

# Wysokostabilny wzorzec czasu i częstotliwości,

## część 1

### kit AVT-310

PROJEKT Z OKŁADKI

Wiele przyrządów pomiarowych wymaga stosowania precyzyjnego wzorca czasu (częstotliwości), od którego zależy dokładność dokonywanego pomiaru. Dużą popularnością cieszą się oscylatory kwarcowe, lecz zarówno ich stabilność, jak i dokładność nie zawsze jest wystarczająca do prowadzenia naprawdę precyzyjnych pomiarów.

W artykule przedstawiamy opis konstrukcji wzorca o niezwykle wysokiej precyzji oraz dużej stabilności długo i krótkoterminowej. Czotliwości wyjściowe mają wartości odpowiednie dla typowych zastosowań tego wzorca.



Czemu zawdzięczamy tak dobre parametry? Może to trochę niezwykle, ale jest to zasługa pierwszego programu Polskiego Radia! Zaczniemy od krótkiego wstępu teoretycznego.

#### Definicje jednostek podstawowych

Z jednostek podstawowych układu miar SI jedną z najdokładniej określonych jest jednostka czasu, zwana sekundą. Według definicji, sekunda jest to czas równy 9 192 631 770 okresom promieniowania, odpowiadającego przejściu między dwoma poziomami struktury nadsubtelnej stanu podstawowego atomu cezu 133. Definicja ta pozwala

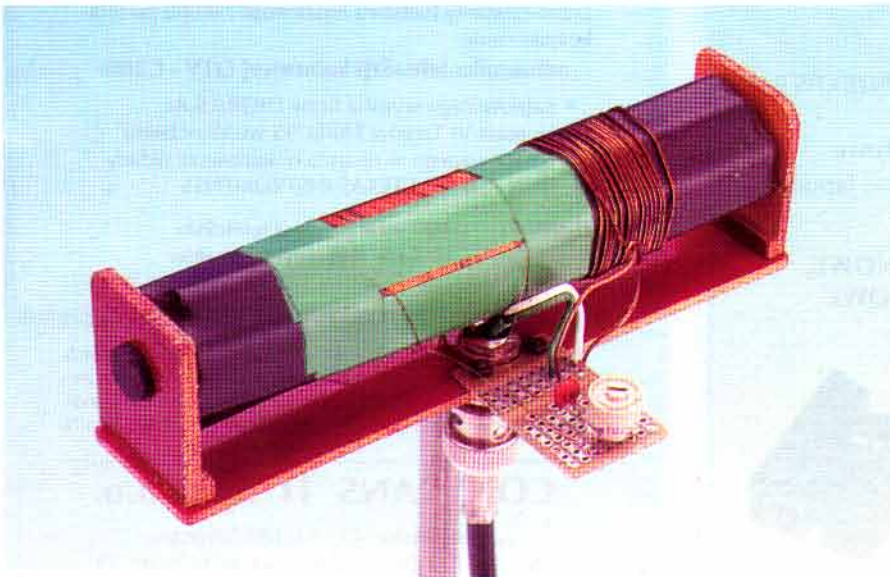
na odtworzenie sekundy z niepewnością rzędu  $10^{-12}$ . Dla porównania jednostka długości, czyli metr (długość równa 1 650 763, 73 długości fali promieniowania odpowiadającego przejściu pomiędzy poziomami  $2p_{10}$  a  $5d_5$  atomu kryptonu 86 w próżni), jest określony z dokładnością ponad 50 razy mniejszą. Gdyby określić wzorzec masy zwany kilogramem z taką dokładnością, z jaką zdefiniowano jednostkę czasu, to jego masę należałoby wyznaczać z dokładnością do 0,1 mikrograma.

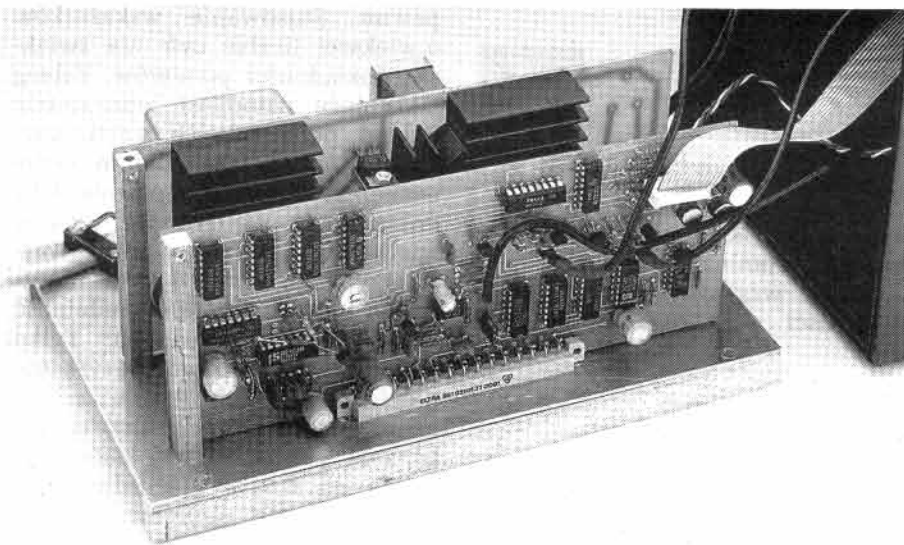
Dla wyobrażenia sobie precyzji z jaką określono jednostkę czasu warto podać, że niepewność  $10^{-12}$  oznacza zmianę o 1 sekundę na 31 700 lat. Masę 0,1µg ma cząsteczka pary wodnej o średnicy 50µm.

#### Przykłady rozwiązań wzorców częstotliwości

Do precyzyjnych pomiarów częstotliwości i czasu stosowane są zegary z elektronicznymi wzorcami częstotliwości. Zależnie od rodzaju zastosowanego wzorca rozróżnia się zegary kwarcowe, atomowe lub molekularne. Zasada działania wzorca atomowego przedstawiona jest na rys.1.

Wzorzec ten pracuje na długości fali 3,26cm (9,19GHz - linia struktury nadsubtelnej cezu). Wiązka atomów cezu wychodzi ze źródła Z i dochodzi do odbiornika R. Po drodze wiązka odchylana jest





była stabilizowana takim wzorcem, wówczas byłby to ogólnie dostępny, wysokostabilny wzorzec częstotliwości. W Polsce nie ma aktualnie takiej stacji. Można natomiast odbierać stację DCF77, pracującą w Niemczech na częstotliwości 77,5kHz stabilizowaną z dokładnością  $10^{-11}$ .

Do wzorców wysokostabilnych należą również wzorce kwarcowe, które pozwalają uzyskać dokładności rzędu  $10^{-10}$  (zmiana o 1 sekundę na 317 lat). Głównym elementem takich wzorców jest rezonator kwarcowy (zazwyczaj cięcia AT), pracującego na piątym overtone (piąta harmoniczna częstotliwości podstawowej), przy częstotliwości 5MHz i dobroci Q nie mniejszej niż  $3 \times 10^6$ . Schemat blokowy takiego wzorca przedstawiono na rys.2.

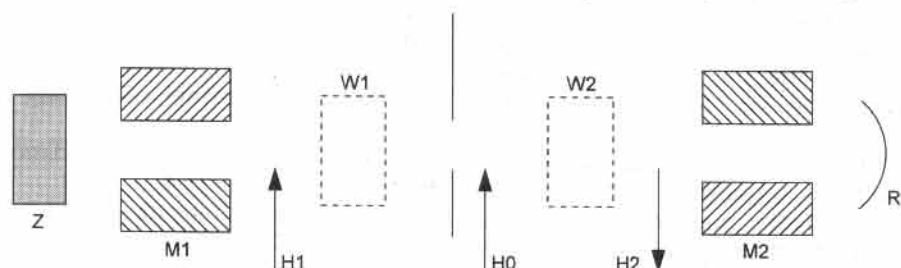
Dzięki podwójnemu systemowi termostatów można uzyskać stałość temperatury z dokładnością do  $0,001^{\circ}\text{C}$ , co pozwala uzyskać stabilność częstotliwości nie przekraczającą  $10^{-10}$  na  $^{\circ}\text{C}$ . Przeciętna stabilność krótkoterminowa (uśrednianie za 1s) kwarcowych wzorców częstotliwości osiąga  $10^{-11}$ . Tak dokładne kwarcowe wzorce częstotliwości są również drogie i skomplikowane. Jednak w całej Polsce dostępny jest sygnał o takiej stabilności. Dzieje się tak dlatego, że częstotliwość nośna radiostacji Warszawa I stabilizowana jest takim wzorcem. Stabilność wzorca wynosi  $10^{-10}$ . Stacja ta pracuje na częstotliwości 225kHz z modulacją „DCC”. Jednak dla zwiększenia dokładności pomiarów, dwa razy w tygodniu, w poniedziałek i w czwartek w godzinach 11.15 do 12 stacja pracuje z czystą modulacją AM z wyłączonym układem kompresji (nie ma zmiany poziomów fali nośnej przy powolnych zmianach poziomu sygnału nadawanego).

Prostsze wzorce kwarcowe produkowane są w Polsce przez „OMIG”. Pracują one na częstotliwości 5MHz, można je przestrajać elektrycznie w granicach  $\pm 5\text{Hz}$ . Stabilność ich pracy wynosi  $5 \times 10^{-9}$ . Orientacyjna cena takiego wzorca wynosi ok. 250zł. Od wzorca przedstawionego wcześniej różni je przede wszystkim to, że mają jeden termostat który stabilizuje temperaturę.

Po tym pobieżnym przeglądzie wzorców częstotliwości i przed podaniem praktycznego rozwiązania

przez niejednorodne pole magnetyczne H1 wytworzone przez magnes M1. Pole H2 magnesu M2 ma kierunek przeciwny do pola magnesu M1. Przechodząc przez wne-

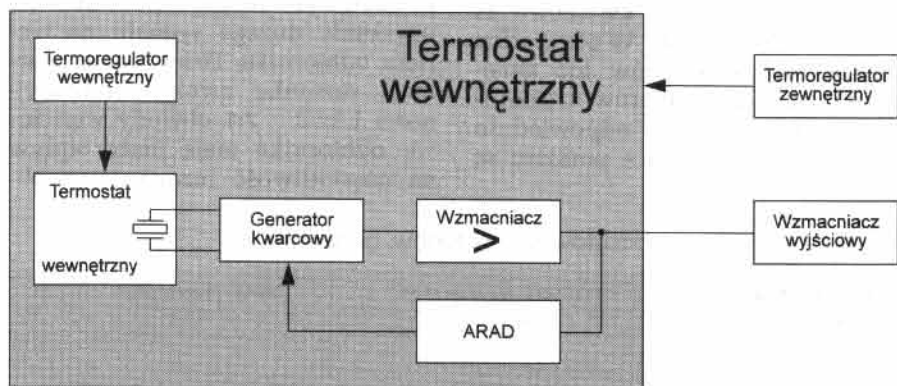
puje to dla częstotliwości pola elektromagnetycznego równej częstotliwości rezonansowej dla danego przejścia. Zadaniem części elektronicznej wzorca jest takie prze-



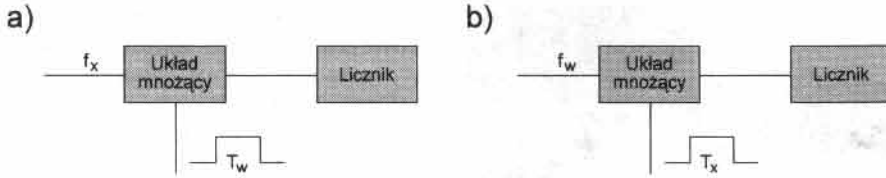
Rys. 1. Ilustracja sposobu dzielenia wzorca atomowego.

ki rezonansowe W1 i W2 wiązka atomów oddziałuje z polem elektromagnetycznym wielkiej częstotliwości. W obszarze, gdzie następuje oddziaływanie tego pola, występuje stałe jednorodne pole magnetyczne H0 równoległe do pól H1 i H2. Dokładna analiza pracy takiego układu udowadnia, że prąd jonowy odbiornika R osiąga minimum wtedy, gdy oddziaływanie atomów cezu z polem elektromagnetycznym jest największe. Wystę-

strzanie wzorca kwarcowego, aby po procesie powielania i mieszania uzyskać przebieg o takiej częstotliwości, który zasilając wneki rezonansowe W1 i W2 będzie dawał minimalną wartość prądu odbiornika. Wzorce atomowe są urządzeniami o bardzo wielkiej dokładności, ale są drogie i skomplikowane. Dla prywatnych potrzeb użytkowników stosowanie ich jest nieopłacalne. Gdyby jednak częstotliwość fali nośnej wybranych radiostacji



Rys. 2. Schemat blokowy generatora z termostatem.



Rys. 3. Zasada pomiaru częstotliwości i okresu.

wzorca o stabilności równej stabilności wzorca Warszawa I należy podać cel osiągania tak dużych stabilności częstotliwości.

Jednymi z urządzeń, które wymagają utrzymywania stabilnej częstotliwości wzorcowej są zegary elektroniczne. Można wtedy unikać częstego korygowania wskazań zegara. Stabilność  $10^{-5}$  zapewnia utrzymanie dokładności wskazań do 1 sekundy na dobę. Do pomiarów częstotliwości i okresu przebiegu metodami elektronicznymi wymagane są również stabilne częstotliwości wzorcowe. Tylko wtedy można prawidłowo wykorzystywać wskaźniki o większej liczbie cyfr. Uzasadnione to jest tym, że liczba dokładnych cyfr z pomiaru nie może być większa od rzędu dokładności wzorca. Wyjaśnia to rozumowanie przedstawione niżej, obrazujące ideę pomiaru częstotliwości i okresu. Podstawowy schemat pomiaru częstotliwości lub okresu przedstawia rys.3.

Dla rys.3a w czasie trwania impulsu bramkującego o wartości  $T_w$  zliczone zostaje  $n$  impulsów, które można wyliczyć z zależności  $n T_x = T_w$ . Ponieważ:

$$f_x = \frac{1}{T_x} \quad \text{to:} \quad f_x = \frac{n}{T_w} \quad (1)$$

Dla rys.3b rola wejść zostaje zamieniona miejscami, licznik w czasie mierzonego okresu  $T_x$  zliczy  $n$  impulsów, które można wyliczyć ze wzoru (2)

$$n T_w = T_x \quad (2)$$

Licząc różniczki zupełne funkcji  $f_x$  dla wzoru (1) i funkcji  $T_x$  dla wzoru (2) otrzymuje się:

$$\Delta f_x = \frac{n}{T_w^2} \Delta T_w + \frac{1}{T_w} \Delta n \quad (3)$$

$$\Delta T_x = T_w \Delta n + n \Delta T_w \quad (4)$$

We wzorach powyższych:  $\Delta f_x$  - błąd wyznaczenia częstotliwości mierzonej

$\Delta T_x$  - błąd wyznaczenia mierzonego okresu

$n$  - liczba impulsów zliczona przez licznik

$\Delta n$  - błąd licznika wynosi  $\pm 1$

$T_w$  - nominalny okres wzorca

$\Delta T_w$  - odchyłka okresu wzorca od wartości nominalnej

Błędy względne pomiaru częstotliwości albo okresu wynoszą więc:

$$\frac{\Delta f_x}{f_x} = \frac{\Delta T_w}{T_w} + \frac{\Delta n}{n} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = \frac{\Delta T_w}{T_w} + \frac{\Delta n}{n} \quad (6)$$

Ponadto zachodzi związek:

$$\frac{\Delta f_w}{f_w} = - \frac{\Delta T_w}{T_w} \quad (7)$$

We wzorach (5) i (6) składnik  $\Delta n/n$  to błąd kwantyzacji, natomiast  $\Delta f_w/f_w$  to błąd analogowy wzorca.

Liczniki mogą zliczać dowolną liczbę impulsów. O tym co ta liczba reprezentuje decyduje fakt w jakich odstępach czasu impulsy pojawiały się na wejściu liczników. Z wzorów (5) i (6) wynika, że błąd względny pomiarów zmniejsza się wraz ze zwiększaniem liczby zliczonych impulsów  $n$ . Oznacza to w przypadku pomiaru częstotliwości wydłużanie pomiaru, a w przypadku pomiaru okresu zwiększenie częstotliwości wzorca. Częstotliwości wzorca nie można zwiększać jednak powyżej częstotliwości granicznej liczników. Jeśli liczba zliczonych impulsów rośnie to w końcu błąd kwantyzacji zrównuje się z błędem analogowym wzorca. W tabeli 1 zebrano podstawowe typy generatorów oraz ich stabilności i zakresy przestrajania

Z tabeli tej wynika, że multiwibratory zapewniają dokładność wskazań około 1s na pół minuty, generatory LC zapewniają 1s na około 5 minut a generatory kwarcowe 1s na 0,1 - 1000 dni. W przypadku użycia multiwibratorów lub generatorów LC do pomiarów częstotliwości i okresu tylko odpowiednio 2 albo 3 cyfry znaczące pomiaru są

pewne. Stosowanie wskaźników o większej liczbie cyfr nie zwiększa dokładności pomiarów. Zabieg taki może natomiast wprowadzić w błąd potencjalnych użytkowników, którzy nieświadomie mogą uznać, że miernik zapewnia taką dokładność pomiaru ile rzędów wielkości może pokazywać. W przypadku pomiaru z dokładnością do  $n$  cyfr znaczących stabilność wzorca musi być rzędu  $10^{-n}$ . Tylko wtedy pomiar zapewnia uzyskanie  $n$  cyfr dokładnych w wyniku pomiaru. Jeśli zachodzi potrzeba wykonania pomiarów z dokładnością lepszą od 0,01% niezbędne staje się stosowanie wzorców kwarcowych.

### Opis układu

Wzorzec ten składa się z dwóch zasadniczych części: odbiornika fali nośnej 225kHz emitowanej przez radiostację oraz z układu wytwarzającego częstotliwości wzorcowe o praktycznie stosowanych wartościach.

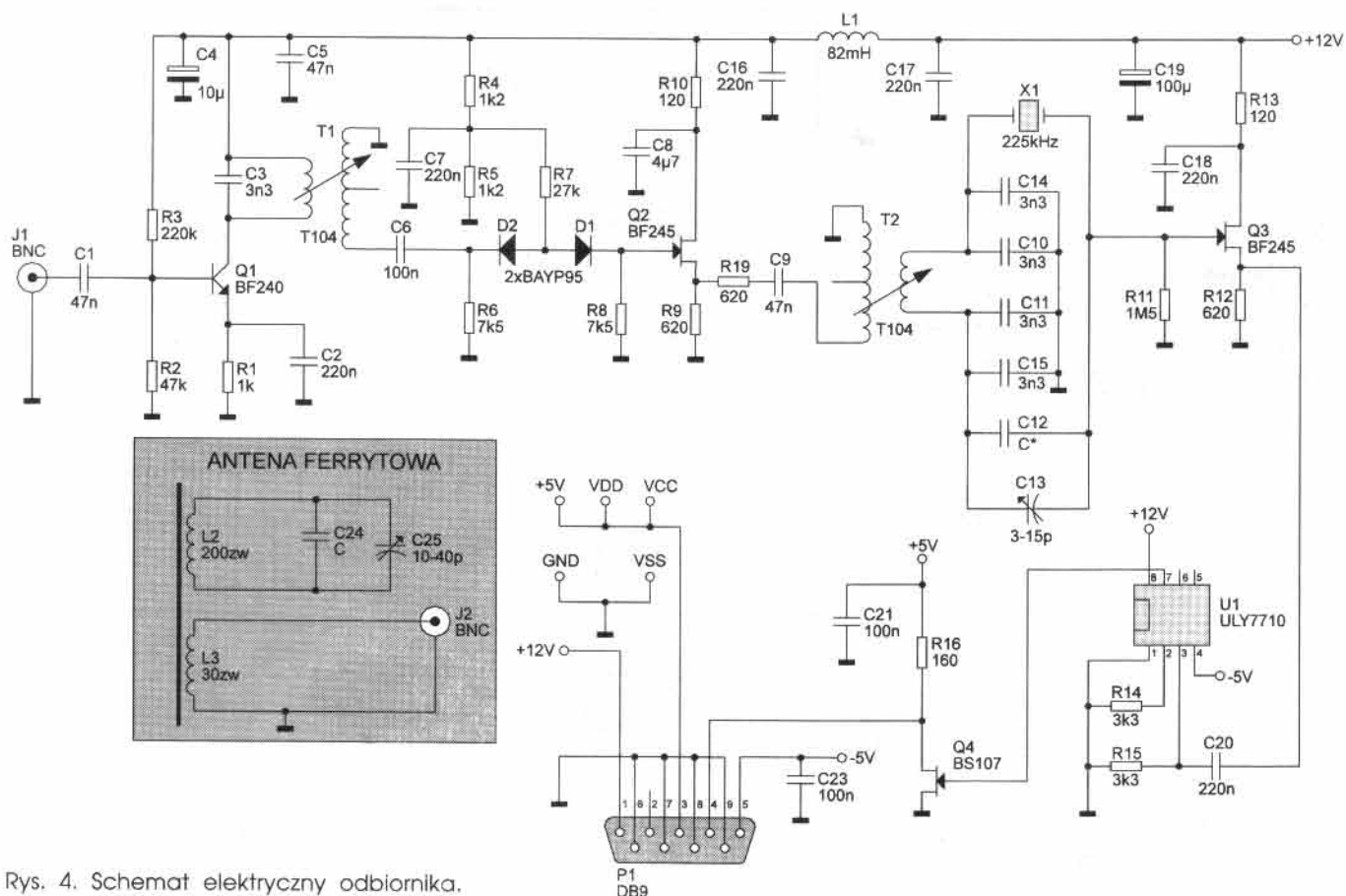
### Odbiornik fali nośnej radiostacji Warszawa I

Schemat odbiornika przedstawiony został na rys.4.

Na wejściu odbiornika znajduje się antena złożona z siedmiu prętów ferrytowych, o średnicy 8mm i długości 125mm, na których nawinięto dwa uzwojenia: uzwojenie pierwotne mające 110 zwojów i uzwojenie wtórne o 15 zwojach. Indukcyjność L2 uzwojenia pierwotnego łącznie z kondensatorem C24 i trymerem C25 stanowią obwód rezonansowy dostrojony do częstotliwości nośnej radiostacji, która wynosi 225kHz. Napięcie zaindukowane w cewce L3 doprowadzone jest do bazy tranzystora Q1 (BF240), który jest pierwszym stopniem wzmocnienia. Przedstawiona konstrukcja anteny pozwala na uzyskanie dużego sygnału na wejściu odbiornika. Dzięki dużej wartości stosunku zwojów indukcyjności L3:L2 7:1 obwody wejściowe odbiornika mają mały wpływ na częstotliwość rezonansową ob-

Tabela 1. Parametry podstawowych typów generatorów

| Typ generatora                       | Stabilność od 0 do 50°C     | Zakres przestrajania |
|--------------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| multiwibrator                        | do 0,5%                     | do 100%              |
| generator LC z diodami waraktorowymi | do 0,05%                    | 1 - 5%               |
| generator kwarcowy                   | ( $10^{-6}$ - $10^{-3}$ ) % | (0,001 - 0,1) %      |



Rys. 4. Schemat elektryczny odbiornika.

wodu pierwotnego. W obwodzie kolektora tranzystora Q1 znajduje się obwód rezonansowy dostrojony do częstotliwości 225kHz. Obwód ten składa się z cewki filtru p.cz.AM typ 104 oraz z kondensatora C3 i strojony jest indukcyjnością. Napięcie z uzwojenia wtórnego wchodzi na ogranicznik zbudowany w oparciu o diody D1 i D2. Napięcie wyjściowe z ogranicznika poprzez wtórnik źródłowy (tranzystor Q2) dochodzi do drugiego filtra p.cz.AM (identycznego jak poprzedni), ale tym razem do uzwojenia wtórnego. Obwód rezonansowy składa się z indukcyjności uzwojenia pierwotnego oraz dwóch zastępczych pojemności połączonych szeregowo. Każda pojemność zastępcza składa się z dwóch połączonych równolegle pojemności C10 i C14 oraz C11 i C15. Napięcie na końcówkach indukcyjności występuje więc w fazach przeciwnych w stosunku do masy. Napięcia te doprowadzone są do bramki tranzystora Q3, gdzie następuje ich sumowanie. Jedno napięcie doprowadzone jest przez filtr kwarcowy o dobroci  $Q = 10\ 000$  i częstotliwości rezonansowej  $f_0 = 225\text{kHz}$ , drugie napięcie doprowadzone jest

przez trymer C13. Jego pojemność należy tak dobrać, aby dla częstotliwości różnych od  $f_0$  nie było napięcia na wyjściu wtórnika źródłowego, w charakterze którego pracuje tranzystor polowy Q3. W tym przypadku skompensowane zostaje przenikanie napięcia przez pojemność oprawki filtru kwarcowego. Komparator ULY7710 (układ U1) zamienia napięcie wyjściowe z wtórnika Q3 na napięcia zgodne ze standardem TTL. Tranzystor Q4 zapewnia odpowiedni poziom mocy na wyjściu odbiornika.

Podsumowując: na wyjściu odbiornika występuje napięcie o częstotliwości 225kHz i standardzie TTL. Sygnał z radiostacji Warszawa I odbierany jest w pasmie

$$B = \frac{f_0}{Q} = 22,5\text{Hz.}$$

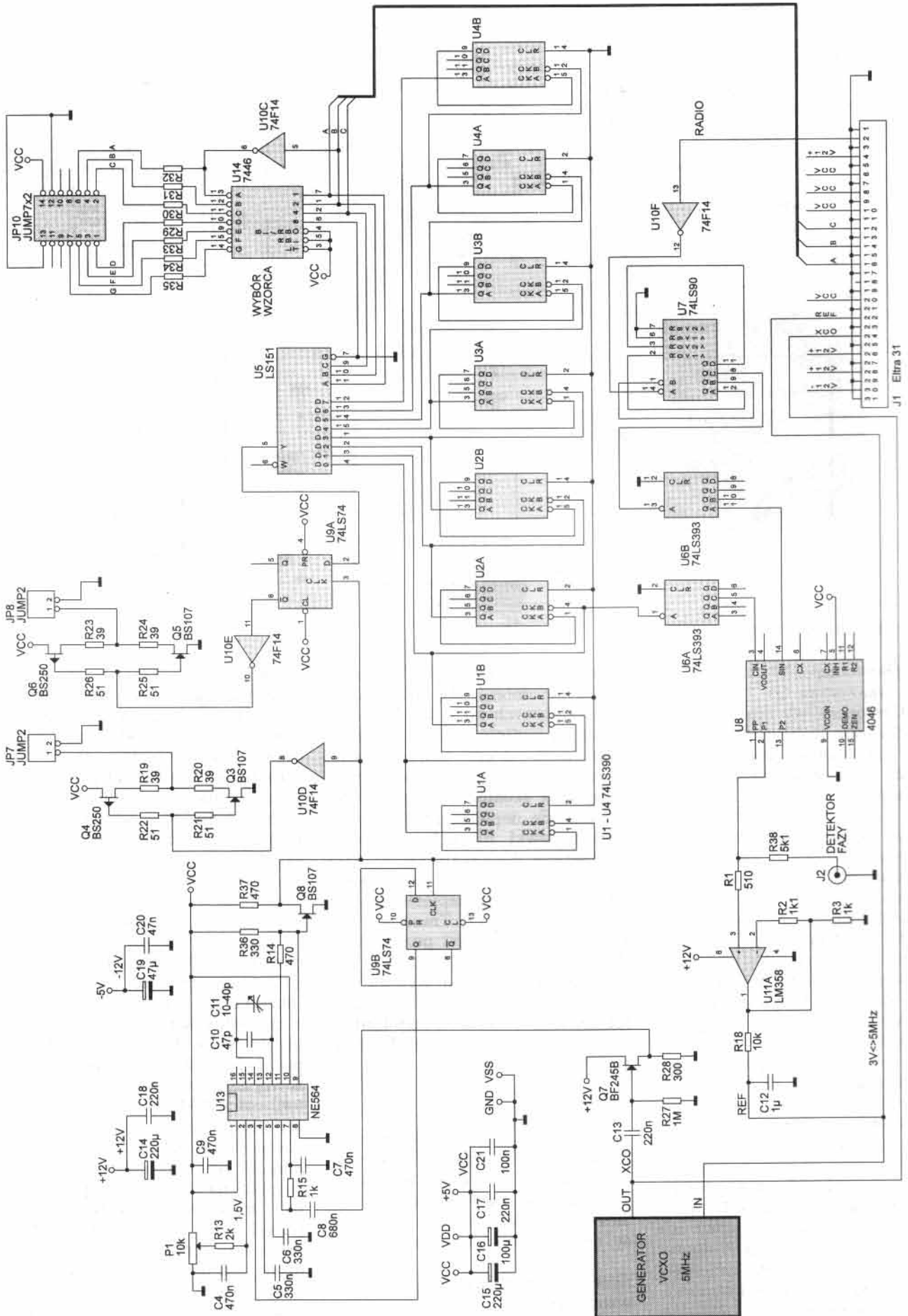
Właściwa antena oraz bardzo wąskie pasmo odbiornika (bardzo duża dobroć filtru kwarcowego) zapewniają odpowiedni sygnał do dalszej obróbki przez układ syntezy częstotliwości wzorcowych.

**Synteza częstotliwości wzorcowych**

Napięcie z odbiornika o częstot-

liwości równej 225kHz, która stabilizowana jest w radiostacji wysokostabilnym, kwarcowym wzorcem częstotliwości o dokładności  $10^{-10}$ , doprowadzone zostaje do układu syntezy. Jego zadaniem jest wytworzenie w oparciu o stabilną częstotliwość wejściową szeregu częstotliwości o wartościach, które znajdują praktyczne zastosowania, na przykład takie, żeby były one potęgą liczby 10. Na rys.5 przedstawiony jest schemat takiego układu.

Sygnał wyjściowy odbiornika, nazwany „RADIO“, o częstotliwości 225kHz dzielony jest przez 18 (liczniki U7 i U6B) i jako sygnał o częstotliwości 12,5kHz dochodzi do detektora fazy U8(PIN14). Detektor fazy pracuje w układzie fazowej automatycznej regulacji częstotliwości (FARCz). Ponieważ schemat zawiera jeszcze jedną pętlę fazową, to na zakończenie artykułu podane zostaną podstawowe wiadomości na temat takich pętli. Sygnał wyjściowy z detektora fazy (PIN2) wzmacniony dwukrotnie przez wzmacniacz U11A doprowadzony jest przez filtr dolnoprzepustowy R18, C12 do wejścia wysokostabilnego generatora kwarcowego VCXO pracującego z częstotli-



Rys. 5. Schemat elektryczny syntezyera.

wością  $f_w = 5\text{MHz}$ . Napięcie wyjściowe z filtru może w wąskich granicach ( $\pm 5\text{Hz}$ ) przestrajać generator. Aby nie obciążać wyjścia generatora sygnał wyjściowy z generatora kwarcowego przechodzi najpierw przez wtórnik źródłowy Q7. Napięcie wyjściowe z wtórnika dochodzi do detektora fazy drugiej pętli FARCz (U13). Częstotliwość środkowa generatora lokalnego tej pętli zależy od wartości pojemności C10 i C11, zaś zakres chwytania częstotliwości wyznaczony jest przez położenie suwaka potencjometru P1. Sygnał z tego generatora o częstotliwości  $f_0$  stanowi jedną z częstotliwości wzorcowych syntezera (10MHz). Częstotliwość ta zostaje podzielona przez 2 w układzie U9B i jest doprowadzona do detektora fazy jako drugi sygnał w tej pętli. Pętla FARCz zapewnia, że częstotliwość generatora lokalnego w pętli ma dokładnie dwa razy większą częstotliwość niż generator kwarcowy, czyli  $f_0 = 2f_w$ .

Sygnał z generatora lokalnego pętli przez tranzystor separujący Q8 doprowadzony jest do 8 liczników dzielących częstotliwość przez 10 (najpierw przez 5, a następnie przez 2 aby przebieg był symetryczny). Częstotliwość napięcia z wyjścia licznika U2B ( $f_0 : 100$ ) podzielona zostaje w układzie U6A przez 8. Sygnał z tego licznika jest drugim przebiegiem doprowadzonym do detektora fazy pierwszej pętli FARCz (układ U8). Zadaniem tej pętli jest utrzymanie równości częstotliwości dochodzących do detektora fazy oraz stałego przesunięcia fazy między nimi. Zachodzi więc związek, czyli  $f_0 = 10\text{MHz}$ . Jest to częstotliwość wzorcowa stabilizowana częstotliwością radiostacji. Stabilizację częstotliwości  $f_0$  w układzie zapewniają dwie pętli FARCz. Napięcia wyjściowe z dzielników (układy U1, U2, U3 i U4) doprowadzone są do selektora U5. Na jego wyjściu pojawia się przebieg o częstotliwości określonej przez wejścia sterujące ABC. Te same sygnały ABC dołączone są do dekodera U14, aby można wyświetlać wartość wybranej częstotliwości wzorcowej na wskaźniku LED. Jeśli wyświetlana jest liczba  $n$  ( $n = 0, 1, 7$ ) to częstotliwość na złączu JP8 wynosi.

Dodatkowy negator U10C zapewnia, że cyfra 6 przedstawiana jest z górnym, poziomym segmen-

tem. Na złączu JP7 jest stale przebieg o częstotliwości 10MHz. Sygnał z selektora U5 doprowadzony jest do wejścia D przerzutnika U9A, dla którego przebiegiem zegarowym jest napięcie o częstotliwości 10MHz. Dzięki temu zmniejszają się fluktuacje zboczy przebiegów wzorcowych pod wpływem zmian czasów propagacji sygnałów przez liczniki. Dla poprawienia stromości zboczy napięć wyjściowych przebiegi z przerzutników U9A i U9B przechodzą jeszcze przez bramki Schmitta. Stopnie końcowe, w których pracują tranzystory Q3, Q4, Q5 i Q6 zapewniają, że rezystancja wyjściowa wynosi 50 dla każdego wyjścia. Umożliwia to doprowadzenie tych przebiegów na znaczne odległości za pomocą przewodów koncentrycznych o rezystancji falowej  $50\Omega$  bez konieczności stosowania dopasowania na drugim końcu przewodów.

W układzie znajduje się jeszcze jedno wyjście nazwane „DETEKTOR FAZY“. Można w tym

miejscu obejrzyć przebieg napięcia na wyjściu detektora fazy głównej pętli FARCz. Jeśli na wyjściu tym jest stabilny przebieg okresowy to pętla jest w synchronizmie. Oznacza to, że wzorzec nadaje się do użycia. Bezpośrednio po włączeniu zasilania wewnątrz generatora kwarcowego jest chłodne i nie można go dostroić na drodze elektrycznej do częstotliwości 5MHz.

Podsumowując opis układu syntezy częstotliwości wzorcowych należy podkreślić, że cel został osiągnięty głównie dzięki zastosowaniu stabilnego przestrajanego generatora kwarcowego. Duża dobroć tego generatora zapewnia małe fluktuacje zboczy sygnału wzorcowego i dużą stabilność krótkoterminową częstotliwości. Dwie pętli FARCz pozwalają precyzyjnie kontrolować częstotliwość generatora kwarcowego i lokalnego generatora drugiej pętli za pomocą wysokostabilnej radiostacji Warszawa I.

**Roman Nowak**