of quartz by the addition of impurities to the growth solution. Phys. Chem. Solids 1962, t. 23, czerwiec s. 1019-1025.
11. King J.C. Dislocation and impurity-induced defects in quartz. Proc. 13th Annual Symp. on Frequency Control, 1959, s. 1-16.
12. Ballman A.A., Laudise R.A., Rudd D.W.: Synthetic quartz with a mechanical Q equivalent to natural quartz. Appl. Phys. Lett., 1966, t. 8, nr 2, s. 53-54.
13. Stevels J.M., Volger J.: Impurity-induced imperfections and the dielectric properties of quartz crystals. Phys. Chem. Glasses (GB), 1963, t. 4, nr 6, s. 247-252.
14. Dodd D.M., Fraser D.B.: The 3000-3900 cm^{-1} absorption bands and anelasticity in crystalline α -quartz. J. Phys. Chem. Solids, 1965, t. 26, nr 4, s. 673-686.
15. Sawyer B.: Pilot plant production of cultured quartz. Sawyer Research Products Inc., Eastlake, Ohio final rept. under Contract DA36-039-sc-81245, 1961, Styczeń.
16. Seed A.: High Q BT-type, quartz oscillator. J.Sci. Instr. (GB) 1964, t. 41, nr 4, s. 242.
17. Seed A.: Development of a high Q, BT-cut resonator. Brit. J. Appl. Phys. 1965, t. 16, nr 9, s. 1341-1346.
18. Mindlin R.D.: Thickness-shear and flexural vibra-

- tions of crystal plates. J. Appl. Phys. 1951, t.22, nr 3, s. 316-323.
19. Mindlin R.D., Gazis D.C.: Strong resonances of rectangular AT-cut quartz plates. Proc. 4th U.S. Nat'l Congress Appl. Mech., 1962, s. 305-310.
 20. Mindlin R.D., Lee P.C.Y.: Thickness-shear and flexural vibrations of partially plated crystal plates. Dept. of Civil Engrg and Engrg Mechanics, Columbia University. New-York, N.Y., Tech. Rept 2 under Contract DA36-039 AMC-00065 /E/ czerwiec 1965.
 21. Mindlin R.D., Spencer W.J. to be published.
 22. Shockley W., Curran D.R., Koneval D.J.: Energy trapping and related studies of multiple electrode filter crystals. Proc 17th Annual Symp. on Frequency Control, 1963, s. 88-126.
 23. Mortley W.S.: Priority in energy trapping. Physics Today, 1966, t. 19, nr 12, s. 11-12.
 24. Curran D.R., Coneval D.J.: Factors in the design of VHF filters crystals. Proc. 19th Annual Symp. on Frequency Control, 1965, s. 213-286.
 25. Curran D.R., Coneval D.J.: Energy trapping and the design of single and multielectrode filter crystals. Proc. 18th Annual Symp. on Frequency Control 1964, s. 93-119.
 26. Bechmann R., Lukaszek T.J., Wasshausen H.: Improve

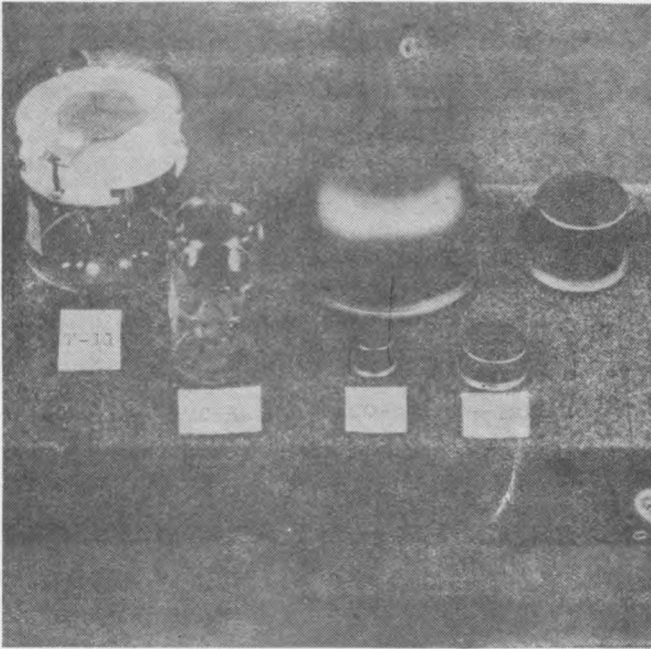
- ments in HF and VHF quartz filter crystals. Proc. IEEE (Correspondence), 1965, t. 53, nr 8, s. 1160-1161.
27. Koga I.: Radio-frequency vibration of rectangular AT-cut quartz plates. J. Appl. Phys. 1963, t. 34, nr 8, s. 2357-2365; Union Radio Scientifique Internationale, XIVth General Assembly, 1963, t. XIII-1, s. 36-39.
28. Sauerbrey G.: Messung von Plattenschwingungen sehr kleiner Amplitude durch Lichtstrommodulation. Z. Phys. (Germany), 1964, t. 178, nr 4, s. 457-471.
29. Spencer W.J.: Modes in circular AT quartz plates. IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics. 1965, t. SU-12, nr 3, s. 1-5.
30. Young R.A., Bennett A.L., Hicklin W.H., Meaders J.C., Wagner C.E.: Special X-ray studies of quartz frequency control units. Proc. 19th Annual Symp. on Frequency Control, 1965, s. 23-41.
31. Spencer W.J., Haruta K.: Defects in synthetic quartz. J. Appl. Phys. 1966, t. 37, nr 2, s. 549-553.
32. Greenham A.C., Isherwood B.J., Wallace C.A.: A study of vibrations in quartz crystals using X-ray diffraction topography. Brit. J. Appl. Phys. 1965, t. 16, nr 11, s. 1759-1761.
33. Haruta K., Spencer W.J.: Strain in thin metal films on quartz. J. Appl. Phys. 1966, t. 37, nr 5, s. 2232-2233.

34. Haruta K., Spencer W.J.: X-ray diffraction studies of vibrational modes. Proc. 20th Annual Symp. on Frequency Control, 1966, s. 1-13.
35. Bechmann R.: Excitation of piezoelectric plates by use of a parallel field with particular reference to thickness modes of quartz. Proc. IRE 1960, t.48, nr 7, s. 1278-1280.
36. Ianouchevsky W.: High Q crystal units. Proc. 17th Annual Symp. on Frequency Control, 1963, s.233-247.
37. Warner A.W.: Use of parallel-field excitation in the design of quartz crystal units. Proc. 17th Annual Symp. on Frequency Control, 1963, s. 248-266.
38. Groys O.Sh.: Aging of quartz. Radiotekhnika i Elektronika (USSR), 1963, t. 8, nr 9, s. 1630-1632. For English translation, see Radio Engrg. and Electronic Phys. (USSR) 1963, t. 8, nr 9, s. 1552-1555.
39. Armstrong J.H., Blomster P.R., Hokanson J.L.: Aging characteristics of quartz crystal resonators. Proc. 20th Annual Symp. on Frequency Control, 1966, s. 192-207.
40. Warner A.W., Fraser D.B., Stockbridge C.D.: Fundamental studies of aging in quartz resonators. IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics, 1965, t. SU-12, s. 52-59, czerwiec.
41. Leeson D.B., Johnson G.F.: Short-term stability for a Doppler radar: requirements, measurements and techniques. Proc. IEEE, 1966, t. 54, nr 2, s. 244-248.

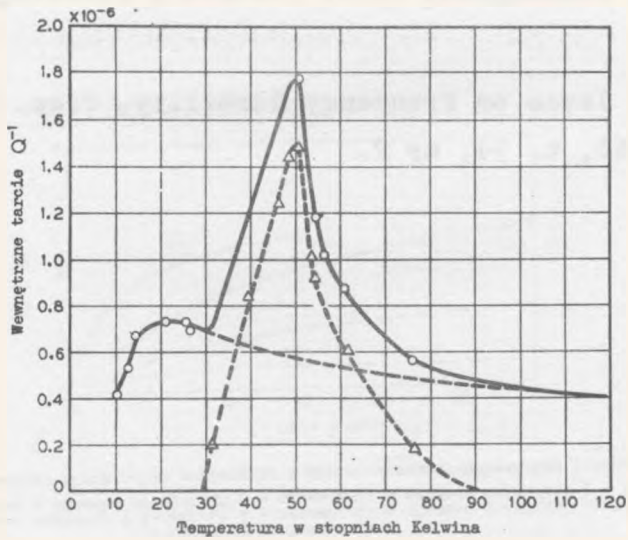
42. Spencer W.J., Smith W.L.: Precision crystal frequency standards. Proc. 15th Annual Symp. on Frequency Control 1961, s. 139-155.
43. Mingins C.R., Barcus L.C., Perry R.W.: Effects of external forces on vibrating crystal plates. Lowell Technological Institute Research Foundation. Contract DA36-039 AMC-02239 (E), Final Rept. 1963, May 1, to 1965, April 30.
44. Mingins C.R., Perry R.W., Barcus L.C.: Transient reactions to stress changes in vibrating crystals plates. Proc. 20th Annual Symp. on Frequency Control 1966, s. 50-69.
45. Gerber E.A., Miles M.H.: Reduction of the frequency-temperature shift of piezoelectric resonators by mechanical stress. Proc. IRE, 1961, t. 49, nr 11, s. 1650-1654.
46. Ratajski J.M.: The force sensitivity of AT-cut quartz crystal. Proc. 20th Annual Symp. on Frequency Control. 1966. s. 33-49.
47. Hammond D.L., Adams C., Cutler L.: Precision crystal units. Proc. 17th Annual Symp. on Frequency Control, 1963, s. 215-232.
48. Karolus A. and D. Aus dem Bruch.: On the aging of harmonic quartz crystals of 2 and 2,5 MHz (in German). Z. Instrumentekunde 1964, t. 72, s. 229-232, sierpień.

49. Schodowski S.: Aging of temperature-compensated crystal oscillators. Proc. IEEE (Letters) 1966, t. 54, nr 5, s. 808-809.
50. Newell D.E., Hinnah H., Bangert R.: Advances in crystal oscillator and resonator compensation. Proc. 18th Annual Symp. on Frequency Control 1964, s. 487-534.
51. Bangert R., Hinnah H., Newell D.E.: Recent developments in crystal oscillator temperature compensation. Proc. 19th Annual Symp. on Frequency Control, 1965, s. 617-641.
52. Buck J.R., Healey D.J.: Short term frequency stability measurement of crystal controlled X-band source. Proc. IEEE-NASA Symp. on Short-Term Frequency Stability. Washington D.C.: U.S. Gov't Printing Office, 1964, s. 201-209.
53. Dvornikow E.V., Mavrin E.A., Morkovin N.V.: A high-stability transistorized crystal oscillator. Pri-bory i Tekhn. Eksperim. (USSR), nr 4, July-August 1963. For English translation see Instr. Exper. Tech. (USSR), July-August 1963, s. 672-674.
54. Baxandall P.J.: Transistor crystal oscillators and the design of a 1-mc/s oscillator circuit capable of good frequency stability. Radio Electronic Engrg (GB), 1965, t. 29, nr 4, s. 229-246.
55. Cutler L.S., Searle C.L.: Some aspects of the theory

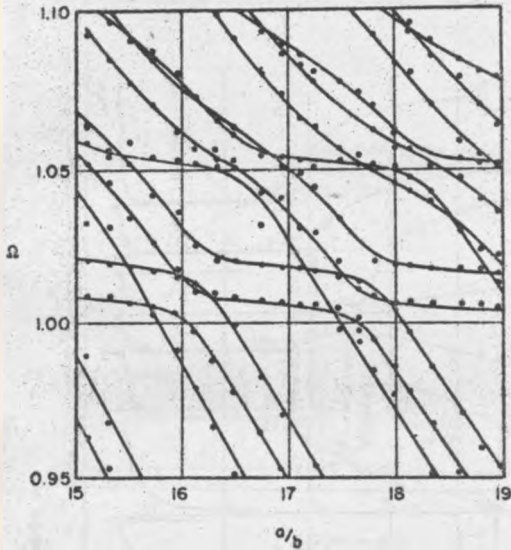
- and measurement of frequency fluctuations in frequency standards. Proc. IEEE, 1966, t. 54, nr 2, s. 136-154.
56. Hafner E.: The effects of noise in oscillators. Proc. IEEE, 1966, t. 54, nr 2, s. 179-198.
57. Edson W.R.: Progress and problems in short term stability. Proc. 19th Annual Symp. on Frequency Control, 1965, s. 43-48.
58. Pustarfi H.S.: An improved 5 MHz reference oscillator for time and frequency standard applications. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, grudzień 1966, t. IM-15, s. 196-202.
59. Proc. IEEE-NASA Symp. on Short-Term Frequency Stability. Washington, D.C.: U.S.Gov't Printing Office, 1964.
60. Special Issue on Frequency Stability. Proc. IEEE, luty 1966, t. 54, nr 2.



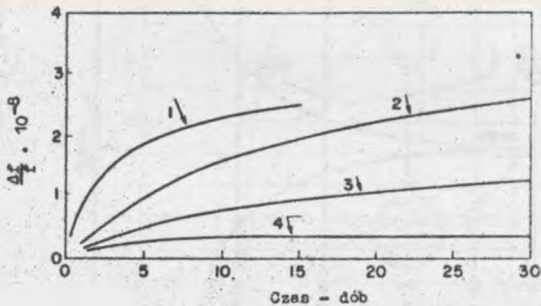
Rys. 1. Oprawki rezonatorów kwarcowych



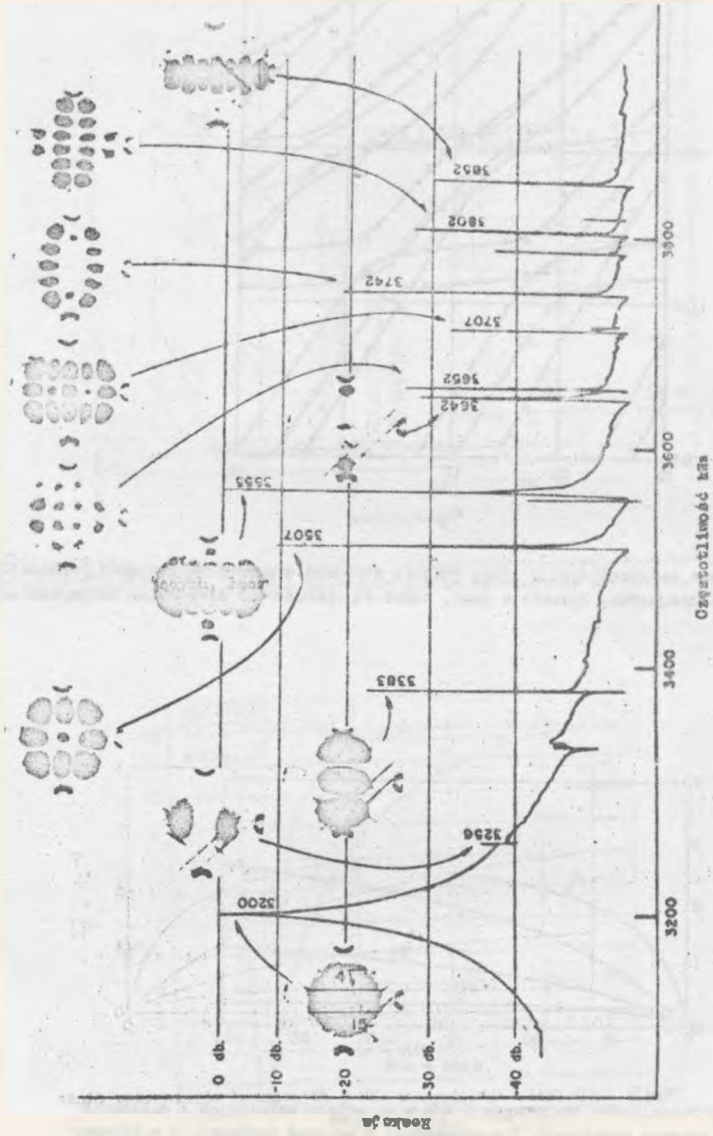
Rys. 2. Straty na tarcie w kwarcu; krzywa ciągła przedstawia zmierzone tarcie wewnętrzne składające się z relaksacji strat szczytowych i tłowych /krzywe przerywane/



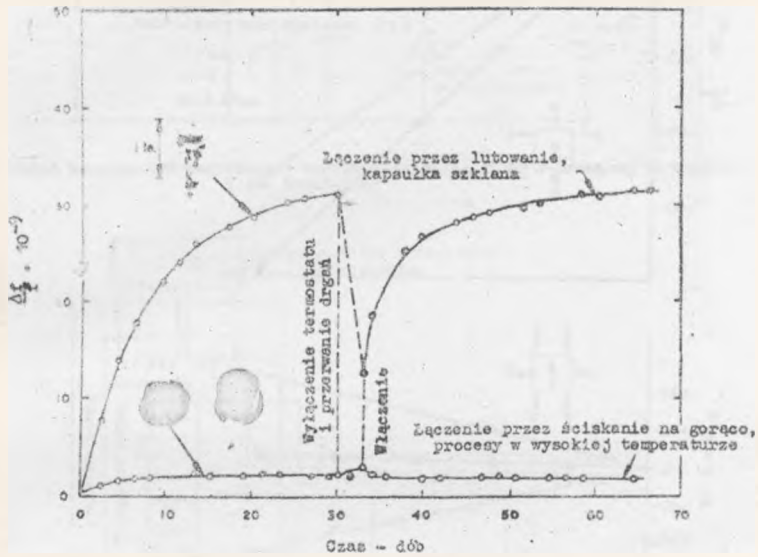
Rys. 3. Normalizowana częstotliwość Q jako funkcja stosunku długości do grubości $\frac{l}{b}$ rodzajów drga giębiowych i ścinających, łącznie z tymi, które są spowodowane skręcaniem trójwymiarowym



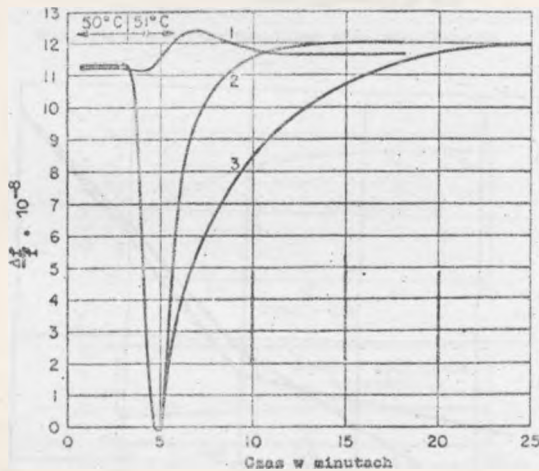
Rys. 5. Starzenie rezonatorów kwarcowych 5 MHz w oprawkach metalowych i szklanych
 1 - rezonatory w oprawce metalowej, 2 - rezonatory w oprawce szklanej, 3 - rezonatory w oprawce szklanej z getterem, 4 - rezonatory w oprawce metalowej nasyconej w wysokiej temperaturze



Rys. 4. Charakterystyki i rozkład cięń w rezonatorze kwarcowym 3,2 MHz



Rys. 6. Zmiana częstotliwości precyzyjnych rezonatorów kwarcowych spowodowana przez przerwanie drgań płytki kwarcowej i przerwanie pracy grzejnika



Rys. 7. Zmiana częstotliwości rezonatora kwarcowego z polem równoległym i prostopadłym, wywołana zmianą temperatury o 1°C

1,5 MHz $n = 1$, pole równoległe 2,5 MHz $n = 1$, pole prostopadłe
 3,5 MHz $n = 3$, pole prostopadłe

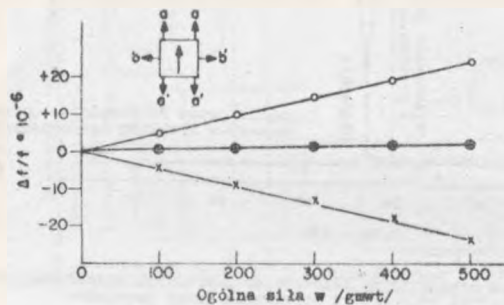
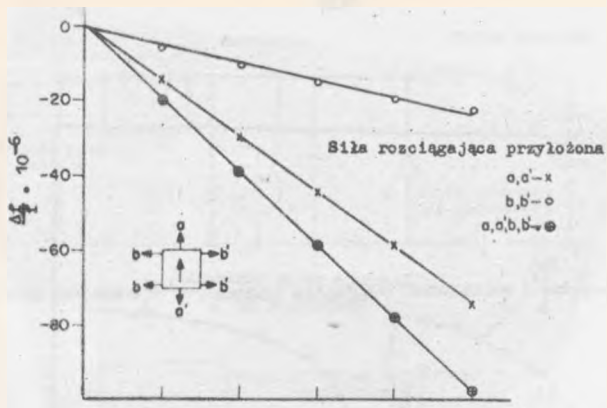


Fig. 8. Zmiana częstotliwości rezonatorów sieci AR o częstotliwości 8 MHz wywołana zewnętrzny siłami rozciągającymi. Kwadraty przedstawiają płytki kwarcowe; strzałki wewnątrz kwadratów wskazują kierunek osi X, strzałki na zewnątrz wskazują zastosowanie sił rozciągających

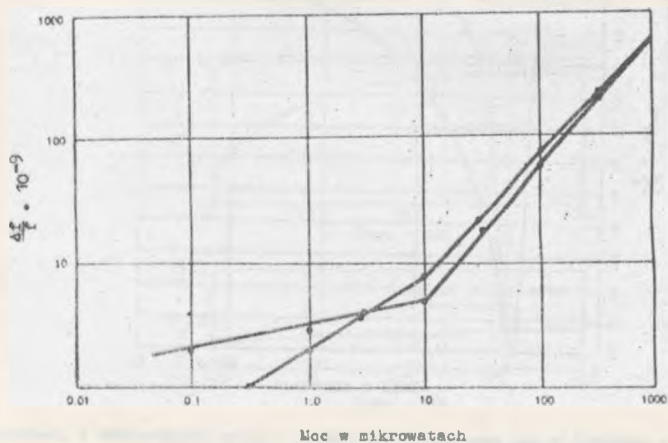
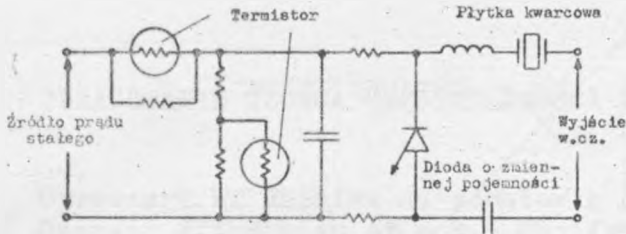
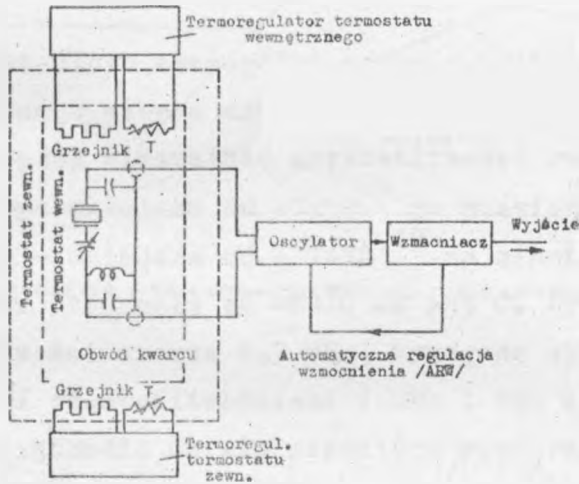


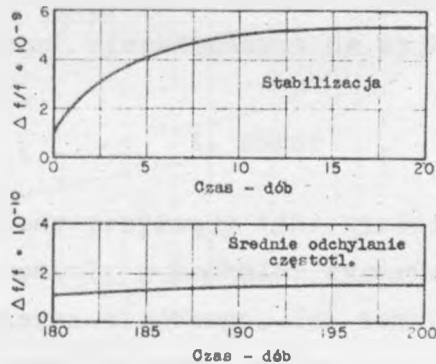
Fig. 9. Zmiana częstotliwości swiązana z wydaleniem mocy w dwóch typowych rezonatorach kwarcowych 2,5 MHz



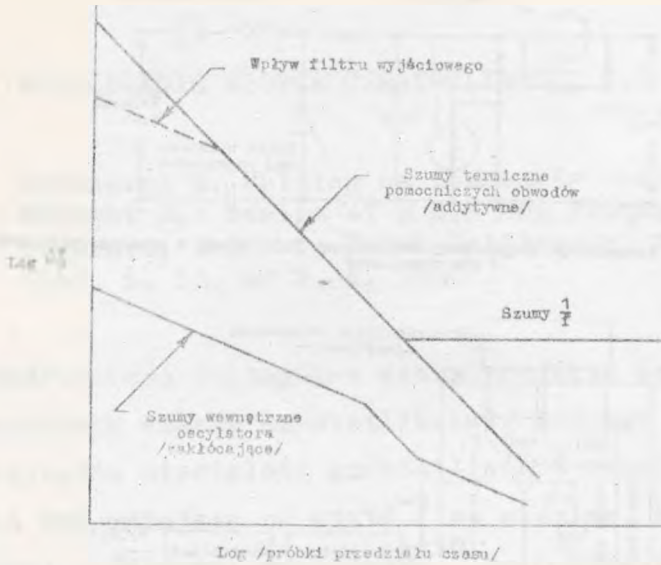
Rys. 10. Układ kompensacji temperatury zawierający jedną diodę o zmiennej pojemności i dwa termistory



Rys. 11. Precyzyjny oscylator sterowany kwarcem

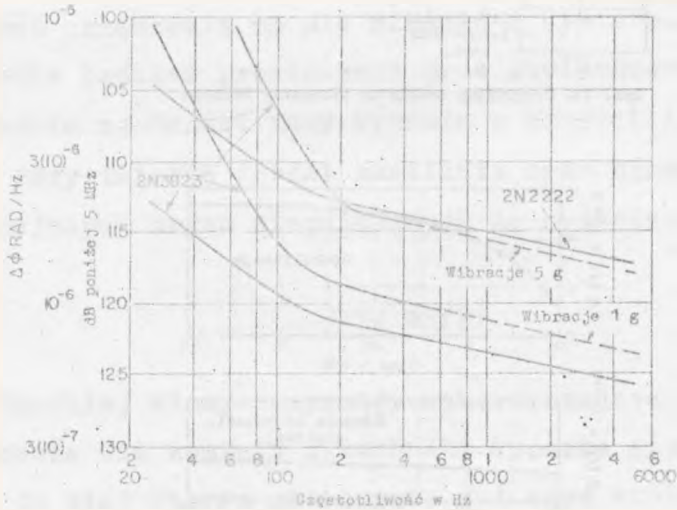


Rys. 12. Początkowy okres stabilizacji i odchylenia częstotliwości precyzyjnych oscylatorów 2,5 MHz



Rys. 13. Stabilność krótkoterminowa oscylatorów sterowanych kwarcem jako funkcja próbek przedziałów czasu

Rys. 14.



Rys. 14. Wzrost szumów na wyjściu oscylatora odniesiona do pewnej częstotliwości o szerokości 1 Hz

OPRACOWANIE WZORCA CZĘSTOTLIWOŚCI 2,5 MHz

Opracował H. Helbing na podstawie artykułu:
Dowsett J.: Design of a 2,5 MHz Frequency
Standard. Point to Point Telecommunications,
1968, t. 12, nr 1, s. 38-50.

Przedstawiono szczególne cechy projektu wysokiej klasy kwarcowego wzorca częstotliwości, którego długoterminowa względna niestalość częstotliwości wywołana starzeniem ma być mniejsza od $+1 \times 10^{-9}$ na miesiąc, zaś krótkoterminowa - mniejsza od $\pm 1 \times 10^{-10}$ na minutę w zakresie temperatur otoczenia od -20°C do $+55^{\circ}\text{C}$. Prócz głównej częstotliwości wzorca 2,5 MHz, wymagane są wyjścia z wzorcowymi częstotliwościami 1 MHz i 100 kHz z tym, że całość urządzenia ma się mieścić w wymiarach 19"x7"x11". Ponadto podczas prowadzenia prac stwierdzono potrzebę uzyskania zgodności fazy sygnału o częstotliwości wzorcowej przy zmianie źródeł zasilania oraz ograniczenia występujących drgań niepożądanych na wyjściach wzorca.

1. WSTĘP

Wysokiej klasy przyrządy wykorzystujące rezonatory kwarcowe nie zostały z techniki wyparte mimo wprowadzenia do niej wzorca atomowego. Już sama krótkoterminowa duża stałość częstotliwości rezonatorów kwarcowych zapewnia im jeszcze dłuższy okres praktycznego stosowania.

Ten artykuł dotyczy szczególnych, interesujących zagadnień, które napotkano przy opracowaniu źródła częstotliwości wzorcowej z wykorzystaniem rezonatora kwarcowego. Będący w dyspozycji wzorzec atomowy okazał się bardzo przydatny, jako absolutny sprawdzian częstotliwości do pomiarów kontrolnych, niezbędnych podczas prowadzenia prac rozwojowych nad wzorcem kwarcowym.

Poza wyborem kwarcu, którego względna niestalość częstotliwości wywołana starzeniem byłaby mniejsza od $+ 1 \times 10^{-9}$ na miesiąc, wyłoniła się jeszcze ważna kwestia odpowiedniego systemu regulacji temperatur i czułego wykrywania ich różnic. W obecnym stanie techniki do omawianego rodzaju zastosowań praktycznych termistor okazał się na właściwszym elementem.

Potrzeby uzyskania małego poziomu wysterowania kwarcu i jak najmniejszej komplikacji układu oscylatora doprowadziły do rozwiązania różniącego się od dotychczasowych. Usunięcie cewek indukcyjnych z układu oscylatora uważa się szczególnie za poprawę rozwiązania.

Wpływ starzenia kwarcu na stałość częstotliwości wymaga ciągłości zasilania wzorca w energię elektryczną. Konieczność korzystania w nagłych przypadkach z awaryjnego źródła energii elektrycznej wyłoniła dodatkowy problem, związany z potrzebą usunięcia wpływu dzielników częstotliwości na zgodność fazy sygnału wzorcowego przy zmianie źródeł zasilania w energię elektryczną.

Ponadto zwrócono uwagę na czystość widmową sygnałów wyjściowych wzorca, zaś problem krótkoterminowych pomiarów nie został jeszcze w pełni rozwiązany.

2. CECHY PROJEKTU

2.1. Rezonator kwarcowy

Od rezonatora kwarcowego wymaga się, by prócz małego stopnia starzenia miał trwałe mechaniczne zamocowanie, znaczną przekładnię pojemności i dużą wartość Q . Podatność dostrojczya rezonatora kwarcowego powinna pokrywać tolerancje jego produkcji rzędu $\pm 5 \times 10^{-7}$ oraz wpływu starzenia w ciągu co najmniej dziesięciu lat. Dodatkowym wymaganiem jest względnie prosty układ elektryczny oscylatora.

Tylko niektóre typy rezonatorów kwarcowych cechuje mały stopień starzenia. Pod tym względem najodpowiedniejszymi rezonatorami są kolejno: typu drgań piątej górnej częstotliwości 5 MHz i typu BT drgań o powyższej częstotliwości podstawowej.

Szereg z przytoczonych wymagań jest współzależnych i najlepszym do praktycznego zastosowania okazał się rezonator kwarcowy typu drgań piątej górnej częstotliwości 2,5 MHz. Rezonator ten ma niezbędną trwałość zamocowania, chociaż ujemną stroną jest to, że jego masa jest raczej duża i dokładność ustawienia w temperaturze pobocznej punktu z zerowym współczynnikiem temperatury nie może być lepsza od $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Parametry elektryczne typowego rezonatora kwarcowego są następujące:

$$L = 19,5 \text{ H}$$

$$C_0 = 4,2 \text{ pF}$$

$$C_1 = 0,00031 \text{ pF}$$

$$Q = 5,3 \cdot 10^6$$

$$R = 58 \Omega$$

$$r = \frac{C_0}{C_1} \approx 20000$$

2.2. Temperatura pracy

Z punktu widzenia własności kwarcu temperatura jego pracy powinna odpowiadać średniej temperaturze otoczenia w miejscu instalacji. Ta zasada wynika z dwóch powodów: z wymagań uzyskania jak najmniejszego stopnia starzenia kwarcu, gdyż stopień ten (tj. wartość niestabilności częstotliwości w określonym czasie jest wprost proporcjonalny do temperatury jego pracy, oraz z potrzeby zredukowania do minimum udarów cieplnych, które mają wpływ zarówno na częstotliwość, jak i na stopień starzenia rezonatora kwarcowego.

Oba powyższe, poważne argumenty przemawiające za pracą wzorca w "temperaturze pokojowej" nie nadają się jednak jeszcze do praktycznego wykorzystania. Gdy zapadła decyzja nie stosowania się ściśle do wyżej podanej zasady, powstała potrzeba określenia użytecznego marginesu ponad temperaturę otoczenia. Zatrzymano się na temperaturze 75°C . Tę cyfrę należy uzupełnić zakresem $\pm 5^{\circ}\text{C}$, przeznaczonym do dokładnego dobrania temperatury, przy której występuje minimum częstotliwości rezonatora kwarcowego dla punktu z zerowym współczynnikiem temperatury. Powyższe dotyczy pierwszej komory termostatu, w któ-

rej znajduje się kwarc. Komora druga, zewnętrzna ma temperaturę o 7°C niższą od pierwszej.

Wybór 75°C na temperaturę roboczą kwarcu jest dobrym przykładem rodzaju kompromisu, jaki muszą stosować projektanci, szczególnie wtedy, gdy występują komercyjne (ekonomiczne) powiązania. Mocne argumenty, przemawiające za wyborem 25°C jako roboczej temperatury rezonatorów kwarcowych, będą bez wątpienia triumfowały w przyszłych urządzeniach generujących drgania.

Na rysunku 1^{x)} przedstawiono wykresy zmian częstotliwości w zależności od temperatury szeregu rezonatorów kwarcowych z punktami o zerowym współczynniku temperatury, występującymi między 45°C a 105°C . W praktyce doborem kąta cięcia i innych zmiennych kwarcu można uzyskać minimum częstotliwości drgań przy 75°C z tolerancją $\pm 5^{\circ}\text{C}$. W rezultacie projektant ściśle dopasowuje temperaturę komory termostatu w granicach $70 \pm 80^{\circ}\text{C}$ do punktu z zerowym współczynnikiem temperatury aktualnie pracującego rezonatora kwarcowego. W tych warunkach wartość współczynnika temperatury wynosi około 3×10^{-8} na 1°C i do uzyskania wymaganej stałości częstotliwości wahań temperatury w komorze mieszczącej rezonator kwarcowy powinny być ograniczone do $0,01^{\circ}\text{C}$.

^{x)} Wszystkie rysunki są zamieszczone na końcu artykułu.

2.3. System regulacji temperatury

Wyżej podane rozważania dowodzą ważności zadań systemów regulacji temperatury w stabilizacji częstotliwości rezonatorów kwarcowych. Systemy regulacji temperatury można podzielić na trzy typy, przeznaczone do różnych zastosowań w zależności od stopnia rozbudowania urządzeń regulacji - małego, średniego lub dużego. W typie pierwszym, elementy oscylatora nie są termicznie kontrolowane z wyjątkiem tych, które tworzą rezonator umieszczony w komorze termostatu. W typie średnim elementy oscylatora są w pewnej mierze pod kontrolą termiczną, a czułe na zmianę temperatury elementy są częściowo odizolowane od wpływów zewnętrznych. System termostatu o dwóch komorach jest natomiast właściwym rozwiązaniem stabilizacji termicznej urządzeń najwyższej klasy. Trudno jest podać dokładne cyfry charakteryzujące poszczególne systemy, lecz stosunek między skutecznością termicznej stabilizacji częstotliwości trzech podanych typów zastosowań jest rzędu 10^{-6} , 10^{-7} i 10^{-9} .

Szczególnie kłopotliwy okazał się wybór elementu służącego do kontroli temperatury. Chociaż uszczelniony szkłem termistor jest dostatecznie czuły na zmianę temperatury i ma małe wymiary, to jednak brakowało potrzebnych danych o jego długotrwałym zachowaniu się przy obciążeniu 1 mW w temperaturze 75°C . W związku z powyższym zbadano 22 termistory wybranego typu, poddając je trzydziestookresowej serii cyklicznych zmian temperatury od

-70 do + 150°C. Uzyskano wyniki zachęcające i podtrzymujące poprzednie doświadczenia z podobnym typem termostatu, mieszczącym rezonator kwarcowy 5 MHz o cięciu E^m z gwarantowaną długoterminową stabilnością częstotliwości 5×10^{-8} . W rozwiązaniu zdecydowano zastosować układ mostkowy prądu zmiennego ze wzmacniaczem. Powyższa metoda unika ryzyka przesunięć charakterystyki U_{BE} tranzystora, wpływających na punkt pracy, co może się zdarzyć w układzie z prądem stałym. Zastosowano ciągłą regulację prądu grzejnego.

2.4. Układ oscylatora

Duży stosunek pojemności rezonatora kwarcowego zezwala na stosowanie względnie prostego układu oscylatora. Dzięki dopasowaniu oporności wejściowej oscylatora do impedancji rezonatora kwarcowego dla piątej, górnej częstotliwości drgań można było pozbyć się cewek indukcyjnych w układzie. Normalnie cewki te są potrzebne do zapobieżenia tendencji rezonatora kwarcowego do drgań typu o mniejszej częstotliwości niż projektowany.

Odpowiednia wartość pojemności obciążenia oscylatora jest bliska 32 pF. Wchodzą tutaj w grę różne względy, jak stabilność i podatność dostrojczy rezonatora kwarcowego, która powinna pokrywać tolerancję jego produkcji rzędu $\pm 5 \times 10^{-7}$. Przewidziany został dokładny sposób dostrojenia ze zwinnością rozdzielczą wyrażającą się w częściach 10^{-11} , przez zmianę za pomocą diody "Varactor" pojemności jednego z kondensatorów układu Colpittsa.

Ważną cechą opracowania jest osiągnięcie poziomu wysterowania rezonatora kwarcowego mniejszego od $0,5 \mu\text{W}$. Potrzebę tak niskiego poziomu wysterowania wyjaśnia rysunek 2. W poprzednich opracowaniach ten parametr był osiągany za pomocą zmiany napięcia bazy tranzystora podtrzymującego drgania. Z wielu względów, szczególnie nielinearności, ten sposób nie dawał zadowalających rezultatów, wobec czego w tym opracowaniu zastosowano automatyczną regulację poziomu napięcia zasilającego.

2.5. Częstotliwości wyjściowe i ich powiązanie z częstotliwością rezonatora kwarcowego

Częstotliwość $2,5 \text{ MHz}$ ma tę zaletę, że zezwala na zbliżenie dobroci Q rezonatora kwarcowego do wartości teoretycznie osiągalnej. Jednak $2,5 \text{ MHz}$ nie jest dogodną wartością do tworzenia z niej częstotliwości wyjściowych 1 MHz i 100 kHz . Z dwóch sposobów postępowania, najpierw powielania, a potem dzielenia częstotliwości lub vice versa, wybrano ten drugi sposób jako prowadzący do mniejszych częstotliwości, przy których krotność dzielnika jest mniejsza. Zastosowano więc układ dzielenia częstotliwości $2,5 \text{ MHz}$ przez 5, a następnie układ mnożenia uzyskanych 500 kHz przez dwa, aby osiągnąć wymaganą częstotliwość 1 MHz na wyjściu. Częstotliwość 100 kHz na wyjściu uzyskiwana jest za pomocą dodatkowego układu dzielenia 500 kHz przez 5.

2.6. Metoda dzielenia częstotliwości

Zostały wzięte pod uwagę i praktycznie wypróbowane trzy następujące metody dzielenia częstotliwości: dzielnika schodkowego w układzie synchronizowanego multiwibratora, dzielnika w układzie regeneracyjnym i dzielnika w układzie przeliczeniowym. Na wybór metody pierwszej, tj. dzielnika schodkowego miały przede wszystkim wpływ - prostota rozwiązania i pewne uprzednio nabyte doświadczenie z tego rodzaju zasadą pracy układów.

2.7. Ciągłość zasilania

Producenci sprzętu wyposażonego w pracujący w temperaturze bliskiej 75°C rezonator kwarcowy zwykle podają w wykazie parametrów warunki nie przerywanej pracy urządzenia w ciągu trzech miesięcy. Powyższy warunek wynika przede wszystkim z tego, że rezonator kwarcowy po ponownym włączeniu zasilania ma mniejszą częstotliwość drgań i starzeje się szybciej. To zjawisko występuje wyraźnie w początkowym okresie pracy każdego rezonatora kwarcowego. Ma ono również związek z dużą masą rezonatora, taką na przykład, jaką posiada użyty w tym opracowaniu kwarc. Wyjaśnia to zasada, która głosi, że stopień starzenia rezonatora kwarcowego jest wprost proporcjonalny do temperatury jego pracy.

W związku z powyższym zdecydowano użyć do zasilania baterię ogniw o pojemności zapewniającej sześciogodzinny okres pracy wzorca, chociaż były sugestie zastosowa-

nia do tego celu baterii o mniejszej pojemności. Przeprowadzone próby z akumulatorem niklowo-kadmowym o uzupełnianym stanie naładowania prądem z sieci zasilającej dały zadowalające wyniki, o ile nie następowało całkowite wyladowanie baterii. Typowe urządzenie, jakim jest równolegle do każdego ogniwa włączona dioda, zapobiega zmianie polaryzacji ogniw i wydaje się dostatecznym zabezpieczeniem przed eksplozją, która mogłaby się wydarzyć w szczególnych przypadkach niewłaściwej konserwacji i eksploatacji ogniw.

3. REALIZACJA PROJEKTU

3.1. Generator sygnału wzorcowego 2,5 MHz

Stoły, mniejszy od 0,5 μW poziom wysterowania rezonatora kwarcowego jest nieodzownym warunkiem uzyskania małego długoterminowego stopnia starzenia (tj. małej długoterminowej niestalości częstotliwości). Tak niski poziom drgań wymaga jednak znacznego wzmocnienia, dając w rezultacie mniejszy stosunek sygnał/szum niż pożądaný. Zmniejszenie stosunku sygnał/szum prowadzi w ostatecznym wyniku do zwiększenia krótkoterminowych przesunięć częstotliwości, $\Delta f/f$, dla krótkich okresów, mniejszych od 10 sekund.

Układ generatora sygnału, jak to widać ze schematu ideowego, przedstawionego na rys. 3 ma prostą, aperiodyczną budowę z kondensatorem o stosunkowo dużej pojemności w gałęzi sprzężenia zwrotnego. Stabilną pracę na

piątej, górnej częstotliwości drgań rezonatora kwarcowego zapewnia wzajemne dopasowanie impedancji układów oscylatora i rezonatora przy częstotliwości 2,5 MHz, o czym była już wzmianka w rozdz. 2.4. Dokładną regulację częstotliwości uzyskuje się za pomocą diody "Varactor", włączonej do układu między masę a kolektor, równoległe do kondensatora będącego częścią składową oscylatora w typowym układzie Colpittsa. Zmiany pojemności diody "Varactor", wywołane zmianą doprowadzanego do niej za pośrednictwem spiralnego potencjometru napięcia prądu stałego są wystarczające, aby pokryć zakres $2,5 \times 10^{-8}$ dokładnego strojenia.

Istotny w stabilizacji częstotliwości niski poziom wysterowania rezonatora kwarcowego jest osiągnięty przez zmianę wartości napięcia zasilającego tranzystor VT1 w układzie automatycznej kontroli poziomu za pomocą sprzężenia zwrotnego. Wyjście 2,5 MHz (rys. 3) jest zasilane w drgania drogą od kolektora w tranzystorze VT1 układu oscylatora, poprzez połączenie galwaniczne z bazą tranzystora VT2, pracującego w układzie wtórnika emiterowego (analogia do wtórnika katodowego) i następnie poprzez układ 3-stopniowego wzmacniacza na tranzystorach VT3, VT5 i VT6. Tranzystor VT4 pracuje w układzie regulatora prądu stałego, którego działanie polega na tym, że prąd stały pobierany przez układ ze źródła zasilania jest proporcjonalny do poziomu drgań rezonatora kwarcowego. W tym celu prądy zasilające układ regulacyjny i tranzystor VT1 przepływają przez wspólny opornik, w którym powstaje spadek napięcia odpowiednio regulujący wartość na-

pięcia zasilającego tranzystor-oscylator VT1. Układy regulatora prądu stałego i wzmacniacza na tranzystorach VT5 - VT6 z kondensatorem sprzęgającym o bardzo małej pojemności są podłączone równolegle do kolektora w tranzystorze VT3 układu wzmacniacza buforowego.

3.2. Termostat

Termostat ma dwie komory. W komorze pierwszej, wewnętrznej znajdują się: rezonator kwarcowy, oscylator na tranzystorze VT1 i stopnie wzmacniaczy buforowych w temperaturze ściśle utrzymywanej i dopasowanej do punktu z zerowym współczynnikiem temperatury rezonatora kwarcowego.

W komorze drugiej, zewnętrznej mieści się komora pierwsza termostatu, układy kontroli temperatury obu komór oraz spiralny potencjometr. O tym, że w komorze drugiej utrzymywana jest temperatura o 7°C niższa niż w komorze pierwszej była już mowa w rozdz. 2.2. Taką różnicę temperatur pokrywają urządzenia grzejne komory pierwszej, wykorzystując do tego celu połowę rozporządzalnej mocy.

Temperatura każdej komory jest oddzielnie kontrolowana za pomocą termistora, wchodzącego w skład układu mostkowego z samowzbudnym generatorem prądu zmiennego. W celu uniknięcia możliwych sprzężeń praca mostka wewnętrznej komory odbywa się na częstotliwości 26 kHz, zaś mostka komory zewnętrznej na częstotliwości 10 kHz. Każdy generator samowzbudny steruje przydzielony mu układ re-

gulatora prądu stałego, który za pośrednictwem wzmacniacza prądu stałego dozuje energię elektryczną, dostarczaną do grzejnika komory.

3.3. Dzielenie częstotliwości i filtracja drgań wyjściowych

Do zestawu wzorca wchodzi jako oddzielny człon dzielnik częstotliwości. Ma on trzy wyjścia z drganiami o dużej czystości widmowej wzorcowych częstotliwości 2,5 MHz, 1 MHz i 100 kHz, z których każde jest o skutecznym napięciu 1 V na oporności 50Ω . Dzielenie częstotliwości wykonywane jest metodą dzielnika schodkowego, do wyjścia którego jest podłączony układ prostego, pasmowo-przepustowego filtra kwarcowego ze wzmacniaczem, zgodnie z przedstawionym na rys. 4 schematem blokowym układu.

Podłączony do wyjścia generatora wąskopasmowy filtr kwarcowy 2,5 MHz o szerokości przepuszczanego pasma 300 Hz obniża poziom szumów o 40 dB. Następnym organem układu po filtrze jest stopień buforowy w postaci wtórnik emiterowego zakończony wzmacniaczem wyjściowym z drugim filtrem 2,5 MHz o szerokości przepuszczanego pasma 1 kHz. Filtr ten daje dalszą poprawę stosunku sygnał/szum na wyjściu 2,5 MHz.

Częstotliwość wyjściowa drgań 2,5 MHz jest dzielona przez pięć za pomocą dzielnika schodkowego, a uzyskana tą operacją częstotliwość impulsów 500 kHz pobudza do drgań obwód rezonansowy wzmacniacza o dwukrotnie większej częstotliwości, tj. 1 MHz. Drgania o częstotliwo-

ści 1 MHz są następnie przepuszczane przez pasmowy filtr kwarcowy i wzmacniane w wyjściowym wzmacniaczu 1 MHz.

Częstotliwość drgań 500 kHz jest również dzielona przez pięć za pomocą dzielnika schodkowego, a uzyskana częstotliwość impulsów 100 kHz pobudza do drgań obwód rezonansowy wzmacniacza tej samej częstotliwości. Drgania o częstotliwości 100 kHz są następnie przepuszczane przez pasmowy filtr kwarcowy i wzmacniane w wyjściowym wzmacniaczu 100 kHz.

3.4. Źródła zasilania energią elektryczną

Do zestawu wzorca wchodzi jako dwa oddzielne człony: zasilacz sieciowy o typowym rozwiązaniu konstrukcyjnym i bateria ogniów z urządzeniem do ich ładowania, która pozwala na pracę wzorca i utrzymanie wszystkich jego parametrów w ciągu około sześciu godzin, zależnie od temperatury otoczenia. Specjalną cechą urządzeń zasilających jest ich przystosowanie do nieprzerywania pracy wzorca podczas zabiegów konserwacji urządzeń zasilania sieciowego, choć w tym czasie nie wszystkie parametry wzorca mogą być dotrzymane. W przypadku przerwy w dopływie energii elektrycznej z sieci następuje automatyczne przełączenie zasilania na bateryjne o takim samym napięciu 27 V, jakie dostarczał uprzednio zasilacz sieciowy. Próby wykazały możliwość utrzymania prawidłowej częstotliwości i fazy sygnału wzorcowego podczas zmiany źródeł zasilania w jednym lub drugim kierunku.

4. ZAGADNIENIA OCENY OPRACOWANIA

4.1. Pomiar częstotliwości

W badaniach długie- i krótkoterminowej stałości częstotliwości wzorca występują zagadnienia, które wymagają stosowania dwóch różnych metod pomiarowych. Użycie wzorca atomowego zamiast dotychczasowej metody wzajemnego porównania, usunęło poprzednie trudności i umożliwiło dokładny, dzień po dniu pomiar tempa przesunięć częstotliwości. Tym sposobem wyniki doświadczalnych zmian w opracowaniu wzorca mogą być szybko oceniane.

Do pomiaru krótkoterminowej stałości częstotliwości wzorzec atomowy natomiast nie wystarcza, gdyż oscylator z rezonatorem kwarcowym może sam zapewnić stałość ($\frac{\Delta f}{f} \approx \pm 1 \times 10^{-11}$) co najmniej tak dobrą, jak wzorzec atomowy. Rysunki 5a) i 5b) przedstawiają wykonane za pomocą mechanicznego rejestratora zapisy na taśmie długie i krótkoterminowych przesunięć częstotliwości laboratoryjnego modelu wzorca. Badania nad krótkoterminowym przesunięciem częstotliwości znajdują się obecnie w takim stadium, że wymagają stosowania statystycznej metody pomiarowej.

4.2. Starzenie się rezonatorów kwarcowych

Oczywiście, każdy projektant sprzętu chciałby mieć do dyspozycji rezonatory kwarcowe, na które nie mają wpływu: czas, temperatura i poziom wysterowania. Jednak

w praktyce, każdy egzemplarz użyty w pracach doświadczalnych jest na ogół stosunkowo niedawnej produkcji. W tym przypadku rezonator kwarcowy ma trwałą budowę, która niestety jeszcze dzisiaj nie pozwala na stosowanie sztucznego przyspieszenia starzenia za pomocą wygrzewania w wysokiej temperaturze. Doświadczenie wskazuje, że tempo przesunięcia częstotliwości, wywołane starzeniem obecnie wytwarzanych rezonatorów kwarcowych, może być mniejsze od 1×10^{-9} na miesiąc, szczególnie wtedy, gdy zostaną one użyte w rok po wyprodukowaniu i po trzymiesięcznym okresie nieprzerwanej pracy w układzie oscylatora. Niektóre rezonatory kwarcowe mogą nawet osiągnąć po tym czasie stałość częstotliwości z tempem przesunięcia wynoszącym 2 lub 3×10^{-10} na miesiąc. Racjonalnymi środkami ostrożności są zabezpieczenia rezonatorów kwarcowych przed wstrząsami zarówno mechanicznymi jak i cieplnymi oraz przechowywanie ich w temperaturze późniejszej pracy. Dotychczas nie można uzyskać fabrycznej gwarancji na mniejsze tempo przesunięć częstotliwości od 1×10^{-10} na miesiąc dla omawianego typu produkcji rezonatorów kwarcowych.

4.3. Zgodność fazy

Potrzeba zachowania zgodności fazy sygnału wzorcowego przy zmianie źródła zasilania wynika z użycia oscylatorów do zadań śledzenia satelitów w odległych okolicach, gdzie mogą występować przerwy w zasilaniu energią elektryczną. Przeprowadzone w podobnych warunkach próby

wykazały początkowo skłonność schodkowego dzielnika częstotliwości do skokowej zmiany krotności. Źródłem tych zakłóceń, jak się okazało, były impulsy, które drogą z sieci zasilającej przedostawały się do dzielnika częstotliwości, wzbudzając tendencję do wcześniejszego odblokowania synchronizowanego multiwibratora. Napotkane trudności zmusiły do prowadzenia obszernych prac nad metodami dzielenia częstotliwości, włącznie z układem dzielnika regeneracyjnego i występującymi w tej metodzie potrzebami redukcji szumów.

Ostatecznie zagadnienie zostało rozwiązane za pomocą ekranowania wejścia zasilania sieciowego oraz uzupełnienia układu wzorca dodatkowymi filtrami na wyjściach generatora 2,5 MHz i dzielników częstotliwości, o których była już wzmianka w rozdz. 3.3.

4.4. Czystość widmowa wyjściowych sygnałów wzorca

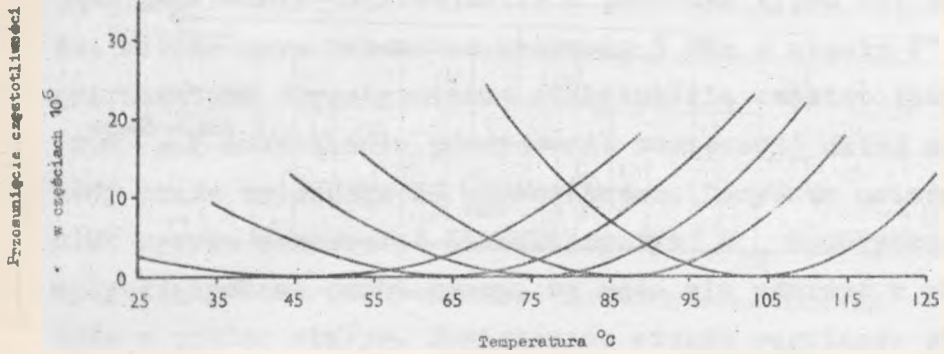
Celowość stosowania filtracji drgań na wyjściach wzorca dla pozbycia się składowych zarówno harmonicznych jak i podharmonicznych została stwierdzona podczas prac nad zagadnieniem zgodności fazy. Rysunek 6 przedstawia wpływ prostego układu środkowoprzepustowego filtra kwarcowego 2,5 MHz na widmo wyjściowego sygnału wzorca 2,5 MHz. Podobny wpływ na widmo wyjściowych sygnałów 1 MHz i 100 kHz mają filtry umieszczone w tych gałęziach wzorca.

5. PORÓWNANIE PARAMETRÓW UZYSKANYCH W PRAKTYCE Z DOCELOWYMI PROJEKTU

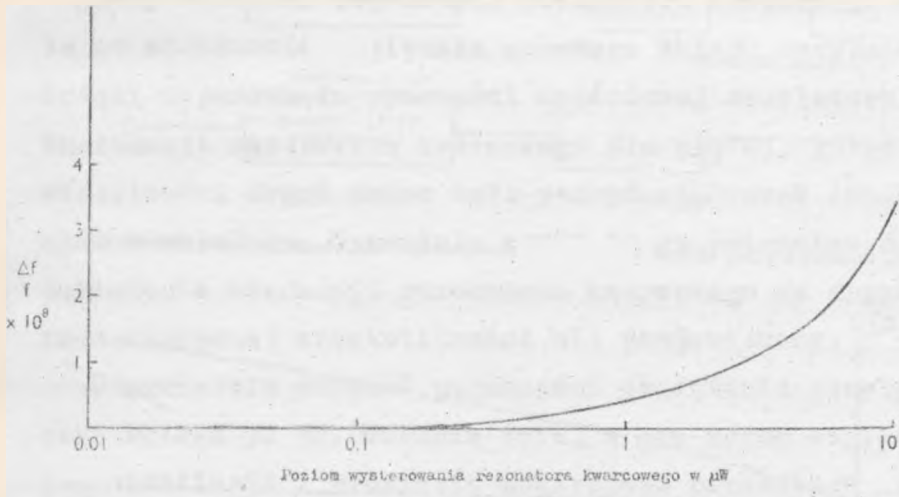
Okazało się możliwe spełnienie pod każdym względem wszystkich docelowych parametrów wzorca, wstępnie określonych w projekcie, napotykając jedynie pewne trudności w utrzymaniu stabilności wzorca w dolnym zakresie temperatur otoczenia - 20°C . Ostatecznie stwierdzono, że tempo względnych przesunięć częstotliwości wzorca o wartości $\pm 3 \times 10^{-10}$ na miesiąc może być utrzymane w całym zakresie temperatur otoczenia od -15°C do $+55^{\circ}\text{C}$.

Potrzeba przystosowania wzorca do wymagań zgodności fazy drgań w czasie zmiany źródła zasilania w energię elektryczną oraz poprawienia czystości widmowej sygnałów wyjściowych stała się widoczna dopiero później.

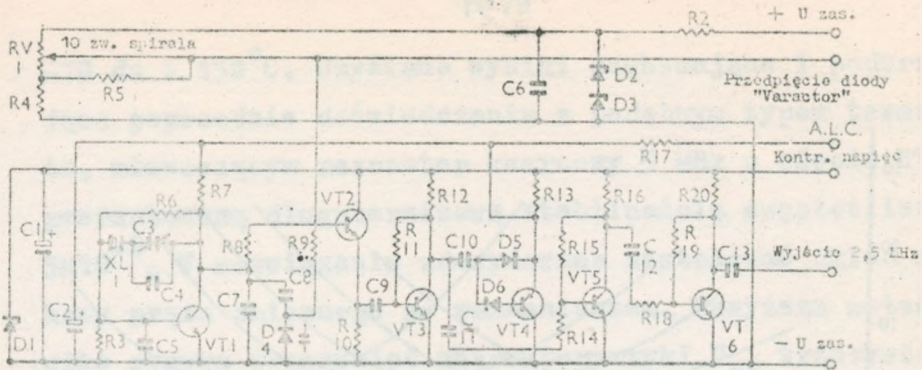
Rysunek 7 przedstawia zestaw wzorca, który dla wygody składa się z czterech członów, a mianowicie: baterii ogniów, zasilacza sieciowego, dzielnika częstotliwości i generatora sygnału wzorcowego $2,5\text{ MHz}$ z rezonatorem kwarcowym. Jeszcze niecałe dziesięć lat temu, wzorzec częstotliwości o podobnych parametrach miał tak duże wymiary, że wymagał sześciostopowego stojaka i był uważany za przyrząd laboratoryjny.



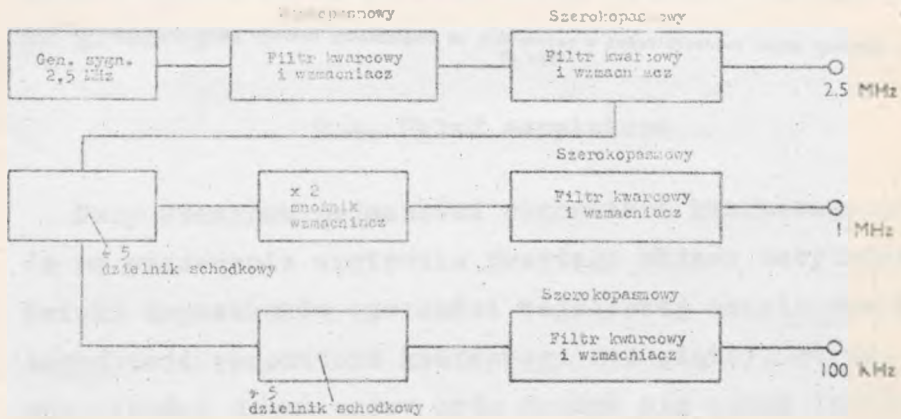
Rys. 1. Wykresy zmian częstotliwości w zależności od temperatury szeregu rezonatorów kwarcowych typu AT



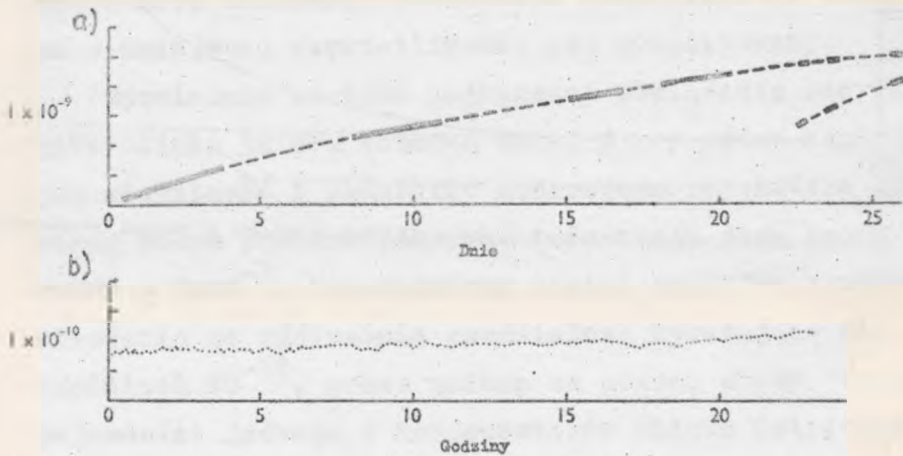
Rys. 2. Zmiany częstotliwości rezonatora kwarcowego 2,5 MHz w zależności od poziomu wysterowania



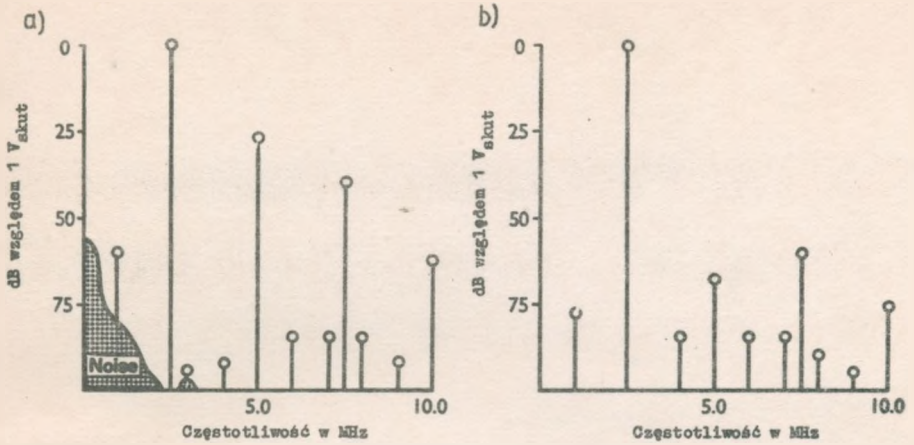
Rys. 3. Schemat ideowy układu generatora wzniku wzorowego 2,5 MHz



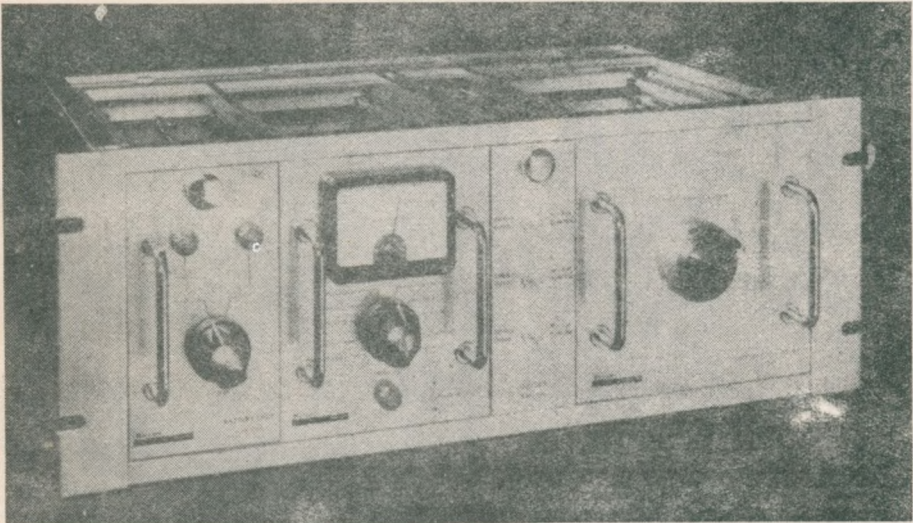
Rys. 4. Schemat blokowy układu dzielenia częstotliwości i filtracji sygnałów wzorowych



Rys. 5. Zapisy: a/ długoterminowych przesunień częstotliwości, wywołanych starzeniem kwarcu, b/ krótkoterminowej niestabilności częstotliwości



Rys. 6. Wpływ układu środkowoprzepustowego filtru 2,5 MHz na widmo sygnału wsorocowego: a/ bez filtru, b/ po dodaniu kwarcowego filtru



Rys. 7. Zestaw wsorca częstotliwości

