

METODY ROZSZERZENIA CYFROWYCH POMIARÓW CZĘSTOTLIWOŚCI NA ZAKRES MIKROFALOWY

KD: 621.317.361.029.6.083.722

Omówiono stosowane obecnie systemy rozszerzenia cyfrowych pomiarów częstotliwości na zakres mikrofalowy.

Podano zasadę działania, zalety i wady oraz wnioski dotyczące przydatności przedstawionych systemów w zakresie mikrofalowym. Przedstawiono wyniki wstępnych prac prowadzonych w Katedrze Urządzeń Radiotechnicznych i Telewizyjnych Politechniki Warszawskiej nad metodą automatycznego dzielenia częstotliwości.

1. W s t ę p

Znane zalety cyfrowo-zliczających pomiarów częstotliwości, jak szybkość, dokładność i możliwość automatyzacji pomiarów stały się przyczyną od dawna prowadzonych prac nad zastosowaniem metod cyfrowych do pomiaru coraz wyższych częstotliwości, aż do zakresu mikrofalowego włącznie.

Maksymalna częstotliwość mierzona bezpośrednio przez częstościomierze zliczające jest ograniczona przez stosowane w nich elementy i układy i przy obecnym stanie techniki wynosi w praktycznych urządzeniach około 100 MHz.

Dlatego prace nad zastosowaniem cyfrowo-zliczających metod pomiaru częstotliwości w zakresie mikrofalowym koncentrują się obecnie na ukła-

dach służących do przetwarzania częstotliwości, leżących w zakresie mikrofalowym, w taki sposób, aby w rezultacie uzyskać częstotliwości leżące w paśmie pomiarowym częstotliwościomierza zliczającego. Poniżej zostaną opisane stosowane obecnie zasadnicze metody służące do realizacji tego celu i odpowiadające im układy, a mianowicie:

- bezpośredni dzielnik częstotliwości /"prescaler"/,
- heterodynowy przemiennik częstotliwości /"frequency converter"/,
- harmoniczny przemiennik częstotliwości /"transfer oscillator"/,
- automatyczny dzielnik częstotliwości.

Ze względu na nieustaloną terminologię, obok w nawiasach podano niektóre odpowiedniki nazw polskich, używane w literaturze angielskiej i amerykańskiej.

2. Bezpośredni dzielnik częstotliwości

W zakresie mikrofalowym nie zna się obecnie sposobów aperiodycznego dzielenia częstotliwości. Dlatego w bezpośrednich dzielnikach częstotliwości stosuje się analogiczne elementy /np. tranzystory i diody tunelowe/ i układy, jak w częstotliwościomierzach zliczających. Wynikają stąd podobne ograniczenia, jak w wypadku częstotliwościomierzy, powodujące, że stosowane obecnie dzielniki pracują w zakresie do około kilkuset MHz.

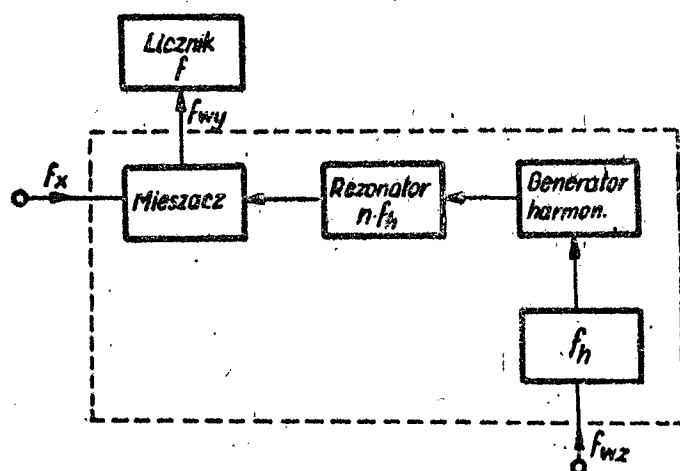
Stosowanie dzielnika częstotliwości na wejściu częstotliwościomierza może powodować zwiększenie błędu pomiaru. Jeżeli bowiem błąd pomiaru częstotliwościomierza zliczającego wynosi $\pm \Delta f_1$, a stosunek podziału mierzonej częstotliwości jest równy N , to błąd pomiaru częstotliwościomierza łącznie z dzielnikiem przy stałym czasie pomiaru wynosi $\pm \Delta f_1 \times N$. Jeżeli jednak jednocześnie z N -krotnym podzieleniem mierzonej częstotliwości zwiększa się N -krotnie czas otwarcia bramki licznika /czyli zostaje N -krotnie zwiększony czas pomiaru/, wówczas zachowana zostaje dokładność pomiaru wyrażona przez błąd licznika $\pm \Delta f_1$, a częstotliwościomierz wskazuje bezpośrednio mierzoną częstotliwość f_x . Takie rozwiązanie pozwala na pełną automatyzację pomiarów.

Bezpośrednie dzielniki częstotliwości są obecnie najwygodniejszym narzędziem rozszerzenia cyfrowych pomiarów częstotliwości do kilkuset MHz. Przykładem tego typu urządzenia może być dzielnik firmy "Hewlett-Packard", typ 5252A, pracujący w zakresie 0÷350 MHz ze współczynnikami podziału częstotliwości 2, 4 oraz 6.

Dla zastosowania cyfrowych metod pomiaru częstotliwości powyżej kilkuset MHz konieczne jest obecnie stosowanie pośrednich metod przetwarzania mierzonych częstotliwości.

3. Heterodynowy przemiennik częstotliwości

Schemat blokowy typowego heterodynowego przemiennika częstotliwości przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Schemat blokowy heterodynowego przemiennika częstotliwości

Zasada pracy heterodynowego przemiennika częstotliwości polega na tym, że sygnał o częstotliwości mierzonej f_x jest mieszany z odpowiednią harmoniczną sygnału heterodyny nf_h . Różnica częstotliwości f_x i nf_h /oznaczona na rys.1 jako f_{wy} / znajduje się w paśmie pomiarowym częstotlicie-
rza zliczającego /licznika f/ i jest mierzona przez częstotlicie-
mierza. Czę-
stotlicie mierzoną f_x zależnie od kierunku przestrajania rezonatora określa się zgodnie z jedną z zależności:

$$f_x = nf_h + f_{wy} \quad \text{gdy} \quad f_{wy} = f_x - nf_h \quad /1/$$

/rezonator przestrajany od dołu/

$$\text{lub} \quad f_x = /n+1/ f_h - f'_{wy} \quad \text{gdy} \quad f'_{wy} = /n+1/ f_h - f_x \quad /2/$$

/rezonator przestrajany od góry/

Sygnał heterodyny o częstotliwości f_h uzyskuje się zwykle przez powielenie częstotliwości wzorcowej częstotłomierza zliczającego. Pożądaną harmoniczną sygnału heterodyny uzyskuje się za pomocą generatora harmonicznych oraz przestrajanego rezonatora.

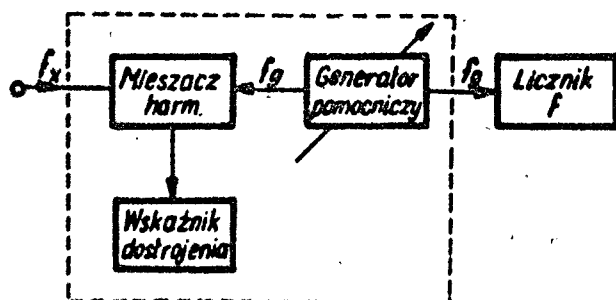
Zasadniczą zaletą heterodynowego przemiennika częstotliwości jest duża dokładność pomiaru częstotliwości, która może być równa dokładności pomiaru częstotłomierza przy odpowiednio dużej dokładności częstotliwości f_h .

Stosowanie heterodynowego przemiennika częstotliwości ma jednak także istotne wady, jak niemożność automatyzacji pomiarów i niejednoznaczność pomiaru, wynikająca z przedstawionych zależności /1/ i /2/ oraz z możliwości harmonicznego mieszania sygnałów o częstotliwościach f_x oraz nf_h .

Zakres pomiarowy heterodynowych przemienników częstotliwości jest ograniczony głównie przez zakres przestrajanania rezonatora wybierającego odpowiednią harmoniczną częstotliwości f_h oraz przez konieczny do uzyskania rząd harmonicznych sygnału o częstotliwości f_h . Stosowane obecnie heterodynowe przemienniki częstotliwości pracują do częstotliwości rzędu kilkunastu GHz. Przykładem urządzenia opisywanego typu może być heterodynowy przemiennik częstotliwości firmy "Hewlett - Packard", typ 5255A, pracujący w zakresie 3 ÷ 12,4 GHz i współpracujący z częstotłomierzem zliczającym o zakresie pomiarowym 0 ÷ 50 MHz.

4. Harmoniczny przemiennik częstotliwości

Schemat blokowy objaśniający zasadę działania harmonicznego przemiennika częstotliwości pokazano na rys.2.



Rys.2. Schemat blokowy harmonicznego przemiennika częstotliwości.

Zasadniczą częścią harmonicznego przemiennika częstotliwości jest przestrajany generator pomocniczy, pracujący w paśmie pomiarowym częstościomierza zliczającego /licznika f /. Generator pomocniczy jest dostrajany do odpowiedniej podharmonicznej częstotliwości mierzonej f_x , a jego częstotliwość f_g jest następnie mierzona przez częstościomierz. Mierzoną częstotliwość f_x określa się zgodnie z zależnością

$$f_x = N f_g$$

/3/

gdzie N jest rzędem harmonicznego częstotliwości f_g .

Pomiar częstotliwości za pomocą harmonicznego przemiennika częstotliwości, w jego najprostszej postaci, jest dość kłopotliwy i związany ze znacznym błędem. Powodują to następujące okoliczności:

1. Ręczne dostrajanie generatora pomocniczego wyklucza automatyzację pomiarów.

2. Błąd licznika $\pm \Delta f_1$ jest wielokrotniony przez współczynnik N /rząd harmonicznego częstotliwości f_g /. Ponadto dodatkowo występuje błąd pomiaru wynikający z krótkoterminowej niestabilności generatora pomocniczego. Stałość częstotliwości tego generatora jest zwykle znacznie gorsza niż stałość częstotliwości wzorcowej licznika.

3. Pewną trudność stanowi określenie rzędu harmonicznego N , który może być wyznaczony przez pomiar częstotliwości generatora pomocniczego f_g dla dwóch sąsiednich dudnień f_x i harmonicznym f_g .

W bardziej rozbudowanych układach harmonicznym przemienników częstotliwości niedogodności te mogą być usunięte przez automatyzację urządzenia. Tak więc może być zautomatyzowane napięciowe lub mechaniczne przestrajanie generatora pomocniczego, a błąd wynikający z krótkoterminowej niestabilności częstotliwości generatora pomocniczego może być usunięty przez fazową regulację częstotliwości f_g . Zwykle uzyskuje się to przez pewne odstrojenie generatora pomocniczego, aby odpowiednia harmoniczna częstotliwości f_g dawała z częstotliwością mierzoną f_x częstotliwość różnicową, którą przyrównuje się do częstotliwości wzorcowej licznika /np. 1 MHz/ w pętli fazowej regulacji częstotliwości. Przy takim rozwiązaniu częstotliwość wskazywana w układzie pomiarowym różni się jednak od

częstotliwości mierzonej o częstotliwość różnicową /zwykle 1 MHz/, co jest typową niedogodnością przy pomiarach z zastosowaniem harmonicznych przemienników częstotliwości.

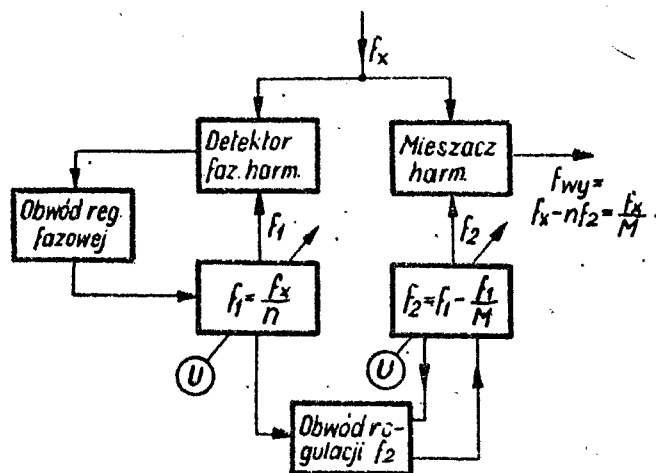
Istnieją także różne systemy pozwalające na częściową lub pełną automatyzację określenia rzędu harmonicznej N . W układach pomiarowych zawierających harmoniczne przemienniki częstotliwości stosuje się często N -krotne zwiększanie czasu otwarcia bramki licznika, co zmniejsza błąd pomiaru i pozwala na bezpośredni odczyt na liczniku, ale jednocześnie zmniejsza możliwość śledzenia szybkich zmian mierzonej częstotliwości.

Ostatnio opracowane zostały harmoniczne przemienniki częstotliwości pozwalające na częściową lub pełną automatyzację pomiarów i pracujące w zakresie do kilkunastu GHz. Przykładem takiego urządzenia może być harmoniczny przemiennik częstotliwości firmy "Systron - Donner", typ 1255, pracujący w zakresie $8,2 \div 12,4$ GHz i współpracujący z częstotłomierzem zliczającym o zakresie pomiarowym $0 \div 100$ MHz. Urządzenie pozwala na pełną automatyzację pomiarów, przy czym częstotliwość wskazywana przez licznik różni się od częstotliwości mierzonej o 1 MHz.

5. Automatyczny dzielnik częstotliwości

Prowadzone ostatnio prace nad zastosowaniem cyfrowych metod pomiaru częstotliwości w zakresie mikrofalowym zmierzają do konstrukcji urządzeń pozwalających na pełną automatyzację pomiarów przy jednoczesnym bezpośrednim odczycie lub zapisie mierzonej częstotliwości /bez konieczności dodawania lub odejmowania częstotliwości różnicowej/. Przykładem takiego urządzenia jest automatyczny dzielnik częstotliwości, którego schemat blokowy przedstawiono na rys.3.

Parametry zewnętrzne urządzenia przedstawionego na rys.3 są takie, jak bezpośredniego dzielnika częstotliwości, tzn. częstotliwość sygnału wyjściowego f_{wy} jest równa odpowiedniej podwielokrotności częstotliwości sygnału wejściowego f_x .



Rys.3. Schemat blokowy automatycznego dzielnika częstotliwości

Urządzenie zawiera niektóre elementy poprzednio opisanych układów, a zwłaszcza harmonicznego przemiennika częstotliwości, i w istocie jest układem syntezy częstotliwości działającym w taki sposób, aby częstotliwość sygnału wyjściowego była równa

$$f_{wy} = \frac{f_x}{M}$$

gdzie M jest żądanym stosunkiem podziału mierzonej częstotliwości.

W układzie przedstawionym na rys.3 przestrajany napięciowo generator o częstotliwości f_1 jest sterowany przez sygnał o częstotliwości mierzonej f_x w taki sposób, że

$$f_1 = \frac{f_x}{n} \quad /4/$$

gdzie n jest odpowiednim rzędem harmonicznej sygnału o częstotliwości f_1 .

Sterowanie generatora o częstotliwości f_1 odbywa się za pomocą pętli fazowej regulacji częstotliwości /detektor fazowy harmoniczny oraz obwód regulacji fazowej/ zapewniającej spełnienie równości

$$n f_1 = f_x$$

W układzie znajduje się także drugi generator przestrajany napięciowo o częstotliwości f_2 , który jest z kolei sterowany przez sygnał o częstotliwości f_1 w taki sposób, że

$$f_2 = f_1 - \frac{f_1}{M} \quad /5/$$

Sygnały o częstotliwościach f_x oraz f_2 są przykładane do wejść mieszacza harmonicznego, na którego wyjściu uzyskuje się sygnał o częstotliwości

$$f_{wy} = f_x - nf_2 \quad /6/$$

Ponieważ zgodnie z zależnością /5/

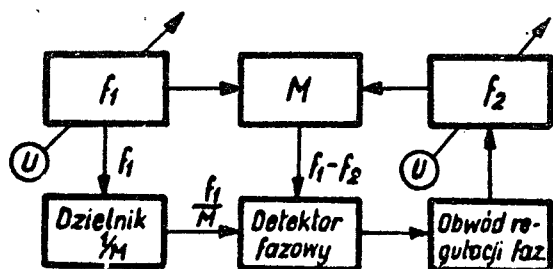
$$nf_2 = f_x - \frac{f_x}{M}$$

więc

$$f_{wy} = \frac{f_x}{M} \quad /7/$$

Na rys.4 przedstawiono schemat blokowy obwodu regulacji częstotliwości f_2 . W układzie przedstawionym na tym rysunku sygnały o częstotliwościach f_1 i f_2 są przykładane do wejść mieszacza M, na którego wyjściu uzyskuje się sygnał o częstotliwości różnicowej $f_1 - f_2$. Jednocześnie sygnał o częstotliwości f_1 jest przykładany do wejścia dzielnika częstotliwości, na którego wyjściu uzyskuje się sygnał o częstotliwości $\frac{f_1}{M}$, /gdzie M jest żądanym stosunkiem podziału mierzonej częstotliwości f_x /. Sygnał o częstotliwości różnicowej $f_1 - f_2$ oraz sygnał o częstotliwości $\frac{f_1}{M}$ są następnie przykładane do wejść detektora fazowego. Napięcie wyjściowe z detektora fazowego steruje generatorem o częstotliwości f_2 , aby zapewnić równość

$$f_1 - f_2 = \frac{f_1}{M}$$



Rys.4. Obwód regulacji częstotliwości f_2

Z przedstawionej zasady działania układu automatycznego "dzielnika" częstotliwości wynika, że żądany stosunek podziału f_x uzyskuje się przez odpowiedni podział częstotliwości f_1 oraz zastosowanie pętli fazowej regulacji częstotliwości f_1 i f_2 . Częstotliwości f_1 i f_2 znajdują się w zakresie poniżej 300 MHz, w którym poprawnie pracują bezpośrednio dzielniki

ki częstotliwości. Stosunek podziału M może być wybrany zgodnie z wymaganiami stawianymi urządzeniu, np. 10, 100 lub 1000, co umożliwia łatwą współpracę automatycznego dzielnika częstotliwości z dziesiętnymi częstościomierzami zliczającymi.

Zasadniczą zaletą automatycznego dzielnika częstotliwości jest szybkość i możliwość pełnej automatyzacji pomiarów, prostota obsługi oraz bezpośredni odczyt mierzonej częstotliwości na częstościomierzu zliczającym. Dokładność pomiaru za pomocą automatycznego dzielnika częstotliwości jest określona przez błąd licznika $\pm \Delta f_1$, pomnożony przez stosunek podziału M /o ile czas otwarcia bramki licznika nie jest odpowiednio zwiększony.

Wadą automatycznego dzielnika częstotliwości jest znaczne skomplikowanie układowe urządzenia.

Przykładem urządzenia opisywanego typu jest automatyczny dzielnik częstotliwości firmy "Hewlett-Packard", typ 5260A, pracujący w zakresie 0,3 – 12,4 GHz. Urządzenie jest w pełni zautomatyzowane i nie posiada żadnych organów regulacji oprócz przełącznika podzakresów. Urządzenie posiada 2 podzakresy:

0,3 ÷ 1,2 GHz ze stosunkiem podziału $M = 100$ oraz

1 ÷ 12,4 GHz ze stosunkiem podziału $M = 1000$.

6. Z a k o ń c z e n i e

Porównując zasadnicze właściwości opisanych metod i układów można sformułować ogólne wnioski dotyczące przydatności poszczególnych metod do cyfrowych pomiarów częstotliwości w zakresie mikrofalowym.

Największą dokładność pomiaru częstotliwości pozwala uzyskać heterodynowy przemiennik częstotliwości. Błąd pomiaru może być w tym wypadku równy błędowi licznika $\pm \Delta f_1$. W pozostałych metodach błąd licznika jest pomnożony przez stosunek podziału częstotliwości /przy zachowaniu stałego czasu otwarcia bramki licznika/. Jednak zasadniczą wadą obecnie sto-

sowanych heterodynowych przemienników częstotliwości jest niemożność automatyzacji pomiarów oraz niejednoznaczność wyników.

Możliwość śledzenia szybkich zmian mierzonej częstotliwości jest ograniczona we wszystkich opisanych metodach. Przy dostrajaniu ręcznym jest ona ograniczona nadążnością dostrajania, a przy dostrajaniu automatycznym - stałą czasu układu fazowej regulacji częstotliwości. Dodatkowe ograniczenie stanowi tu powiększanie czasu otwarcia bramki licznika, stosowane w celu uzyskania bezpośredniego odczytu mierzonej częstotliwości oraz zwiększenia dokładności pomiaru. Stosunkowo najmniejsze ograniczenia, jeśli chodzi o obserwację szybkich zmian mierzonej częstotliwości, wprowadza bezpośredni dzielnik częstotliwości, ale może on pracować jedynie w zakresie niezbyt wielkich częstotliwości.

W wielu przypadkach najbardziej istotną zaletą cyfrowych metod pomiaru częstotliwości jest możliwość pełnej automatyzacji pomiarów. Z przedstawionych danych wynika, że spośród opisywanych układów największe możliwości automatyzacji pomiarów w szerokim zakresie częstotliwości mikrofalowych rokuje obecnie automatyczny dzielnik częstotliwości. Z tego powodu w Katedrze Urządzeń Radiotechnicznych i Telewizyjnych Politechniki Warszawskiej, w ramach ogólnych prac nad cyfrowymi metodami pomiarów częstotliwości, prowadzone są obecnie wstępne prace dotyczące automatycznego dzielnika częstotliwości i obejmujące wybór optymalnych parametrów oraz opracowanie poszczególnych zespołów automatycznego dzielnika częstotliwości.

L i t e r a t u r a

1. Elektroniczne mierniki zliczające. Praca zbiorowa pod prof. dr S. Ryzko. Wyd. Kom. i Łączności. Warszawa, 1966.
2. Automatic Frequency Divider. "Microwave Journal", August 1966, str. 120 - 122.
3. Dukes J.N.: A Plug-in Unit for Extending Counter-Type Frequency Measurements to 12,4 GHz. Hewlett-Packard Journal, Sept. 1966, str. 11 - 13.

4. Ostler R.J.: Microwave Converters Marconi Instrumentation, Dec. 1966, str. 98 - 100.