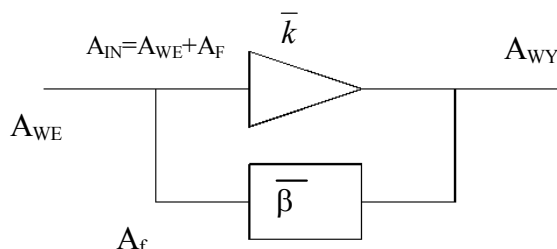


WYKŁAD 11

Sprężenie zwrotne.

Sprężeniem zwrotnym nazywa się oddziaływanie skutku na przyczynę. W technice stosuje się je do uzyskania pewnych własności, trudnych do osiągnięcia inną drogą.

Podstawowym układem elektronicznym, w którym stosuje się sprzężenie zwrotne jest wzmacniacz. Układ sprzężenia zwrotnego dokonuje analizy (próbki) sygnału wyjściowego i wytwarza sygnał sprzężenia zwrotnego, który dodaje się do sygnału wejściowego. Jeżeli wzmocnienie wzmacniacza jest opisywane zależnością : $\bar{k} = A_{WY} / A_{IN}$, a działanie układu sprzężenia zwrotnego parametrem : $\bar{\beta} = A_f / A_{WY}$, to ponieważ $A_{IN} = A_{WE} + A_f$, można łatwo pokazać, że wypadkowe wzmocnienie układu ze sprzężeniem zwrotnym wyrażone jest przez :



$$\bar{k}_f = \frac{A_{WY}}{A_{WE}} = \frac{\bar{k}}{1 - \bar{\beta}k}$$

Ponieważ wzmacniacz i układ sprzężenia zwrotnego przesuwają fazę, więc :

$\bar{k} = k \exp(j\phi)$ oraz $\bar{\beta} = \beta \exp(j\psi)$. Wówczas wzór na wzmocnienie wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym przyjmuje postać :

$$k_f = \frac{k(\cos\phi + j \sin\phi)}{1 - k\beta[\cos(\phi + \psi) + j \sin(\phi + \psi)]}$$

W szczególnym wypadku, gdy suma przesunięć fazowych wprowadzanych przez układ sprzężenia zwrotnego i wzmacniacz wynosi $\phi + \psi = 2n\pi$, wyrażenie to upraszcza się do postaci :

$$k_f = \frac{\bar{k}}{1 - k\beta}$$

Mamy wtedy do czynienia z **dodatnim sprzężeniem zwrotnym**. Prowadzi ono do zwiększenia wzmocnienia wzmacniacza.

W przypadku, gdy : $\phi + \psi = (2n+1)\pi$ otrzymujemy :

$$k_f = \frac{\bar{k}}{1 + k\beta}$$

Ten typ sprzężenia nazywa się **ujemnym**. Powoduje ono zmniejszenie efektywnego wzmocnienia wzmacniacza.

Za pomocą sprzężenia zwrotnego można wpływać na własności urządzeń elektronicznych.

Jedną z najważniejszych jest **stabilność wzmocnienia**. Określa się ją za pomocą parametru bezwzględnego : $\gamma = dk_f / dk$, lub jako wrażliwość względną : $\gamma_R = \frac{dk_f / k_f}{dk / k}$.

W przypadku, gdy mamy do czynienia z układem ze sprzężeniem zwrotnym, wówczas :

$$\gamma = \frac{1}{(1 - \bar{\beta}k)^2} \quad \text{oraz} \quad \gamma_R = \frac{1}{1 - \bar{\beta}k}.$$

Dla dodatniego sprzężenia zwrotnego otrzymujemy :

$$\gamma = \frac{1}{(1 - \bar{\beta}k)^2} \quad \text{oraz} \quad \gamma_R = \frac{1}{1 - \bar{\beta}k},$$

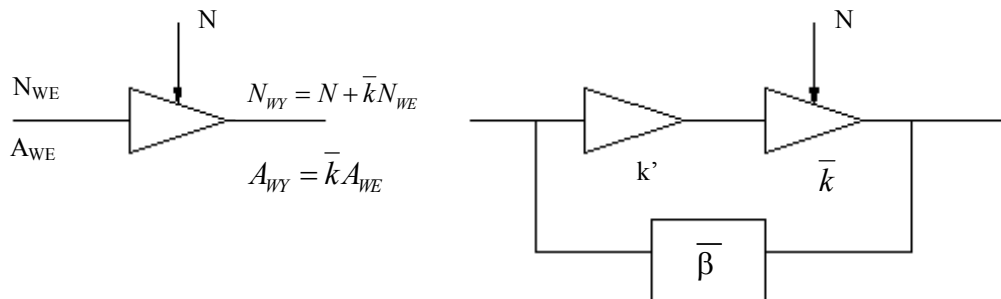
czyli **stabilność wzmacniacza ulega zmniejszeniu** w stosunku do stabilności wzmacniacza bez sprzężenia. Natomiast gdy mamy do czynienia z ujemnym sprzężeniem zwrotnym :

$$\gamma = \frac{1}{(1 + \bar{\beta}k)^2} \quad \text{oraz} \quad \gamma_R = \frac{1}{1 + \bar{\beta}k}.$$

Wynika stąd, że **za pomocą ujemnego sprzężenia zwrotnego możemy poprawić stabilność układu.**

Szczególnie, gdy wzmocnienie wzmacniacza jest bardzo duże ($k_f \rightarrow \infty$), w przypadku ujemnego sprzężenia zwrotnego $k_f \rightarrow 1/\bar{\beta}$. Parametry układu są więc wyznaczone tylko przez parametry układu sprzężenia zwrotnego, a te mogą być bardzo stabilne, gdyż obwody sprzężenia zwrotnego często buduje się wyłącznie z elementów biernych.

Za pomocą ujemnego sprzężenia zwrotnego można również **poprawić własności szumowe** układu elektrycznego : zredukować pojawiające się na jego wyjściu niepożądane sygnały jak szумы, zakłócenia i zniekształcenia. Zakładamy, że szумы i zakłócenia nie dostają się do wzmacniacza wraz z sygnałem wejściowym, lecz powstają w wyniku niedoskonałości układu w jego wnętrzu. Szumowe własności układu elektronicznego opisuje współczynnik szumów :



wzmacniacz zakłócający

wzmacniacz zakłócający z korekcją

$$F = \frac{A_{WE} / N_{WE}}{A_{WY} / N_{WY}}$$

Współczynnik szumów układu idealnego (niewprowadzającego zakłóceń) wynosi 1. Tworząc obwód złożony ze wzmacniacza korekcyjnego (k') wzmacniającego sygnał wejściowy dla badanego wzmacniacza oraz pętli sprzężenia zwrotnego uzyskujemy dla sygnału wejściowego wzmocnienie efektywne :

$$\frac{k' \bar{k}}{1 - \bar{\beta} k k'} = \bar{k}$$

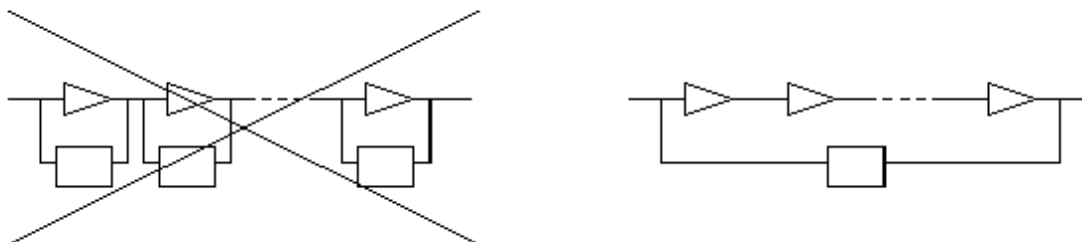
Jednak dla zakłóceń i szumów wytwarzanych we wzmacniaczu wzmocnienie efektywne wynosi :

$$\overline{k}_N = \frac{\overline{k}}{1 - \beta k k'}$$

Można pokazać, że współczynnik szumów wynosi wtedy :

$$F = 1 + \frac{N}{k' N_{WE}}$$

W przypadku **ujemnego sprzężenia zwrotnego**, by uzyskać identyczne wzmocnienie układu z korekcją i układu bez korekcji, wzmocnienie wzmacniacza korekcyjnego powinno być $k' > 1$, dzięki czemu uzyska się **współczynnik szumów mniejszy** niż dla układu bez korekcji : ($F = 1 + N/N_{WE}$). Gdy zastosowane będzie **dodatnie sprzężenie zwrotne** należy użyć tłumika w miejsce wzmacniacza korekcyjnego, (czyli $0 < k' < 1$), ale **wtedy współczynnik szumów ulegnie zwiększeniu**.



Powyższe rozważania sugerują, że w złożonych układach elektronicznych powinno się, o ile to możliwe, stosować jedną **wspólną pętlę silnego ujemnego sprzężenia zwrotnego**, obejmującego całość układu. Należy szczególnie starannie dbać o wysoką jakość wejściowych stopni elektronicznych, gdyż im dalej od wejścia układu pojawiają się szумы i zniekształcenia, tym łatwiej jest wyeliminować je z sygnału wyjściowego.

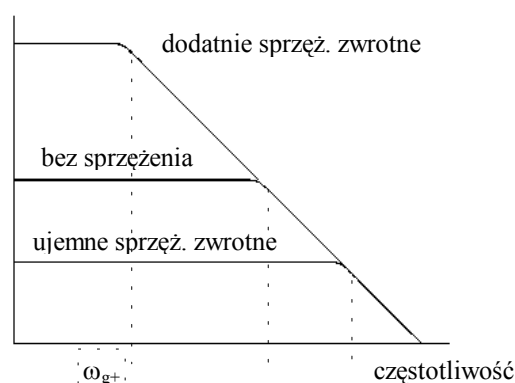
Za pomocą sprzężenia zwrotnego można także korygować **własności częstotliwościowe** układów elektronicznych. Jak wiadomo, ze względu na elementy reaktancyjne, efekt Millera itd. charakterystykę częstotliwościową układu można opisać

wzorem :
$$\overline{k}(\omega) = \frac{\overline{k}_0}{1 + j\omega/\omega_g}$$

Jeżeli wzmacniacz pracuje w układzie ze sprzężeniem zwrotnym :

$$\begin{aligned} \overline{k}_f(\omega) &= \frac{\overline{k}(\omega)}{1 - \beta \overline{k}(\omega)} = \\ &= \frac{\overline{k}_0}{1 - \beta \overline{k}_0 / (1 + j\omega/\omega_g)} = \frac{\overline{k}_0}{1 - \beta \overline{k}_0 / (1 + j\omega/\omega_0)} \end{aligned}$$

wzmocnienie



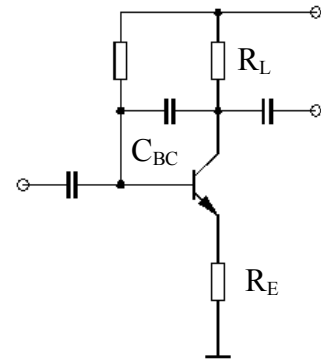
Oznaczając : $k_{f0} = \bar{k}_0 / (1 - \beta \bar{k}_0)$ oraz : $\omega_{fg} = \omega_g (1 - \beta \bar{k}_0)$ otrzymujemy znaną postać na wzmacnienie układu : $\bar{k}_f(\omega) = \frac{\bar{k}_{f0}}{1 + j\omega/\omega_{fg}}$. W przypadku gdy zastosowane zostanie **ujemne**

sprężenie zwrotne następuje zmniejszenie maksymalnego wzmacnienia wzmacniacza do wartości k_- lecz równocześnie **zwiększenie częstotliwości granicznej** do wartości ω_- . **Dodatnie sprężenie zwrotne** wywoła zwiększenie maksymalnego wzmacnienia do wartości k_+ lecz jednocześnie **pasmo przenoszenia wzmacniacza ulegnie ograniczeniu** do częstotliwości ω_+ .

Podsumowując, można stwierdzić, że ujemne sprężenie zwrotne pozwala korzystnie modyfikować własności aparatury elektronicznej : zwiększać jej stabilność, redukować współczynnik szumów, poszerzać pasmo częstotliwości. Zmniejszenie efektywnego współczynnika wzmacnienia dla dzisiejszej techniki elektronicznej nie jest w zasadzie przeszkodą.

Ujemne sprężenie zwrotne stosuje się w układach tranzystorowych do stabilizacji punktu pracy - za pomocą rezystora R_E umieszczanego w emiterze. Występuje ono także pod postacią efektu Millera, (pojemność C_{BK}) powodującego ograniczenie wzmacnienia dla wysokich częstotliwości.

Dodatnie sprężenie zwrotne oddziałuje niekorzystnie na układ i we współczesnych urządzeniach elektronicznych jest w zasadzie stosowane tylko w generatorach.



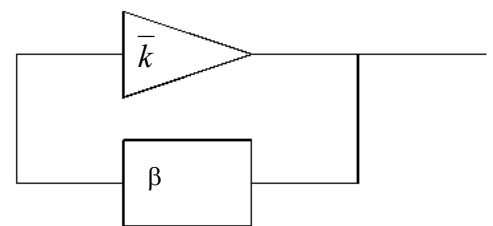
Generatory.

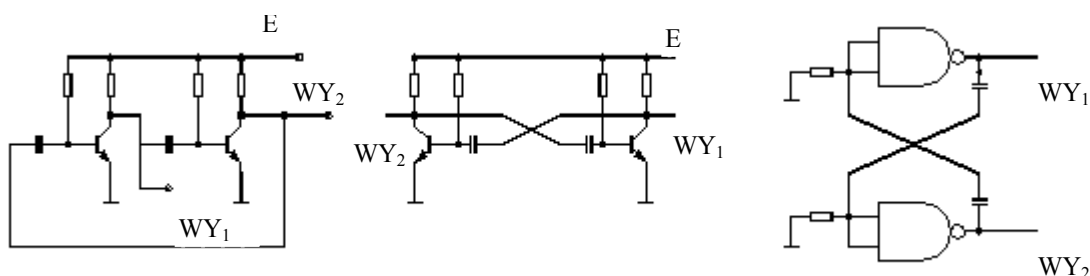
Generatory buduje się jako **wzmacniacze z silnym dodatnim sprężeniem** zwrotnym. Ponieważ wzmacnienie takiego układu opisywane jest wzorem :

$$k_f = \frac{\bar{k}}{1 - k\beta}$$

dla $k\beta \rightarrow 1$ wzmacnienie efektywne układu $k_f \rightarrow \infty$.

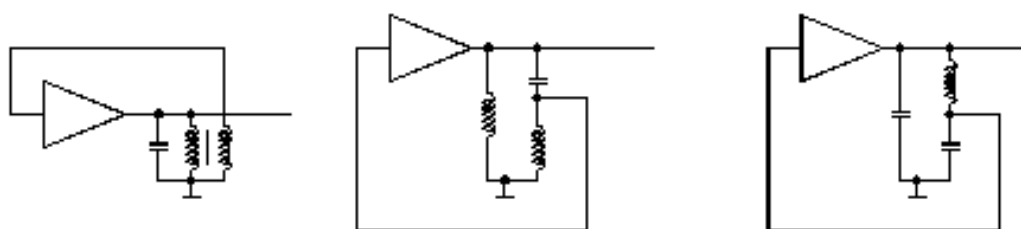
Jednym z najpowszechniej znanych układów generujących jest **multiwibrator astabilny**, który może być zbudowany z połączonych w pętli dwóch wzmacniaczy o wspólnym emiterze. Ponieważ każdy z nich odwraca fazę o 180° , w układzie mamy spełnione warunki dla dodatniego sprężenia zwrotnego. Układ ten może być również zbudowany z dwóch bramek NAND. Jego działanie jest analogiczne do układu tranzystorowego.





Jeżeli **generator** ma wytwarzać przebiegi **sinusoidalne**, należy ograniczyć pasmo częstotliwości, dla których w układzie może zaistnieć dodatnie sprzężenie zwrotne. Załóżmy, że każdy ze wzmacniaczy przedstawionych poniżej odwraca fazę o 180° . Istnieją trzy podstawowe sposoby (Meissner'a, Hartley'a i Colpits'a) połączenia z nimi układów rezonansowych w taki sposób, by transmitowały one sygnały z wyjścia do wejścia w pętli dodatniego sprzężenia zwrotnego. Ponieważ warunek sprzężenia zwrotnego jest spełniony tylko dla częstotliwości rezonansowej ω_0 , układ wytwarza przebiegi sinusoidalne o tej częstotliwości.

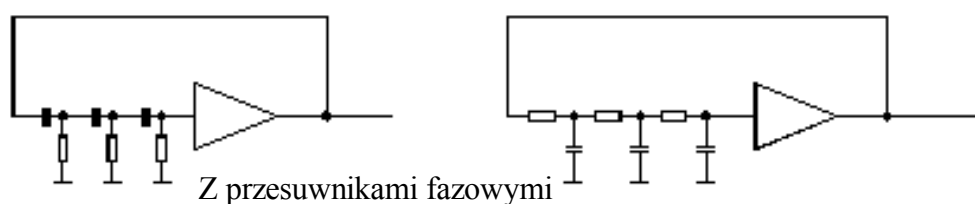
Generatory drgań sinusoidalnych (wszystkie wzmacniacze odwracają fazę)



Meissner'a

Hartley'a

Colpits'a



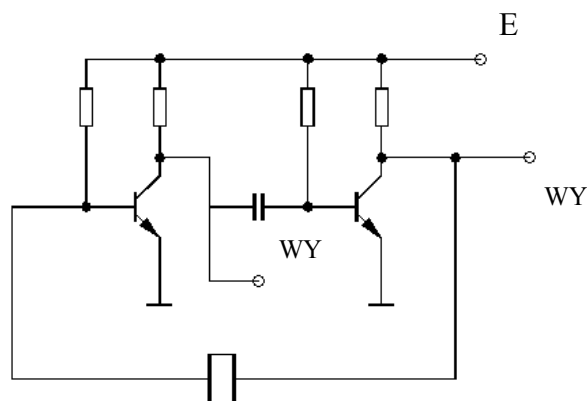
Z przesuwnikami fazowymi

W innych generatorach dodatnie sprzężenie zwrotne jest uzyskiwane dzięki zastosowaniu przesuwника fazowego złożonego z trzech układów różniczkujących lub całkujących. Oscylacje pojawią się na częstotliwości, dla której przesunięcie fazowe wynosi 180° . Oczywiście, można także budować generatory ze wzmacniaczami nieodwracającymi fazę.

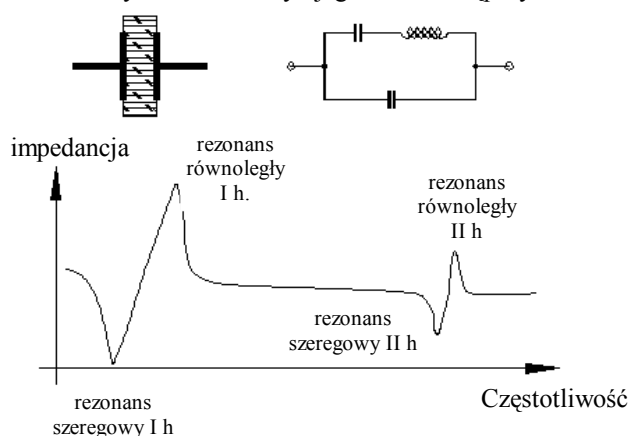
Stabilność częstotliwości ($\Delta\nu/\nu$)

uzyskiwana za pomocą układów ze sprzężeniem RLC zwykle nie przekracza 10^{-4} . Znacznie bardziej stabilne są drgania układów mechanicznych, szczególnie płyt kwarcowych, ze względu na ich niewielki współczynnik rozszerzalności termicznej. Krysztály kwarcu mają własności **piezoelektryczne**, tzn. że odkształcenia krysztálu indukują na ścianach napięcia

elektryczne. Efekt piezoelektryczny jest odwracalny : przykładanie napięć do ścian krysztálu piezoelektrycznego powoduje jego odkształcanie. Dzięki temu drgania krysztáłow piezoelektrycznych można sprzężać z drganiami układów elektrycznych. Z punktu widzenia własności elektrycznych **oscylator kwarcowy** można rozważać jako zastępczy układ rezonansowy szeregowo-równoległy.

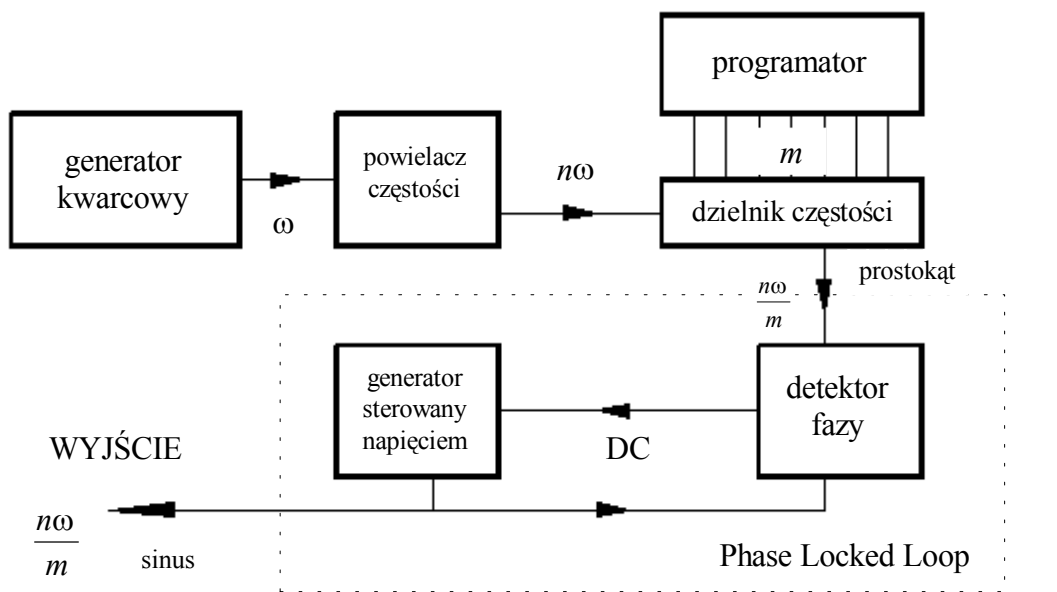


oscylator kwarcowy i jego układ zastępczy



Oscylator kwarcowy współpracujący w pętli dodatniego sprzężenia zwrotnego ze wzmacniaczem (oscylującym w rezonansie szeregowym lub odpowiednio równoległym) tworzy generator kwarcowy, którego **stabilność może przekraczać 10^{-7}** .

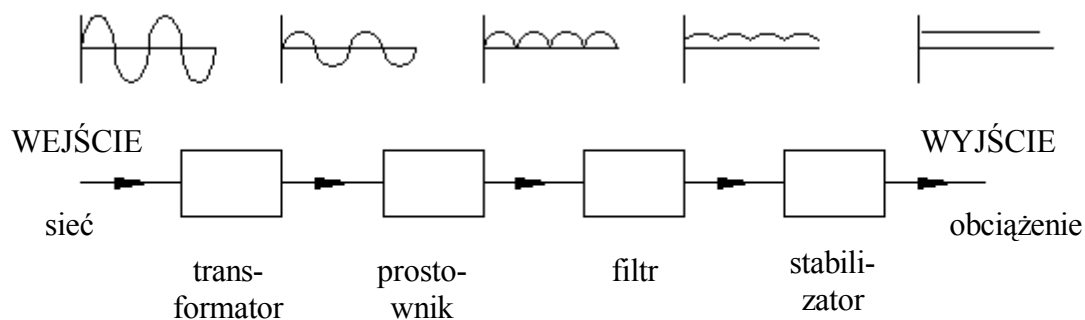
Generatory kwarcowe są w zasadzie nieprzestrjalne. Jednak za pomocą techniki cyfrowej (dzielenia częstotliwości) lub techniki nieliniowej (mnożenia i sumowania częstotliwości) buduje się generatory o częstotliwości regulowanej zwane **syntezernami**, charakteryzujące się przy tym stabilnością generatora wzorcowego. Układy te są następnie przy użyciu techniki PLL (Phase Locked Loop) sprzęgane z wyjściowymi generatorami drgań sinusoidalnych. **Syntezery** są dzisiaj powszechnie stosowane w nauce i telekomunikacji, w tym także w odbiornikach radiowych i telewizyjnych wyższej klasy.



Zasilacze.

Rolą zasilacza jest dostarczenie energii elektrycznej do układu odbiorczego w odpowiedniej postaci. Najczęściej wymagane jest, by zasilacz był źródłem napięciowym, niekiedy jest on ogranicznikiem prądu (źródłem prądowym), czasami spełnia też inne, dodatkowe funkcje, jak zabezpieczenie przed przegrzaniem, zapaleniem, porażeniem itp.

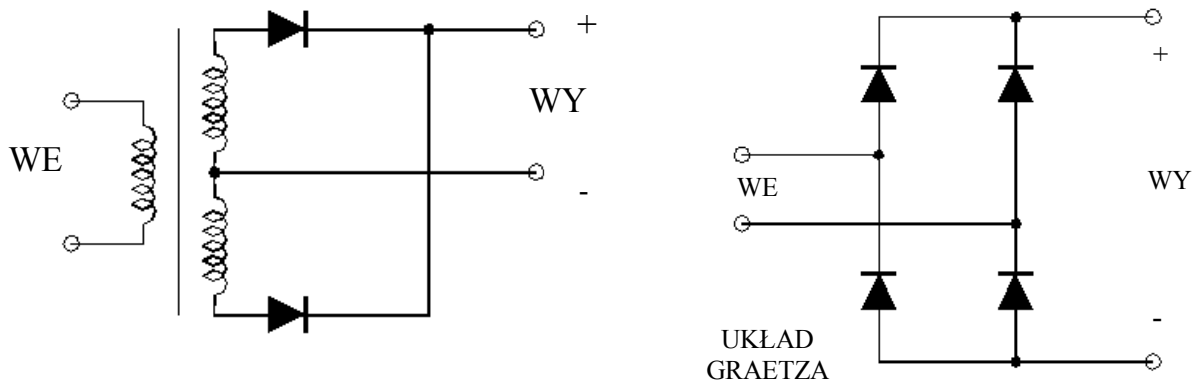
Zwykle energia elektryczna pobierana jest z sieci. Rola zasilacza jest przetworzenie jej tak, by była dostosowana do układu odbiorczego. Standardowy schemat blokowy zasilacza przedstawiony został poniżej :



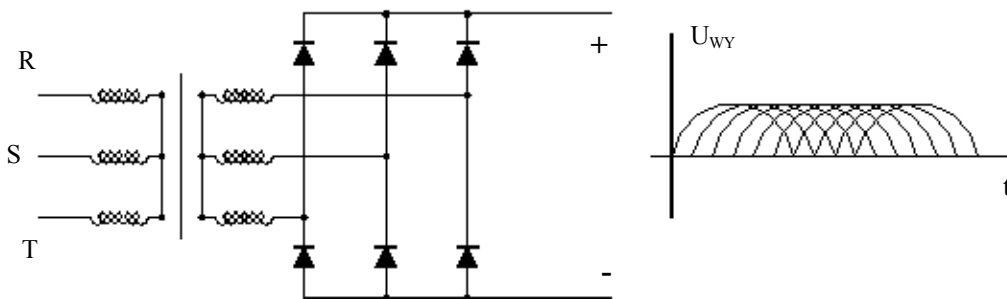
Transformator służy do :

- dopasowania przemiennego napięcia sieci do napięcia wyjściowego zasilacza;
- galwanicznej izolacji układu elektronicznego od sieci (zabezpieczenie przed porażeniem, pożarem, zakłóceniami).

Prostownik służy do przekształcenia prądu przemiennego na prąd płynący w jednym kierunku. Najczęściej stosuje się prostowniki dwupołkowe, gdyż w stosunku do prostowników jednapółkowych mają większą wydajność, większą zawartość składowej stałej w widmie wyjściowym, a podstawowa składowa ich tętnień wynosi 100 Hz. Wśród nich dominują prostowniki z **mostkami Graetza**.



Dla układów wymagających dużych prądów stosuje się **trójfazowe prostowniki dwupołkowe** :



Charakteryzują się one niewielką zawartością harmonicznych, przy czym najmniejsza częstotliwość pulsacji wynosi 300 Hz.

Do wyeliminowania pulsacji stosuje się **filtry dolnoprzepustowe** typu RC lub (w przypadku dużych prądów wyjściowych) typu RL. W przypadku filtru RC należy zastosować pojemność na tyle dużą, by kondensator nie zdołał znacząco rozładować się między cyklami pulsacji. Na przykład, gdy dopuszcza się poziom pulsacji 10 %, pojemność C można obliczyć z warunku :

$$U_{MAX} - U_{MIN} \approx U_{MAX} \left[1 - e^{-T/R_L C} \right] < 0.1 \cdot U_{MAX}$$

gdzie T jest okresem pulsacji.

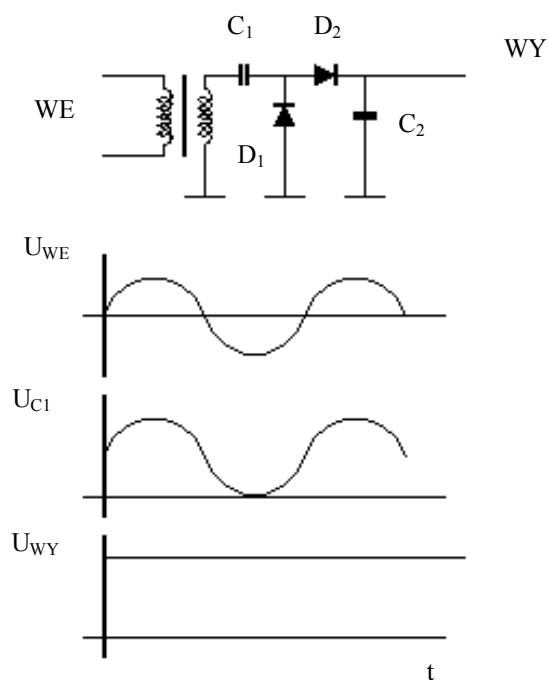
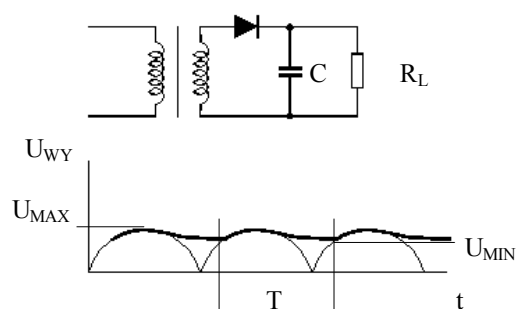
W układzie przedstawionym obok zarówno dioda jak i kondensator powinny mieć odporność na przebicie $U_R = 2\sqrt{2}U_{MAX}$.

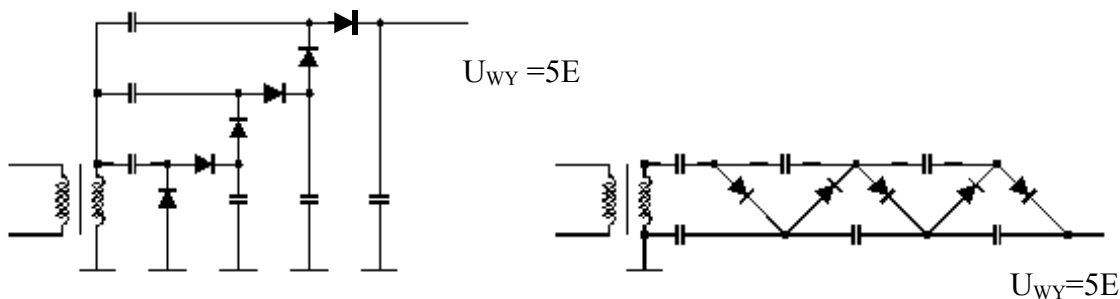
Powielacze napięcia.

We współczesnej elektronice - szczególnie w elektronice laboratoryjnej - często zachodzi potrzeba wytworzenia wysokiego napięcia przy niewielkiej (ok. 1 mA) wydajności prądowej. Problem ten rozwiązuje się za pomocą diodowo - pojemnościowych powielaczy napięcia.

W przedstawionym obok podwajaczu napięcia „ujemna” połówka sinusoidy przez diodę D1 ładuje kondensator C1 do napięcia szczytowego E.

Następnie „dodatnia” połówka sinusoidy poprzez diodę D2 doładowuje kondensator C2 do napięcia 2E. Jeżeli pobór prądu jest niewielki, co oznacza, że między cyklami oscylacji napięcia wejściowego kondensatory nie zostaną znacząco rozładowane, na wyjściu otrzymuje się stałe napięcie 2E.





Zaletą powielaczy napięcia jest możliwość ich budowy elementów niskonapięciowych, mimo, że przy wysokich stopniach powielenia napięcia wyjściowe mogą przekraczać **dziesiątki tysięcy woltów**. Wadą ich jest wysoka rezystancja wyjściowa, tym większa, im większy jest stopień powielenia.

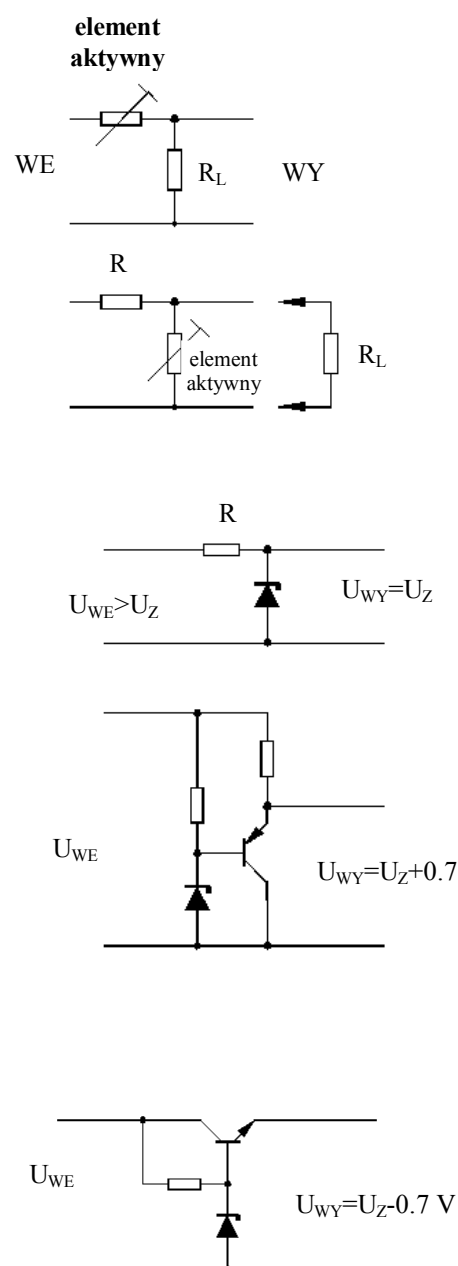
Stabilizatory napięcia.

Analogowe stabilizatory napięcia działają w oparciu o zasadę dzielnika oporowego. Dzieli się na **stabilizatory szeregowe i równoległe**, w zależności od tego w jakim położeniu względem wyjścia znajduje się element regulujący.

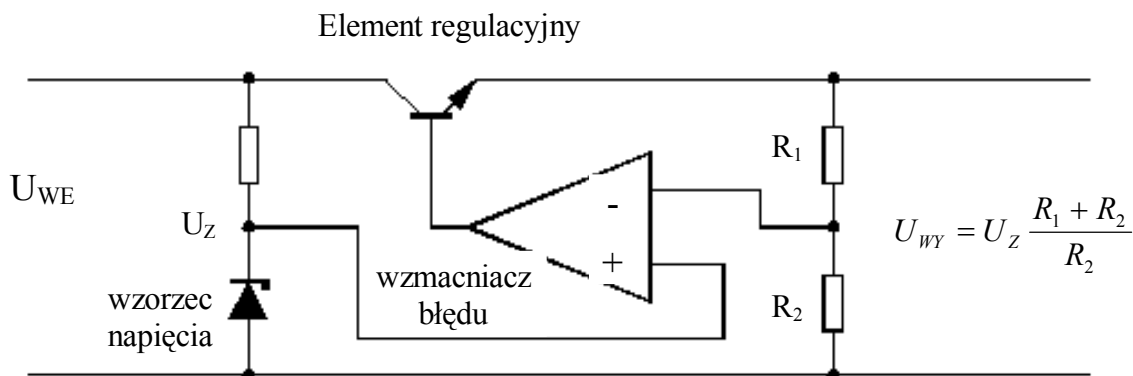
Najprostszym stabilizatorem równoległym jest **stabilizator z diodą Zenera**. Układ ten zapewnia napięcie wyjściowe bliskie napięciu Zenera. Jednak znaczne zmiany prądu płynącego przez diodę przy zmieniającej się rezystancji obciążenia powoduje, że stopień stabilizacji tych układów jest niewystarczający.

Znacznie lepiej działa stabilizator równoległy, w którym jako element aktywny zastosowano tranzystor, natomiast dzielnik napięcia z dioda Zenera pełni rolę **źródła napięcia odniesienia**.

Jednak stabilizatory równoległe są rzadko stosowane, ponieważ pobierają prąd ze źródła napięcia niestabilizowanego nawet wtedy, gdy do ich wyjścia nie jest dołączone żadne obciążenie. Wady tej nie posiadają **stabilizatory szeregowe** (wzmacniacze o wspólnym



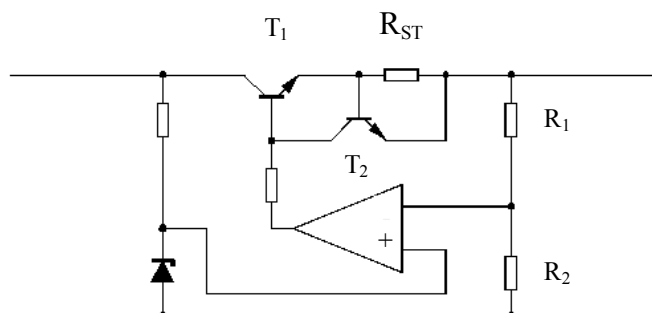
kollektorze, w których R_L pełni rolę rezystora obciążenia). Ponieważ jednak współczynnik wzmocnienia uzyskiwany w pojedynczym tranzystorze jest niewielki wahania napięcia wyjściowego wraz ze zmianą obciążenia (a także i temperatury) sięgają kilku procent. Znacznie bardziej dokładne są **stabilizatory napięcia ze wzmacniaczami błędów**.



W układzie tym napięcie wyjściowe jest porównywane we wzmacniaczu błędów z napięciem wzorcowym. W przypadku wystąpienia różnicy, wzmacniacz wytwarza napięcie błędów, które odpowiednio zwiększa lub zmniejsza potencjał bazy tranzystora regulującego, dzięki czemu następuje odpowiednio zmniejszenie lub zwiększenie rezystancji tego tranzystora, powodując niwelację błędów. Jeżeli napięcie wyjściowe jest próbkowane za pośrednictwem dzielnika rezystorowego (R_1 - R_2), układ ten pozwala na stabilizację dowolnego napięcia $U_{wy} > U_Z$.

Wadą tej konstrukcji jest możliwość uszkodzenia w przypadku poboru zbyt wielkiego prądu (I). Moc cieplna wydzielająca się w szeregowym elemencie regulacyjnym wynosi: $P = (U_{WE} - U_{wy})I$. Przy zwarceniu wyjścia $P \rightarrow \infty$, i następuje przegrzanie tranzystora. W związku z tym stosuje się ograniczniki prądu, będące jednocześnie ich stabilizatorami.

Gdy pobór prądu jest niewielki, układ ten działa podobnie jak stabilizator napięcia omówiony powyżej. Jednak, gdy pobór prądu jest tak duży, że wywołuje na rezystorze R_{ST} spadek napięcia około 0.7 V, część prądu wyjściowego może przepływać przez złącze baza - emiter tranzystora T_2 . Dzięki temu rezystancja tego tranzystora zmniejsza się, co powoduje obniżenie potencjału sterującego bazę tranzystora T_1 , a przez to zmniejszenie napięcia wyjściowego. Maksymalny prąd wyjściowy tego zasilacza może wynieść :



$$I_{MAX} = \frac{0.7V}{R_{ST}}$$

Jednak, gdy pobór prądu jest zbyt wielki, ciepło wydzielane w tranzystorze T_1 sprawia kłopoty techniczne. Bardziej sprawnym stabilizatorem jest **stabilizator impulsowy**, stosowany także w przetwornicach.

Przetwornice.

W wielu nowoczesnych urządzeniach elektronicznych jako zasilacze wykorzystuje się **przetwornice**. W urządzeniach tych napięcie sieciowe jest prostowane, a następnie modulowane (np. za pomocą tranzystora sterowanego przy

użyciu impulsatora) z wysoką częstotliwością. Impulsy w.c.z. są transformowane prostowane i filtrowane; na wyjściu przetwornicy wytwarzane jest napięcie stałe. Szerokość impulsów modulujących w stosunku do okresu ich powtarzania (τ/T) są automatycznie dobierane przez impulsator, co pozwala regulować (stabilizować) napięcie wyjściowe.

Dzięki zastosowaniu wysokiej częstotliwości (10 - 20 kHz) można zminiaturyzować transformator, stosować niewielkie pojemności filtrujące i osiągnąć wysoką sprawność zasilacza. W telewizorach, monitorach oscyloskopach itd. częstotliwość impulsów przetwornicy synchronizuje się z generacją obrazu na ekranie, co pozwala uniknąć zakłócania go przez pracę zasilacza.

Współczesne zasilacze spełniają wiele dodatkowych funkcji jak „inteligentne” dozowanie energii elektrycznej, kontrola temperatury itd.

Uniwersalne stabilizatory napięć z ogranicznikami prądu są powszechnie wytwarzane jako układy scalone, zawierające podstawowe układy jak źródło napięcia odniesienia, wzmacniacz błędów, układ ogranicznika prądu itd. Dodając pewne zewnętrzne elementy można je łatwo dostosować do stabilizacji dowolnego napięcia i prądu. Przykładem takiego układu scalonego, który może być wykorzystany do budowy stabilizatorów liniowych i impulsowych, jest $\mu A 723$.

Ponieważ we współczesnej elektronice często wykorzystuje się standardowe napięcia jak np. 5 V, 9 V, 12 V, 15 V, 24 V itd, dostarcza się również proste w zastosowaniu **trojkońcówkowe stabilizatory** tych napięć w pełni zabezpieczone termicznie i prądowo.

