

Podstawy Elektrotechniki i Elektroniki

część 9

dr hab. inż. Stanisław Hałgas, prof. PŁ

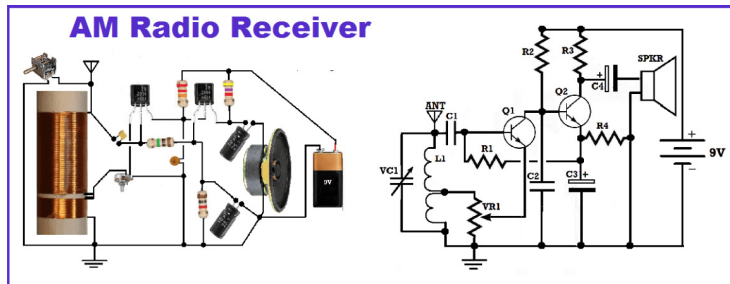


Rezonans w obwodach elektrycznych

Rezonans w obwodach elektrycznych

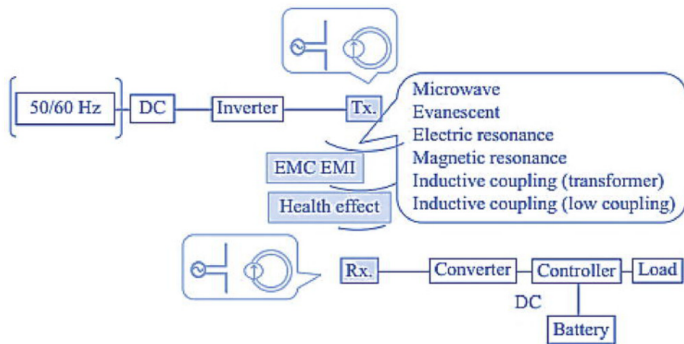
- **Układy rezonansowe** wykorzystywane w: tunerach radiowych i selektorach kanałów w telefonach komórkowych i sieciach bezprzewodowych.
- **Zachowanie obwodów rezonansowych** charakteryzuje się poprzez określenie takich parametrów jak: współczynnik dobroci, częstotliwość rezonansowa, pasmo przepuszczania i selektywność (wzajemnie ze sobą powiązane).

Przykład



<https://envirementalb.com/simple-am-radio/>

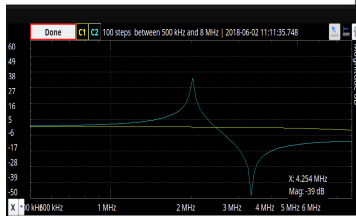
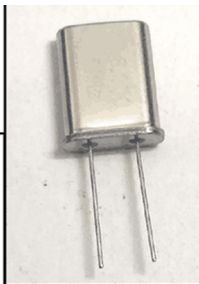
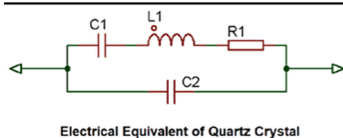
Przykład

**Figure 5.**

Block diagram of WPT system.

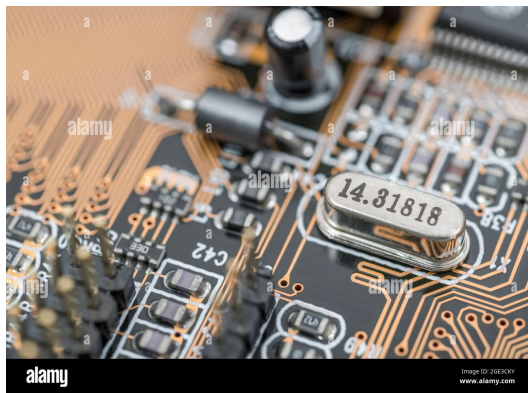
<https://www.intechopen.com/chapters/75267>

Przykład



<https://hackaday.com/2018/12/08/crystal-oscillators-explained/>

Przykład

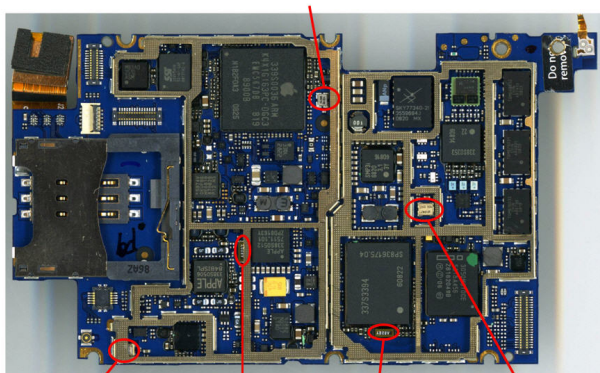


<https://www.alamy.com/quartz-crystal-oscillator-resonator-on-a-pb-motherboard-oscillators-provide-an-electrical-heartbeat-to-other-c-components-in-an-electrical-system-image438940207.html>

Przykład

Figure 1 – Apple
iPhone Main Board
with Xtal and Oscillator
Content Identified

- MHz Xtal – for application processor – video/audio
- 24MHz
- 2520 package
- Hosonic
- P/N – HCX-2SB



- GPS TCXO
- 33.6MHz
- 2520 package

- 32kHz – for power management
- 3215 package

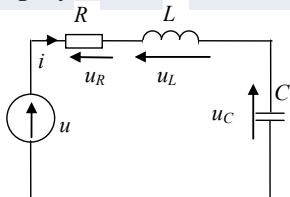
- 32kHz – sleep mode for baseband
- 3215 package

- Cellular TCXO
- 26MHz
- 2520 package

Rezonans napięć – szeregowy

Rezonans napięć – szeregowy

Klasyczny najprostszy układ, w którym może zajść rezonans napięć - rezonans szeregowy.



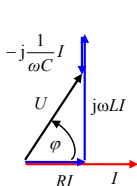
Rys. 1: Szeregowy obwód RLC

- W układzie spełnione są następujące zależności:
- $Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = R + jX$
- $U_R = RI, \quad |U_R| = R |I|,$
- $U_L = j\omega LI, \quad |U_L| = \omega L |I|,$
- $U_C = -j\frac{1}{\omega C}I, \quad |U_C| = \frac{1}{\omega C} |I|.$

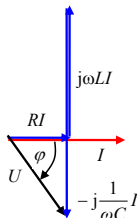
Rezonans napięcie – szeregowy

Rezonans napięcie – szeregowy

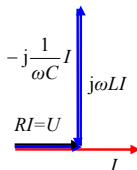
- Jeżeli $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ ($X > 0$) to $|U_L| > |U_C|$, $\varphi > 0$ – obwód o charakterze indukcyjnym,
- Jeżeli $\omega L < \frac{1}{\omega C}$ ($X < 0$), to $|U_L| < |U_C|$, $\varphi < 0$ – obwód o charakterze pojemnościowym,
- Jeżeli $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ ($X = 0$) to $|U_L| = |U_C|$, $\varphi = 0$ – **w obwodzie występuje rezonans szeregowy (napięcie)**



Rys. 2: Wykres wskazowy – charakter indukcyjny



Rys. 3: Wykres wskazowy – charakter pojemnościowy



Rys. 4: Wykres wskazowy – rezonans szeregowy (napięcie)

Rezonans napięcie – szeregowy

Rezonans napięcie – szeregowy

- **Rezonans napięcie występuje wówczas, gdy napięcia na cewce i na kondensatorze kompensują się, przy czym wartości skuteczne tych napięć są na ogół znacznie większe od wartości skutecznej napięcia zasilającego U .**
- *Istnienie dużych odpowiedzi przy małym pobudzeniu o ściśle określonej częstotliwości jest ogólną cechą charakterystyczną rezonansu w układach fizycznych.*

Rezonans napięć – szeregowy

Rezonans napięć – szeregowy

- **Pulsacja rezonansowa**

$$|U_L| = |U_C| \quad (1)$$



$$\omega_r L = \frac{1}{\omega_r C}, \quad (2)$$



$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3)$$

- W stanie rezonansu reaktancja cewki i moduł reaktancji kondensatora są sobie równe, spełnione są więc poniższe zależności

$$Z = R, \quad \varphi = 0, \quad X(\omega_r) = 0. \quad (4)$$

Rezonans napięć – zjawiska energetyczne

Rezonans napięć – zjawiska energetyczne

- Można wykazać, że **suma energii cewki i kondensatora w stanie rezonansu jest w każdej chwili stała** i wynosi

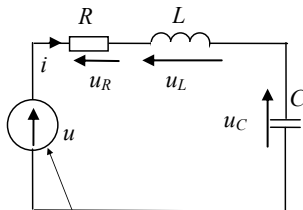
$$w_L + w_C = \frac{1}{2}LI_m^2, \quad (5)$$

- Moc chwilowa (przebiegienna) połączenia cewki i kondensatora jest równa zero**, a więc także moc bierna Q tego połączenia, a zatem i całego układu, równa się zero.
- Zerowanie się mocy biernej układu jest wynikiem kompensowania się mocy biernych cewki i kondensatora.

Rezonans napięć – krzywa rezonansowa

Rezonans napięć – krzywa rezonansowa

- Uniwersalna krzywa rezonansowa odnosi się do każdego układu szeregowego



źródło zasilania generator o stałej amplitudzie i zmieniającej się pulsacji

Rys. 5: Układ do wyznaczania krzywej rezonansowej

Rezonans napięć – krzywa rezonansowa

Rezonans napięć – krzywa rezonansowa

- Dla ustalonej pulsacji, z dzielnika napięcia

$$U_R = \frac{U}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} R. \quad (6)$$

- Dzieląc stronami przez U

$$\frac{U_R}{U} = \frac{R}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}. \quad (7)$$

- Po przekształceniach

$$\frac{U_R}{U} = \frac{1}{\sqrt{1 + x^2}} e^{-j \arctg x}. \quad (8)$$

- gdzie

$$x = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \frac{X}{R} = \frac{\omega_r L}{R} \left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right) \quad (9)$$

Rezonans napięcie – krzywa rezonansowa

Rezonans napięcie – krzywa rezonansowa

- **Rozstrojenie bezwzględne – x – pewnego rodzaju wskaźnik rozstrojenia,** przyjmujący wartości z przedziału $(-\infty, \infty)$ i równy zero w stanie rezonansu.
- Ponieważ iloraz po prawej stronie jest ilorazem dwóch wielkości symbolicznych równaniu (8) odpowiadają dwa równania:

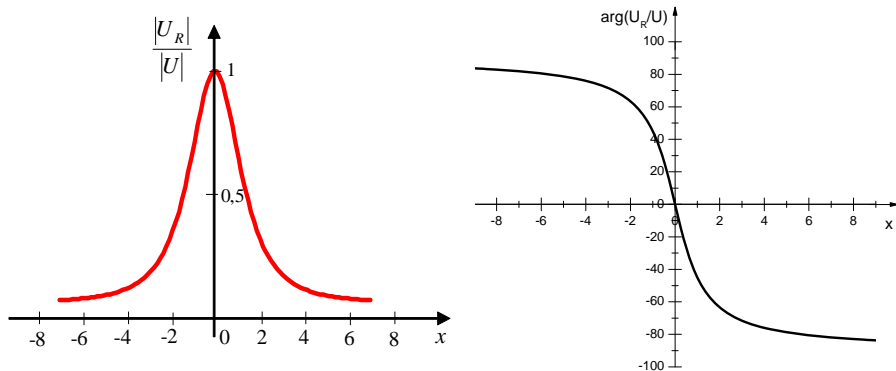
$$\frac{|U_R|}{|U|} = \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} \quad (10)$$

oraz

$$\arg\left(\frac{U_R}{U}\right) = -\operatorname{arctg}x. \quad (11)$$

- **Wykresy tych zależności w funkcji x to uniwersalne krzywe rezonansowe.**

Rezonans napięć – krzywa rezonansowa



Rys. 6: Uniwersalne krzywe rezonansowe

Rezonans napięć – dobroć

Rezonans napięć – dobroć

- **Dobroć obwodu w stanie rezonansu**

$$Q = 2\pi \frac{(w_L + w_C)_{\max}}{w_R(T)} = \frac{\omega_r L}{R} = \frac{1}{\omega_r C R}. \quad (12)$$

- **Napięcia $|U_L|$, $|U_C|$ są w warunkach rezonansu Q razy większe od napięcia U .**

Rezonans napięć – pasmo przepuszczania (przenoszenia)

Rezonans napięć – pasmo przepuszczania (przenoszenia)

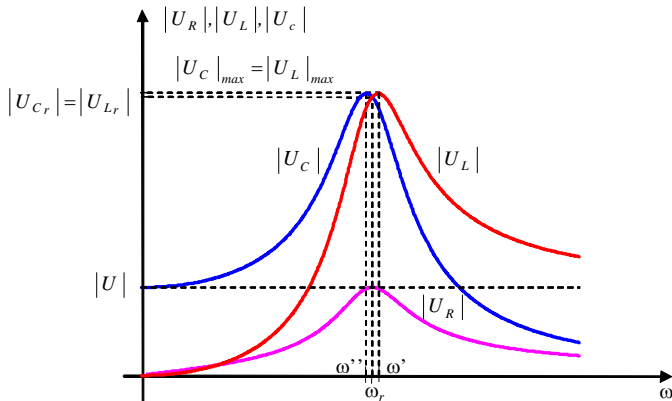
- **Pasmo przepuszczania (przenoszenia)** – przedział pulsacji $\langle \omega_1, \omega_2 \rangle$ obejmujący pulsację rezonansową, na krańcach którego wartość skuteczna napięcia na rezystorze jest równa $\frac{|U|}{\sqrt{2}}$.
- W paśmie przepuszczania zachodzi zależność

$$\frac{|U_R|}{|U|} \geq \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (13)$$

- **Szerokość pasma przepuszczania**

$$\omega_2 - \omega_1 = \frac{\omega_r}{Q}. \quad (14)$$

Rezonans napięć – pasmo przepuszczania (przenoszenia)

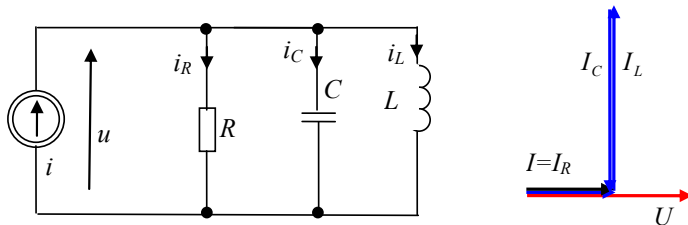


Rys. 7: Wykresy wartości skutecznych napięć elementów w szeregowym obwodzie rezonansowym

Rezonans prądów – równoległy

Rezonans prądów – równoległy

Drugi klasyczny obwód, w którym może wystąpić zjawisko rezonansu jest układ równoległy.



Rys. 8: Równoległy obwód RLC oraz wykres wskazowy w stanie rezonansu

Rezonans prądów – równoległy

Rezonans prądów – równoległy

- **Stan obwodu, w którym prądy cewki oraz kondensatora kompensują się** (a więc mają jednakowe wartości skuteczne) – rezonans równoległy (prądów).
- Admitancja obwodu wynosi

$$Y = G + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) = G + jB, \quad (15)$$

gdzie $G = 1/R$,

- Rezonans zachodzi wówczas, gdy $\frac{1}{\omega L} = \omega C$.
- **Pulsacja rezonansowa** $\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.
- W stanie rezonansu $Y = G$, $\varphi = 0$, $I = I_G$.

Rezonans prądów – równoległy

Rezonans prądów – równoległy

- **Suma energii cewki i kondensatora jest stała** i wynosi:

$$w_C + w_L = \frac{1}{2} C U_m^2. \quad (16)$$

- **Dobroć** zdefiniowana jako

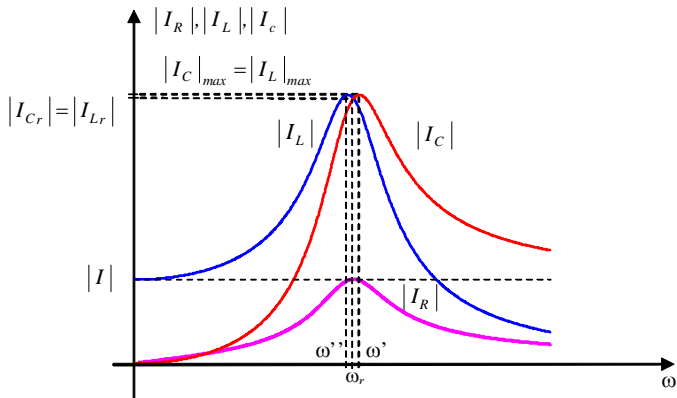
$$Q = 2\pi \frac{(w_L + w_C)_{\max}}{w_G(T)} = \frac{\omega_r C}{G} = \frac{1}{\omega_r L G}. \quad (17)$$

- W warunkach rezonansu prądy $|I_L|$ i $|I_C|$ są Q razy większe od prądu $|I|$.
- Pasmo przepuszczania równoległego obwodu rezonansowego – przedział pulsacji $\langle \omega_1, \omega_2 \rangle$ w otoczeniu pulsacji rezonansowej na krańcach którego

$$|I_R| = \frac{|I|}{\sqrt{2}}. \quad (18)$$

- **szerokość pasma** $\omega_2 - \omega_1 = \frac{\omega_r}{Q}$.

Rezonans prądów – równoległy

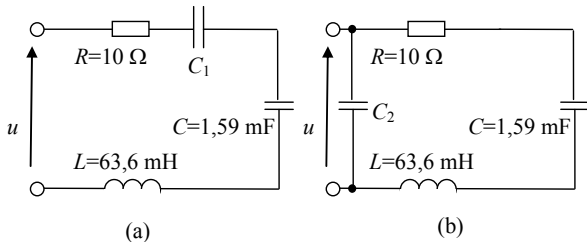


Rys. 9: Wykresy wartości skutecznych prądów w poszczególnych gałęziach równoległego obwodu rezonansowego

Przykład 1

Przykład 1

Dobierz wartości pojemności C_1 oraz C_2 tak, aby w układach, pokazanych na rys. 10a i rys. 10b zachodził rezonans dla częstotliwości $f = 50$ Hz.



Rys. 10: Przykładowe obwody rezonansowe

Przykład 1

Przykład 1

- W układzie z rys. a może wystąpić rezonans szeregowy.
- Ponieważ warunkiem matematycznym rezonansu szeregowego jest $\text{Im}(Z) = 0$, należy wyznaczyć impedancję układu

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{1}{\omega C} \right). \quad (19)$$

- Przyrównując część urojoną do zera mamy

$$\left(\omega_{sz} L - \frac{1}{\omega_{sz} C_1} - \frac{1}{\omega_{sz} C} \right) = 0, \quad (20)$$

gdzie ω_{sz} – pulsacja rezonansu szeregowego

- w równoważnej postaci

$$\omega_{sz} L = \frac{1}{\omega_{sz} C_1} + \frac{1}{\omega_{sz} C}. \quad (21)$$

Przykład 1

Przykład 1

- Podstawiając dane

$$2\pi \cdot 50 \cdot 63,6 \cdot 10^{-3} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot C_1} + \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 1,59 \cdot 10^{-3}}. \quad (22)$$

- Po przekształceniach wartość pojemności

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 18} = 177 \mu\text{F}. \quad (23)$$

Przykład 1

Przykład 1

- W układzie z rys. b należy wyznaczyć wartość pojemności C_2 , dla której zachodzi rezonans równoległy.
- Ponieważ warunkiem matematycznym rezonansu równoległego (prądów) jest $\text{Im}(Y) = 0$, należy wyznaczyć admitancję układu

$$Y = j\omega C_2 + \frac{1}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}. \quad (24)$$

- Po podstawieniu danych i przekształceniach admitancja wynosi

$$Y = 0,0236 + j(100\pi C_2 - 0,0424528) \quad (25)$$

- Przyrównując część urojoną do zera $100\pi C_2 = 0,0424528$,
- stąd wartość pojemności

$$C_2 = \frac{0,0424528}{100\pi} = 135,13 \mu\text{F}. \quad (26)$$

Podstawowe informacje o modulacji

Podstawowe informacje o modulacji

- **Modulacja – zakodowanie informacji, będącej pewnym przebiegiem elektrycznym, w postaci zmiany parametru innego, nośnego przebiegu elektrycznego** [Filipkowski:1978].
- **Sygnał zawierający użyteczną informację – *sygnał modulujący*, sygnał, którego parametr podlega zmianie – *sygnał modulowany*.**
- W wyniku procesu modulacji powstaje sygnał zmodulowany, który albo jest przesyłany na odległość, albo poddawany jest dalszemu przetwarzaniu.
- **Główną przyczyną stosowania modulacji jest fakt, że sygnał modulujący (użyteczny) w swojej naturalnej postaci nie nadaje się do transmisji na odległość.**

Podstawowe informacje o modulacji

Podstawowe informacje o modulacji

- **Modulację stosuje się również wówczas, gdy sygnał zawierający informację narażony jest na silne zakłócenia.** Odpowiednio dobrany system modulacji może znacznie zmniejszyć ich wpływ.
- **Wybór systemu modulacji zależy od wielu czynników, z których najważniejsze to:** rodzaj środowiska, w którym rozchodzą się fale elektromagnetyczne, pasmo częstotliwości zajmowane przez przesyłaną informację, poziom mocy, rodzaje zakłóceń, koszt urządzeń nadawczo-odbiorczych, niezawodność połączenia.
- **Rozróżnia się transmisje sygnałów w paśmie podstawowym,** w której sygnał użyteczny transmitowany jest w swoim pierwotnym zakresie częstotliwości typowy dla systemów łączności przewodowej, np. telefonii przewodowej oraz **transmisje z wykorzystaniem częstotliwości nośnych,** w których sygnał użyteczny przetwarzany jest na wyższą częstotliwość nadawczą [Tietze:2009].

Podstawowe informacje o modulacji

Podstawowe informacje o modulacji

- Transmisja wykorzystująca światłowód jest również transmisją przewodową i umożliwia przesył zarówno w paśmie podstawowym jak i z wykorzystaniem wyższych częstotliwości.
- **W przypadku systemów bezprzewodowych stosowana jest transmisja z wykorzystaniem częstotliwości nośnych.** Wynika to między z innymi z faktu, że wielkość anten jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości nadajnika i transmisja bezpośrednia (w paśmie podstawowym) wymagałaby zastosowania anten o ekstremalnie dużych rozmiarach).

Podstawowe informacje o modulacji

Rodzaje modulacji

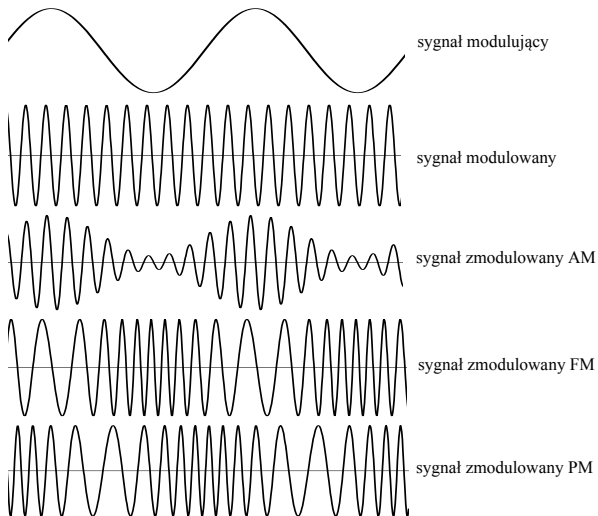
- **Modulacja analogowa** – zakodowanie informacji poprzez zmianę parametrów fali nośnej będącej przebiegiem okresowym o kształcie sinusoidalnym.
- Ponieważ przebieg taki, określony zależnością:

$$u(t) = U_m \sin(2\pi f t + \varphi), \quad (27)$$

gdzie: U_m – amplituda, f – częstotliwość, φ – faza początkowa, charakteryzowany jest przez trzy parametry, wyróżniamy trzy rodzaje modulacji (rys. 11): **amplitudy (AM)**, **częstotliwości (FM)** oraz **fazy (PM)**.

- Modulacje analogowe są klasycznymi metodami stosowanymi w radiotechnice: radiofonia długo i średniofalowa wykorzystuje modulację AM, a radiofonia UKF – modulację FM.

Podstawowe informacje o modulacji

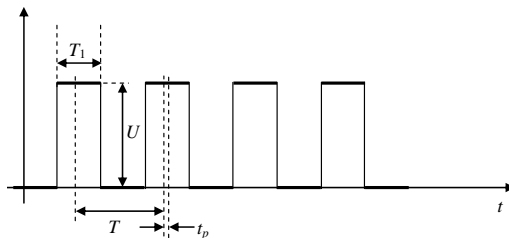


Rys. 11: Rodzaje modulacji analogowej

Podstawowe informacje o modulacji

Modulacja impulsowa

Wykorzystanie jako sygnału modulowanego ciągu impulsów (rys. 12) prowadzi do **modulacji impulsowej** – przesyłanie kilku różnych informacji w jednym kanale transmisyjnym, wykorzystując wolne przedziały czasu między impulsami (tzw. podział czasowy informacji).

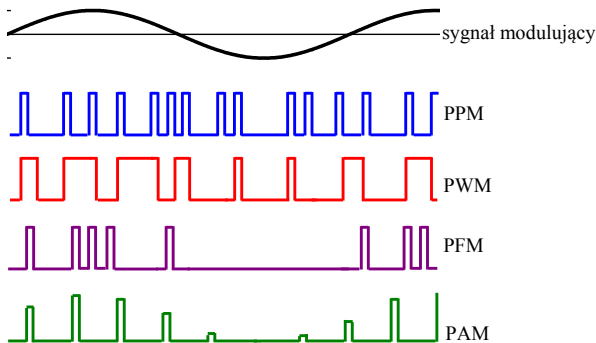


Rys. 12: Sygnał modulowany wykorzystywany w modulacji impulsowej

Podstawowe informacje o modulacji

Modulacja impulsowa

Zmieniając parametry ciągu impulsów (odpowiednio U , T_1 , $f = \frac{1}{T}$, t_p) otrzymujemy modulację: **amplitudy (PAM)**, **szerokości (PWM)**, **częstotliwości powtarzania (PFM)** oraz **położenia impulsów (PPM)** (rys. 13).



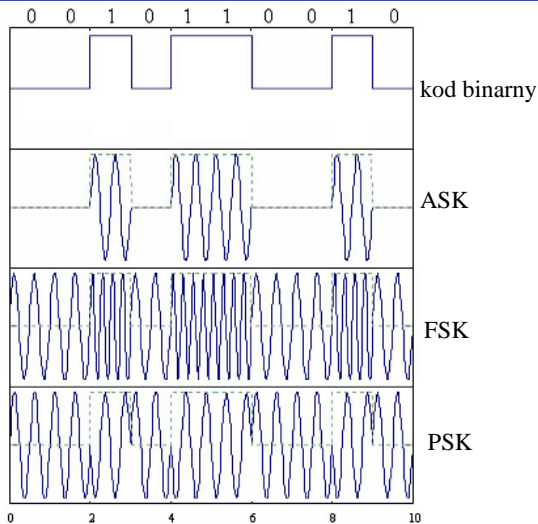
Rys. 13: Rodzaje modulacji impulsowej

Podstawowe informacje o modulacji

Modulacja cyfrowa (kluczowanie)

- **Modulacja cyfrowa** umożliwia transmisję sygnałów cyfrowych (w najprostszym przypadku binarnych) i polega na uzależnieniu parametru harmonicznego (sinusoidalnego) sygnału nośnego od sygnału cyfrowego.
- **Modulowanymi parametrami sygnału nośnego są: amplituda, częstotliwość oraz faza.**
- Chwilowa wartość tych parametrów jest uzależniona od sygnału cyfrowego.
- W przypadku sygnału binarnego (o dwóch wartościach odpowiadających logicznym poziomom 0 oraz 1) następuje przełączanie między dwiema amplitudami, dwiema częstotliwościami lub dwiema fazami.
- **Modulacja cyfrowa – kluczowanie** rodzaje:
 - **kluczowanie z przesuwem amplitudy ASK (w skrócie kluczowanie amplitudy),**
 - **kluczowanie z przesuwem częstotliwości FSK (kluczowanie częstotliwości)**
 - **kluczowanie z przesuwem fazy PSK (kluczowanie fazy).**

Podstawowe informacje o modulacji



Rys. 14: Rodzaje modulacji cyfrowej

Podstawowe informacje o modulacji

Modulacja cyfrowa (kluczowanie)

- Można również stosować więcej niż dwa poziomy, odpowiednie metody noszą nazwy n -ASK, n -FSK, n -PSK, gdzie n – liczba poziomów wartości.
- **Metody kluczowania nie są, ściśle rzecz biorąc, żadnymi oddzielnymi metodami modulacji, ponieważ mamy tutaj do czynienia ze zwykłą modulacją AM, FM lub PM z wykorzystaniem specjalnego sygnału modulującego [Tietze:2009], [modul_http:2017].**

Podstawowe informacje o modulacji

Modulacja QAM (ang. Quadrature Amplitude Modulation)

- Modulacja QAM – kwadraturowa modulacja amplitudowo-fazowa służąca do przesyłania danych cyfrowych przez kanał radiowy, stosowana m.in. w transmisjach DVB.
- Modulacja QAM jest połączeniem modulacji amplitudy i modulacji fazy.
- Dane formowane są w dwójki, trójki, czwórki itd., które odpowiadają zarówno amplitudzie, jak i fazie. Tworzone są według diagramu konstelacji (ang. constellation diagram).

Modulacja QAM

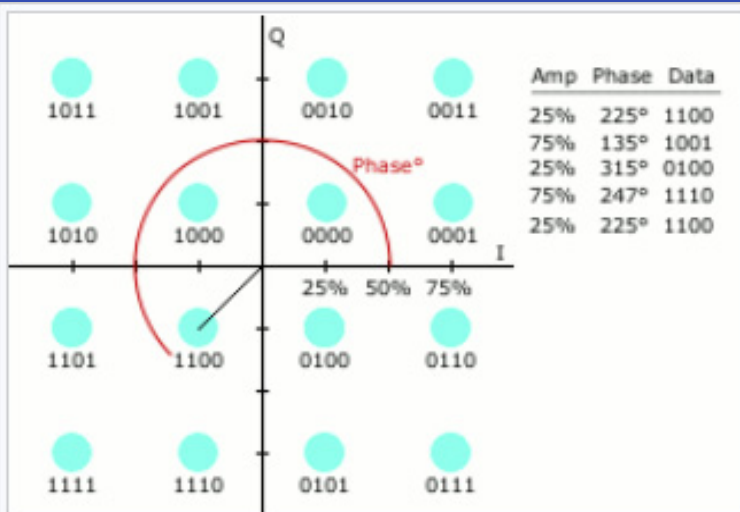


Diagram konstelacji 16-QAM z przykładowymi punktami konstelacji

Modulacja amplitudy (AM)

Modulacja amplitudy (AM)

- $x(t)$ – sygnał modulujący (użyteczny), $y(t) = Y_m \sin(\omega_0 t)$ – sygnał modulowany (nośna) wówczas **sygnał zmodulowany amplitudowo $g(t)$ można uzyskać w wyniku przemnożenia sygnału modulującego i modulowanego**

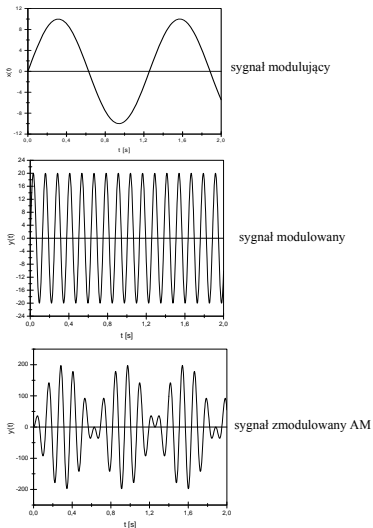
$$g(t) = x(t) \cdot y(t) = x(t) \cdot Y_m \sin(\omega_0 t). \quad (28)$$

- Przykładowo, jeżeli $x(t) = 10 \sin(5t)$, a $y(t) = 20 \sin(50t)$, to

$$g(t) = x(t) \cdot y(t) = 200 \sin(5t) \cdot \sin(50t). \quad (29)$$

- **Jest to modulacja AM bez fali nośnej** i można ją łatwo uzyskać stosując układy mnożące, np. układ scalony AD633JN.

Modulacja amplitudy (AM)



Rys. 15: Modulacja AM bez fali nośnej

Modulacja amplitudy (AM)

Modulacja amplitudy (AM)

- **Modulacja z falą nośną** realizowana zgodnie z równaniem

$$g(t) = (Y_m + k_a x(t)) \sin(\omega_0 t), \quad (30)$$

k_a – stała, dobierana tak, aby wyrażenie w nawiasie było dodatnie w każdej chwili.

- Ponieważ $(Y_m + k_a x(t)) > 0$, obwiednia $g(t)$ ma kształt sygnału $x(t)$.
- W przypadku sygnału modulującego $x(t) = X_m \sin(\omega_m t)$ wzór (30) przyjmuje postać

$$g(t) = (Y_m + k_a X_m \sin(\omega_m t)) \sin(\omega_0 t) = Y_m (1 + m \sin(\omega_m t)) \sin(\omega_0 t), \quad (31)$$

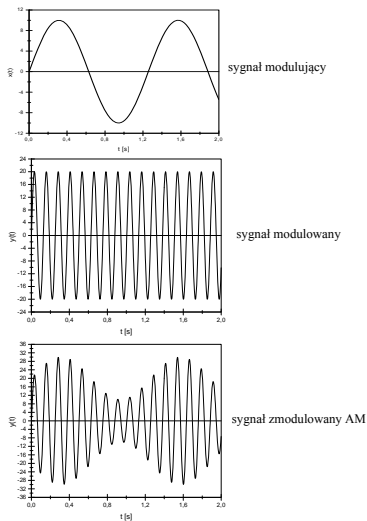
$m = \frac{k_a X_m}{Y_m}$ – **współczynnik głębokości modulacji**, proporcjonalny do amplitudy sygnału modulującego X_m .

Modulacja amplitudy (AM)

Modulacja amplitudy (AM)

- **Modulację taką można zrealizować wykorzystując dwa układy scalone: układ mnożący i układ sumatora lub jeden układ scalony z wbudowanymi obydwoma blokami** (np. AD633JN).
- Wynik modulacji dla $x(t) = 10 \sin(5t)$ oraz $y(t) = 20 \sin(50t)$, przyjmując $k_a = 1$ ($m = \frac{1 \cdot 10}{20} = 0,5$) – rys. 16.

Modulacja amplitudy (AM)

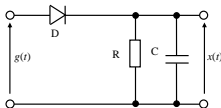


Rys. 16: Modulacja AM z falą nośną

Demodulacja

Demodulacja

- **Detekcją, demodulacją nazywamy odtworzenie przebiegu modulującego z sygnału zmodulowanego** [Filipkowski:1978].
- Cel – uzyskanie w urządzeniu odbiorczym przebiegu o kształcie jak najbardziej zbliżonym do kształtu sygnału modulującego w urządzeniu nadawczym.
- **Detekcję przebiegów z różnym typem modulacji realizuje się poprzez zastosowanie różnych układów** – cecha wspólna zastosowanie elementu o charakterystyce nieliniowej.
- Najczęściej stosowanym detektorem w prostych układach odbiorczych z modulacją amplitudy z falą nośną – **detektor szczytowy**.

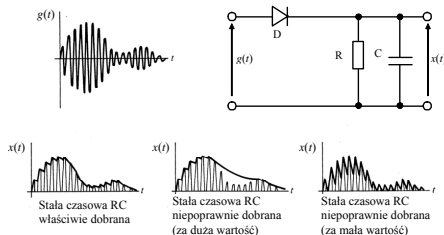


Rys. 17: Detektor szczytowy

Demodulacja

Demodulacja

- Ponieważ obwiednia sygnału zmodulowanego $g(t)$ ma ten sam kształt co sygnał modulujący $x(t)$ wystarczy odtworzyć tę obwiednię.
- Jeżeli stała czasowa RC spełnia zależność ([RC_stala:2017]) $\frac{1}{\omega_0} < RC < \frac{\sqrt{1-m^2}}{m\omega_m}$, gdzie ω_m jest pulsacją sygnału modulującego, a ω_0 pulsacją sygnału zmodulowanego, to sygnał na wyjściu detektora odtwarza obwiednię $g(t)$, czyli przyjmuje kształt sygnału modulującego.

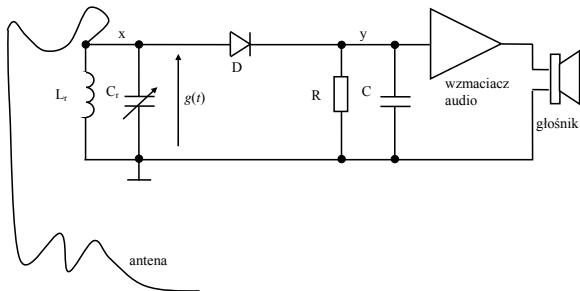


Rys. 18: Wpływ wartości stałej czasowej na przebieg wyjściowy detektora

Układ odbiornika AM

Układ odbiornika AM

W odbiorniku należy wybrać pożądaną stację (spośród wielu), a następnie wykorzystując układ detektora szczytowego odtworzyć sygnał audio.

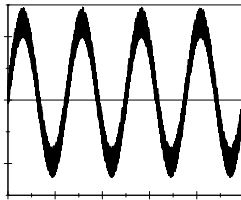


Rys. 19: Prosty odbiornik AM

Układ odbiornika AM

Układ odbiornika AM

- **Układ odbiornika AM zawiera:** obwód rezonansowy równoległy $L_r C_r$, który jest dostrajany do częstotliwości stacji przez zmienny kondensator C_r , detektor szczytowy, antenę, wzmacniacz audio (np. w postaci układu tranzystorowego) oraz głośnik.
- Odłączenie obwodu rezonansowego – sygnał w punkcie 'x' składa się głównie z sygnału o niskiej częstotliwości (przede wszystkim o częstotliwości 50 Hz) oraz 'mieszanki' sygnałów ze wszystkich dostępnych stacji AM na danym obszarze.



Rys. 20: Sygnał w punkcie 'x' układu z rys. 19 przy usunięciu obwodu rezonansowego

Układ odbiornika AM

Układ odbiornika AM

- Podłączenie układu rezonansowego sprawia, że wszystkie niskoczęstotliwościowe zakłócenia zostają usunięte z sygnału, a uzyskany przebieg jest sygnałem AM wybranej stacji.
- **Ze względu na dużą dobroć obwodu rezonansowego amplituda sygnału wybranej stacji AM znacznie przewyższa amplitudę sygnałów uzyskiwanych z anteny w układzie odbiornika bez obwodu rezonansowego.**
- Pozwala to na skuteczną demodulację w układzie detektora sygnału użytecznego, który zostaje wzmocniony i doprowadzony do głośnika lub słuchawek.

Układ odbiornika AM

Układ odbiornika AM

- **We współczesnych odbiornikach AM dostrojenie do stacji odbywa się na drodze elektronicznej, a nie mechanicznej.**
- **Miejsce kondensatorów powietrznych o regulowanej pojemności zajęły elementy półprzewodnikowe, głównie diody pojemnościowe (warikapy).**

Modulacja szerokości impulsów

Modulacja szerokości impulsów

- **Modulacja PWM** – rodzaj modulacji impulsowej.
- Modulacja szerokości impulsów (PWM) – podstawowa **technika sterowania wykorzystywana w energoelektronice**.
- Innym jej zastosowaniem jest sterowanie silnikami prądu stałego (np. występującymi w wentylatorach), ale może być również stosowana do sterowania zaworami, pompami, układami hydraulicznymi i innymi.
- Technikę tę wykorzystuje się również w systemach pomiarowych i telekomunikacyjnych.

Modulacja szerokości impulsów

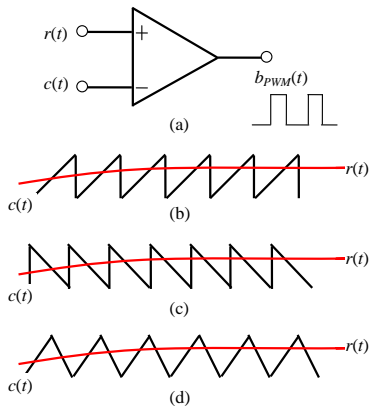
Modulacja szerokości impulsów

- **Częstotliwość impulsów** jest jednym z najważniejszych parametrów przy definiowaniu metody PWM i **może być albo stała, albo zmienna**.
- Sygnał PWM o stałej częstotliwości można generować poprzez porównanie sygnału odniesienia, $r(t)$, z sygnałem nośnym, $c(t)$, wykorzystując komparator (układ scalony) – **analogowa realizacja modulacji PWM**.
- Sygnał PWM opisany zależnością

$$b_{PWM}(t) = k \operatorname{sgn}[r(t) - c(t)], \quad (32)$$

sgn jest funkcją znaku, a k pewną stałą.

Modulacja szerokości impulsów



Rys. 21: Implementacja sprzętowa modulacji PWM-CF w układzie komparatora oraz różne sygnały nośne

Modulacja szerokości impulsów

Modulacja szerokości impulsów

W przypadku modulacji PWM o stałej częstotliwości (PWM-CF) powszechnie stosowane są trzy typy sygnałów nośnych – wybór sygnału zależy od aplikacji:

- sygnał piłokształtny (rys. 21(b)) – np. przetwornice DC-DC,
- sygnał piłokształtny odwrotny (rys. 21(c)),
- sygnał trójkątny (rys. 21(d)) – np. przetwornice AC-DC oraz DC-AC.

Modulacja szerokości impulsów

Modulacja szerokości impulsów

- **W przypadku realizacji cyfrowej sygnał odniesienia jest z reguły próbkowany z ustaloną częstotliwością, a sygnał nośnej jest generowany przez licznik lub zegar.**
- Niektóre mikrokontrolery posiadają wbudowany moduł PWM i mogą generować pożądane sygnały.
- **Modulacja PWM umożliwia sterowanie układami analogowymi z wyjść cyfrowych mikroprocesora.**

Modulacja szerokości impulsów

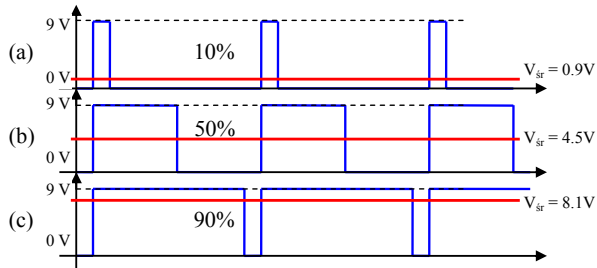
Modulacja szerokości impulsów

- **Sterowanie układów analogowych metodami cyfrowymi zwykle prowadzi do znacznych redukcji kosztów wytwarzania i mocy strat na elementach wykonawczych.**
- **Współczynnik wypełnienia impulsów (ang. duty cycle DT – stosunek czasu włączenia do okresu, zwykle podawany w %)**
- *Sygnał PWM jest nadal sygnałem cyfrowym ponieważ w każdej chwili czasu napięcie dostarczane do obciążenia analogowego albo posiada wartość równą wartości odniesienia albo jest odłączone, czyli ma wartość równą zero.*
- Napięcie źródłowe (lub prąd) jest dostarczane do odbiornika na drodze podawania serii powtarzających się impulsów.

Modulacja szerokości impulsów

Modulacja szerokości impulsów

Zastosowanie PWM pozwala uzyskać każdą wartość analogową.



Rys. 22: Przykładowe sygnały PWM

Modulacja szerokości impulsów

Modulacja szerokości impulsów

Częstotliwość, na jaką musi być ustawiony sygnał nośnej PWM, zależy od aplikacji i czasu odpowiedzi systemu, który ma być zasilany [ni_http].

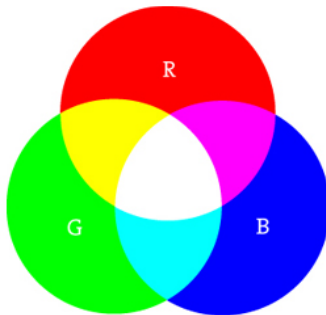
- elementy grzewcze: 10-100 Hz
- silniki elektryczne DC: 5-10 kHz
- zasilacze lub wzmacniacze audio (np. wzmacniacze dźwięku klasy D): od 20-200 kHz

Zastosowania modulacji PWM

Zastosowania modulacji PWM

- *Sterowanie oświetleniem – diody LED (pojedynczych lub trójek RGB):*
 - ❶ kontrola jasności diod(y) LED, dostosowując współczynnik wypełnienia impulsu
 - ❷ dla trójkolorowych diod LED można kontrolować, ile z każdego z trzech kolorów podstawowych powinno wystąpić w mieszaninie kolorów, przyciemniając poszczególne diody poprzez zastosowanie różnych wartości współczynnika DT.
- **Częstotliwość fali prostokątnej musi być wystarczająco wysoka, jeżeli sterowanie diodami LED ma prowadzić do prawidłowego efektu zmiany jasności.**
- *20-procentowy DT przy częstotliwości 1 Hz – dioda(y) włączają się i wyłączają wywołując efekt migotania.*
- *20-procentowy DT przy częstotliwości 100 Hz lub powyżej – efekt ściemniania.*

Zastosowania modulacji PWM

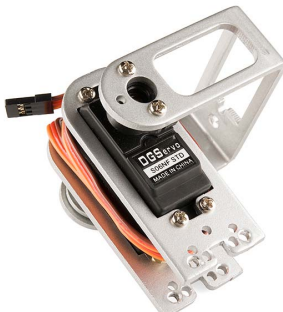


Rys. 23: Diody RGB LED oraz ilustracja mieszania barw

Zastosowania modulacji PWM

Zastosowania modulacji PWM

Można również wykorzystać modulację szerokości impulsu, do sterowania siłownikiem (odpowiedni silnik elektryczny) w celu zmiany położenia np. ramienia robota o zadany kąt (rys. 24).



Rys. 24: Siłownik pod kątem 90° względem wspornika [Pwm1:2017]

Sterowanie wentylatorem

Sterowanie wentylatorem

- Najprostsza metoda sterowania pracą wentylatora – technika dwupołożeniowej regulacji typu **włącz/wyłącz**. *Wentylator pracuje wówczas tylko wtedy, kiedy temperatura wzrośnie powyżej wartości progowej.*
- Układ sterowania wentylatorem składa się z czujnika temperatury i komparatora.
- **Zaleta:** skuteczność chłodzenia i oszczędność energii.
- **Wada:** i uciążliwość tego typu sterowania dla użytkownika – nagłe i częste zatrzymywanie i uruchamianie wentylatora może więc powodować niepotrzebne rozdrażnienie [wentyl_http].

Sterowanie wentylatorem

Sterowanie wentylatorem

- W celu zapewnienia wydajnego, cichego i energooszczędnego chłodzenia prędkość obrotową wentylatora powinno się zmieniać w zależności od aktualnej temperatury, zmniejszając lub zwiększając ją, np. poprzez zmianę napięcia zasilania.
- Stosowane są **dwie metody regulacji: liniowa i wykorzystująca PWM**.
- W metodzie liniowej w celu zmiany prędkości obrotowej napięcie, odpowiednio, obniża się albo podwyższa co prowadzi do znacznego ograniczenia hałasu. Stopień wyjściowy układu regulacji musi działać jak wzmacniacz liniowy, a nie element przełączający.
- **Wada:** duże rozmiary i cena, wzmacniacz może wymagać dodatkowego radiatora, ponadto większość wentylatorów nie uruchamia się przy napięciu niższym niż połowa nominalnego – ograniczony zakres regulacji prędkości, zazwyczaj od 50% do 100% prędkości maksymalnej.

Sterowanie wentylatorem

Sterowanie wentylatorem

- **Sterowanie PWM o częstotliwości zwykle 30 Hz (zakres najczęściej stosowany to 20 Hz – 160 Hz)**
- **Zalety:** umożliwia uzyskanie większego zakresu regulacji prędkości obrotowej, który wynosi typowo od 10 do 100% wartości maksymalnej, prostota i niski koszt realizacji.
- **Wady:** w wypadku wentylatorów o prądzie powyżej 0,5 A problemem staje się hałas towarzyszący przełączaniu napięcia powstający na skutek drgań uzwojeń wentylatora i efektu magnetostrykcji rdzenia silnika, jeżeli napięcie zasilające jest odłączane, do układu sterowania nie dociera prawidłowy sygnał z wyjścia tachometrycznego wentylatora trójprzewodowego.

Sterowanie wentylatorem

Sterowanie wentylatorem

- **Najlepszym rozwiązaniem – zastosowanie wentylatora czteroprzewodowego.**
- *Oprócz wyjścia tachometrycznego, zasilania i masy ma on również wejście sygnału PWM.*
- Za jego pośrednictwem zasilanie jest odłączane tylko od uzwojeń stojana wentylatora (czyli napędu).
- Sygnał na wyjściu tachometrycznym stale informuje o rzeczywistej prędkości obrotowej.

Sterowanie wentylatorem



Rys. 25: Wentylator dwuzaciskowy




Sterowanie wentylatorem



Rys. 26: Wentylatory trójzaciłkowe

Sterowanie wentylatorem



	P1	czarny	Masa (GND)
	P2	czerwony	Napięcie (5-12 V)
	P3	żółty	tachometr (RPM), czujnik obrotów

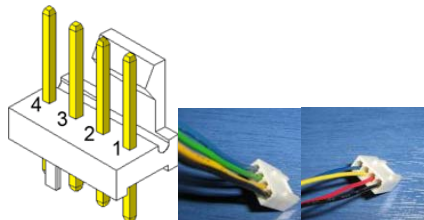
Rys. 27: Złącze 3-pin stosowane w płytach głównych formatu ATX

Sterowanie wentylatorem



Rys. 28: Wentylator czterozaciskowy

Sterowanie wentylatorem

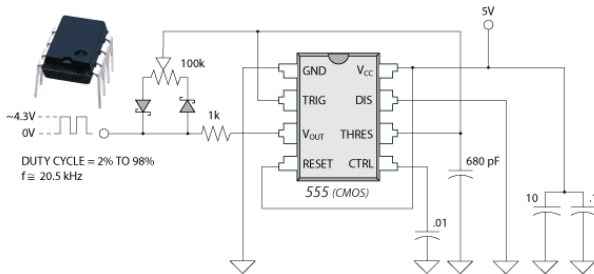


P1	czarny	Masa (GND)
P2	czerwony	Napięcie (5-12 V)
P3	żółty	tachometr (RPM), czujnik obrotów
P4	niebieski	PWM (ang. <i>Pulse Width Modulation</i>), kontroler obrotów

P1	czarny	Masa (GND)
P2	żółty	Napięcie (5-12 V)
P3	zielony	tachometr (RPM), czujnik obrotów
P4	niebieski	PWM (ang. <i>Pulse Width Modulation</i>), kontroler obrotów

Rys. 29: Złącze czterozaciskowego wentylatora z PWM

Schemat prostego generatora sygnału PWM, wykorzystującego układ scalony 555 (pierwszy układ NE555 opracowany w 1970 roku, rok później trafił do masowej produkcji, a produkowany jest do dziś), do sterowania prędkością obrotową wentylatora umieszczono na stronie jednego z wiodących producentów wentylatorów – firmy NIDEC (rys. 30) [nidec:2017].

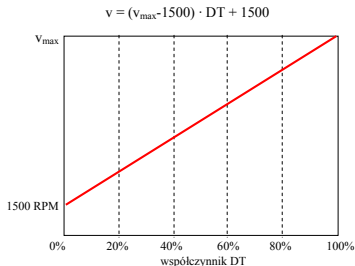


Rys. 30: Prosty generator sygnału PWM do sterowania prędkością obrotową wentylatora [nidec:2017]

Sterowanie wentylatorem

Sterowanie wentylatorem

Dla podanych na schemacie wartości nominalnych elementów generatora PWM pracuje przy częstotliwości około 20 kHz pod obciążeniem, ale prędkość wentylatora w funkcji współczynnika DT, pokazana na rys. 31 jest niezależna od częstotliwości w bardzo szerokim zakresie.



Rys. 31: Charakterystyka sterowania układu z rys. 30 [nidec:2017]

Sterowanie wentylatorem

Sterowanie wentylatorem

- Prawie identyczne charakterystyki uzyskuje się w zakresie częstotliwości od 300 Hz do 60 kHz.
- Współczynnik wypełnienia impulsów generatora PWM wynosi od 2% do 98%.
- Jeśli wymagane są wartości tego współczynnika 100% i 0%, wyjście obwodu może być przełączane na styki dołączone do zasilania (5 V) i potencjału uziemienia.

Sterowanie wentylatorem

Sterowanie wentylatorem

- Istnieją układy scalone umożliwiające łatwe skonstruowanie odpowiedniego sterowania prędkością obrotową wentylatorów.
- Na przykład układ MAX6620 firmy Maxim umożliwia regulację liniową napięcia zasilającego niezależnie dla maksymalnie czterech wentylatorów oraz monitoruje wyjścia tachometryczne wentylatorów.
- Układ AMC6821 firmy Texas Instruments jest z kolei sterownikiem wykorzystującym modulację PWM. Oprócz tego układ ten mierzy temperaturę (wewnętrzną oraz zewnętrzną, z czujnika na chłodzonym elemencie) [wentyl_http].