



Technical University of Lodz  
Institute of Electronics

## Układy elektroniczne 2

dr inż. Marcin Kociolek  
Zakład Elektroniki Medycznej  
Łódź 2018



## Informacje ogólne

Wykładowca:  
Dr inż. Marcin Kociolek  
starszy wykładowca w Instytucie Elektroniki PŁ  
Kontakt:  
mail: [kociolek@p.lodz.pl](mailto:kociolek@p.lodz.pl)  
<http://www.eletel.p.lodz.pl/kociolek>  
telefon: +48 42 631 26 38  
pokój: 205 (II piętro) B9  
Konsultacje:  
sprawdzać w kalendarzu:  
<http://www.eletel.p.lodz.pl/kociolek/timetable2010.html>

2



## Informacje o zajęciach

3 punkty ECTS - 75 ÷ 90 g pracy  
(1 ECTS – 25 ÷ 30 h)

Wykład:

15 g (9 g studia niestacjonarne)

Laboratorium:

15 g (9 g studia niestacjonarne)

Praca własna

45 ÷ 60 (15 tyg. semestru i 3 tyg. sesji)

57 ÷ 72 (9 zjazdów w semestrze i 3 w sesji)

3



## Forma zaliczenia wykładu

- 1) 7 kolokwium częściowych, 10 min na każdym zajęciach. (studia niestacjonarne 4 kolokwia na zjazdach od 2 do 5)
  - Z każdego kolokwium można otrzymać 0÷4 punktów.
  - Ocena końcowa:
    - >19(13,5) 4
    - >21(15,5) 4,5
    - >23(17,5) 5
  - Pierwsze kolokwium można poprawić.
  - Osoba, która do godziny 8.00 w dniu pisania kolokwium, poinformuje mnie mailowo o niepisaniu kolokwium, ma prawo do napisania kolokwium w terminie dodatkowym.
  - Będzie wyznaczony termin uzupełniający na poprawę pierwszego kolokwium lub/i uzupełnienie brakujących kolokwium dla uprawnionych studentów. W tym terminie student ma może napisać maksymalnie 2 kolokwia.

4



## Forma zaliczenia wykładu

2) Rozbójnik (kolokwium z całości materiału) dwa terminy w sesji + jeden w sesji poprawkowej. Ocena 3 za uzyskanie ilości punktów > połowy maksymalnej liczby punkt na teście

Uwagi

- Wyniki kolokwium będą umieszczone na mojej stronie internetowej w ciągu 5 dni roboczych po kolokwium.
- Prace będą dostępne do wglądu w **godzinach moich konsultacji** przez 5 dni roboczych po publikacji wyników. (dla studiów niestacjonarnych na godzinach przyjęć przed wykładem na kolejnym zjeździe)

Laboratorium  
Ustalają prowadzący

5



## Plan wykładu

1. Układy scalone wzmacniaczy operacyjnych
2. Układy scalone wzmacniaczy mocy
3. Układy scalone wzmacniaczy pasmowych
4. Analogowe filtry aktywne czasu ciągłego i dyskretnego
5. Szumy układów aktywnych
6. Analogowe układy mnożące i jego zastosowania
7. Pętla fazowa i jej zastosowania
8. Detektory amplitudy, częstotliwości i przesunięcia fazowego
9. Przetworniki analogowo cyfrowe i cyfrowo analogowe

6



## Pan laboratorium

Laboratorium: 15h (L215, B9)  
(9h na studiach niestacjonarnych)

- Zniekształcenia liniowe i nieliniowe
- Wzmacniacz szerokopasmowy
- Wzmacniacz mocy
- ...

7



## UWAGA !

Prezentowane na wykładzie slajdy nie zawierają całej wiedzy potrzebnej do uzyskania zaliczenia z przedmiotu układy elektroniczne 2.

Wiedza przekazywana jest na wykładzie. Warto prowadzić notatki.

Zalecane jest również sięganie do wskazanej literatury.

8



## Podziękowania

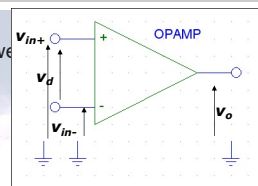
W przygotowaniu niniejszej prezentacji brali udział następujący studenci:  
Beata Mordzak – korekta tekstu

9



## Wzmacniacz operacyjny

- Wzmacniacz DC
- Duże wzmocnienie napięciowe
- Wejścia różnicowe
- Wyjście odniesione do masy
- Zastosowania:
- Liniowe i nienilorowe operacje na sygnałach



Wzrost napięcia wyjściowego w stosunku do napięcia różnicowego wejściowego

$$v_o = A_{vd}(v_{in+} - v_{in-}) = A_{vd}v_d$$

WO zazwyczaj pracuje z silnym ujemnym sprzężeniem zwrotnym

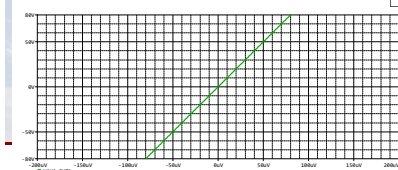
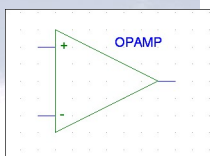
10



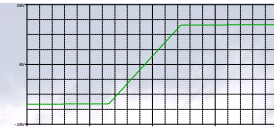
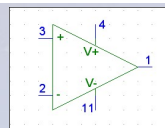
## Wzmacniacz operacyjny

Idealny wzmacniacz operacyjny:

- Nieskończona rezystancja wejściowa
- Zerowa rezystancja wyjściowa
- Nieskończone wzmocnienie napięciowe
- Nieskończone Pasmo
- **Napięcie wyjściowe niezależne od sumy napięć wejściowych**



## Wzmacniacz operacyjny



$$v_{out} = A_{vd}(v_{in+} - v_{in-}) + A_{vd}(v_{in+} + v_{in-}) + v_{noise} + V_{offset}$$

$$A_{vd} = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_d} \Big|_{U_c = const}$$

$$A_{vc} = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_c} \Big|_{U_c = const}$$

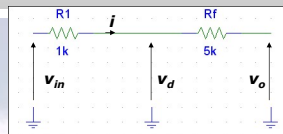
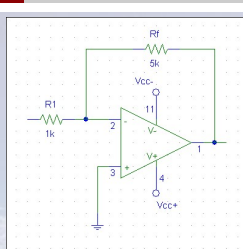
$$TC = \frac{A_{vd}}{A_{vc}}$$

$$CMRR = 20 \log \frac{A_{vd}}{A_{vc}}$$

12



## Wzmacniacz odwracający



$$v_{in} - v_o = i(R_1 + R_f)$$

$$v_d = v_i - iR_1$$

$$v_o = -v_d A$$

13



## Wzmacniacz odwracający

$$v_o = -v_d A \quad v_{in} - v_o = i(R_1 + R_f)$$

$$v_d = -v_o \frac{1}{A} \quad i = (v_{in} - v_o) \frac{1}{R_1 + R_f}$$

$$v_d = v_{in} - iR_1$$

$$-v_o \frac{1}{A} = v_{in} - (v_{in} - v_o) \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

$$-v_o \frac{1}{A} = v_{in} - v_{in} \frac{R_1}{R_1 + R_f} + v_o \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

14



## Wzmacniacz odwracający

$$-v_o \frac{1}{A} = v_{in} - v_{in} \frac{R_1}{R_1 + R_f} + v_o \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

$$-v_o \frac{1}{A} - v_o \frac{R_1}{R_1 + R_f} = v_{in} - v_{in} \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

$$-v_o \left( \frac{1}{A} + \frac{R_1}{R_1 + R_f} \right) = v_{in} \left( 1 - \frac{R_1}{R_1 + R_f} \right)$$

$$\frac{v_o}{v_{in}} = - \frac{1 - \frac{R_1}{R_1 + R_f}}{\frac{1}{A} + \frac{R_1}{R_1 + R_f}}$$

15



## Wzmacniacz odwracający

$$\frac{v_o}{v_{in}} = - \frac{1 - \frac{R_1}{R_1 + R_f}}{\frac{1}{A} + \frac{R_1}{R_1 + R_f}} = - \frac{\frac{R_1 + R_f - R_1}{R_1 + R_f}}{\frac{1}{A} + \frac{R_1}{R_1 + R_f}} = - \frac{\frac{R_f}{R_1 + R_f}}{\frac{1}{A} + \frac{R_1}{R_1 + R_f}}$$

$$\frac{v_o}{v_{in}} = - \frac{R_f}{R_1 + R_f} \frac{A(R_1 + R_f)}{R_1 + R_f + AR_1} = - \frac{AR_f}{R_1 + R_f + AR_1}$$

$$\frac{v_o}{v_{in}} = - \frac{AR_f}{R_1 + R_f + AR_1} = - \frac{R_f}{R_1} \frac{AR_1}{R_1 + R_f + AR_1}$$

16



## Wzmacniacz odwracający

$$\frac{v_o}{v_{in}} = - \frac{AR_f}{R_1 + R_f + AR_1} = - \frac{R_f}{R_1} \frac{AR_1}{R_1 + R_f + AR_1}$$

$$\frac{v_o}{v_{in}} = - \frac{R_f}{R_1} \frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{R_f}{AR_1} + 1} = - \frac{R_f}{R_1} \frac{1}{\frac{R_1 + R_f}{AR_1} + 1}$$

$$\frac{v_o}{v_{in}} = - \frac{R_f}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{1}{A\beta_v}}$$

$$\beta_v = \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

17



## Wzmacniacz odwracający

$$\frac{v_o}{v_{in}} = - \frac{R_f}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{1}{A\beta_v}}$$

$$\beta_v = \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

$$A\beta_v > 1000$$

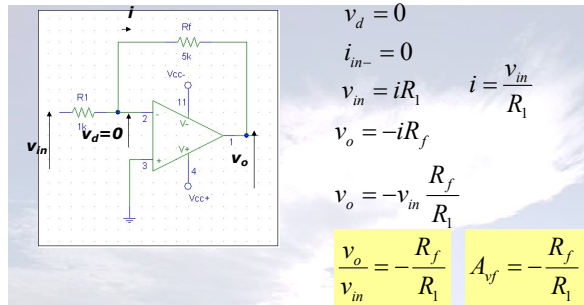
$$A_{vf} = - \frac{R_f}{R_1}$$

$$A_{vf} = - \frac{Z_f}{Z_i}$$

18



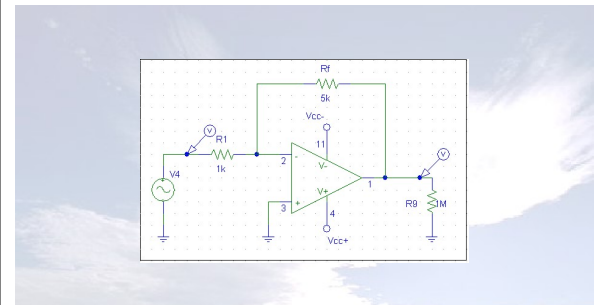
## Wzmacniacz odwracający



19



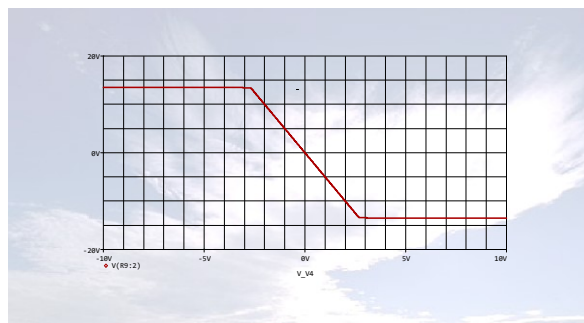
## Wzmacniacz odwracający



20



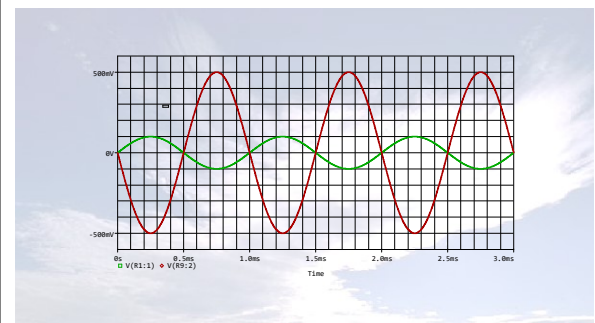
## Wzmacniacz odwracający charakterystyka przejściowa



21



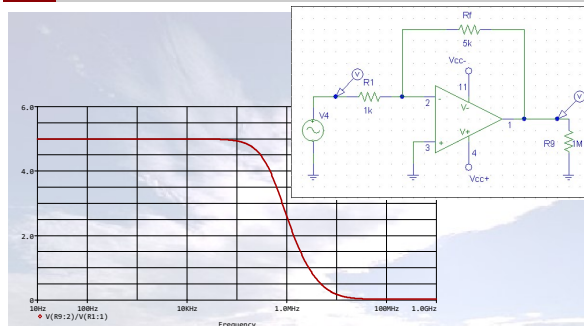
## Wzmacniacz odwracający Przebieg czasowy



22



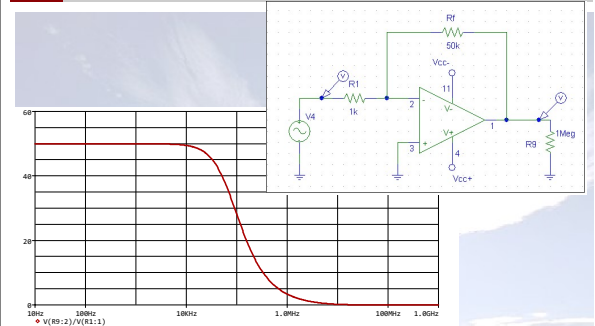
## Wzmacniacz odwracający charakterystyka częstotliwościowa



23



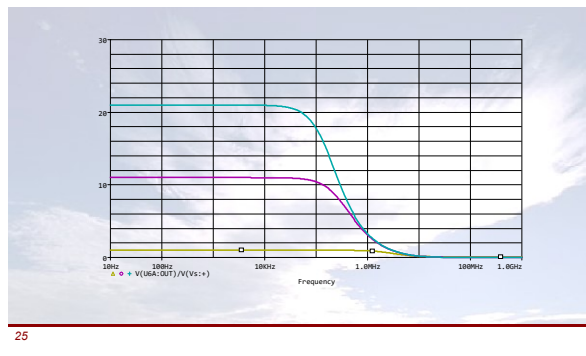
## Wzmacniacz odwracający charakterystyka częstotliwościowa



24



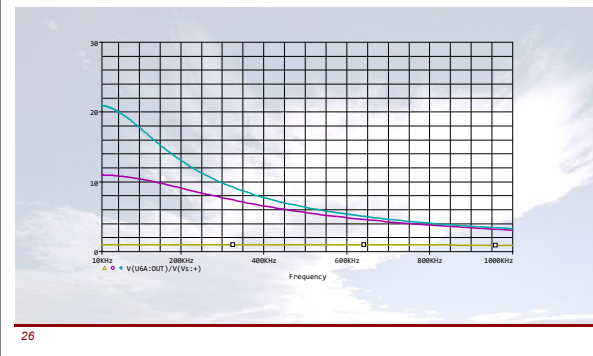
## Wzmacniacz odwracający charakterystyka częstotliwościowa



25



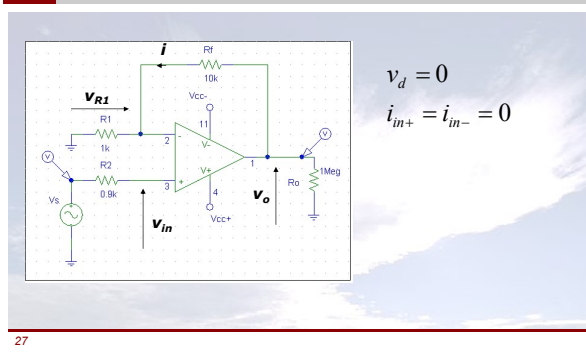
## Wzmacniacz odwracający charakterystyka częstotliwościowa



26



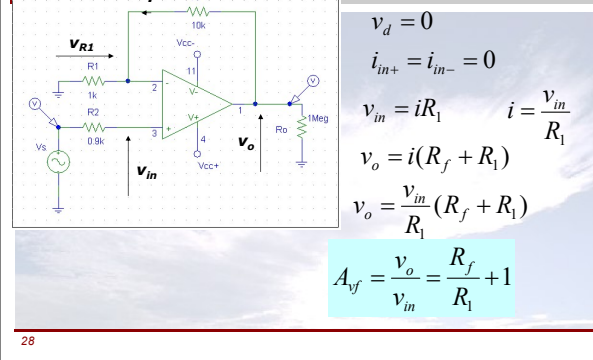
## Wzmacniacz nieodwracający



27



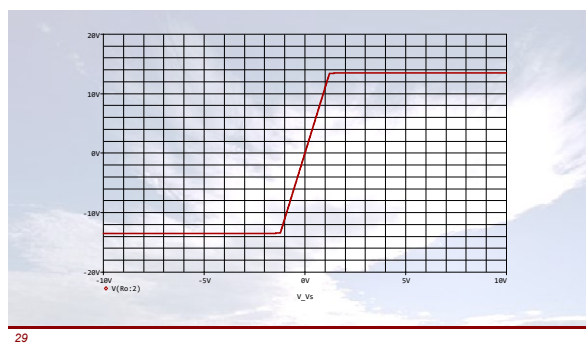
## Noninverting amplifier



28



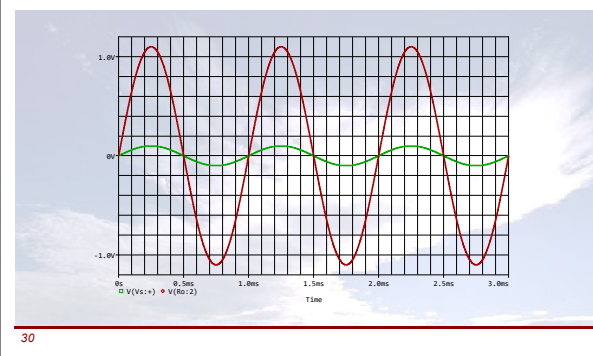
## Wzmacniacz nieodwracający charakterystyka przejściowa



29



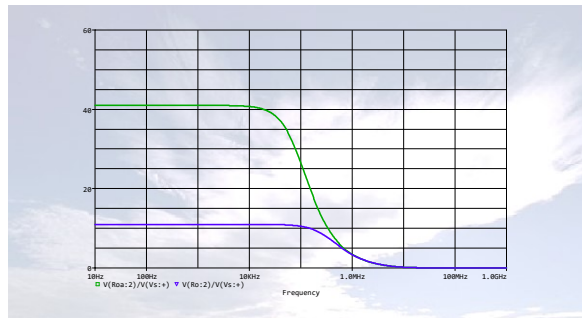
## Wzmacniacz nieodwracający przebiegi czasowe



30



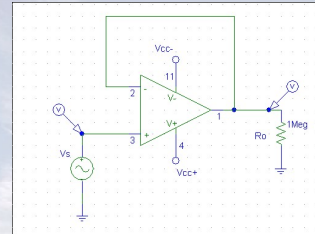
## Wzmacniacz nieodwracający charakterystyka częstotliwościowa



31



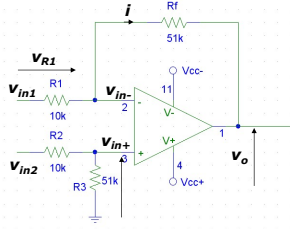
## Bufor (Voltage follower)



32



## Differential amplifier



$$v_d = 0$$

$$i_{in+} = i_{in-} = 0$$

$$v_{in+} = v_{in2} \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

$$i = (v_{in1} - v_o) \frac{1}{R_1 + R_f}$$

$$v_{in-} = v_{in1} - iR_1$$

$$v_{in-} = v_{in1} - (v_{in1} - v_o) \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

33



## Differential amplifier

$$v_{in-} = v_{in1} - v_{in1} \frac{R_1}{R_1 + R_f} + v_o \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

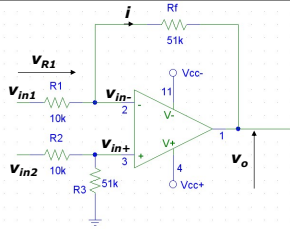
$$v_{in-} = v_{in1} \left( 1 - \frac{R_1}{R_1 + R_f} \right) + v_o \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

$$v_{in-} = v_{in1} \frac{R_f}{R_1 + R_f} + v_o \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

34



## Differential amplifier



$$v_d = 0$$

$$v_{in+} = v_{in-}$$

$$v_{in+} = v_{in2} \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

$$v_{in-} = v_{in1} \frac{R_f}{R_1 + R_f} + v_o \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

$$v_{in2} \frac{R_2}{R_2 + R_3} = v_{in1} \frac{R_f}{R_1 + R_f} + v_o \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

35



## Differential amplifier

$$v_{in2} \frac{R_2}{R_2 + R_3} = v_{in1} \frac{R_f}{R_1 + R_f} + v_o \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

$$v_o \frac{R_1}{R_1 + R_f} = v_{in2} \frac{R_2}{R_2 + R_3} - v_{in1} \frac{R_f}{R_1 + R_f}$$

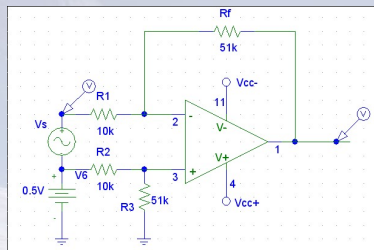
$$\frac{R_1}{R_f} = \frac{R_2}{R_3}$$

$$v_o = \frac{R_f}{R_1} (v_{in2} - v_{in1})$$

36



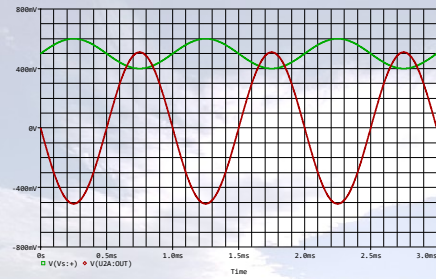
## Differential amplifier



37



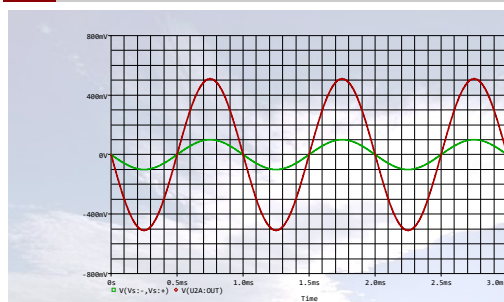
## Differential amplifier



38



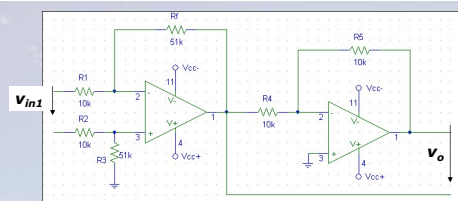
## Differential amplifier



39



## Differential amplifier



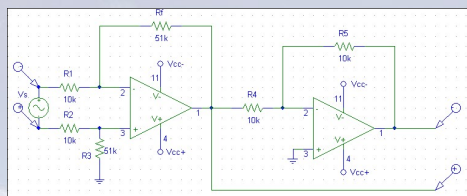
$$v_o = 2 \frac{R_f}{R_i} (v_{in2} - v_{in1})$$

$$v_o = 2 \frac{R_f}{R_i} v_{in1}$$

40



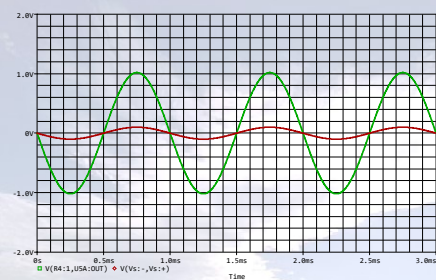
## Differential amplifier



41



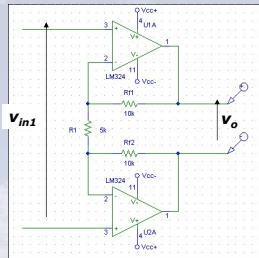
## Differential amplifier



42



### Differential amplifier with very high input resistance

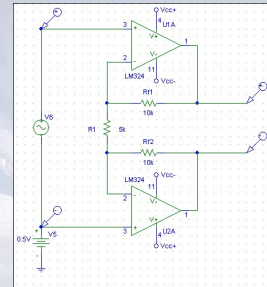


$$v_o = \left(1 + 2 \frac{R_f}{R_1}\right) v_{in2}$$

43



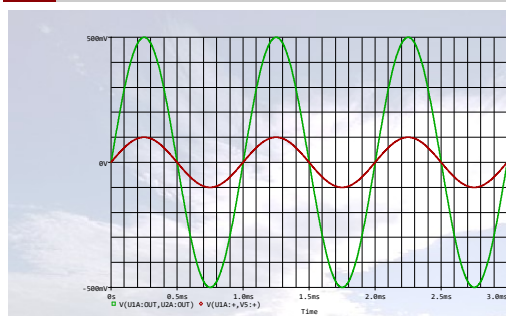
### Differential amplifier with very high input resistance



44



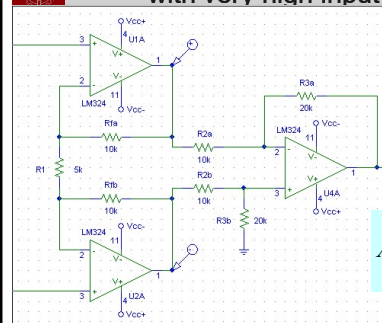
### Differential amplifier with very high input resistance



45



### Differential amplifier with very high input resistance

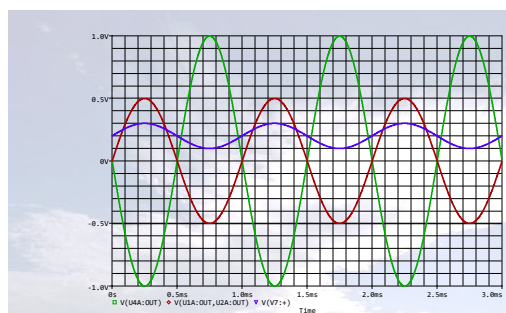


$$A_{vf} = -\left(1 + 2 \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2}$$

46



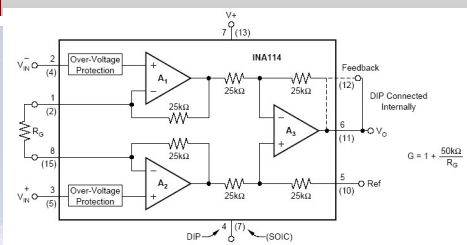
### Differential amplifier with very high input resistance



47



### Instrumentation amplifier



©1992 Burr-Brown Corporation

48

### Instrumentation amplifier

Microphone, Hydrophone etc.

Thermocouple

©1992 Burr-Brown Corporation

### Summing amplifier

$$i = \frac{u_{in1}}{R_1} + \frac{u_{in2}}{R_2} + \frac{u_{in3}}{R_3}$$

$$u_o = -u_{in1} \frac{R_f}{R_1} - u_{in2} \frac{R_f}{R_2} - u_{in3} \frac{R_f}{R_3}$$

Thanks to the virtual shortcircuit to the ground inputs are separated

### Current to voltage transducer

$$v_o = -i_{in} R_f$$

51

### Voltage to current transducer

$$i_L = \frac{v_{in} - V_{cc-}}{R_c}$$

52

### Differentiating amplifier

$$i(t) = C \frac{\partial v_{in}(t)}{\partial t}$$

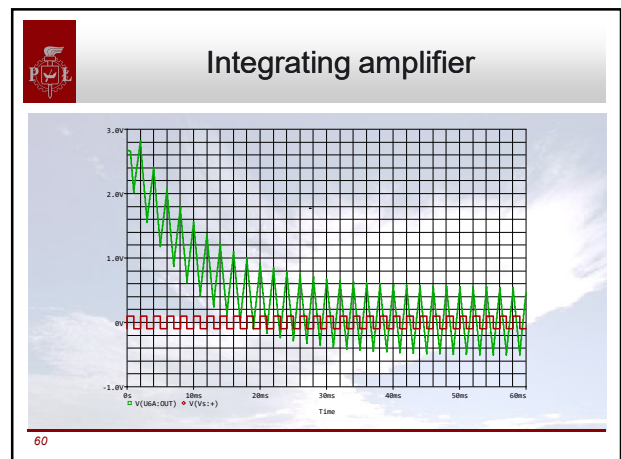
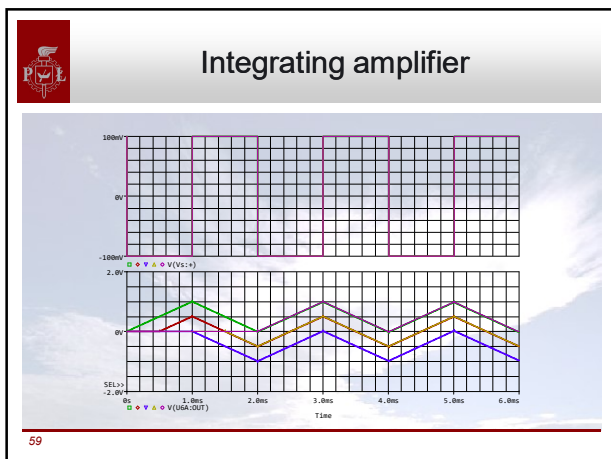
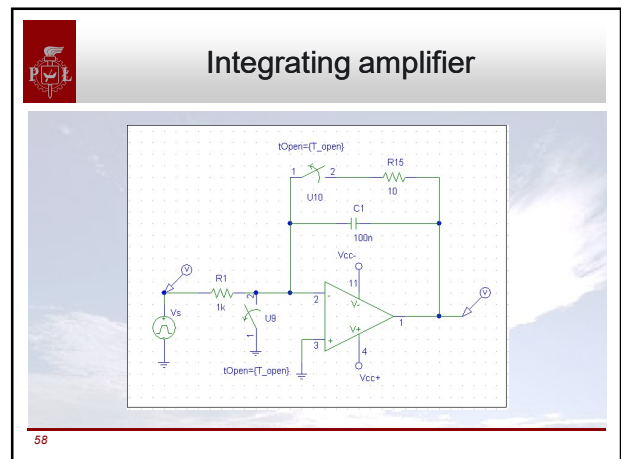
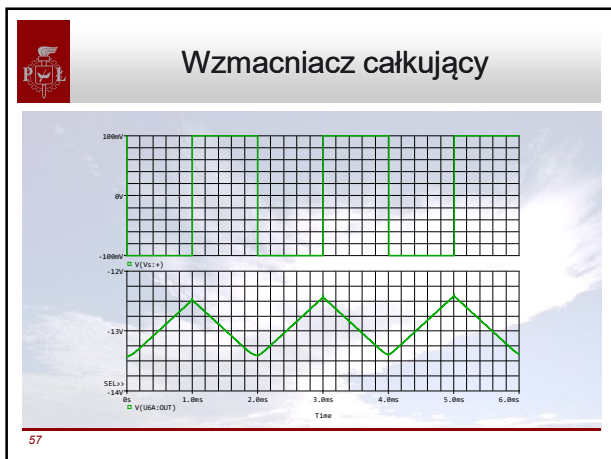
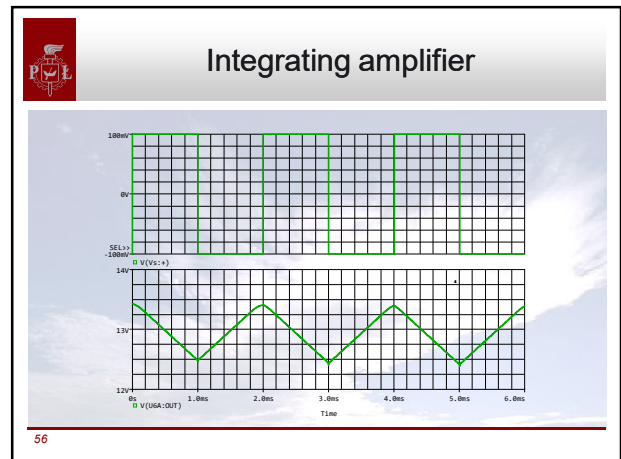
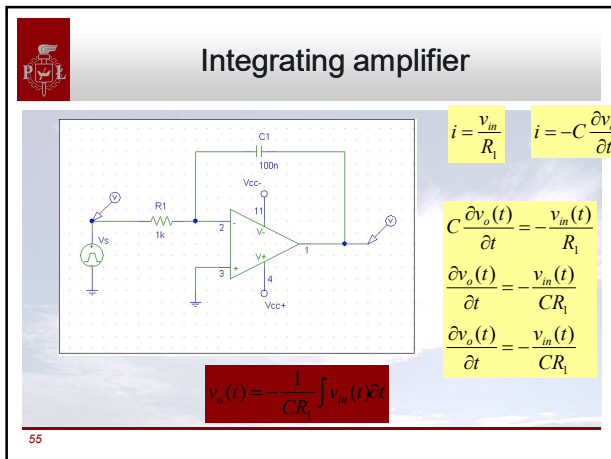
$$v_o(t) = -i(t) R_f$$

$$v_o(t) = -C R_f \frac{\partial v_{in}(t)}{\partial t}$$

53

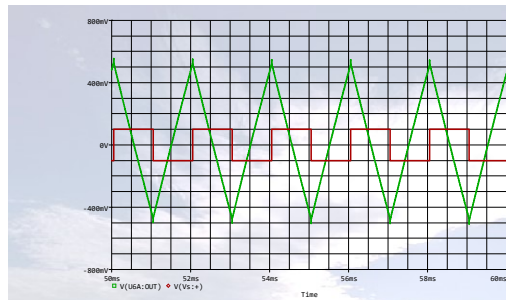
### Differentiating amplifier

54





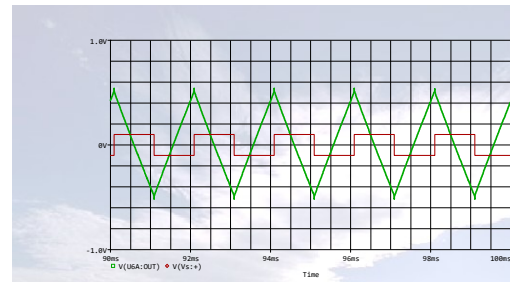
## Integrating amplifier



61



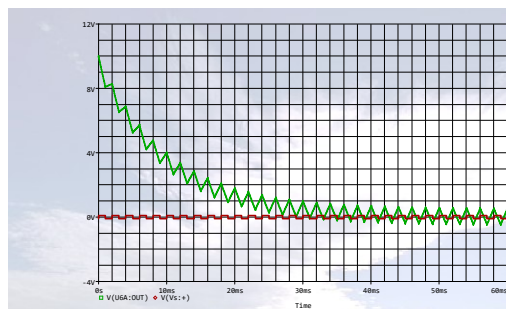
## Integrating amplifier



62



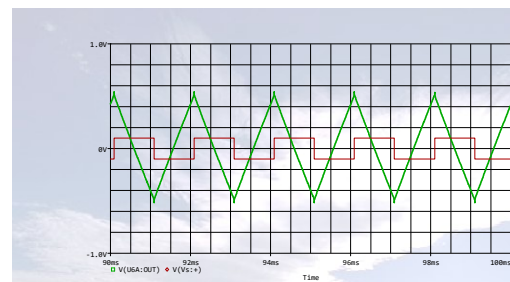
## Integrating amplifier



63



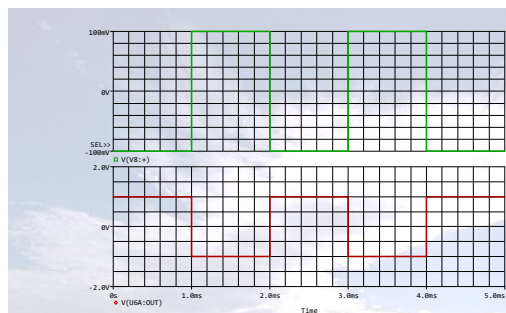
## Integrating amplifier



64



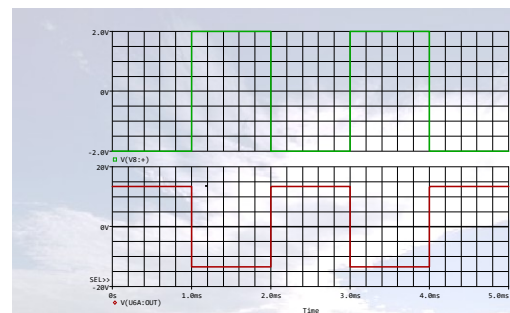
## Impulse response



65



## Impulse response

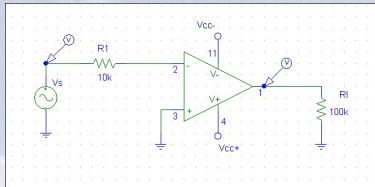


66



## Opamp with open feedback loop-comparator

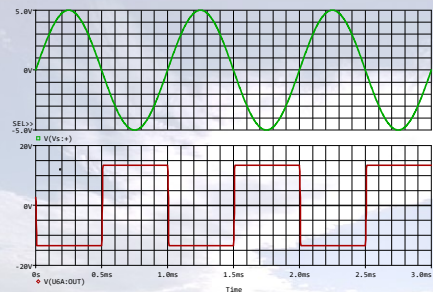
### Non regenerative detector of zero crossing



67



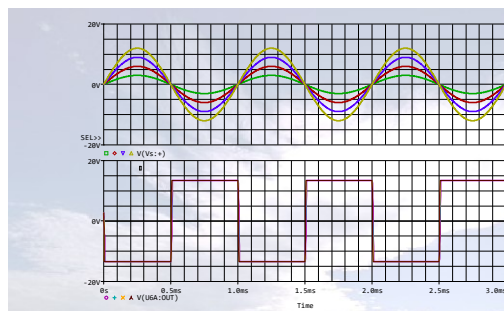
## Non regenerative detector of zero crossing



68



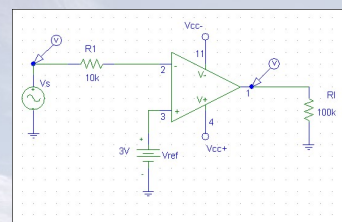
## Non regenerative detector of zero crossing



69



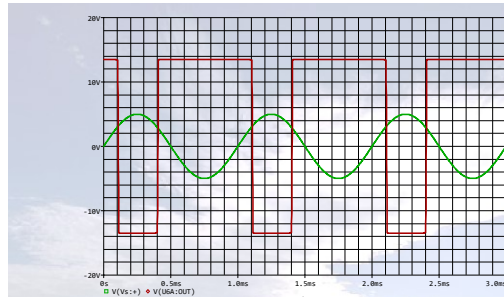
## Non regenerative amplitude discriminator



70



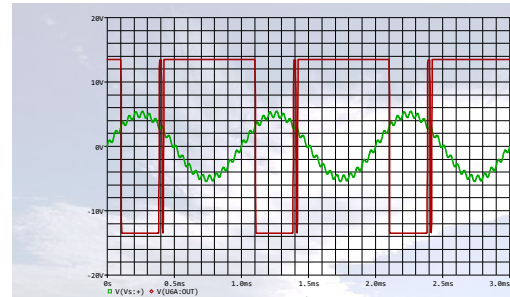
## Non regenerative amplitude discriminator



71



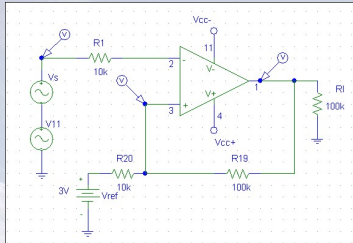
## Non regenerative amplitude discriminator



72



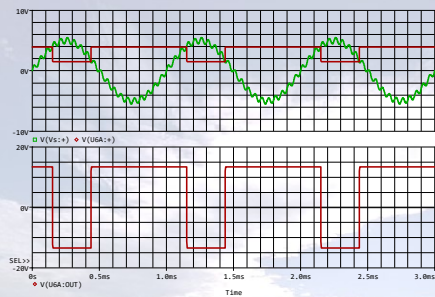
## Regenerative amplitude discriminator



73



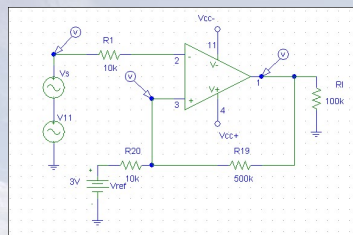
## Regenerative amplitude discriminator



74



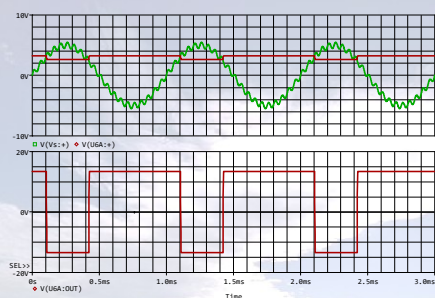
## Regenerative amplitude discriminator



75



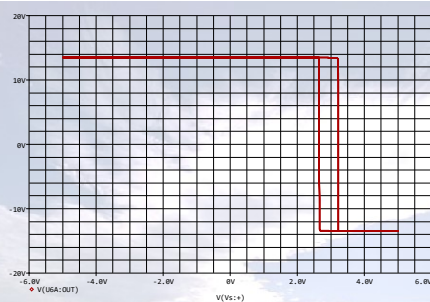
## Regenerative amplitude discriminator



76



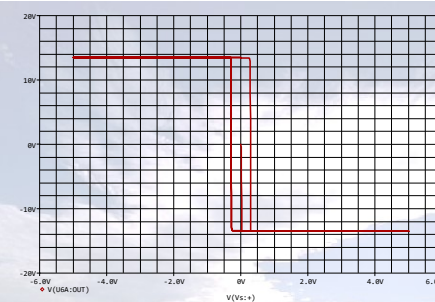
## Regenerative amplitude discriminator



77



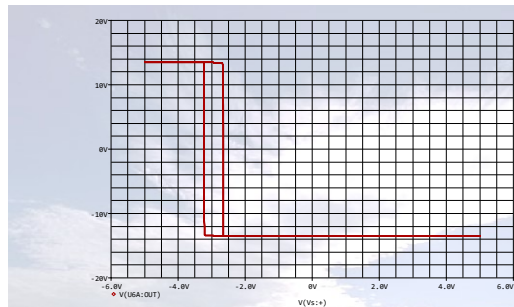
## Regenerative amplitude discriminator



78



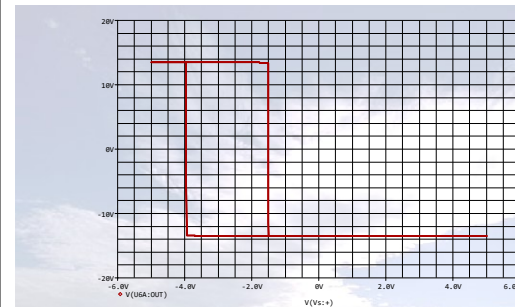
## Regenerative amplitude discriminator



79



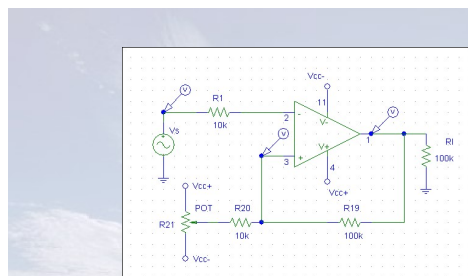
## Regenerative amplitude discriminator



80



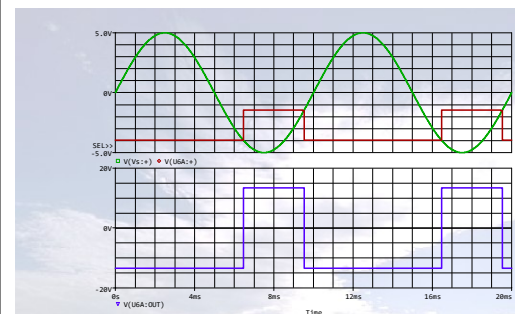
## Regenerative amplitude discriminator



81



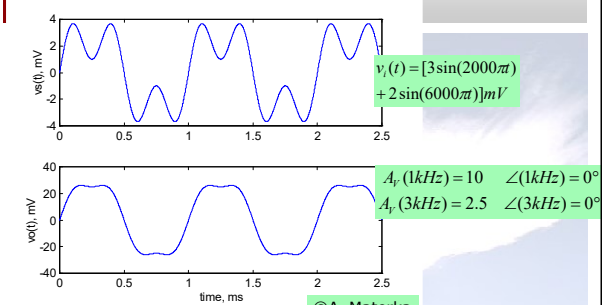
## Regenerative amplitude discriminator



82



## Zniekształcenia amplitudy

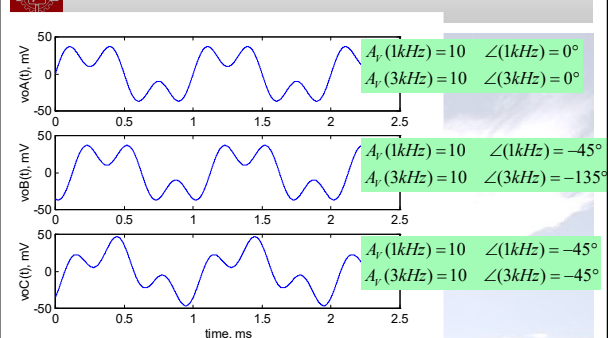


©A. Materka

83



## Zniekształcenia fazy



84



## Zniekształcenia fazy

Sygnał wejściowy suma dwóch sinusoid:

1. częstotliwość = 1 kHz; amplituda = 2V
2. częstotliwość = 3 kHz; amplituda = 1V

Symulacja w programie MatLab:

m-file: PhaseDistortion.m

300 próbek

częstotliwość próbkowania = 100 kHz

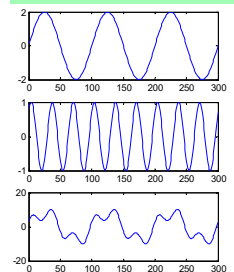
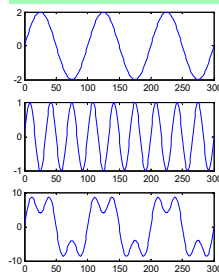
85



## Zniekształcenia fazy

$$A_r(1\text{kHz}) = 4 \quad \angle(1\text{kHz}) = 0^\circ$$
$$A_r(3\text{kHz}) = 4 \quad \angle(3\text{kHz}) = 0^\circ$$

$$A_r(1\text{kHz}) = 4 \quad \angle(1\text{kHz}) = 0^\circ$$
$$A_r(3\text{kHz}) = 4 \quad \angle(3\text{kHz}) = 45^\circ$$



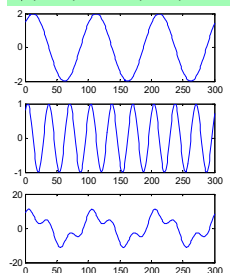
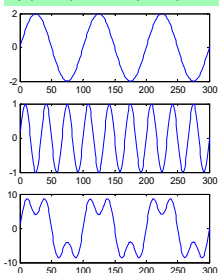
86



## Zniekształcenia fazy

$$A_r(1\text{kHz}) = 4 \quad \angle(1\text{kHz}) = 0^\circ$$
$$A_r(3\text{kHz}) = 4 \quad \angle(3\text{kHz}) = 0^\circ$$

$$A_r(1\text{kHz}) = 4 \quad \angle(1\text{kHz}) = 45^\circ$$
$$A_r(3\text{kHz}) = 4 \quad \angle(3\text{kHz}) = 45^\circ$$



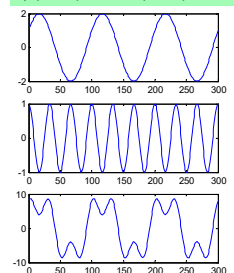
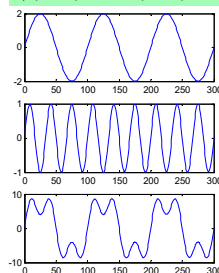
87



## Zniekształcenia fazy

$$A_r(1\text{kHz}) = 4 \quad \angle(1\text{kHz}) = 0^\circ$$
$$A_r(3\text{kHz}) = 4 \quad \angle(3\text{kHz}) = 0^\circ$$

$$A_r(1\text{kHz}) = 4 \quad \angle(1\text{kHz}) = 30^\circ$$
$$A_r(3\text{kHz}) = 4 \quad \angle(3\text{kHz}) = 90^\circ$$



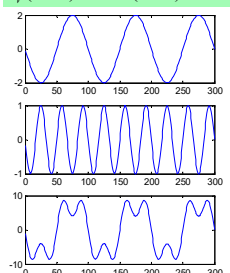
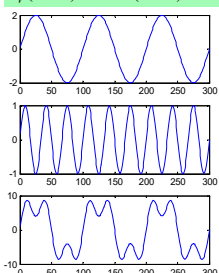
88



## Zniekształcenia fazy

$$A_r(1\text{kHz}) = 4 \quad \angle(1\text{kHz}) = 0^\circ$$
$$A_r(3\text{kHz}) = 4 \quad \angle(3\text{kHz}) = 0^\circ$$

$$A_r(1\text{kHz}) = 4 \quad \angle(1\text{kHz}) = 180^\circ$$
$$A_r(3\text{kHz}) = 4 \quad \angle(3\text{kHz}) = 180^\circ$$



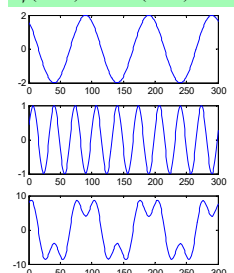
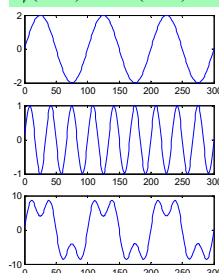
89



## Zniekształcenia fazy

$$A_r(1\text{kHz}) = 4 \quad \angle(1\text{kHz}) = 0^\circ$$
$$A_r(3\text{kHz}) = 4 \quad \angle(3\text{kHz}) = 0^\circ$$

$$A_r(1\text{kHz}) = 4 \quad \angle(1\text{kHz}) = 125^\circ$$
$$A_r(3\text{kHz}) = 4 \quad \angle(3\text{kHz}) = 15^\circ$$



90



## Zniekształcenia liniowe

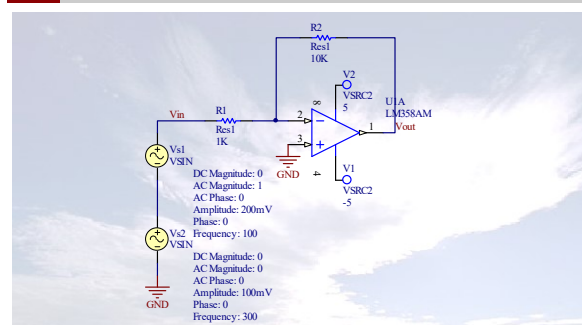
Warunki niewystępowania zniekształceń liniowych

- Warunek amplitudy:** stałe wzmocnienie w całym paśmie sygnału użytecznego  
 $A(f) = \text{const}$  dla  $f \in (f_L, f_H)$ ;
- Warunek fazy:** przesunięcie fazowe równe  $0^\circ$ , przesunięcie fazowe  $= 180^\circ$ , przesunięcie fazowe proporcjonalne do częstotliwości w całym paśmie sygnału użytecznego  
 $\varphi(f) = 0^\circ$ ,  $\varphi(f) = 180^\circ$ ,  $\varphi(f) = k \cdot f$  dla  $f \in (f_L, f_H)$

91



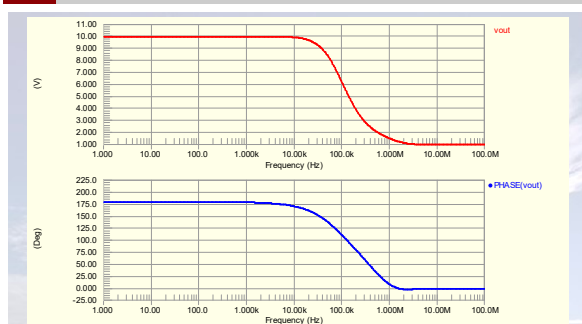
## Zniekształcenia liniowe



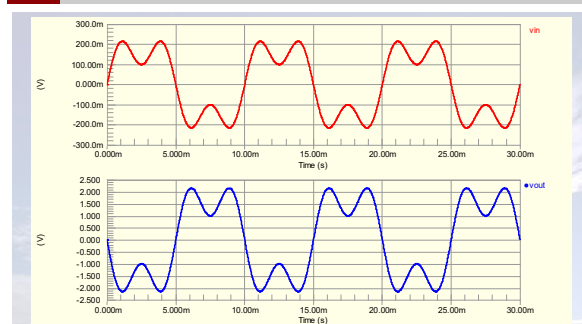
92



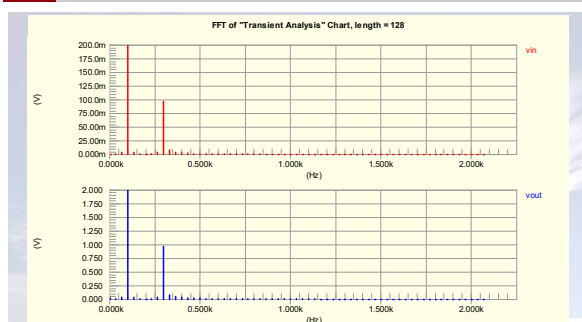
## Zniekształcenia liniowe



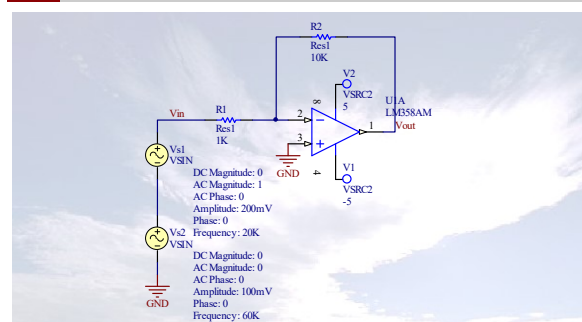
## Zniekształcenia liniowe



## Zniekształcenia liniowe



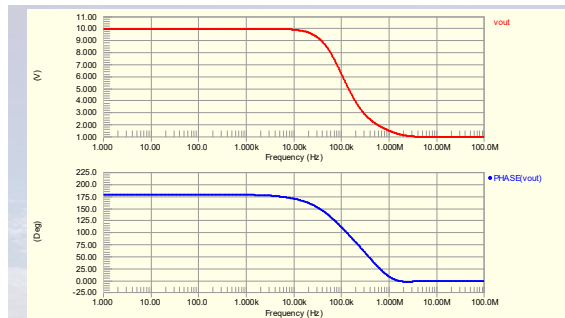
## Zniekształcenia liniowe



96



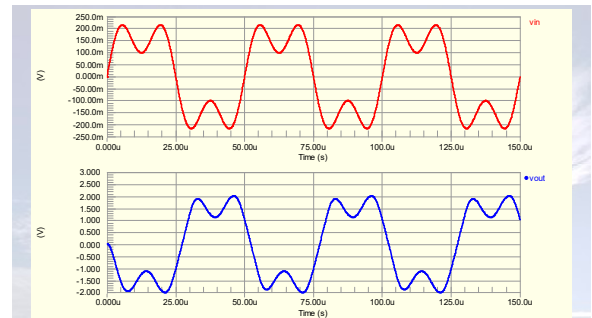
## Zniekształcenia liniowe



97



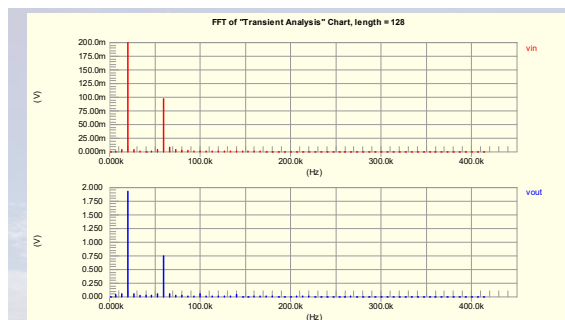
## Zniekształcenia liniowe



98



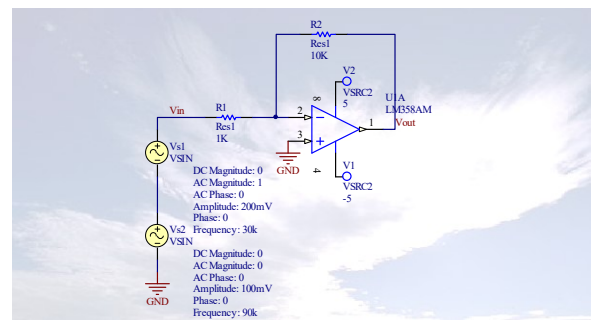
## Zniekształcenia liniowe



99



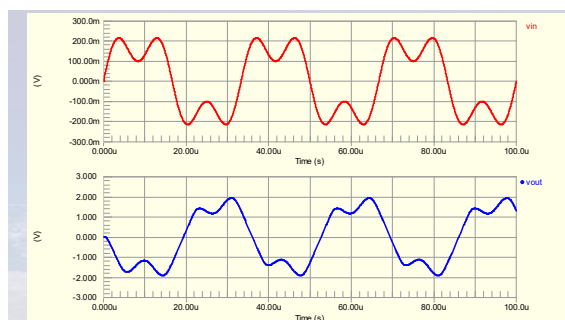
## Zniekształcenia liniowe



100



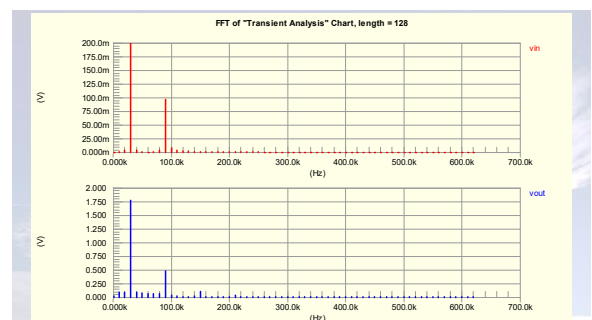
## Zniekształcenia liniowe



101

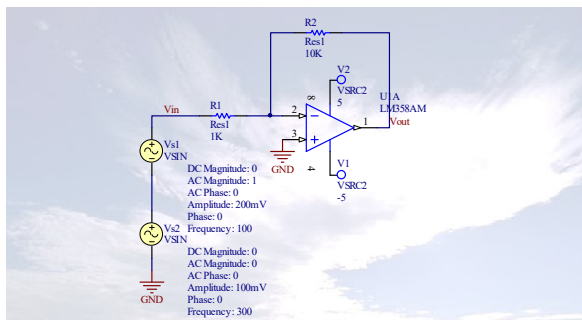


## Zniekształcenia liniowe



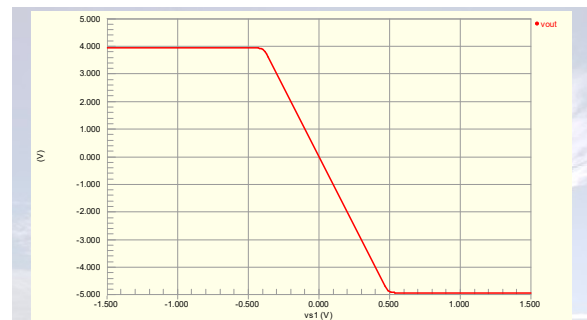
102

## Zniekształcenia nieliniowe



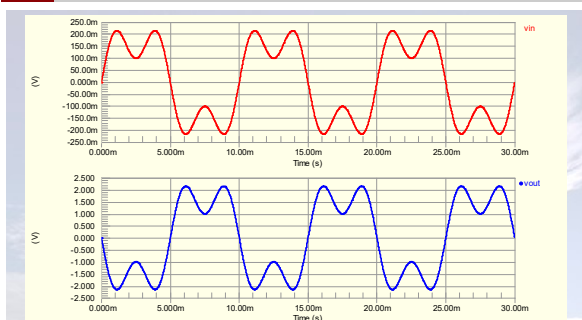
103

## Zniekształcenia nieliniowe



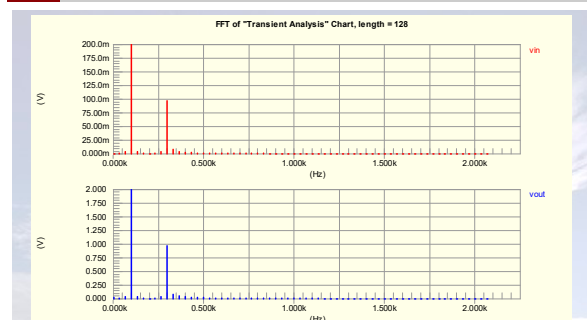
104

## Zniekształcenia nieliniowe



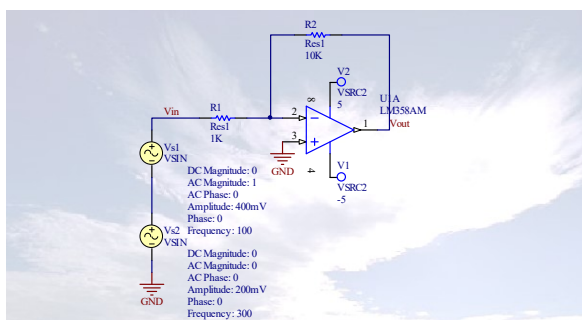
105

## Zniekształcenia nieliniowe



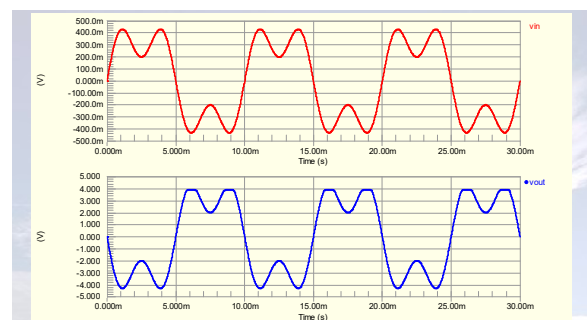
106

## Zniekształcenia nieliniowe



107

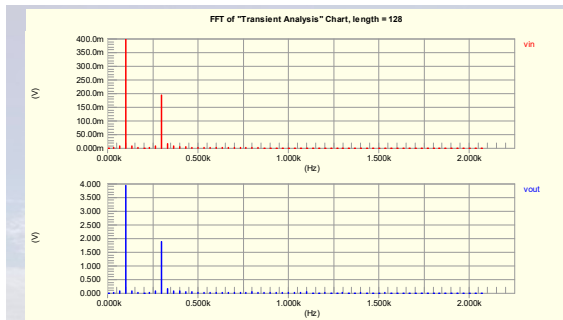
## Zniekształcenia nieliniowe



108



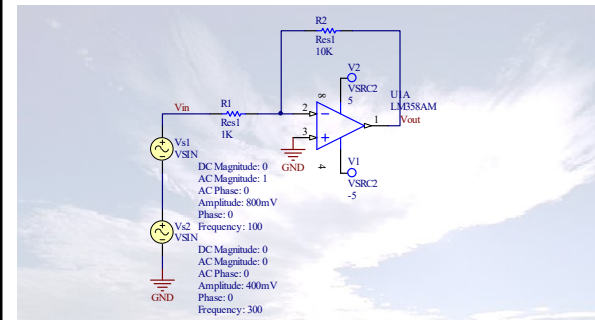
## Zniekształcenia nieliniowe



109



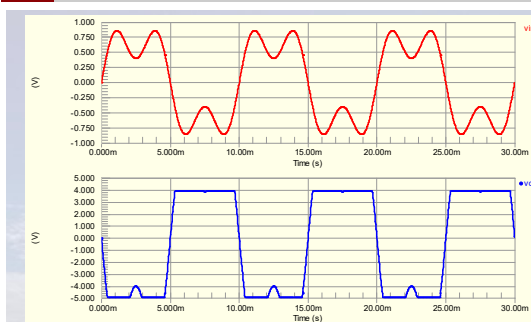
## Zniekształcenia nieliniowe



110



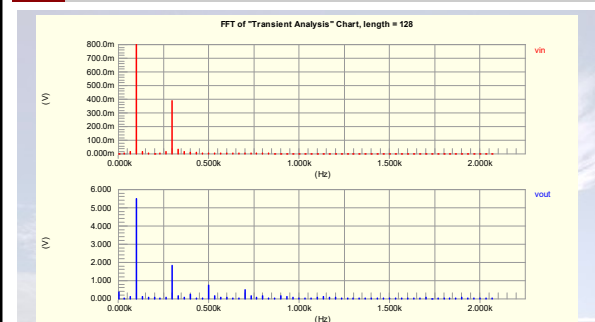
## Zniekształcenia nieliniowe



111



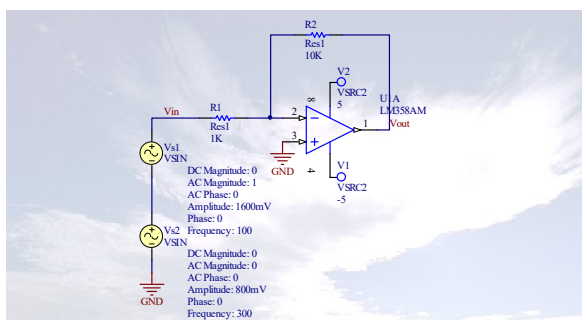
## Zniekształcenia nieliniowe



112



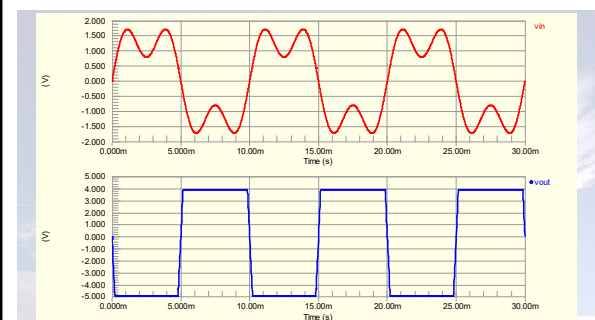
## Zniekształcenia nieliniowe



113

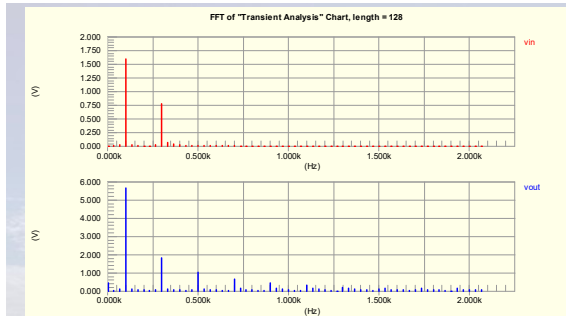


## Zniekształcenia nieliniowe



114

## Zniekształcenia nieliniowe



115

## Zniekształcenia nieliniowe

Zniekształcenia nieliniowe powodują dodawanie do sygnału wyjściowego **harmonicznych** nie występujących w sygnale wejściowym.

116

## Współczynnik zawartości harmonicznych THD (ang. *Total Harmonic Distortion*)

stosunek wartości skutecznej wyższych harmonicznych sygnału, do wartości skutecznej składowej podstawowej, mierzony dla sygnału sinusoidalnego

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n V_k^2}}{V_1}$$

gdzie:

$V_1$  - skuteczna wartość napięcia składowej podstawowej  
 $V_k$  - skuteczna wartość napięcia k-tej harmonicznej

$$THD + N = \frac{\sqrt{V_n^2 + \sum_{k=2}^n V_k^2}}{V_1}$$

gdzie:

$V_n$  - skuteczna wartość napięcia szumu w paśmie pomiaru.

117

## Poziomy THD w technice audio

- 10% (-20dB) - poziom zniekształceń wyraźnie odczuwalny (dyskwalifikujący urządzenie audio)
- 1% (-40dB) - poziom akceptowalny w prostych systemach odtwarzania dźwięku, odczuwalny w systemach hifi przez słuchaczy o wyrobionym słuchu muzycznym.
- 0,1% (-60dB) - poziom ogólnie akceptowany z wyjątkiem wysokiej klasy systemów hifi
- 0,01% (-80dB) - poziom reprezentatywny dla sprzętu hifi wysokiej klasy (np. odtwarzacze CD), akceptowany przez audiofilów
- 0,001% (-100dB) - poziom w zasadzie poza możliwościami systemów audio. Spotykany w odbiornikach radiowych wysokiej jakości.
- 0,0001% (-120dB) - poziom zbliżony do najniższych poziomów audio możliwych obecnie do zmierzenia w najkorzystniejszych warunkach.

118

## Notacja (zapis) decybelowa

$$A_{vdB} = 20 \log |A_v| \text{ dB} \quad \text{Wzmocnienie napięciowe}$$

$$A_{idB} = 20 \log |A_i| \text{ dB} \quad \text{Wzmocnienie prądowe}$$

$$G_{dB} = 10 \log G \text{ dB} \quad \text{Wzmocnienie mocy}$$

$A_v = 100$	→ 40 dB,	$G = 100$	→ 20 dB,
$A_v = 10$	→ 20 dB,	$G = 10$	→ 10 dB,
$A_v = 1$	→ 0 dB,	$G = 1$	→ 0 dB,
$A_v = 0.1$	→ -20 dB.	$G = 0.1$	→ -10 dB.

$$G_{dB} = A_{vdB} \Leftrightarrow R_L = R_i$$

119

## Plan wykładu

1. Szumy układów aktywnych
2. Układy scalone wzmacniacze mocy
3. Układy scalone wzmacniacze pasmowych
4. Analogowe filtry aktywne czasu ciągłego i dyskretnego
5. Analogowe układy mnożące i jego zastosowania
6. Pętla fazowa i jej zastosowania
7. Detektory amplitudy, częstotliwości i przesunięcia fazowego
8. Programowalne układy analogowe i ich zastosowania
9. Specjalizowane układy scalone
10. Przetworniki analogowo cyfrowe i cyfrowo analogowe

120



## Szumy układów elektronicznych

### Literatura:

Józef Boksa, Analogowe układy elektroniczne, BTC, Warszawa 2007  
Waldemar Nawrocki, Krzysztof Arnold, Krzysztof Lange, Układy Elektroniczne, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999  
Stanisław Kuta, Wykład układy Elektroniczne, szumy w układach elektronicznych, AGH <http://student.agh.edu.pl/~mborowka/UE/wyklad/R1.17.pl>  
Fabrizio Bonani, Giovanni Ghione, Noise in Semiconductor Devices: Modeling and Simulation Springer (Kindle Edition - 6 Sep 2001)

121



## Szumy układów elektronicznych

Szum

Zakłócenie

Zniekształcenie

122



## Szumy układów elektronicznych

### Szum

Niepożądany sygnał o przypadkowo zmieniających się w czasie parametrach generowany w elementach urządzenia elektronicznego

### Zakłócenie

Niepożądany sygnał zewnętrzny, zaburzający pracę urządzenia elektronicznego

### Zniekształcenie

Przewidywalna zmiana przebiegu sygnału użytecznego wprowadzana przez urządzenie elektroniczne wynikająca z właściwości danego urządzenia

123



## Szumy układów elektronicznych

Szum to niepożądane zakłócenie użytecznego sygnału. Nazwa pochodzi z analogii do szumu słyszanego.

Szum może blokować, zakłócać lub zmieniać znaczenie informacji niesionej przez sygnał.

Sygnał o przypadkowo zmieniających się w czasie parametrach generowany w elementach urządzenia elektronicznego

[http://en.wikipedia.org/wiki/Noise\\_\(electronics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Noise_(electronics))  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Noise>

124



## Szumy układów elektronicznych

### Rodzaje szumu:

- termiczny (ciepły),
- śrutowy,
- $1/f$ ,
- wybuchowy,
- magnetyczny,
- jonowy,
- lawinowy,
- generacyjno rekombinacyjny,
- ...

125



## Szum termiczny (ciepły)

Jest to główne źródło zakłóceń w układach elektronicznych. Za ich powstawanie odpowiada ruch elektronów swobodnych oraz ich oddziaływanie (zderzenia) z drgającymi jonami w sieci krystalicznej materiału. Szumy termiczne występują w każdym materiale przewodzącym o niezerowej rezystancji.

Przewidywany przez A. Einsteina w 1907r  
Zaobserwowany przez J. B. Johnsona z Bell Labs w 1928  
Opisany wzorem przez H Nyquista z Bell Labs

126



## Szum termiczny (cieplny)

Wartość średniokwadratową napięcia szumu termicznego na zaciskach opornika

$$\bar{v}^2 = 4k_B T R \Delta f \quad \text{wzór Johnsona-Nyquista}$$

gdzie:

$R$  – rezystancja [ $\Omega$ ]

$\Delta f$  – pasmo częstotliwości szumu [Hz],

$k_B$  – stała Boltzmanna =  $1,38 \times 10^{-23}$  [J/K]

$T$  – temperatura [K].

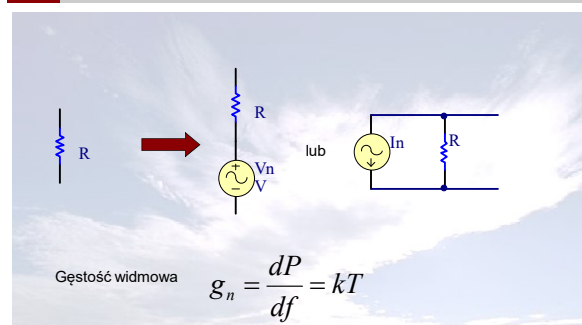
Moc szumu termicznego

$$P = \frac{\left(\frac{\bar{v}}{2}\right)^2}{R} = k_B T \Delta f$$

127



## Szum termiczny (cieplny)



128



## Szum termiczny (cieplny)

Główne właściwości szumu termicznego:

- jego występowanie dotyczy elementów o niezerowej rezystancji,
- jest skutkiem pobudzenia termicznego elektronów,
- jego widmo jest w równomiernie rozłożone w częstotliwości (przybliżenie poprawne w zakresie od 0 do ok.  $10^{13}$  Hz),
- jego moc jest proporcjonalna do temperatury i szerokości pasma

129



## Szum śrutowy

Szumem śrutowym nazywamy fluktuacje prądu elektrycznego, związane z ziarnistą naturą ładunku elektrycznego. Fluktuacja ta powstaje w przypadku przepływu nośników przez barierę potencjału.

Można ją zaobserwować w złączu P-N.

Szum śrutowy jest szumem białym i charakteryzuje się normalnym rozkładem wartości chwilowych oraz stałą gęstością widmową energii.

[http://pl.wikipedia.org/wiki/Szum\\_%C5%9Brutowy](http://pl.wikipedia.org/wiki/Szum_%C5%9Brutowy)

130



## Szum śrutowy

Wartość skuteczną fluktuacji prądu

$$I_{SZ} = \sqrt{2eI\Delta f} \quad \text{wzór Schottky'ego:}$$

Gdzie:

$e$  – ładunek elektronu  $1,6 \times 10^{-19}$  [C],

$I$  – wartość średnia prądu [A],

$\Delta f$  – pasmo częstotliwości szumu [Hz]

[http://pl.wikipedia.org/wiki/Szum\\_%C5%9Brutowy](http://pl.wikipedia.org/wiki/Szum_%C5%9Brutowy)

131



## Szum śrutowy

Główne właściwości szumu śrutowego:

- jego występowanie dotyczy elementów posiadających barierę potencjałów (np. złącza p-n),
- jest skutkiem kwantowej struktury prądu,
- jego widmo jest w równomiernie rozłożone w częstotliwości,
- jego pomiary pozwalają na wyznaczenie wielkości ładunku elementarnego

132



## Szum typu 1/f (małoczęstotliwościowy)

Szum ten obserwowany jest we wszystkich rodzajach elementów elektronicznych.

Przyczyna powstawania szumu 1/f jest na razie niewyjaśniona.

Jedna z hipotez głosi, że jest on spowodowany fluktuacjami przewodności na styku pomiędzy dwoma materiałami w elemencie elektronicznym. Ta hipoteza wyjaśnia dlaczego ten szum występuje w elementach elektronicznych o zróżnicowanej budowie.

Inna teoria głosi że jest on rezultatem kilku różnych mechanizmów fizycznych w których dominuje generacja i rekombinacja ładunków w defektach struktury krystalicznej półprzewodnika.

133



## Szum typu 1/f (małoczęstotliwościowy)

Gęstość widmowa szumu 1/f :

$$S(f) = k \frac{1}{f^\alpha}$$

Wartość współczynnika  $\alpha$  jest zwykle bliska 1 zawiera się w zakresie (0,7 – 2).

Szum 1/f dla:

$\alpha = 1$  nazywany jest szumem różowym

$\alpha = 2$  nazywany jest szumem czerwonym

134



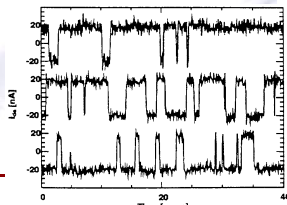
## Szum wybuchowy

Występuje w postaci impulsów o zazwyczaj stałej amplitudzie, przypadkowej częstotliwości i czasie trwania.

Jest on spowodowany przez wady w materiale elementu elektronicznego (np. defekt w złączu p-n)

Właściwości:

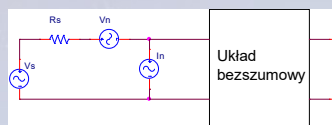
- czas trwania impulsów wynosi zwykle od milisekund do kilkudziesięciu sekund ;
- częstotliwość mniejsza od 1kHz;
- amplituda o jeden lub dwa rzędy wielkości większa od amplitudy szumu termicznego;



135



## Parametry szumowe



$$SNR = \frac{P_s}{P_n}$$

$$SNR_{out} = SNR_{in} \quad \text{Dla układu bezszumowego}$$

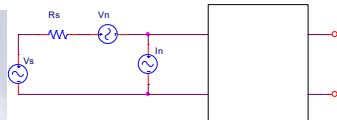
$$SNR_{out} = F \times SNR_{in} \quad \text{Dla układu rzeczywistego}$$

Gdzie:  $F$  współczynnik szumów układu  $F > 1$

136



## Parametry szumowe



$$V_{n\_total}^2 = V_n^2 + R_s^2 I_n^2 + V_{ns}^2 + 2c V_n I_n R_s$$

Gdzie:

$V_{n\_total}$  – całkowite zastępcze napięcie szumów sprowadzone do wejścia układu

$V_{ns}$  – napięcie szumu generowanego przez źródło sygnału

$c$  – współczynnik korelacji między  $V_n$  i  $I_n$

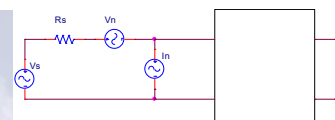
Gdy  $c = 0$ :

$$V_{n\_total}^2 = V_n^2 + R_s^2 I_n^2 + V_{ns}^2$$

137



## Współczynnik szumów



$$F = \frac{V_{n\_total}^2}{V_{ns}^2} = \frac{V_n^2 + R_s^2 I_n^2 + V_{ns}^2}{V_{ns}^2}$$

$$F[dB] = 10 \log_{10} \frac{V_n^2 + R_s^2 I_n^2 + V_{ns}^2}{V_{ns}^2}$$

138



## Szumy elementów biernych

Rezystor:

- szum cieplny
- szum nadmiarowy (o charakterze  $1/f$ ) powodowany przepływem prądu przez niejednorodną ziarnistą strukturę materiału rezystywnego

Kondensator:

- pomijalny szum cieplny
- szum nadmiarowy ( $1/f$ )
- szumy kondensatora filtruje pojemność kondensatora włączona równolegle do ich źródła

Cewka:

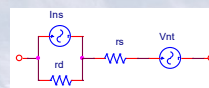
- szum cieplny
- szum Barkhausena (w cewkach z rdzeniem) powstający z fluktuacji pola magnetycznego w rdzeniu

139



## Szumy diod półprzewodnikowych

- Szum cieplny
- Szum śrutowy

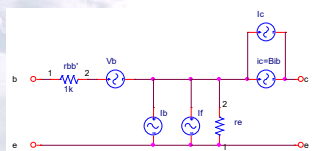


140



## Szumy tranzystorów BJT

- Szum cieplny rezystancji rozproszenia bazy
- Szum śrutowy prądu bazy
- Szum śrutowy prądu kolektora
- Szum  $1/f$



141



## Szumy w układach elektronicznych

- [http://www.national.com/analog/power/ldo/low\\_noise](http://www.national.com/analog/power/ldo/low_noise)
- <http://www.national.com/ds/LM/LM340.pdf>
- <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ina114.pdf>

142



## Plan wykładu

1. Szumy układów aktywnych
2. **Układy scalone wzmacniacze mocy**
3. Układy scalone wzmacniacze pasmowych
4. Analogowe filtry aktywne czasu ciągłego i dyskretnego
5. Analogowe układy mnożące i jego zastosowania
6. Pętla fazowa i jej zastosowania
7. Detektory amplitudy, częstotliwości i przesunięcia fazowego
8. Programowalne układy analogowe i ich zastosowania
9. Specjalizowane układy scalone
10. Przetworniki analogowo cyfrowe i cyfrowo analogowe

143



## Układy scalone wzmacniacze mocy

Literatura:

- Józef Boksa, Analogowe układy elektroniczne, BTC, Warszawa 2007
- Zbigniew Nosal, Jerzy Baranowski, Układy Analogowe Liniowe, Wydawnictwa Naukowo Techniczne Warszawa 2003
- Douglas Self, Audio Power Amplifier Design Handbook, Elsevier 2006
- G. Randy Slone, High-Power Audio Amplifier Construction Manual McGraw-Hill 1999

144



## Układy scalone wzmacniacze mocy

1. Zagadnienia związane ze wzmacniaczami mocy
2. Klasy wzmacniaczy mocy
3. Przykłady układów scalonych wzmacniaczy mocy

145



## Wzmacniacze mocy

- Układ elektroniczny, którego zadaniem jest dostarczenie żądanej mocy do obciążenia
- Ostatni wzmacniacz w szeregu bloków funkcyjnych (stopień wyjściowy)
- Sprawność jednym z najważniejszych parametrów charakteryzujących wzmacniacz mocy

146



## Wzmacniacze mocy

- Moc nie dostarczona do obciążenia jest zamieniana na ciepło.
- Duże amplitudy sygnałów powodują zniekształcenia nieliniowe.
- Do analizy pracy wzmacniaczy mocy nie można stosować modeli małosygnałowych.

147



## Parametry wzmacniacza mocy

- moc wyjściowa (podawana w watach przy określonym poziomie sygnału wejściowego)
- pasmo przenoszonych częstotliwości
- współczynnik sprawności energetycznej (podawany w procentach)
- współczynnik zniekształceń nieliniowych

148



## Sprawność wzmacniacza

$$P_i + P_s = P_o + P_d \leftarrow \text{Zasada zachowania mocy}$$

$P_i$  – moc wejściowa

$P_s$  – moc pobrana ze źródła zasilania

$P_o$  – moc wyjściowa

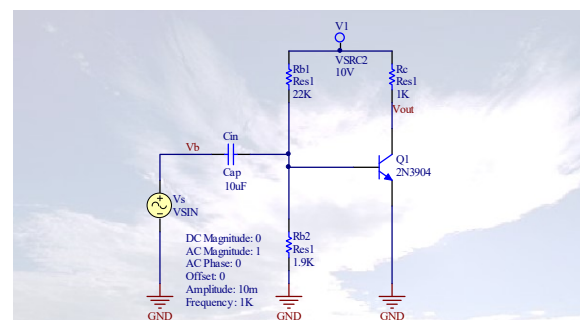
$P_d$  – moc rozproszona w układzie

$$\eta = \frac{P_o}{P_s} \cdot 100\% \leftarrow \text{sprawność}$$

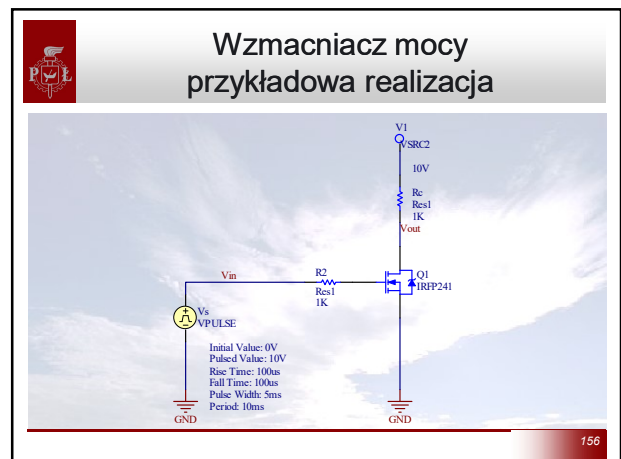
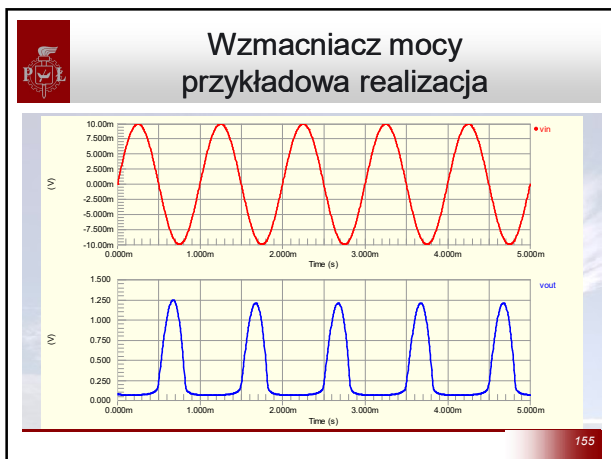
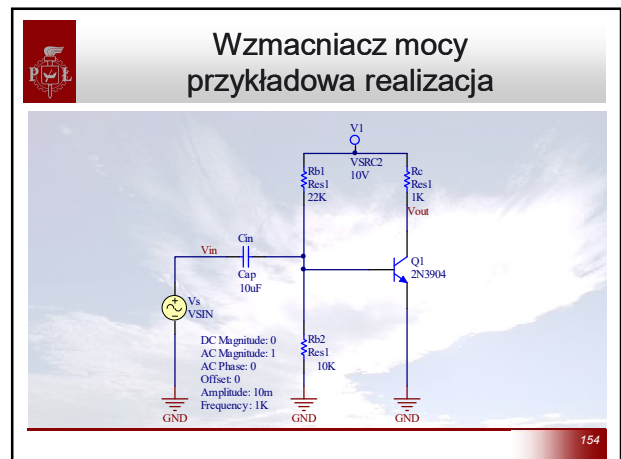
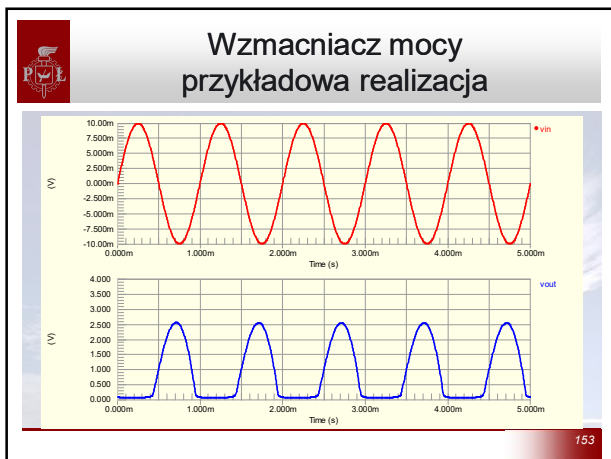
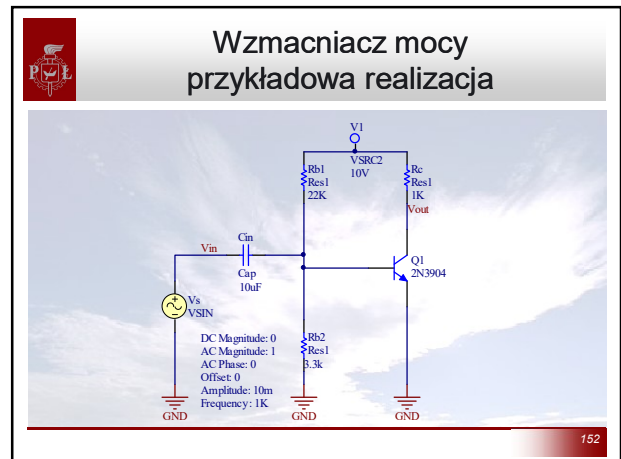
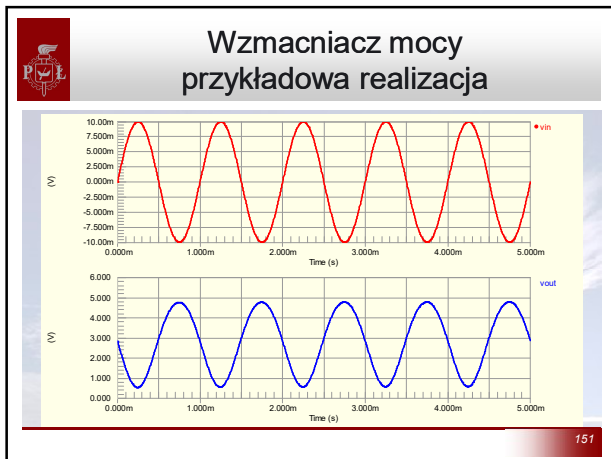
149



## Wzmacniacz mocy przykładowa realizacja

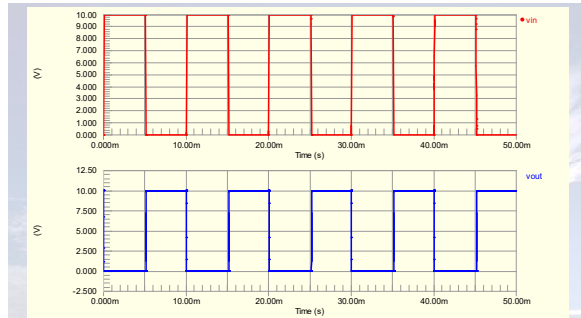


150





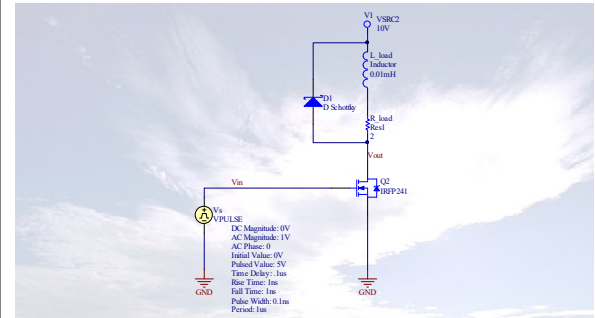
## Wzmacniacz mocy przykładowa realizacja



157



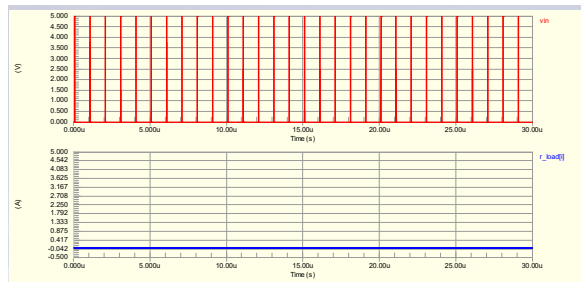
## PWM



158



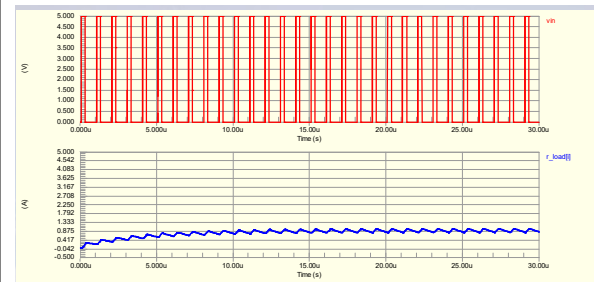
## PWM



159



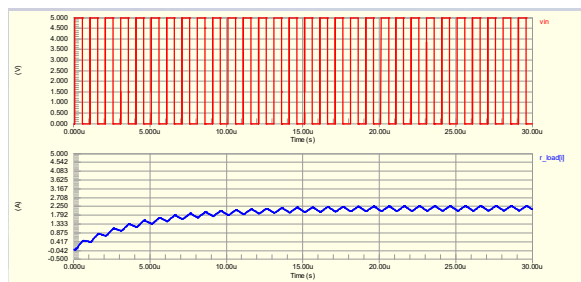
## PWM



160



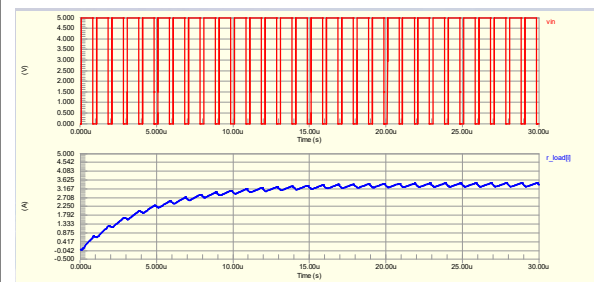
## PWM



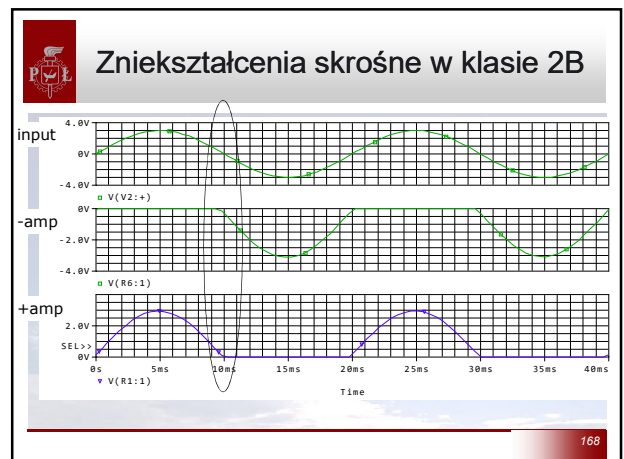
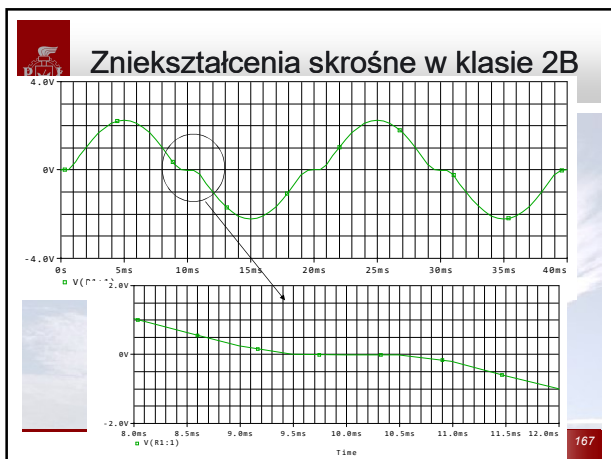
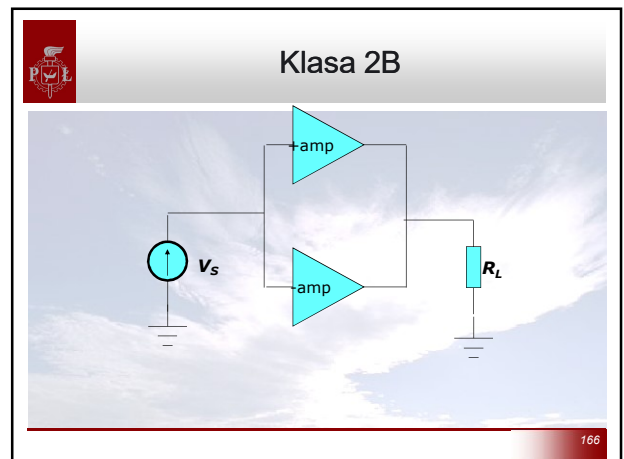
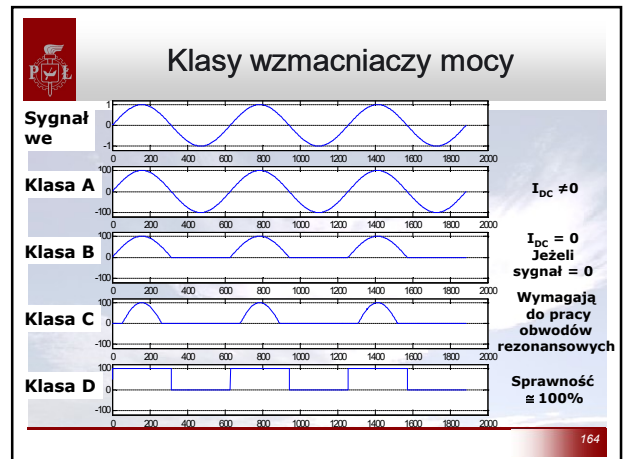
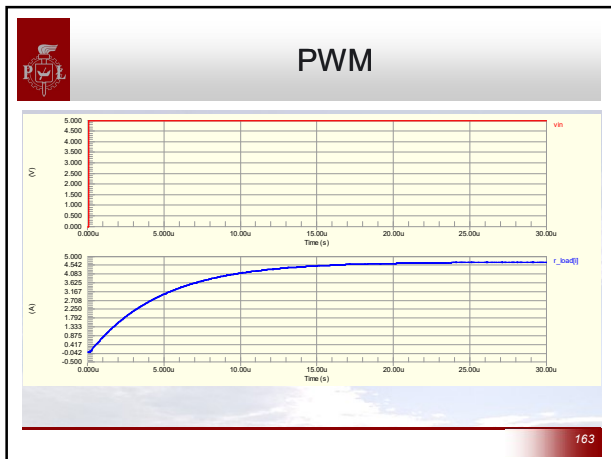
161

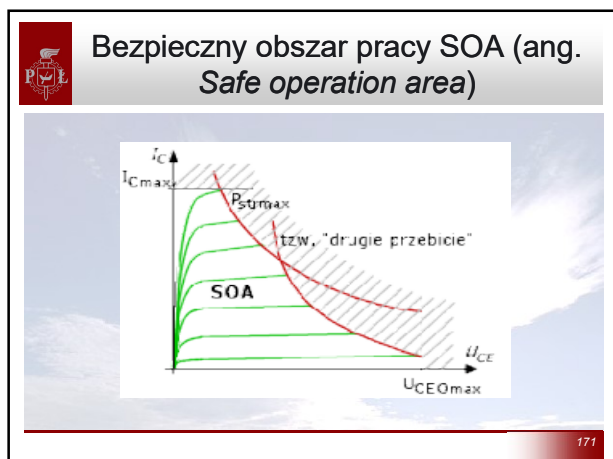
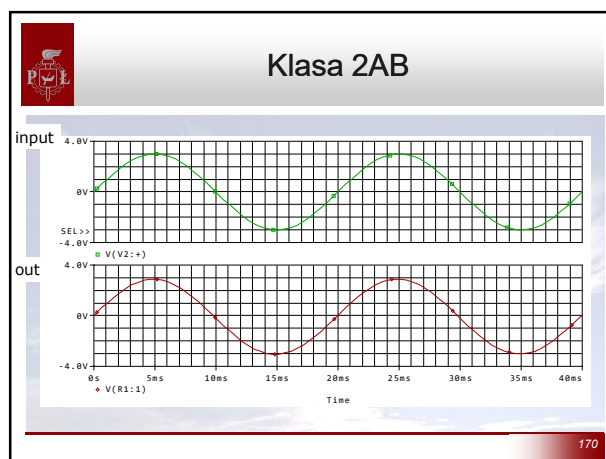
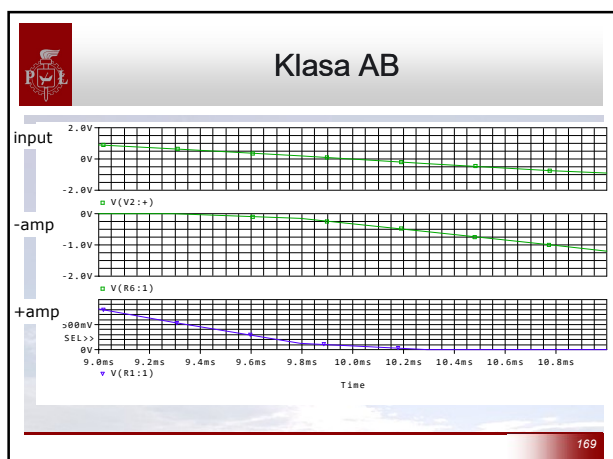


## PWM



162





- ### Układy scalone wzmacniaczy mocy.
- LM380 2.5W Audio Power Amplifier
  - TDA7052 1 W BTL mono audio amplifier
  - LM4780 Overture™ Audio Power Amplifier Series Stereo 60W, Mono 120W Audio Power Amplifier with Mute
  - TDA8920B 2 x 100 W class-D power amplifier
  - Class D Audio Amplifier Design International amplifier <http://www.irf.com/product-info/audio/classdtutorial.pdf>
- 172

- ### Plan wykładu
1. Szumy układów aktywnych
  2. Układy scalone wzmacniaczy mocy
  3. **Układy scalone wzmacniaczy pasmowych**
  4. Analogowe filtry aktywne czasu ciągłego i dyskretnego
  5. Analogowe układy mnożące i jego zastosowania
  6. Pętla fazowa i jej zastosowania
  7. Detektory amplitudy, częstotliwości i przesunięcia fazowego
  8. Programowalne układy analogowe i ich zastosowania
  9. Specjalizowane układy scalone
  10. Przetworniki analogowo cyfrowe i cyfrowo analogowe
- 173

- ### Układy scalone wzmacniaczy pasmowych i impulsowych
- Literature:
- Józef Boksa, Analogowe układy elektroniczne, BTC, Warszawa 2007
- Waldemar Nawrocki, Krzysztof Arnold, Krzysztof Lange, Układy Elektroniczne, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999
- Zbigniew Nosal, Jerzy Baranowski, Układy Analogowe Liniowe, Wydawnictwa Naukowo Techniczne Warszawa 2003
- 174



## Układy scalone wzmacniaczy pasmowych i impulsowych

1. Wprowadzenie
2. Związki między charakterystykami częstotliwościowymi i przebiegami czasowymi układów liniowych
3. Przykładowe układy scalone wzmacniaczy pasmowych i impulsowych

175



## Wzmacniacze szerokopasmowe i impulsowe

Bezwzględna szerokość pasma przenoszenia jest bardzo duża

$$(f_h - f_l) > \text{MHz}$$

$$\frac{f_h}{f_l} > 10$$

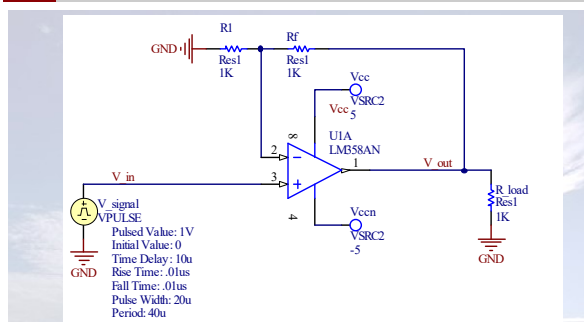
Przykładowe zastosowania:

- odbiorniki telewizyjne (30Hz - 6MHz)
- Oscyloskopy (DC do kilku GHz)
- urządzenia radarowe (do kilkunastu GHz)
- łączność światłowodowa (100kHz – 25GHz)

176



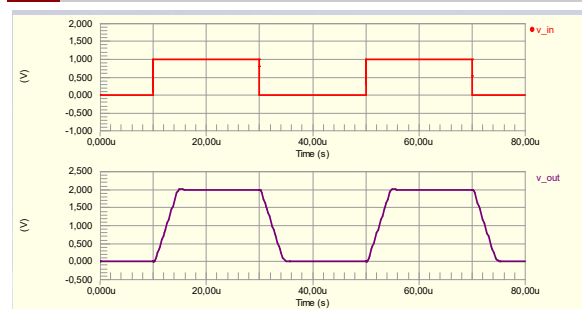
## Odpowiedź impulsowa wzmacniaczy



177



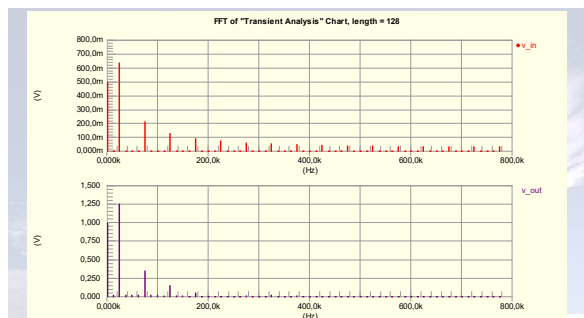
## Odpowiedź impulsowa wzmacniaczy



178



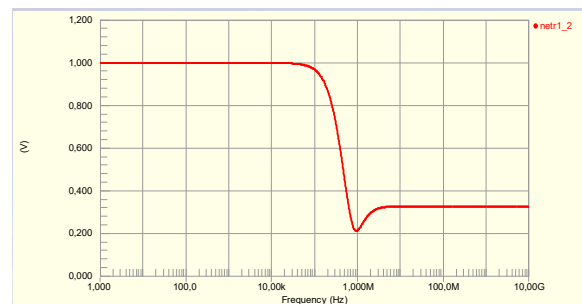
## Odpowiedź impulsowa wzmacniaczy



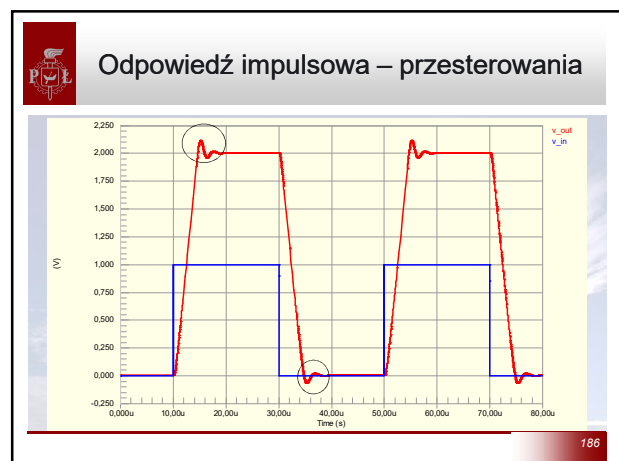
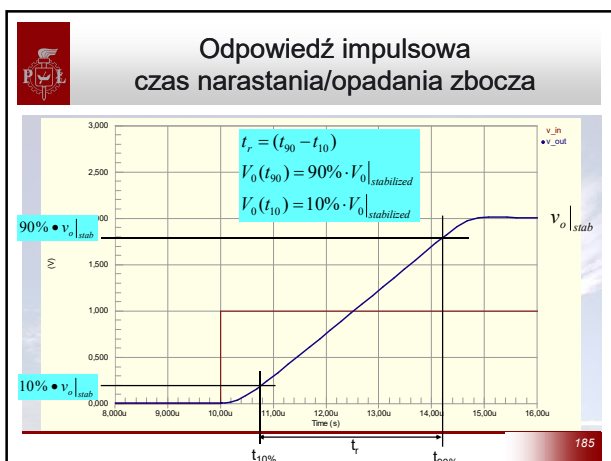
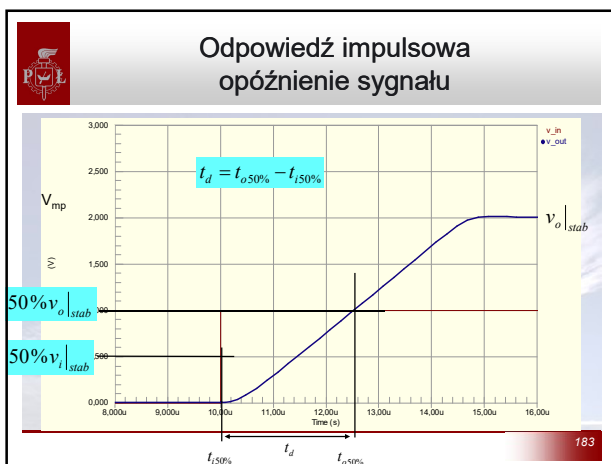
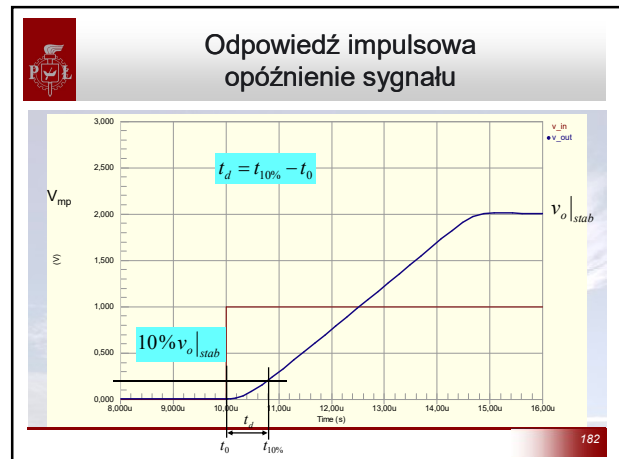
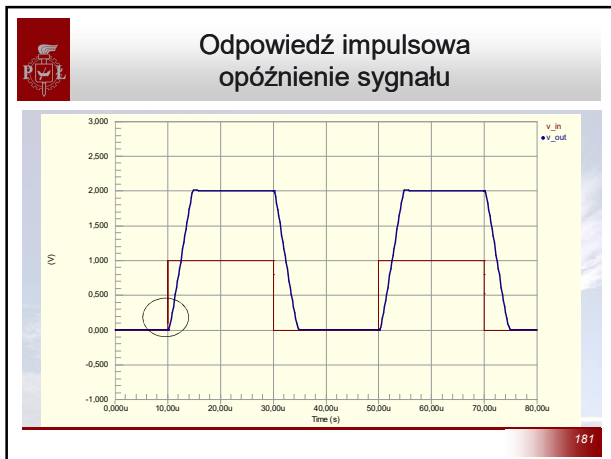
179



## Odpowiedź impulsowa wzmacniaczy

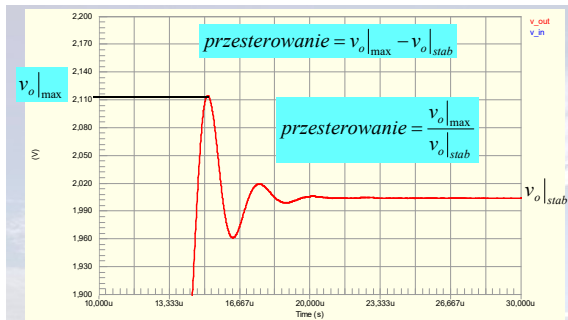


180





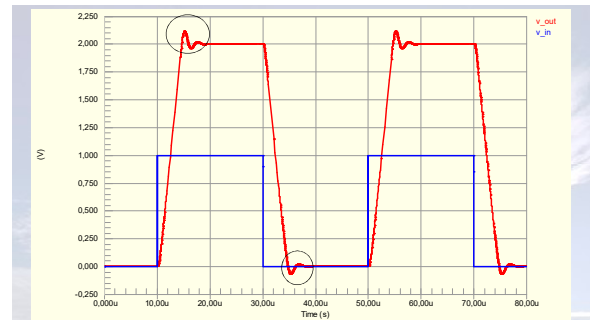
## Odpowiedź impulsowa – przesterowania



187



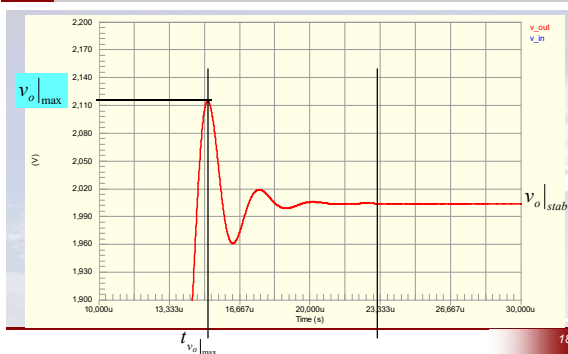
## Odpowiedź impulsowa – zafalowania



188



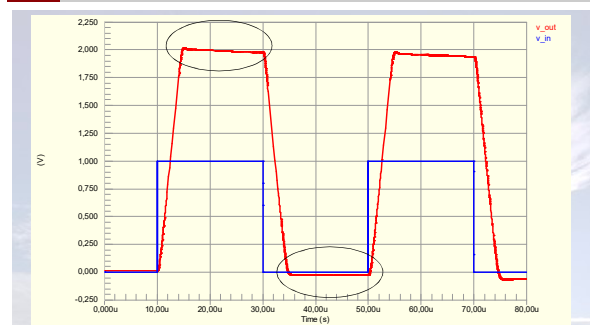
## Odpowiedź impulsowa – zafalowania



189



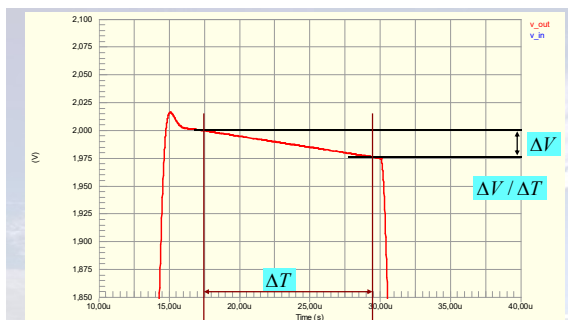
## Odpowiedź impulsowa – opadanie sygnału



190



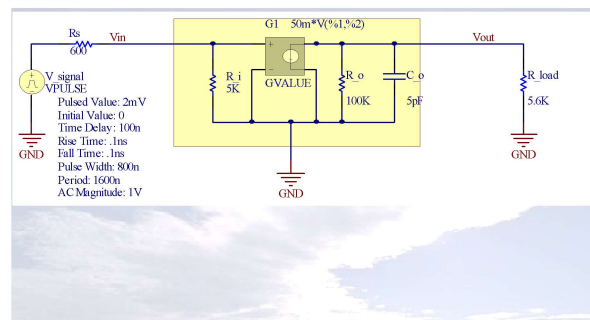
## Odpowiedź impulsowa – opadanie sygnału



191



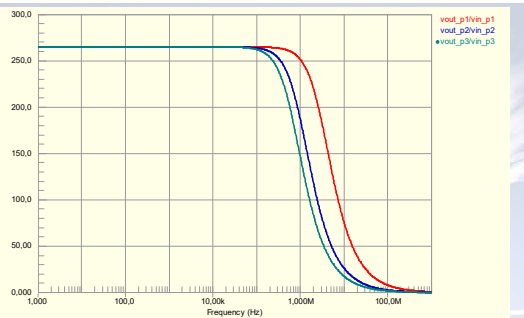
## Odpowiedź impulsowa a charakterystyka częstotliwościowa



192



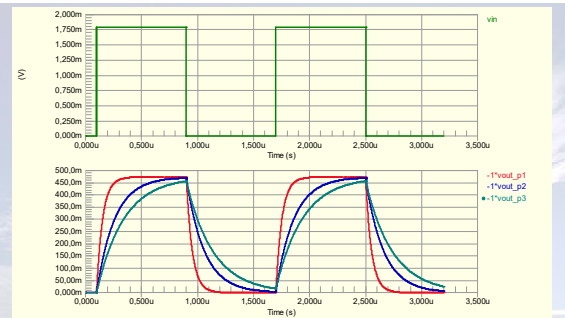
### Odpowiedź impulsowa a charakterystyka częstotliwościowa



193



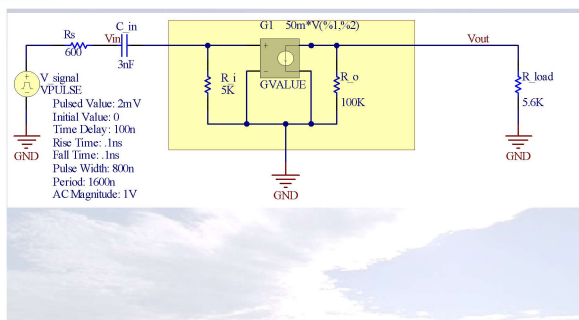
### Odpowiedź impulsowa a charakterystyka częstotliwościowa



194



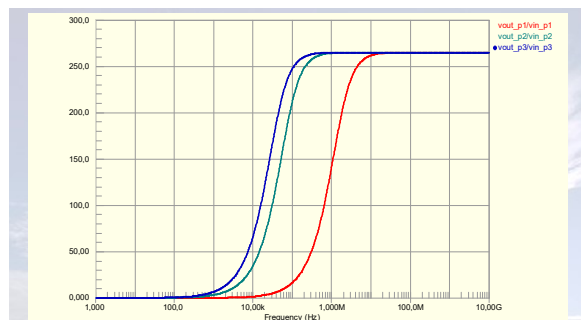
### Odpowiedź impulsowa a charakterystyka częstotliwościowa



195



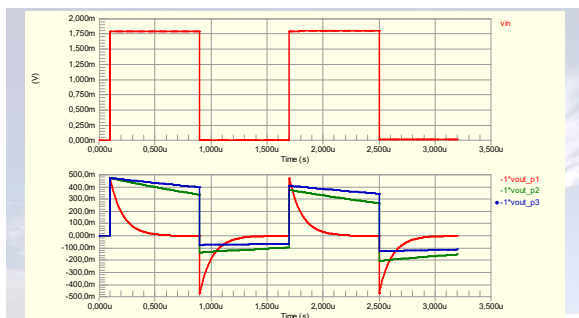
### Odpowiedź impulsowa a charakterystyka częstotliwościowa



196



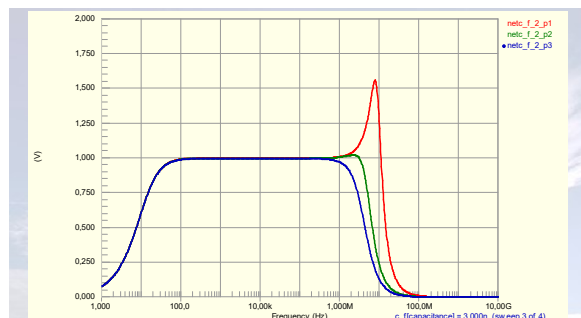
### Odpowiedź impulsowa a charakterystyka częstotliwościowa



197



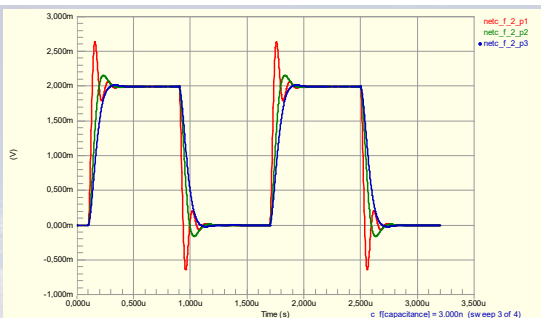
### Odpowiedź impulsowa a charakterystyka częstotliwościowa



198



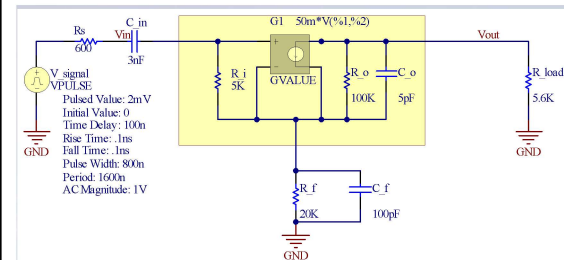
## Odpowiedź impulsowa a charakterystyka częstotliwościowa



199



## Odpowiedź impulsowa a charakterystyka częstotliwościowa



200



## Odpowiedź impulsowa podsumowanie

- Odpowiedź impulsowa określa dynamiczne zachowanie wzmacniacza
- Występuje 5 rodzajów zniekształceń odpowiedzi impulsowej:
  - opóźnienie
  - „łagodne” (nieostre) zbocze
  - przesterowanie
  - zafalowania
  - opadanie

201



## Związki między charakterystykami częstotliwościowymi a przebiegami czasowymi

$$h(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{k(s)}{s} \right]$$

Odpowiedź układu na skok jednostkowy  $1(t)$

Gdzie :

$k(s)$  – operatorowa funkcja przenoszenia układu

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = \lim_{\omega \rightarrow 0} k(j\omega)$$

Odpowiedź w zakresie grzbietu impulsu może być powiązana z przebiegiem charakterystyki  $k(j\omega)$  w zakresie małych częstotliwości.

$$\lim_{t \rightarrow 0} h(t) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} k(j\omega)$$

Odpowiedź w zakresie czoła impulsu może być powiązana z przebiegiem charakterystyki  $k(j\omega)$  w zakresie dużych częstotliwości.

202



## Związki między charakterystykami częstotliwościowymi a przebiegami czasowymi

Jednobiegunowa transmitancja dolnoprzepustowa

$$k(s) = \frac{k_0}{1 + \frac{s}{\omega_h}} \quad h(t) = 1k_0 \left( 1 - e^{-t\omega_h} \right)$$

$$t_r = t_{90\%} - t_{10\%}$$

$$t_{90\%} = t|_{h(t)=0.9k_0}$$

$$t_{10\%} = t|_{h(t)=0.1k_0}$$

$$t_r = \frac{2,303}{\omega_h} - \frac{0,105}{\omega_h} = \frac{2,198}{\omega_h} = \frac{2,198}{2\pi f_h} \approx \frac{0,35}{f_h}$$

203



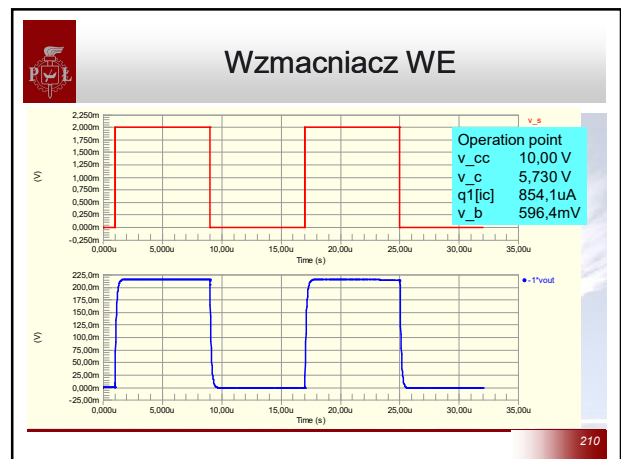
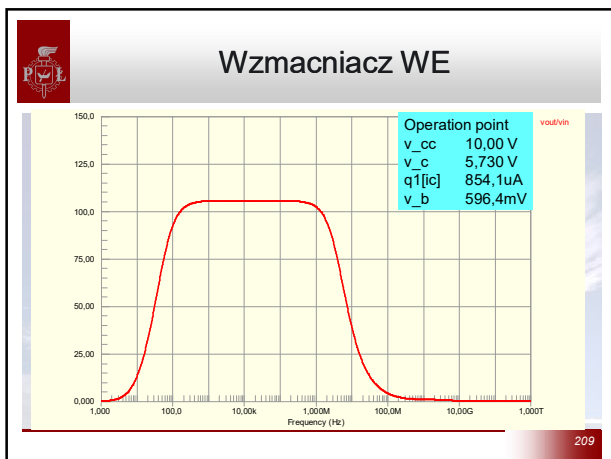
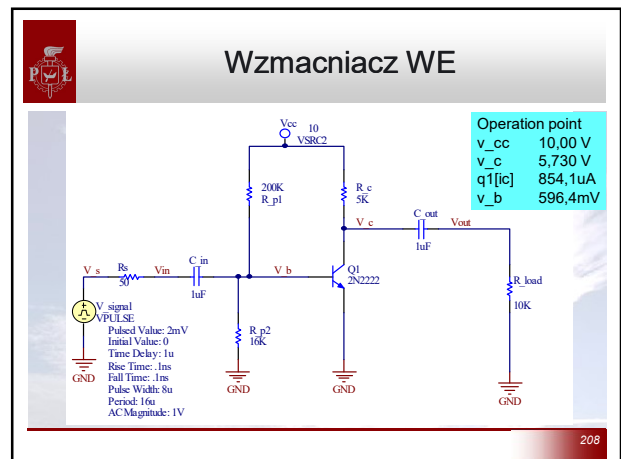
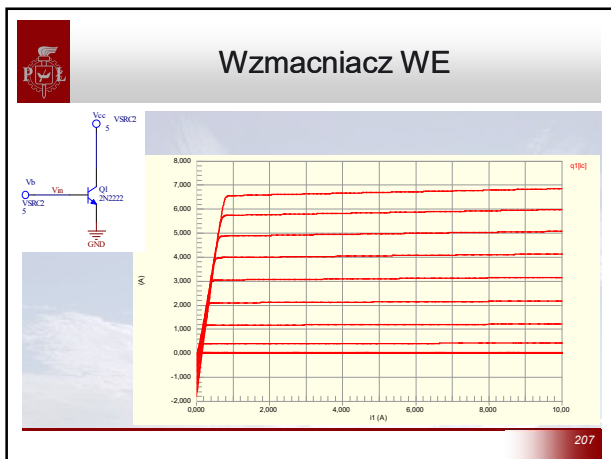
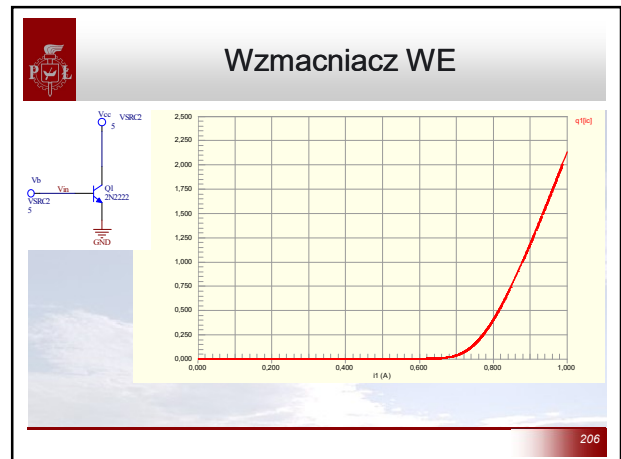
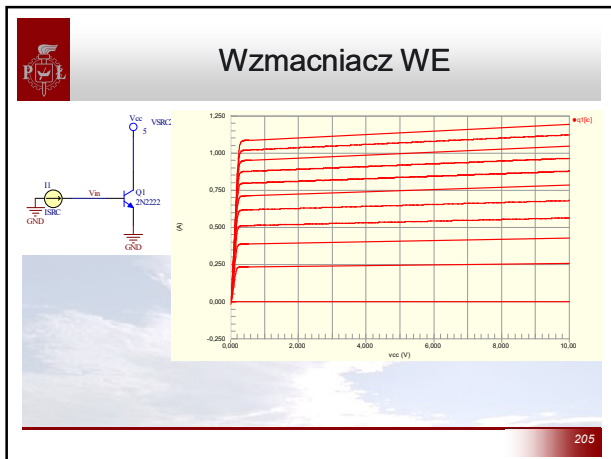
## Związki między charakterystykami częstotliwościowymi a przebiegami czasowymi

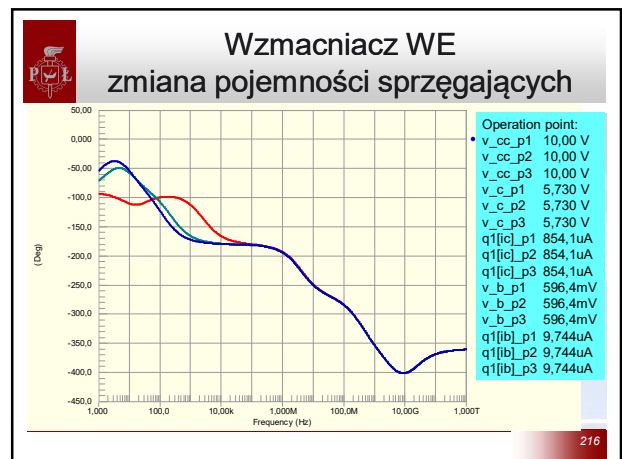
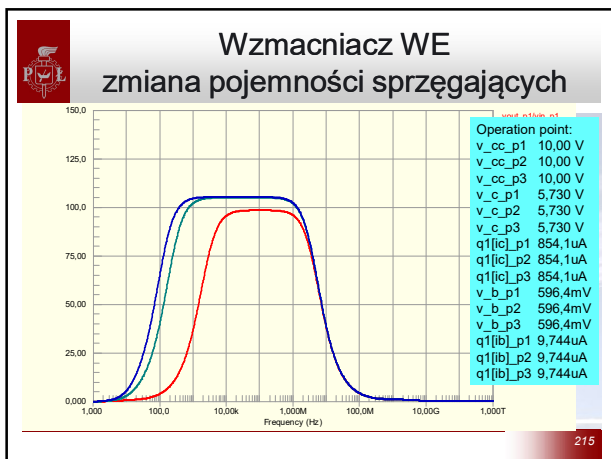
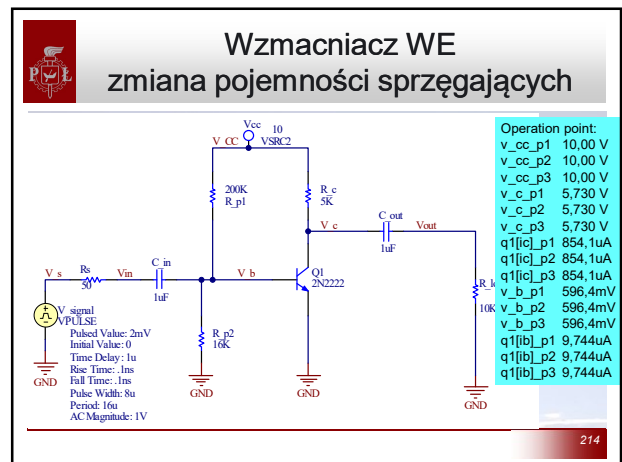
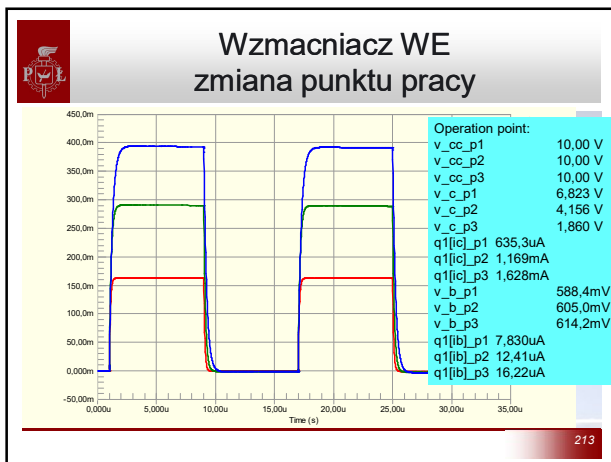
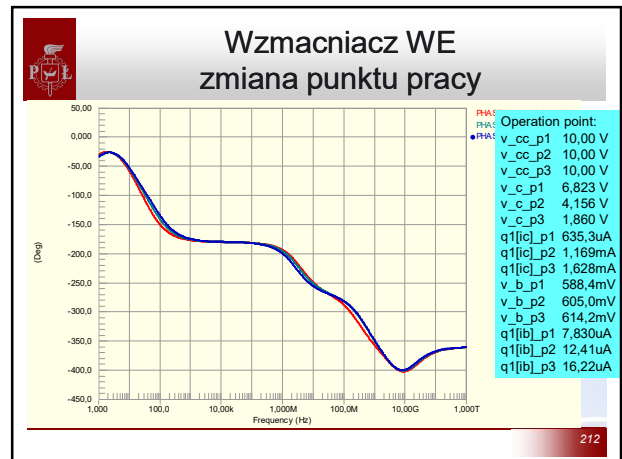
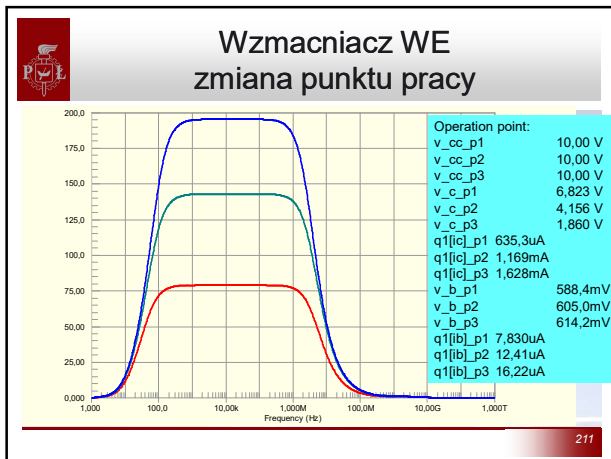
Jednobiegunowa transmitancja górnoprzepustowa

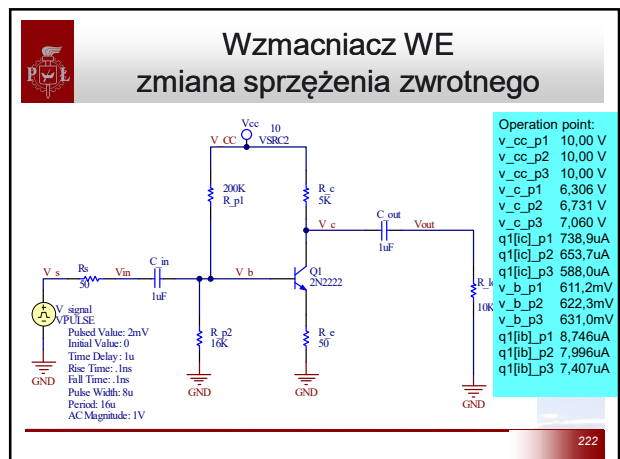
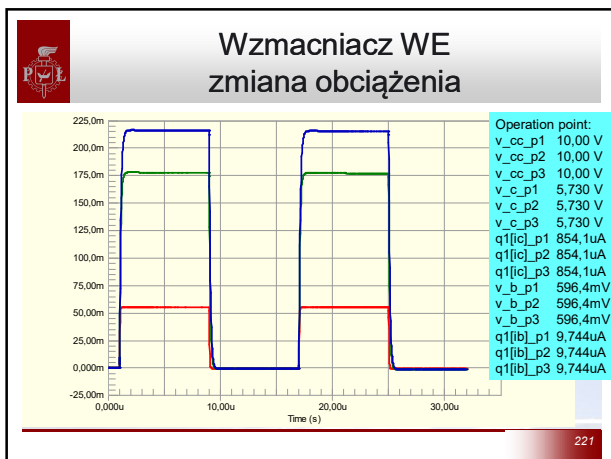
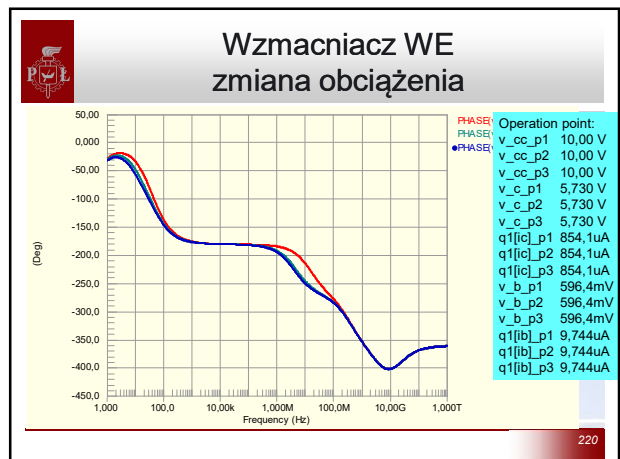
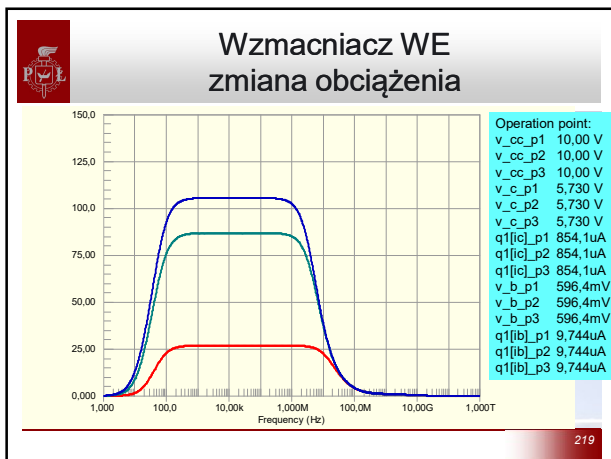
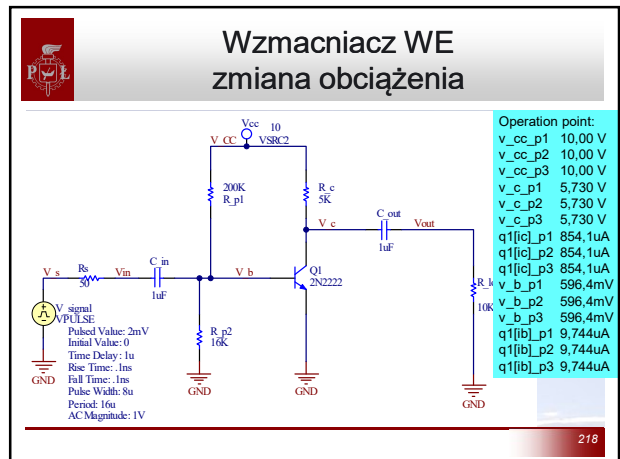
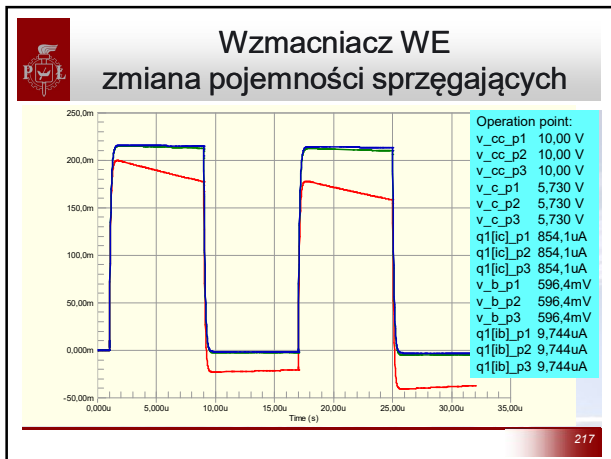
$$k(s) = \frac{k_0}{1 + \frac{\omega_l}{s}} \quad h(t) = 1k_0 e^{-t\omega_l}$$

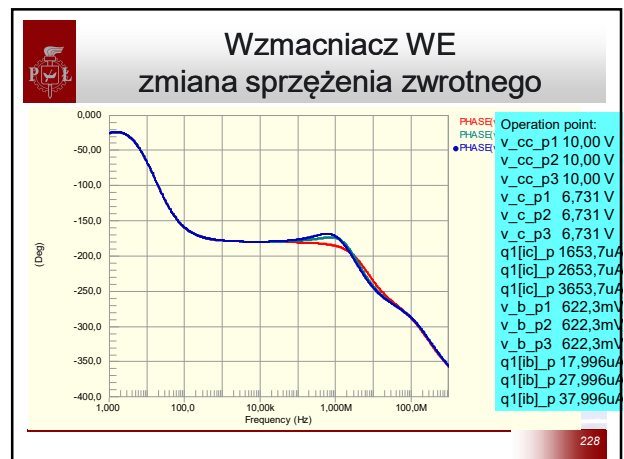
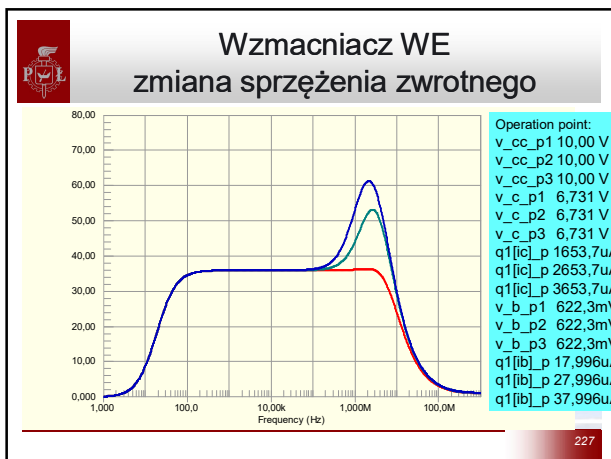
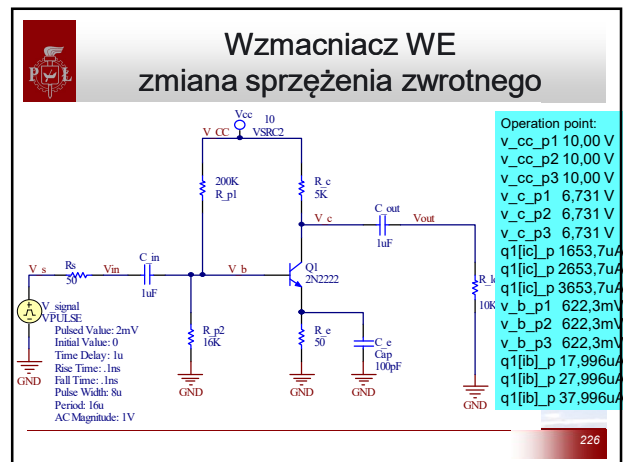
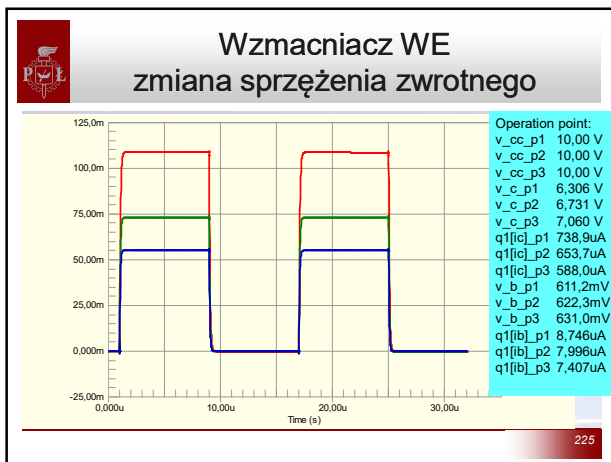
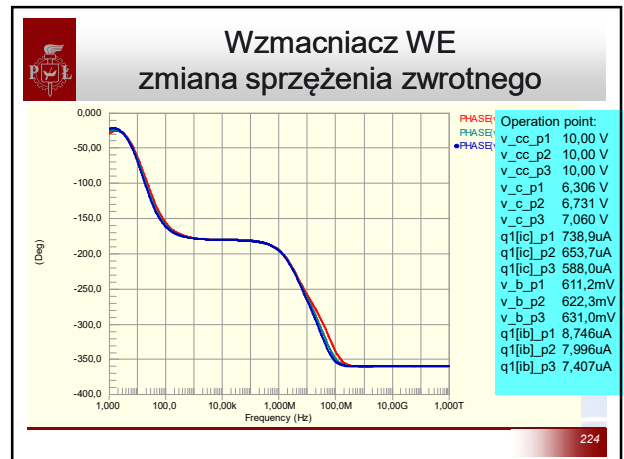
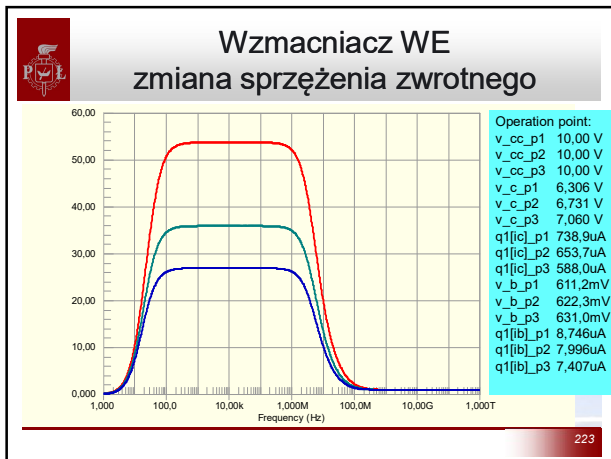
$$\Delta V = \frac{h(0) - h(t)}{h(0)} = \frac{1k_0 - 1k_0 e^{-t\omega_l}}{1k_0} = 1 - e^{-t\omega_l} \approx t\omega_l \Big|_{t \ll \frac{1}{\omega_l}}$$

204



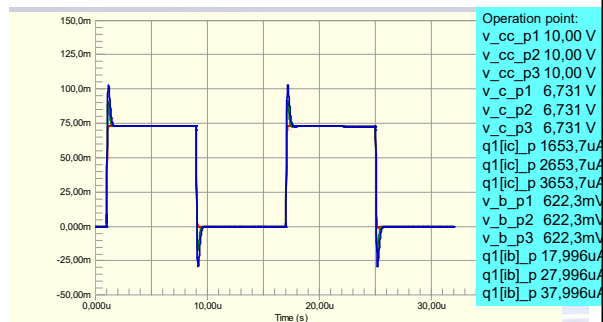








## Wzmacniacz WE zmiana sprzężenia zwrotnego



229



## Układy scalone wzmacniaczy pasmowych

- LM2904, LM358/LM358A, LM258/ LM258A Dual Operational Amplifier
- AD829 High Speed, Low Noise Video Op
- AD8597/AD8599 Single and Dual, Ultralow Distortion, Ultralow Noise Op Amps
- TL072 TL072A TL072B Low noise JFET dual operational amplifiers

230



## Plan wykładu

1. Szumy układów aktywnych
2. Układy scalone wzmacniaczy mocy
3. Układy scalone wzmacniaczy pasmowych
4. **Analogowe filtry aktywne czasu ciągłego i dyskretnego**
5. Analogowe układy mnożące i jego zastosowania
6. Pętla fazowa i jej zastosowania
7. Detektory amplitudy, częstotliwości i przesunięcia fazowego
8. Programowalne układy analogowe i ich zastosowania
9. Specjalizowane układy scalone
10. Przetworniki analogowo cyfrowe i cyfrowo analogowe

231



## Analogowe filtry aktywne czasu ciągłego i dyskretnego

### Literatura:

U. Tietze, Ch. Shenck, Electronics circuits, design and applications, Springer-Verlag, 2001

232



## Analogowe filtry aktywne czasu ciągłego i dyskretnego.

1. Filtry pasywne
2. Charakterystyki filtrów
3. Filtry aktywne czasu ciągłego
4. Filtry z przełączanymi pojemnościami
5. Filtry DSP
6. Przykłady scalonych filtrów analogowych

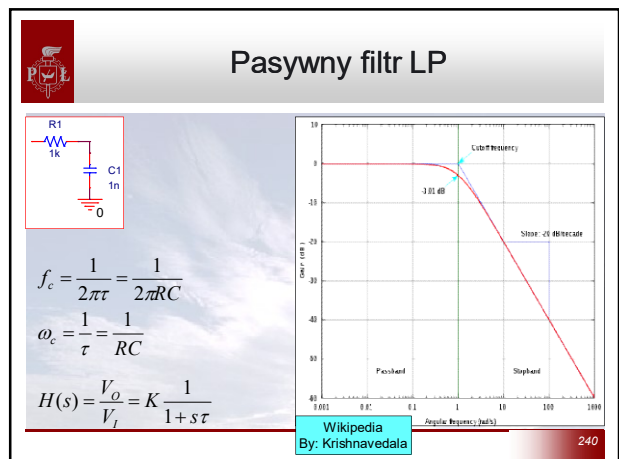
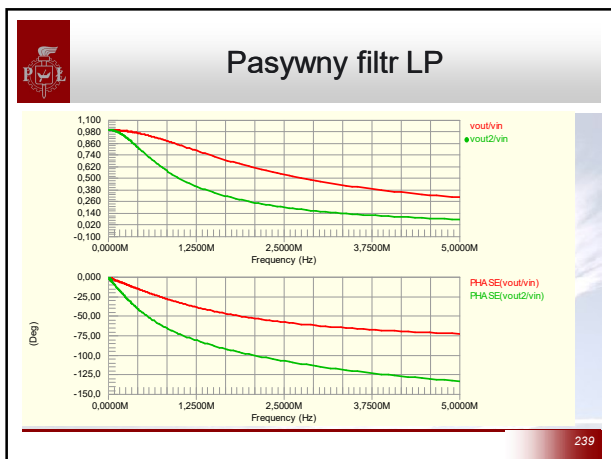
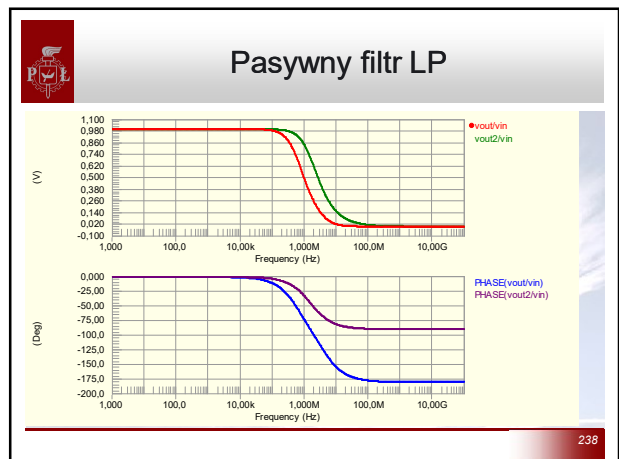
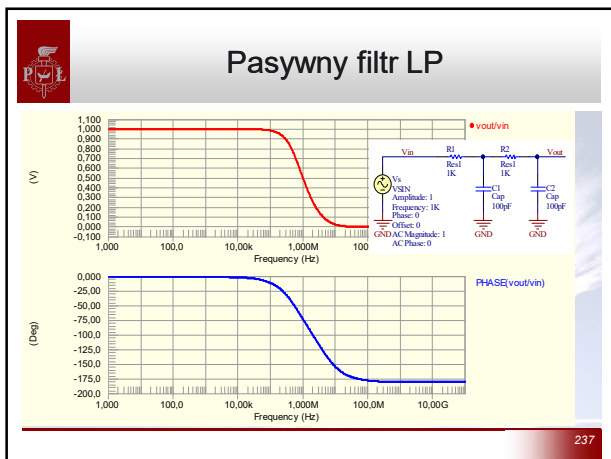
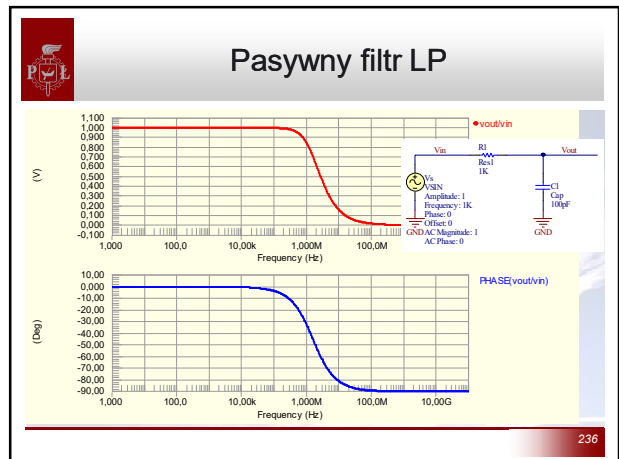
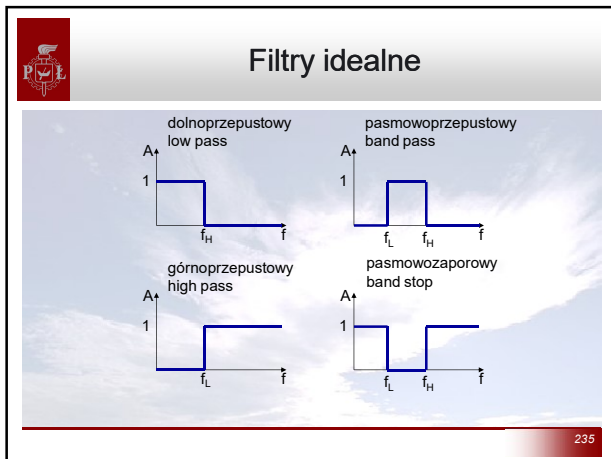
233



## Filtr

Fragment obwodu elektrycznego lub obwodu elektronicznego odpowiedzialny za przepuszczanie lub blokowanie sygnałów o określonym zakresie częstotliwości lub zawierającego określone harmoniczne. (Wikipedia)

234





## Filtr LP

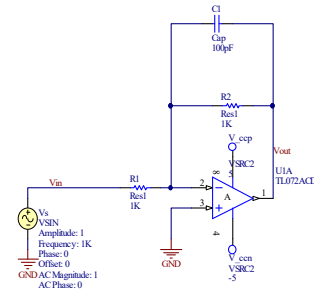
Zastosowania:

- Zwrotnica w kolumnach głośnikowych – sterowanie głośnikami niskotonowymi
- Nadajniki radiowe – blokowanie emisji harmonicznych
- Filtry telefoniczne przy DSL
- Filtry antyaliasingowe na wejściach przetworników A/D
- Filtry wygładzające na wyjściach przetworników DA

241



## Aktywny filtr LP



$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi R_2 C_1}$$

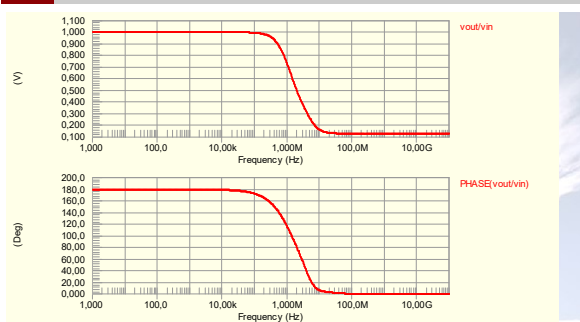
$$\omega_c = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{R_2 C_1}$$

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1}$$

242



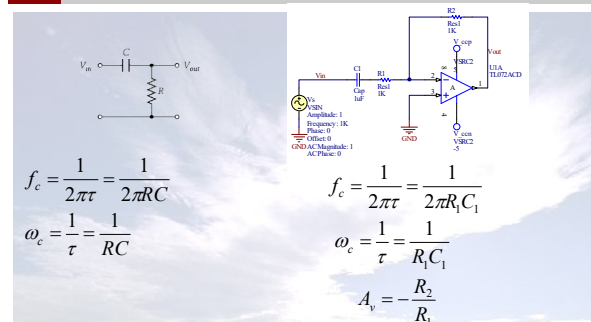
## Aktywny filtr LP



243



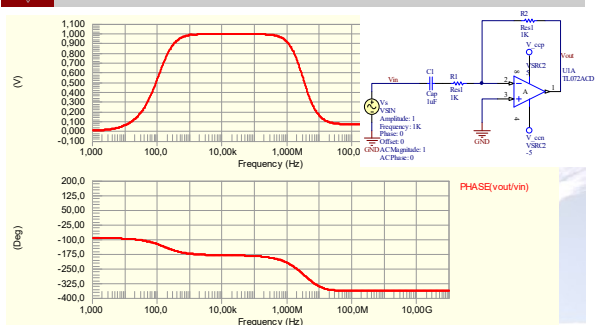
## Filtry HP



244



## Filtr HP ?



245



## Pozostałe typy filtrów

- pasmowoprzepustowe
- pasmowozaporowe
- (notch filter)
- grzebieniowy (comb filter)
- pełnoprzepustowe (all pass filter)

246



## Parametry filtrów

- Częstotliwość odcięcia (Cutoff frequency) podawana zazwyczaj dla konkretnego tłumienia (np. 3dB)
- (Roll-off)
- Pasmo przenoszenia (Transition band),
- Zafalowania w paśmie przenoszenia (Ripple).
- Rząd filtru (The order of a filter)

247



## Filtry aktywne wyższych rzędów

Klasyfikacja ze względu na kształt charakterystyki częstotliwościowej:

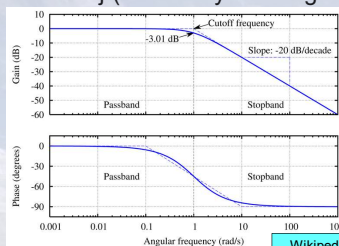
- Butterworta (Butterworth filter)
- Czebyszewa typ 1 (Chebyshev filter type I)
- Czebyszewa typ 2 (Chebyshev filter type II)
- Bessela (Bessel filter)
- Eliptyczny (Elliptic filter)
- Optymalny typu L (Optimum "L" filter)
- Gausowski (Gaussian filter)
- (Hourglass filter)
- (Raised-cosine filter)

248



## Filtr Butterworta (Butterworth filter)

Filtr o maksymalnie płaskiej odpowiedzi częstotliwościowej (maximally flat magnitude filter)



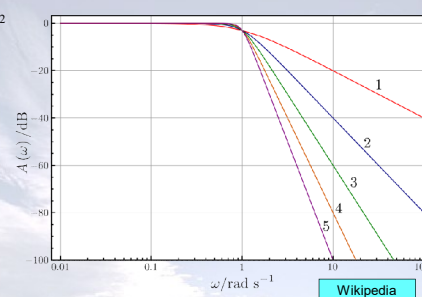
Wikipedia  
by Omegatron

249



## Butterworth filter

$$G^2(\omega) = |H(j\omega)|^2 = \frac{G_0^2}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}$$



Wikipedia  
by Inductiveload

250



## Filtr Butterworta (Butterworth filter)

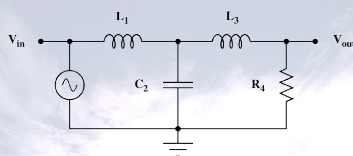
$$C_2 = 1F$$

$$R_4 = 1\Omega$$

$$L_1 = \frac{3}{2}H$$

$$L_3 = \frac{1}{2}H$$

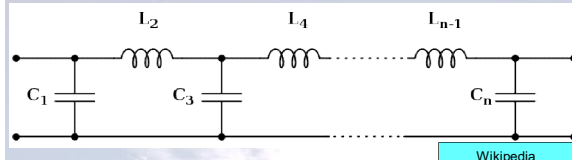
$$H(s) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + 2s + 2s^2 + s^3}$$



251



## Filtr Butterworta (Butterworth filter)

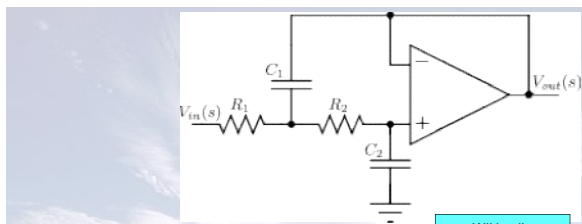


Wikipedia  
by Alessio Damato

252



## Filtr Butterworta (Butterworth filter)



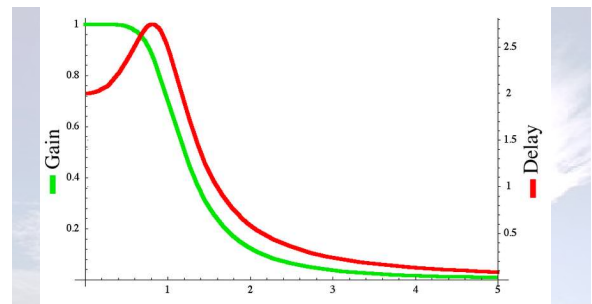
$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{1 + C_2(R_1 + R_2)s + C_1C_2R_1R_2s^2}$$

Wikipedia  
by Guillaume Simard

253



## Filtr Butterworta (Butterworth filter)

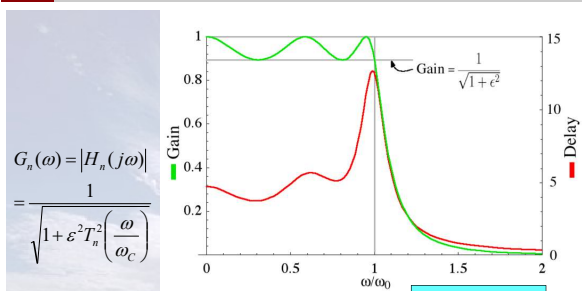


Wikipedia  
by PAR

254



## Filtr Czebeshewa typ 1 (Chebyshev filter type I)



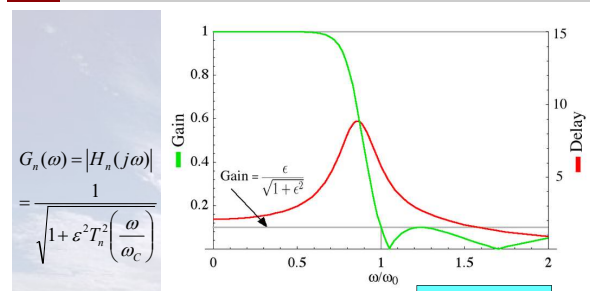
$$G_n(\omega) = |H_n(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 T_n^2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)}}$$

Wikipedia  
by PAR

255



## Filtr Czebeshewa typ 2 (Chebyshev filter type 2)



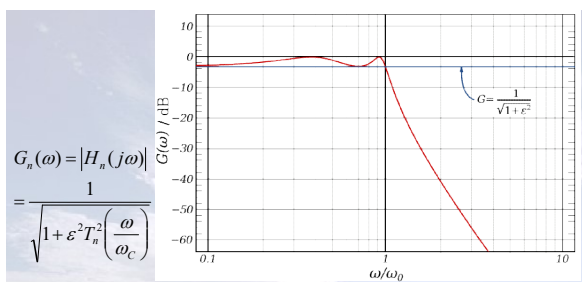
$$G_n(\omega) = |H_n(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 T_n^2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)}}$$

Wikipedia  
by PAR

256



## Filtr Czebeshewa typ 1 (Chebyshev filter type I)



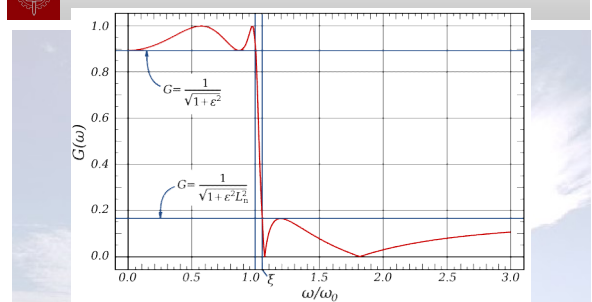
$$G_n(\omega) = |H_n(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 T_n^2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)}}$$

Wikipedia  
by Inductiveload

257

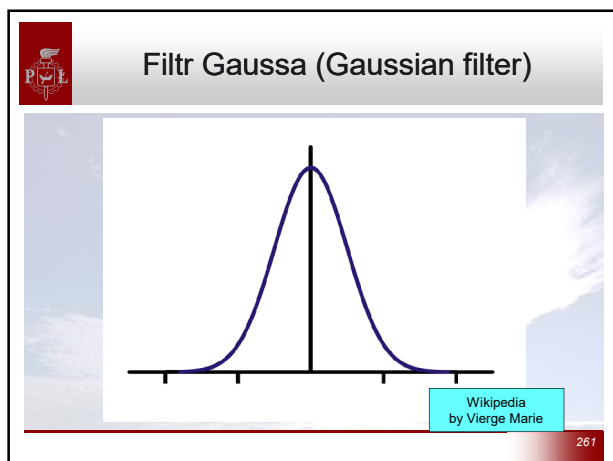
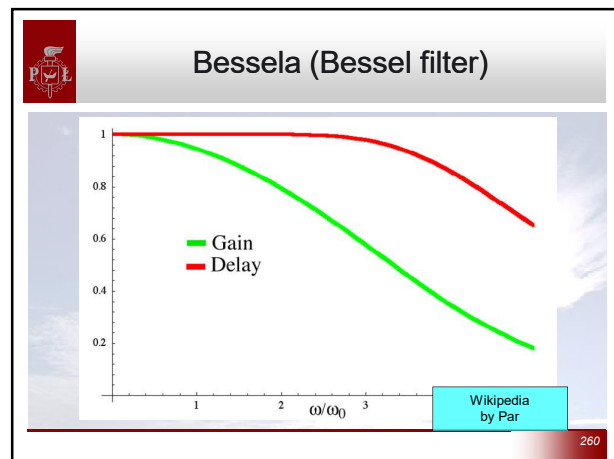
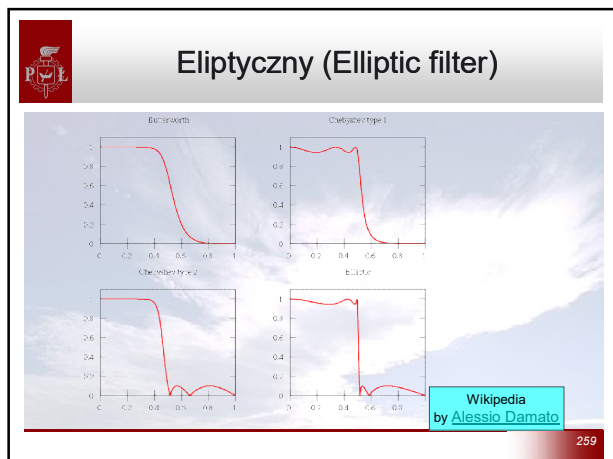


## Eliptyczny (Elliptic filter)



Wikipedia  
by Inductiveload

258



- ### Filtry aktywne wyższych rzędów
- Klasyfikacja ze względu na kształt charakterystyki częstotliwościowej
- Butterworth filter – no gain ripple in pass band and stop band, slow cutoff
  - Chebyshev filter (Type I) – no gain ripple in stop band, moderate cutoff
  - Chebyshev filter (Type II) – no gain ripple in pass band, moderate cutoff
  - Elliptic filter – gain ripple in pass and stop band, fast cutoff
  - Bessel filter – no group delay ripple, no gain ripple in both bands, slow gain cutoff
  - Optimum "L" filter
  - Gaussian filter – no ripple in response to step function
  - Hourglass filter
  - Raised-cosine filter
- 262

- ### Filtry czasu dyskretnego
- Układy z przełączanymi pojemnościami (Switched capacitor)
  - Procesory sygnałowe DSP (Digital Signal Processor)
- 263

### Układy z przełączanymi pojemnościami (Switched capacitor)

Zasada działania opiera się na przenoszeniu ładunku z i do kondensatorów podczas przełączania łączników.

Do sterowania przełącznikami służą nienakładające się sygnały zegarowe. Stąd w żadnej chwili czasowej nie są załączone wszystkie łączniki.

W przeciwieństwie do filtrów czasu ciągłego filtry z przełączanymi pojemnościami bazują na proporcjach pomiędzy pojemnościami, a nie na określonych wartościach pojemności.

264



## Rezystor z przełączanymi pojemnościami

$$q = CV$$

$$q_{In} = C_S V_{In}$$

$$q_{Out} = C_S V_{Out}$$

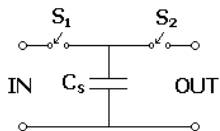
$$q = q_{Out} - q_{In} = C_S (V_{Out} - V_{In})$$

$$I = qf$$

$$I = C_S (V_{Out} - V_{In}) f$$

$$V = V_{Out} - V_{In}$$

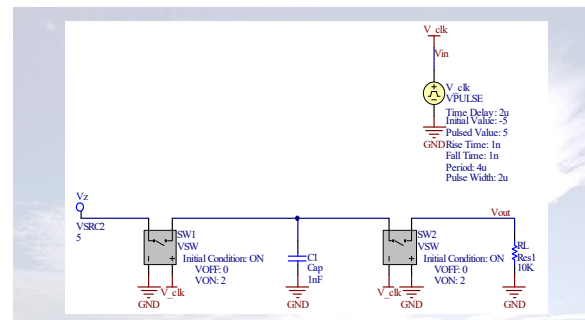
$$R = \frac{V}{I} = \frac{1}{C_S f}$$



265



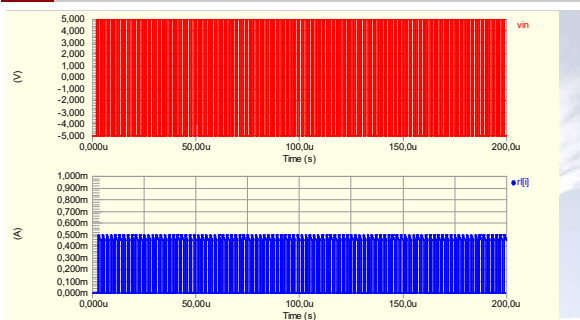
## Rezystor z przełączanymi pojemnościami



266



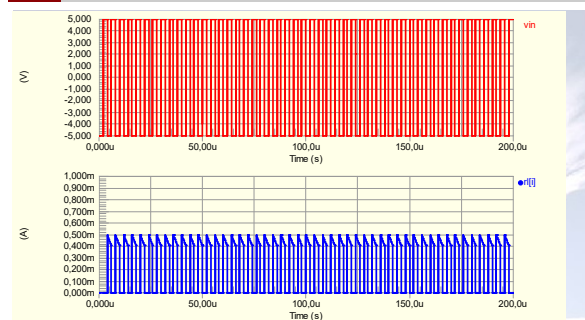
## Rezystor z przełączanymi pojemnościami



267



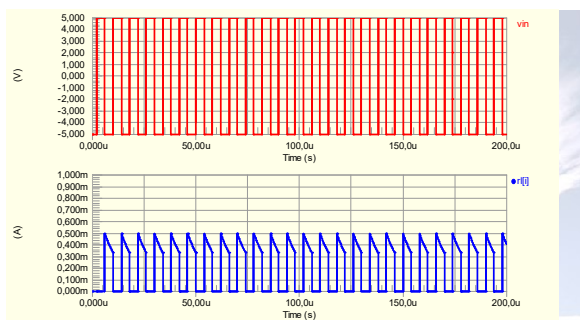
## Rezystor z przełączanymi pojemnościami



268



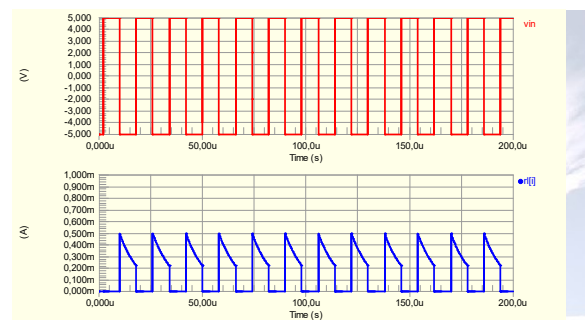
## Rezystor z przełączanymi pojemnościami



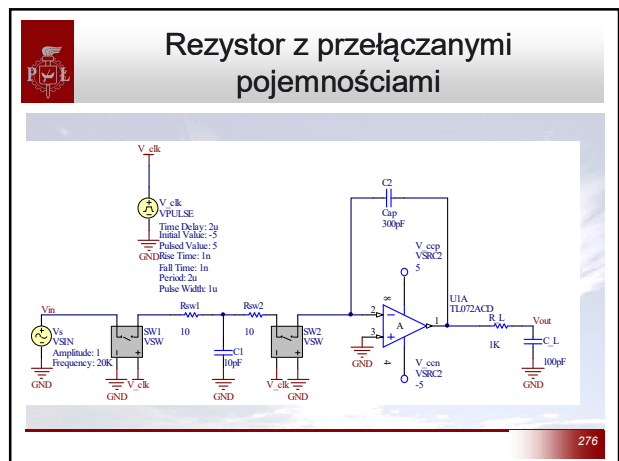
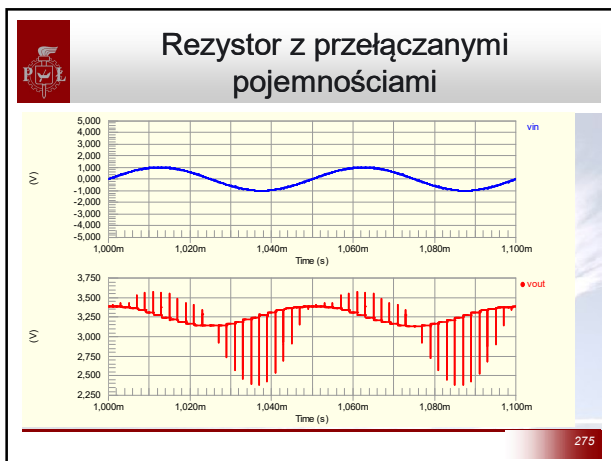
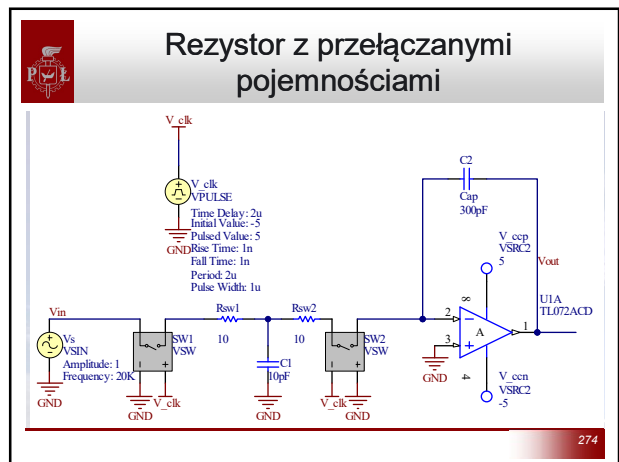
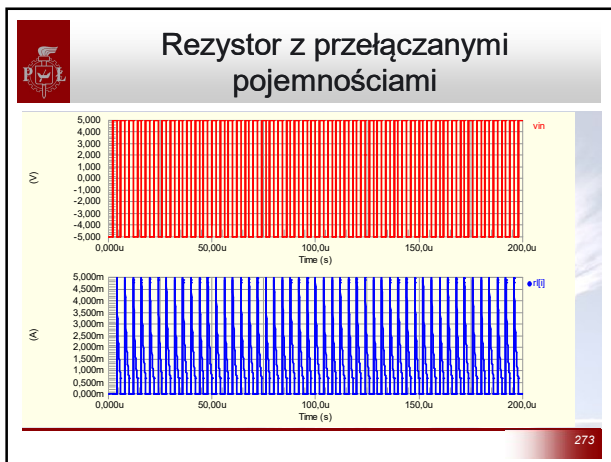
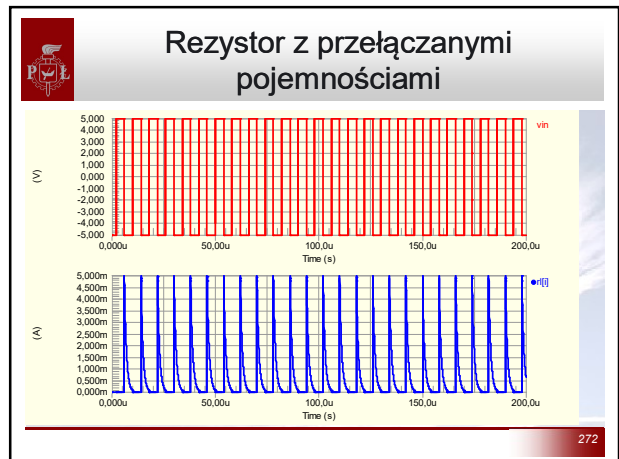
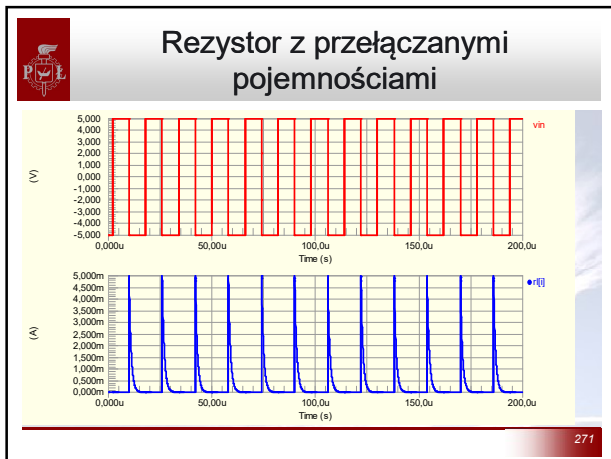
269

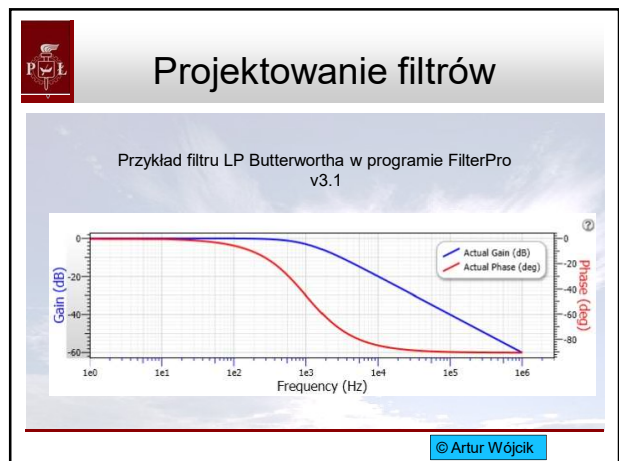
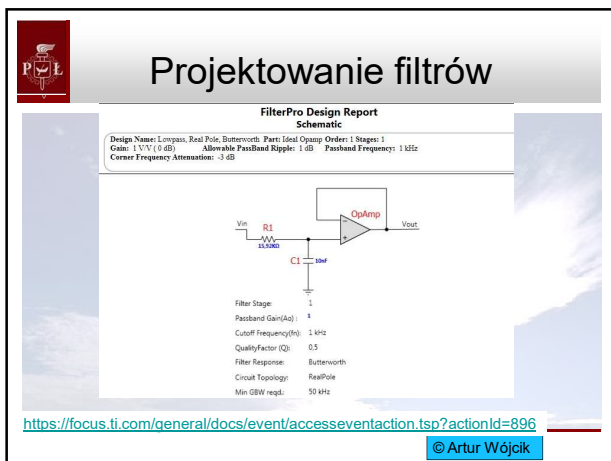
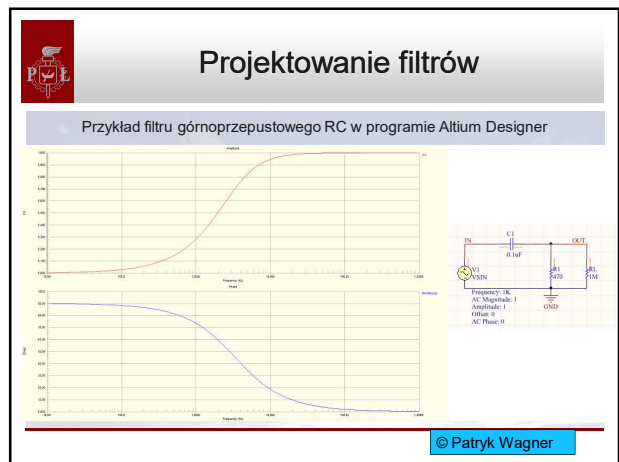
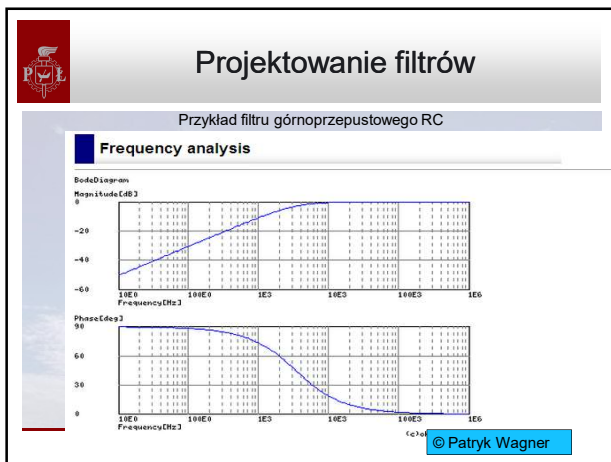
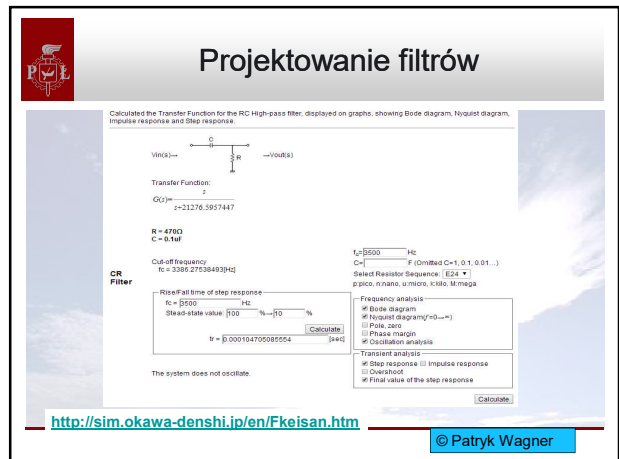
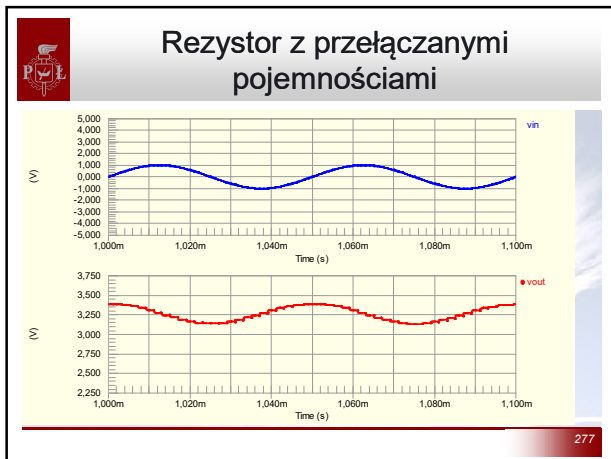


## Rezystor z przełączanymi pojemnościami



270

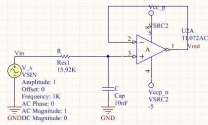
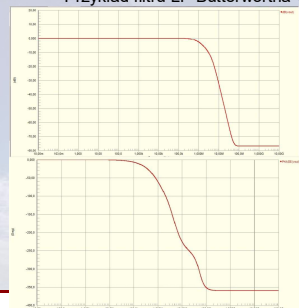






## Projektowanie filtrów

Przykład filtru LP Butterwortha w programie Altium



© Artur Wójcik



## Układy scalone filtrów analogowych

- LTC1062
- LTC1562
- LTC1569-7
- DF1704
- LTC1060
- MAX270
- MAX271
- MAX274
- MAX275
- MAX280
- MAX7480

284



## Plan wykładu

1. Szumy układów aktywnych
2. Układy scalone wzmacniaczy mocy
3. Układy scalone wzmacniaczy pasmowych
4. Analogowe filtry aktywne czasu ciągłego i dyskretnego
5. **Analogowe układy mnożące i jego zastosowania**
6. Pętla fazowa i jej zastosowania
7. Detektory amplitudy, częstotliwości i przesunięcia fazowego
8. Programowalne układy analogowe i ich zastosowania
9. Specjalizowane układy scalone

285



## Analogowe układy mnożące

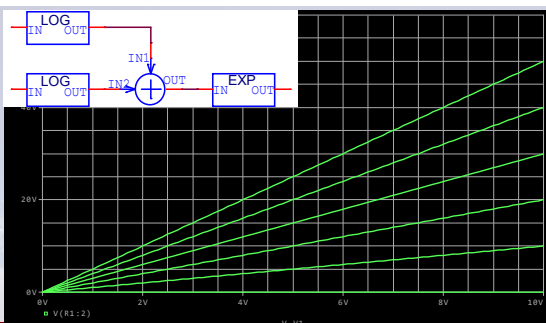
Literatura:

U. Tietze, Ch. Shenck, Electronics circuits, design and applications, Springer-Verlag, 2001

286



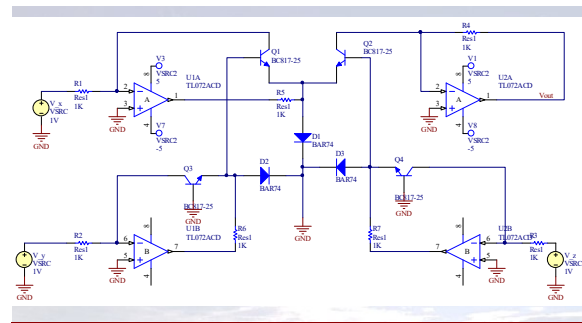
## Analogowe układ mnożący



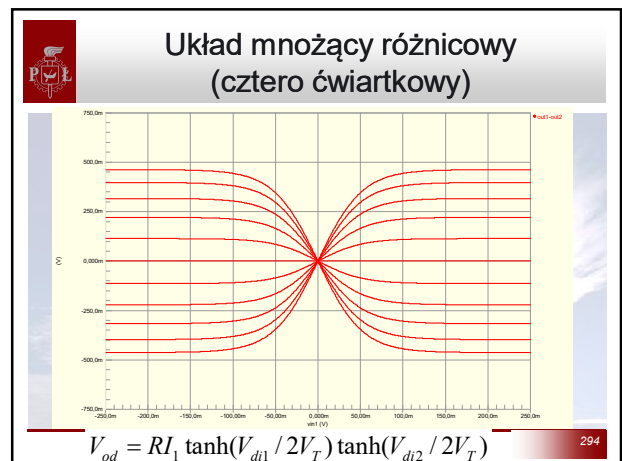
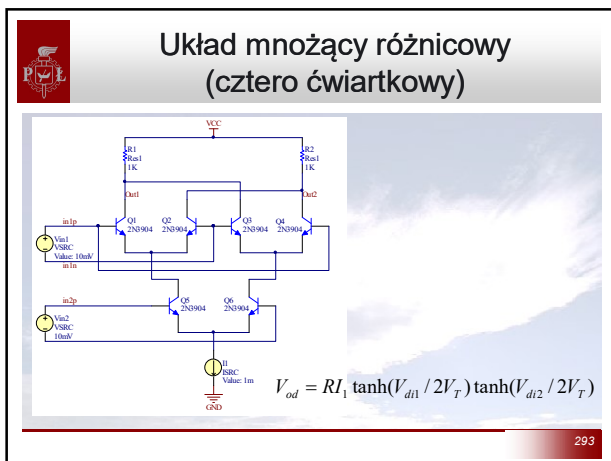
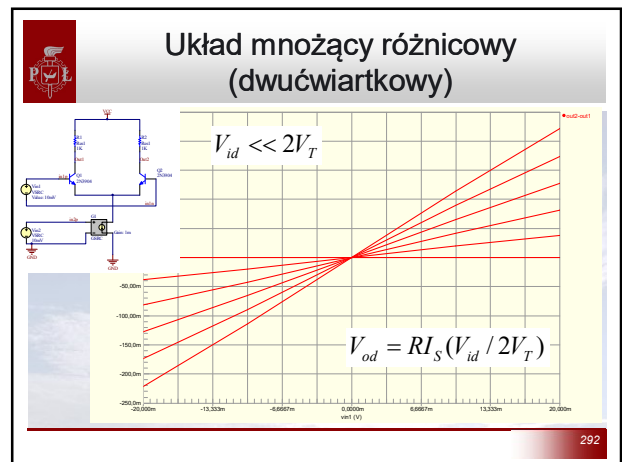
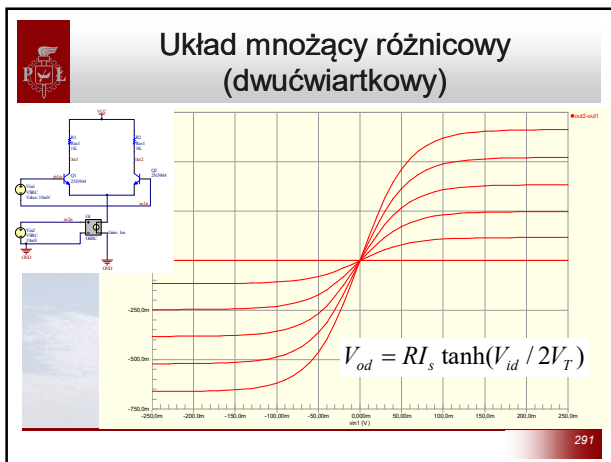
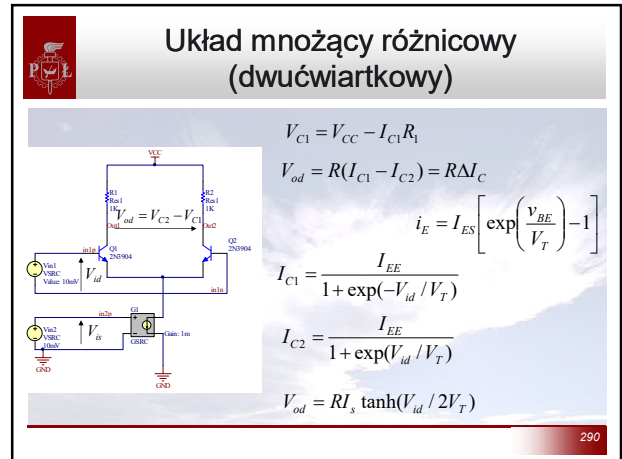
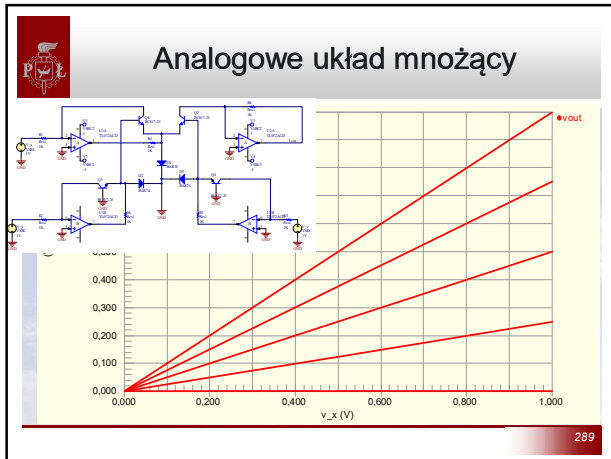
287



## Analogowe układ mnożący

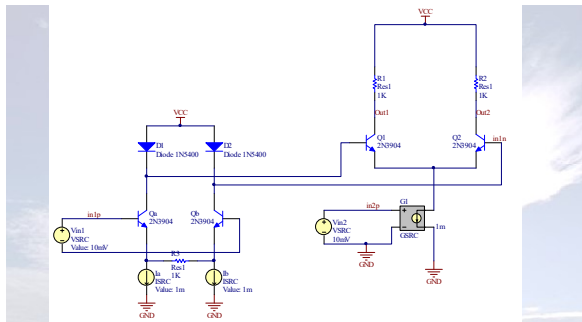


288





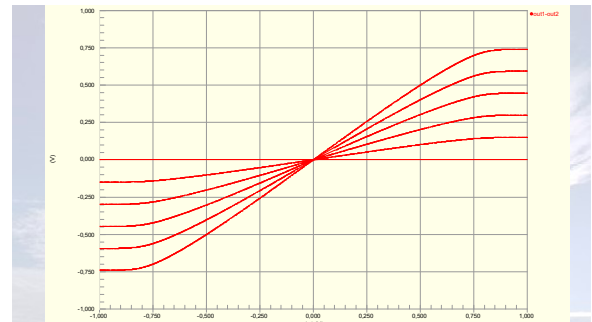
### Układ mnożący różnicowy (dwuwartkowy) z linearyzacją



295



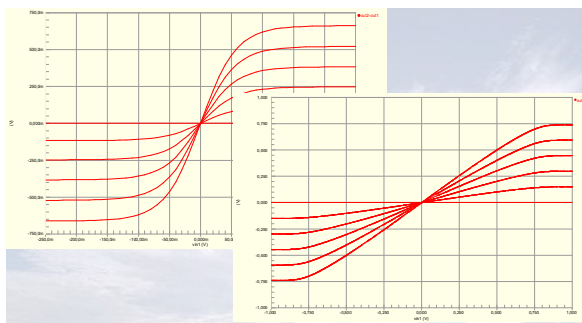
### Układ mnożący różnicowy (dwuwartkowy) z linearyzacją



296



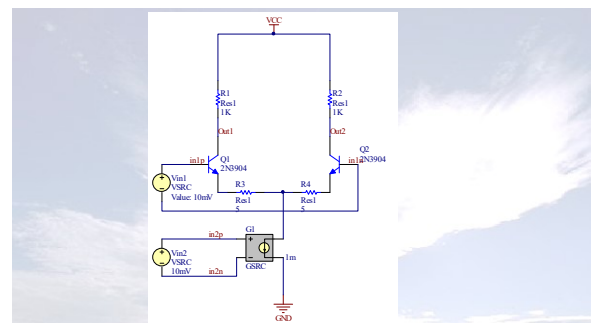
### Układ mnożący różnicowy (dwuwartkowy) z linearyzacją



297



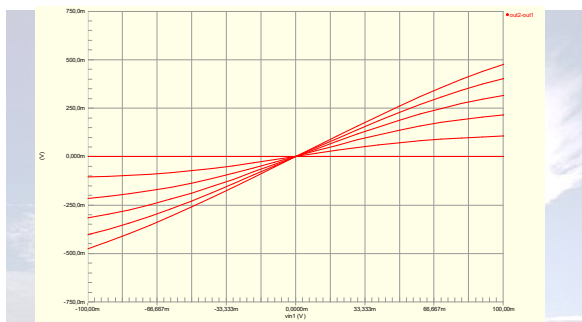
### Układ mnożący różnicowy (dwuwartkowy) z linearyzacją



298



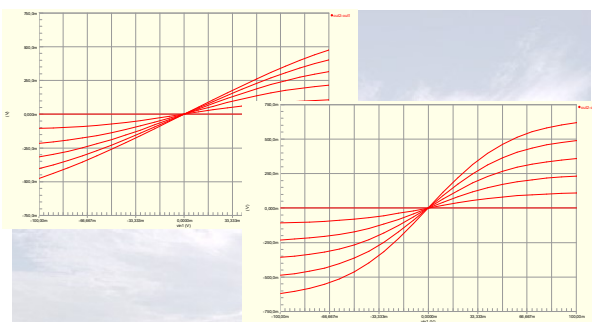
### Układ mnożący różnicowy (dwuwartkowy) z linearyzacją



299



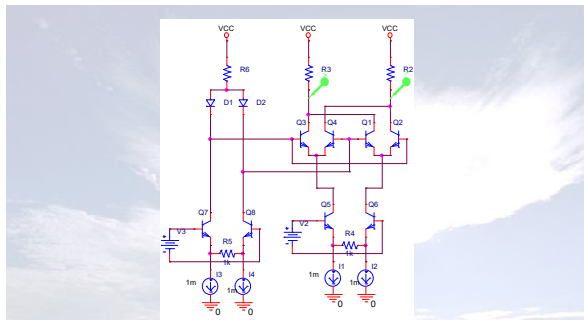
### Układ mnożący różnicowy (dwuwartkowy) z linearyzacją



300



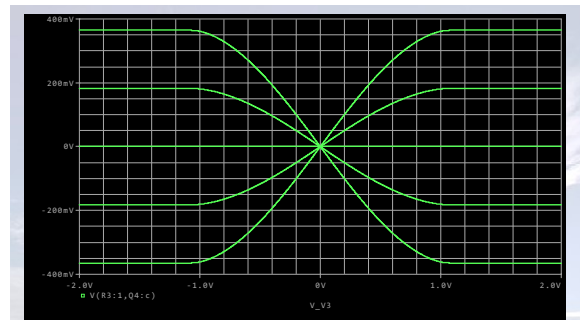
### Układ mnożący różnicowy (cztero ćwiartkowy) z linearyzacją



301



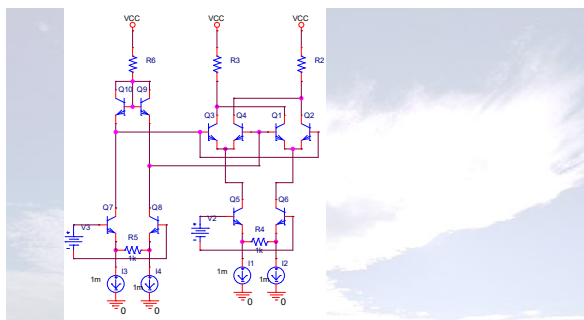
### Układ mnożący różnicowy (cztero ćwiartkowy) z linearyzacją



302



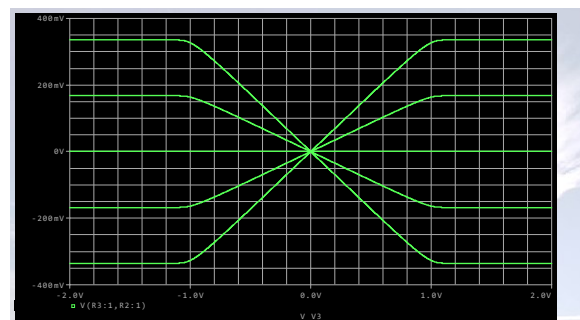
### Układ mnożący różnicowy (cztero ćwiartkowy) z linearyzacją



303



### Układ mnożący różnicowy (cztero ćwiartkowy) z linearyzacją



304



### Układy mnożące zastosowania

- Modułacja amplitudy
- Detekcja amplitudy
- Detekcja fazy
- Detekcja częstotliwości
- Przemiana częstotliwości

305



### Plan wykładu

1. Informacje wstępne.
2. Układy scalone wzmacniaczy mocy.
3. Analogowe filtry aktywne czasu ciągłego i dyskretnego.
4. **Detektory amplitudy, częstotliwości i przesunięcia fazowego.**
5. Programowalne układy analogowe i ich zastosowania.
6. Specjalizowane układy scalone.
7. Szumy układów aktywnych.
8. Analogowe układy mnożące i jego zastosowania.
9. Pętla fazowa i jej zastosowania.
10. Układy scalone wzmacniaczy pasmowych.

306



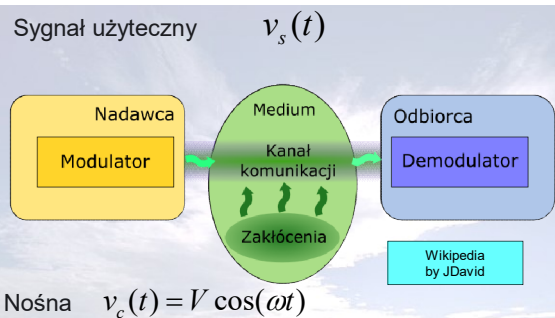
## Detektory amplitudy, częstotliwości i przesunięcia fazowego.

- Modulacje
- Budowa odbiornika radiowego
- Detekcja amplitudy
- Detekcja częstotliwości
- Detekcja fazy
- Rozwiązania w układach scalonych

307



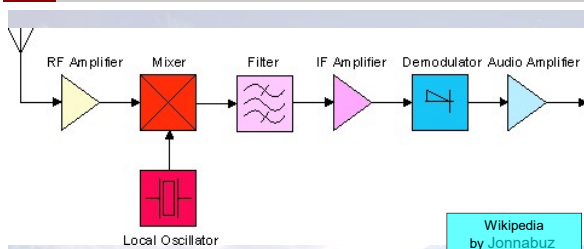
## Modulacja



308



## Odbiornik radiowy



309

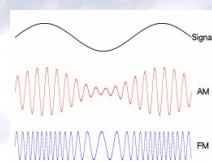


## Modulacja

### Podstawowe typy modulacji

- amplitudy
- częstotliwości
- fazy

$$c(t) = C \cos(\omega_c t + \varphi_c)$$



Wikipedia by Berserkerus

310



## Modulacja amplitudy

$$c(t) = C \cos(\omega_c t + \varphi_c)$$

$$c(t) = \cos(\omega_c t)$$

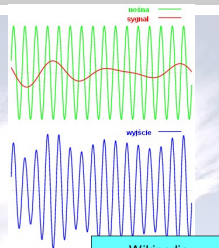
$$m(t) = M \cos(\omega_m t)$$

$$\omega_m \ll \omega_c$$

$$y(t) = [A + m(t)]c(t)$$

$$= [A + M \cos(\omega_m t + \varphi_m)] \cos(\omega_c t)$$

$$y(t) = A \cos(\omega_c t) + \frac{M}{2} \cos((\omega_c + \omega_s)t) - \frac{M}{2} \cos((\omega_c - \omega_s)t)$$

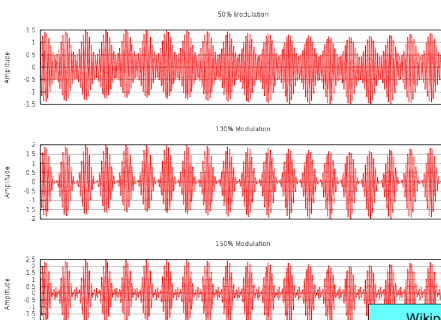


Wikipedia by Stok

311



## Modulacja amplitudy



$$k = \frac{M}{A}$$

$$k = \frac{\max(m(t))}{A}$$

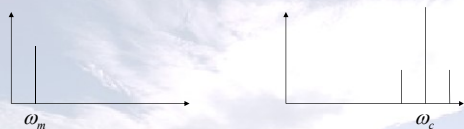
Wikipedia by Adambro

312



## Modulacja amplitudy

$$y(t) = A \cos(\omega_c t) + \frac{M}{2} \cos((\omega_c + \omega_m)t) + \frac{M}{2} \cos((\omega_c - \omega_m)t)$$

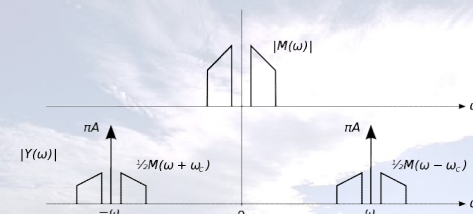


313



## Modulacja amplitudy

$$y(t) = A \cos(\omega_c t) + \frac{M}{2} \cos((\omega_c + \omega_m)t) + \frac{M}{2} \cos((\omega_c - \omega_m)t)$$



Wikipedia  
by Qef

314



## Modulacja amplitudy

$$y(t) = A \cos(\omega_c t) + \frac{M}{2} \cos((\omega_c + \omega_m)t) + \frac{M}{2} \cos((\omega_c - \omega_m)t)$$

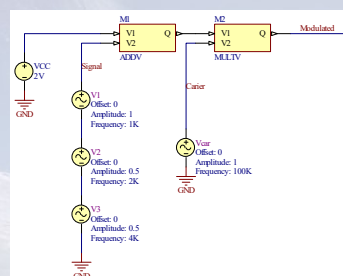
- Modulacje amplitudy
  - DSB-LC (inaczej AM) (ang. Double-Sideband Large Carrier) - modulacja dwuwstęgowa z nośną
  - DSB-SC (ang. Double-Sideband Suppressed Carrier) - modulacja dwuwstęgowa z wytłumioną nośną
  - SSB (ang. single-sideband modulation) - modulacja jednowstęgowa (może to być wstęga górna lub dolna)
  - VSB (ang. vestigial-sideband modulation) - modulacja amplitudy z częściowo tłumioną wstęgą boczną

315



## Modulacja amplitudy

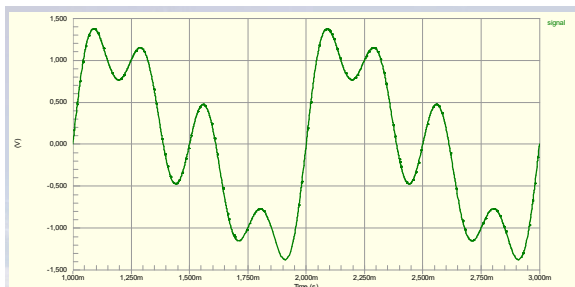
$$y(t) = [A + m(t)]c(t) = [A + M \cos(\omega_m t + \phi_m)] \cos(\omega_c t)$$



316



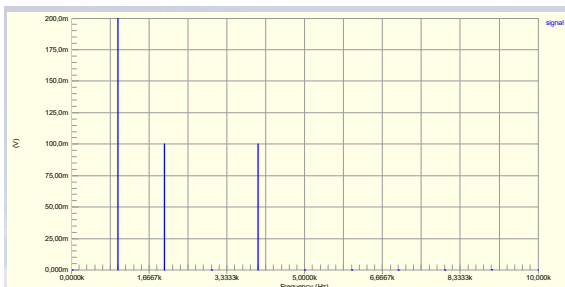
## Modulacja amplitudy



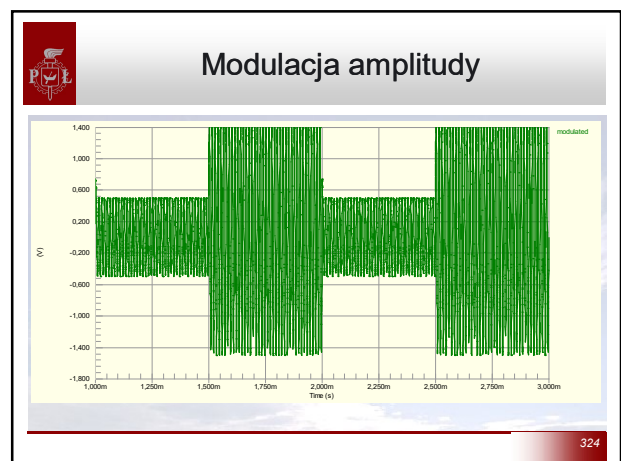
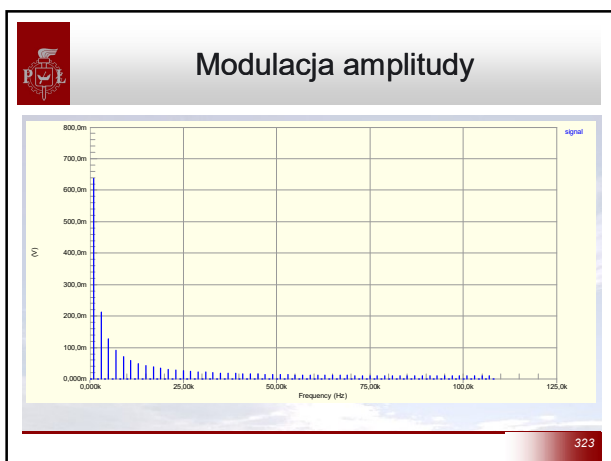
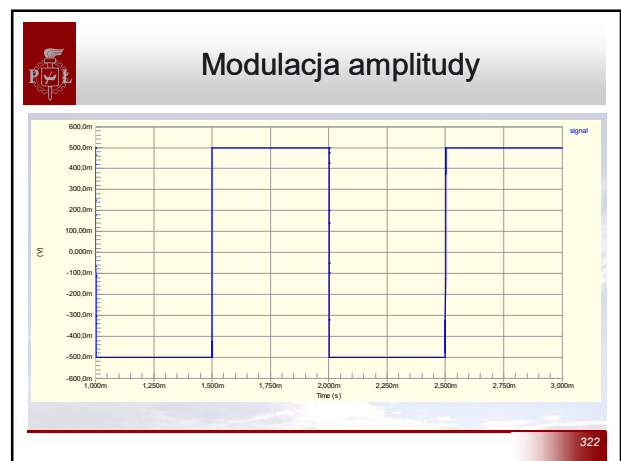
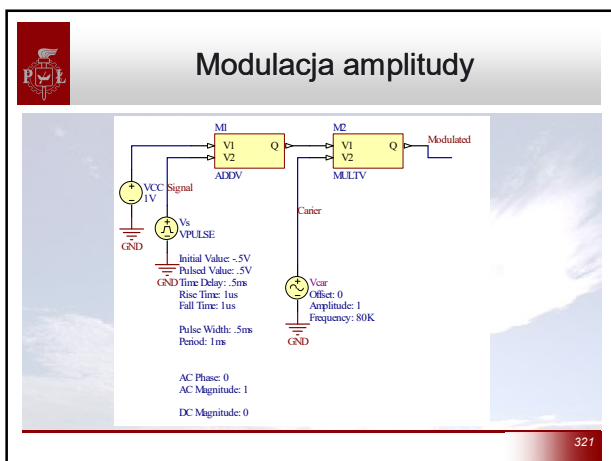
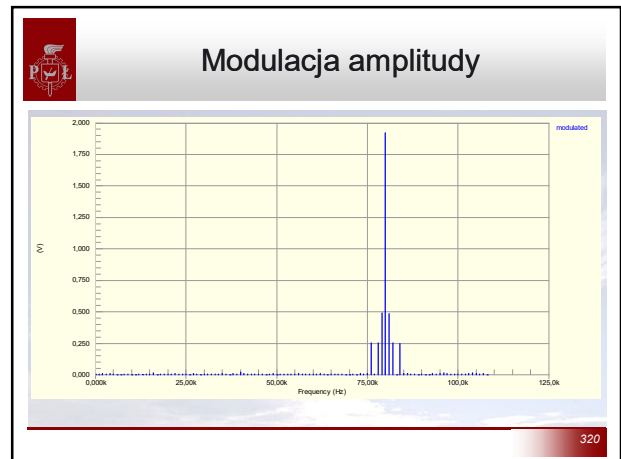
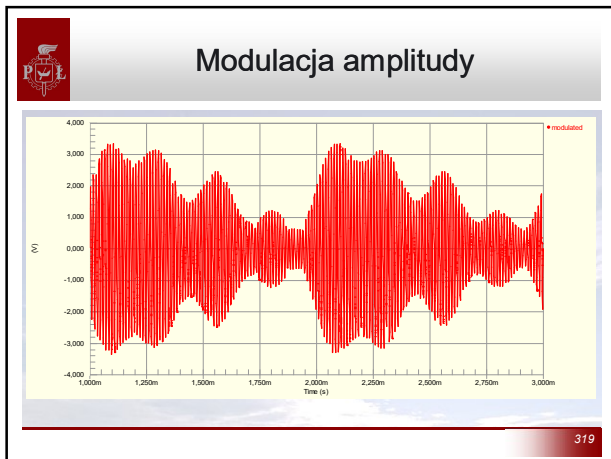
317

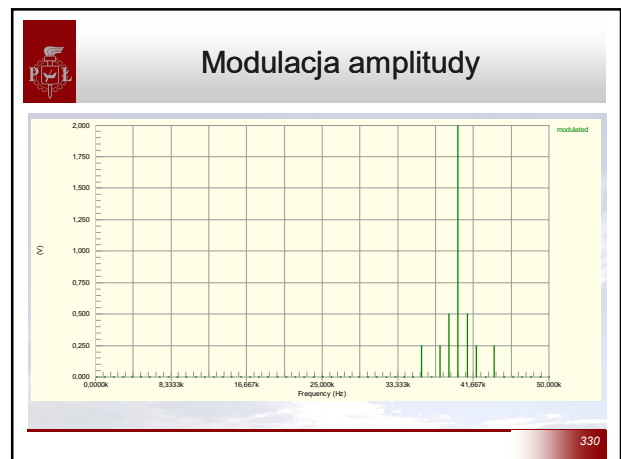
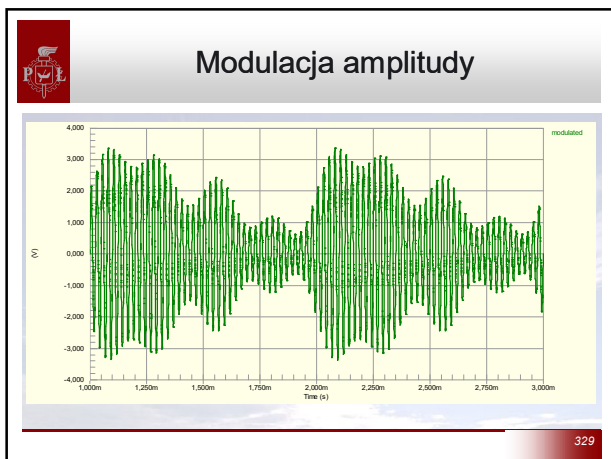
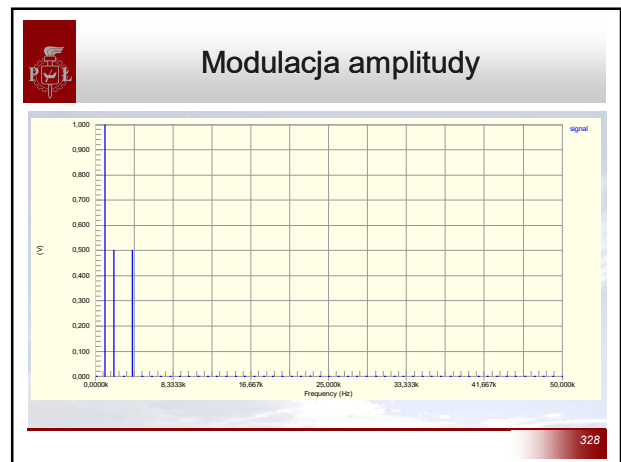
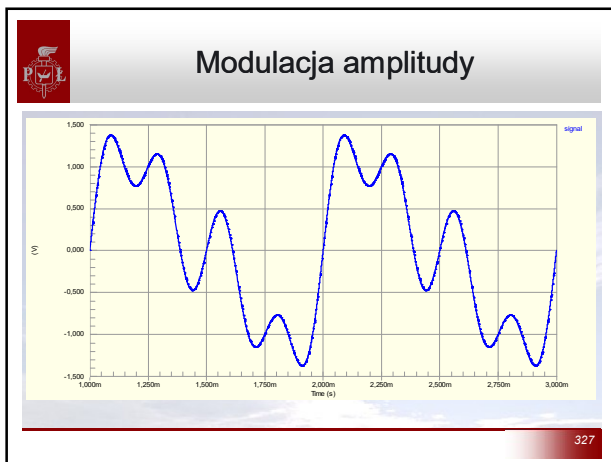
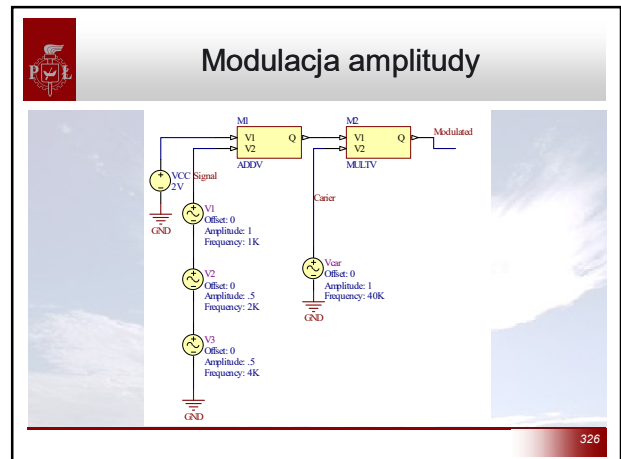
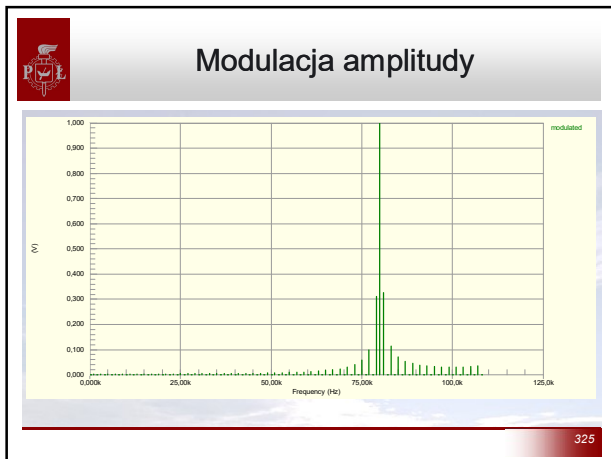


## Modulacja amplitudy



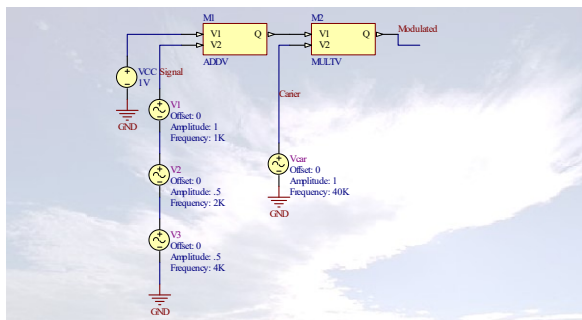
318







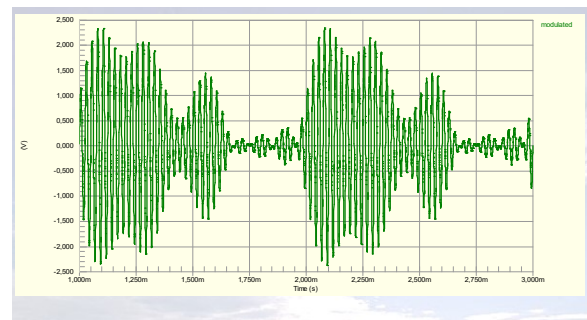
## Modulacja amplitudy



331



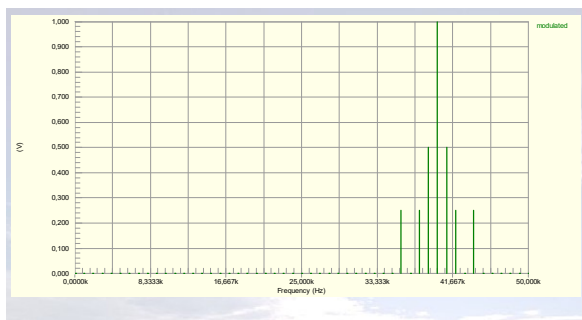
## Modulacja amplitudy



332



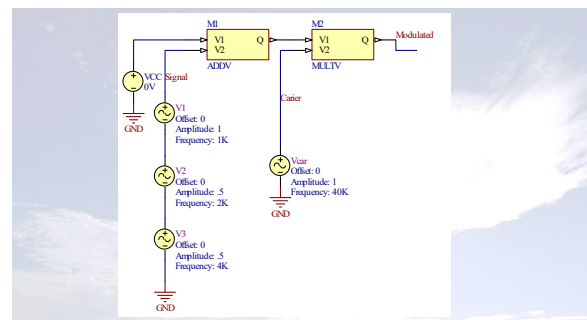
## Modulacja amplitudy



333



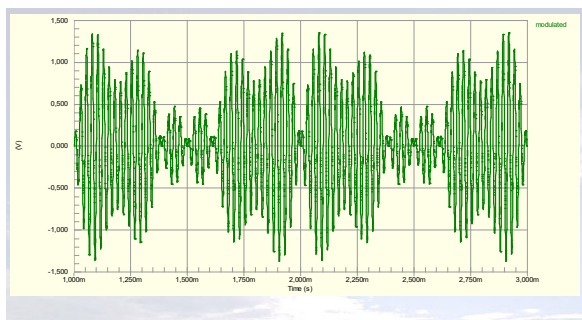
## Modulacja amplitudy



334



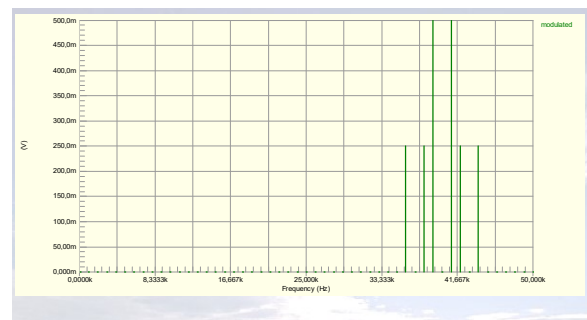
## Modulacja amplitudy



335



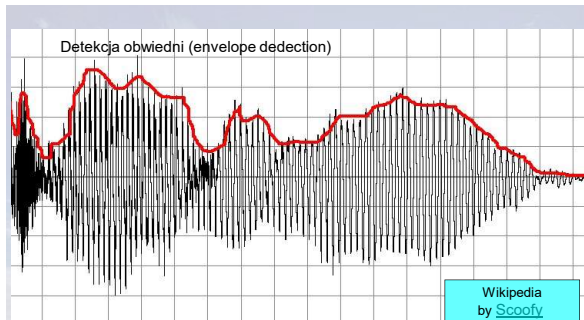
## Modulacja amplitudy



336



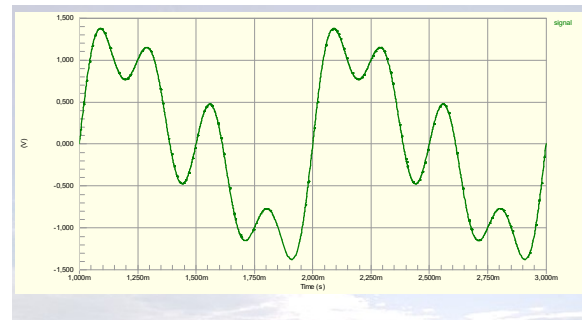
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



337



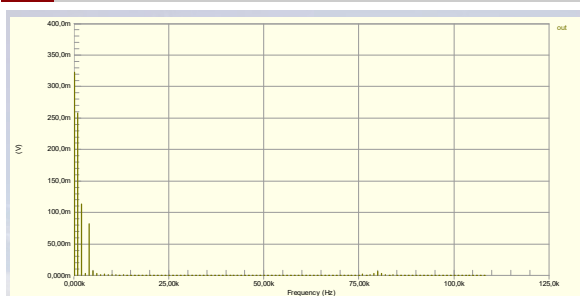
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



338



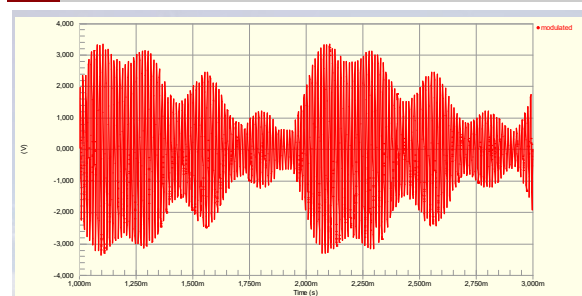
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



339



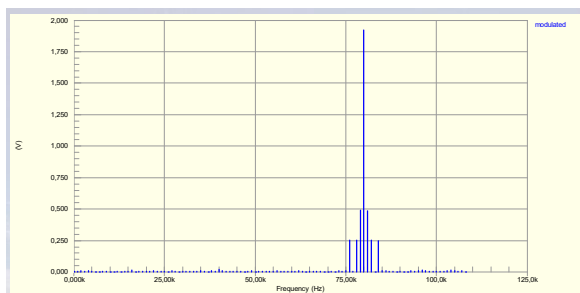
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



340



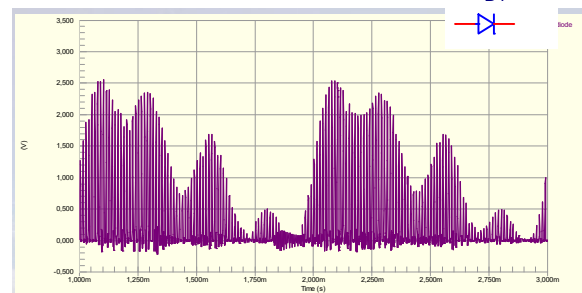
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



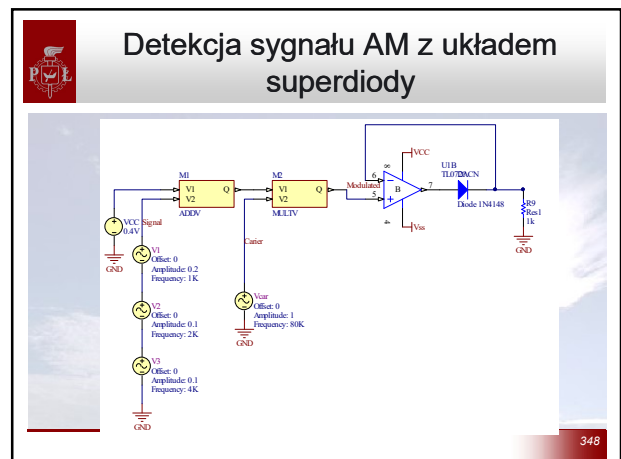
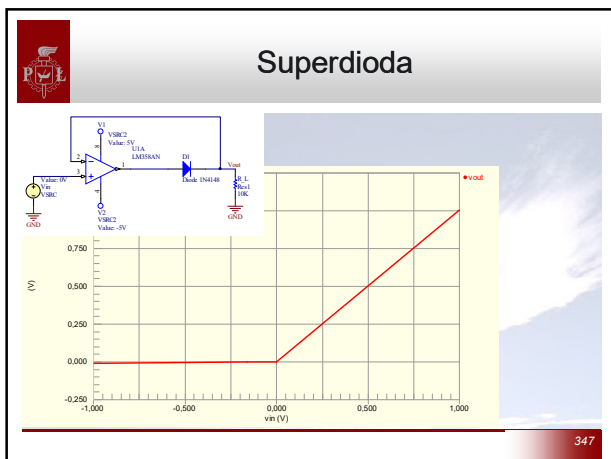
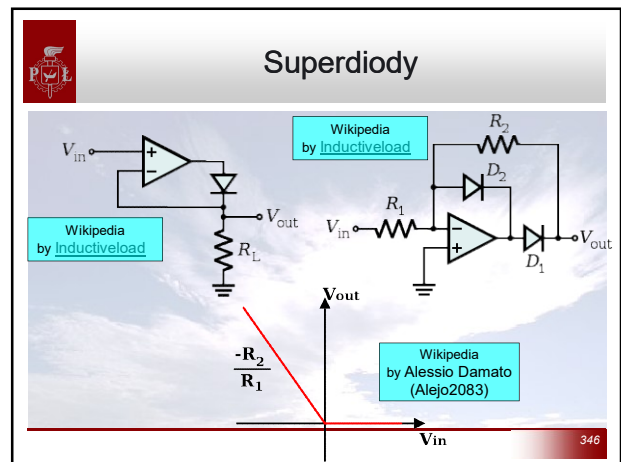
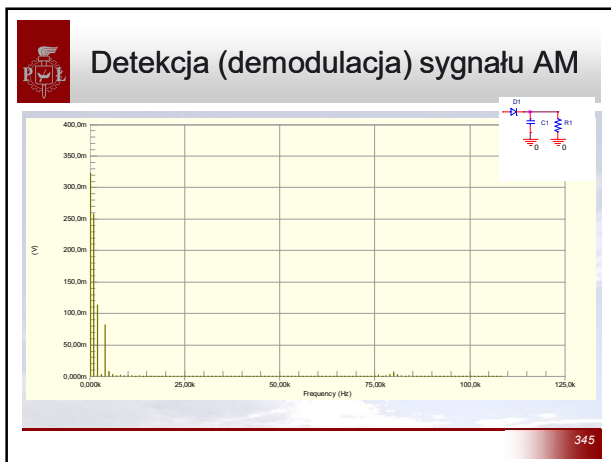
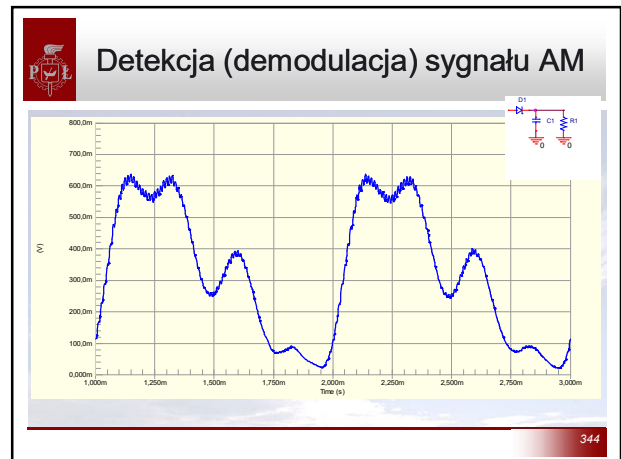
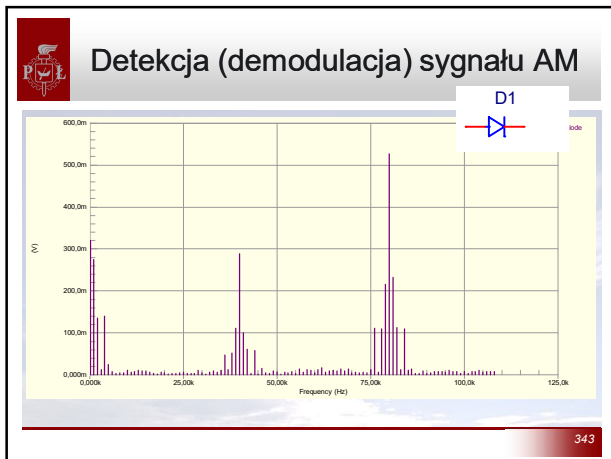
341



## Detekcja (demodulacja) sygnału AM

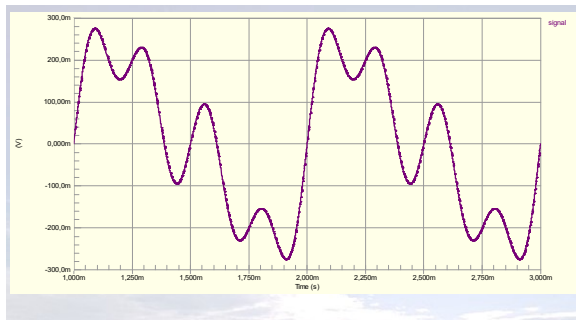


342





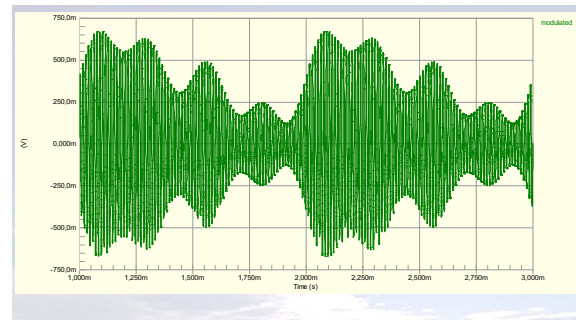
### Detekcja sygnału AM z układem superdiody



349



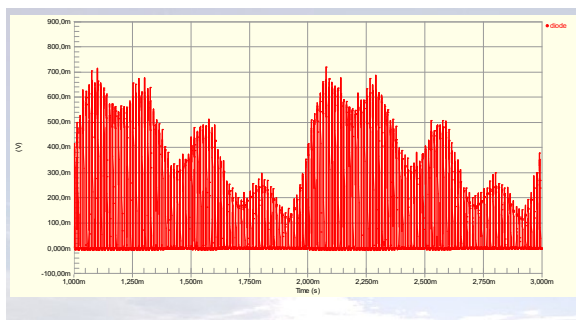
### Detekcja sygnału AM z układem superdiody



350



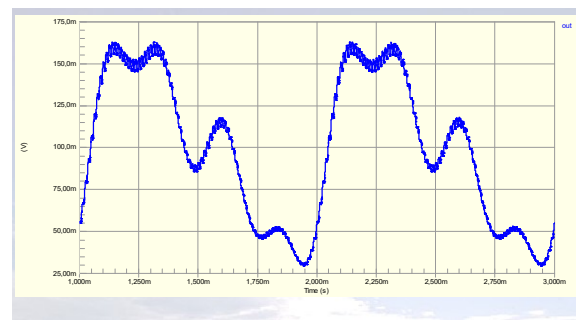
### Detekcja sygnału AM z układem superdiody



351



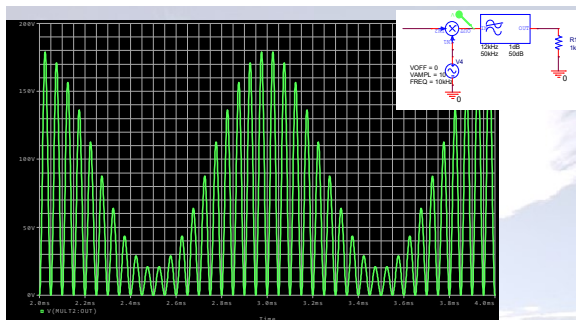
### Detekcja (demodulacja) sygnału AM



352



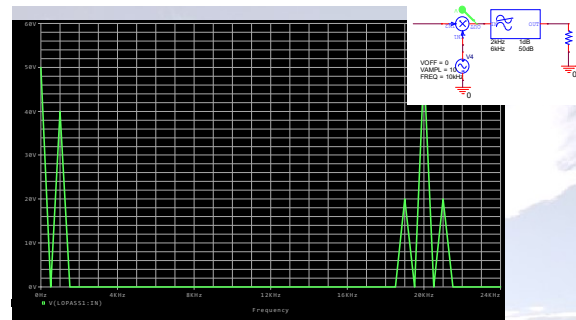
### Detekcja (demodulacja) sygnału AM



353



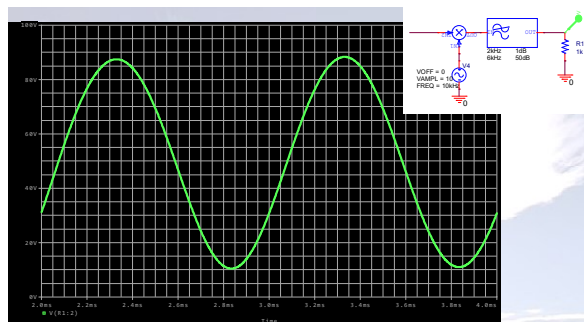
### Detekcja (demodulacja) sygnału AM



354



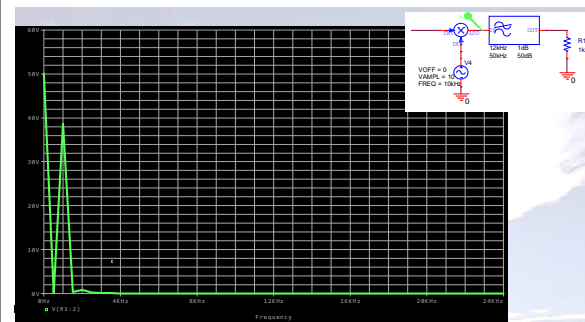
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



355



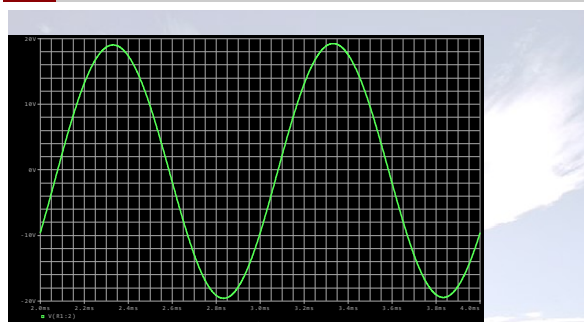
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



356



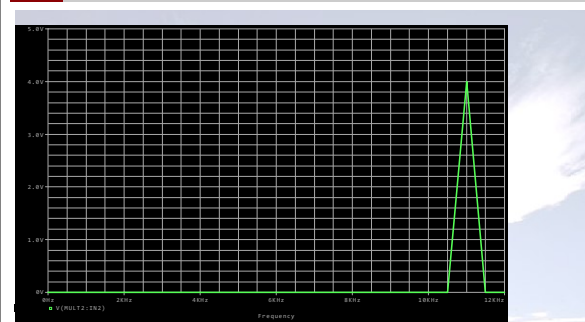
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



357



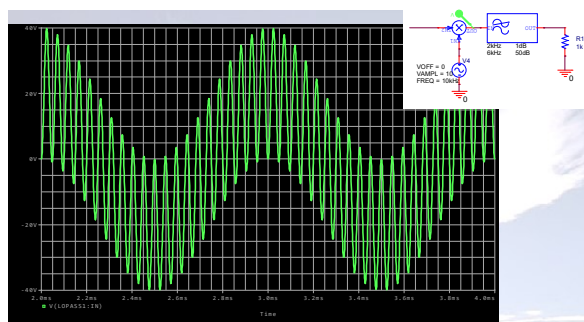
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



358



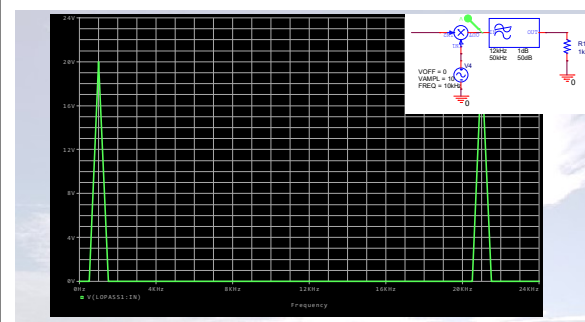
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



359



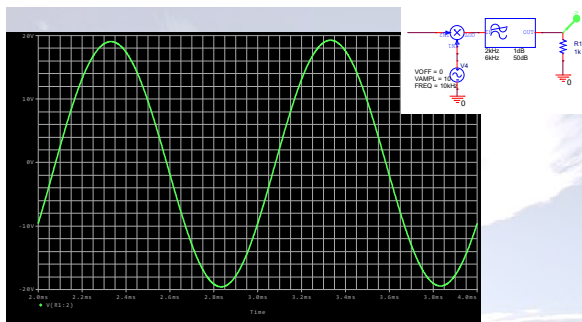
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



360



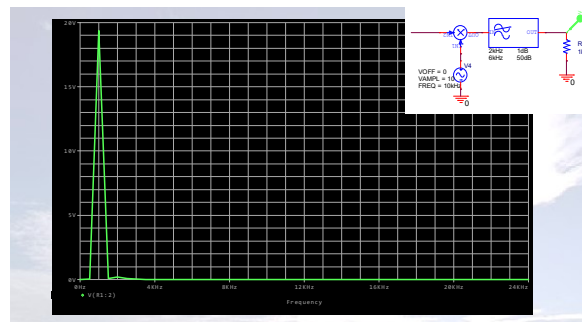
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



361



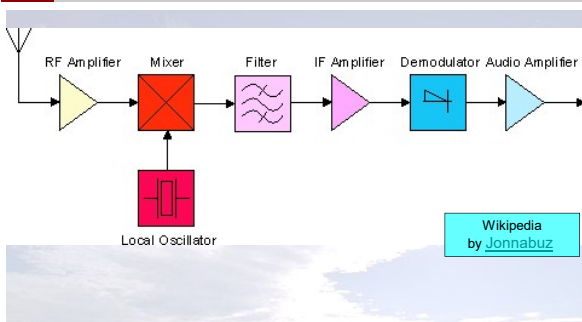
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



362



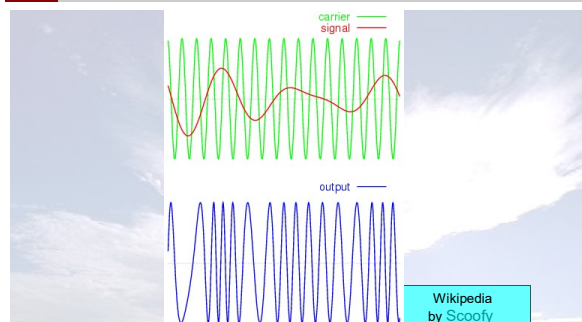
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



363



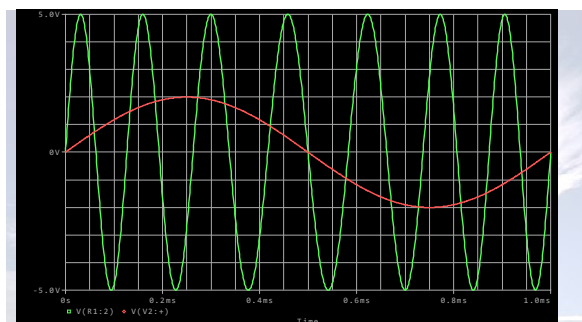
## Detekcja (demodulacja) sygnału FM



364



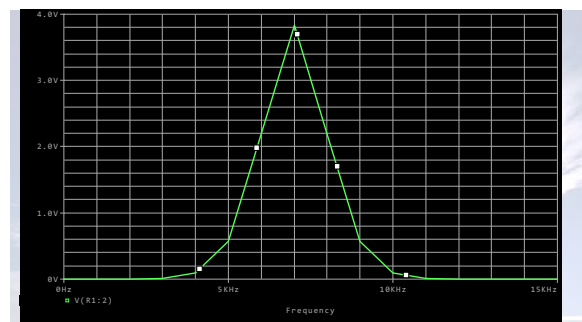
## Sygnał FM (nośna 7kHz sygnał modujący 1kHz)



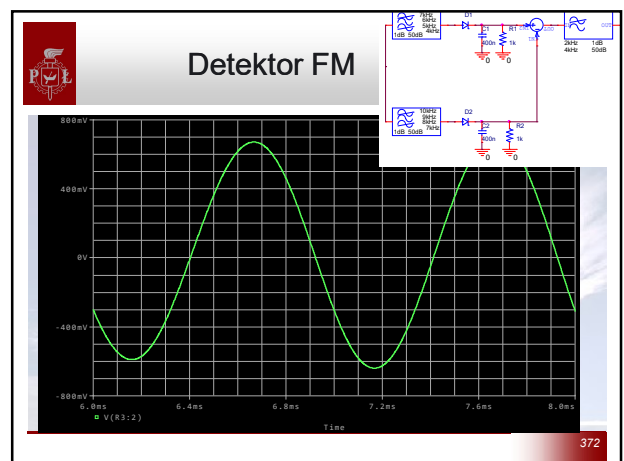
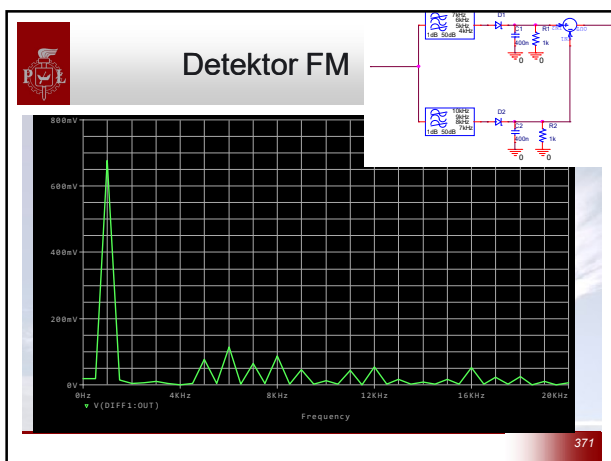
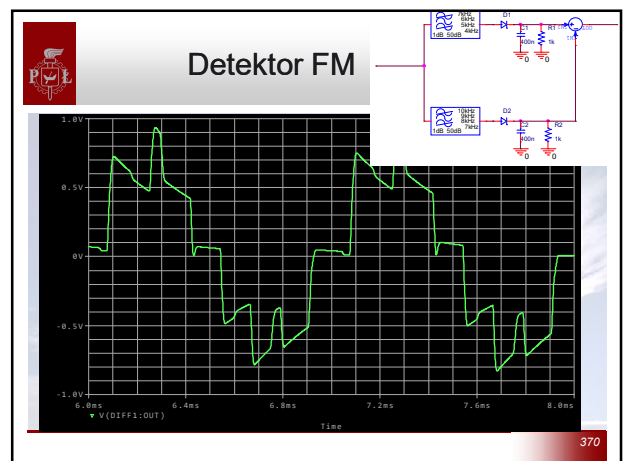
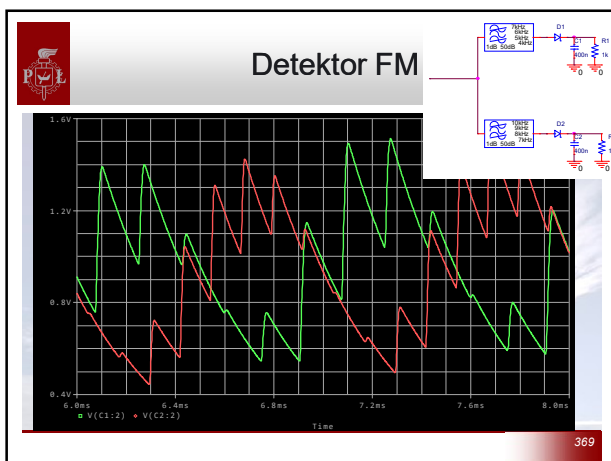
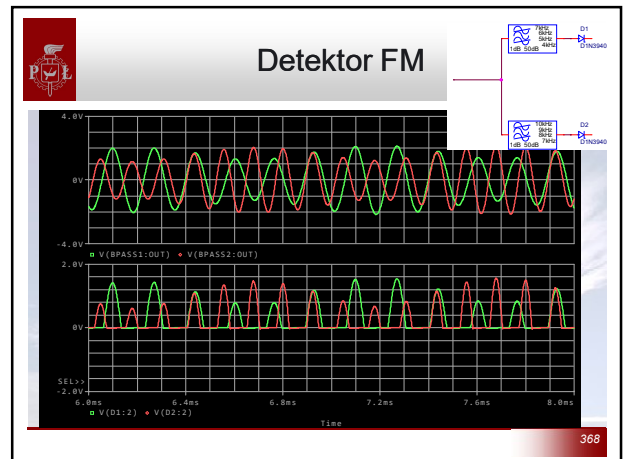
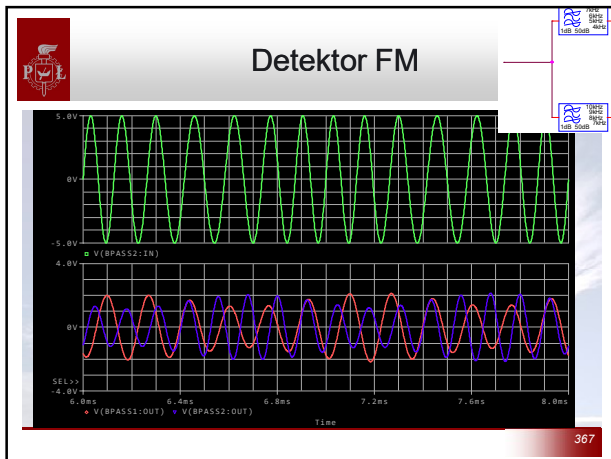
365

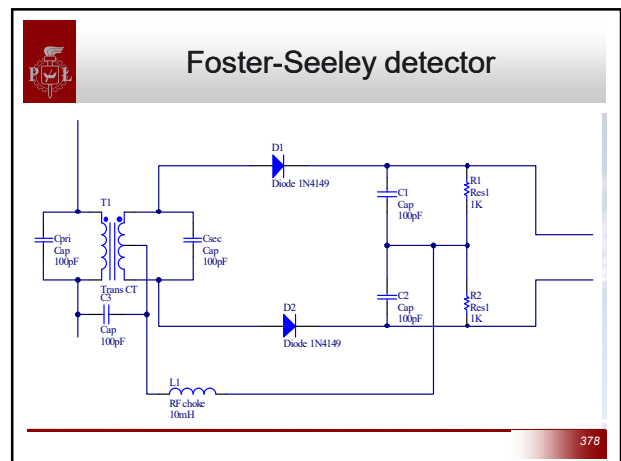
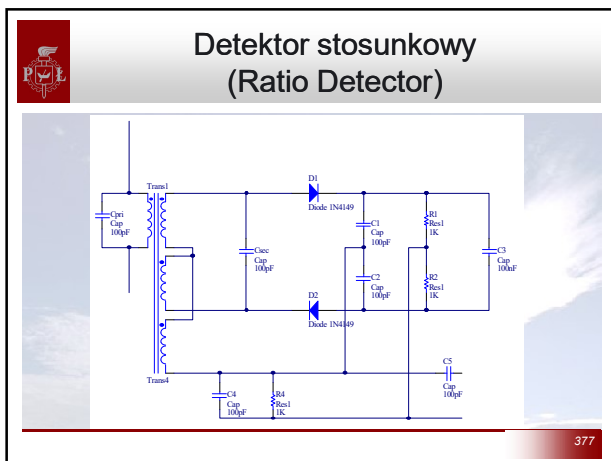
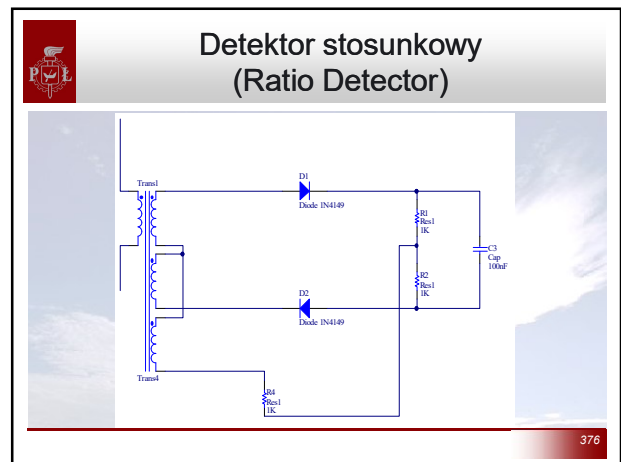
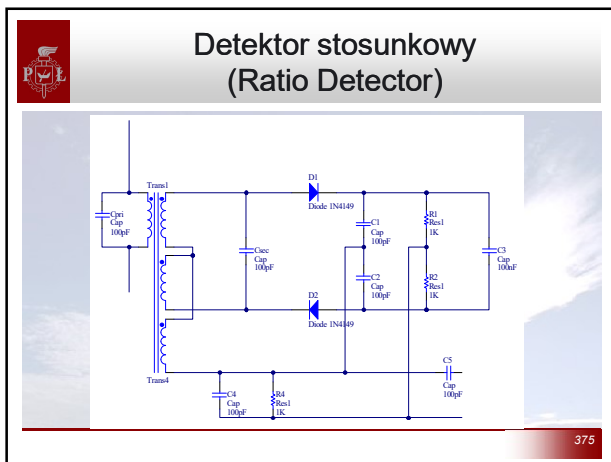
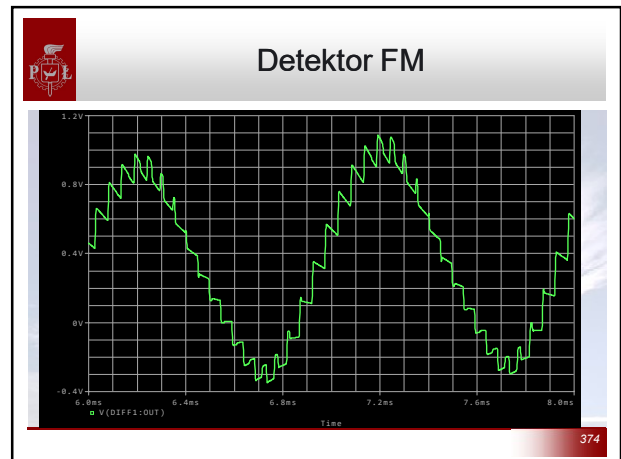
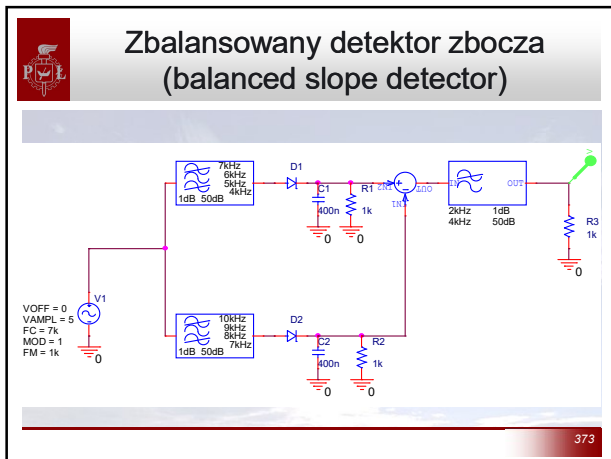


## Sygnał FM (nośna 7kHz sygnał modujący 1kHz)



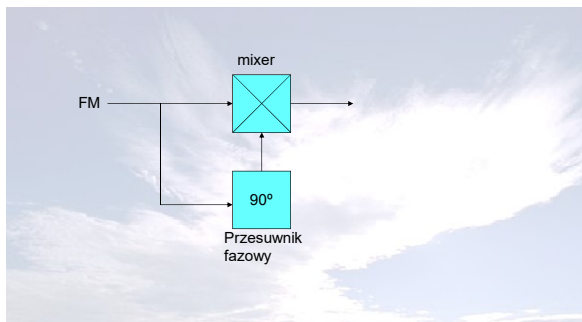
366







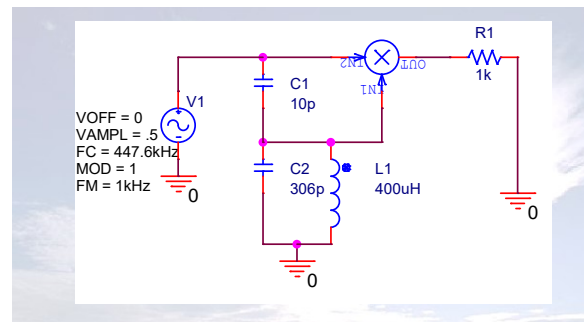
## Detektor kwadraturowy (Quadrature FM detector)



379



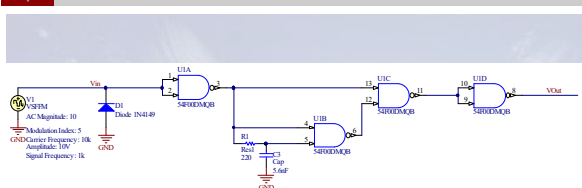
## Detektor kwadraturowy (Quadrature FM detector)



380



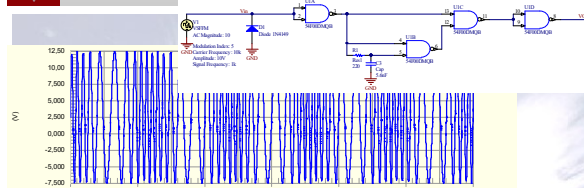
## Detektor FM zliczający impulsy



381



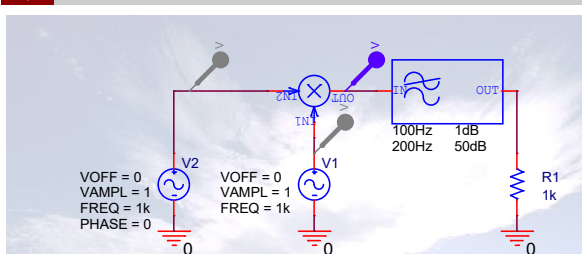
## Detektor FM zliczający impulsy



382



## Detektor fazy



383

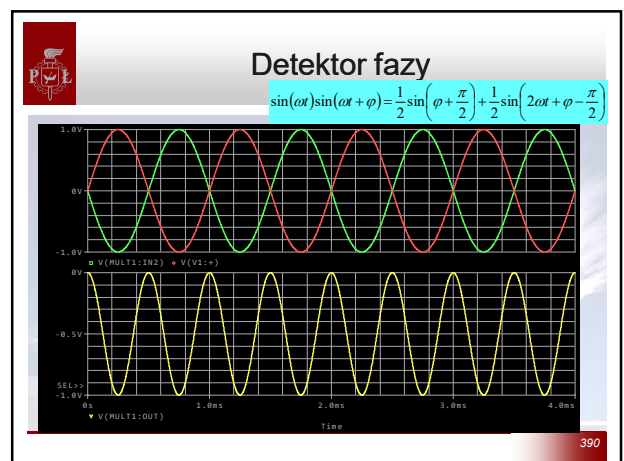
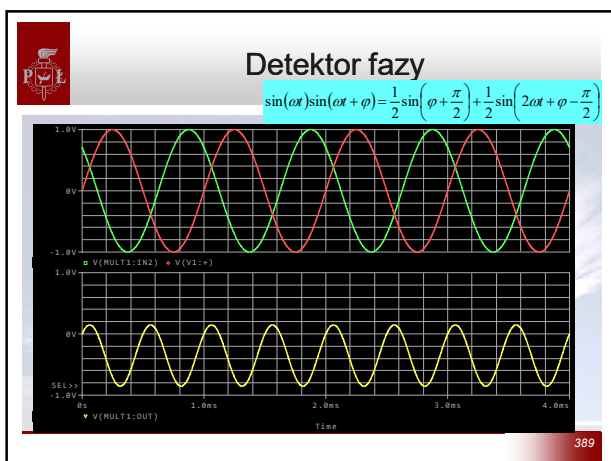
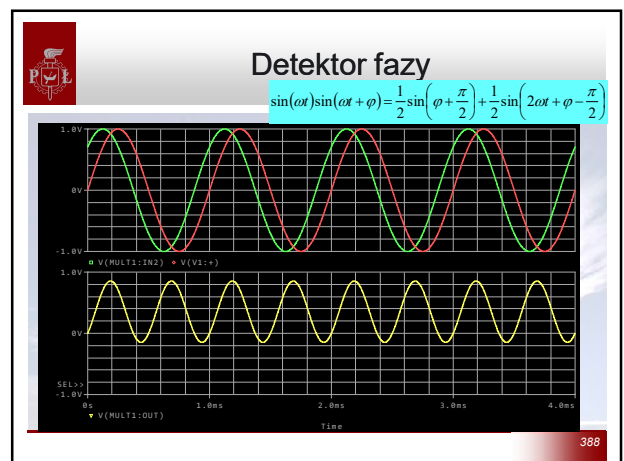
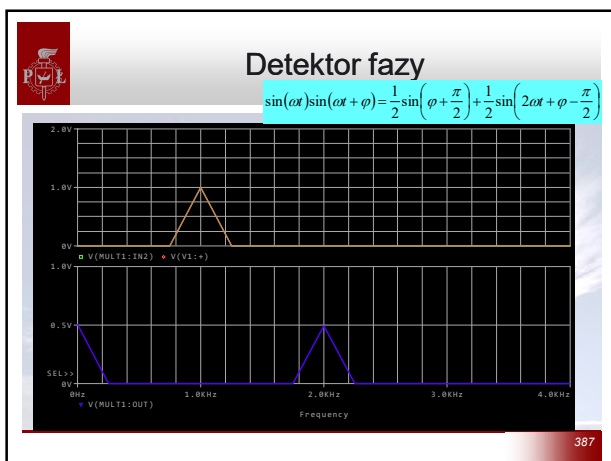
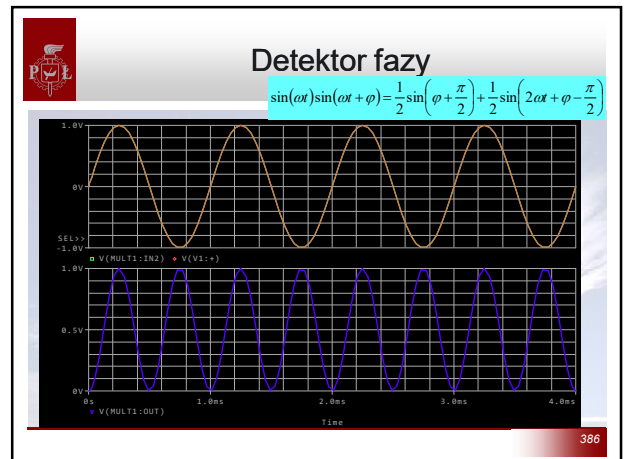
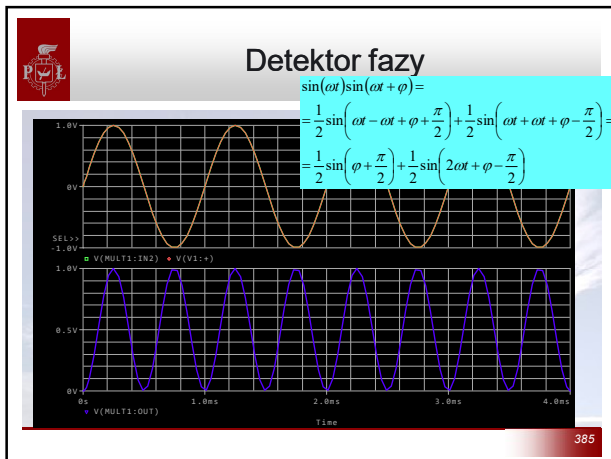


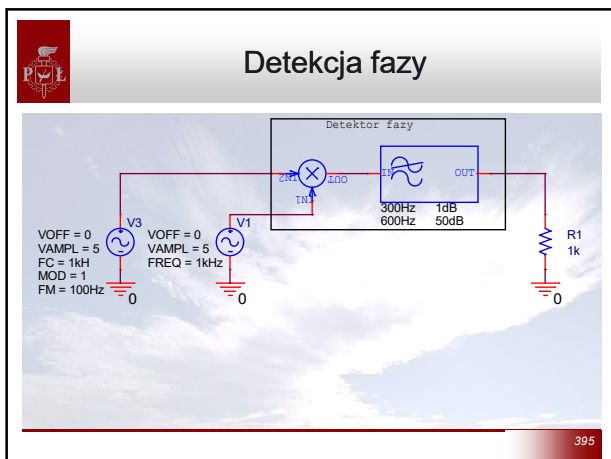
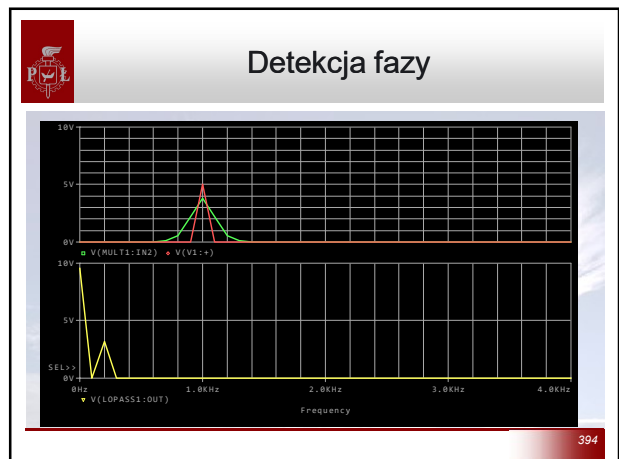
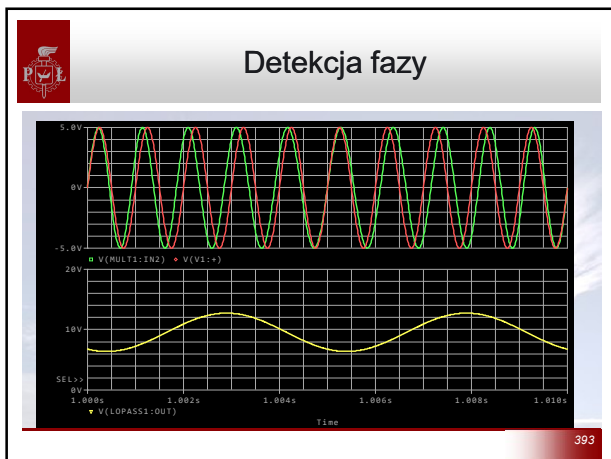
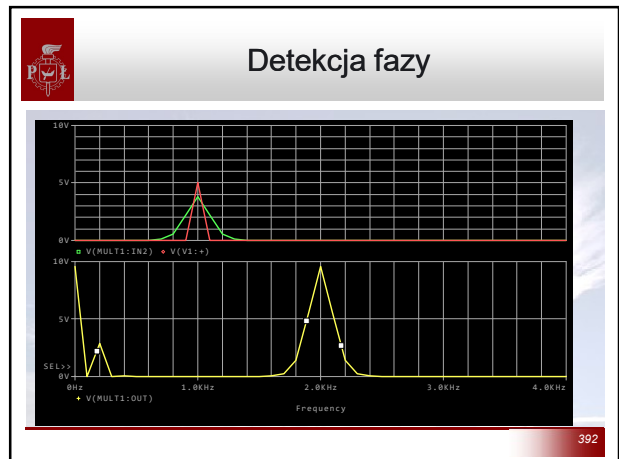
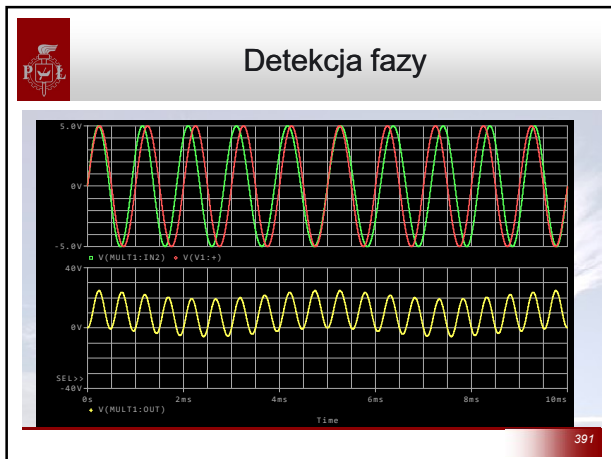
## Mnożenie sygnałów sinusoidalnych

$$\begin{aligned} \sin(2\pi f_1 t + \phi_1) & \sin(2\pi f_2 t + \phi_2) & \sin(\alpha) \sin(\beta) &= \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) - \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta) \\ \sin(\omega_1 t + \phi_1) & \sin(\omega_2 t + \phi_2) & \cos(\alpha) &= \sin(\alpha + 90^\circ) = \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) \\ & & -\sin(\alpha) &= \sin(\alpha + \pi) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sin(\omega_1 t + \phi_1) \sin(\omega_2 t + \phi_2) &= \\ &= \frac{1}{2} \cos(\omega_1 t - \omega_2 t + \phi_1 - \phi_2) - \frac{1}{2} \cos(\omega_1 t + \omega_2 t + \phi_1 + \phi_2) = \\ &= \frac{1}{2} \sin\left(\omega_1 t - \omega_2 t + \phi_1 - \phi_2 + \frac{\pi}{2}\right) - \frac{1}{2} \sin\left(\omega_1 t + \omega_2 t + \phi_1 + \phi_2 + \frac{\pi}{2}\right) = \\ &= \frac{1}{2} \sin\left(\omega_1 t - \omega_2 t + \phi_1 - \phi_2 + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{2} \sin\left(\omega_1 t + \omega_2 t + \phi_1 + \phi_2 - \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned}$$

384





### Phase-locked loop (PLL)

PLL jest systemem sterowania, który generuje sygnał mający ustaloną zależność do fazy sygnału odniesienia.

Układ PLL reaguje zarówno na zmianę fazy i częstotliwości sygnału wejściowego. Częstotliwość sygnału wyjściowego jest automatycznie zwiększana lub zmniejszana w taki sposób aby częstotliwość i faza sygnału wyjściowego odpowiadała częstotliwości i fazie sygnału wejściowego.

PLL jest przykładem układu sterowania wykorzystującego ujemne sprzężenie zwrotne.

Wikipedia

396



## Phase-locked loop (PLL)

### Zastosowania:

- telekomunikacja radio, telecommunications,
- technika komputerowa,
- inne zastosowania elektroniczne.

### Zadania:

- generacja sygnałów o stabilnej częstotliwości,
- odzyskiwanie sygnałów z zaszumionych kanałów komunikacyjnych,
- dystrybucja sygnałów zegarowych w układach cyfrowych np. w mikroprocesorach.

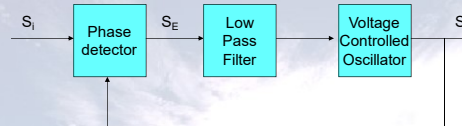
Kompletne układy PLL mogą być wbudowywane jako bloki funkcyjne do układów scalonych. Dzięki temu technika PLL jest szeroko wykorzystywana w nowoczesnych urządzeniach elektronicznych pracujących w zakresie częstotliwości od ułamków Hz do wielu GHz.

Wikipedia

397



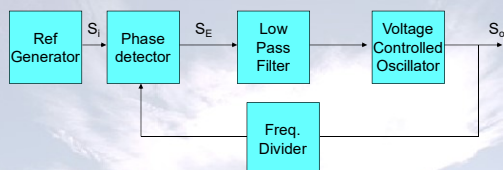
## PLL schemat blokowy



398



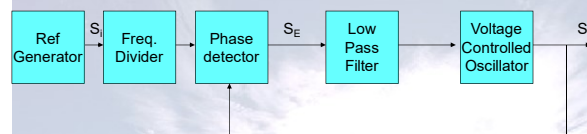
## PLL – n-krotnego zwielokrotniania częstotliwości wzorcowej



399



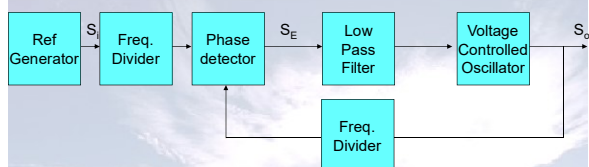
## PLL – układ n-krotnego podziału częstotliwości wzorcowej



400



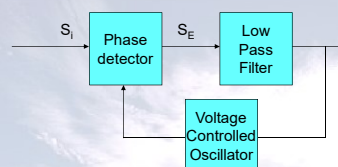
## PLL układ dowolnej (wymiernej) modyfikacji częstotliwości wzorcowej



401



## PLL jako demodulator FM demodulator



402



## Przetworniki analogowo cyfrowe i cyfrowo analogowe (ADC, DAC)

- Przetwarzanie sygnału cyfrowego na analogowy
- Konstrukcje przetworników
- Błędy przetwarzania
- Przykładowe scalone przetworniki analogowo cyfrowe i cyfrowo analogowe

403



## Sygnały analogowe i cyfrowe

**Sygnał Analogowy** – ciągła funkcja czasu

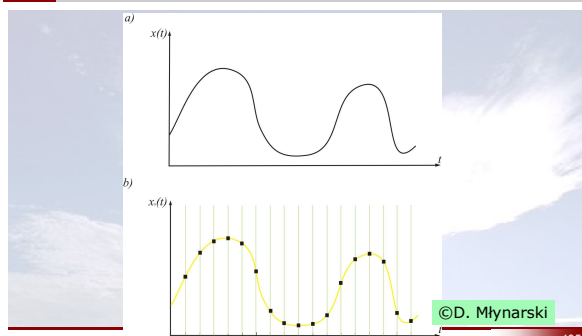
**Sygnał Dyskretny** - zdefiniowany w dyskretnych chwilach czasu  $t_0, t_1, t_2, \dots$  takich, że:  $t_i - t_{i-1} = \Delta t$  gdzie  $\Delta t$  jest okresem próbkowania

**Sygnał Cyfrowy** – ciąg liczb reprezentujący skwantowanie wartości próbek

404



## Próbkowanie sygnału analogowego



©D. Młynarski

405



## Sygnały dyskretne

### Twierdzenie Shannona (Kotelnikova)

Sygnał analogowy  $x(t)$  może być bezbłędnie zrekonstruowany na podstawie jego dyskretnej wersji jeżeli:

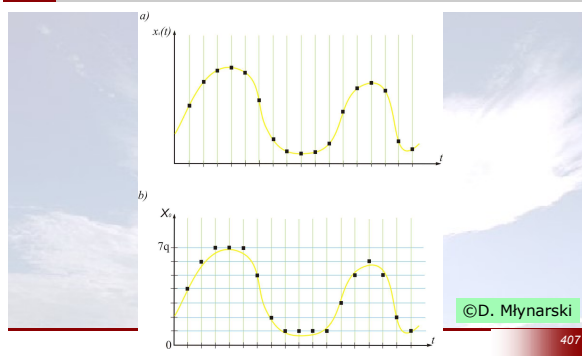
1.  $x(t)$  ma ograniczone pasmo, tzn.  $X(f)=0$ , dla  $f \leq f_h$
2. częstotliwość próbkowania  $f_s = 1/\Delta t$  równa lub większa  $2f_h$

Sygnał dyskretny jest nadal sygnałem analogowym ale nie jest ciągłą funkcją czasu.

406



## Kwantyzacja sygnału dyskretnego

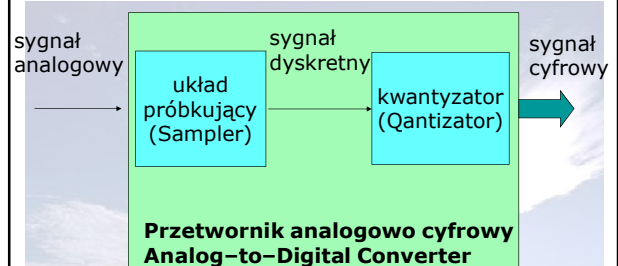


©D. Młynarski

407



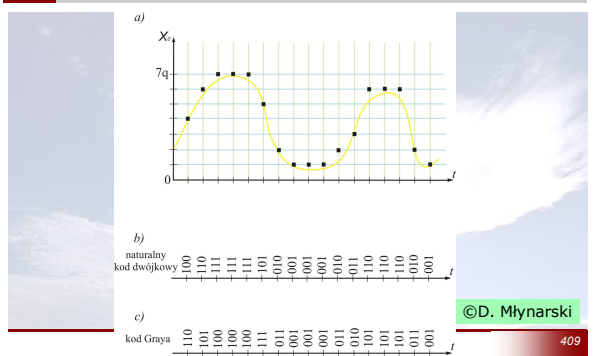
## Sygnały cyfrowe



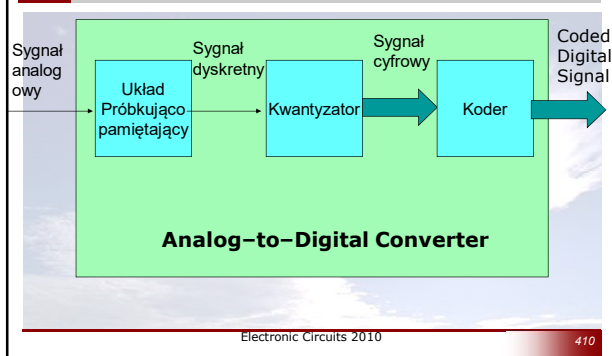
408



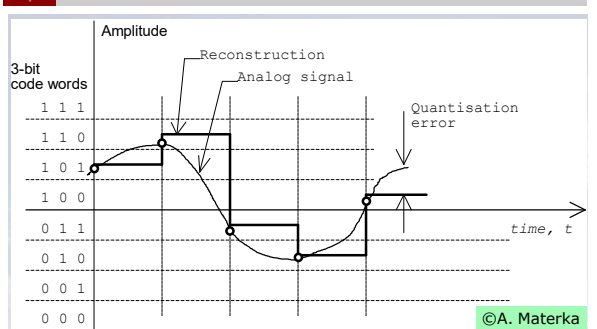
## Kodowanie sygnału cyfrowego



## Przetwornik analogowo cyfrowy



## Rekonstrukcja sygnału analogowego



## Sygnały cyfrowe

Liczba dyskretnych (skwantowanych) poziomów sygnału

$$N = 2^k$$

$k=8 \rightarrow N = 256$

$k=16 \rightarrow N = 65536$

$k=24 \rightarrow N = 16\,777\,216$

10-bit – pomiary przemysłowe,

16-bit – odtwarzacz kompaktowy

24-bit – przetwarzanie obrazów kolorowych (3 x 8 bitów, inaczej 8 bitów na kolor)

412



## Zalety cyfrowego przetwarzania sygnałów

### Wynikające z właściwości układów cyfrowych:

- elastyczność (układy cyfrowe są programowalne),
- mniejsza tolerancja elementów,
- niższa czułość na czynniki zewnętrzne (np. temperaturę i wewnętrzne (starzenie się elementów, dryft),
- dokładność przetwarzania sterowana za pomocą długości słowa reprezentującego próbki,
- układy są powtarzalne (nie wymagają strojenia),
- brak wzmacniania szumu  $\rightarrow$  nieskończona liczba kolejnych operacji,
- łatwa realizacja w postaci układów scalonych (brak dużych indukcyjności i pojemności).

413



## Zalety cyfrowego przetwarzania sygnałów

### Powiązane z ograniczeniami elektroniki analogowej:

- „idealna pamięć” do przechowywania sygnałów nieskończenie długo (sygnały o małej częstotliwości mogą być przetwarzane bez potrzeby użycia dużych  $L$  i  $C$ )
- filtry o liniowej fazie nieosiągalne w technice analogowej,
- systemy adaptacyjne,
- dokładne transformaty sygnałów,
- przetwarzanie sygnałów 2D i 3D.

414



## Wady cyfrowego przetwarzania sygnałów

- większy pobór mocy (nie istnieją pasywne układy cyfrowe),
- ograniczenie do przetwarzania stosunkowo małych częstotliwości,
- w przypadku przetwarzania sygnałów analogowych wymagają skomplikowanych przetworników AC i CA
- kłopoty z przetwarzaniem na sygnał cyfrowy bardzo słabych i bardzo silnych sygnałów -> wymagane układy analogowe do wstępnego przetwarzania sygnałów,
- ta sama informacja w postaci cyfrowej wymaga większego pasma niż w postaci analogowej.

415



## Właściwości układów analogowych

- mniejsza dokładność,
- wrażliwość na szum,
- możliwość przetwarzania sygnałów o dużej częstotliwości, małych i dużych sygnałów.

**Nowoczesne i przyszłościowe systemy elektroniczne zawierają zarówno analogowe jak i cyfrowe obwody. Takie układy nazywane są układami mieszanymi.**

416



## Przetworniki AD

- <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21841a.pdf>
- <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/641/CMP/ELK-11>
- <http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/39-06/architecture.html>
- <http://www.beis.de/Elektronik/DeltaSigma/DeltaSigma.html>
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Analog-to-digital\\_converter](http://en.wikipedia.org/wiki/Analog-to-digital_converter)
- <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/1870>
- Układy: AD7714, MCP3008, MAX104

417



## Przetworniki AD do testu nr 7

- <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/641/CMP/ELK-11>
- MAX104
- AD7714
- MCP3004

418



## Plan wykładu

1. Informacje wstępne.
2. Układy scalone wzmacniaczy mocy.
3. Analogowe filtry aktywne czasu ciągłego i dyskretnego.
4. Detektory amplitudy, częstotliwości i przesunięcia fazowego.
5. Analogowe układy mnożące i jego zastosowania.
6. Pętla fazowa i jej zastosowania.
7. **Programowalne układy analogowe i ich zastosowania.**
8. Specjalizowane układy scalone.
9. Szumy układów aktywnych.
10. Układy scalone wzmacniaczy pasmowych.

419



## Programowalne układy analogowe i ich zastosowania

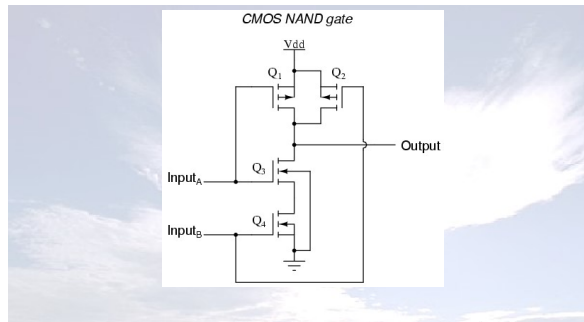
Podstawowe informacje na temat układów programowalnych i reprogramowalnych

1. Pojęcia podstawowe - założenia budowy i działania układów programowalnych
2. Komórka pamięci jako podstawowy element składowy układów programowalnych - budowa, technologie wykonania
3. Elementy konstrukcyjne układów programowalnych - przegląd
4. Interfejsy programujące: koncepcja układów ISP, IAP, interfejs JTAG, dynamiczne reprogramowanie w systemie
- II. Klasyfikacja układów programowalnych, cechy charakterystyczne, preferencje zastosowa
1. Cyfrowe układy programowalne PLD (PAL/GAL, PLA, CPLD, FPGA)
2. Cyfrowe układy programowalne bazujące na rdzeniach procesorów oraz programowalne układy peryferyjne
3. Analogowe układy programowalne, układy hybrydowe
4. Układy PSoC (Programmable System-on-Chip)

420



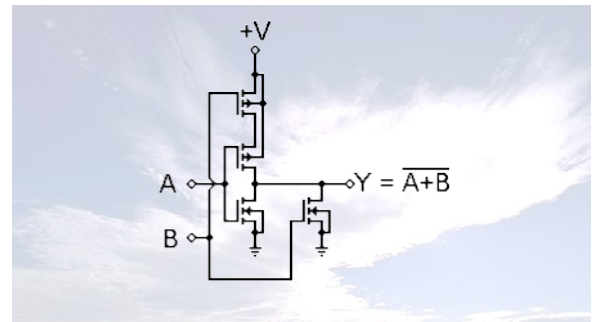
## Analogowe i cyfrowe układy programowalne i ASIC



421



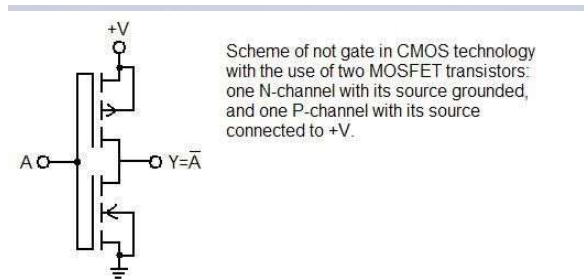
## Analogowe i cyfrowe układy programowalne i ASIC



422



## Analogowe i cyfrowe układy programowalne i ASIC



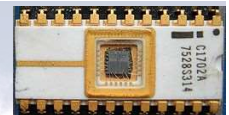
423



## Cyfrowe układy programowalne

### Read only memory (ROM)

- Programmable read-only memory (PROM)
- EPROM
- EEPROM
- Flash memory
- FeRAM
- MRAM
- PRAM



424



## PROM as PLD

Address lines - inputs (m)  
Data lines – outputs (n)  
 $2^m$  values stored,  $2^n$  functions available,

425



## Cyfrowe układy programowalne

- Motorola XC157 (1969) 12 gates 30 I/O mask programmable
- General Electric Company (1971) UV PROM PLD.

426



## Cyfrowe układy programowalne

- Programmable read-only memory (PROM)
- Programmable logic devices (PLD)
- Generic array logic (GAL)
- Complex programmable logic device (CPLD)
- Field-programmable gate array (FPGA)

427



## Application-specific integrated circuit

5,000 to over 100 million gates.

Modern ASICs often include:

- 32-bit processors,
- memory blocks including ROM, RAM, EEPROM, Flash

Designers of digital ASICs use a hardware description language (HDL), such as Verilog or VHDL, to describe the functionality of ASICs.

428



## Application-specific integrated circuit

- Standard cell design
- Gate array design
- Full-custom design
- Structured design
- Cell libraries, IP-based design, hard and soft macros

429



## IDM ASIC suppliers

- |                          |                      |
|--------------------------|----------------------|
| • Avago Technologies     | • NEC                |
| • Elmos Semiconductor    | • NXP Semiconductors |
| • Cavium Networks        | • ON Semiconductor   |
| • Fujitsu                | • Renesas            |
| • Freescale              | • Samsung            |
| • HITACHI                | • STMicroelectronics |
| • IBM                    | • Texas Instruments  |
| • Infineon Technologies  | • Toshiba            |
| • LSI Corporation        | • TSMC               |
| • Marvell Semiconductors |                      |

430



## Programowalne układy analogowe i ich zastosowania literatura

- [http://www.zpt.tele.pw.edu.pl/artykuly/an\\_uk\\_pro.pdf](http://www.zpt.tele.pw.edu.pl/artykuly/an_uk_pro.pdf)
- Jacek Dębowski, „Programowalne układy analogowe przy sterowaniu diodami high-power LED”  
[http://www.elektronikab2b.pl/component/option,com\\_content/Itemid,58/id,1684/view/article/](http://www.elektronikab2b.pl/component/option,com_content/Itemid,58/id,1684/view/article/)
- Lattice „ispPAC Overview”  
<http://www.latticesemi.com/lit/docs/datasheets/pac/pacover.pdf>
- Lattice „ispPAC 10”  
<http://www.latticesemi.com/lit/docs/datasheets/pac/pac10.pdf>

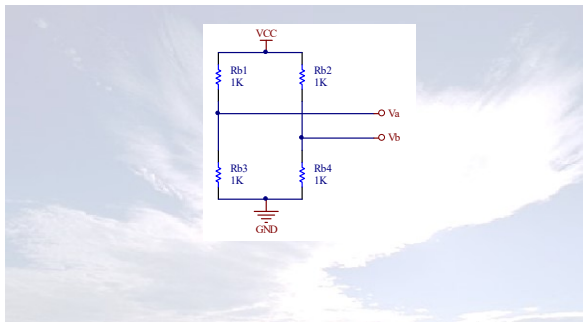
431



432



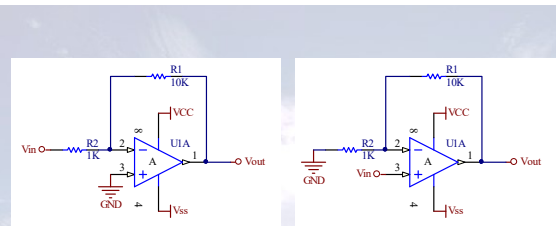
## Czujnik mostkowy



433



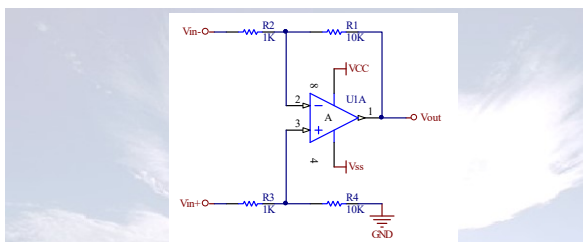
## Wzmacniacze



434



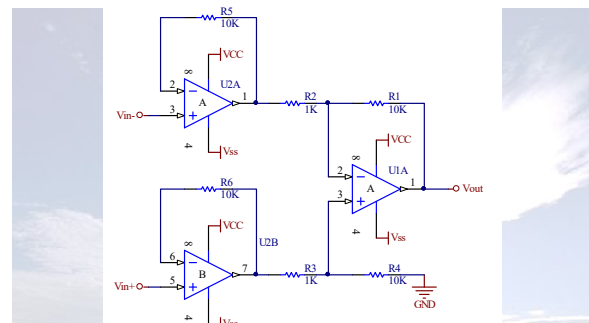
## Wzmacniacz różnicowy



435



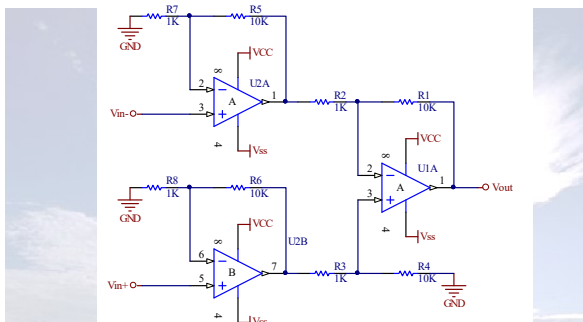
## Buforowany wzmacniacz różnicowy



436



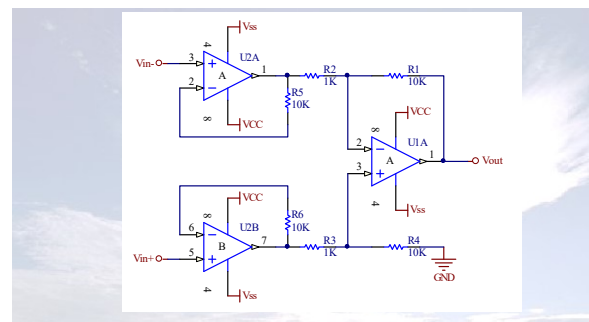
## Buforowany wzmacniacz różnicowy



437



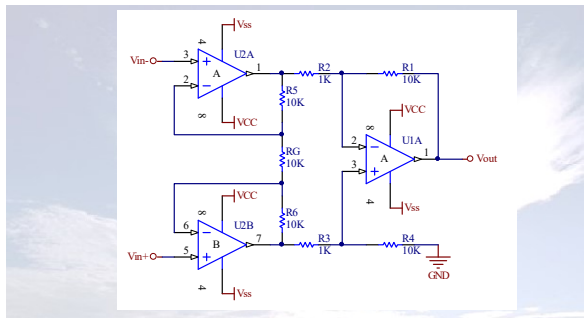
## Buforowany wzmacniacz różnicowy



438



## Wzmacniacz pomiarowy



439



## Wzmacniacze pomiarowe

- INA114
- INA128
- AD8422
- LT1167

440