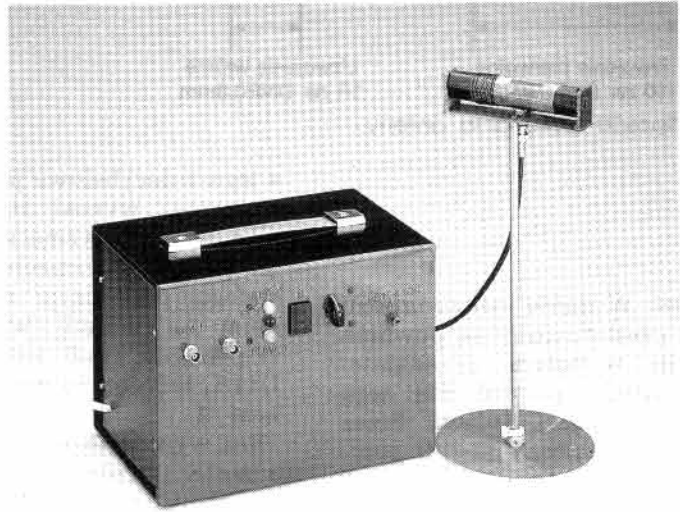


Wysokostabilny wzorzec czasu i częstotliwości, część 2

kit AVT-310

Drugą część artykułu prezentującego ultrastabilny wzorzec czasu poświęcamy skrócowemu omówieniu zasady działania pętli PLL i zasadom obowiązującym podczas montażu i uruchomienia układu.



Pętla fazowej automatycznej regulacji częstotliwości (FARCz)

Przedstawiona zostanie obecnie zasada działania pętli FARCz i jej wybrane parametry podczas pracy w stanie synchronizmu. Ponieważ problemy związane z osiągnięciem synchronizmu lub jego utraty, nadążaniem za zmianami częstotliwości lub fazy sygnału wejściowego nie są istotne dla pracy pętli we wzorcu częstotliwości więc ich opis zostanie pominięty.

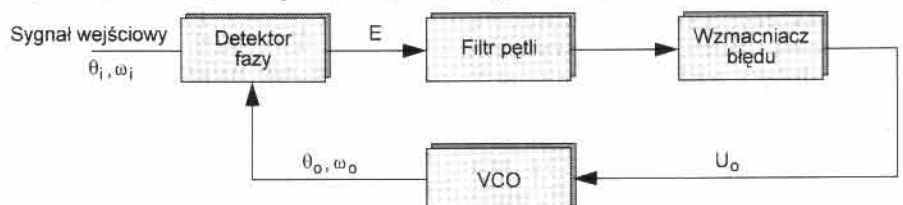
Pętla FARCz (ang. PLL - phase-locked loop) jest to układ, na wyjściu którego uzyskuje się przebieg synchroniczny co do częstotliwości i o stałym przesunięciu fazowym względem przebiegu wejściowego. Schemat blokowy pętli przedstawiony jest na rys.6.

Detektor fazy jest to układ, który zamienia przesunięcie fazy między przebiegami na napięcie. Na wyjściu detektora fazy uzyskuje się w stanie synchronizmu napięcie E , które zawiera składową stałą zależną od przesunięcia

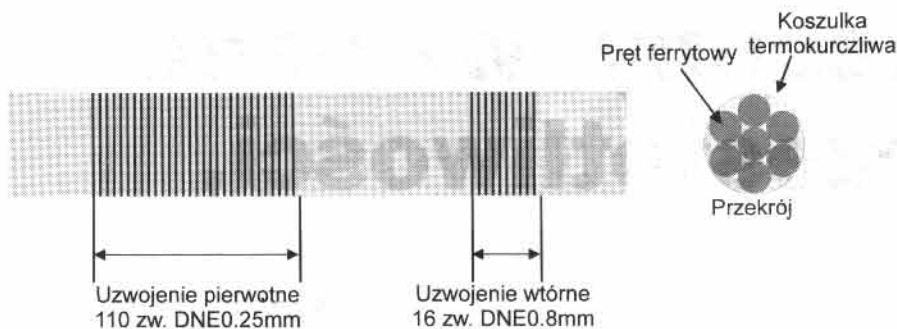
fazowego między sygnałem wejściowym i przebiegiem z generatora lokalnego pętli VCO (ang. VCO - voltage controlled oscillator - generator przestrajany napięciem). VCO to generator, którego częstotliwość pracy można zmieniać za pomocą dołączonego z zewnątrz napięcia sterującego. Napięcie błędu jest odfiltrowywane z wyższych harmoniczných w filtrze pętli i może być dodatkowo wzmacniane we wzmacniaczu błędu. Napięcie wyjściowe U_o ze wzmacniacza przestrajają VCO w ten sposób, aby częstotliwość sygnału wychodzącego z niego była równa częstotliwości sygnału wejściowego. Jest to więc układ automatycznej regulacji z ujemnym sprzężeniem zwrotnym.

Wielkościami charakteryzującymi bloki składowe pętli FARCz są:

- stała detektora D równa stosunkowi zmiany napięcia błędu E do wywołującej je zmiany przesunięcia fazy między przebiegiem wejściowym i przebiegiem z generatora



Rys. 6. Schemat blokowy pętli PLL.



Rys. 7. Sposób wykonania anteny.

$$K_d = \frac{\Delta E}{\Delta \phi}$$

Uwagi: W stanie synchronizmu zmiany częstotliwości są powolne i zawarte w małym przedziale. Można wtedy przyjąć dla tego zakresu zależności liniowe. Przez przesunięcie fazy $\Delta\phi$ między przebiegami prostokątnymi należy rozumieć stosunek przesunięcia czasowego Δt zboczy narastających albo opadających przebiegów dochodzących do detektora fazy do okresu T przebiegów $\Delta\phi = 2\pi \cdot \Delta t / T$. Dla głównej pętli FARCz, w której kontrolowana jest częstotliwość generatora kwarcowego stała detektora K_d wynosi

$$\frac{5V}{\pi} \approx 1,5 \frac{V}{\text{rad}}$$

- stała wzmocnienia K_o generatora VCO równa stosunkowi zmiany pulsacji $\Delta\omega = 2\pi \Delta f$ na wyjściu VCO do zmian napięcia, które je spowodowały

$$K_o = \frac{\Delta\omega}{\Delta U_o} = 2\pi \frac{\Delta f}{\Delta U_o} \quad (9)$$

Dla generatora kwarcowego we wzorcu

$$K_o = 2\pi \frac{10\text{Hz}}{10V} = 2\pi \frac{\text{rad}}{V}$$

- transmitancja filtru pętli $F(s)$ równa stosunkowi transformata Laplace'a do sygnału wyjściowego do wejściowego. Na podstawie transmitancji można wyznaczyć charakterystykę amplitudową i fazową filtru. Filtr wywiera decydujący wpływ na parametry pętli. We wzorcu częstotliwości w głównej pętli FARCz jest filtr dolnoprzepustowy R18, C12. Dla $R18 = 10\text{k}\Omega$ i $C = 1\mu\text{F}$ stała czasowa filtru wynosi 0,01s,

a jego 3-decybelowe pasmo częstotliwości wynosi 16Hz.

- wzmocnienie wzmacniacza błędu K . Jest to wzmacniacz prądu stałego, przy czym nie zawsze musi on w pętli występować. W pętli na rys.5 jest to układ U11A, którego wzmocnienie wynosi 2.

Bez wyprowadzenia podane teraz zostaną wzory, które całkowicie opisują pracę pętli FARCz

$$H(s) = \frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{K_o K_d K \cdot F(s)}{s + K_o K_d K \cdot F(s)} \quad (10)$$

$$\frac{\theta_e(s)}{\theta_i(s)} = \frac{\theta_i(s) - \theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{s}{s + K_o K_d K \cdot F(s)} \quad (11)$$

Powyższe równania są absolutnie wyznaczone przez parametry składowych bloków pętli.

Pierwsza transmitancja (stosunek transformata Laplace'a całkowitej fazy sygnału z generatora VCO do całkowitej fazy przebiegu wejściowego) pozwala wyznaczyć jak zmienia się w czasie faza przebiegu z VCO jeśli znany jest przebieg zmian fazy na wejściu. Całkowita faza przebiegu wyraża się wzorem

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt$$

i na podstawie wzoru definicyjnego (9) jest zależna od całki z napięcia przestrajającego generator VCO.

Drugie równanie (11) pozwala wyznaczyć przesunięcie fazy między przebiegiem wejściowym i sygnałem z VCO. Dokładna analiza tego wzoru pozwala stwierdzić, że dla stałej częstotliwości przebiegu na wejściu pętli stała jest również częstotliwość VCO. W zależności od transmitancji filtru $F(s)$ może natomiast pojawić się w stanie synchronizmu statyczny błąd fazy. We wzorcu

częstotliwości błąd taki nie jest jednak groźny.

Wzory (10) i (11) pozwalają wyznaczyć jak zmienia się faza sygnału z VCO pod wpływem zmian fazy na wejściu oraz jak zmienia się błąd fazy dla dowolnych zmian całkowitej fazy na wejściu. Można za ich pomocą analizować pracę w synchronizmie oraz przebiegi przejściowe.

Dla głównej pętli FARCz, w której kontrolowana jest częstotliwość generatora kwarcowego $K_o K_d K = 2 \cdot 1,5 \cdot 2 = 20$, a transmitancja filtru dolnoprzepustowego wynosi

$$F(s) = \frac{1}{1 + sT}$$

($T = 0,01s$) i równania (10) i (11) przyjmują ostateczną postać:

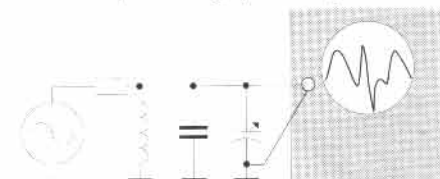
$$H(s) = \frac{20}{0,01s^2 + s + 20}; \quad \frac{\theta_e(s)}{\theta_i(s)} = \frac{0,01s^2 + s}{0,01s^2 + s + 20}$$

Znajomość rachunku operatorowego pozwala na dokładną analizę zmian częstotliwości i fazy przebiegu na wyjściu VCO.

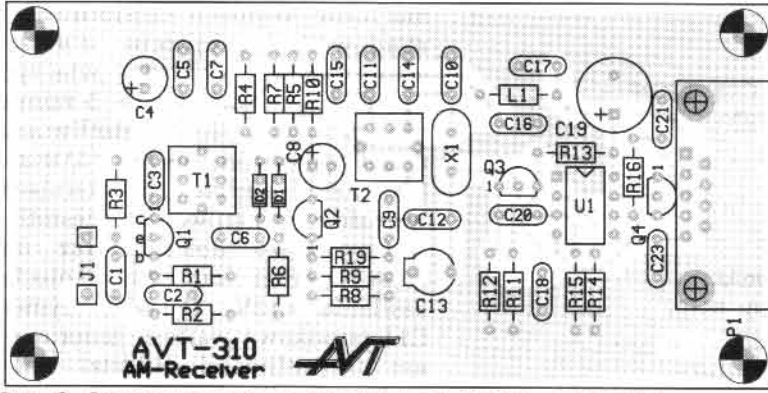
Jeśli częstotliwość generatora VCO dzielona jest za pomocą dzielnika częstotliwości przez n to pętla utrzymuje równość częstotliwości $f_i = f_o/n$, czyli $f_o = n \cdot f_i$.

Podsumowując te krótkie rozważania na temat pętli FARCz, można stwierdzić że w układzie tym zmiana częstotliwości któregoś z sygnałów dochodzących do detektora fazy, powoduje narastającą zmianę przesunięcia fazy między nimi. Przesunięcie fazy powoduje zmianę napięcia błędu z detektora fazy, które po odfiltrowaniu wyższych harmonicznych w filtrze dolnoprzepustowym i wzmocnieniu we wzmacniaczu błędu tak przestrajają VCO, aby częstotliwości dochodzące do detektora fazy były sobie równe.

Pętla FARCz odznacza się jeszcze tym, że w przypadku szybkich fluktuacji zboczy sygnału wejściowego (np. pod wpływem szumów odbieranych wraz z sygnałem) fluktuacje zboczy przebiegu z VCO



Rys. 8. Schemat układu do strojenia.



Rys. 9. Rozmieszczenie elementów na płycie odbiornika.

mogą być bardzo minimalne. Po-prawa zależy od stosunku pasma, w którym sygnał jest odbierany do pasma szumowego pętli FARCz.

WYKAZ ELEMENTÓW

Odbiornik

Rezystory

- R1: 1k Ω
 R2: 47k Ω
 R3: 220k Ω
 R4, R5: 1,2k Ω
 R6, R8: 7,5k Ω
 R7: 27k Ω
 R9, R12, R19: 620 Ω
 R10, R13: 120 Ω
 R11: 1,5M Ω
 R14, R15: 3,3k Ω
 R16: 160 Ω

Kondensatory

- C1, C5, C9: 47nF
 C2, C7, C16, C17, C18, C20: 220nF
 C3, C10, C11, C14, C15: 3,3nF
 C4: 10 μ F
 C6, C21, C23: 100nF
 C8: 4,7 μ F
 C12: C*
 C13: 3-15pF
 C19: 100 μ F
 C24: C
 C25: 10-40pF

Półprzewodniki

- D2, D1: BAY95
 Q1: BF240
 Q3, Q2: BF245
 Q4: BS107
 T1, T2: T104
 U1: ULY7710

Różne

- J1, J2: BNC
 L1: 82mH
 L2: 110zw
 L3: 16zw
 P1: DB9
 X1: 225kHz filtr pasmowy

Pasma szumowe pętli z filtrem o transmitancji $F(s)=1/(1+sT)$ (takiej jak we wzorcu na rys.5) wynosi:

$$B=K_0 K_d K/4 \text{ [Hz]} \quad (12)$$

Jest ono niezależne od stałej czasowej takiego filtru i dla wykonanego wzorca wynosi 5Hz.

Odbiornik częstotliwości wzorcowej 225kHz nadawanej przez radiostację Warszawa I oraz układ syntezy praktycznych wartości częstotliwości wzorcowych zostały praktycznie zrealizowane. Po upływie około 3 minut termostat, w którym umieszczony jest generator kwarcowy nagrzewa się do temperatury znamionowej i od tego czasu częstotliwość lokalnego generatora kwarcowego stabilizowana jest częstotliwością nośną radiostacji z dokładnością 10^{-10} .

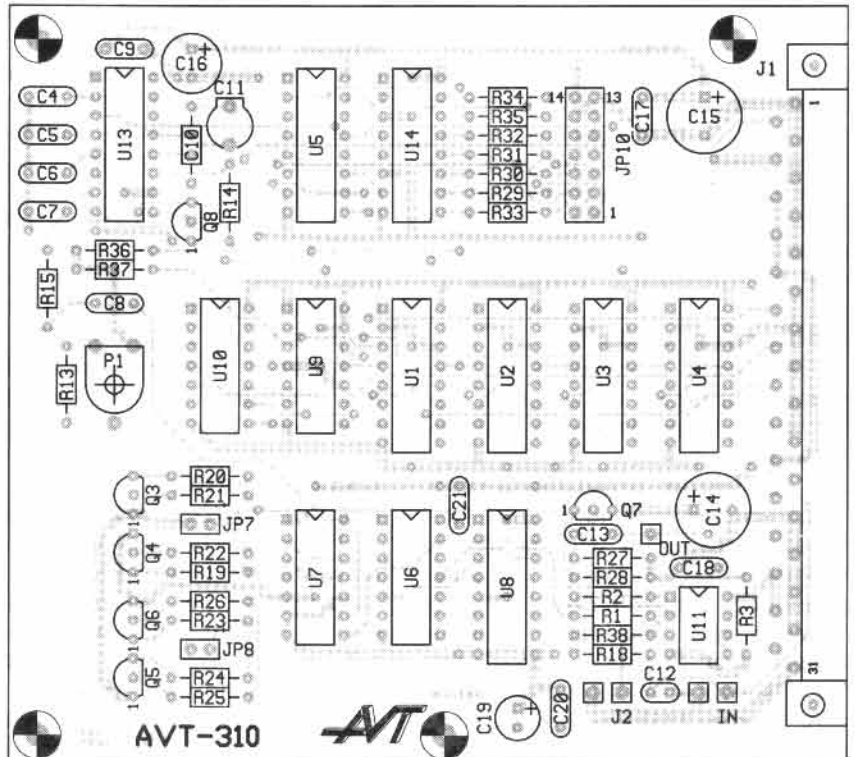
Montaż i uruchomienie

Na jakość odbieranego sygnału największy wpływ mają: antena odbiorcza oraz odległość odbiornika od nadajnika. Na odległość od źródła sygnału użytkownik praktycznie nie ma żadnego wpływu. Aby uzyskać możliwie największy sygnał w danym miejscu antena wykonana została w sposób specjalny. Rdzeń anteny stanowi 7 prętów ferrytowych o średnicy 10mm i długości 140mm umieszczonych wewnątrz koszulki termokurczliwej. Konfigurację prętów przedstawia rys.7.

Siedem prętów ferrytowych od typowych anten ferrytowych odbiorników radiowych należy wsunąć do koszulki termokurczliwej, a następnie nagrzać koszulkę tak, aby zostały przez nią ściśnięte ze sobą jak na rys.7. Na tak wykonanym rdzeniu należy nawinąć dwa uzwojenia:

- uzwojenie pierwotne drutem nawojowym o średnicy około 0,25mm. Uzwojenie to powinno mieć około 110 zwojów,
- uzwojenie wtórne drutem nawojowym o średnicy około 0,8mm. Uzwojenie to powinno mieć 16 zwojów.

Po wykonaniu anteny ferrytowej trzeba dostroić ją do częstotliwości 225kHz. W tym celu do



Rys. 10. Rozmieszczenie elementów na płycie syntezy.

WYKAZ ELEMENTÓW

Moduł pętli PLL

Rezystory

R1: 510Ω
 R2: 1,1kΩ
 R3, R15: 1kΩ
 R13: 2kΩ
 R14, R37: 470Ω
 R19, R20, R23, R24: 39Ω
 R21, R22, R25, R26: 51Ω
 R27: 1MΩ
 R28: 300Ω
 R29, R30, R31, R32, R33, R34, R35
 R36: 330Ω
 R38: 5,1kΩ

R18, P1: 10kΩ

Kondensatory

C4, C7, C9: 470nF
 C5, C6: 330nF
 C8: 680nF
 C10: 47pF
 C11: 10-40pF
 C12: 1μF

C13, C17, C18: 220nF

C15, C14: 220μF

C16: 100μF

C19: 47μF

C20: 47nF

C21: 100nF

Półprzewodniki

Q3, Q5, Q8: BS107

Q4, Q6: BS250

Q7: BF245B

U1, U2, U3, U4: 74LS390

U5: LS151

U6: 74LS393

U7: 74LS90

U8: 4046

U9: 74LS74

U10: 74F14

U11: LM358

U13: NE564

U14: 46

Różne

J2: RCA JACK

uzwojenia pierwotnego należy dołączyć trymer o pojemności 10-40pF oraz równoległe z nim kondensator o pojemności około 1,8nF. Ze względu na to, że różni wykonawcy anteny mogą uzyskać różne indukcyjności uzwojenia pierwotnego może się okazać, że kondensator ten może mieć inną wartość. Dostrojenia anteny można dokonać w układzie przedstawionym na **rys.8**.

Należy tak dobrać pojemność kondensatora C24, aby trymerem C25 można było uzyskać maksimum amplitudy na oscyloskopie przy częstotliwości pracy generatora równej 225kHz. Po tych czynnościach antena dostrojona jest do radiostacji Warszawa I.

Odbiornik 225kHz

Odbiornik montujemy na jednostronnej płycie drukowanej, której widok znajduje się na wkładce wewnątrz numeru. Rozmieszczenie elementów przedstawia **rys.9**.

Uruchomienie odbiornika jest bardzo proste. Do wejścia układu (kondensator C1) należy dołączyć generator sinusoidalny. Sygnały w wybranych punktach najlepiej obserwować za pomocą oscyloskopu. Ustawić częstotliwość generatora równą 225kHz. Kręcąc rdzeniem filtra T1 należy uzyskać maksimum amplitudy na kolektorze

tranzystora Q1. Kondensatory C3, C10, C11, C14, C15 mogą być np. ceramiczne. Po niewielkim odstrojeniu generatora należy ustawić taką wartość pojemności trymera C13, aby na rezystorze R12 uzyskać minimum sygnału (kompensacja wpływu pojemności oprawki filtra kwarcowego X1). Odłączyć generator od wejścia odbiornika i dołączyć uzwojenie wtórne dostrojonej wcześniej anteny ferrytowej. Ustawić antenę w takim kierunku, aby uzyskać maksimum sygnału na kolektorze tranzystora Q1 (ewentualnie skorygować dostrojenie filtra T1). W centrum Warszawy uzyskano na kolektorze tranzystora Q1 napięcie równe 6V_{pp}. Kręcąc rdzeniem filtra T2 uzyskać maksimum amplitudy na rezystorze R12. Po wykonaniu tych czynności odbiornik dostrojony jest do radiostacji Warszawa I.

Układ syntezy częstotliwości wzorcowych

Płytką drukowaną układu syntezy została zaprojektowana jako dwustronna (jej widok znajduje się na wkładce wewnątrz numeru), a rozmieszczenie elementów przedstawiono na **rys.10**.

Uruchomienie układu syntezy sprowadza się do uruchomienia pomocniczej pętli fazowej auto-

matycznej regulacji częstotliwości zbudowanej w oparciu o układ U13 (NE564). Należy włączyć układ i odczekać około 5 minut dla ustalenia się częstotliwości drgań generatora VCXO (5MHz). Następnie wejście IN sterujące wartością generowanej częstotliwości należy dołączyć raz do masy a drugi raz do napięcia zasilania +12V. Ustawić trymer C11 (środkową wartość generowanej częstotliwości 10MHz) i potencjometr P1 (zakres trzymania synchronizmu) tak, aby pętla była w synchronizmie dla obu napięć sterujących IN. Pętla jest w synchronizmie jeśli napięcia na rezystorze R28 i na wyjściu przetrzutnika U9B (PIN 9) mają taką samą częstotliwość (stabilny obraz z obu kanałów oscyloskopu). Po ustawieniu pętli FARCz dołączyć wejście IN generatora VCXO do wyjścia REF filtra dolnoprzepustowego R18, C12. Włączyć układ (antena ferrytowa ustawiona w optymalnym kierunku) i obserwować przebieg napięcia na wyjściu „DETEKTOR FAZY“ (rezystor R38). Po upływie około 3 minut gdy generator VCXO osiągnie częstotliwość znamionową (nagrzeje się termostat) napięcie na wyjściu „DETEKTOR FAZY“ powinno być falą prostokątną o częstotliwości 12,5kHz. Oznacza to, że układ syntezy pracuje prawidłowo, a częstotliwości wyjściowe wzorca stabilizowane są radiostacją Warszawa I.

Roman Nowak