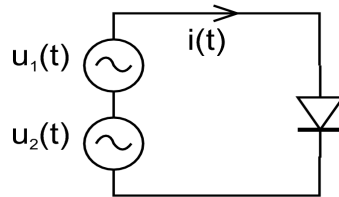


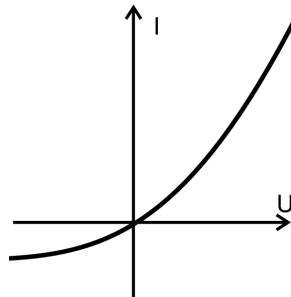
Mieszacze

Najprostszy mieszacz składa się z elementu nieliniowego, do którego doprowadzone są dwa sygnały. Przykładowy taki układ jest pokazany na rysunku 1.



Rysunek 1: Najprostszy mieszacz diodowy

Elementem nieliniowym jest tu dioda półprzewodnikowa, której charakterystyka prądowo-napięciowa jest przedstawiona na rysunku 2.



Rysunek 2: Charakterystyka prądowo-napięciowa diody w mieszaczu

Charakterystykę taką można aproksymować za pomocą funkcji potęgowej:

$$i = A \cdot u + B \cdot u^2$$

Jeśli oba sygnały są przebiegami sinusoidalnymi:

$$u_1(t) = U_1 \cos(\omega_1 t)$$

$$u_2(t) = U_2 \cos(\omega_2 t)$$

to prąd płynący przez diodę można opisać wyrażeniem:

$$i(t) = A[U_1 \cos(\omega_1 t) + U_2 \cos(\omega_2 t)] + B[U_1 \cos(\omega_1 t) + U_2 \cos(\omega_2 t)]^2$$

dokonywając przekształceń matematycznych można go przekształcić do postaci:

$$i(t) = A[U_1 \cos(\omega_1 t) + U_2 \cos(\omega_2 t)] + B[U_1^2 \cos^2(\omega_1 t) + U_2^2 \cos^2(\omega_2 t) + 2U_1 U_2 \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t)]$$

i dalej wykonując odpowiednie przekształcenia trygonometryczne

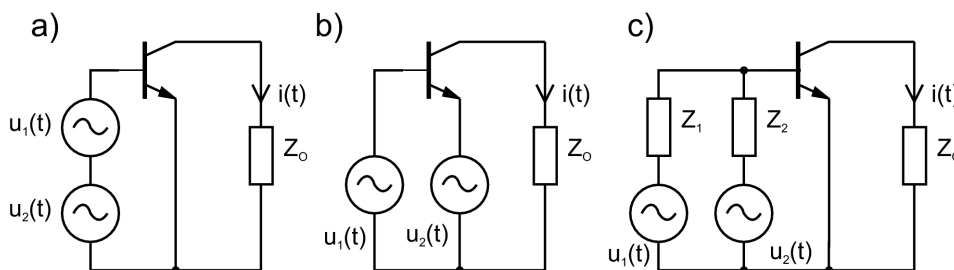
$$i(t) = AU_1 \cos(\omega_1 t) + AU_2 \cos(\omega_2 t) + B \frac{U_1^2}{2} + B \frac{U_2^2}{2} + B \frac{U_1^2}{2} \cos(2\omega_1 t) + B \frac{U_2^2}{2} \cos(2\omega_2 t) + BU_1 U_2 [\cos(\omega_1 + \omega_2)t + \cos(\omega_1 - \omega_2)t]$$

pierwsze dwa składniki to prąd proporcjonalny do sygnału pobudzającego, kolejne dwa stanowią prąd wyprostowany (składowa stała), dwa następne to harmoniczne sygnałów pobudzających. Ostatni składnik zawiera dwie składowe o częstotliwościach równych odpowiednio sumie i różnicy częstotliwości sygnałów wejściowych. Są to produkty przemiany, stanowiące użyteczny sygnał wyjściowy mieszacza.

W typowych warunkach pracy mieszacza w odbiorniku lub nadajniku radiowym jeden z tych sygnałów ma zwykle niewielką amplitudę i może być modulowany podczas gdy drugi jest niemodulowaną falą sinusoidalną o stałej, odpowiednio dużej, amplitudzie i jest nazywany sygnałem heterodyny. W takiej sytuacji sygnał wyjściowy jest proporcjonalny do pierwszego z tych sygnałów i zachowuje jego modulację (możliwe, że z odwróceniem widma w częstotliwości).

Obecnie takie mieszacze diodowe stosuje się bardzo rzadko, przede wszystkim w zakresie wysokich częstotliwości mikrofalowych, gdzie diody są jedynymi elementami pozwalającymi na

realizację mieszacza. Najczęściej diodę mieszającą można zastąpić tranzystorem, przez co uzyskuje się dodatkowo wzmocnienie sygnału podczas przemiany. Mieszacz przedstawiony na rysunku 3a działa analogicznie jak opisany powyżej mieszacz diodowy wykorzystując nieliniowość złącza baza-emiter tranzystora bipolarnego. Prąd $i(t)$ z równań powyżej jest prądem bazy tranzystora a w obwodzie kolektora uzyskuje się prąd wzmocniony. Podobny mieszacz można też zrealizować wykorzystując tranzystory polowe. Uzyskiwane przy optymalnym doborze poziomu sygnału heterodyny wzmocnienie mieszacza tranzystorowego jest o kilka decybeli mniejsze niż wzmocnienie tego samego tranzystora pracującego jako wzmacniacz.



Rysunek 3: Mieszacze tranzystorowe

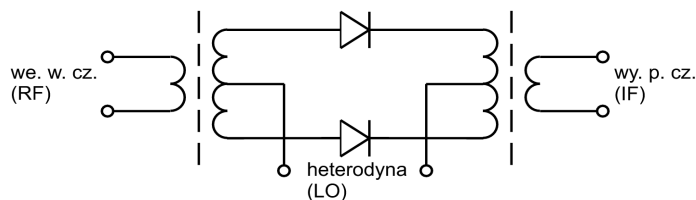
Często szeregowe połączenie źródeł sygnałów wejściowego i heterodyny jest kłopotliwe gdyż wymaga np. stosowania transformatorów. Aby tego uniknąć można jeden z sygnałów doprowadzić do emitera tranzystora (rys. 3b), dzięki temu oba źródła sygnału mają jedną z końcówek uziemioną. Tranzystor dla jednego z sygnałów pracuje wtedy w układzie ze wspólnym emiterem a dla drugiego w układzie ze wspólną bazą. Działanie mieszacza nie ulega istotnej zmianie gdyż w dalszym ciągu do złącza baza-emiter przyłożona jest suma obu sygnałów.

Innym rozwiązaniem jest dołączenie obydwu źródeł sygnału przez pewne impedancje separujące, jak na rys 3c. Mogą one być zależne od częstotliwości (obwody rezonansowe) przez co redukuje się przenikanie sygnału pomiędzy źródłami.

Mieszacze zrównoważone

Najbardziej istotną wadą wszystkich powyższych mieszaczy jest występowanie w widmie sygnału wyjściowego wielu niepożądanych składowych, a zwłaszcza sygnału wejściowego, sygnału heterodyny oraz ich harmonicznych. Ponadto występuje w nich bezpośrednie przenikanie sygnału pomiędzy źródłami sygnałów wejściowego i heterodyny.

Zjawiska te są w znacznym stopniu zredukowane w mieszaczach zrównoważonych, zawierają one dwa lub cztery elementy nieliniowe. W przedstawionym na rysunku 4 mieszaczu dwudiodowym sygnał wejściowy jest doprowadzony do portu RF, a sygnał wyjściowy odbierany z portu IF.

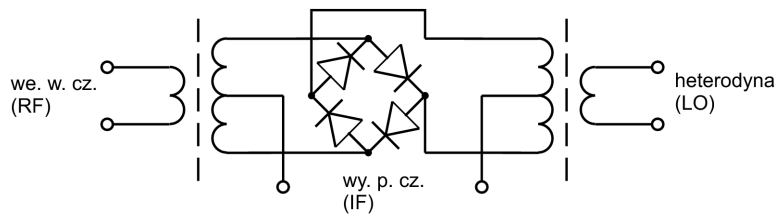


Rysunek 4: Mieszacz zrównoważony dwudiodowy

Aby uprościć analizę, można przyjąć że sygnał heterodyny doprowadzony do portu LO jest na tyle duży, że obie diody są przełączane od stanu pełnego przewodzenia, gdzie mają znikomą rezystancję, do stanu zaporowego, gdzie stanowią przerwę w obwodzie. W tej sytuacji sygnał wyjściowy jest kluczowany w takt zmian polaryzacji sygnału heterodyny. W widmie takiego sygnału występują produkty przemiany sumacyjny i różnicowy oraz sygnał o częstotliwości wejściowej. Jeśli diody będą miały identyczne charakterystyki a uzwojenia transformatorów będą identyczne to w obwodzie wyjściowym zostaną wytłumione składowe o częstotliwości heterodyny oraz jej harmonicznych. Taki mieszacz jest nazywany mieszaczem pojedynczo zrównoważonym.

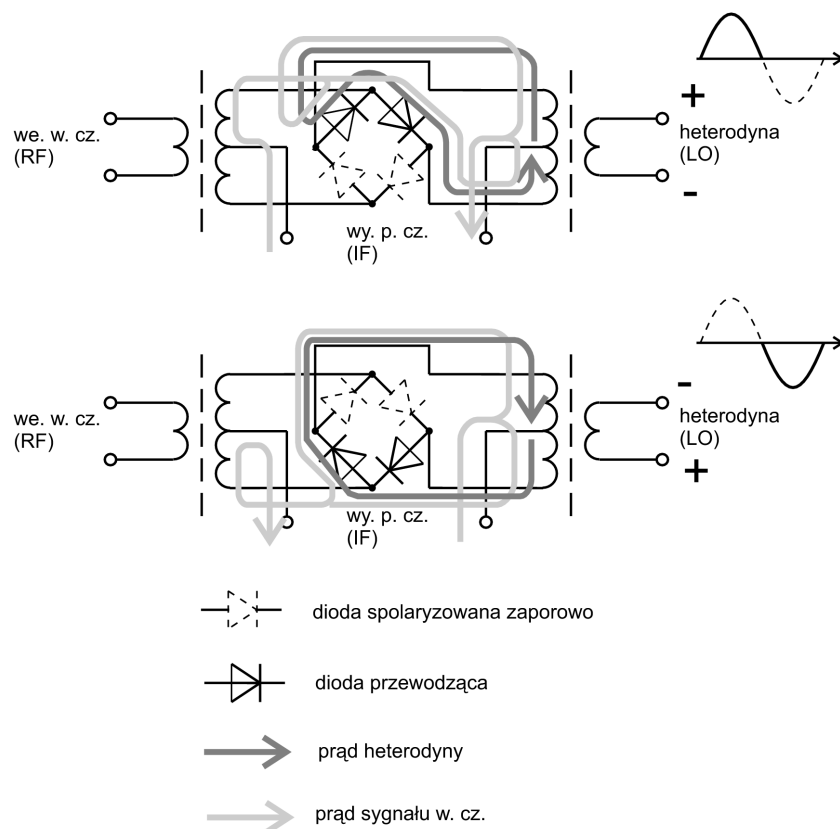
Można też zauważyć, że sygnał heterodyny nie przeniknie także do portu wejściowego a sygnał wejściowy do portu heterodyny, co zapewnia wzajemną izolację obu źródeł sygnału.

Zdolność tłumienia zarówno sygnału wejściowego jak i sygnału heterodyny ma przedstawiony na rysunku 5 czterodiodowy mieszacz pierścieniowy należący do grupy mieszaczy podwójnie zrównoważonych.



Rysunek 5: Mieszacz pierścieniowy

Podobnie jak poprzednio można założyć, że sygnał heterodyny przełącza diody od stanu pełnego przewodzenia do stanu zaporowego. W tych warunkach przewodzące diody łączą jedną z połówek transformatora wejściowego z portem wyjściowym, przy czym zmiana polaryzacji sygnału heterodyny powoduje zmianę kierunku przepływu prądu wyjściowego (rys. 6)



Rysunek 6: Działanie mieszacza pierścieniowego

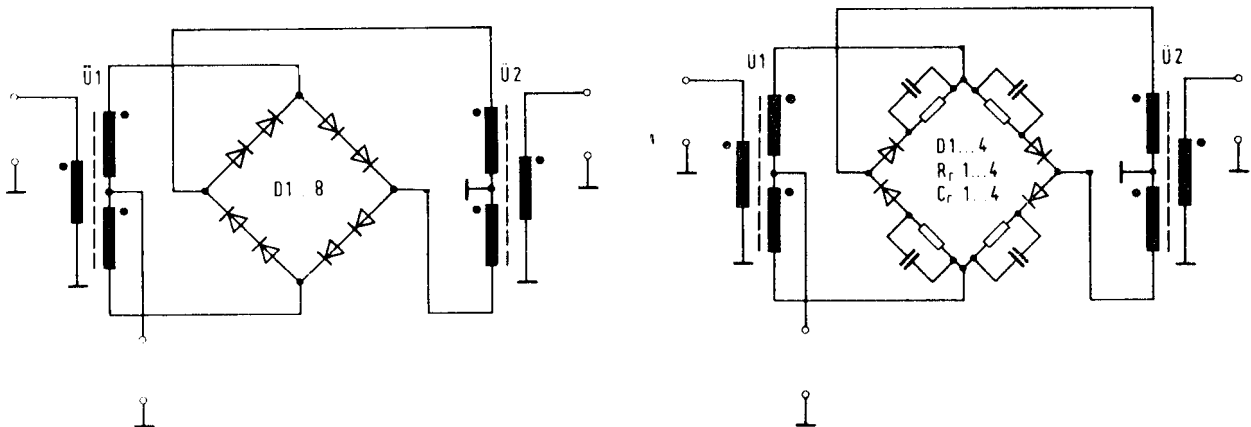
W efekcie więc mieszacz dokonuje mnożenia sygnału wejściowego przez znak sygnału heterodyny i na wyjściu pojawiają się jedynie produkty przemiany (oraz także produkty przemiany z nieparzystymi harmonicznymi sygnału heterodyny). Ze względu na to, że sygnał wejściowy jest iloczynem sygnału wejściowego i sygnału heterodyny, mieszacze podwójnie zrównoważone nazywane są także mieszaczami iloczynowymi.

Charakterystyczną cechą diodowego mieszacza pierścieniowego jest możliwość zmiany przeznaczenia poszczególnych jego portów. Przykładowo można sygnał wejściowy podać na port IF a sygnał wyjściowy odebrać z portu RF. Takie połączenie może być przydatne jeśli mieszacz jest użyty jako modulator amplitudy z wytłumioną falą nośną. Unika się wtedy ograniczeń związanych z dolną częstotliwością graniczną zastosowanych w mieszaczu transformatorów.

Diodowe mieszacze pierścieniowe produkowane są w postaci gotowych podzespołów zamkniętych w obudowach z 4-8 wyprowadzeniami. Podstawowe modele pracują w paśmie

częstotliwości od 1 do 500MHz i wymagają sygnału heterodyny o poziomie +7dBm (5mW). Stosowane są w nich diody Schottky'ego o krótszych czasach przełączania niż zwykłe złączowe diody krzemowe. Tłumienie sygnału podczas przemiany wynosi około 5-7dB. Produkowane są też wersje przeznaczone do pracy w wyższych pasmach częstotliwości do 4GHz.

Maksymalna moc sygnału wejściowego takiego mieszacza (punkt 1dB kompresji) wynosi około +1dBm, jest to więcej niż w typowym mieszaczu tranzystorowym. Przekroczenie tego poziomu powoduje, że jedna z diod, które powinny być w stanie zatkania, zaczyna przewodzić obcinając i zniekształcając sygnał. W mieszaczach, które muszą mieć zdolność przenoszenia silniejszych sygnałów stosuje się szeregowe połączenie od 2 do 8 diod w każdej sekcji pierścienia co tym samym stopniu zwiększa ich całkowite napięcie przewodzenia (rys 7a).



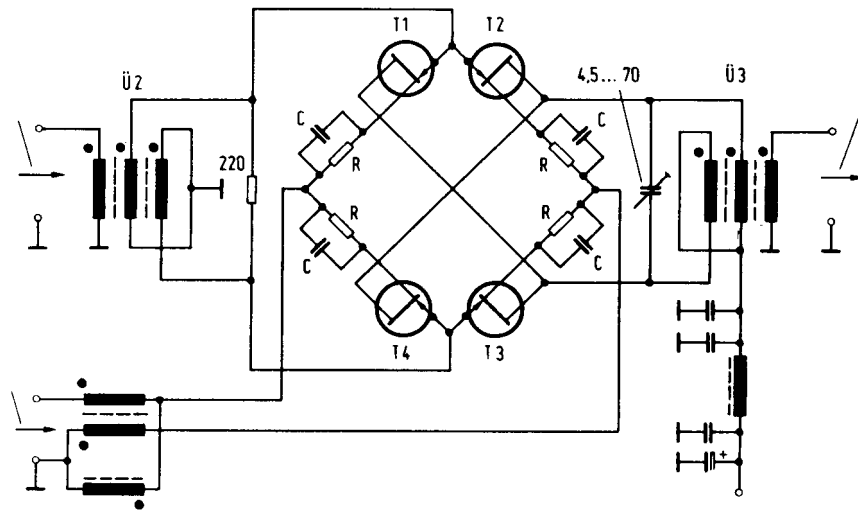
Rysunek 7: Wielkosygnałowy mieszacz pierścieniowy a) z diodami połączonymi szeregowo, b) z obwodami RC

Innym wariantem jest zastosowanie dwójników RC, na których odkłada się napięcie stałe wyprostowane przez diody (rys 7b). W obu przypadkach mieszacz wymaga znacznie większego poziomu sygnału heterodyny, w niektórych konstrukcjach wymagana moc tego sygnału może dochodzić do +30dBm (1W). Mieszacze takie są stosowane w stopniach przemiany profesjonalnych odbiorników krótkofalowych.

Osiągane tłumienie niepożądanych sygnałów na wyjściu mieszacza osiąga wartości dochodzące do około 40-50dB i wynika z nieidealnego dopasowania charakterystyk poszczególnych diod i uzwojeń transformatorów a przede wszystkim z asymetrii pojemności pasozytniczych w układzie. Z tego ostatniego powodu tłumienie zazwyczaj maleje ze wzrostem częstotliwości.

Mieszacze zrównoważone mogą być też budowane z tranzystorów polowych lub bipolarnych. Tranzystory polowe (JFET lub MOSFET) mogą być wykorzystane do budowy zarówno mieszaczy pasywnych, wtedy tranzystory pracują jako klucze bez zasilania prądem stałym, lub aktywnych, gdzie tranzystory pracują jako wzmacniacze. Przykładowy mieszacz aktywny z tranzystorami JFET jest przedstawiony na rysunku 8. Mieszacz z tranzystorami polowymi pozwala osiągnąć parametry wielkosygnałowe porównywalne z najlepszymi mieszaczami diodowymi przy niższej wymaganej mocy heterodyny. Aby zapewnić dobre zrównoważenie mieszacza, poszczególne tranzystory powinny mieć możliwie jednakowe parametry. W przypadku użycia elementów dyskretnych konieczne jest ich dobieranie.

Stosunkowo dobre mieszacze można zbudować z tanich i łatwo dostępnych kluczy i multiplexerów analogowych CMOS. Selekcjonowane układy z serii 74HC pozwalają zbudować mieszacz pracujący do częstotliwości około 20-30MHz i o poziomie IP3 przekraczającym +25dBm.

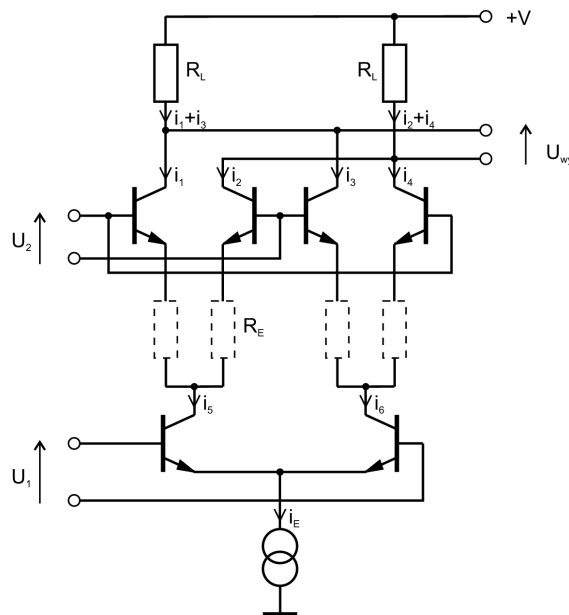


Rysunek 8: Aktywny mieszacz zrównoważony z tranzystorami JFET

Mieszacz w układzie Gilberta

Przedstawione wcześniej mieszacze zrównoważone wymagają użycia trudnych w masowej produkcji transformatorów w. cz. W związku z tym nie można ich zastosować w układach scalonych a ich koszt produkcji jest stosunkowo wysoki.

Najłatwiejszym do scalenia rodzajem mieszacza jest mieszacz w układzie Gilberta. Układ ten został opatentowany jako szybki układ mnożący sygnały analogowe, ale po pewnych uproszczeniach znalazł zastosowanie jako mieszacz w technice radiowej. Składa się on z trzech odpowiednio połączonych par różnicowych i dzięki ich zdolności do tłumienia sygnału wspólnego nie wymaga transformatorów symetryzujących.



Rysunek 9: Mieszacz w układzie Gilberta

Mieszacze takie są powszechnie stosowane w układach scalonych przeznaczonych zarówno do sprzętu powszechnego użytku jak i do sprzętu profesjonalnego. Jeśli mieszacz ma pracować z większymi sygnałami to w obwodach emiterów tranzystorów umieszcza się rezystory linearyzujące. Poprawiają one liniowość kosztem zmniejszenia wzmocnienia. Rezystory te powinny być zastosowane w emiterach tych tranzystorów, do baz których doprowadzony jest sygnał wejściowy. W mieszaczu z rysunku 8 sygnał wejściowy powinien być dołączony do górnych tranzystorów a sygnał heterodyny do dolnych.