


Technical University of Lodz  
Institute of Electronics

## Układy elektroniczne 2

dr inż. Marcin Kociołek  
Zakład Elektroniki Medycznej  
Łódź 2011


## Informacje ogólne

Wykładowca:  
Dr inż. Marcin Kociołek  
adiunkt 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



## Zaliczenia - wykład

- 1) 5 kolokwiumów cząstkowych, 20 min co trzecie zajęcia pierwsze na 3 zajęciach. (studia niestacjonarne 4 kolokwia na zjazdach od 2 do 5)
  - Z każdego kolokwium można otrzymać 0÷6 punktów.
  - Ocena końcowa to suma punktów uzyskanych ze wszystkich kolokwiumów podzielona przez 5 (przez 4 na studiach niestacjonarnych).
  - Ocena  $\geq 4$  zalicza przedmiot.
  - Pierwsze kolokwium można poprawić.
  - Osoba, która do godziny 8.00 w dniu pisania kolokwium, poinformuje mnie mailowo o niemożności uczestniczenia na zajęciach, na których odbywa się kolokwium, ma prawo do napisania takiego kolokwium w terminie dodatkowym.
  - W ostatnim tygodniu semestru lub pierwszym tygodniu sesji będzie wyznaczony termin uzupełniający na poprawę pierwszego kolokwium lub/i uzupełnienie brakujących kolokwiumów dla uprawnionych studentów. W tym terminie student ma może napisać maksymalnie 2 kolokwia.

4



## Zaliczenia - wykład


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 kolokwiumów 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 z zakładu Układów Elektronicznych i Termografii

5



## 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

6





## Pan laboratorium

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

- zasilacz liniowy
- wzmacniacz mocy
- korektor barwy
- odbiornik FM
- przedwzmacniacz mikrofonowy

7



## UWAGA !

Prezentowane na wykładzie slajdy nie zawierają całej wiedzy potrzebnej do zaliczenia przedmiotu elektronika. Wiedza przekazywana jest na wykładzie. Warto prowadzić notatki. Zalecane jest również sięganie do wskazanej literatury.

8



## 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

9



## 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.ppt>

Fabrizio Bonani, Giovanni Ghione, Noise in Semiconductor Devices: Modeling and Simulation Springer (Kindle Edition - 6 Sep 2001)

10



## Szumy układów elektronicznych

Szum

Zakłócenie

Zniekształcenie

11



## 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

12





## 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>

13



## Szumy układów elektronicznych

Rodzaje szumu:

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

14



## Szum termiczny (cieplny)

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.

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

15



## Szum termiczny (cieplny)

Wartość średniokwadratową napięcia szumu termicznego na zaciskach opornika

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

gdzie:

$R$  – rezystancja [ $\Omega$ ]  
 $\Delta f$  – pasmo częstotliwości szumu [Hz],  
 $k_B$  – stała Boltzmanna =  $1,38 \times 10^{-23}$  [J/K]  
 $T$  – temperatura [K].

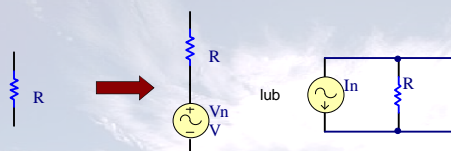
Moc szumu termicznego

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

16



## Szum termiczny (cieplny)



Gęstość widmowa

$$g_n = \frac{dP}{df} = kT$$

17



## 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

18





## Szum  rutowy

Są to fluktuacje prądu elektrycznego, związane z ziarnistą natur  ładunku elektrycznego. Powstają w przypadku przepływu nośników przez barier  potencjału, dlatego też można je zaobserwowa  w z l czu p-n. Szum śrutowy jest szumem białym i charakteryzuje się normalnym rozk ladem wartości chwilowych oraz stałą gęstością widmową energii.

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

19



## Szum  rutowy

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)

20



## Szum  rutowy

G wne w lciwo ci szumu śrutowego:

- jego występowanie dotyczy elementów posiadających barier  potencjałów (np. z l cza p-n),
- jest skutkiem kwantowej struktury prądu,
- jego widmo jest w równomiernie rozk l one w częstotliwości,
- jego pomiary pozwalają na wyznaczenie wielkości ładunku elementarnego

21



## Szum typu 1/f (ma oc stotliwo ciowy)

Szum ten obserwowany jest we wszystkich rodzajach elementów elektronicznych

Przyczyna powstawania szumu 1/f jest na razie niewyjaśniona.

Jedna z hipotez gęsi, 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 zróznicowanej budowie

Inna teoria gęsi że jest on rezultatem kilku róznych mechanizmów fizycznych w których dominuje generacja i rekombinacja ładunków w defektach struktury krystalicznej p lprzewodnika

22



## Szum typu 1/f (ma oc stotliwo ciowy)

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 r zowym

$\alpha = 2$  nazywany jest szumem czerwonym

23



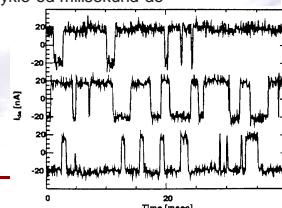
## Szum wybuchowy

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 z l czu p-n)

W lciwo ci:

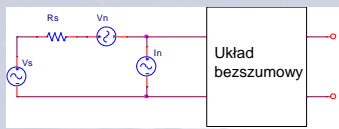
- Czas trwania impulsów wynosi zwykle od milisekund do kilkadziesi ciu sekund
- Częstotliwość mniejsza od 1kHz
- Amplituda o jeden lub dwa rz dy wielkości większa od amplitudy szumu termicznego







## Parametry szumowe



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

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

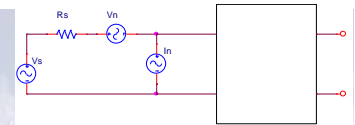
$$SNR_{out} = F \times SNR_{in} \quad \text{Dla układu rzeczywistego}$$

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

25



## 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  $I_n$

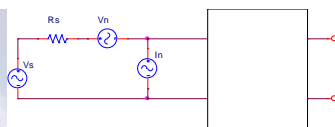
Gdy  $c = 0$ :

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

26



## Współczynnik szumów



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

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

27



## 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

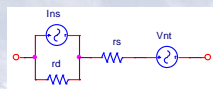
- Szum cieplny
- Szum Barkhausena (w cewkach z rdzeniem) powstający z fluktuacji pola magnetycznego w rdzeniu

28



## Szumy diod półprzewodnikowych

- Szum cieplny
- Szum śrutowy

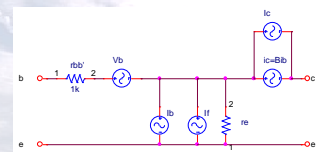


29



## Szumy tranzystorów BJT

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



30





## 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>

31



## 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

32



## Układy scalone wzmacniaczy 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

33



## Układy scalone wzmacniaczy mocy

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

34



## 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

35



## 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

36





## 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

37



## Sprawność wzmacniacza

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

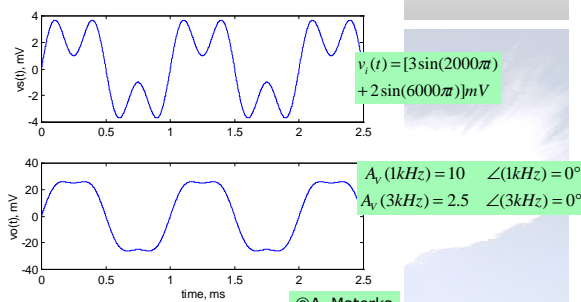
$P_i$  – moc wejściowa  
 $P_s$  – moc pobrana ze źródła zasilania  
 $P_o$  – moc wyjściowa  
 $P_d$  – moc rozproszona w układzie

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

38



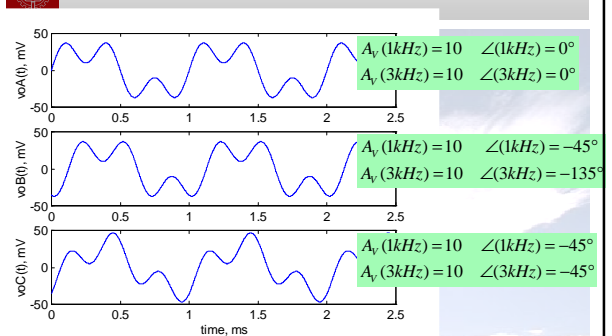
## Zniekształcenia amplitudy



39



## Zniekształcenia fazy



40



## Zniekształcenia fazy

Sygnał wejściowy suma dwóch sinusoid:

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

Symulacja w programie MatLab:

m-file: PhaseDistortion.m

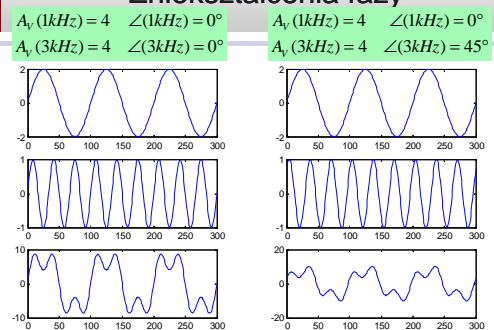
300 próbek

częstotliwość próbkowania = 100 kHz

41

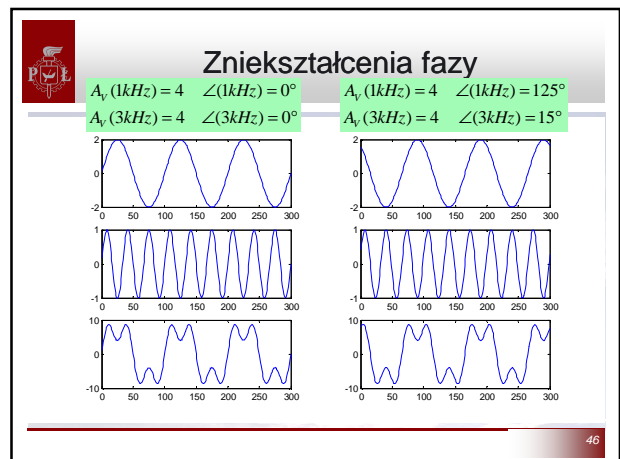
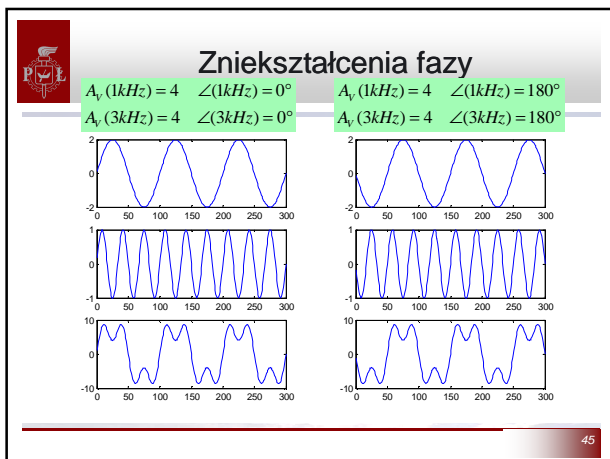
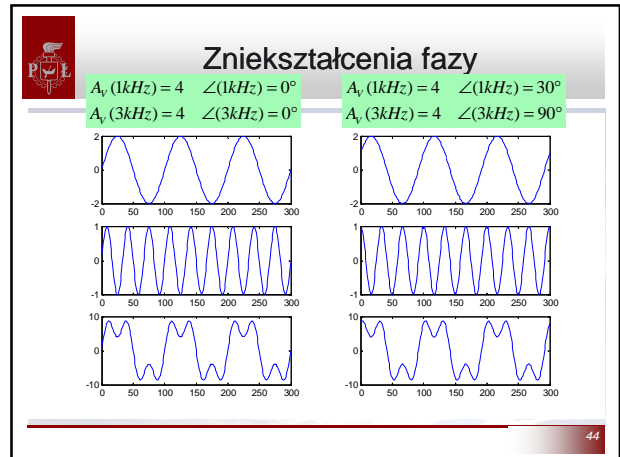
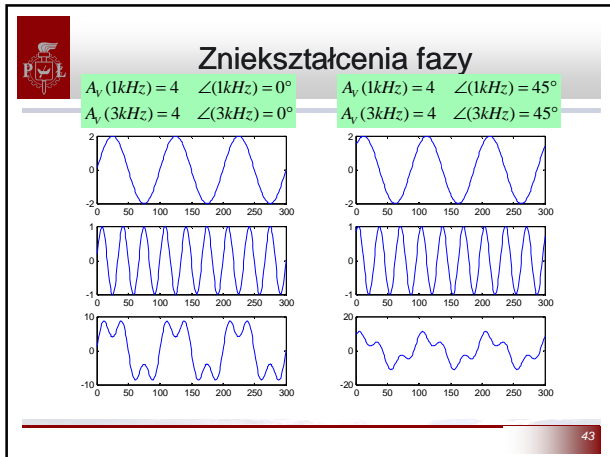


## Zniekształcenia fazy



42



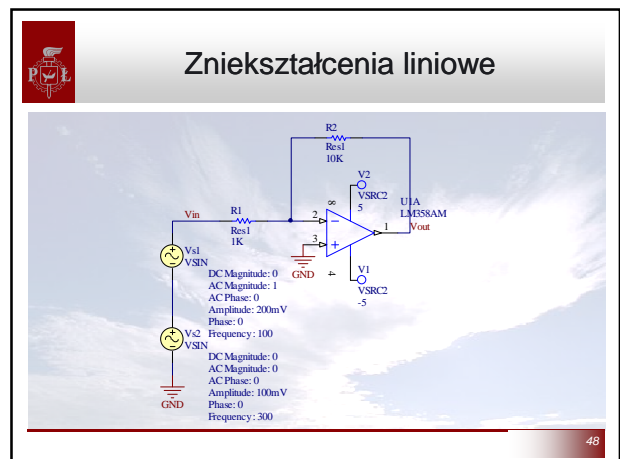


### Zniekształcenia liniowe

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  
 $\varphi(f) = 0^\circ, \varphi(f) = 180^\circ, \varphi(f) = k \cdot f \text{ dla } f \in (f_L, f_h)$

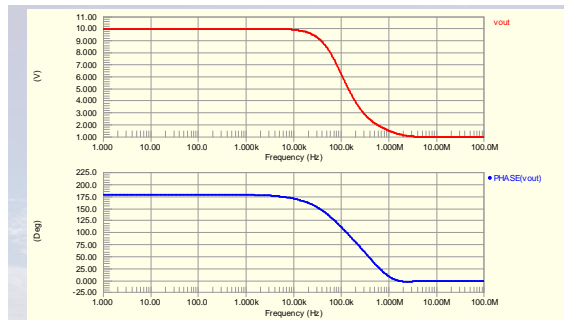
47







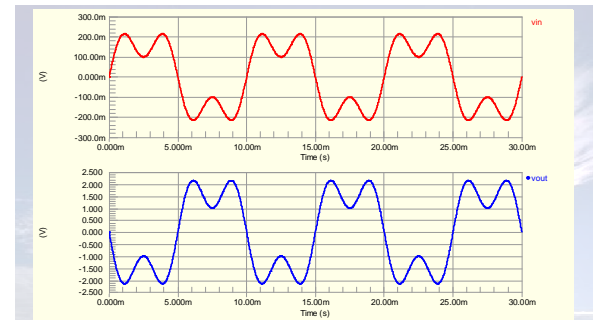
## Zniekształcenia liniowe



49



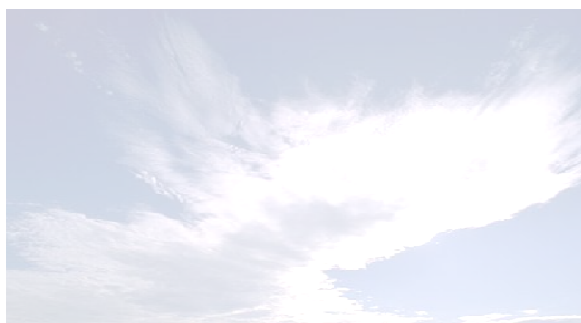
## Zniekształcenia liniowe



50



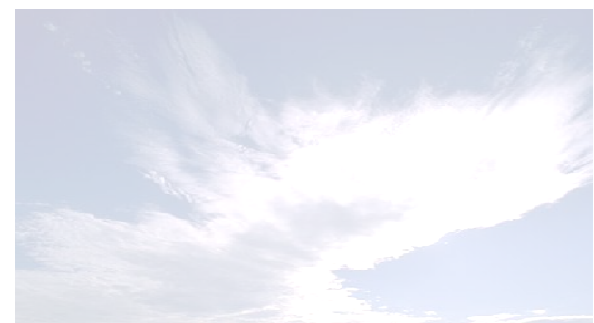
## Zniekształcenia liniowe



51



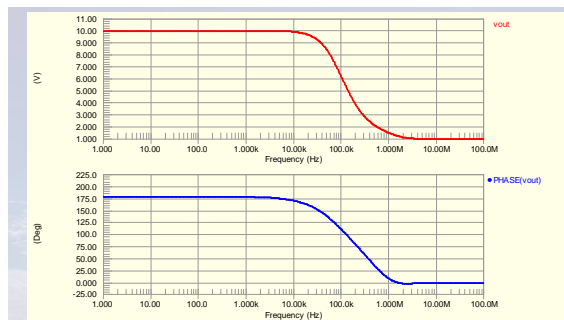
## Zniekształcenia liniowe



52



## Zniekształcenia liniowe



53



## Zniekształcenia liniowe



54



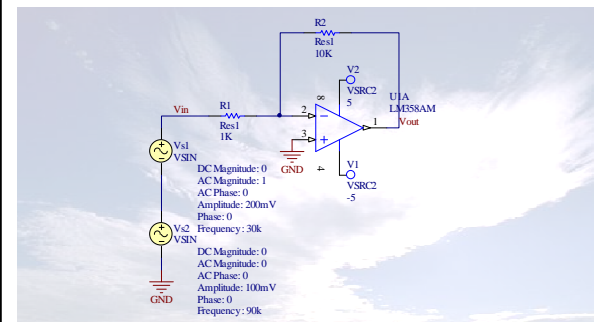


## Zniekształcenia liniowe

55



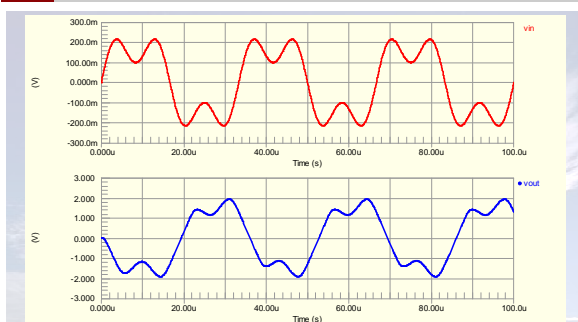
## Zniekształcenia liniowe



56



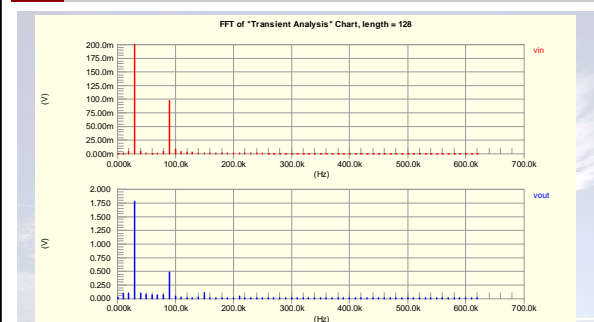
## Zniekształcenia liniowe



57



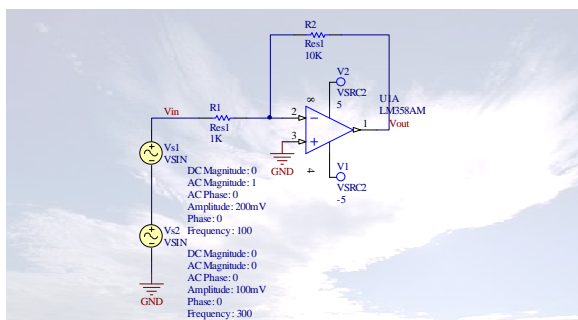
## Zniekształcenia liniowe



58



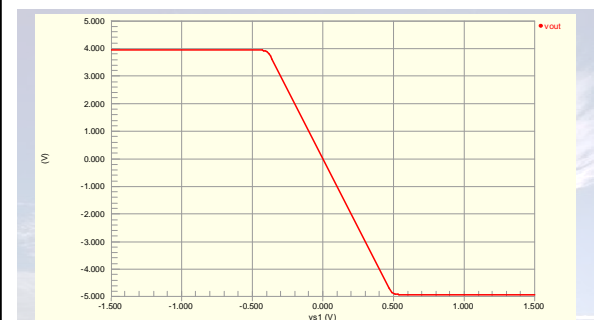
## Zniekształcenia nieliniowe



59



## Zniekształcenia nieliniowe

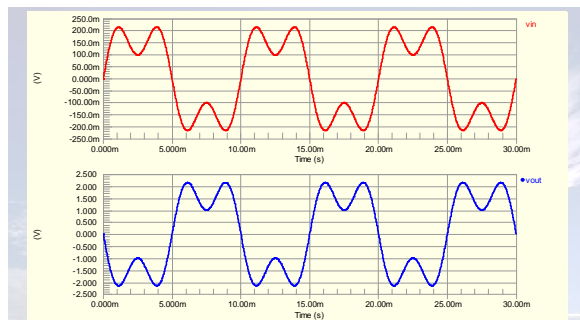


60





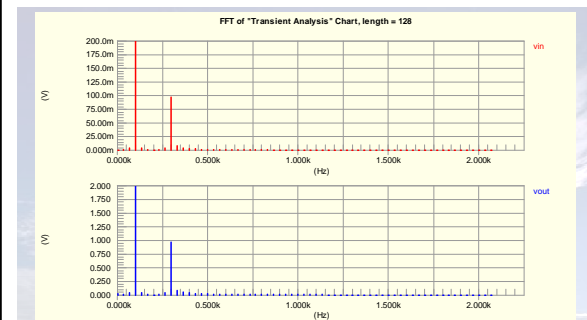
## Zniekształcenia nieliniowe



61



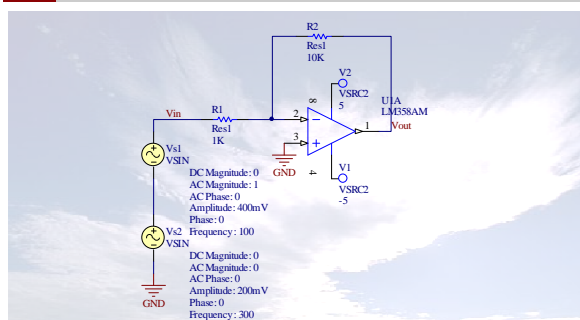
## Zniekształcenia nieliniowe



62



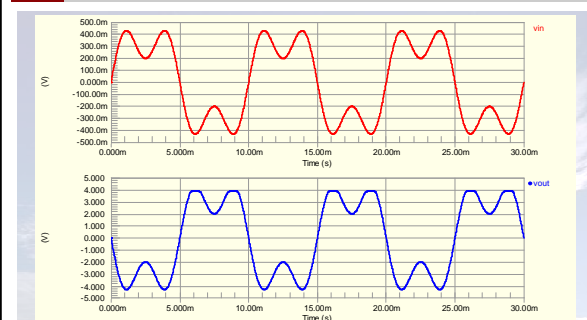
## Zniekształcenia nieliniowe



63



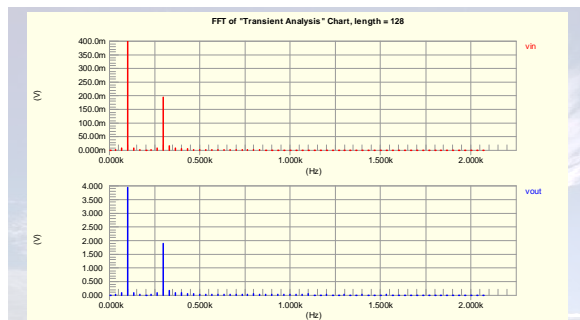
## Zniekształcenia nieliniowe



64



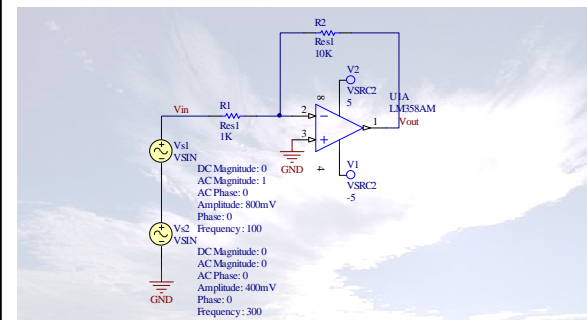
## Zniekształcenia nieliniowe



65



## Zniekształcenia nieliniowe

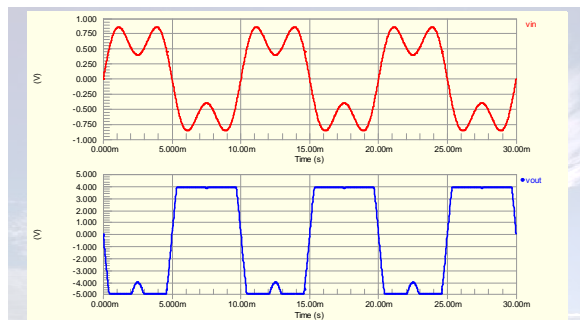


66





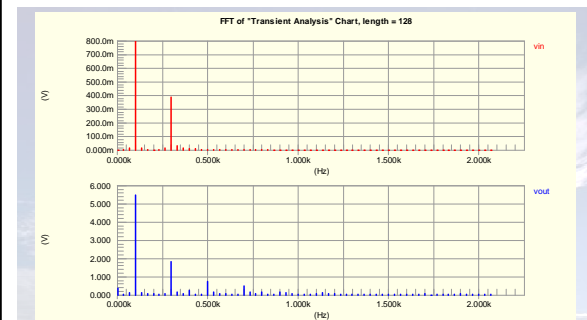
## Zniekształcenia nieliniowe



67



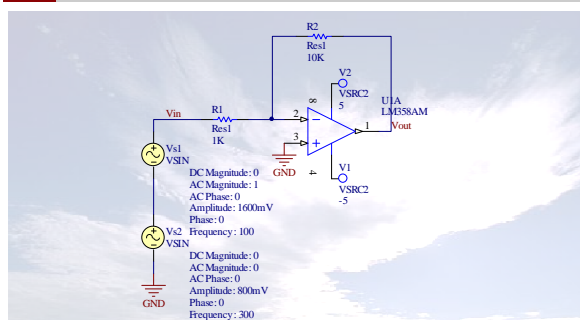
## Zniekształcenia nieliniowe



68



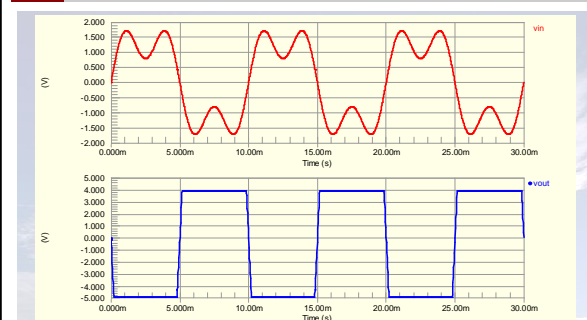
## Zniekształcenia nieliniowe



69



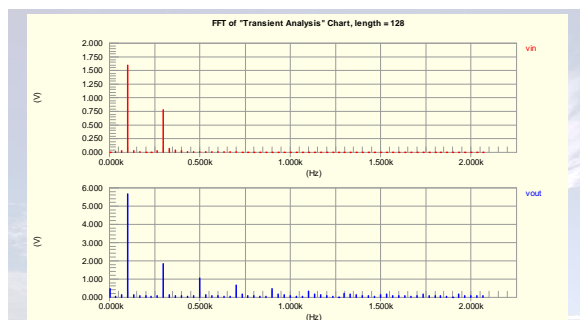
## Zniekształcenia nieliniowe



70



## Zniekształcenia nieliniowe



71



## Zniekształcenia nieliniowe

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

72





## 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.

73



## 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.

74



## Notacja (zapis) decybelowa

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

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

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

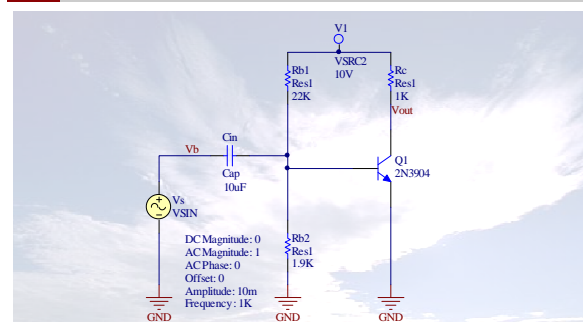
$A_v = 100$	$\rightarrow 40 \text{ dB},$	$G = 100$	$\rightarrow 20 \text{ dB},$
$A_v = 10$	$\rightarrow 20 \text{ dB},$	$G = 10$	$\rightarrow 10 \text{ dB},$
$A_v = 1$	$\rightarrow 0 \text{ dB},$	$G = 1$	$\rightarrow 0 \text{ dB},$
$A_v = 0.1$	$\rightarrow -20 \text{ dB}.$	$G = 0.1$	$\rightarrow -10 \text{ dB}.$

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

75



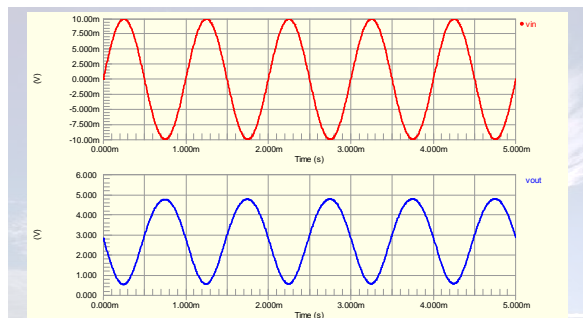
## Wzmacniacz mocy przykładowa realizacja



76



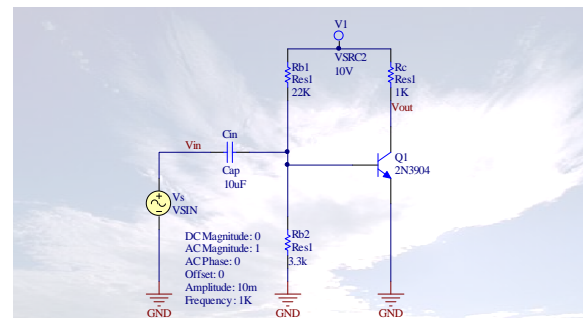
## Wzmacniacz mocy przykładowa realizacja



77

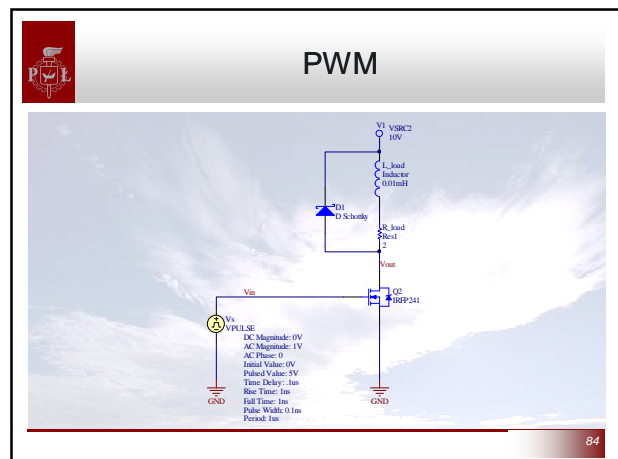
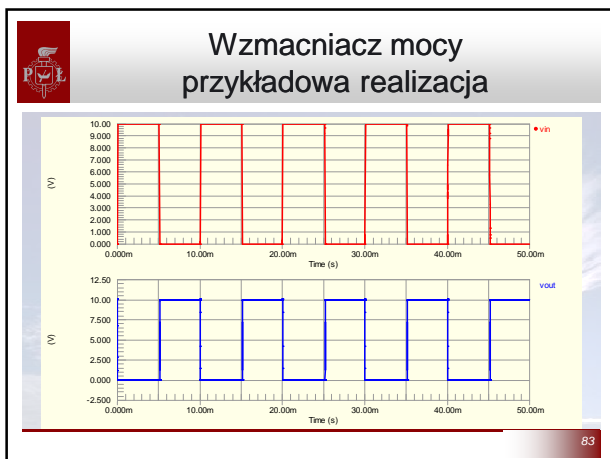
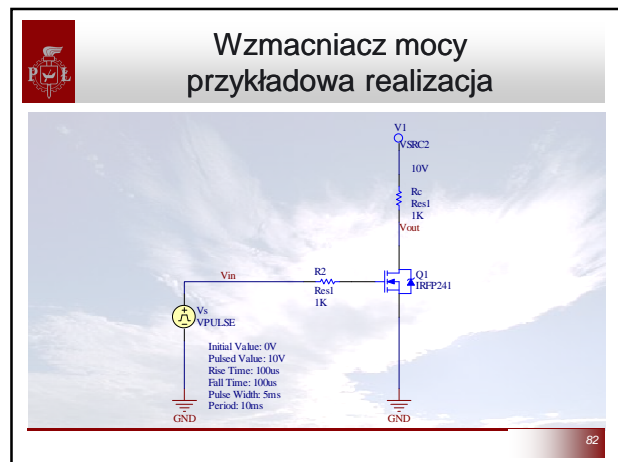
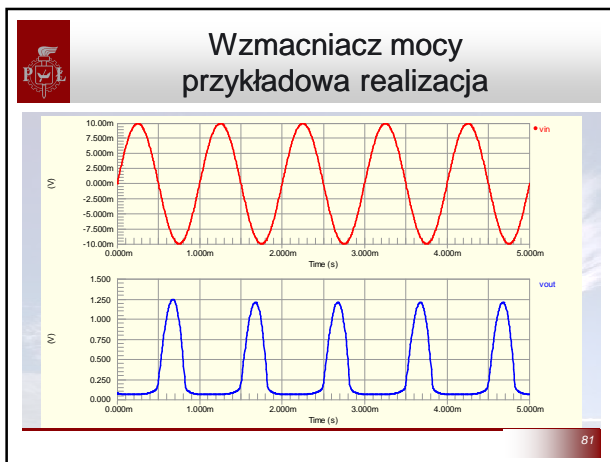
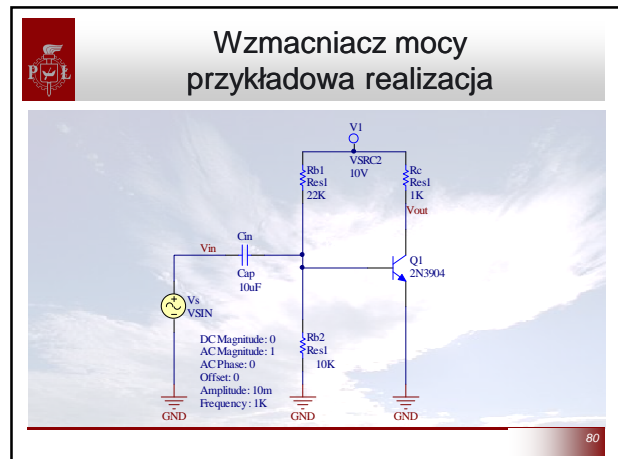
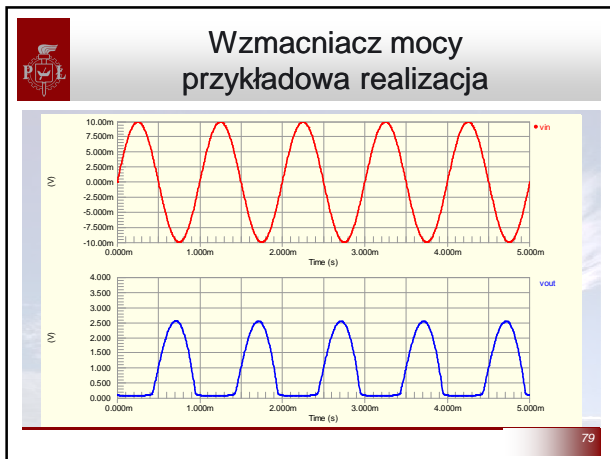


## Wzmacniacz mocy przykładowa realizacja

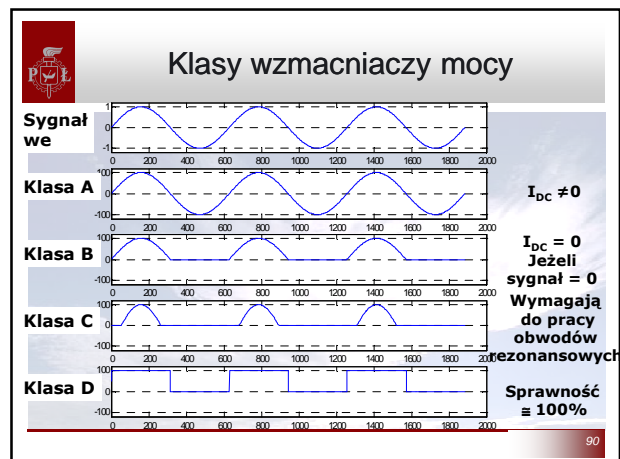
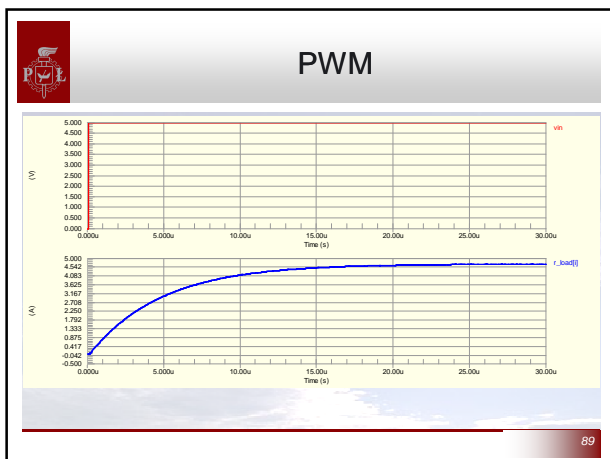
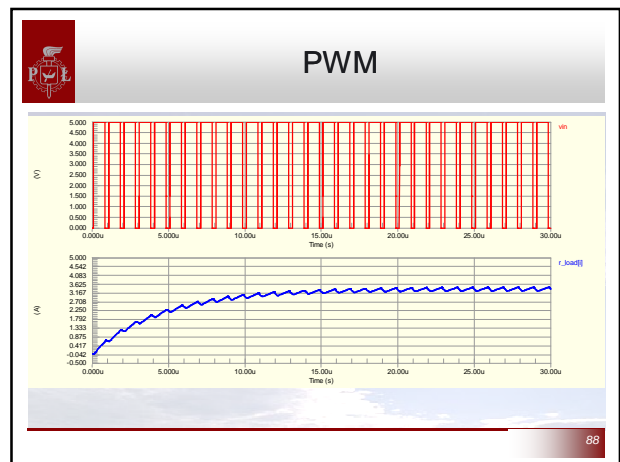
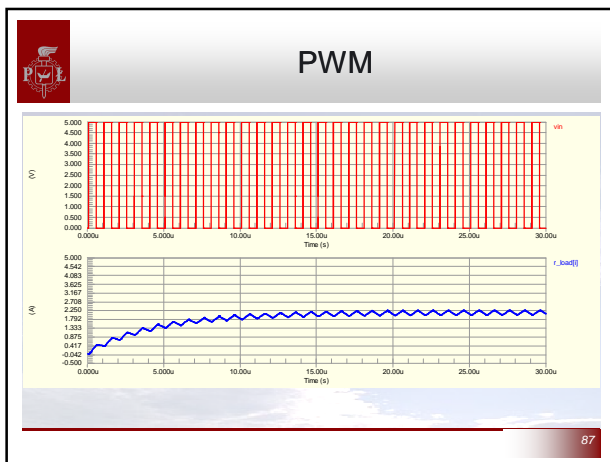
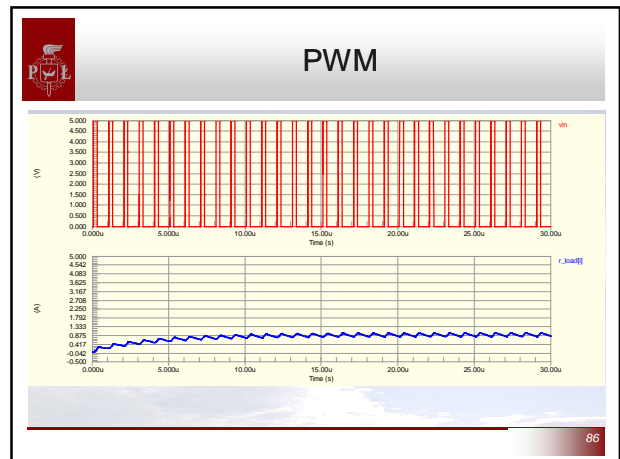
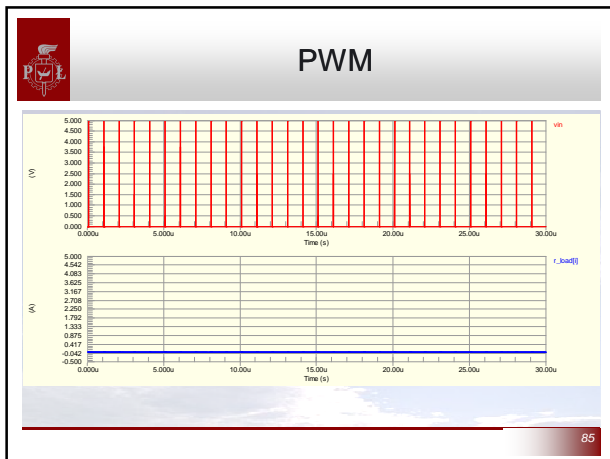


78





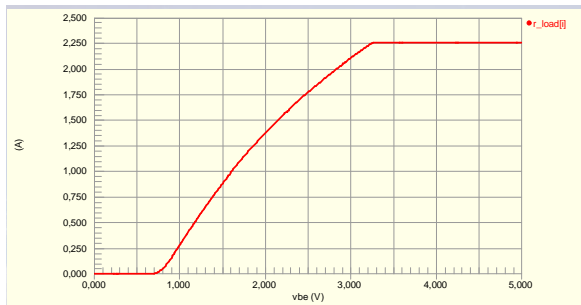








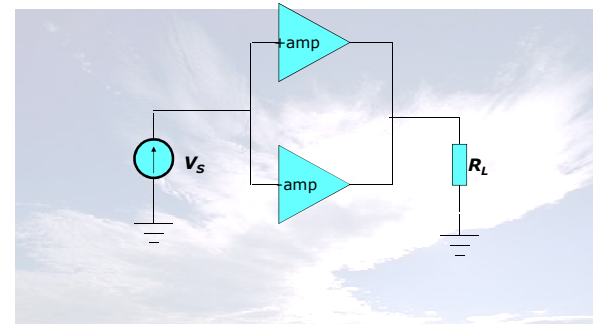
## Charakterystyka przejściowa



91



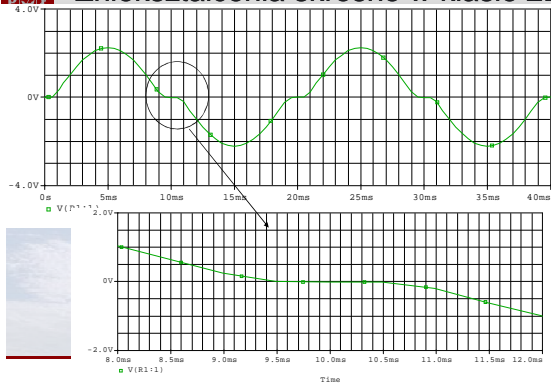
## Klasa 2B



92



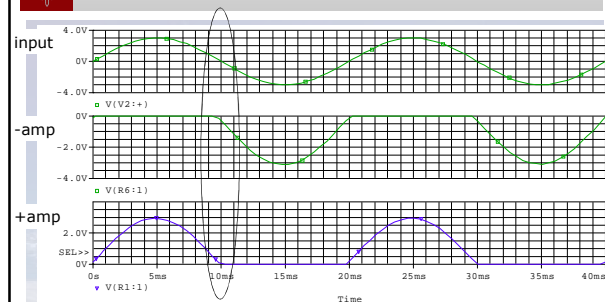
## Zniekształcenia skrośne w klasie 2B



93



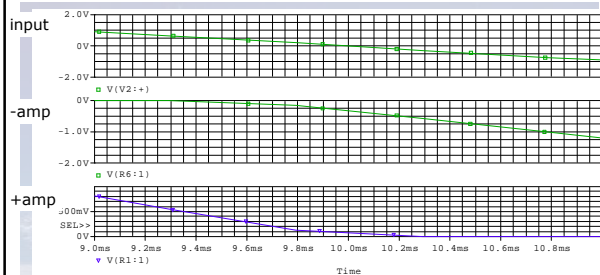
## Zniekształcenia skrośne w klasie 2B



94



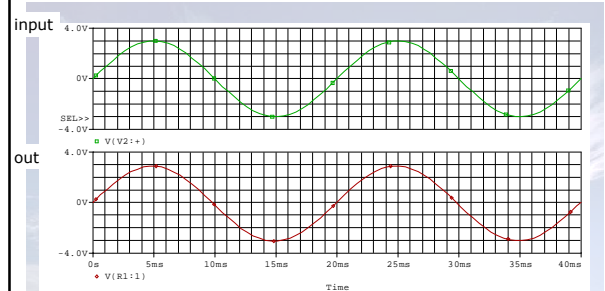
## Klasa AB



95



## Klasa 2AB

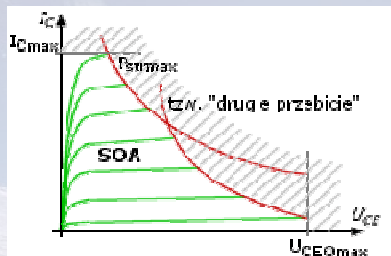


96





## Bezpieczny obszar pracy SOA (ang. *Safe operation area*)



97



## 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>

98



## 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

99



## 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

100



## 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

101



## 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:

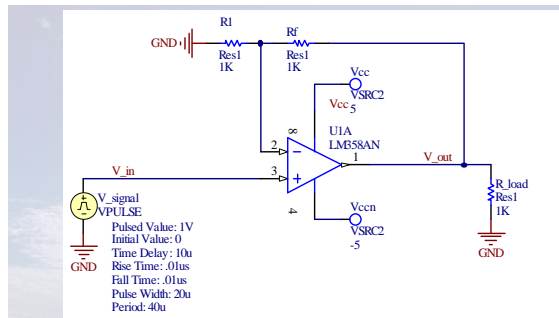
- odbiorniki telewizyjne (30Hz - 6MHz)
- oscyloskopy (DC do kilku GHz)
- urządzenia radarowe (do kilkunastu GHz)
- łączność światłowodowa (100kHz – 25GHz)

102





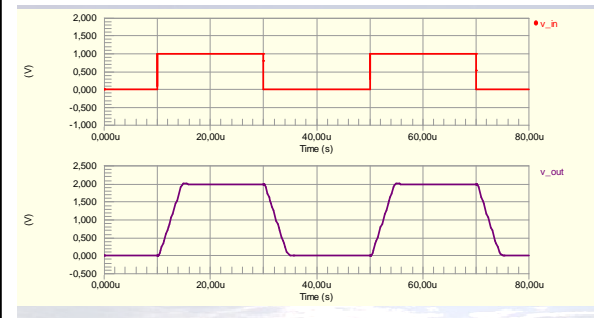
## Odpowiedź impulsowa wzmacniaczy



103



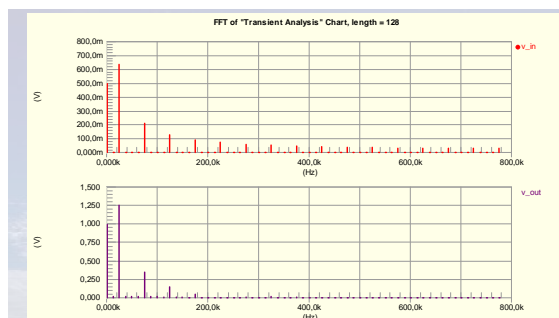
## Odpowiedź impulsowa wzmacniaczy



104



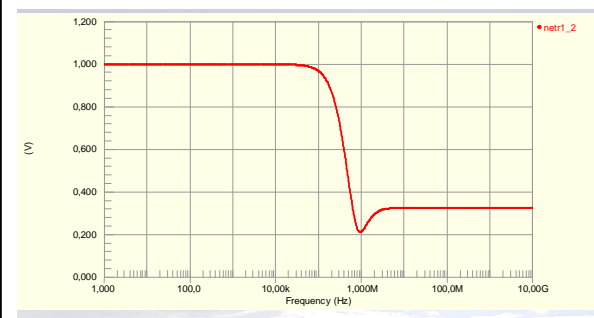
## Odpowiedź impulsowa wzmacniaczy



105



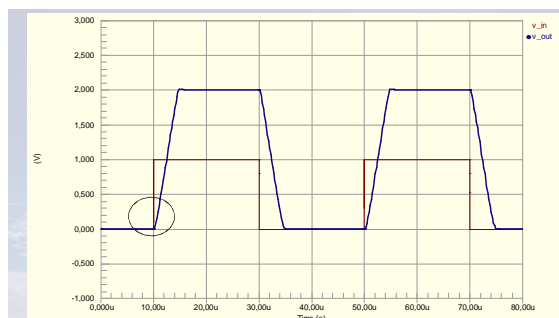
## Odpowiedź impulsowa wzmacniaczy



106



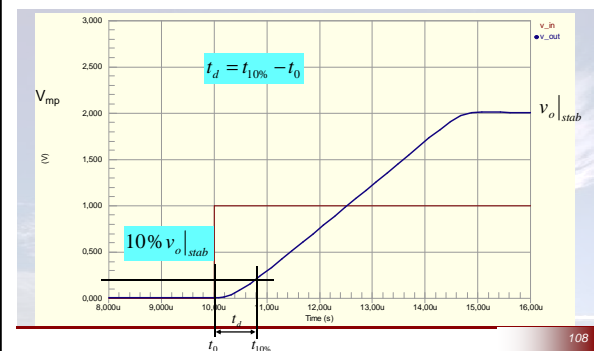
## Odpowiedź impulsowa opóźnienie sygnału



107

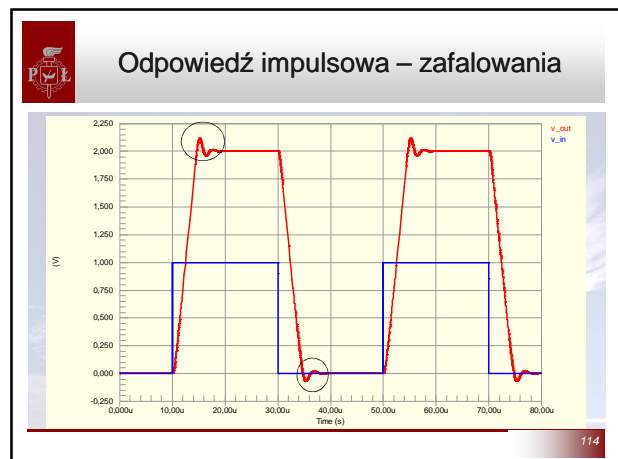
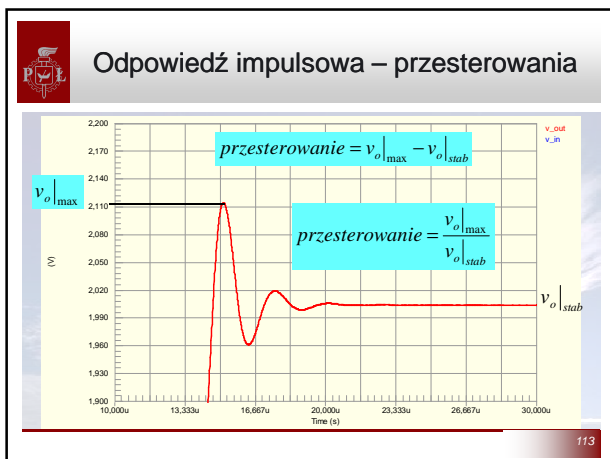
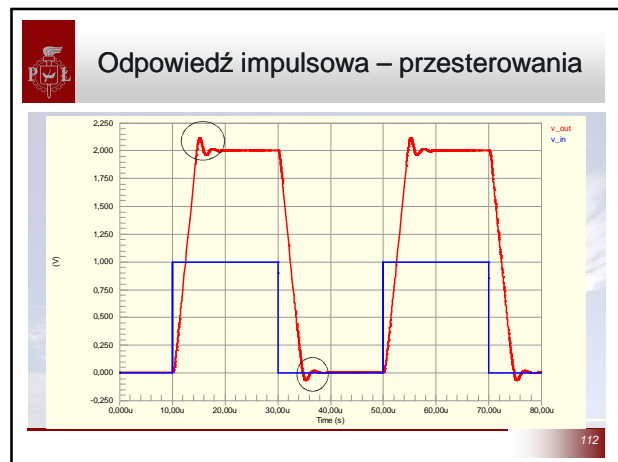
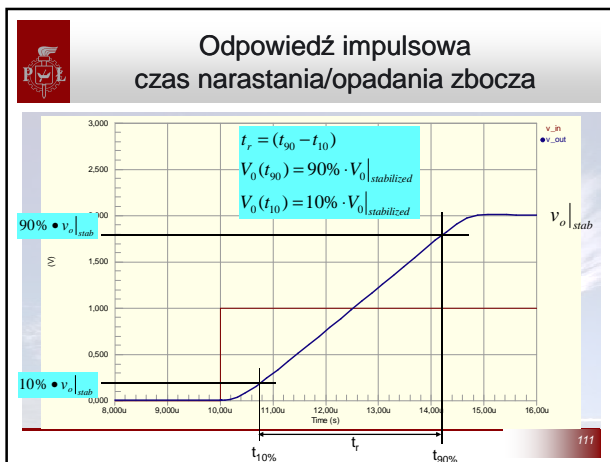
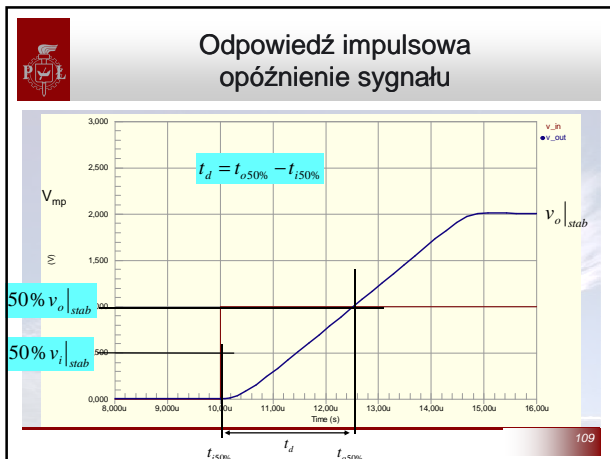


## Odpowiedź impulsowa opóźnienie sygnału



108

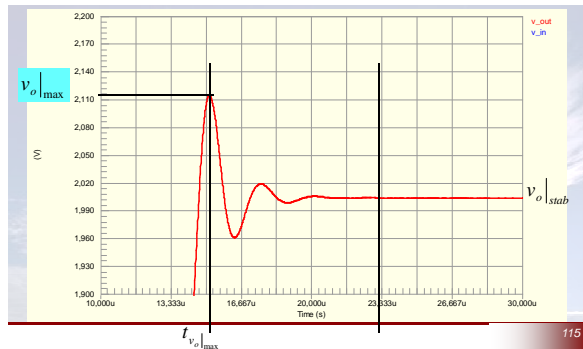








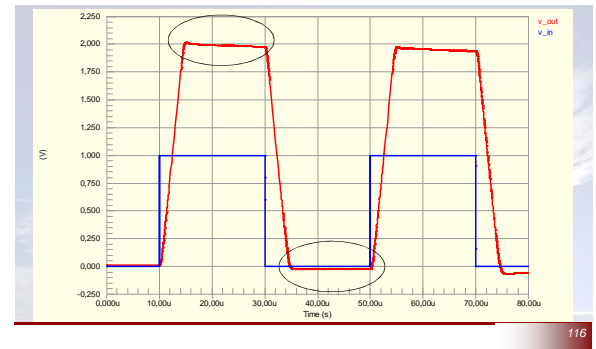
### Odpowiedź impulsowa – zafalowania



115



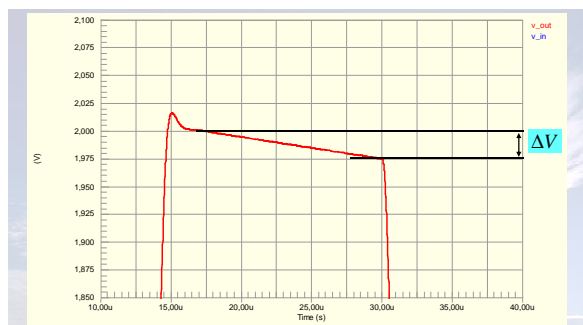
### Odpowiedź impulsowa – opadanie sygnału



116



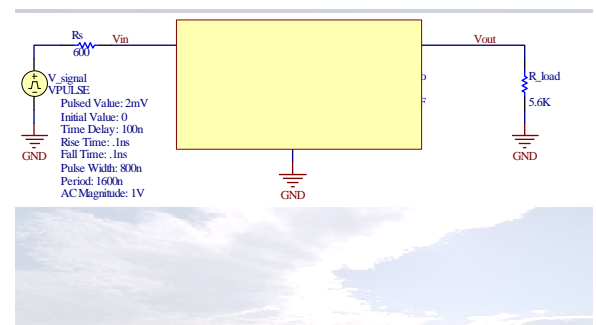
### Odpowiedź impulsowa – opadanie sygnału



117



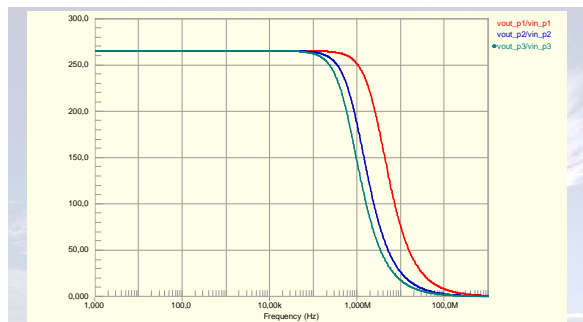
### Odpowiedź impulsowa a charakterystyka częstotliwościowa



118



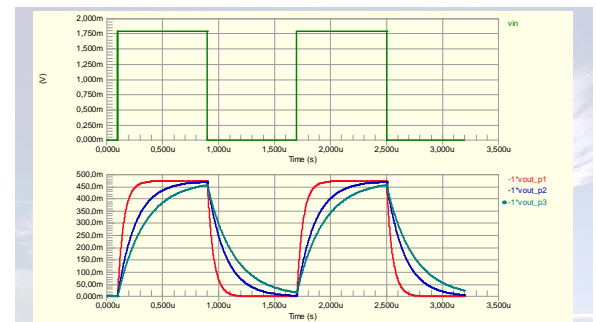
### Odpowiedź impulsowa a charakterystyka częstotliwościowa



119

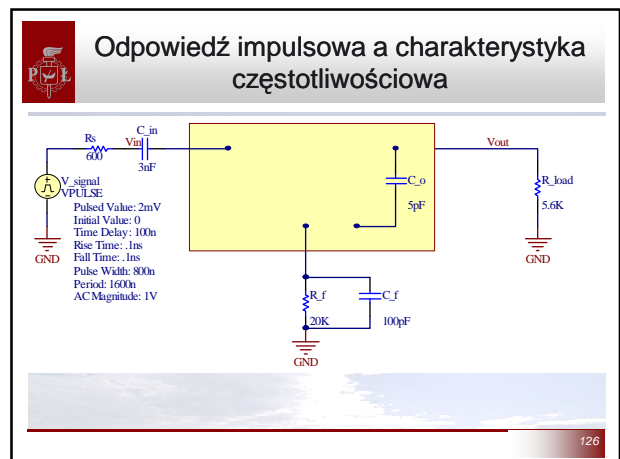
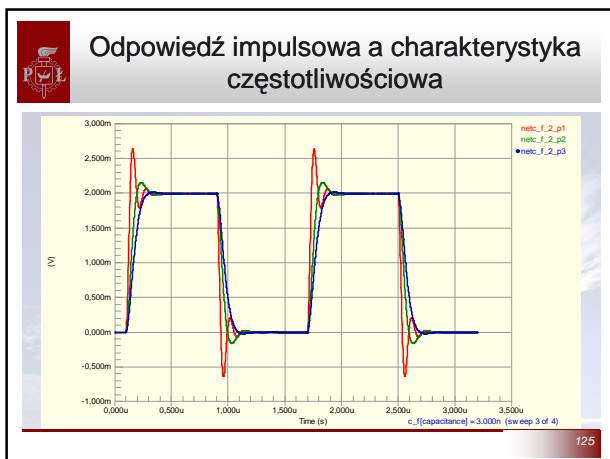
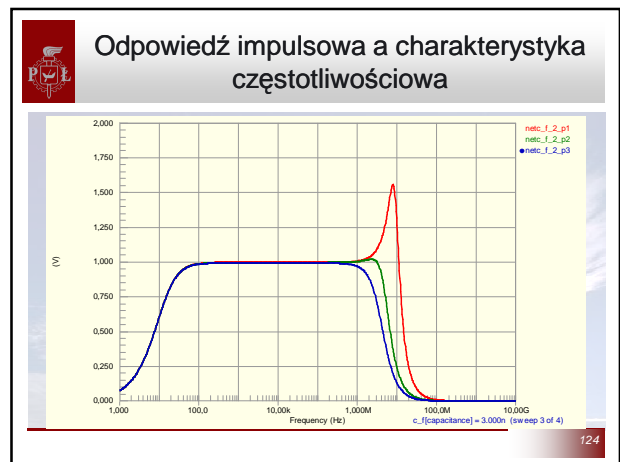
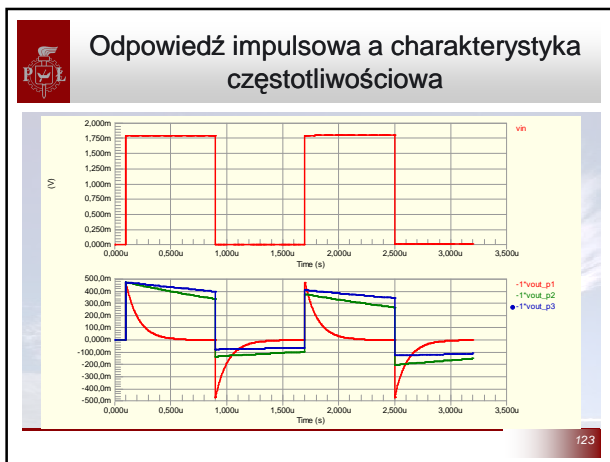
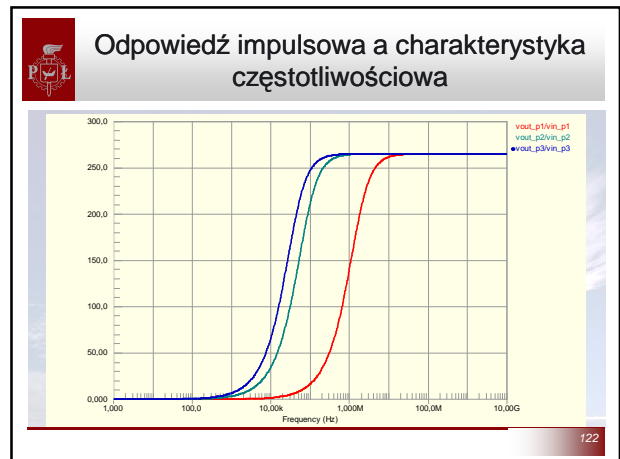
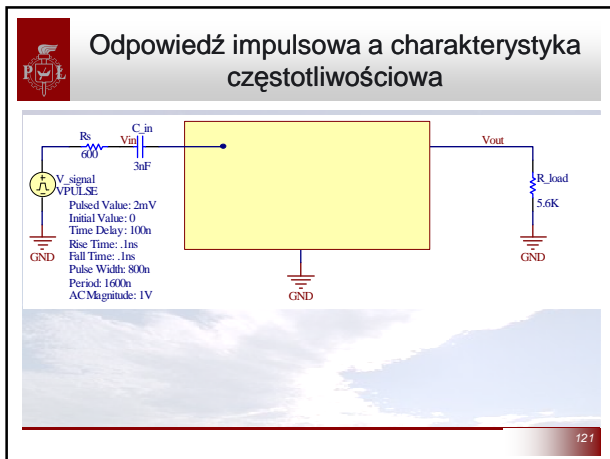


### Odpowiedź impulsowa a charakterystyka częstotliwościowa



120









## Odpowiedź impulsowa podsumowanie

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

127



## Związki między charakterystykami częstotliwościowymi a przebiegami czasowymi

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

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.

128



## Związki między charakterystykami częstotliwościowymi a przebiegami czasowymi

Jednobiegunowa transmitancja dolnoprzepustowa

$$k(s) = \frac{k_0}{1 + \frac{s}{\omega_h}}$$

$$h(t) = 1k_0(1 - e^{-t\omega_h})$$

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

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

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

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

129



## Związki między charakterystykami częstotliwościowymi a przebiegami czasowymi

Jednobiegunowa transmitancja górnoprzepustowa

$$k(s) = \frac{k_0}{1 + \frac{\omega_l}{s}}$$

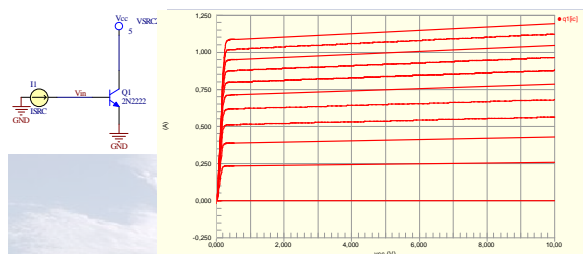
$$h(t) = 1k_0 e^{-t\omega_l}$$

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

130



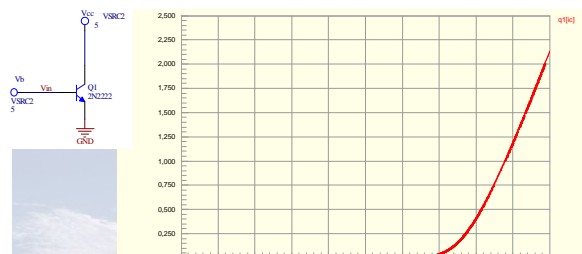
## Wzmacniacz WE



131

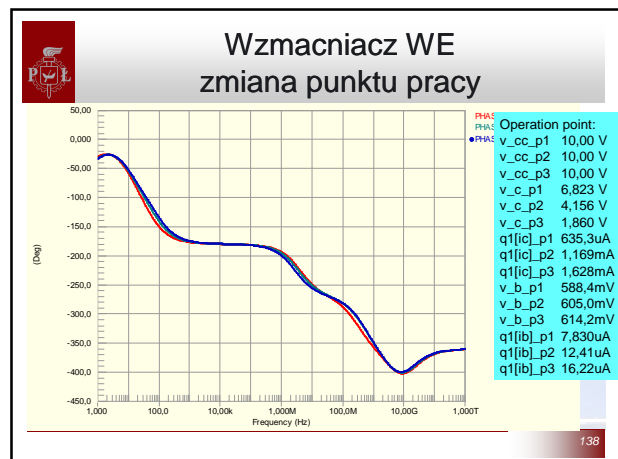
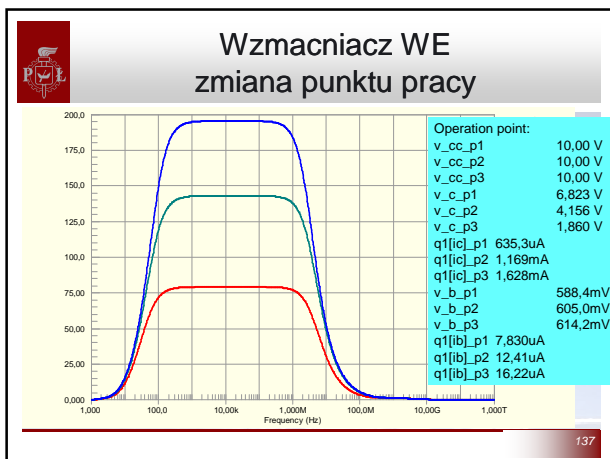
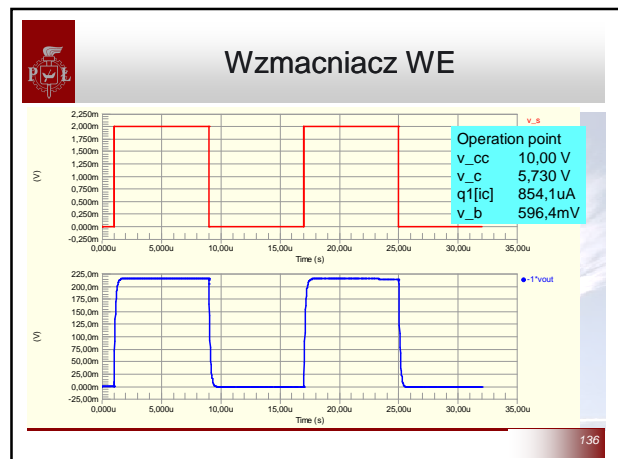
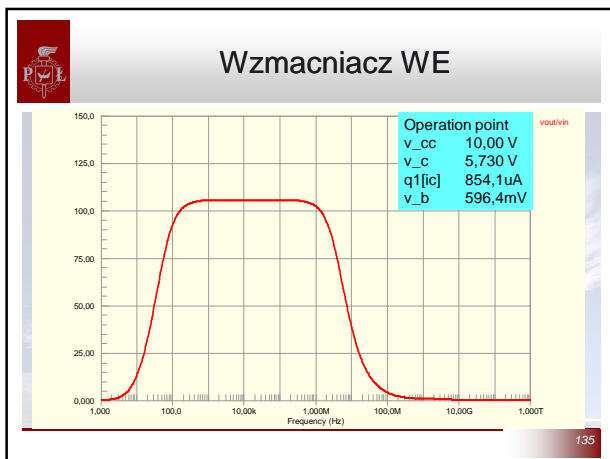
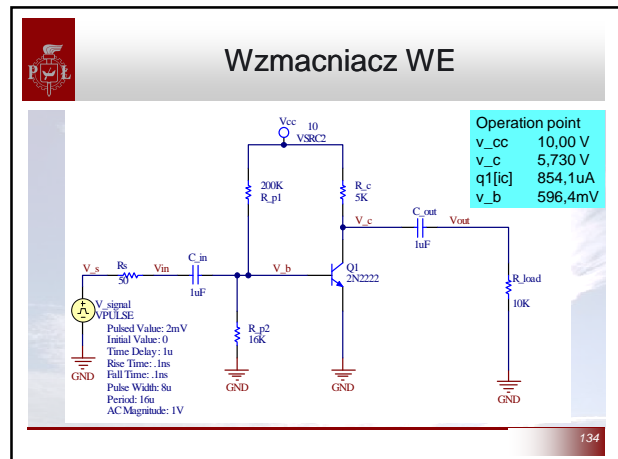
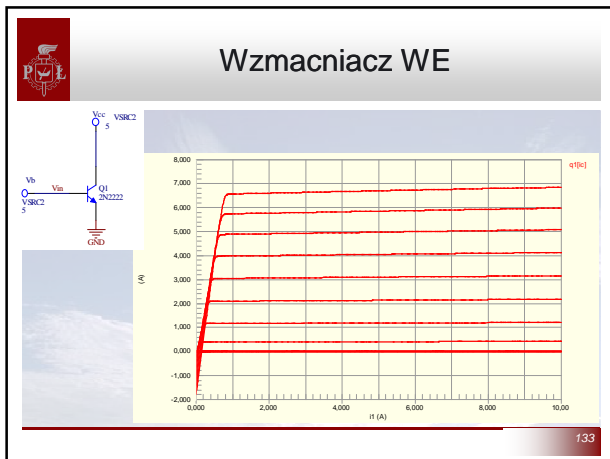


## Wzmacniacz WE

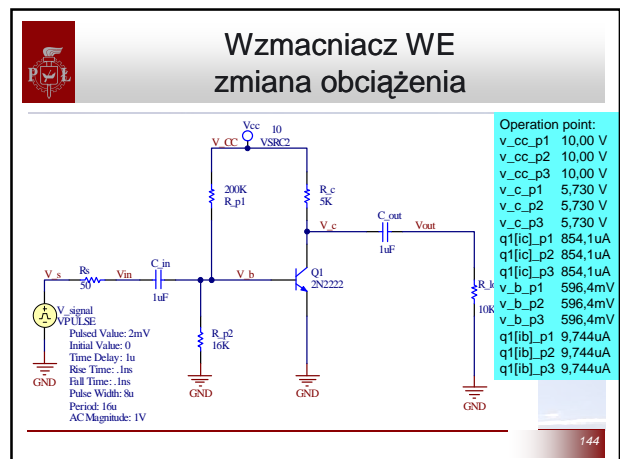
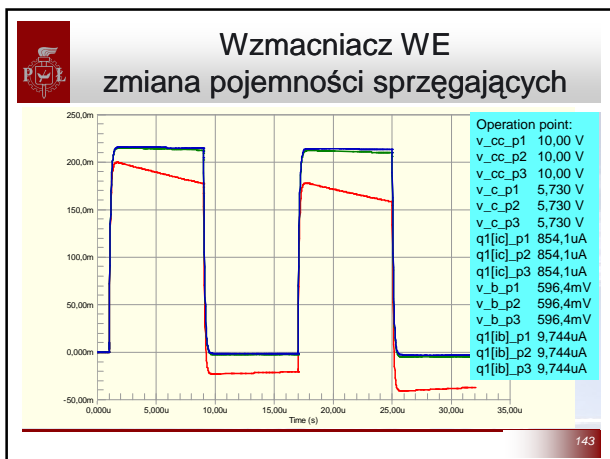
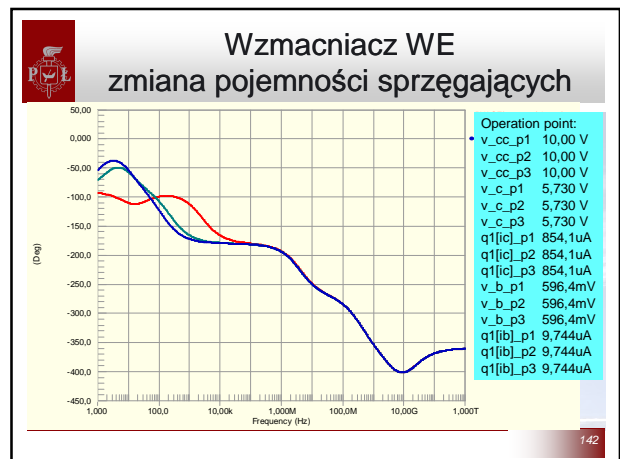
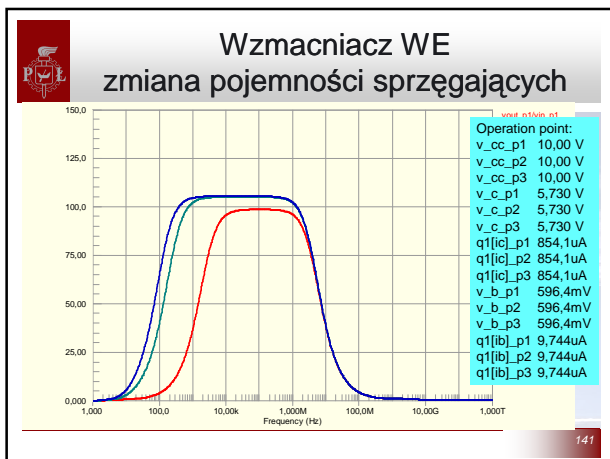
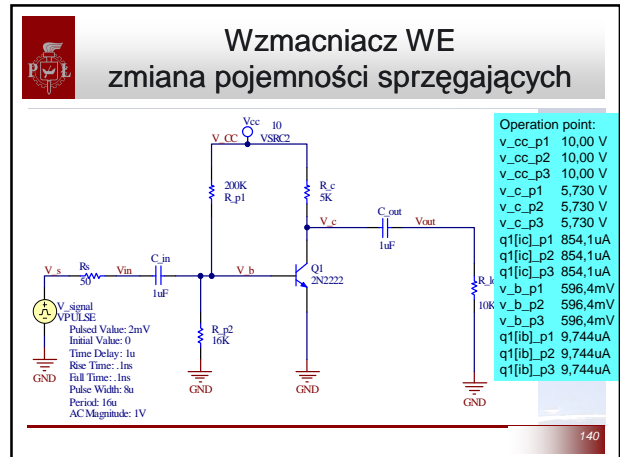
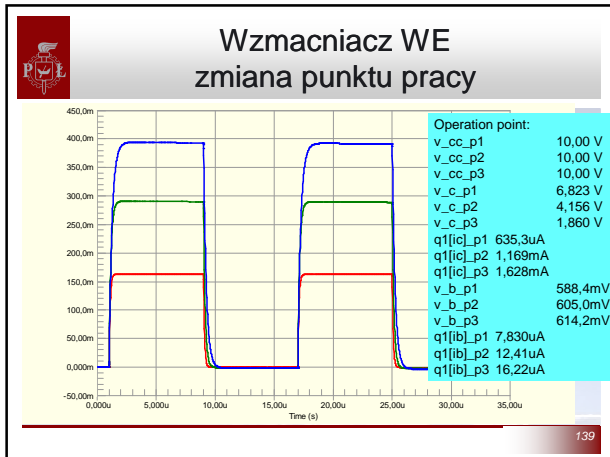


132

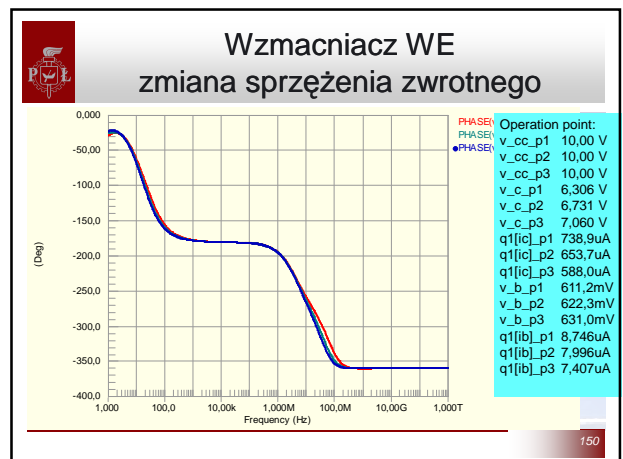
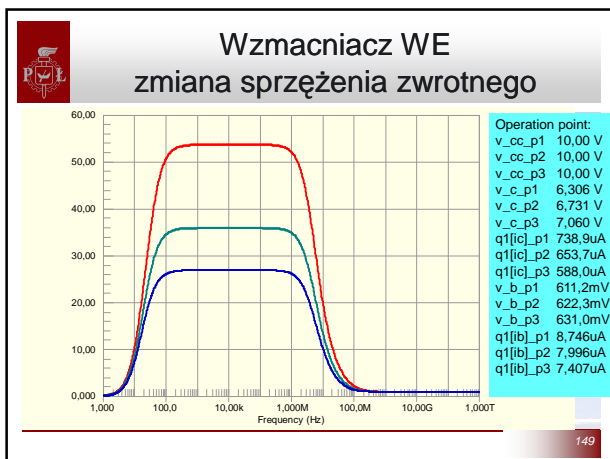
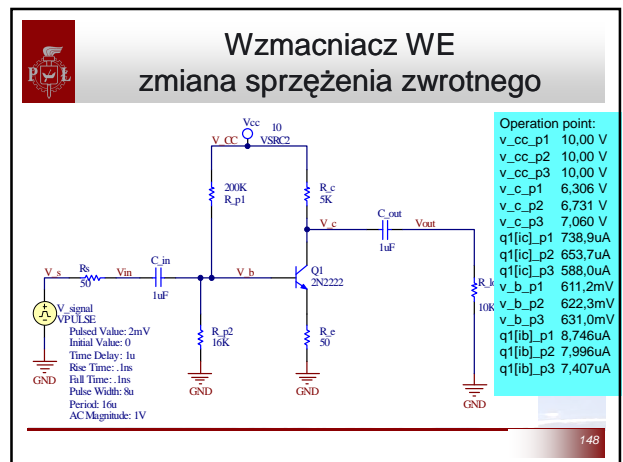
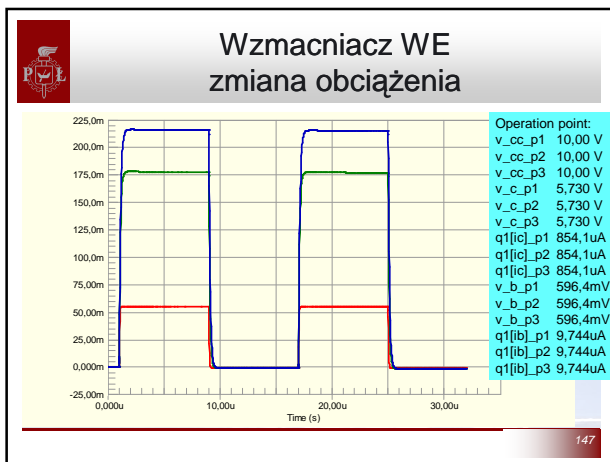
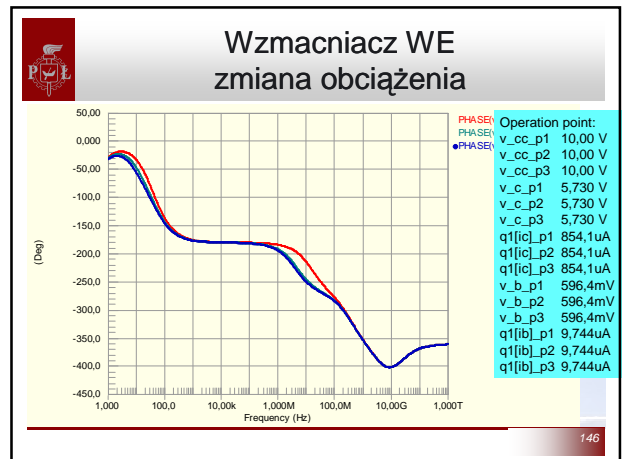
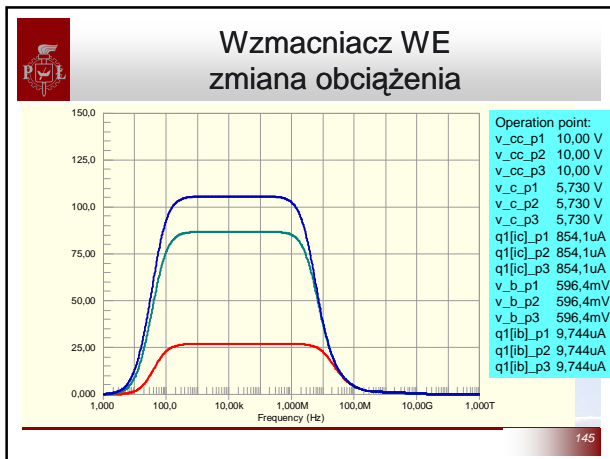




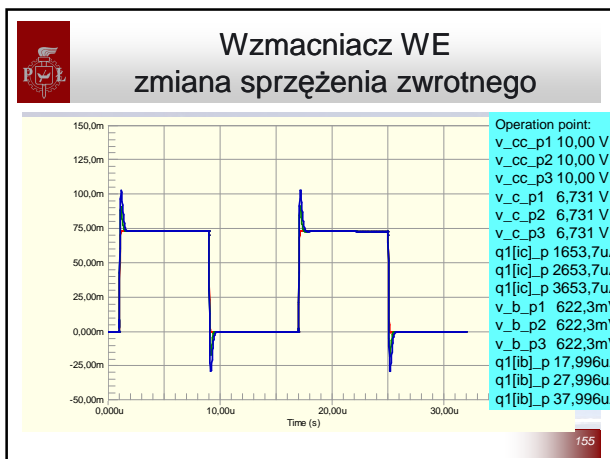
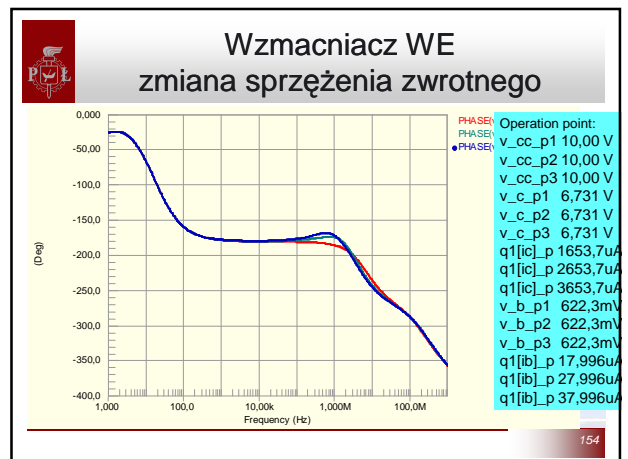
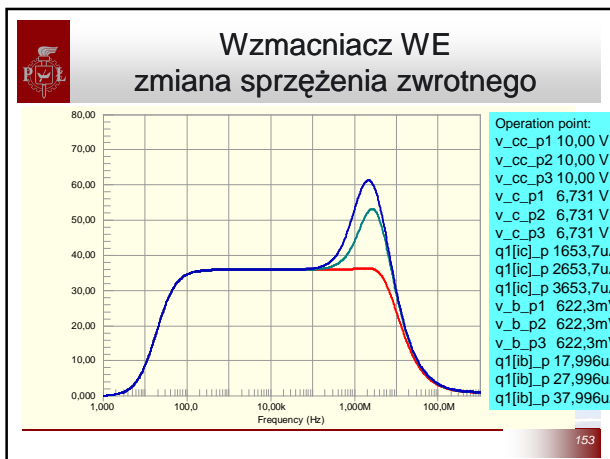
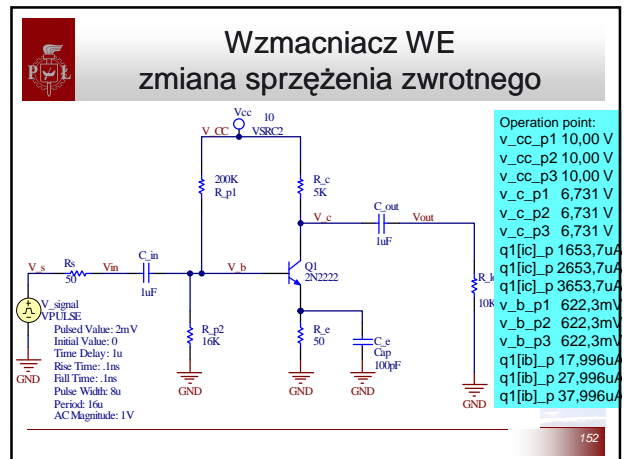
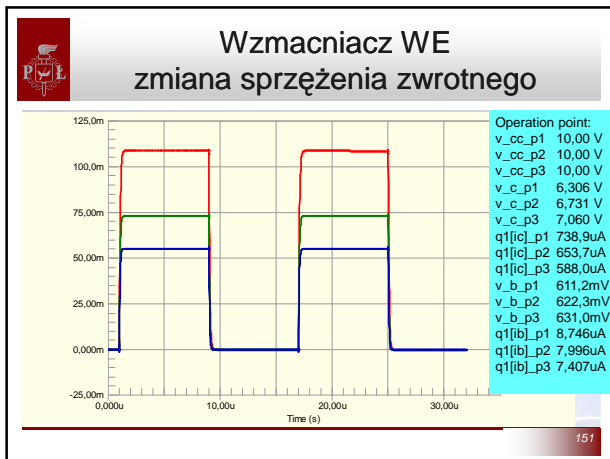












### Układy scalone wzmacniaczy pasmowych

- 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

156





## 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

157



## Analogowe filtry aktywne czasu ciągłego i dyskretnego

### Literatura:

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

158



## 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

159



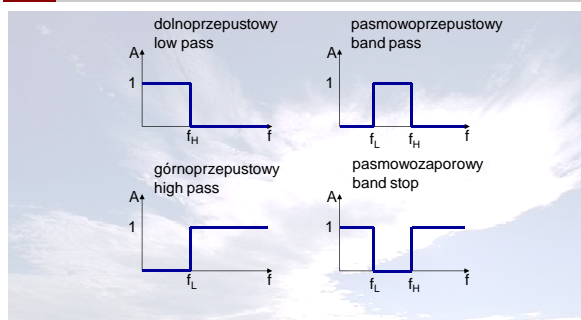
## Filtr

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

160



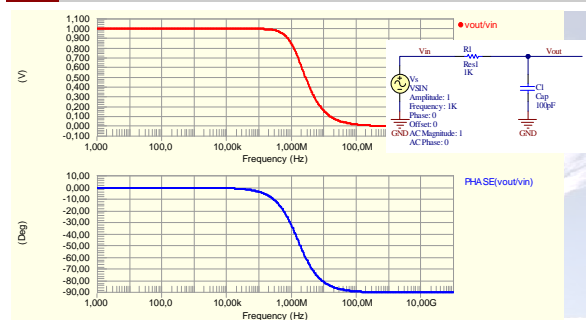
## Filtry idealne



161

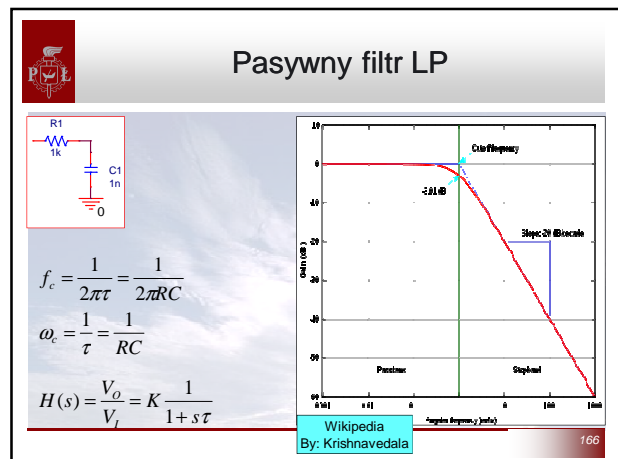
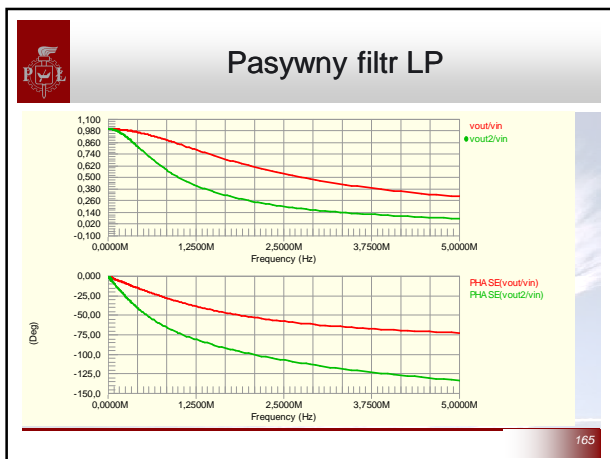
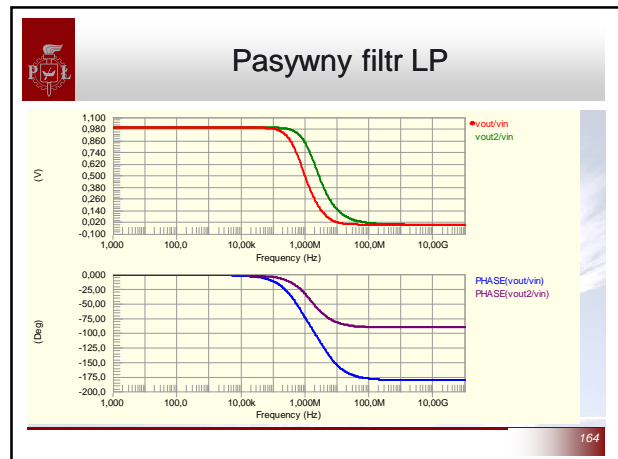
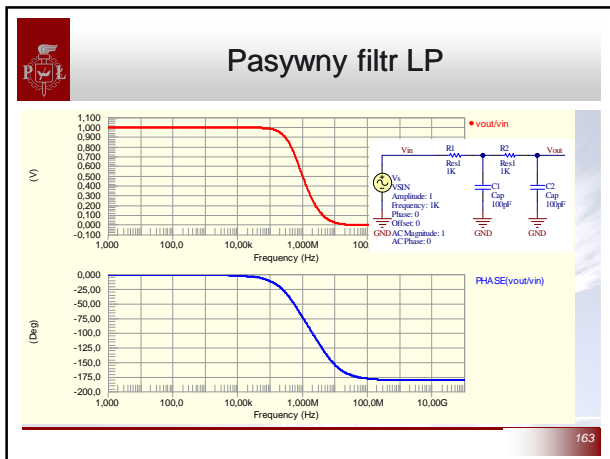


## Pasywny filtr LP



162





### Filtr LP

Zastosowania:

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

167

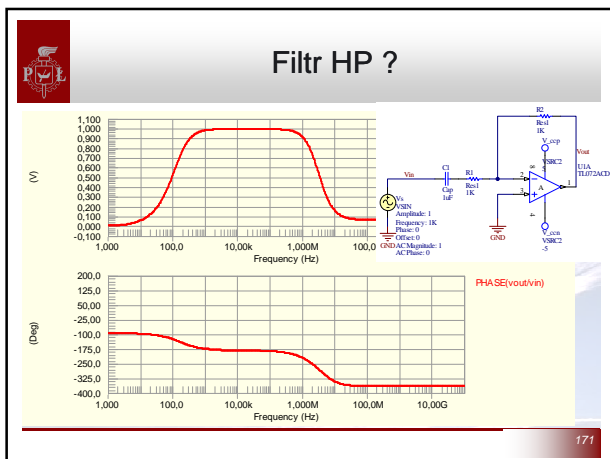
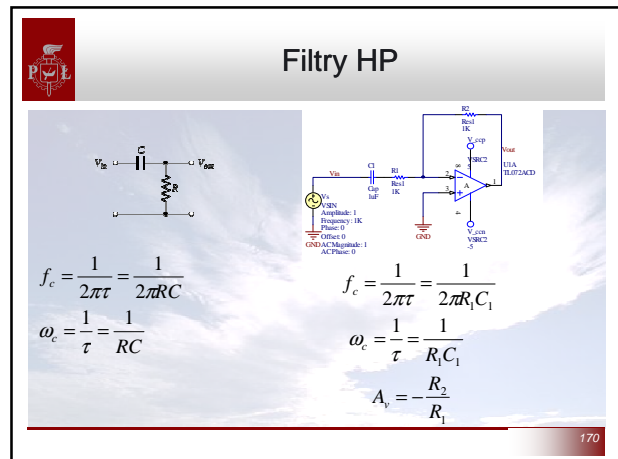
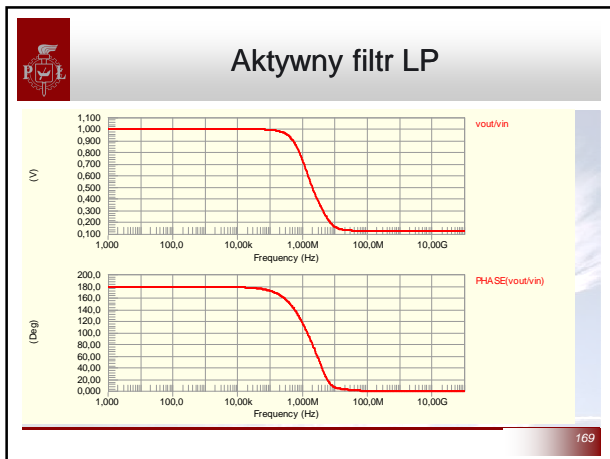
### Aktywny filtr LP

Frequency (Hz)

PHASE(vout/vin)

168





- ### Pozostałe typy filtrów
- pasmowoprzepustowe
  - pasmowozaporowe
  - (notch filter)
  - grzebieniowy (comb filter)
  - pełnoprzepustowe (all pass filter)
- 172

- ### 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)
- 173

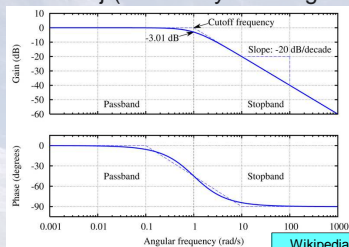
- ### Filtr aktywne wyższych rzędów
- Klasyfikacja ze względu na kształt charakterystyki częstotliwościowej:
- Butterworta (Butterworth filter)
  - Czebyszewa typ 1 (Chebyshev filter type I)
  - Czebyszewa typ 2 (Chebyshev filter type II)
  - Bessela (Bessel filter)
  - Eliptyczny (Elliptic filter)
  - Optymalny typu L (Optimum "L" filter)
  - Gausowski (Gaussian filter)
  - (Hourglass filter)
  - (Raised-cosine filter)
- 174





## Filtr Butterworta (Butterworth filter)

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



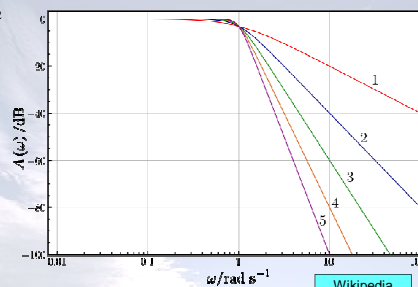
Wikipedia  
by Omegatron

175



## Butterworth filter

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



Wikipedia  
by Inductiveload

176



## Filtr Butterworta (Butterworth filter)

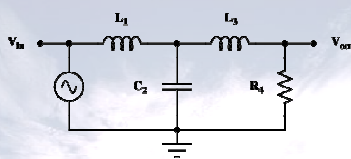
$$C_2 = 1F$$

$$R_4 = 1\Omega$$

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

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

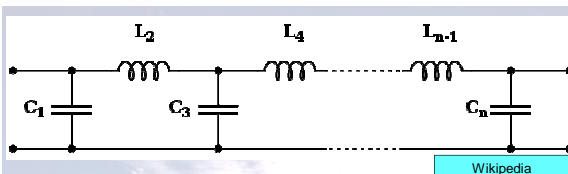
$$H(s) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + 2s + 2s^2 + s^3}$$



177



## Filtr Butterworta (Butterworth filter)

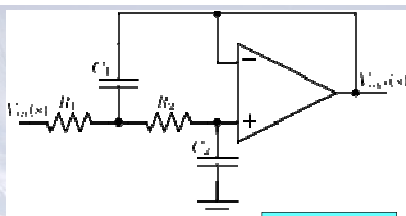


Wikipedia  
by Alessio Damato

178



## Filtr Butterworta (Butterworth filter)



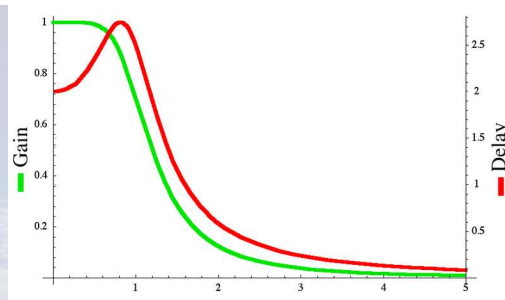
Wikipedia  
by Guillaume Simard

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

179



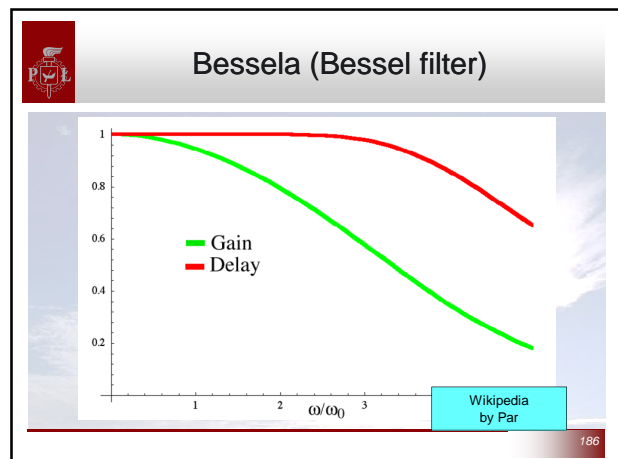
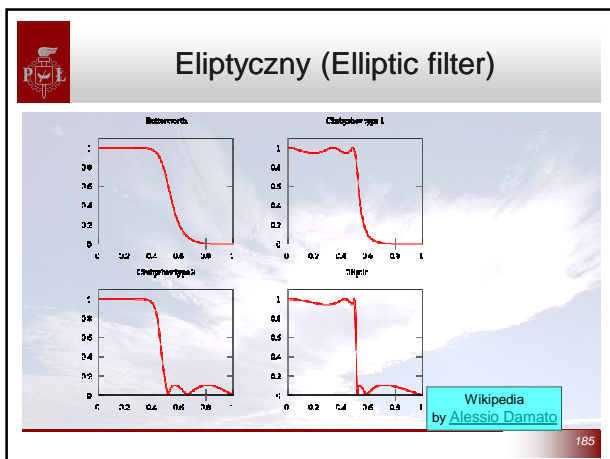
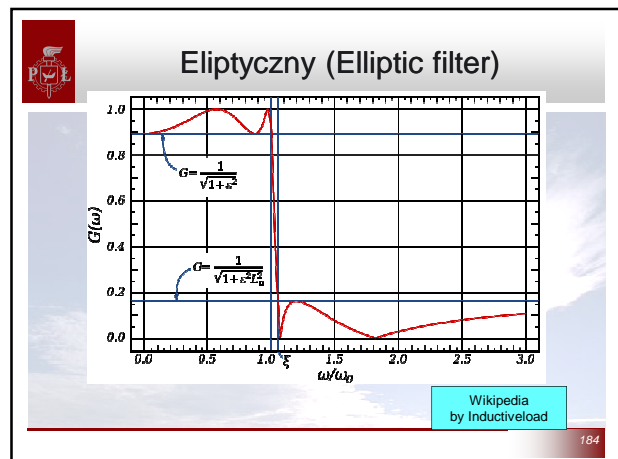
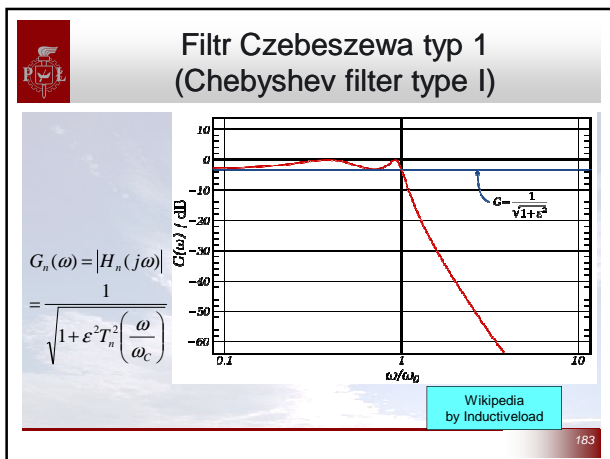
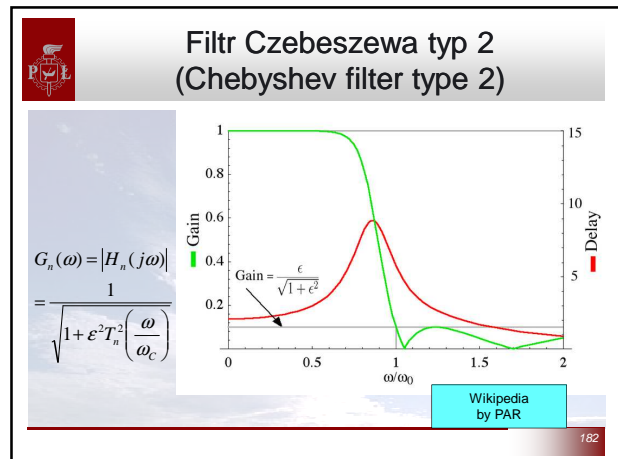
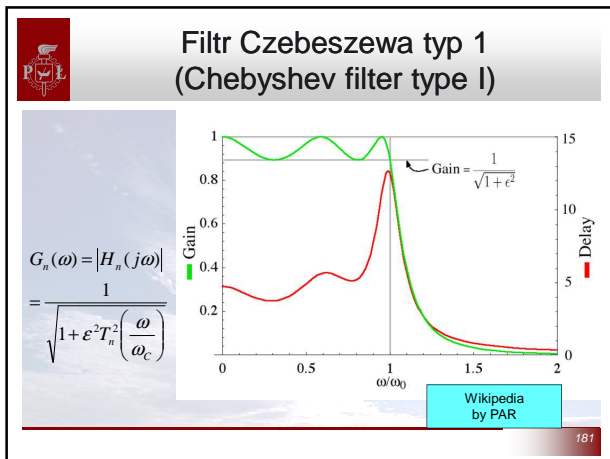
## Filtr Butterworta (Butterworth filter)



Wikipedia  
by PAR

180

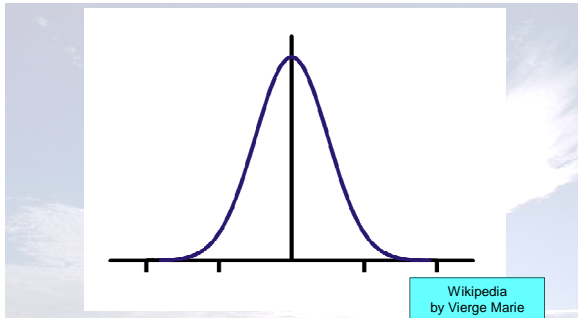








## Filtr Gaussa (Gaussian filter)



187



## 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

188



## Filtry czasu dyskretnego

- Układy z przełączanymi pojemnościami (Switched capacitor)
- Procesory sygnałowe DSP (Digital Signal Processor)

189



## 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

190



## Rezystor z przełączanymi pojemnościami

$$q = CV$$

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

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

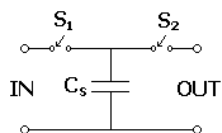
$$q = q_{Out} - q_{Out} = C_S (V_{Out} - V_{In})$$

$$I = qf$$

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

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

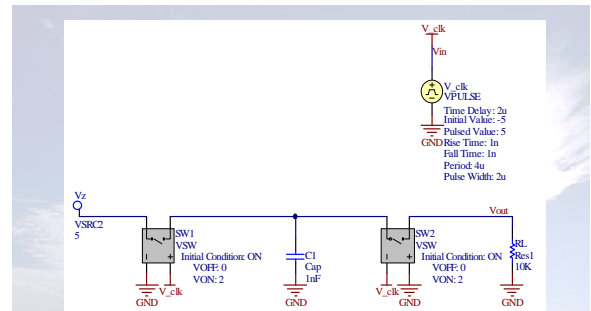
$$R = \frac{V}{I} = \frac{1}{C_S f}$$



191

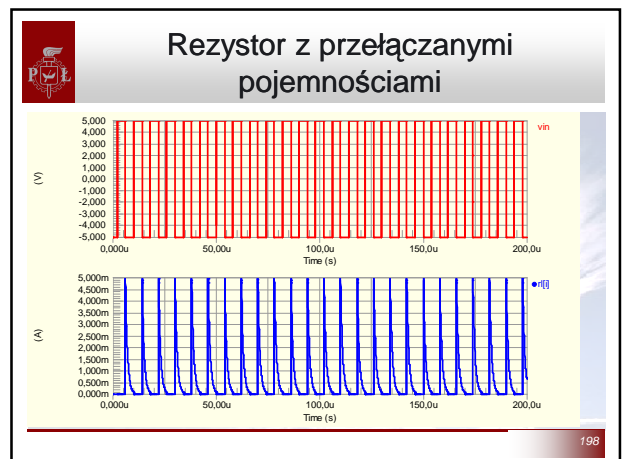
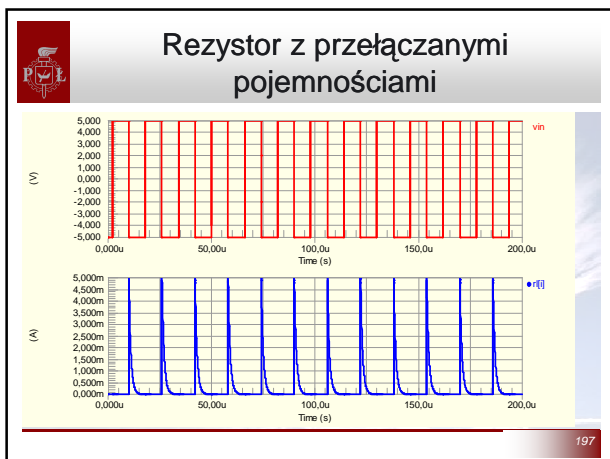
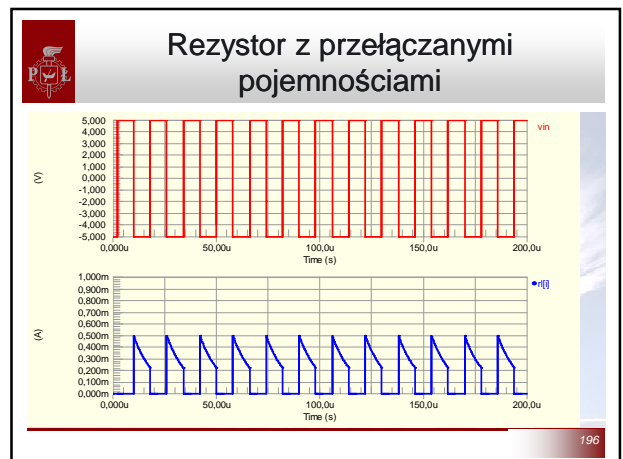
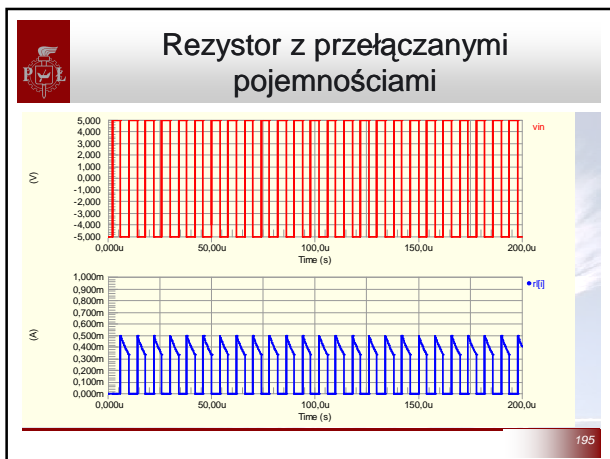
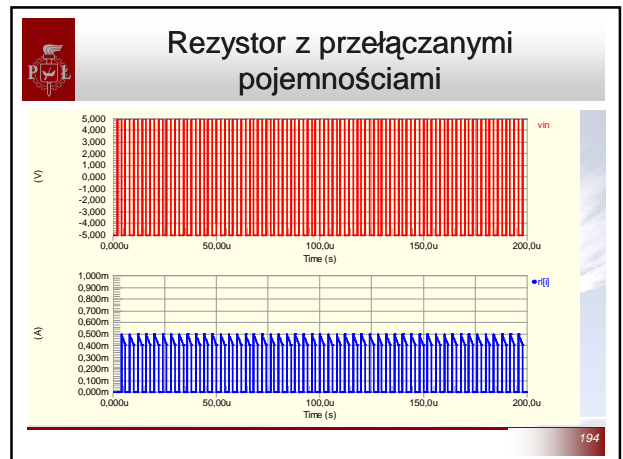
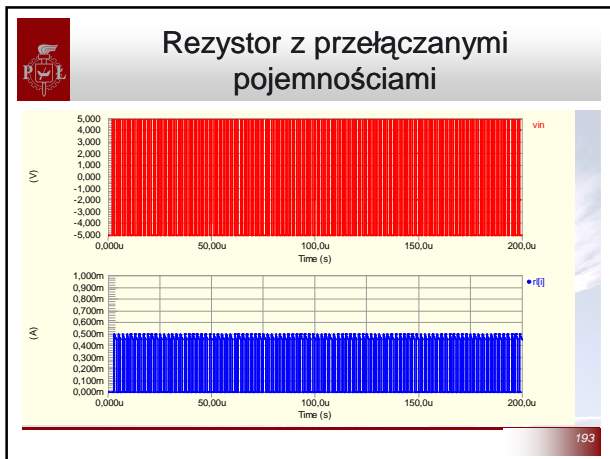


## Rezystor z przełączanymi pojemnościami

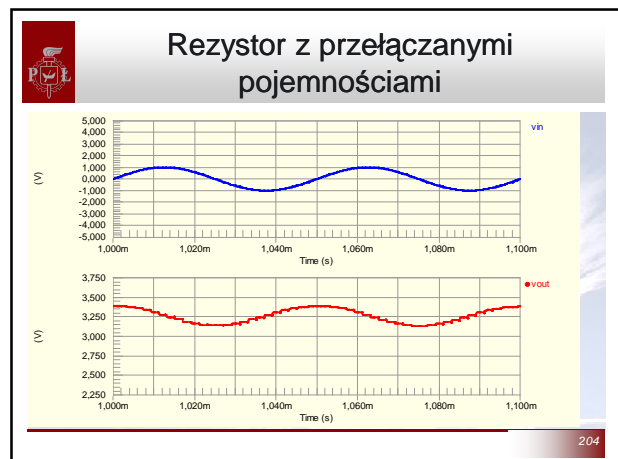
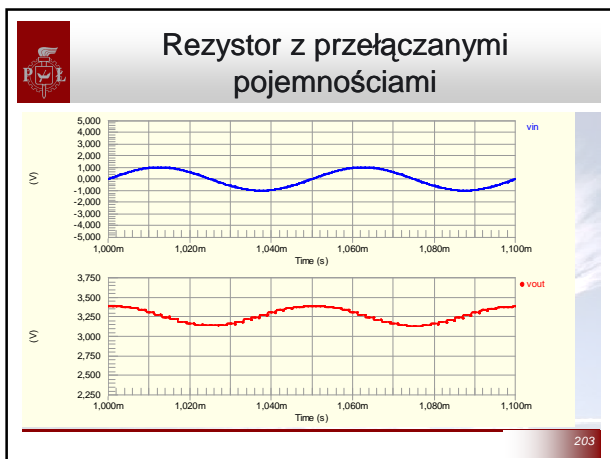
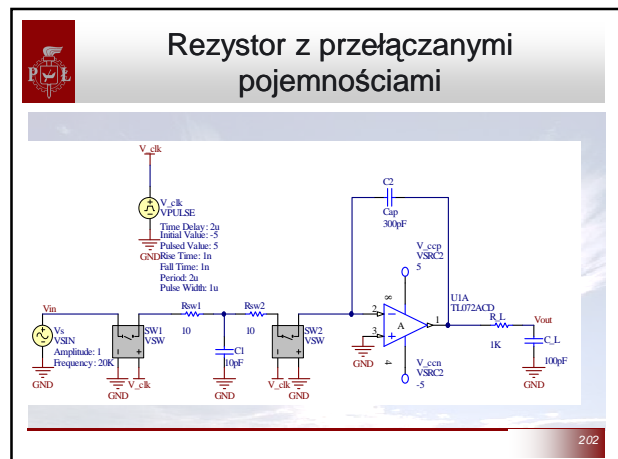
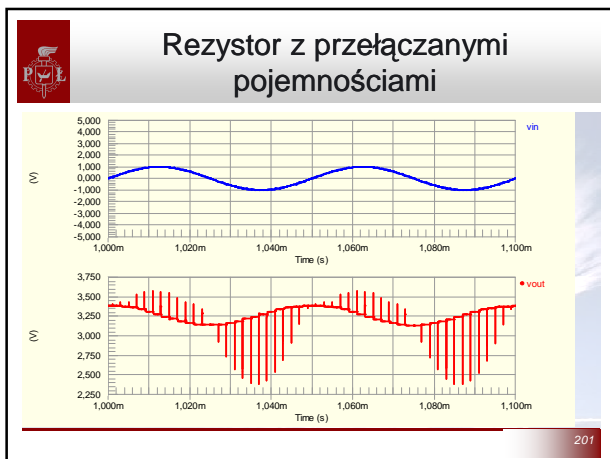
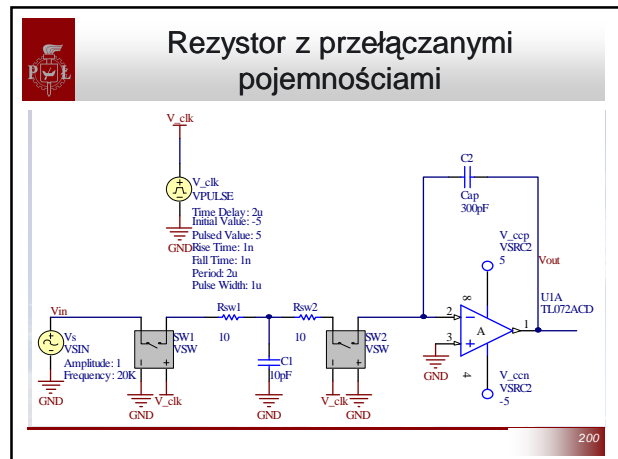
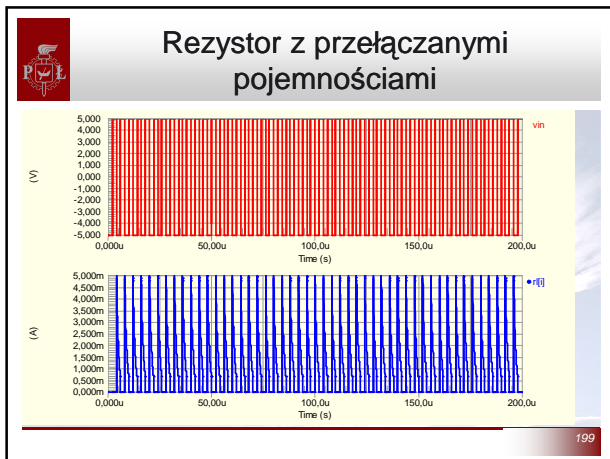


192













## Układy scalone filtrów analogowych

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

205



## 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

206



## Analogowe układy mnożące

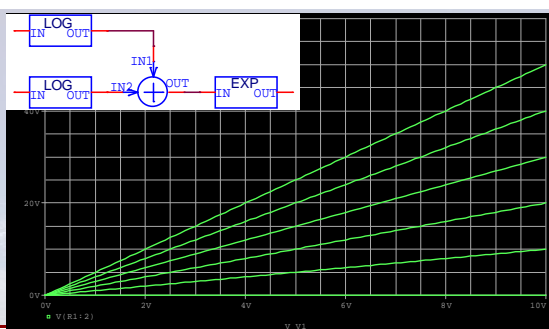
### Literatura:

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

207



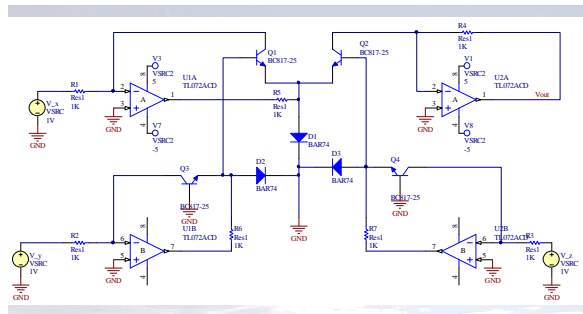
## Analogowe układ mnożący



208



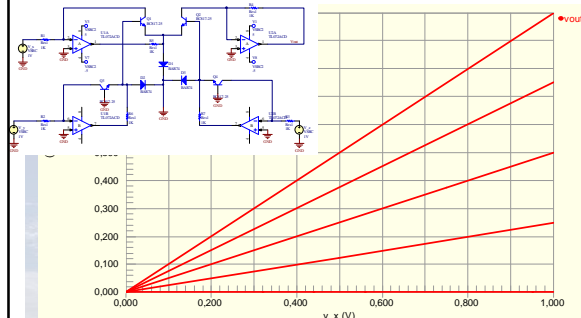
## Analogowe układ mnożący



209

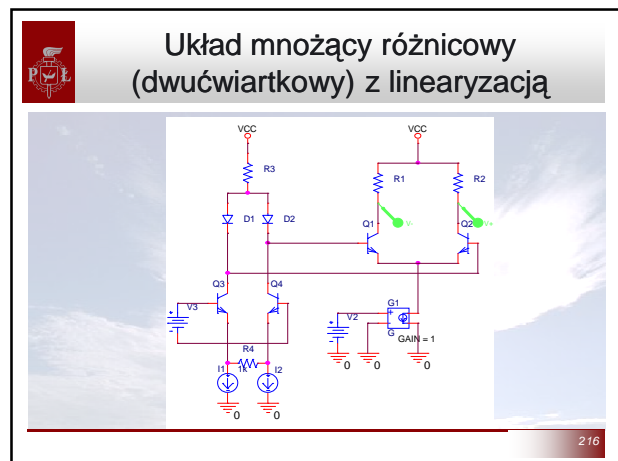
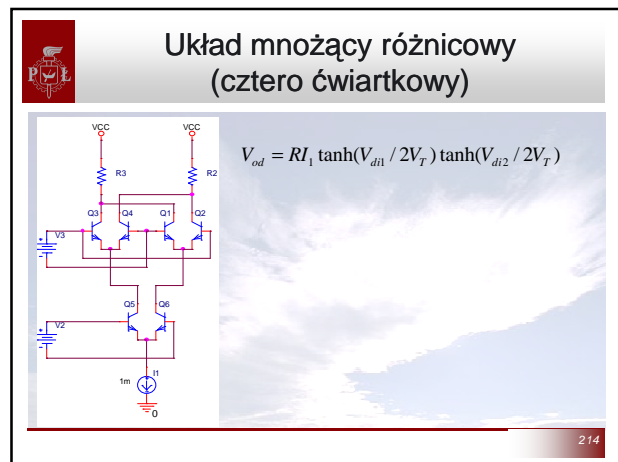
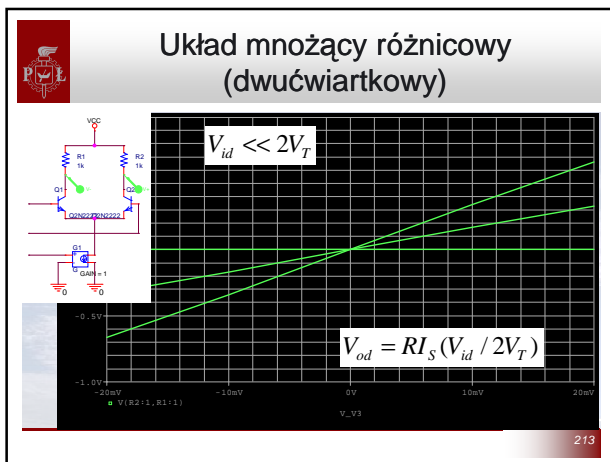
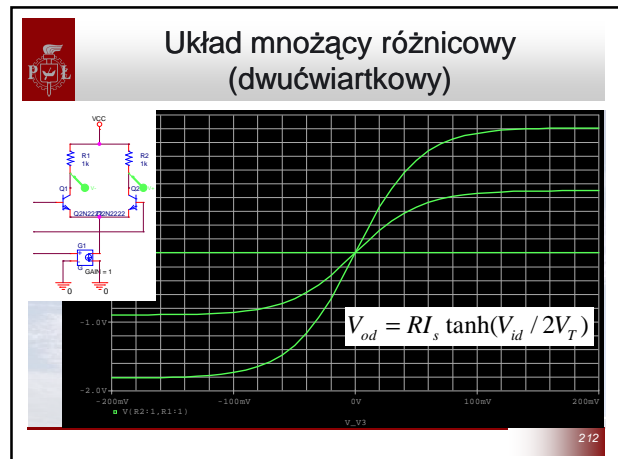
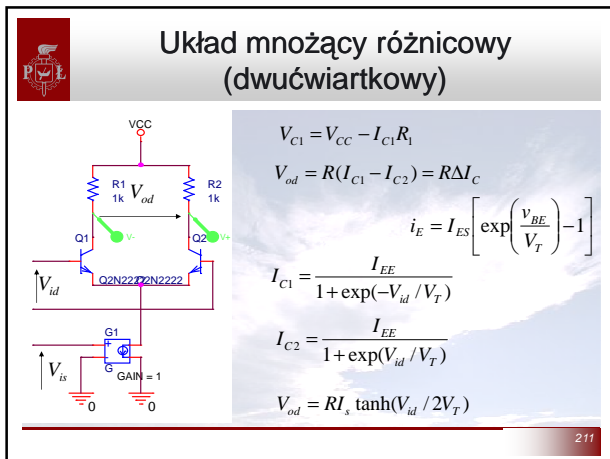


## Analogowe układ mnożący



210

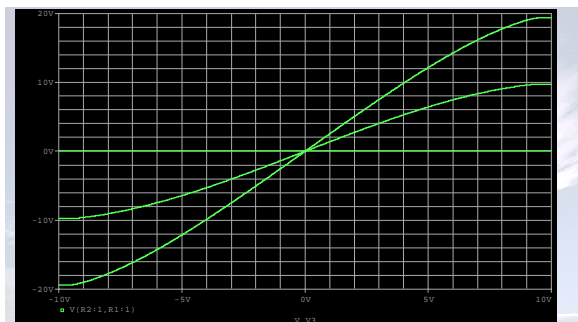








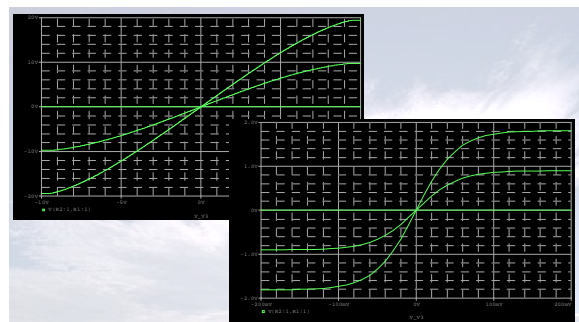
### Układ mnożący różnicowy (dwuźwiartkowy) z linearyzacją



217



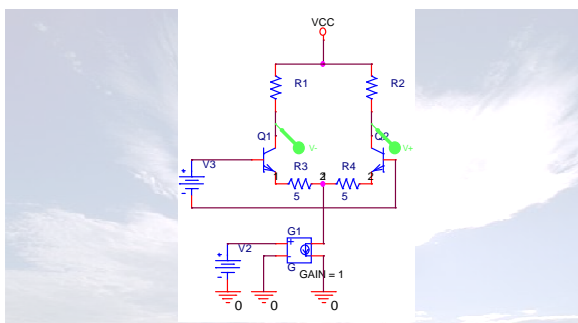
### Układ mnożący różnicowy (dwuźwiartkowy) z linearyzacją



218



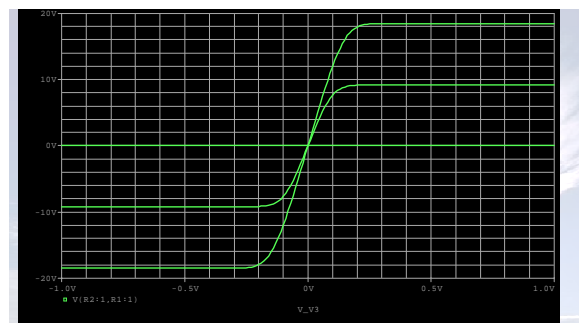
### Układ mnożący różnicowy (dwuźwiartkowy) z linearyzacją



219



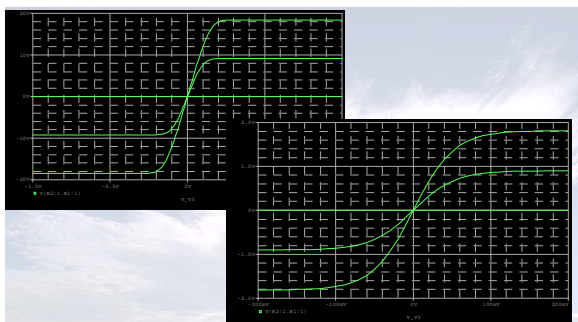
### Układ mnożący różnicowy (dwuźwiartkowy) z linearyzacją



220



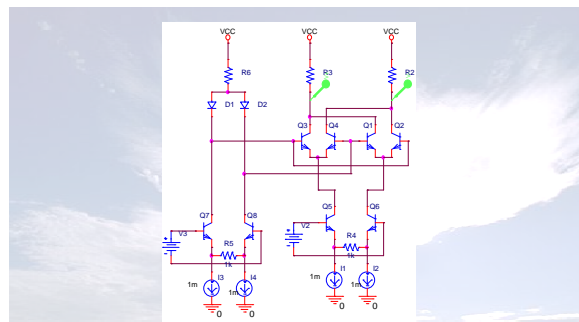
### Układ mnożący różnicowy (dwuźwiartkowy) z linearyzacją



221



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

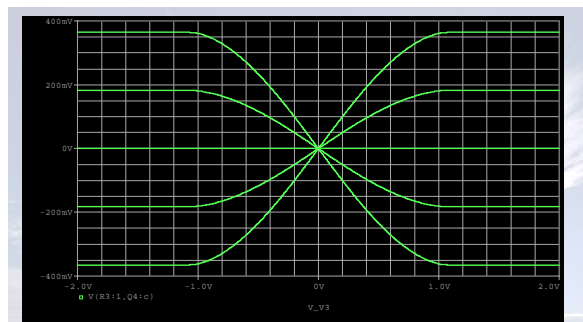


222





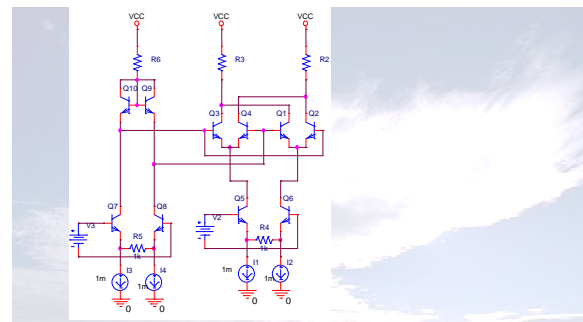
### Układ mnożący różnicowy (cztero ćwiartkowy) z linearyzacją



223



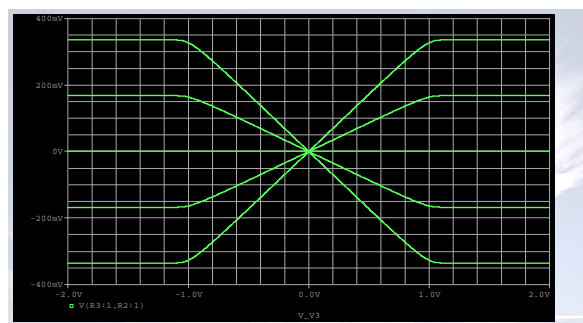
### Układ mnożący różnicowy (cztero ćwiartkowy) z linearyzacją



224



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



225



### Układy mnożące zastosowania

- Modulacja amplitudy
- Detekcja amplitudy
- Detekcja fazy
- Detekcja częstotliwości
- Przemiana częstotliwości

226



### 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.

227

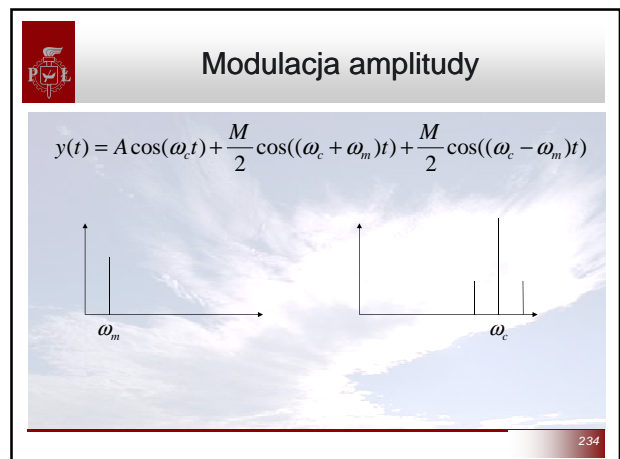
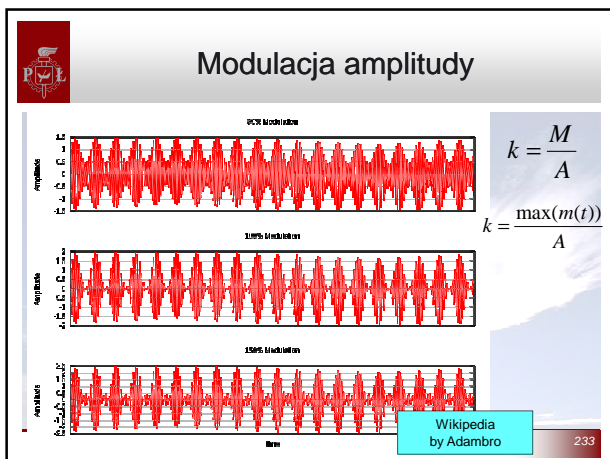
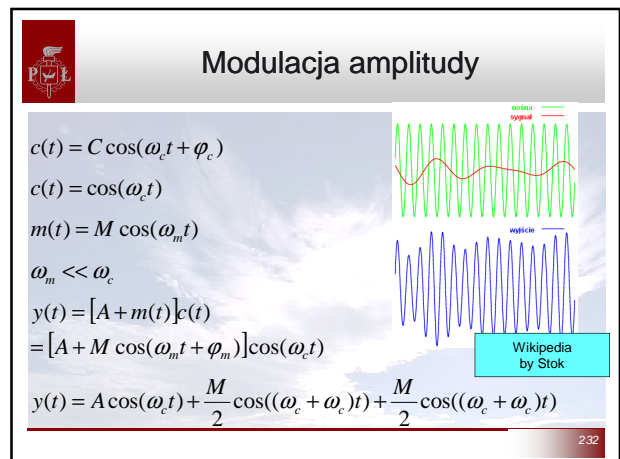
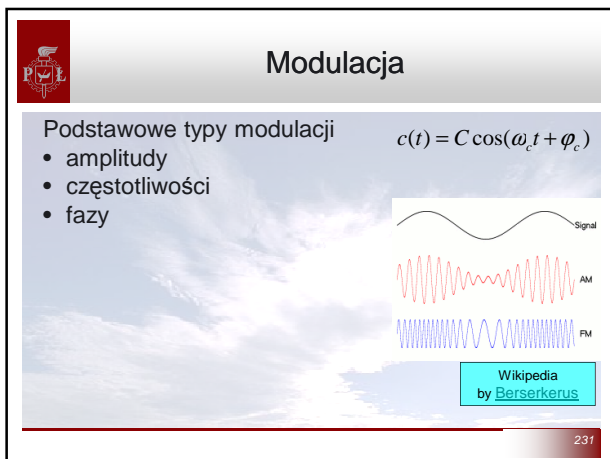
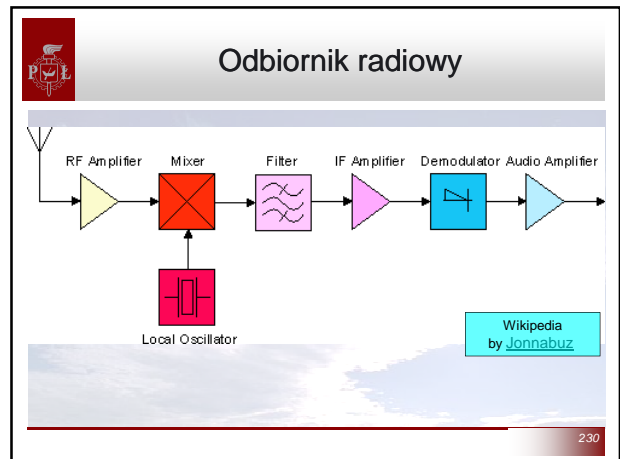
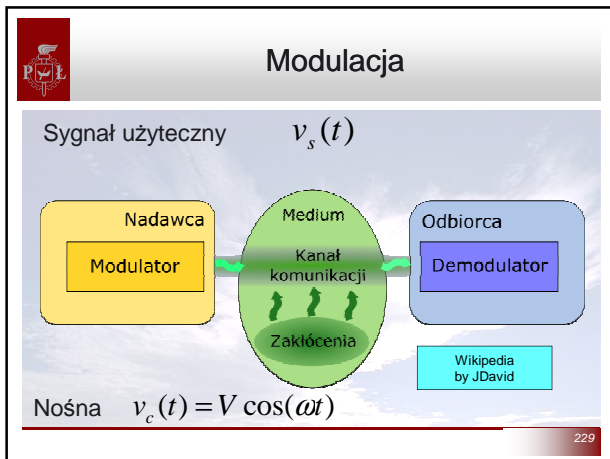


### Detektory amplitudy, częstotliwości i przesunięcia fazowego.

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

228



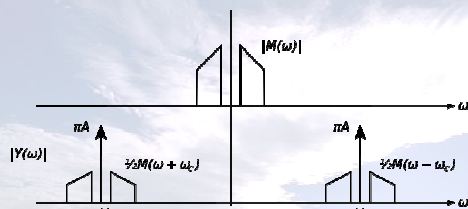






## Modulacja amplitudy

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



Wikipedia  
by Qef

235



## Modulacja amplitudy

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

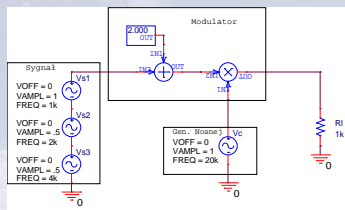
- Modulacje amplitudy
  - DSB-LC (inaczej AM) (ang. Double-Sideband Large Carrier) - modulacja dwuwstęgowa z nośną
  - DSB-SC (ang. Double-Sideband Suppressed Carrier) - modulacja dwuwstęgowa z wytłumioną nośną
  - SSB (ang. single-sideband modulation) - modulacja jednowstęgowa (może to być wstęga górna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

236



## Modulacja amplitudy

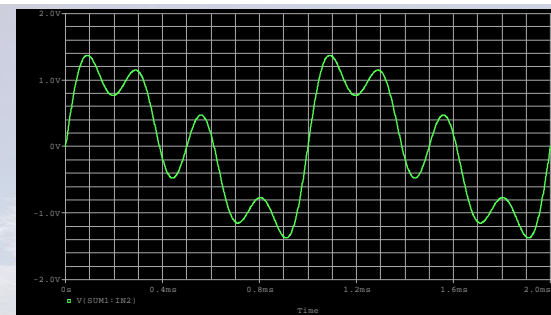
$$y(t) = [A + m(t)]c(t) = [A + M \cos(\omega_m t + \phi_m)]\cos(\omega_c t)$$



237



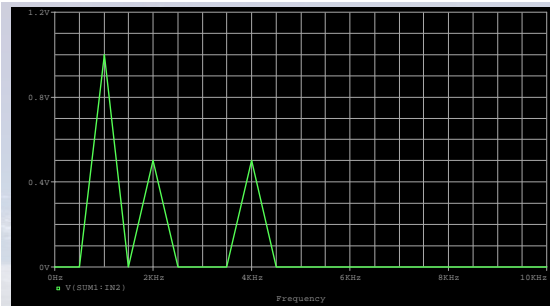
## Modulacja amplitudy



238



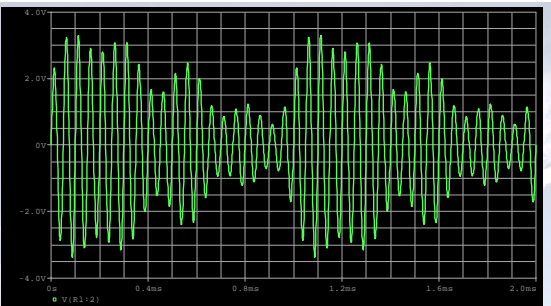
## Modulacja amplitudy



239



## Modulacja amplitudy

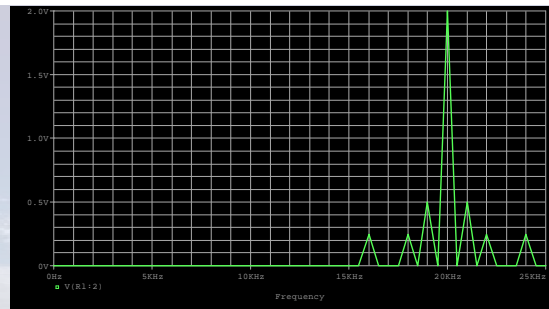


240





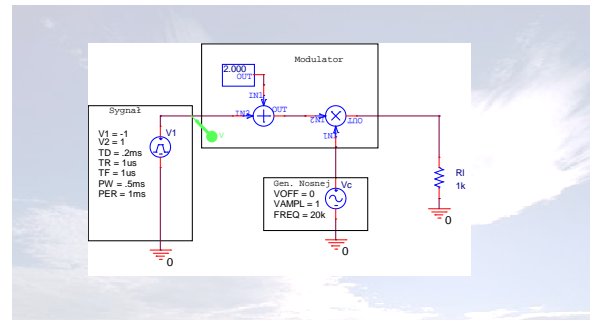
## Modulacja amplitudy



241



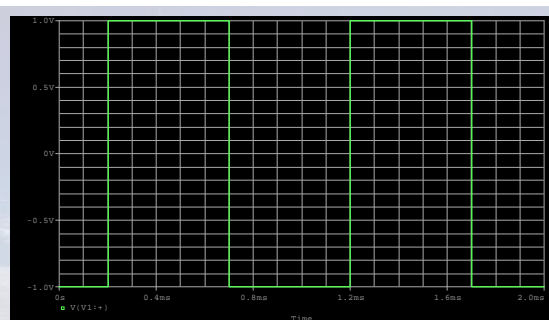
## Modulacja amplitudy



242



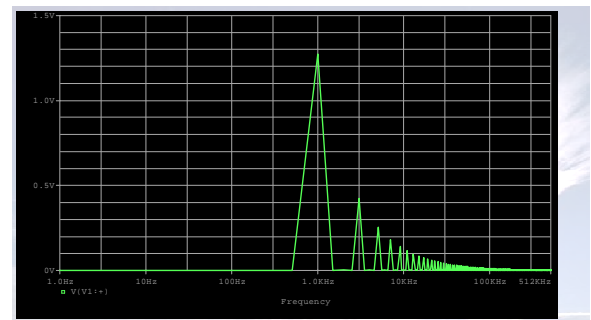
## Modulacja amplitudy



243



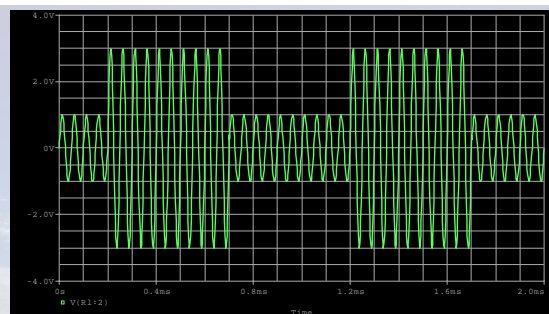
## Modulacja amplitudy



244



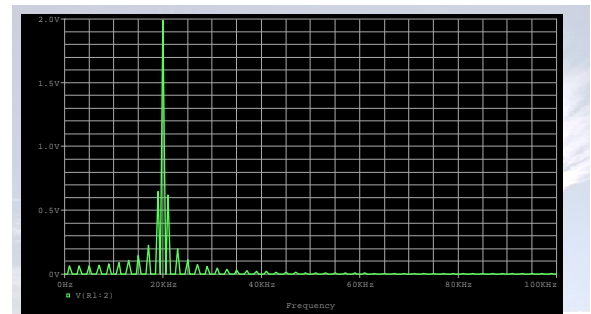
## Modulacja amplitudy



245

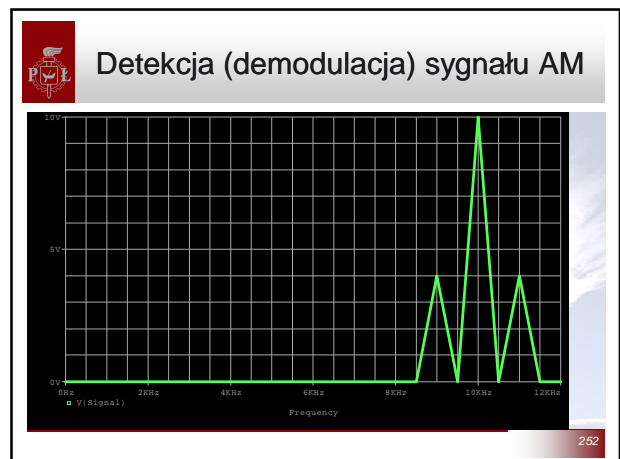
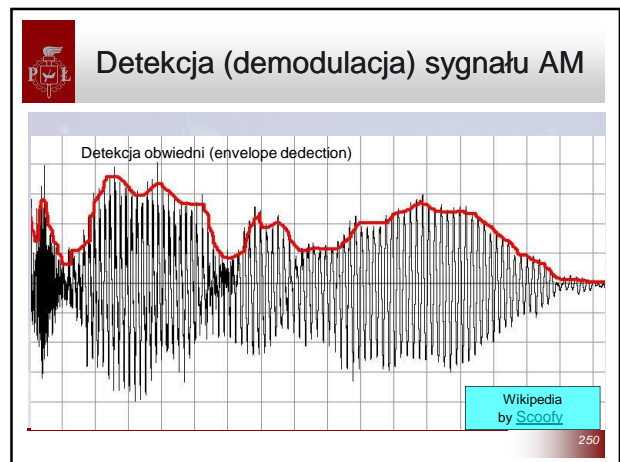
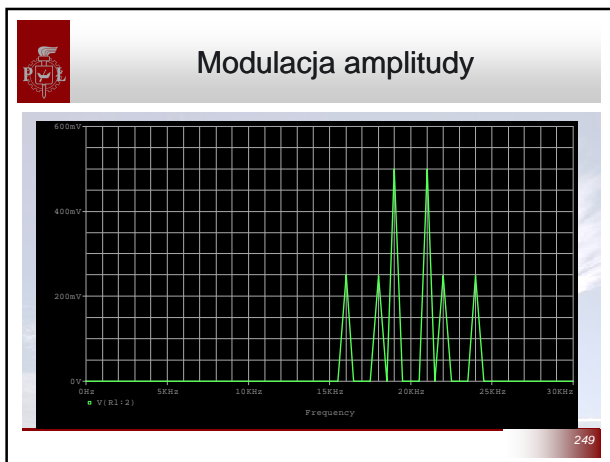
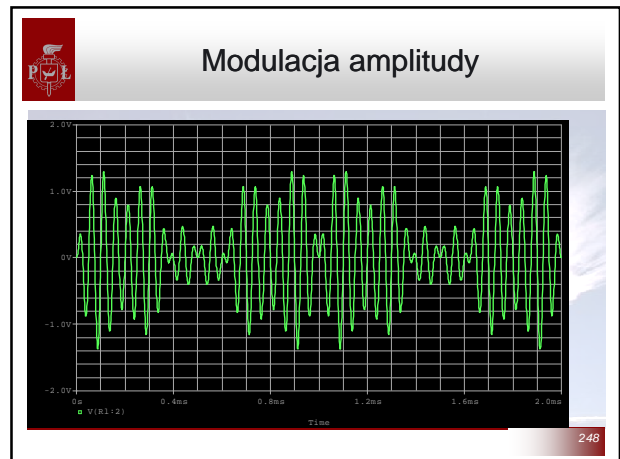
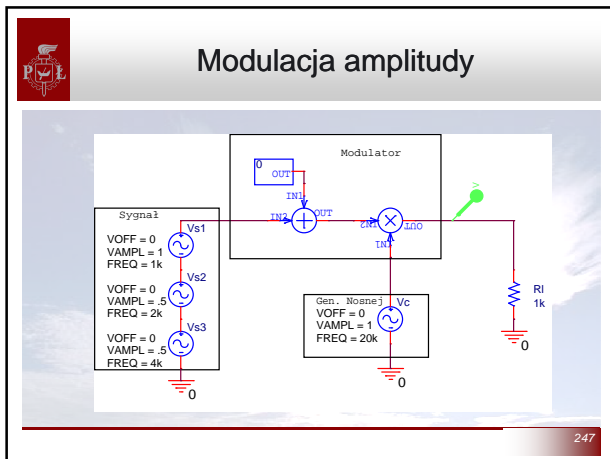


## Modulacja amplitudy



246

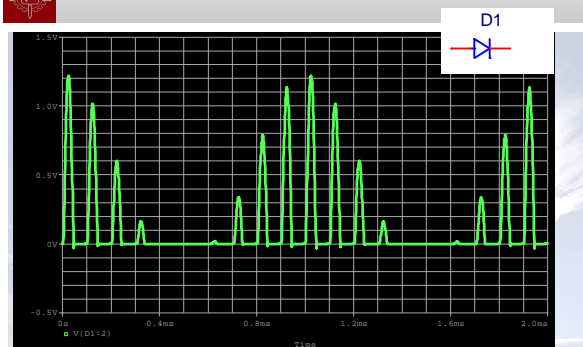








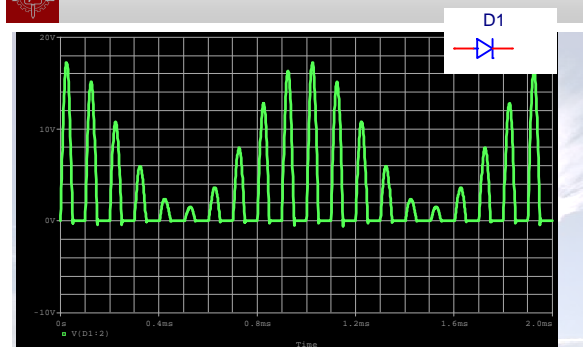
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



253



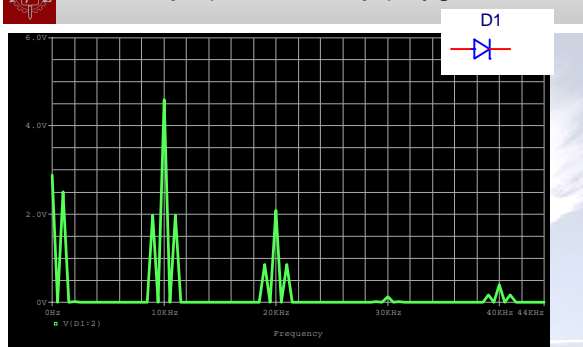
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



254



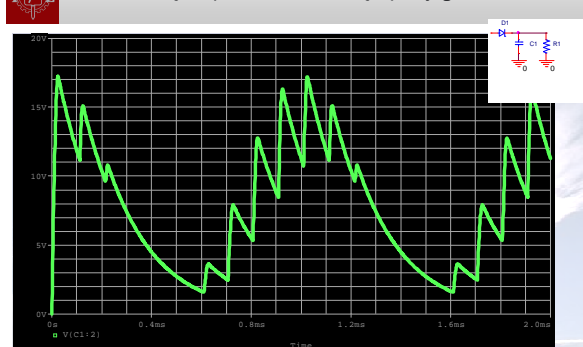
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



255



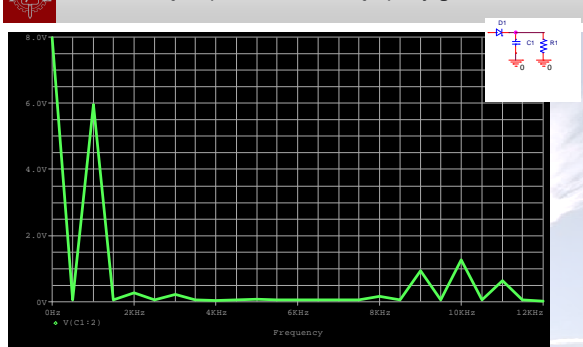
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



256



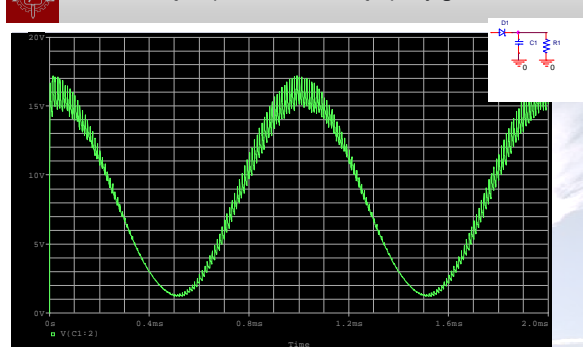
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



257



## Detekcja (demodulacja) sygnału AM

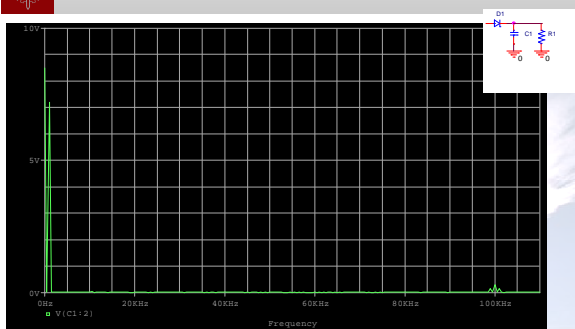


258





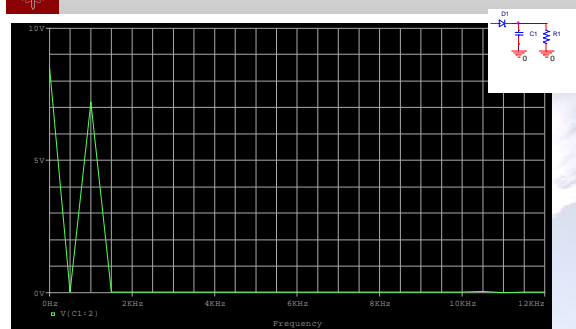
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



259



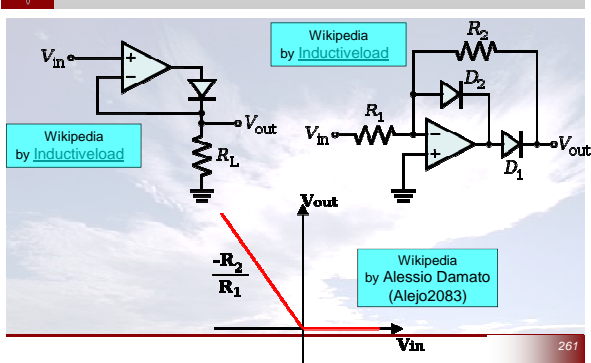
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



260



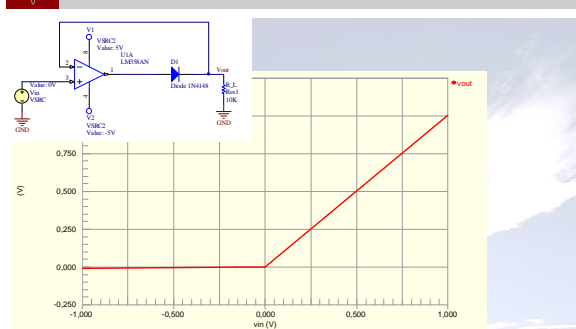
## Superdiody



261



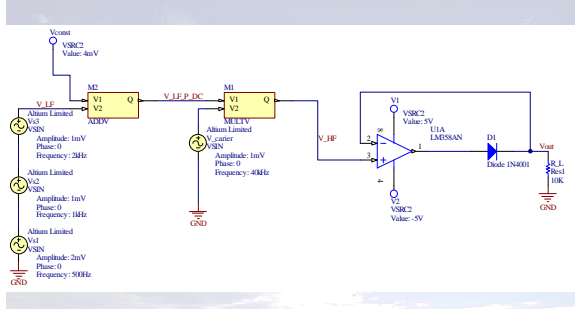
## Superdioda



262



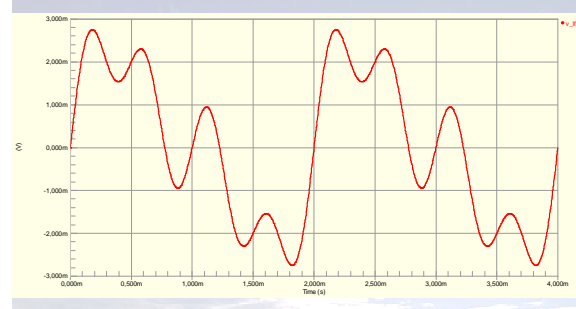
## Detekcja sygnału AM z układem superdiody



263

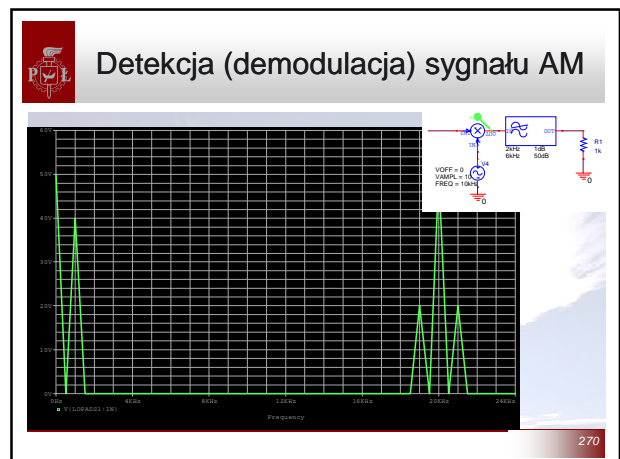
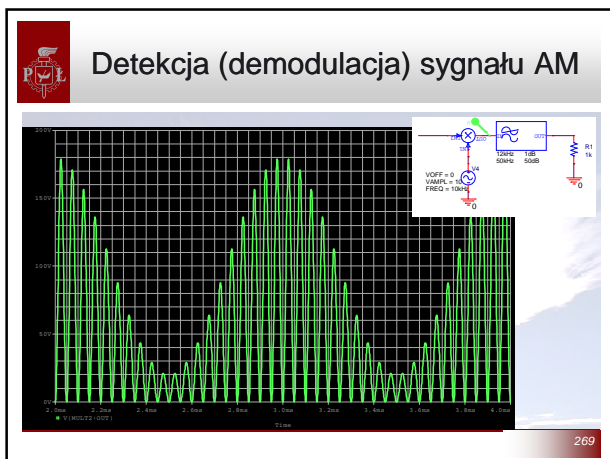
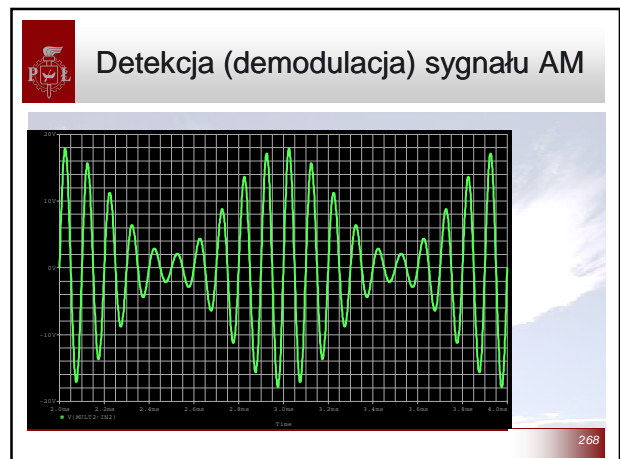
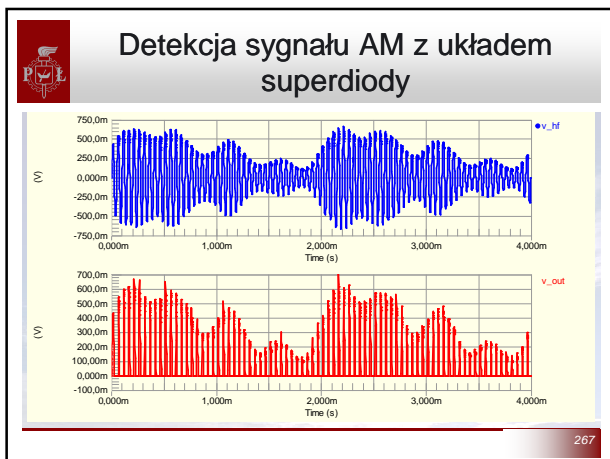
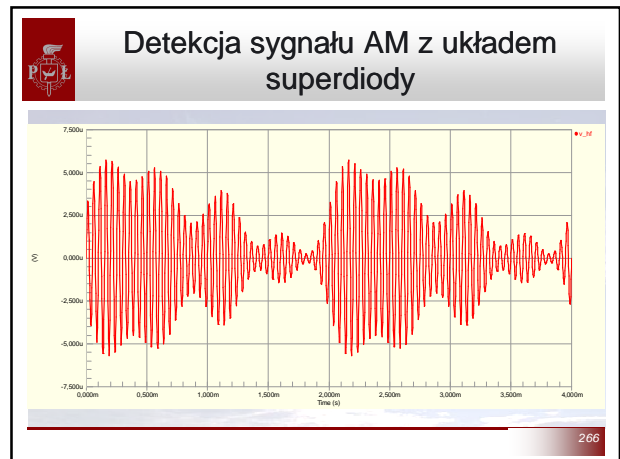
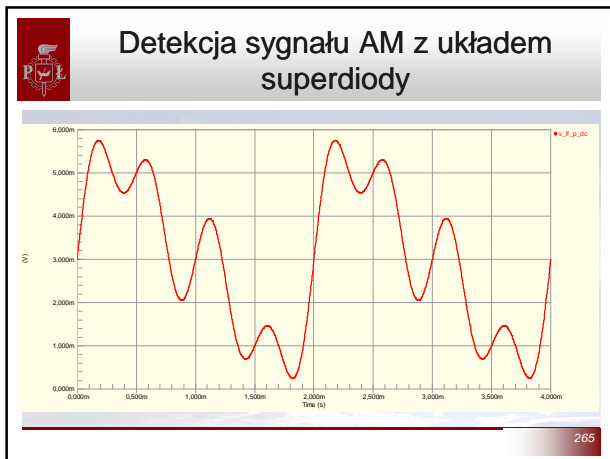


## Detekcja sygnału AM z układem superdiody



264

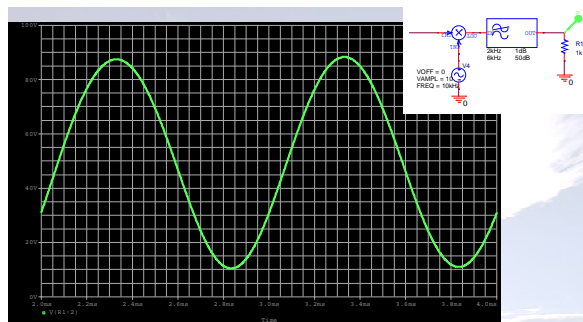








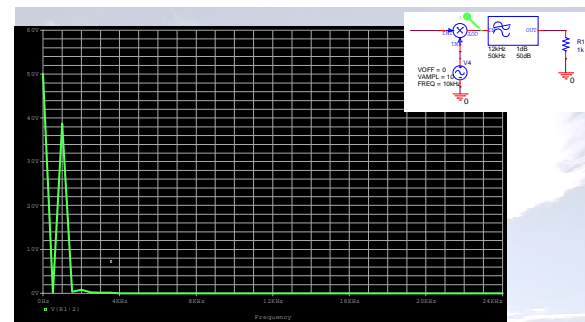
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



271



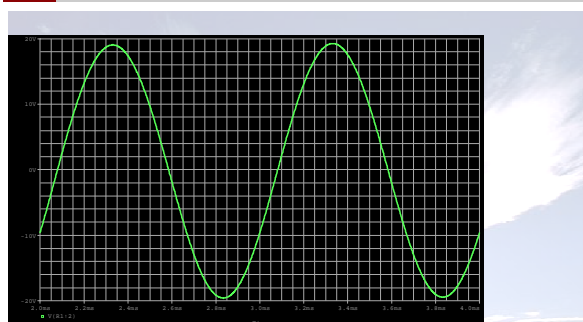
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



272



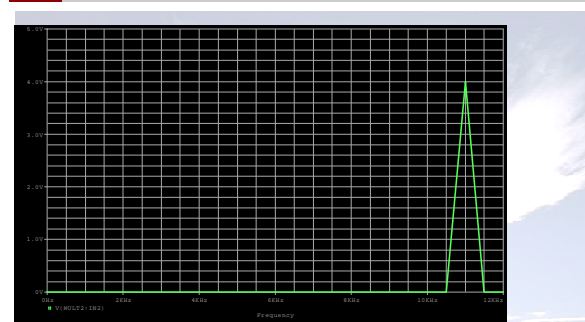
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



273



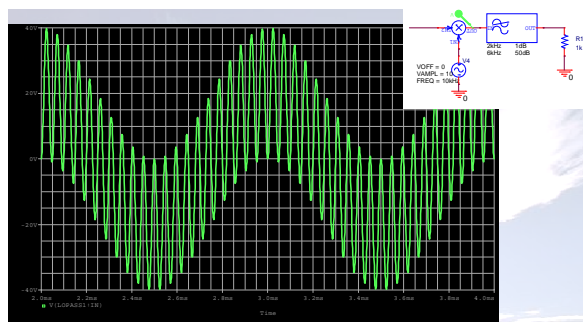
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



274



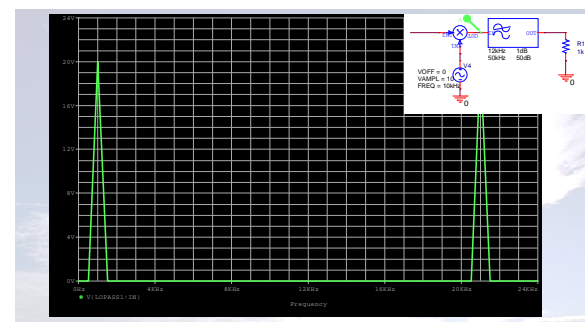
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



275



## Detekcja (demodulacja) sygnału AM

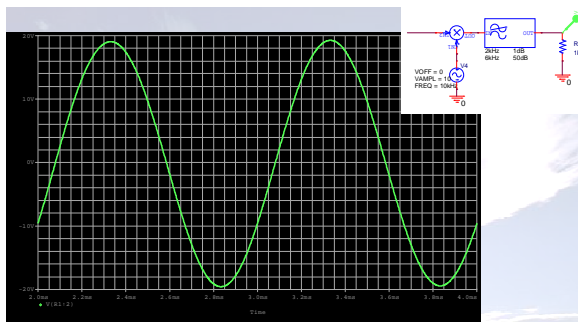


276





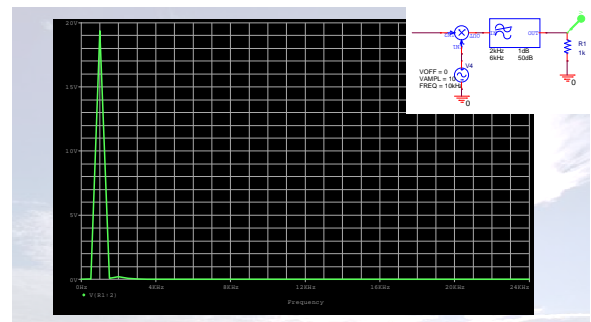
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



277



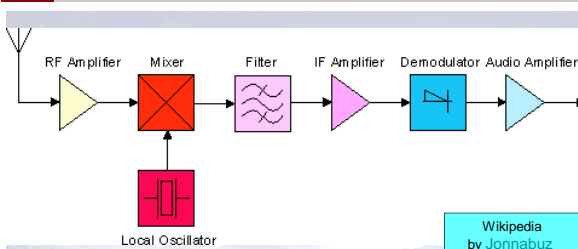
## Detekcja (demodulacja) sygnału AM



278



## Detekcja (demodulacja) sygnału AM

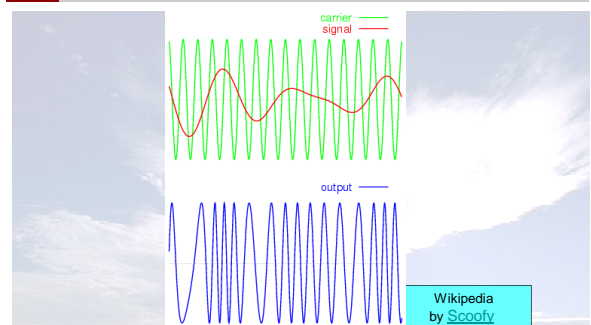


Wikipedia  
by Jonnabuz

279



## Detekcja (demodulacja) sygnału FM

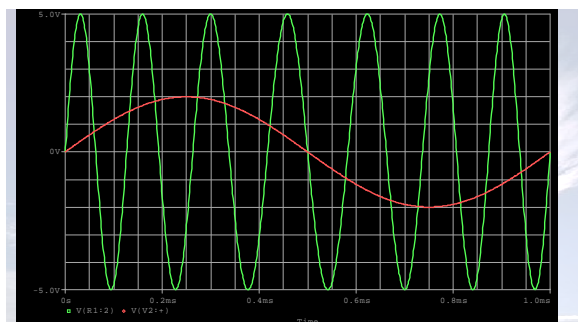


Wikipedia  
by Scoofy

280



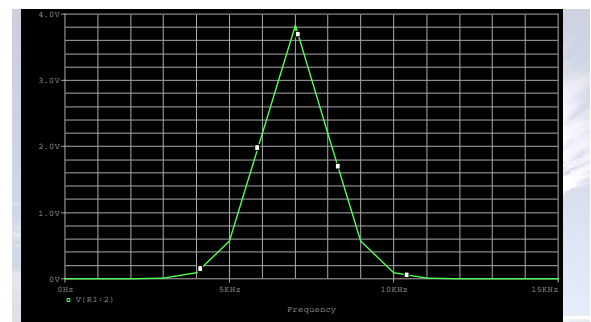
## Sygnał FM (nośna 7kHz sygnał modujący 1kHz)



281

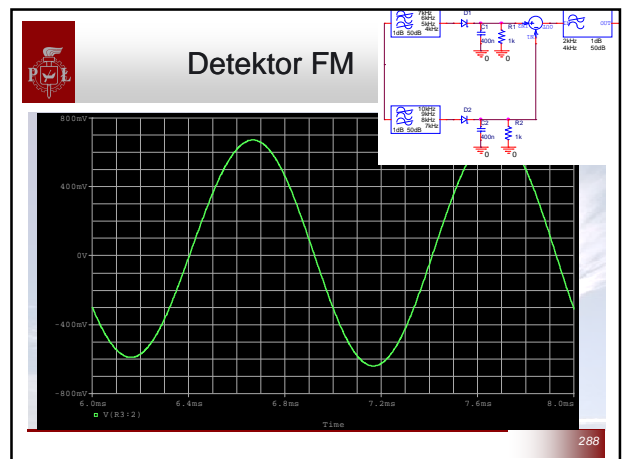
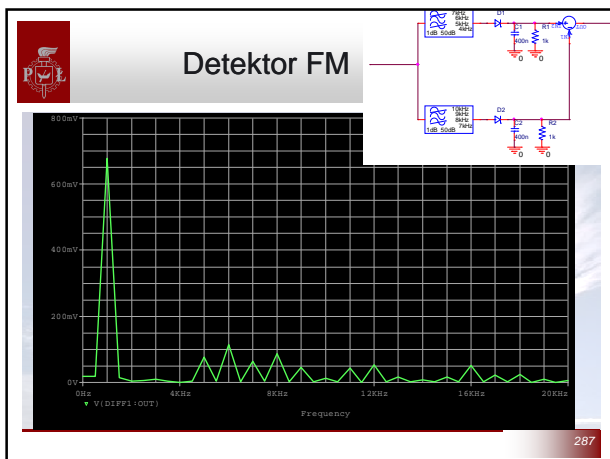
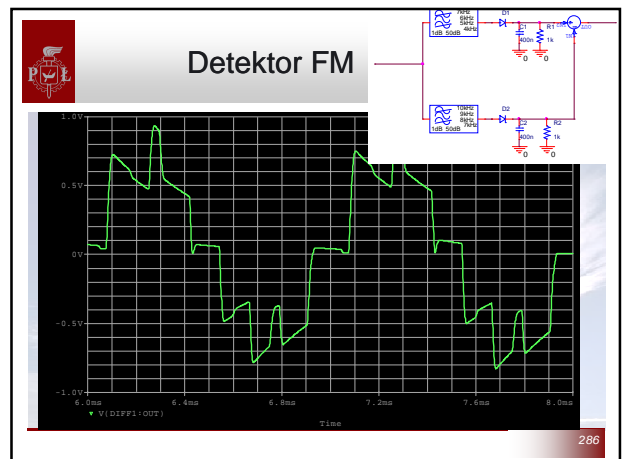
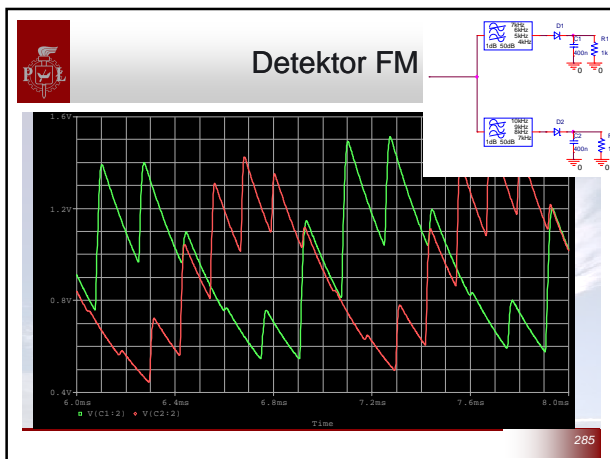
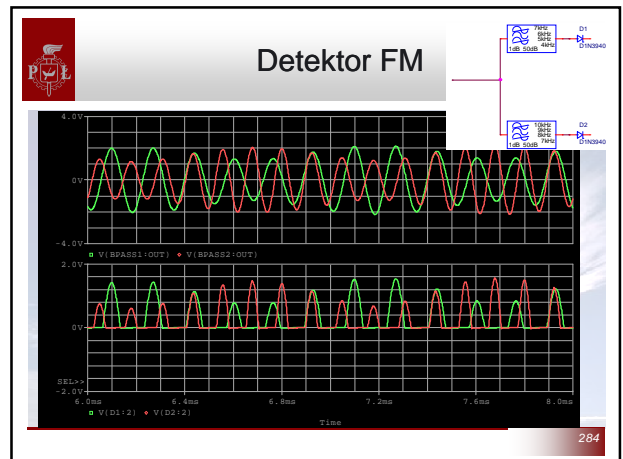
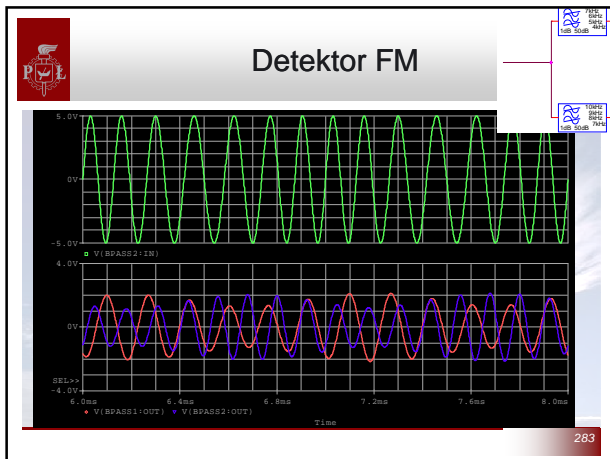


## Sygnał FM (nośna 7kHz sygnał modujący 1kHz)

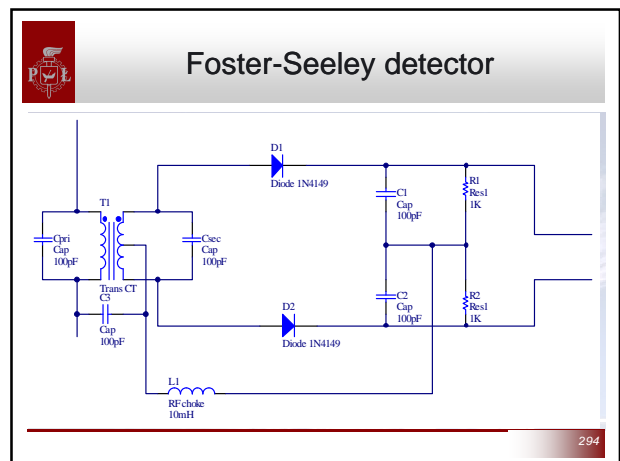
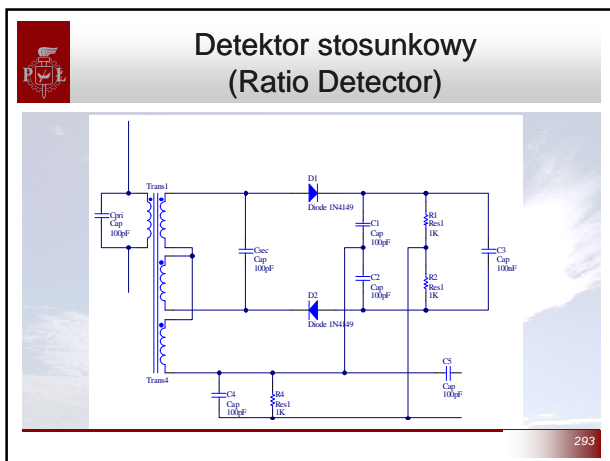
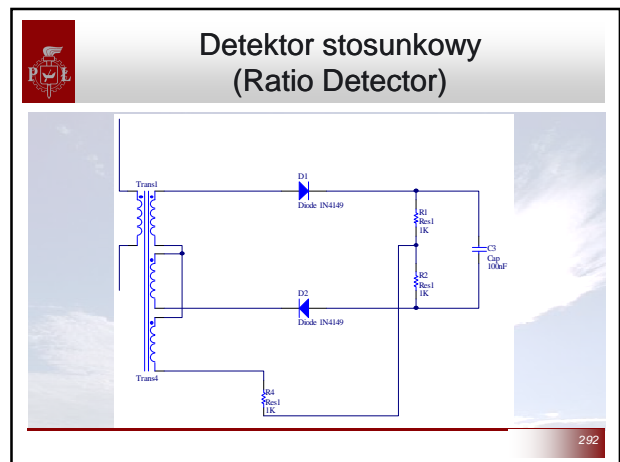
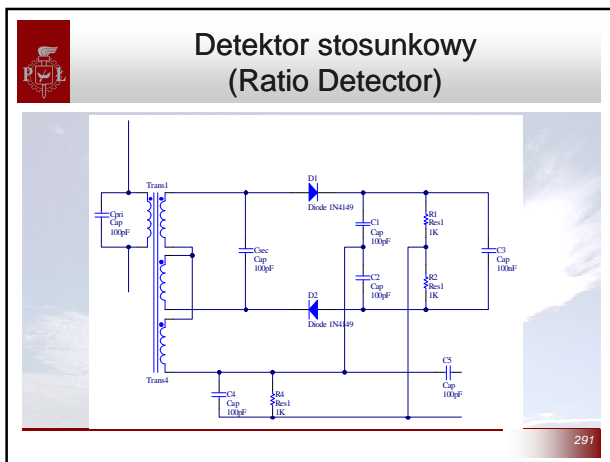
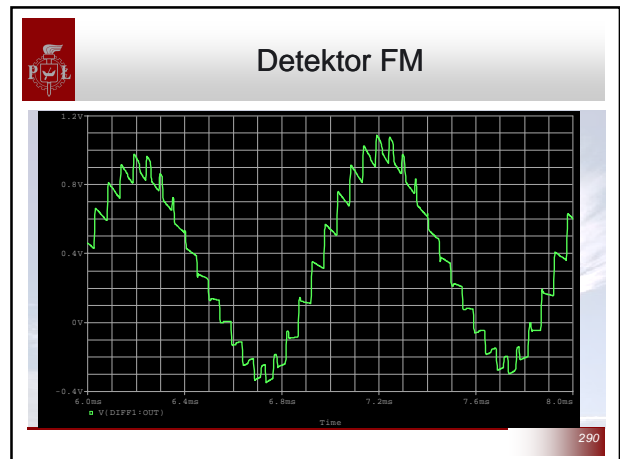
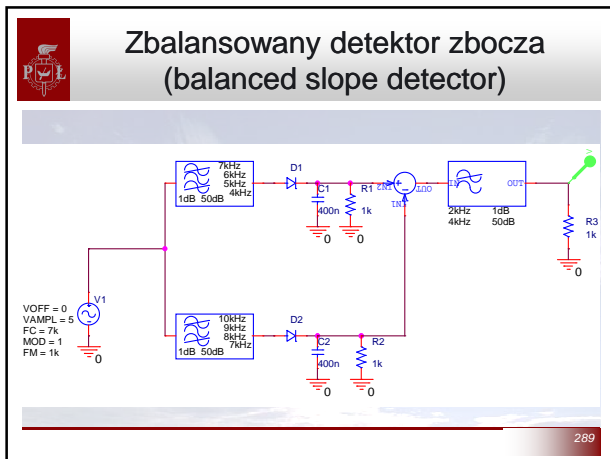


282



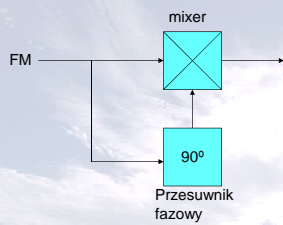






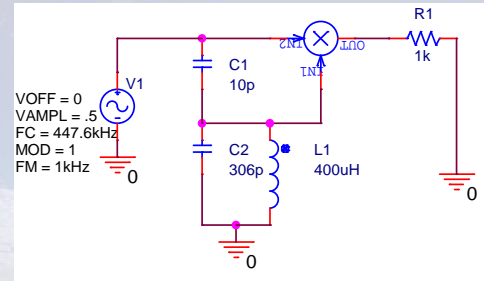


## Detektor kwadraturowy (Quadrature FM detector)



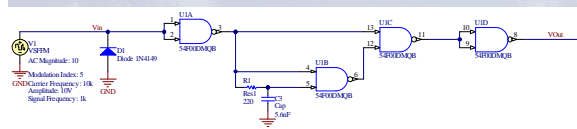
295

## Detektor kwadraturowy (Quadrature FM detector)



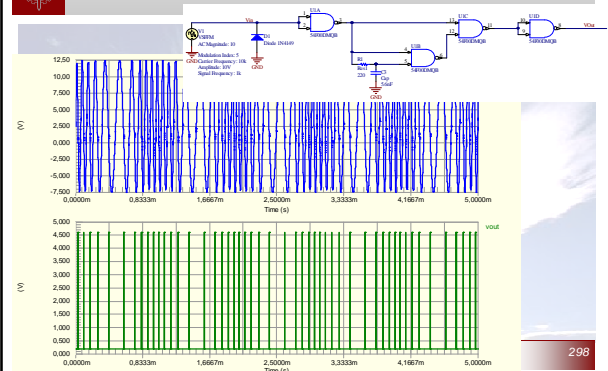
296

## Detektor FM zliczający impulsy



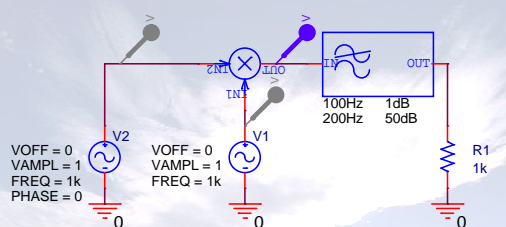
297

## Detektor FM zliczający impulsy



298

## Detektor fazy



299

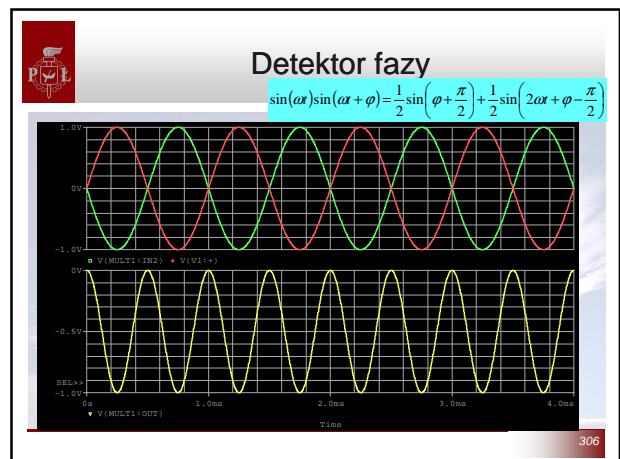
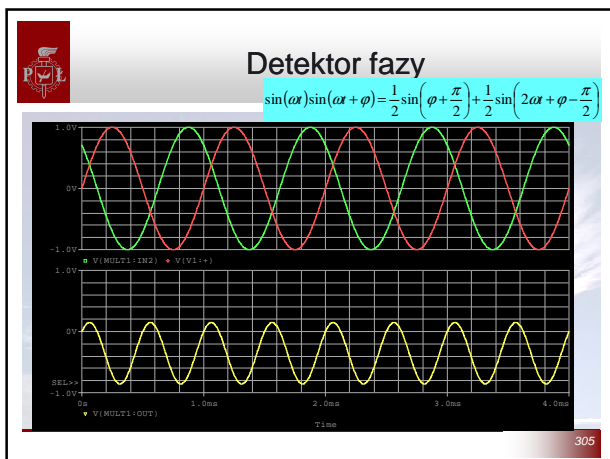
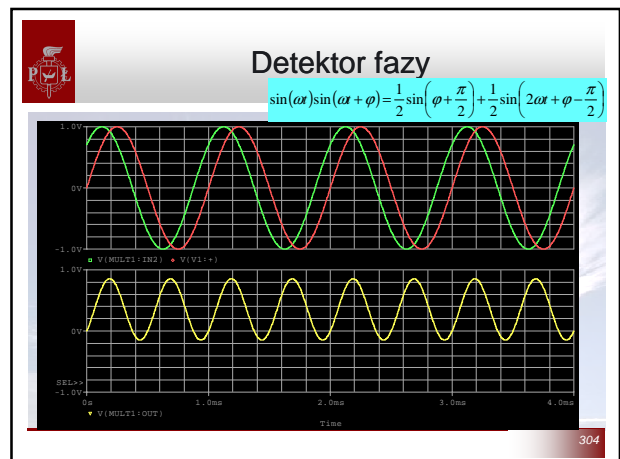
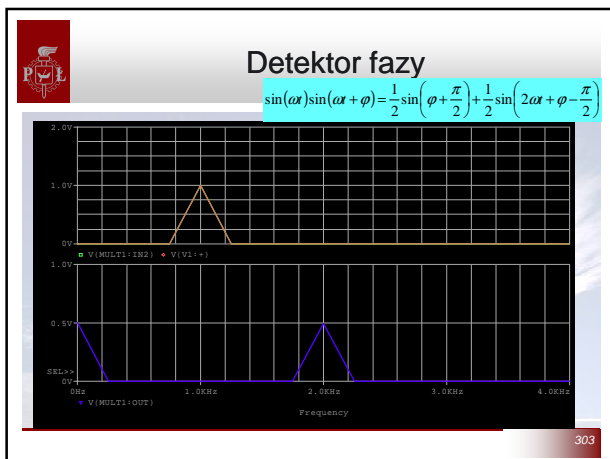
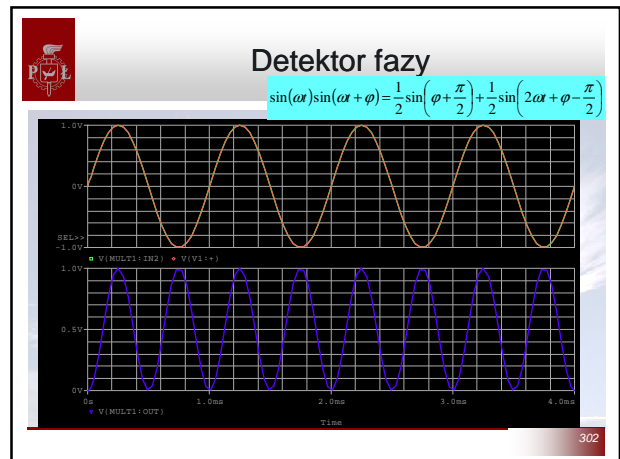
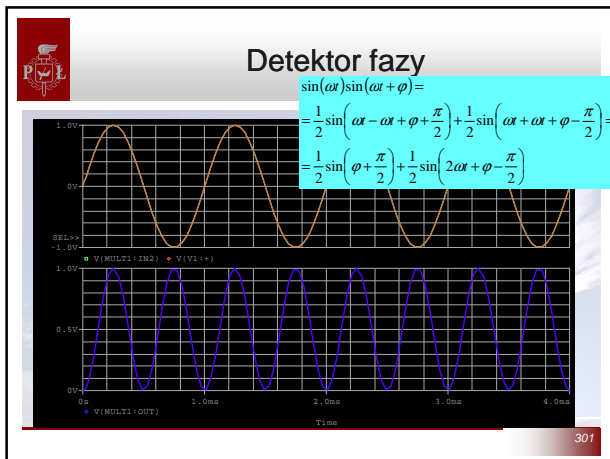
## Mnożenie sygnałów sinusoidalnych

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

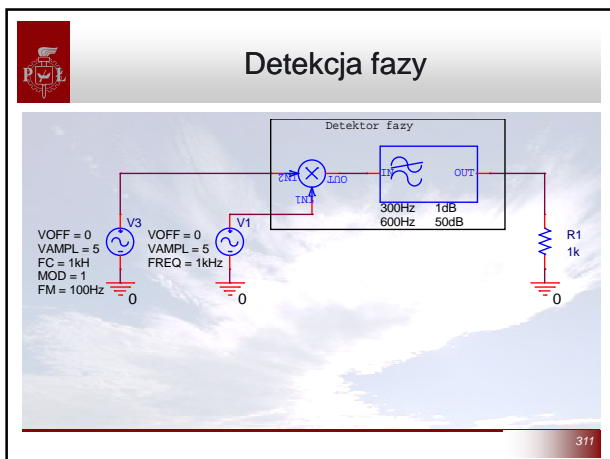
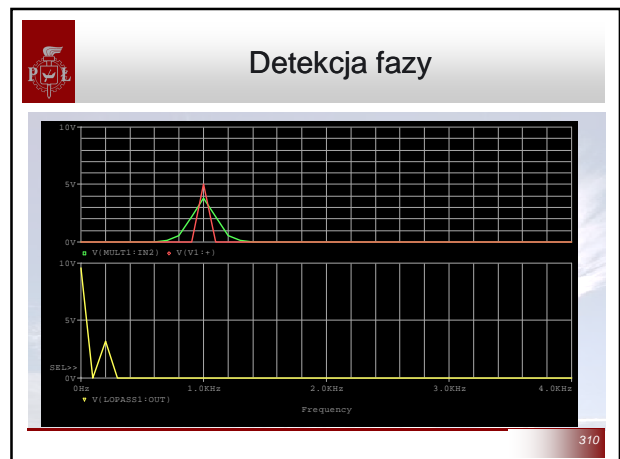
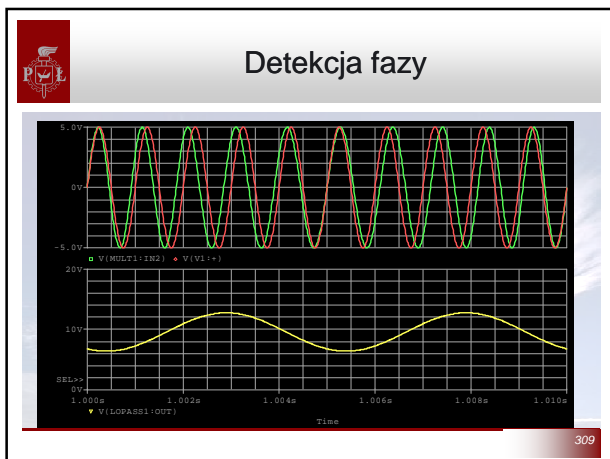
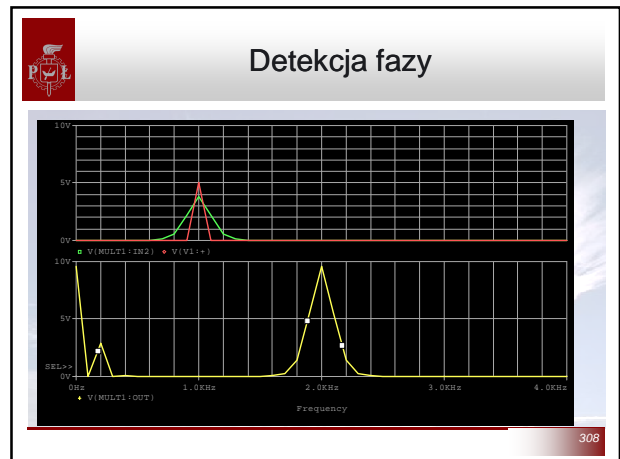
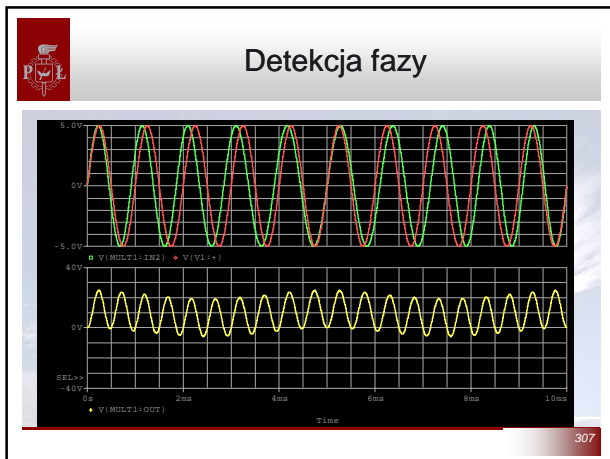
$$\begin{aligned} \sin(\omega_1 t + \phi_1) \sin(\omega_2 t + \phi_2) &= \\ &= \frac{1}{2} \cos(\omega_1 t - \omega_2 t + \phi_1 - \phi_2) - \frac{1}{2} \cos(\omega_1 t + \omega_2 t + \phi_1 + \phi_2) = \\ &= \frac{1}{2} \sin\left(\omega_1 t - \omega_2 t + \phi_1 - \phi_2 + \frac{\pi}{2}\right) - \frac{1}{2}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

300









### 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

312





## 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.

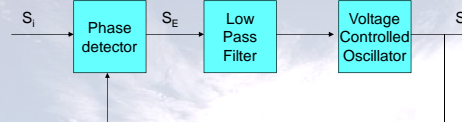
Kompletne układy PLL mogą być wbudowywane jako bloki funkcyjne do układów scalonych. Dzięki temu technika PLL jest szeroko wykorzystywana w nowoczesnych urządzeniach elektronicznych pracujących w zakresie częstotliwości od ułamków Hz do wielu GHz.

Wikipedia

313



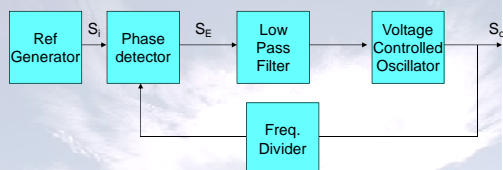
## PLL schemat blokowy



314



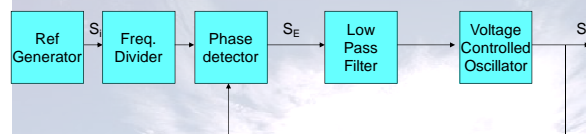
## PLL – n-krotnego zwielokrotniania częstotliwości wzorcowej



315



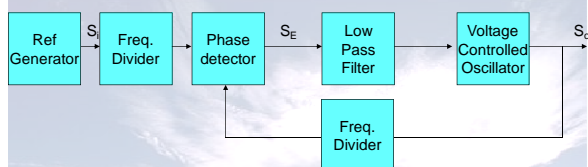
## PLL – układ n-krotnego podziału częstotliwości wzorcowej



316



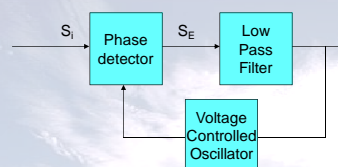
## PLL układ dowolnej (wymiernej) modyfikacji częstotliwości wzorcowej



317



## PLL jako demodulator FM demodulator



318





## 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.

319



## 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)

320



## Programowalne układy analogowe i ich zastosowania literatura

- [http://www.wzpt.tele.pw.edu.pl/artykuly/an\\_uk\\_pro.pdf](http://www.wzpt.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>

321



## 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

322



## Sygnały analogowe i cyfrowe

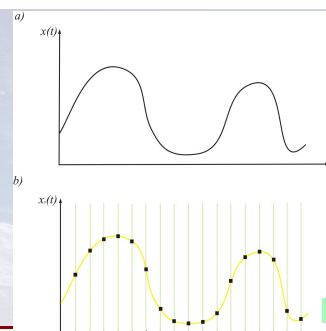
**Sygnał Analogowy** – ciągła funkcja czasu

**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



## Próbkowanie sygnału analogowego



©D. Młynarski





## Sygnały dyskretne

### Twierdzenie Kotelnikova-Shannona :

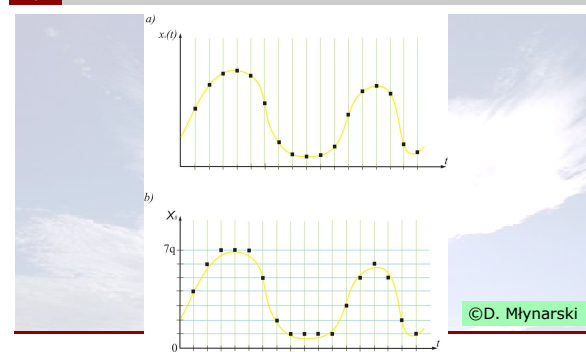
Sygnał analogowy  $x(t)$  może być bezbłędnie zrekonstruowany na podstawie jego dyskretnej wersji jeżeli:

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  $2f_h$

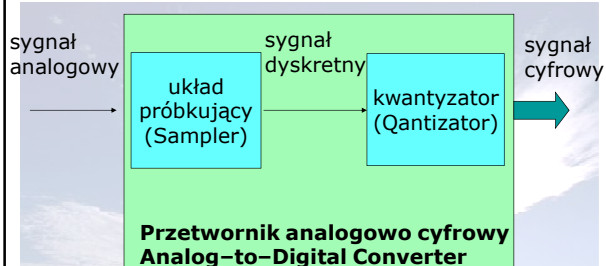
Sygnał dyskretny jest nadal sygnałem analogowym ale nie jest ciągłą funkcją czasu.



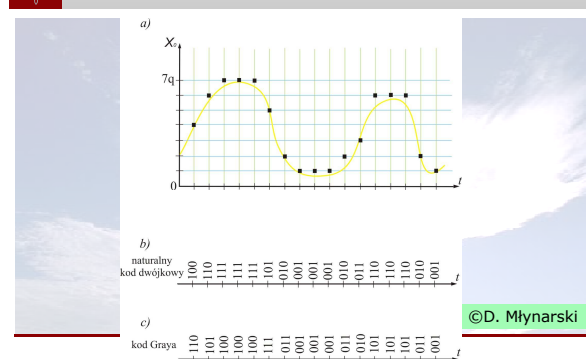
## Kwantyzacja sygnału dyskretnego



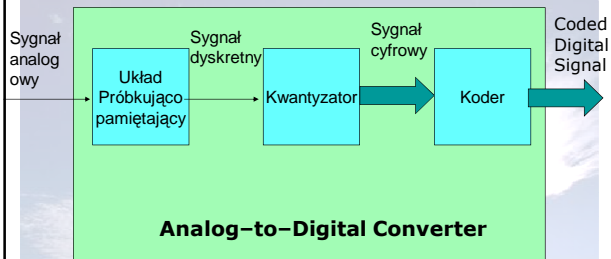
## Sygnały cyfrowe



## Kodowanie sygnału cyfrowego



## Przetwornik analogowo cyfrowy

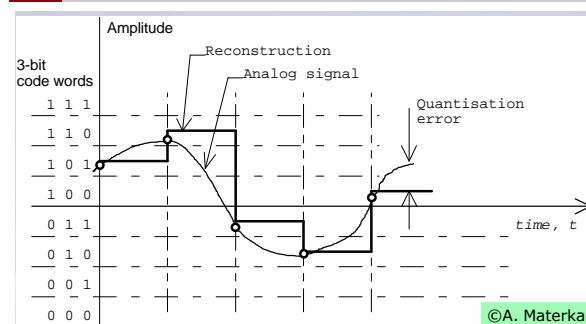


Electronic Circuits 2010

329



## Rekonstrukcja sygnału analogowego







## Sygnały cyfrowe

Liczba dyskretnych (skwantowanych) poziomów sygnału

$$N = 2^k$$

k=8 -> N = 256

k=16 -> N = 65536

k=24 -> 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)



## 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 -> nieskończona liczba kolejnych operacji.,
- łatwa realizacja w postaci układów scalonych (brak dużych indukcyjności i pojemności).



## 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,
- przetwarzane sygnałów 2D i 3D.



## 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.



## 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.**



## 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>
- [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD7714.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7714.pdf)