

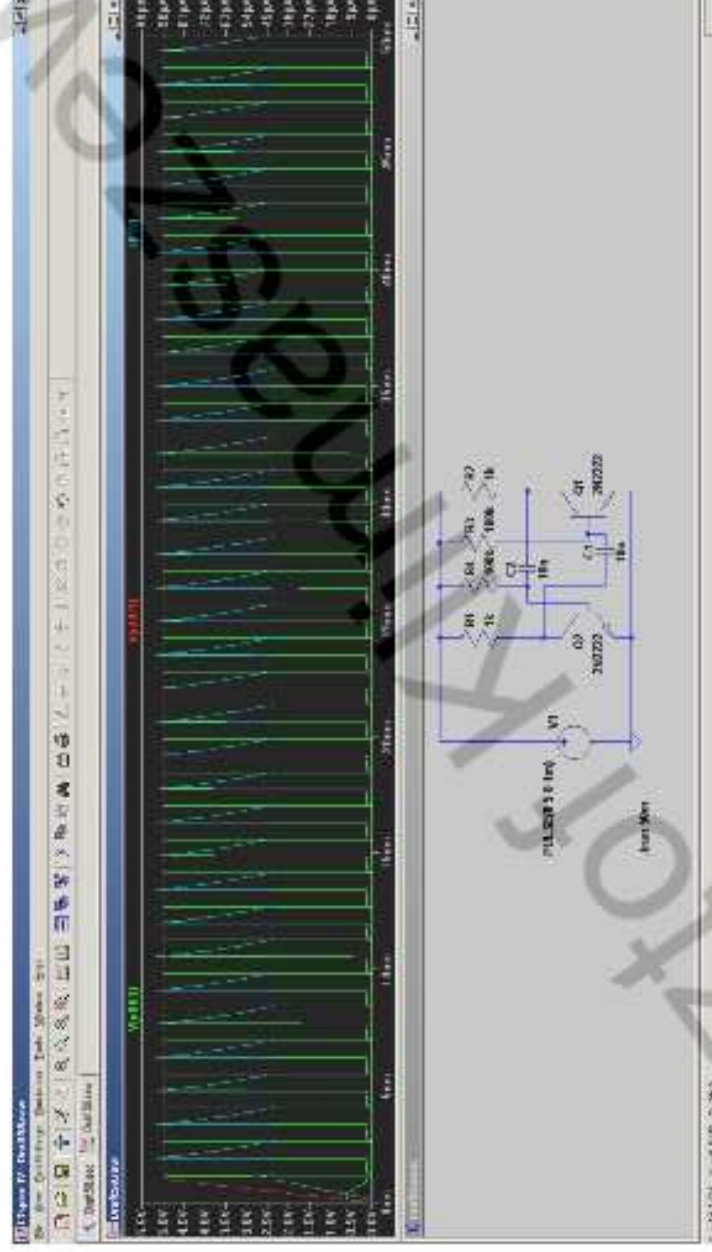
# Przyrządy Półprzewodnikowe

Krzysztof Klimaszewski

[kklima@et.put.poznan.pl](mailto:kklima@et.put.poznan.pl)

Polanka 3, pokój 118

# Przydatne programy



Ltspice

<http://ltspice.analog.com/software/LTspiceXVII.exe>

## Przydatne strony

[www.ti.com](http://www.ti.com)

[www.analog.com](http://www.analog.com)

[www.maximintegrated.com](http://www.maximintegrated.com)

[www.nxp.com](http://www.nxp.com)

[www.vishay.com](http://www.vishay.com)

[www.onsemi.com](http://www.onsemi.com)

[www.tek.com](http://www.tek.com)

(Tektronix)

[www.keysight.com](http://www.keysight.com)

(dawniej część Agilent, dawniej Hewlett Packard)

## Przydatne strony

[www.google.com](http://www.google.com)

Wyszukiwanie dokumentacji, filmów, prezentacji,  
materiałów firmowych

# Rezystory

- Węglowe objętościowe
- Warstwowe
  - Węglowe
  - Metalowe
  - Grubowarstwowe
  - Cienkowarstwowe
- Druutowe
- Foliowe

# Rezystory

Wartość	0.1	50	100	±5	1 to 10 M (E24)	-100 to +600	-55 to +155
ERJ3G (0603)	0.1	75	150	±5	1 to 10 M (E24)	-55 to +155	-55 to +155
ERJ6G (0805)	0.125	150	200	±5	1 to 10 M (E24)	-55 to +155	-55 to +155

## • Szeregi wartości

- E6 (20%): 1,0 1,5 2,2 3,3 4,7 6,8
- E12 (10%): 1,0 1,2 1,5 1,8 2,2 2,7 3,3 3,9 4,7 5,6 6,8 8,2
- E24 (5%): 1,0 1,1 1,2 1,3 1,5 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,7 3,0 3,3 3,6 3,9 4,3 4,7 5,1 5,6 6,2 6,8 7,5 8,2 9,1
- E96 (1%):

1,00 1,02 1,05 1,07 1,10 1,13 1,15 1,18 1,21 1,24 1,27 1,30 1,33 1,37 1,40 1,43 1,47 1,50 1,54 1,58 1,62 1,65 1,69 1,74 1,78 1,82 1,87 1,91 1,95 2,00 2,05 2,10 2,15 2,21 2,26 2,32  
2,37 2,43 2,49 2,55 2,61 2,67 2,74 2,80 2,87 2,94 3,01 3,09 3,16 3,24 3,32 3,40 3,48 3,57 3,65 3,74 3,83 3,92 4,02 4,12 4,22 4,32 4,42 4,53 4,64 4,75 4,87 4,99 5,11 5,23 5,36 5,49  
5,62 5,76 5,90 6,04 6,19 6,34 6,49 6,65 6,81 6,98 7,15 7,32 7,50 7,68 7,87 8,06 8,25 8,45 8,66 8,87 9,09 9,31 9,53 9,76

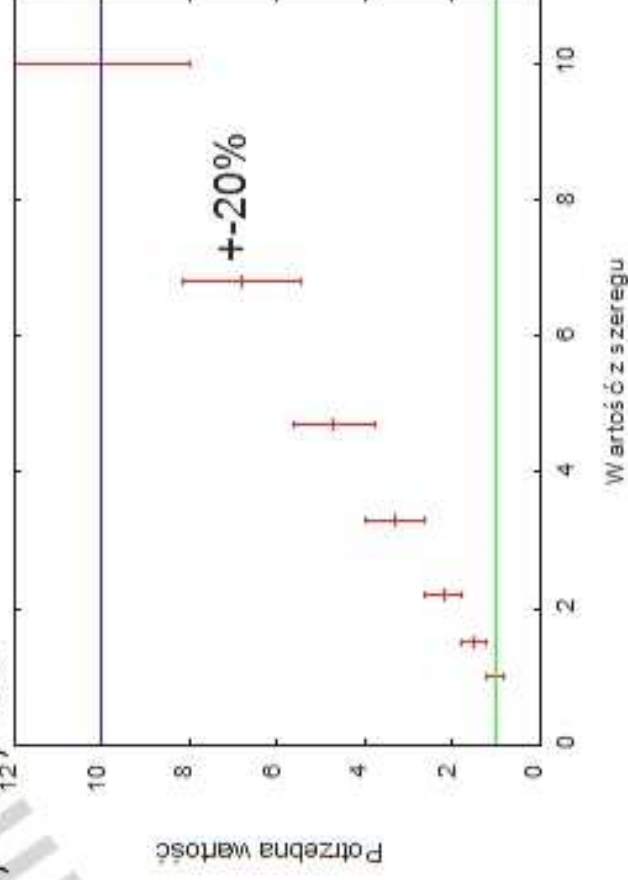
- E192

# Rezystory

Wartość (0402)	0.1	50	100	±5	1 to 10 M (E24)	-100 to +600	-55 to +155
ERJ3G (0603)	0.1	75	150	±5	1 to 10 M (E24)	-55 to +155	-55 to +155
ERJ6G (0805)	0.125	150	200	±5	1 to 10 M (E24)	-55 to +155	-55 to +155

- Szeregi wartości

- **E6 (20%):** 10, 15, 22, 33, 47, 68
- E12 (10%)
- E24 (5%)
- E96 (1%)
- E192



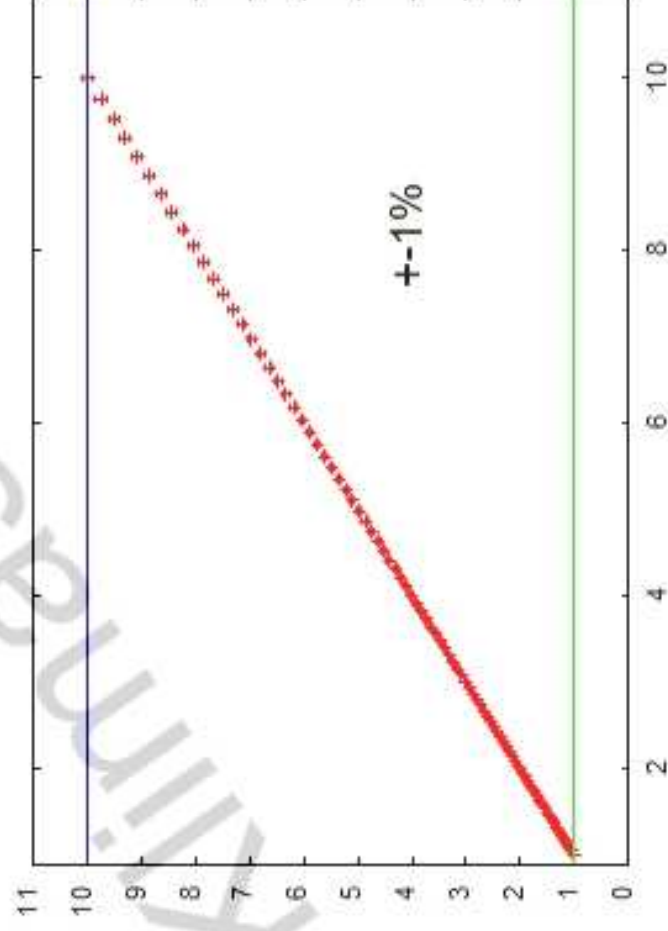
Dowolna wartość z całej dekady jest przybliżana z błędem mniejszym niż 20%

# Rezystory

	0.1	50	100	$\pm 5$	1 to 10 M (E24)	-100 to +600	-55 to +155
ERJ3G (0603)	0.1	75	150	$\pm 5$	1 to 10 M (E24)	-55 to +155	-55 to +155
ERJ6G (0805)	0.125	150	200	$\pm 5$	1 to 10 M (E24)	-55 to +155	-55 to +155

## • Szeregi wartości

- E6 (20%)
- E12 (10%)
- E24 (5%)
- **E96 (1%)**
- E192



Dowolna wartość z całej dekady jest przybliżana z błędem mniejszym niż 1%



# Rezystory

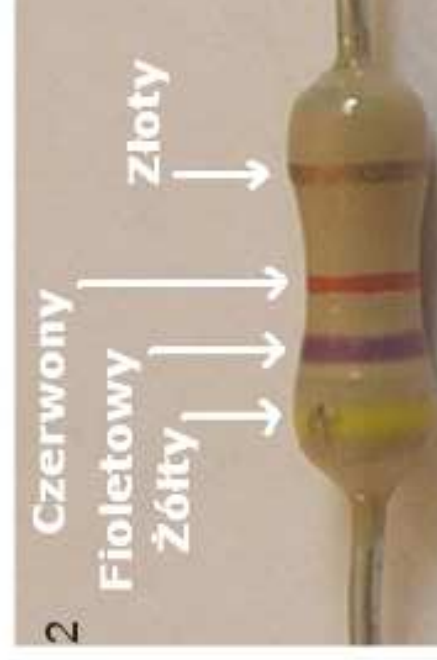
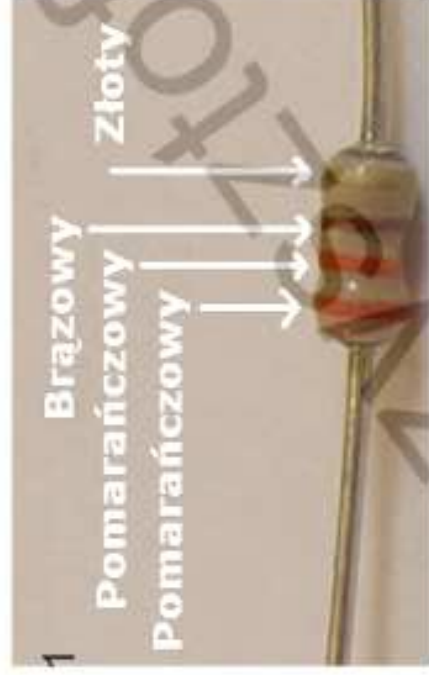
- Oznaczanie wartości
- Kod kolorowy
  - 4, 5 lub 6 pasków

kolor	wartość	mnożnik $10^x$	tolerancja	wsp. temper.
Srebrny		-2	$\pm 10\%$	
Złoty		-1	$\pm 5\%$	
Czarny	0	0		
Brazowy	1	1	$\pm 1\%$	100ppm
Czerwony	2	2	$\pm 2\%$	50ppm
Pomarańczowy	3	3		15ppm
Żółty	4	4		25ppm
Zielony	5	5	$\pm 0,5\%$	
Niebieski	6	6	$\pm 0,25\%$	
Fioletowy	7	7	$\pm 0,1\%$	
Szary	8			
Biały	9			

# Rezystory

- Oznaczanie wartości
  - Kod kolorowy
    - 4, 5 lub 6 pasków

Czarny	0
Braunowy	1
Czerwony	2
Pomarańczowy	3
Żółty	4
Zielony	5
Niebieski	6
Fioletowy	7
Szary	8
Biały	9



# Rezystory

- Oznaczanie wartości
- Kod cyfrowy



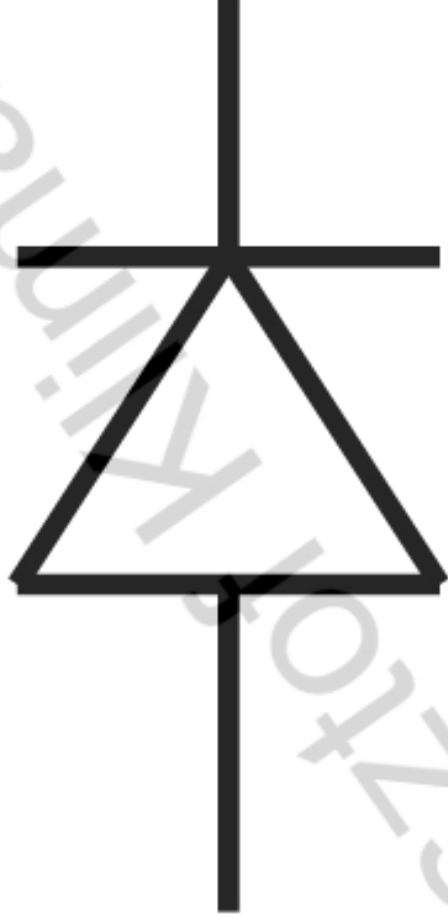
litera	dokładność
B	+/- 0.10pF
C	+/- 0.25pF
D	+/- 0.5pF
E	+/- 0.5%
F	+/- 1%
G	+/- 2%
H	+/- 3%
J	+/- 5%
K	+/- 10%
M	+/- 20%
N	+/- 30%
P	+100% , -0%
Z	+80% , -20%

# Kondensatory

- Stałe
  - Elektrolityczne
- Foliowe, na przykład:
  - Poliesterowe (MKT)
  - Polietylenowe (MKP)
- Ceramiczne
  - klasa 1
  - klasa 2
  - klasa 3
- Mikowe
  - inne
- Polimerowe
- Superkondensatory

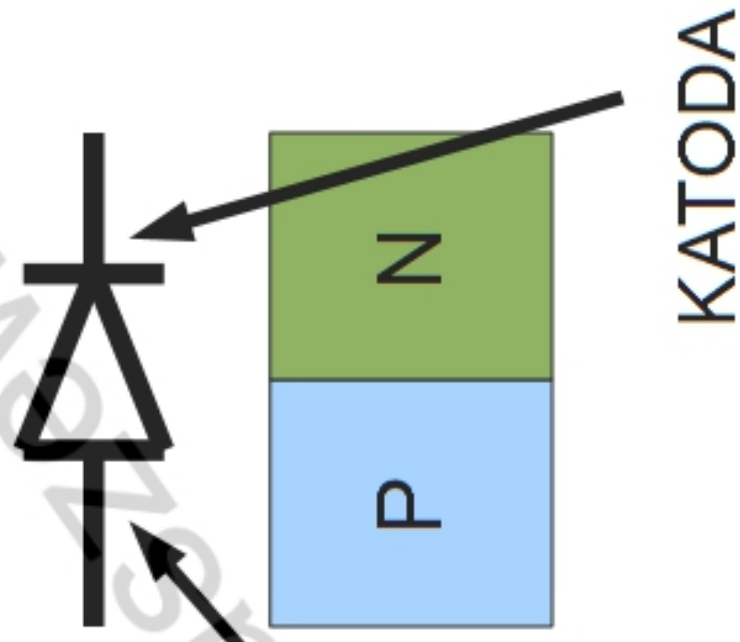
# Diody

- Dioda półprzewodnikowa



# Dioda

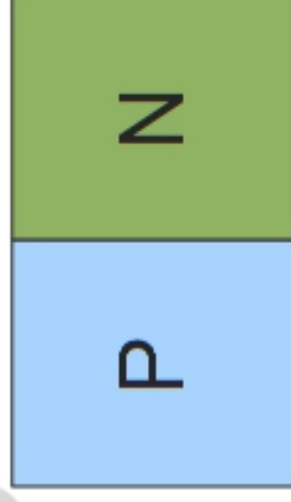
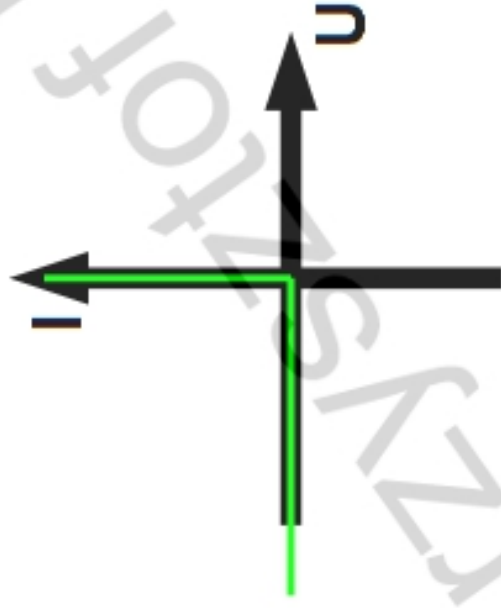
- Dioda półprzewodnikowa



# Dioda

- Dioda półprzewodnikowa

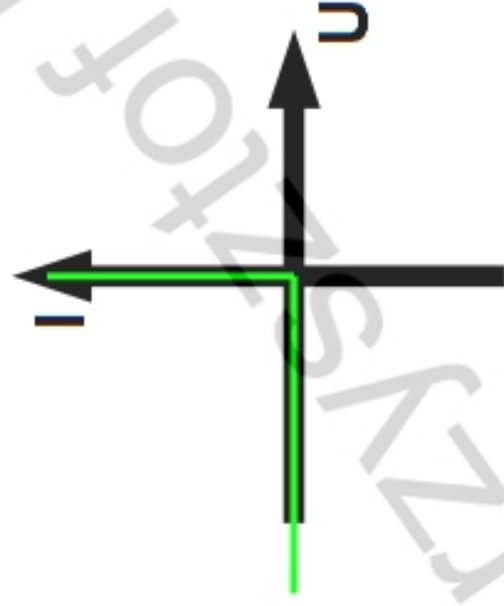
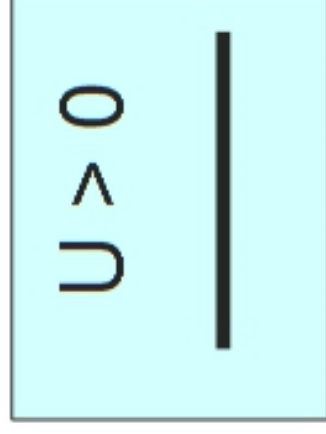
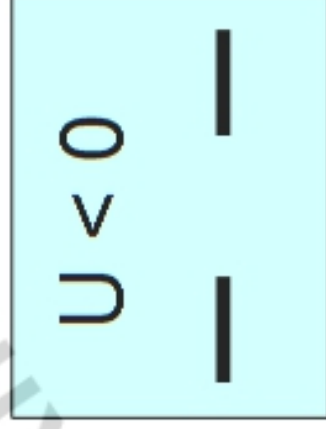
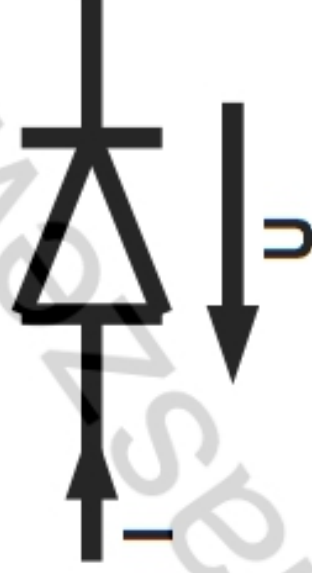
Model 1:



# Dioda

- Dioda półprzewodnikowa

Model 1:

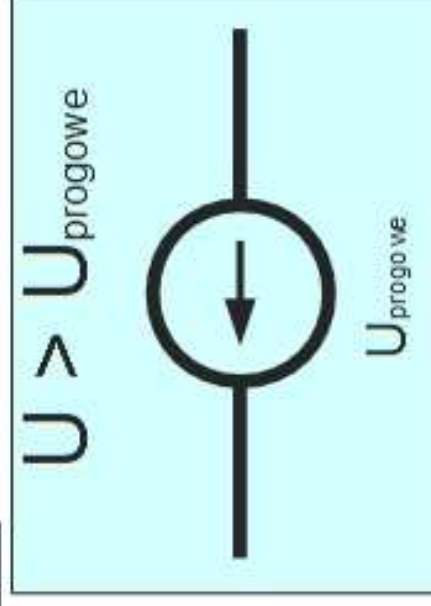
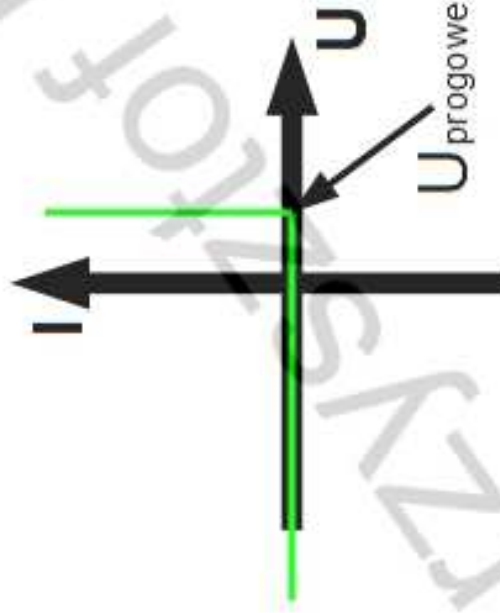
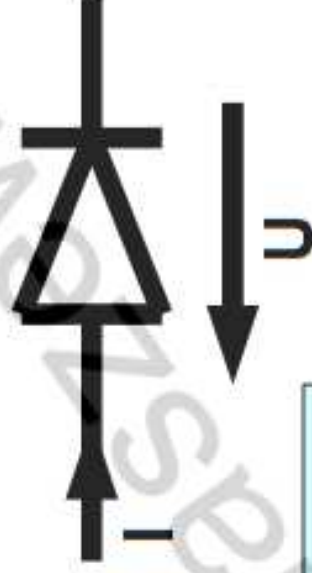




# Dioda

- Dioda półprzewodnikowa

Model 2:



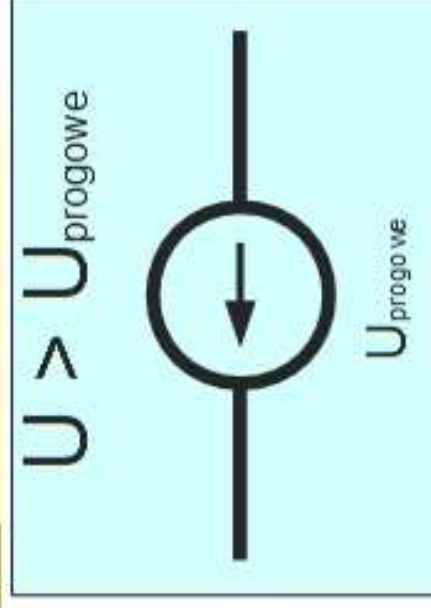
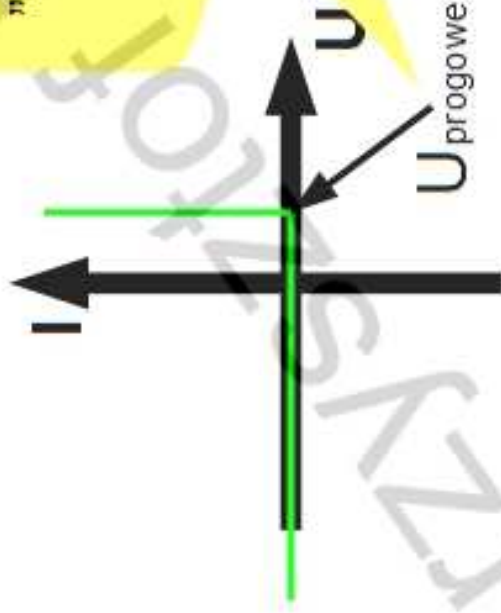
# Dioda

- Dioda półprzewodnikowa

Model 2:



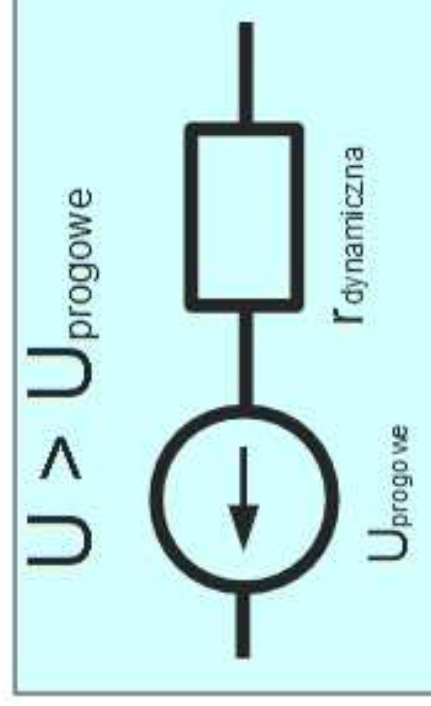
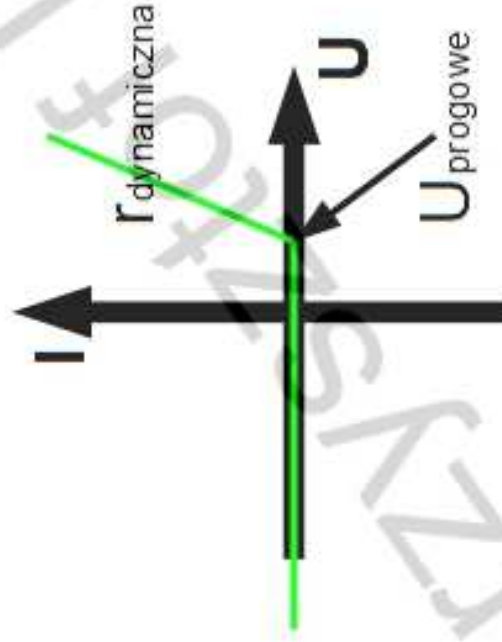
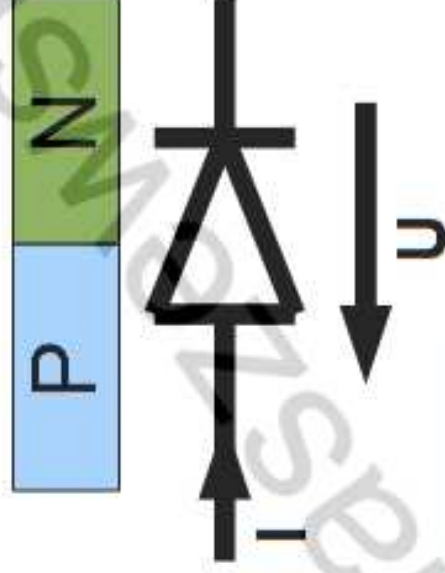
"umowne" wartości napięcia progowego  
diody krzemowe 0,7V  
diody germanowe 0,3V



# Dioda

- Dioda półprzewodnikowa

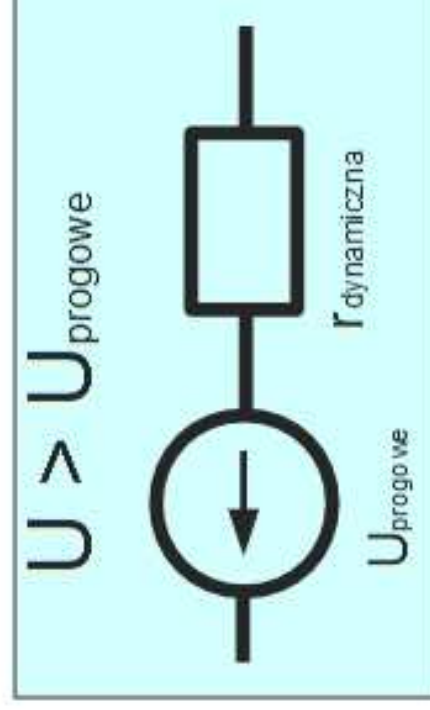
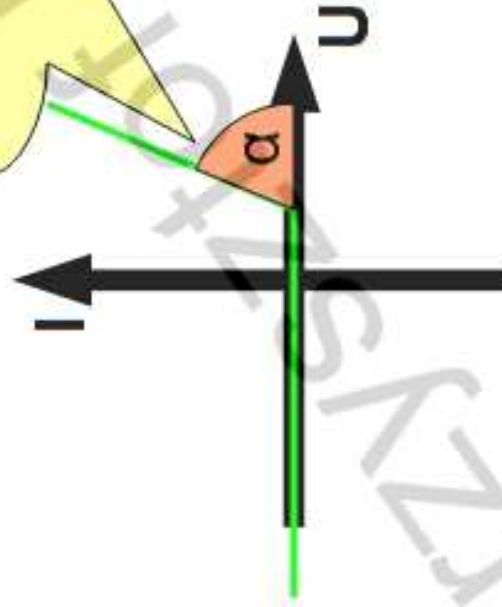
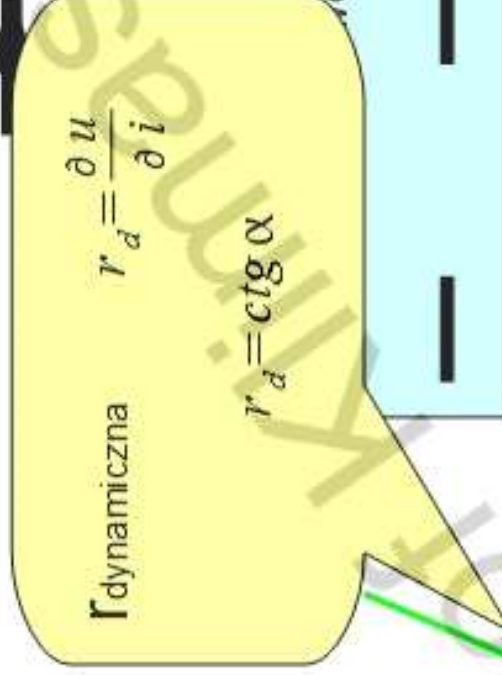
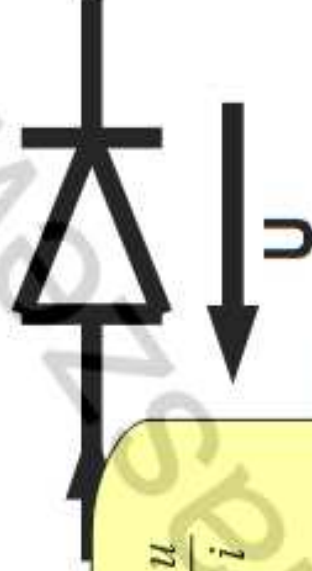
Model 3:



# Dioda

- Dioda półprzewodnikowa

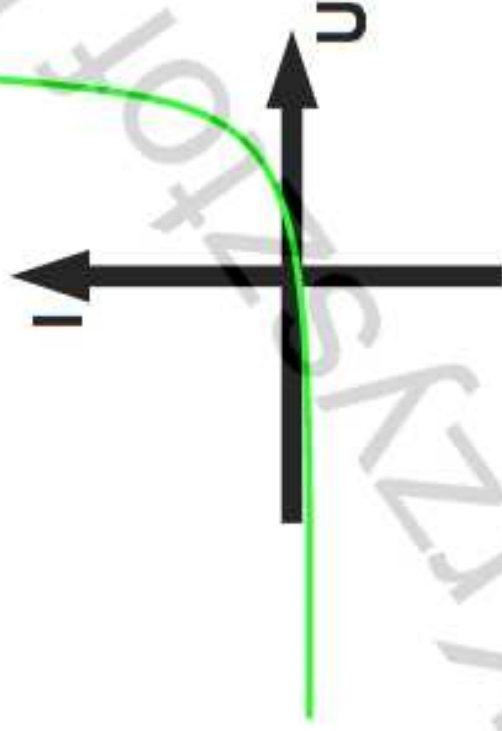
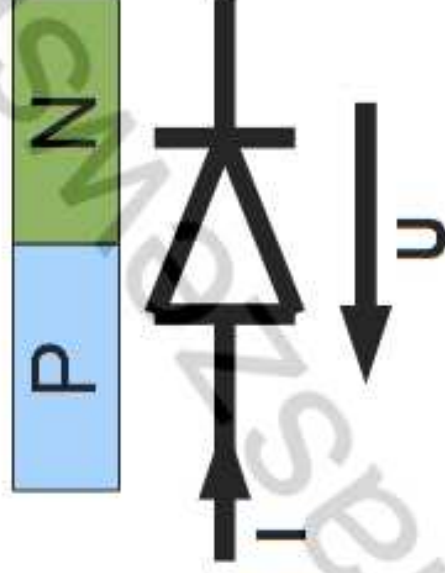
Model 3:



# Dioda

- Dioda półprzewodnikowa

Model 4:



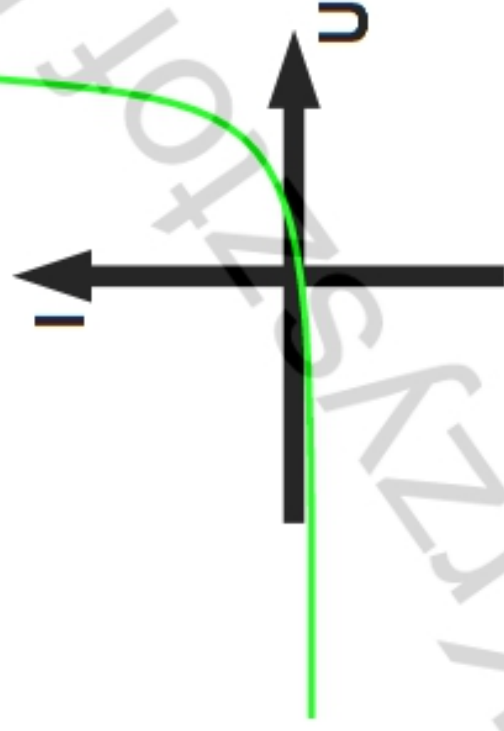
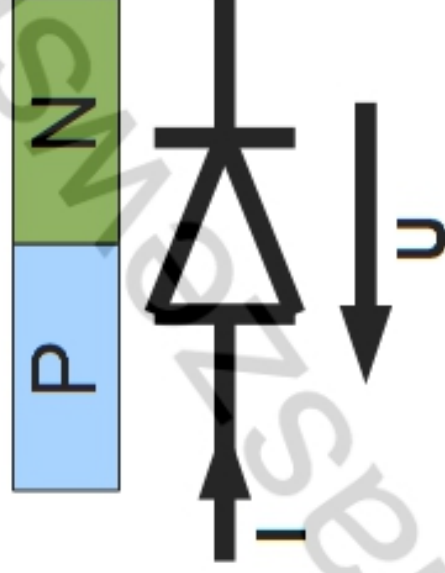
$$I_D = I_S \left( e^{\frac{U_D}{n \cdot U_T}} - 1 \right)$$

równanie Shockleya

# Dioda

- Dioda półprzewodnikowa

Model 4:



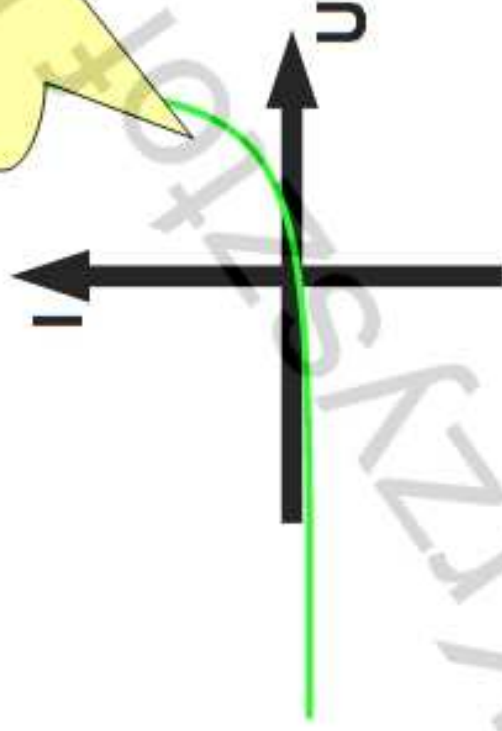
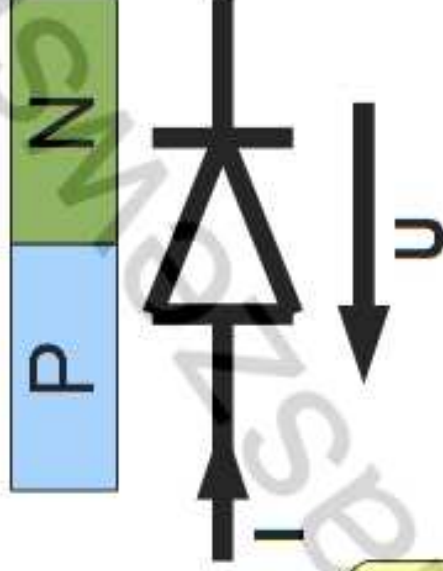
$$I_D = I_S e^{\frac{U_D}{U_T}}$$

# Dioda

- Dioda półprzewodnikowa

Model 4:

$$r_{\text{dynamiczna}} = \frac{\partial u}{\partial i}$$



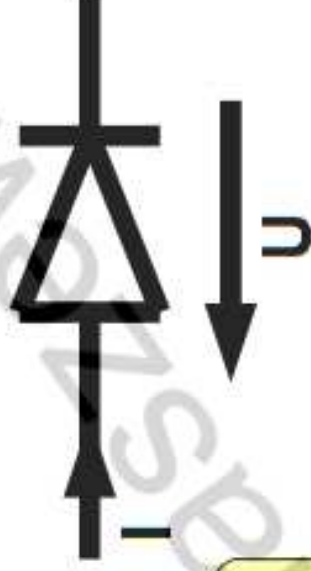
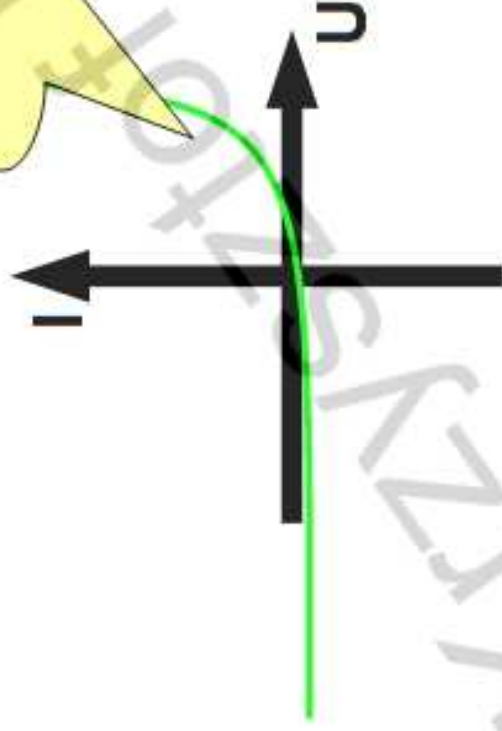
$$I_D = I_S e^{\frac{U_D}{U_T}}$$

# Dioda

- Dioda półprzewodnikowa

Model 4:

dynamiczna  $r_d = \frac{\partial u}{\partial i}$



$$I_D = I_S e^{\frac{U_D}{U_T}}$$

$$U_D = U_T \ln \frac{I_D}{I_S}$$

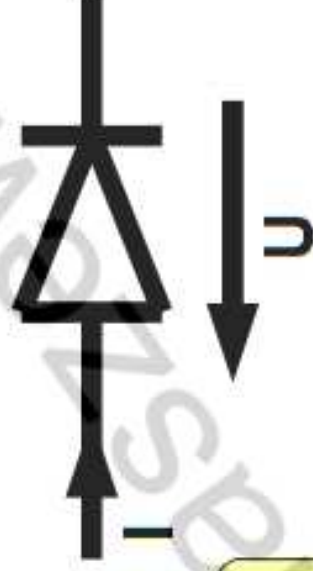
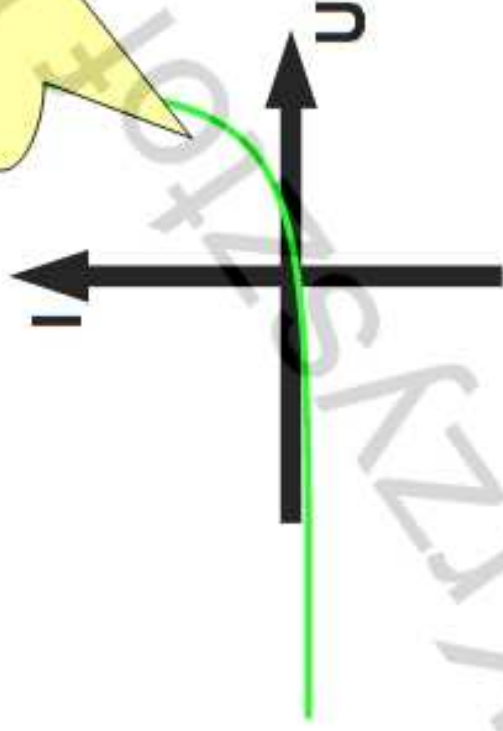
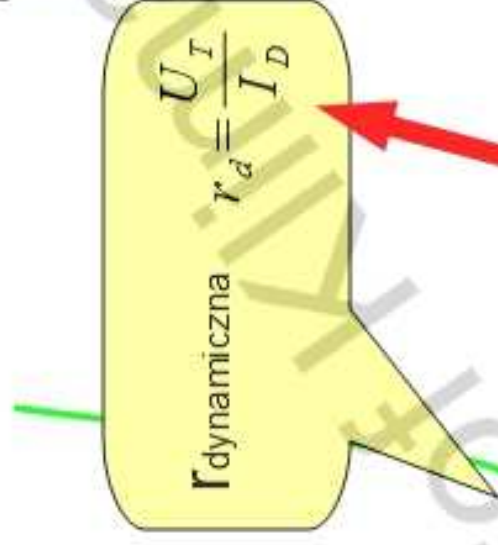
$$r_d = \frac{U_T}{I_D}$$



# Dioda

- Dioda półprzewodnikowa

Model 4:



$$I_D = I_S e^{\frac{U_D}{U_T}}$$

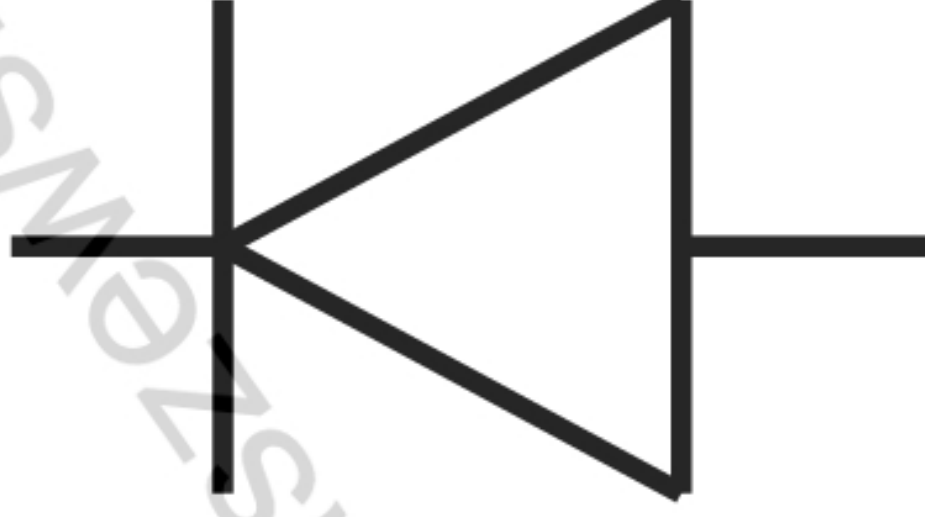
$$U_D = U_T \ln \frac{I_D}{I_S}$$

$$r_d = \frac{U_T}{I_D}$$

Zależy od prądu diody!

# Dioda prostownicza

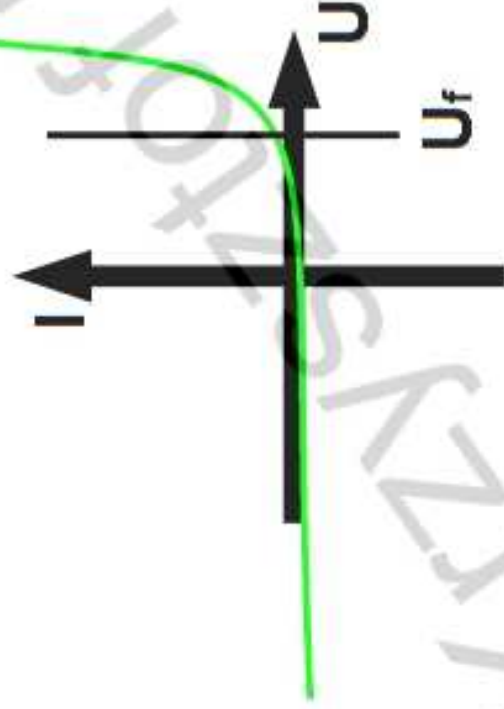
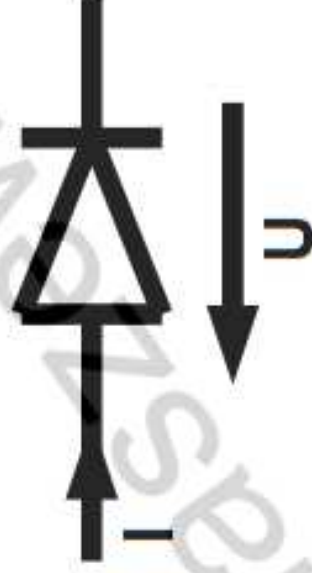
- Dioda krzemowa
- Dioda germanowa



# Dioda prostownicza



- Napięcie przewodzenia



$U_f$  zależy od materiału, z którego wykonana jest dioda

dioda krzemowa:  $\sim 0,6 - 0,7 \text{ V}$

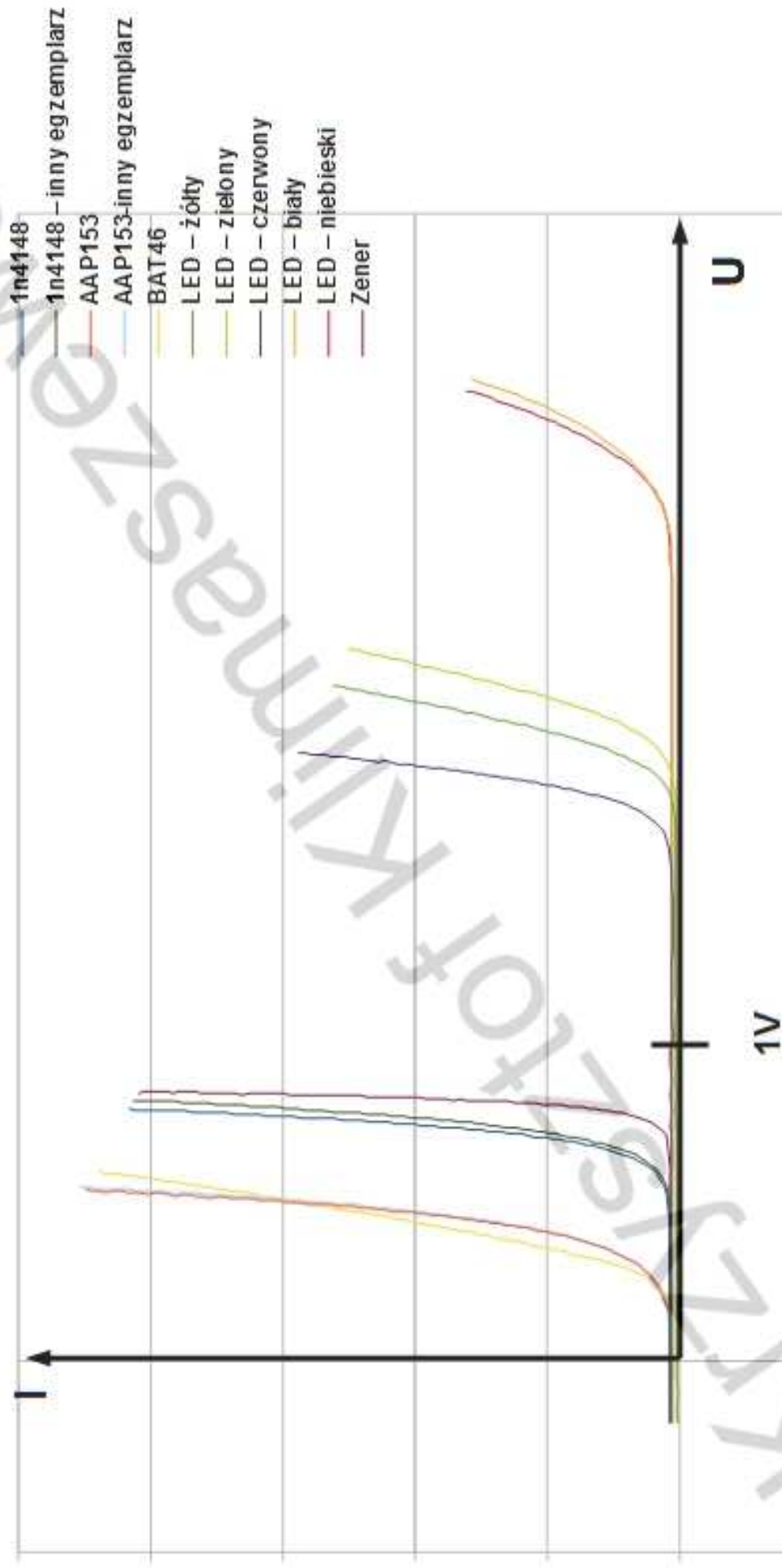
dioda germanowa:  $\sim 0,3 \text{ V}$

dioda Schottky'ego:  $\sim 0,3 \text{ V}$

LED czerwony  $< 2 \text{ V}$

LED niebieski  $3 \text{ V}$

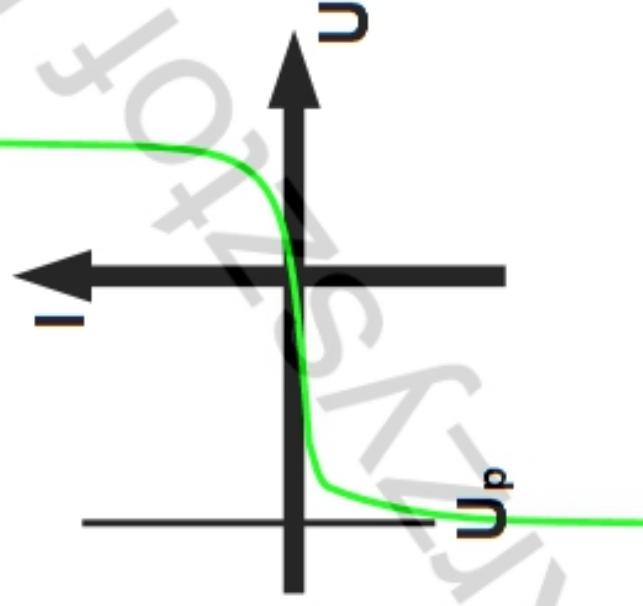
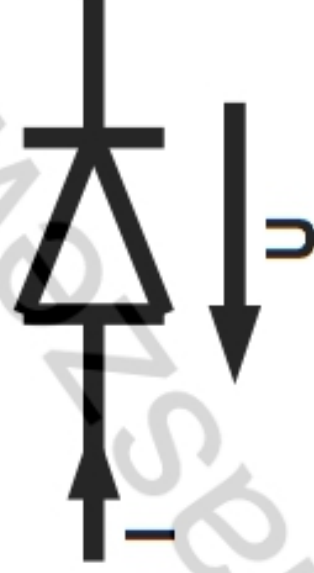
# Dioda prostownicza



# Dioda prostownicza



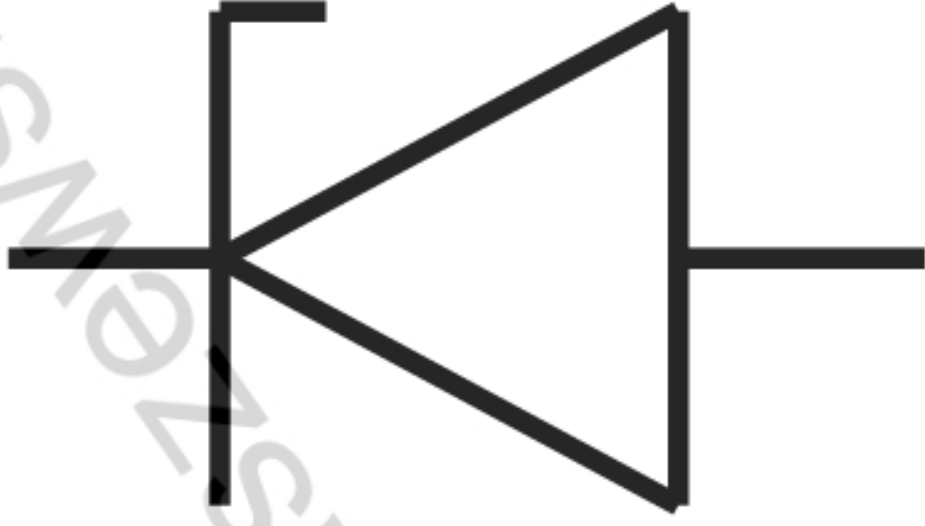
- Polaryzacja zaporowa – napięcie przebicia



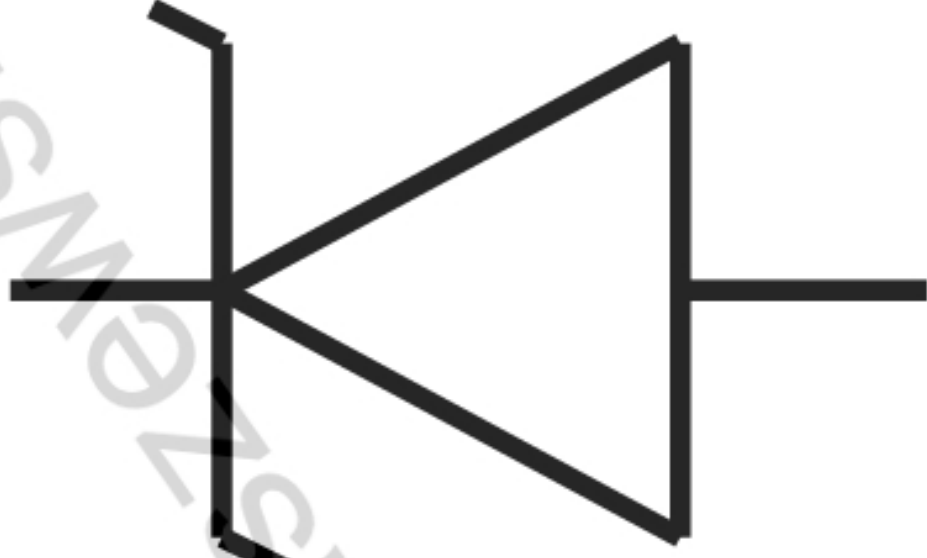
$U_p$  zależy od typu diody

wartości od kilkudziesięciu  
woltów do kilku tysięcy woltów

# Dioda Zenera



# Dioda Zenera



# Transil

- Transil
- jednokierunkowy



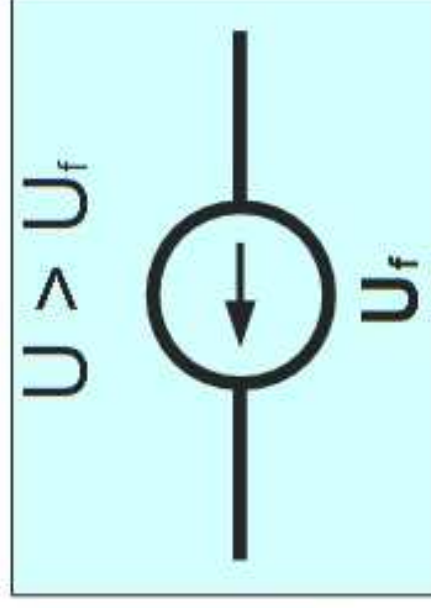
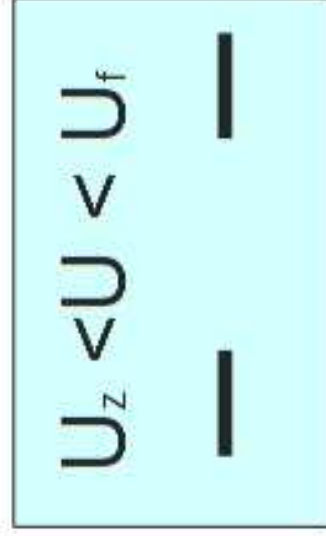
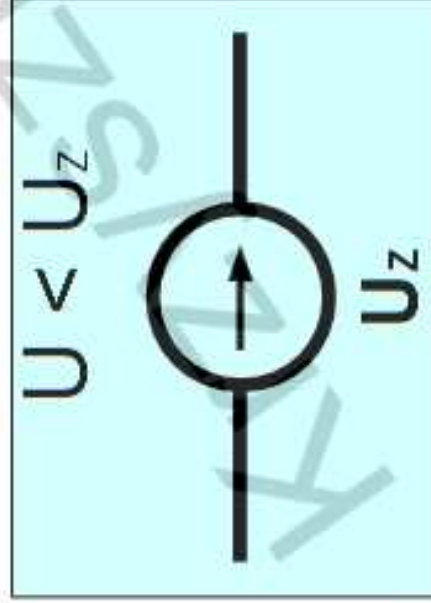
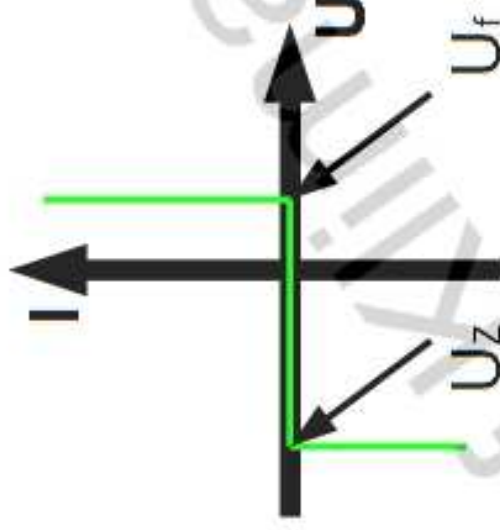
- dwukierunkowy



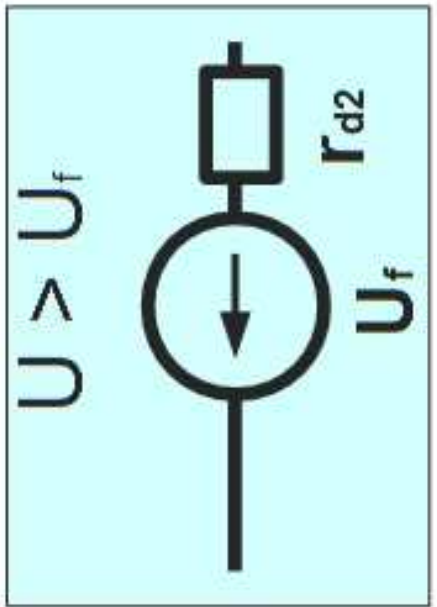
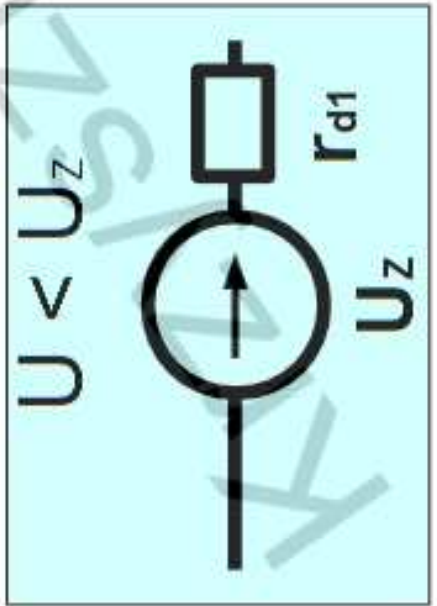
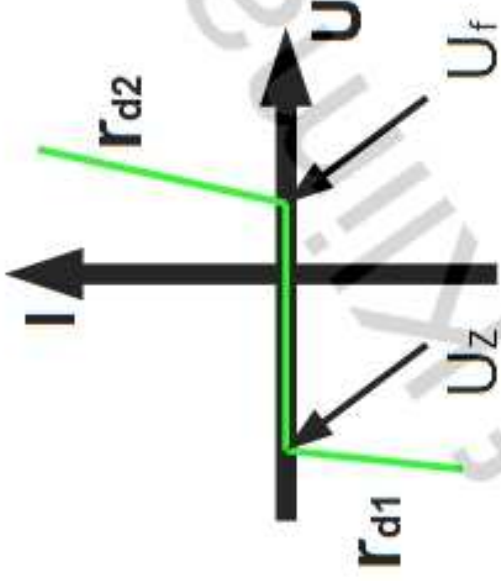
bardzo szybka dioda  
zabezpieczająca



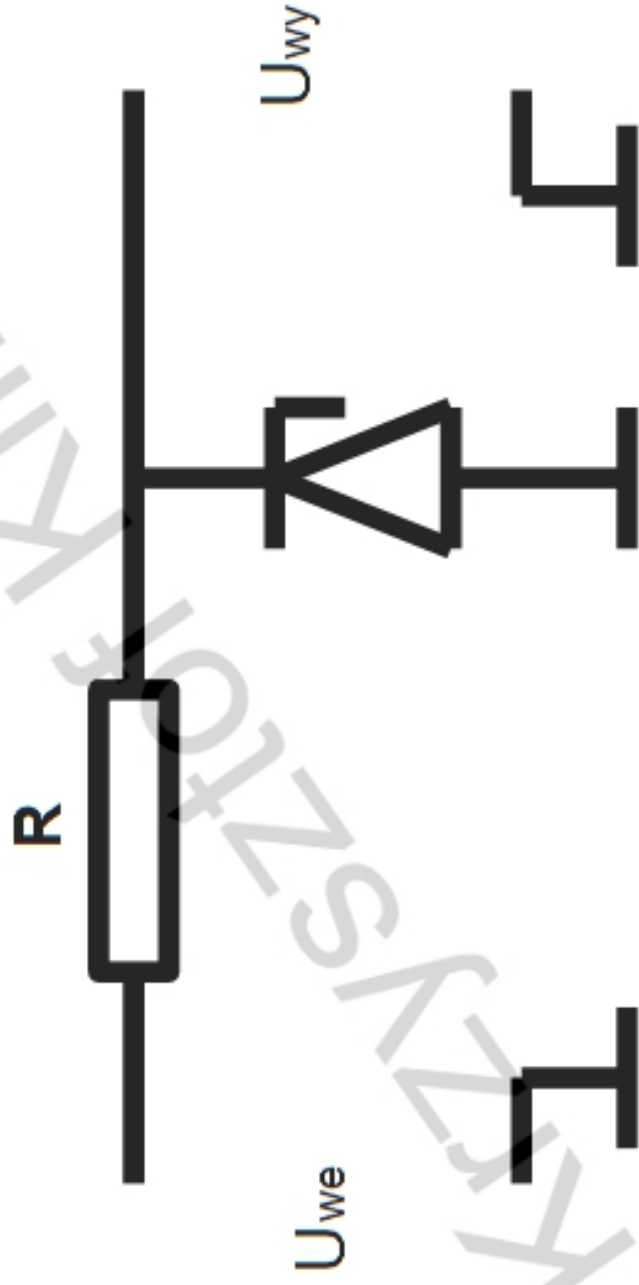
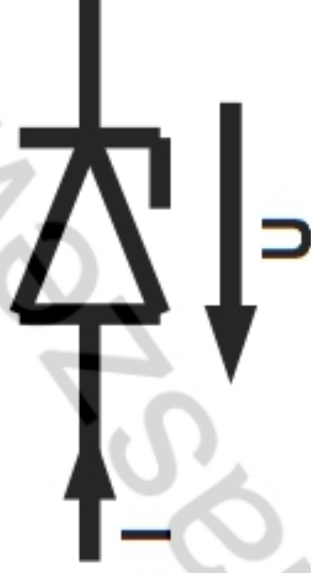
# Dioda Zenera



# Dioda Zenera

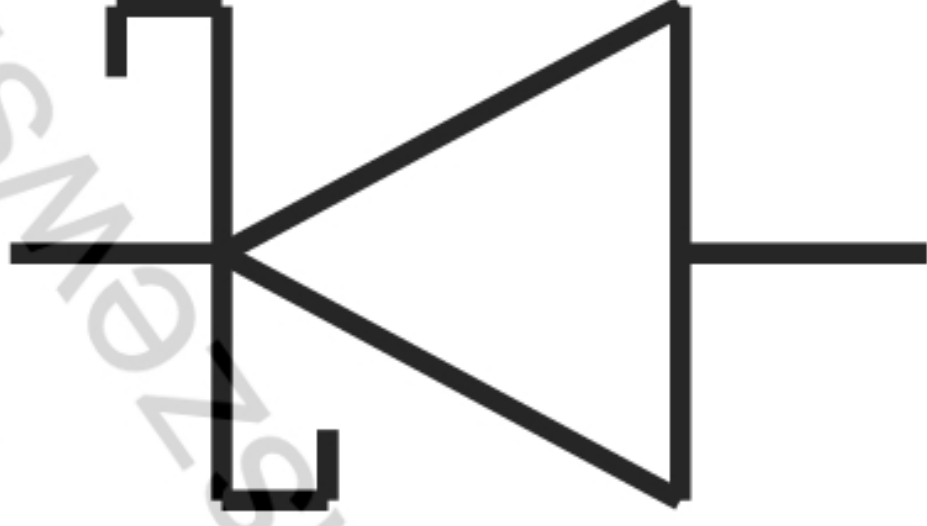


# Dioda Zenera



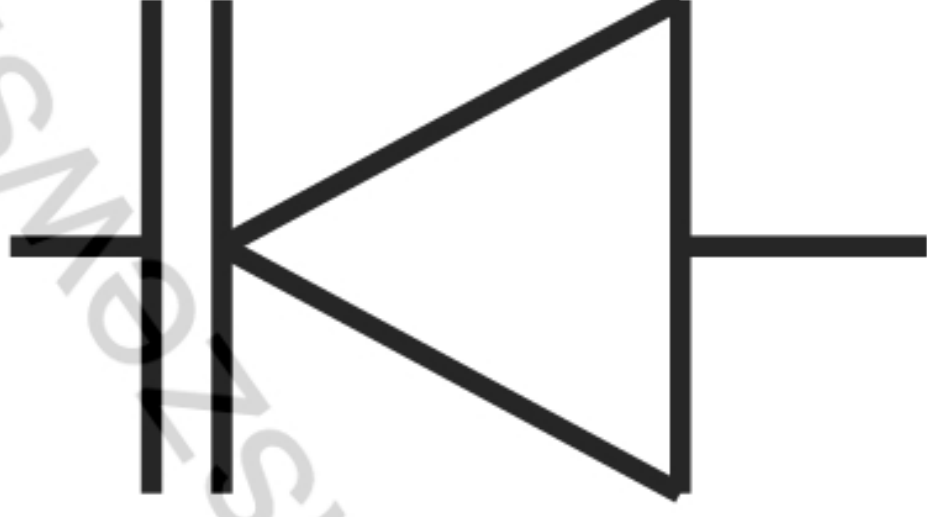


# Dioda Schottky'ego



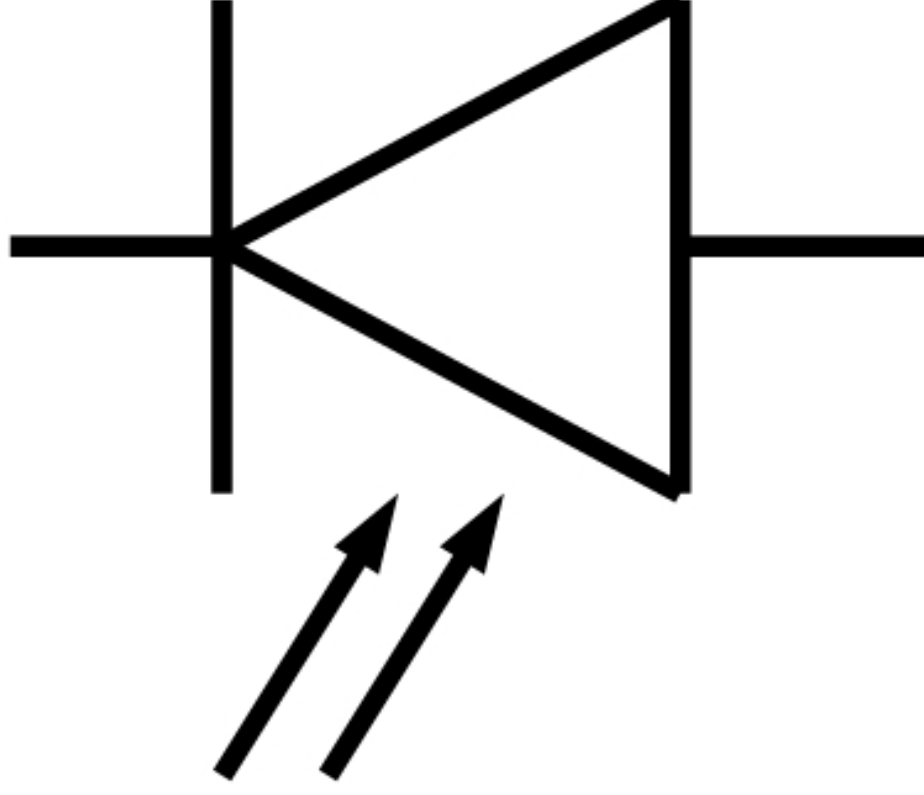
# Dioda

- Dioda pojemnościowa



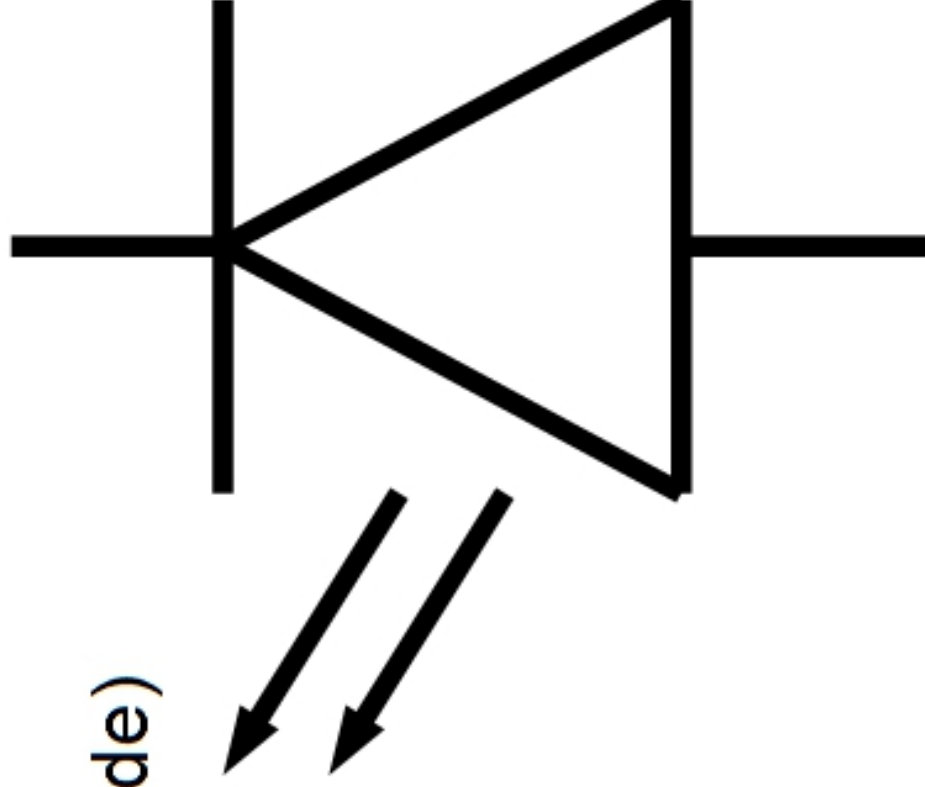
# Dioda

- Fotodioda



# Dioda

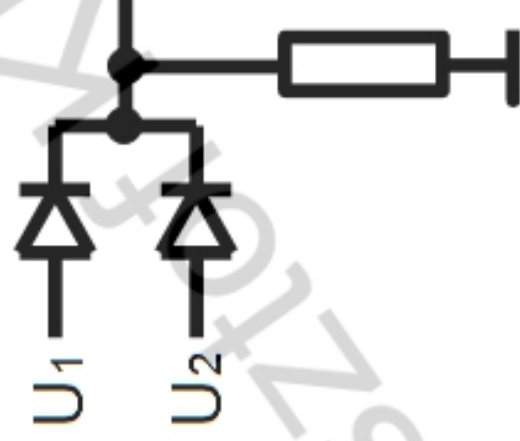
- LED (Light Emitting Diode)





## Niektóre zastosowania diod

- zasilanie
- przełączanie napięcia zasilania, układy logiczne



## Niektóre zastosowania diod

- oświetlenie, kontrolki, wskaźniki
- wyświetlacze (np. siedmiosegmentowe)



wspólna anoda

## Niektóre zastosowania diod

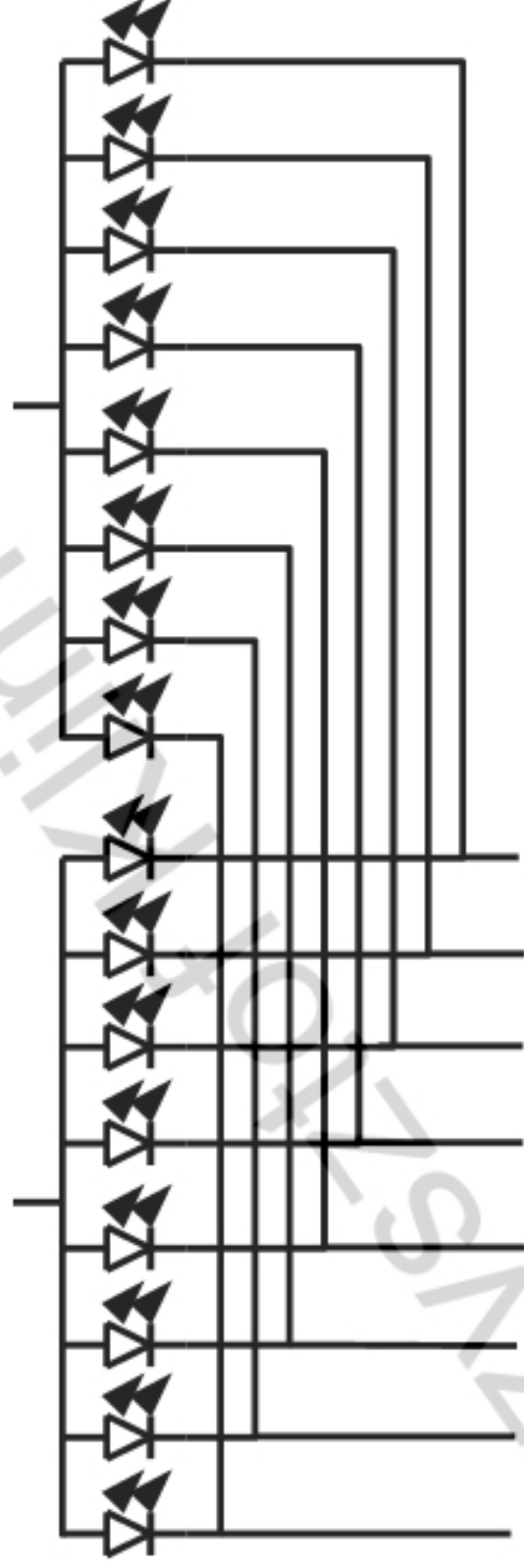
- oświetlenie, kontrolki, wskaźniki
- wyświetlacze (np. siedmiosegmentowe)



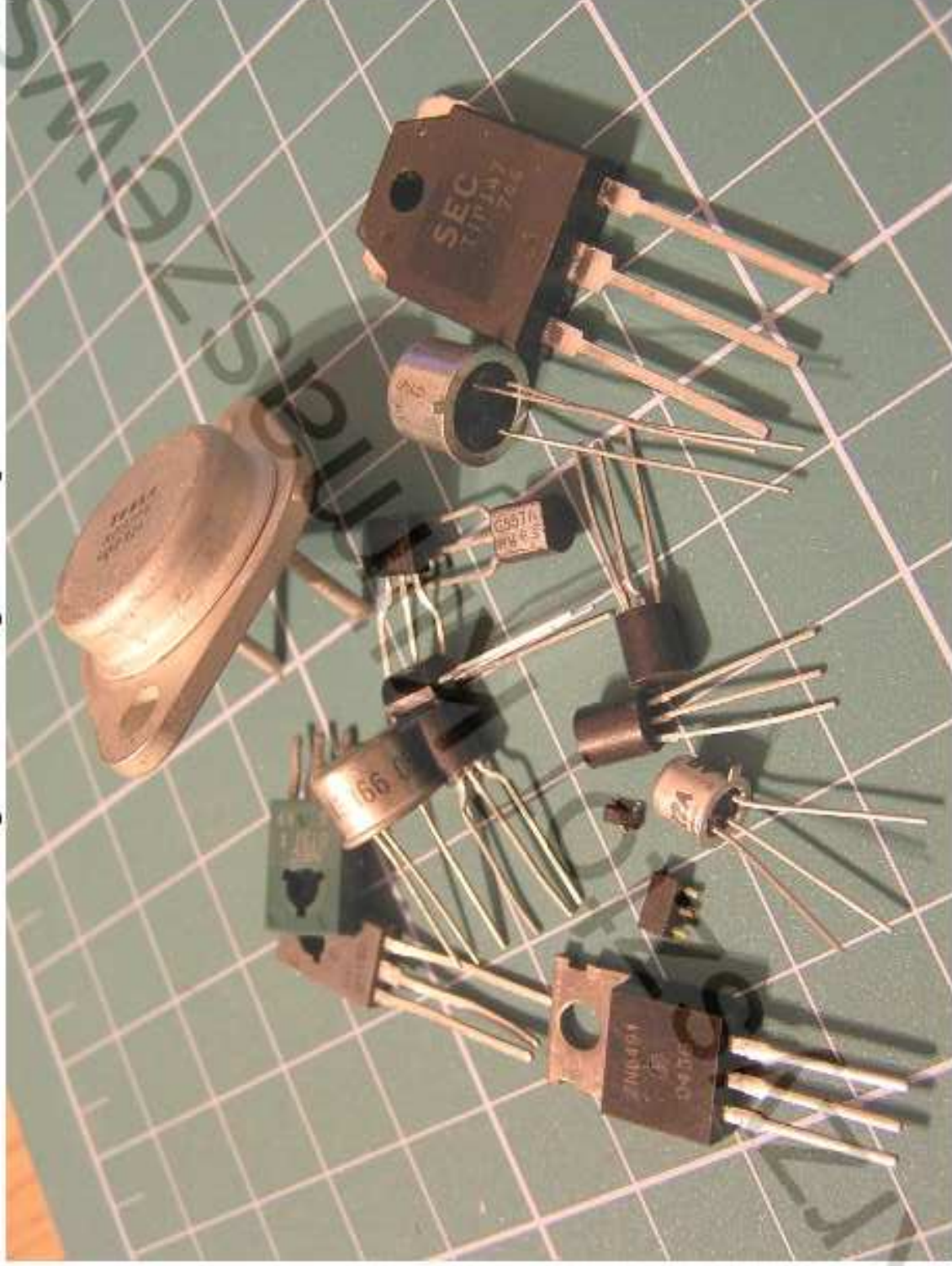
wspólna katoda

## Niektóre zastosowania diod

- oświetlenie, kontrolki, wskaźniki
- wyświetlacze (np. siedmiosegmentowe)

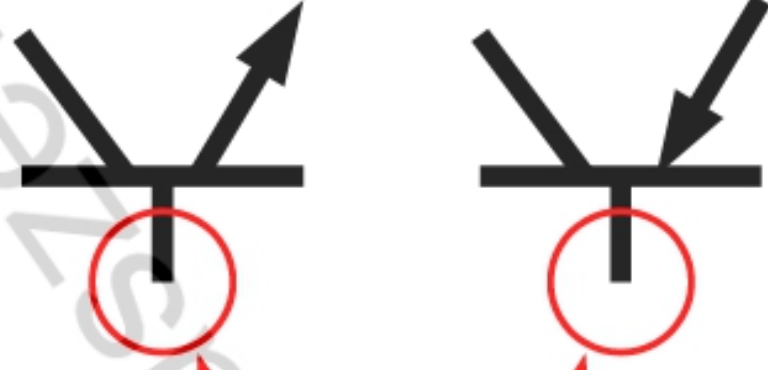


# Tranzystory bipolarné



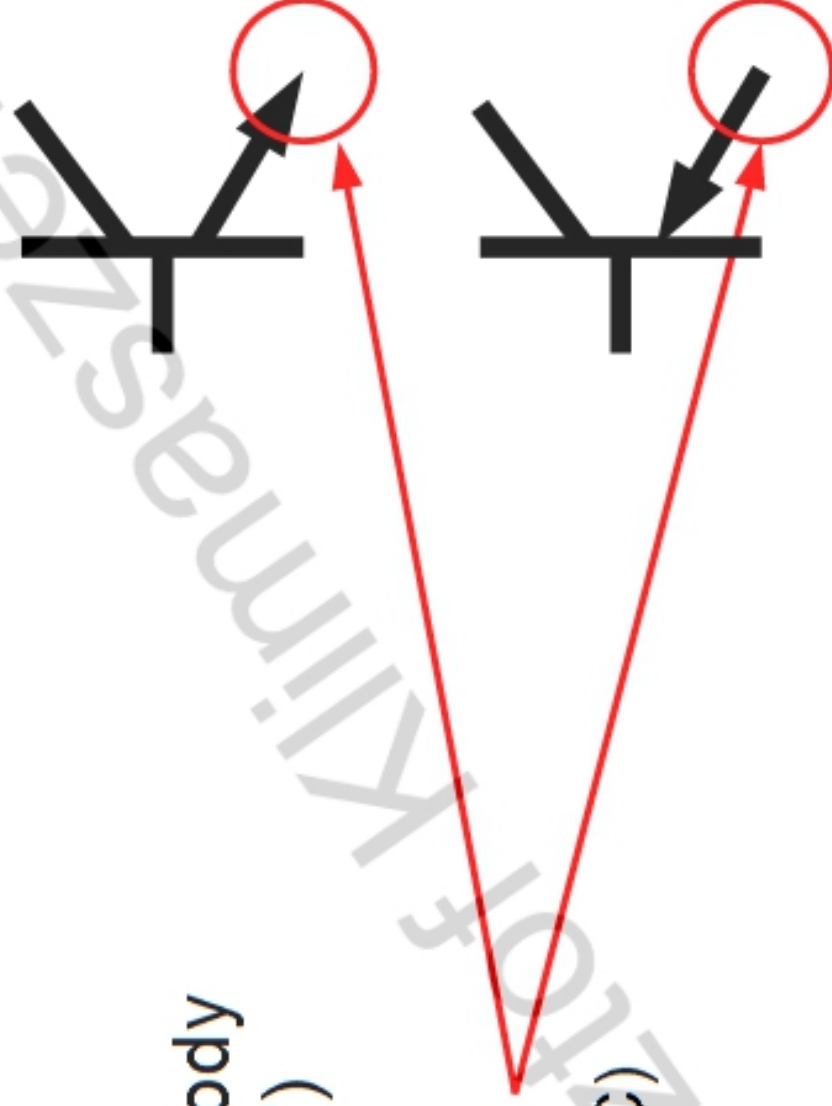
# Tranzystory bipolarne

- ma 3 elektrody („końcówki”)
- baza (B)
- emiter (E)
- kolektor (C)



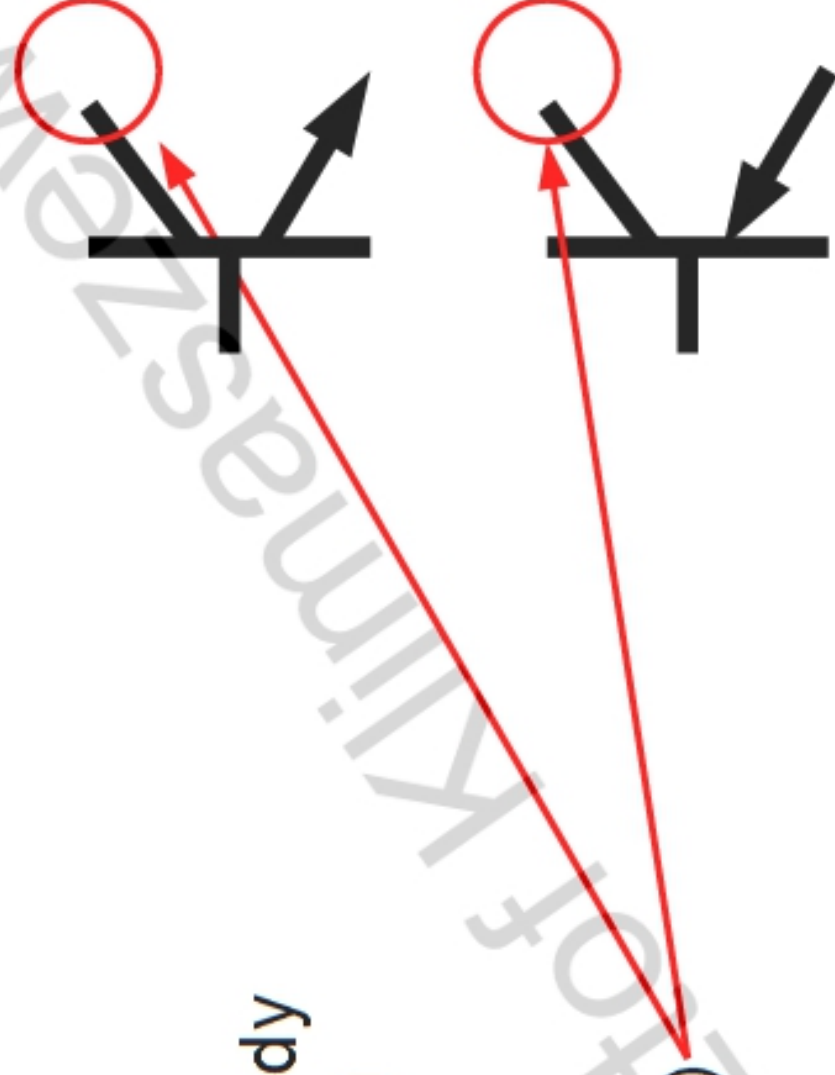
# Tranzystory bipolarne

- ma 3 elektrody („końcówki”)
- baza (B)
- emiter (E)
- kolektor (C)



# Tranzystory bipolarne

- ma 3 elektrody („końcówki”)
- baza (B)
- emiter (E)
- kolektor (C)





# Tranzystory bipolarne

- 2 typy tranzystorów bipolarnych:

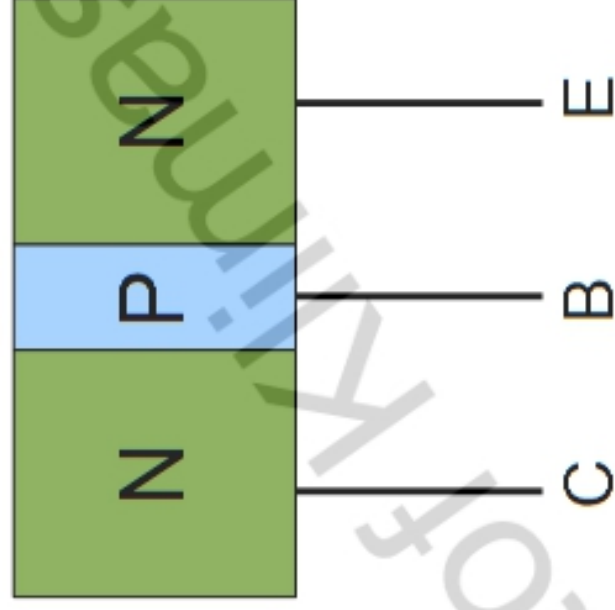
- PNP



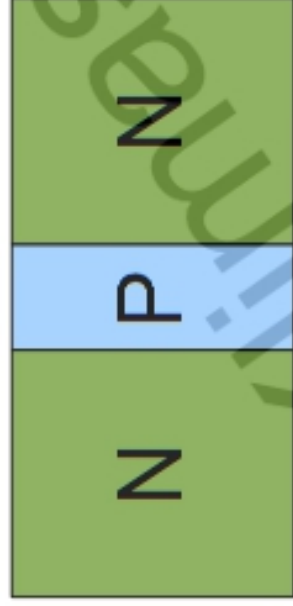
- NPN



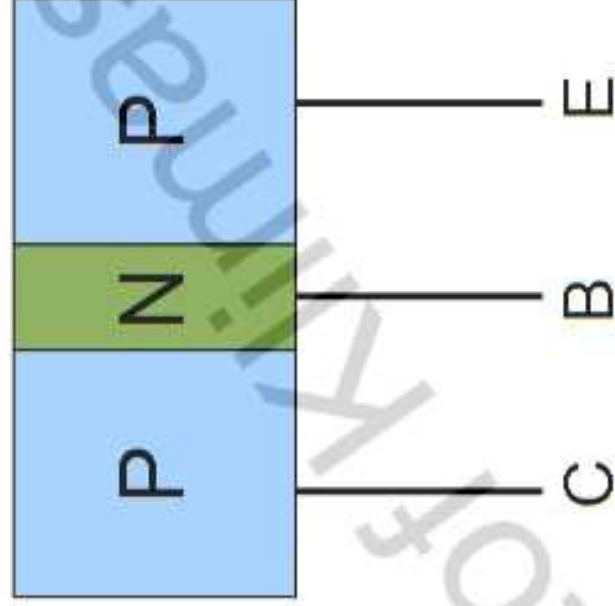
# Tranzystor NPN



# Tranzystor NPN



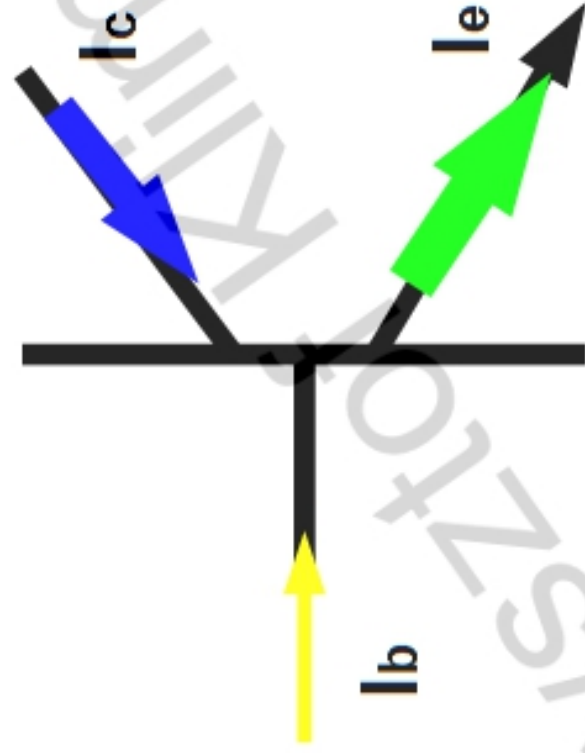
# Tranzystor PNP



# Tranzystor PNP



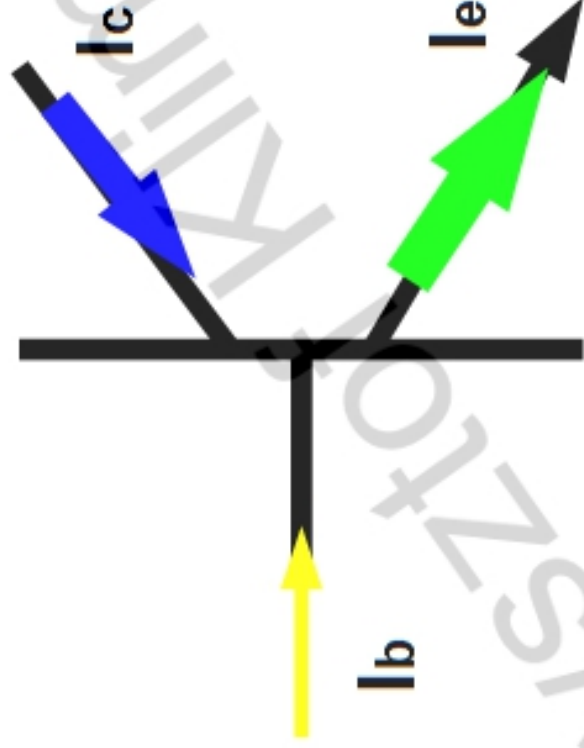
# Jak działa tranzystor



$$I_c = \beta \cdot I_b$$
$$I_e = I_c + I_b$$

# Jak działa tranzystor

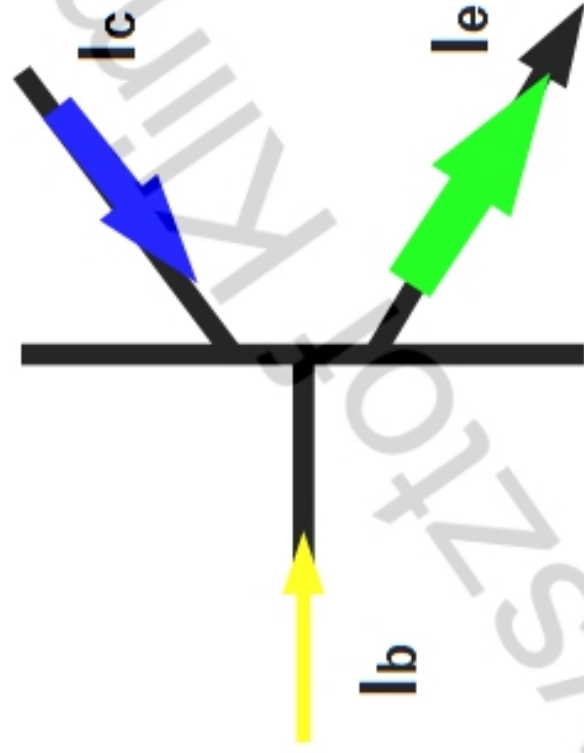
wzmocnienie  
prądowe



$$I_c = \beta \cdot I_b$$
$$I_e = I_c + I_b$$

# Jak działa tranzystor

wzmocnienie  
prądowe



$$I_c = \beta \cdot I_b$$

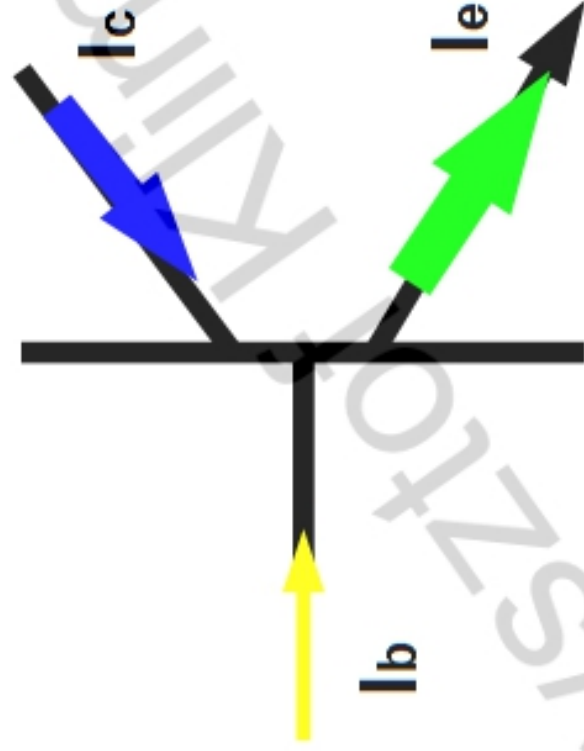
$$I_e = I_c + I_b$$

ile wynosi  $\frac{I_c}{I_e}$  ?



# Jak działa tranzystor

wzmocnienie  
prądowe



$$I_c = \beta \cdot I_b$$
$$I_e = I_c + I_b$$

$$\frac{I_c}{I_e} = \frac{\beta \cdot I_b}{\beta \cdot I_b + I_b} = \frac{\beta}{\beta + 1} = \alpha$$

# Jak działa tranzystor

typowe wartości:  
od około 10  
do około 1000

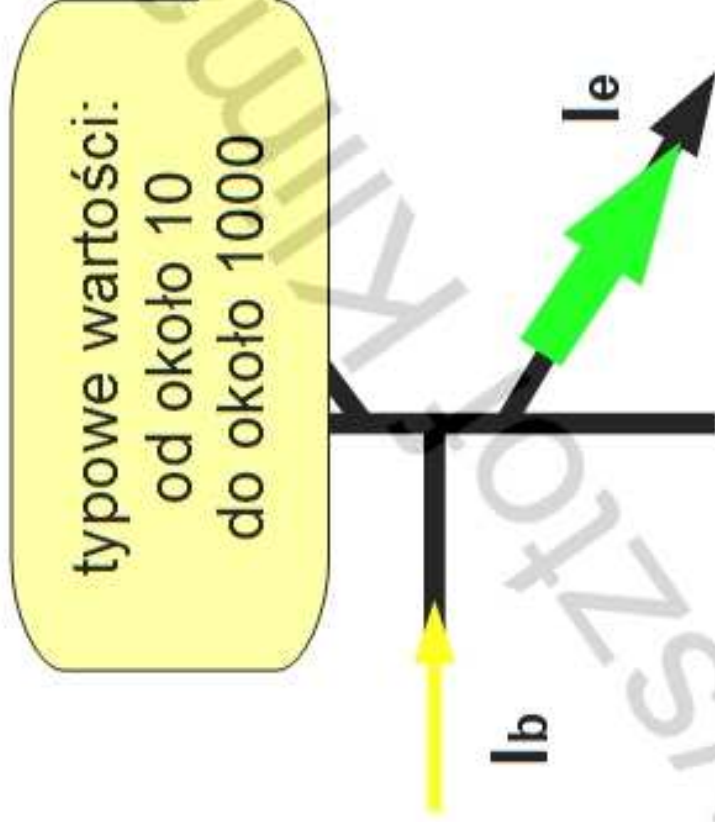
wzmocnienie  
prądowe

$$I_c \approx \beta \cdot I_b$$

$$I_e = I_c + I_b$$

$I_b$

$I_e$



# Jak działa tranzystor

wzmocnienie  
prądowe

$$I_c = \beta \cdot I_b$$
$$I_e = I_c + I_b$$

typowe wartości:  
od około 10  
do około 1000

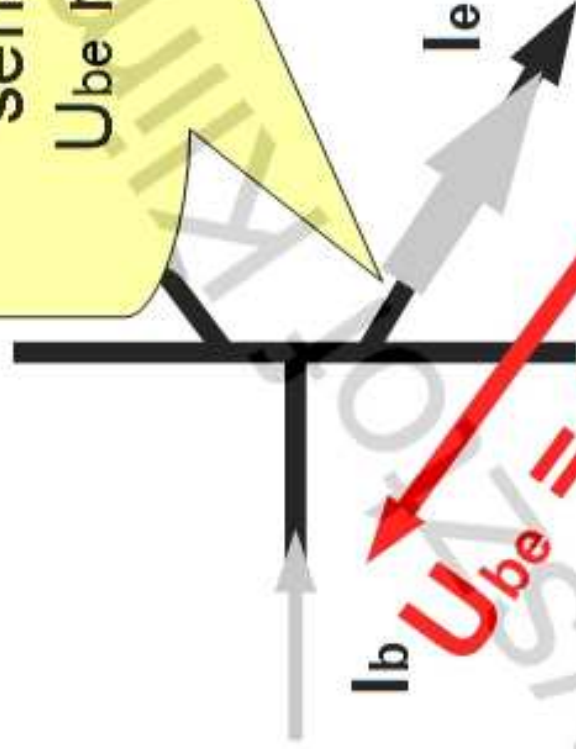
$I_b$

bardzo „kapryśny” parametr –  
zależy od **bardzo** wielu czynników

# Jak działa tranzystor

wzmocnienia

żeby mógł w ogóle popłynąć  
sensowny prąd bazy,  
 $U_{be}$  musi wynosić 0,7V

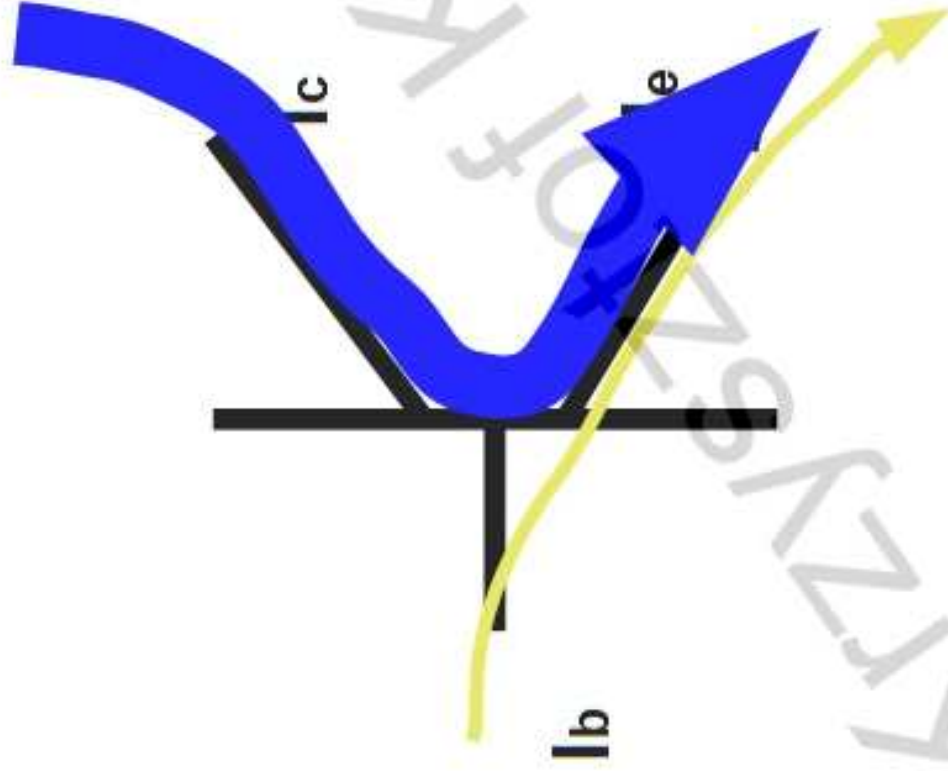


$$I_c = \beta \cdot I_b$$

$$I_e = I_c + I_b$$

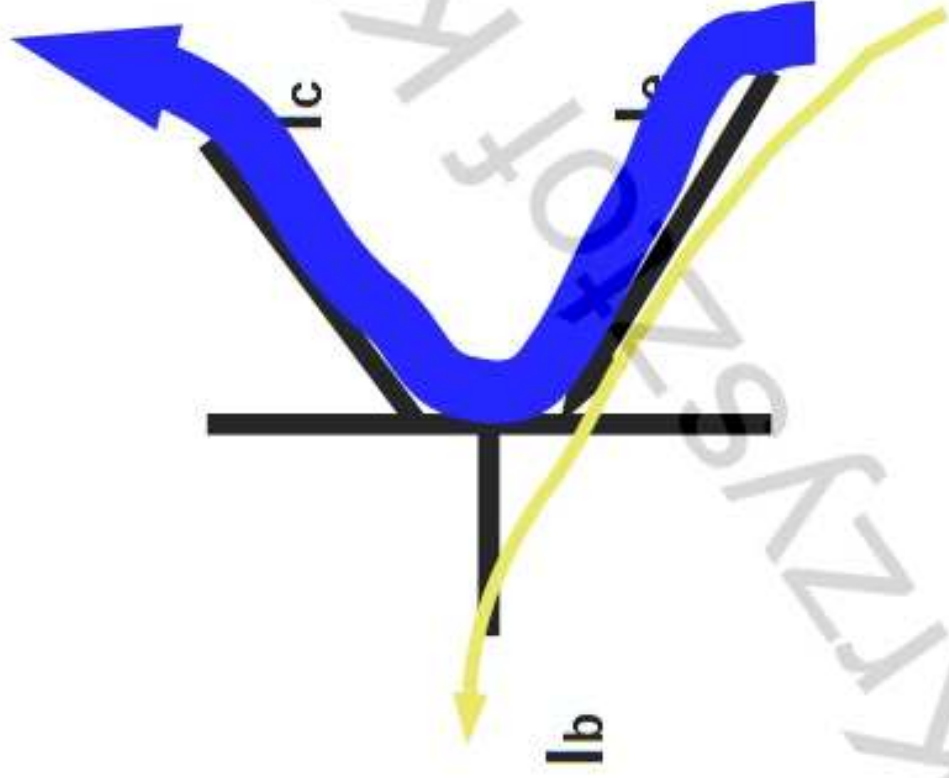
# Jak działa tranzystor

- mały prąd bazy steruje dużym prądem kolektora

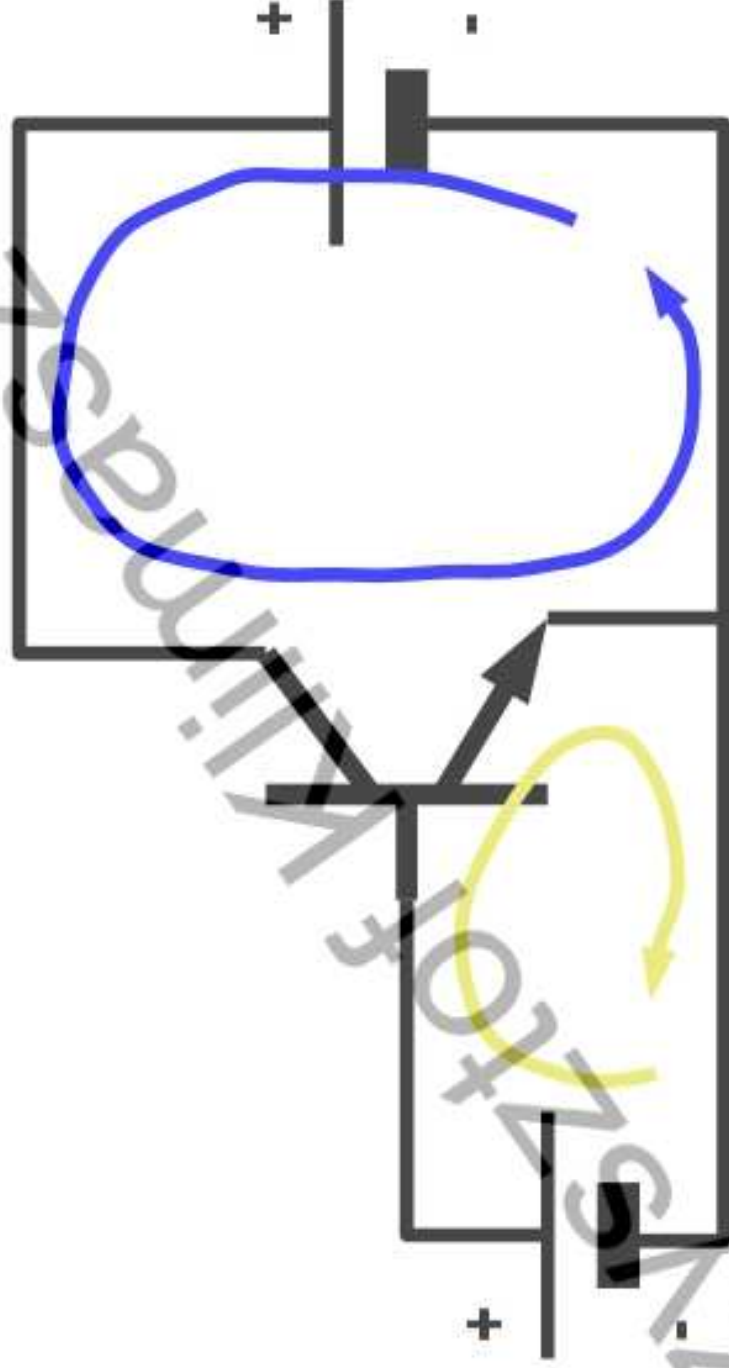


# Jak działa tranzystor PNP?

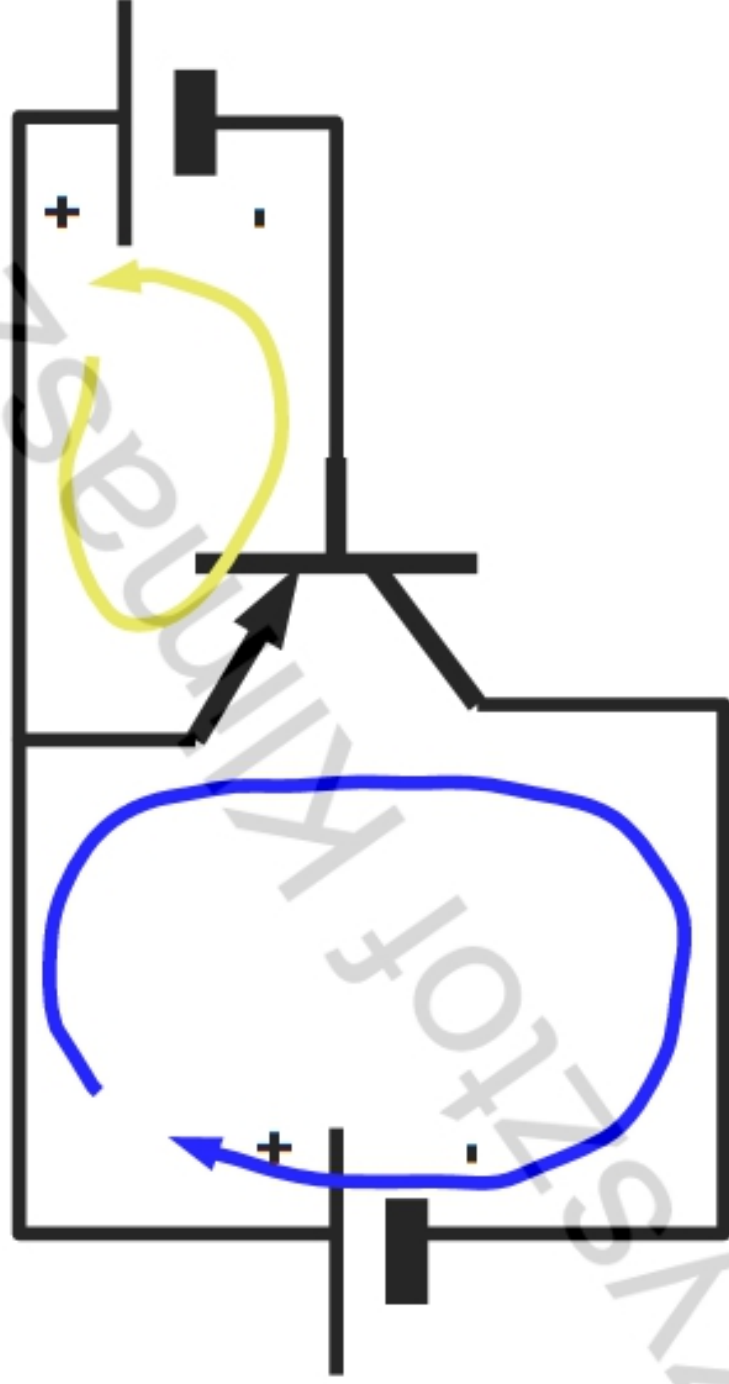
- odwracamy kierunki płynięcia prądów i...  
gotowe!



Jak podłączać napięcia do NPN?

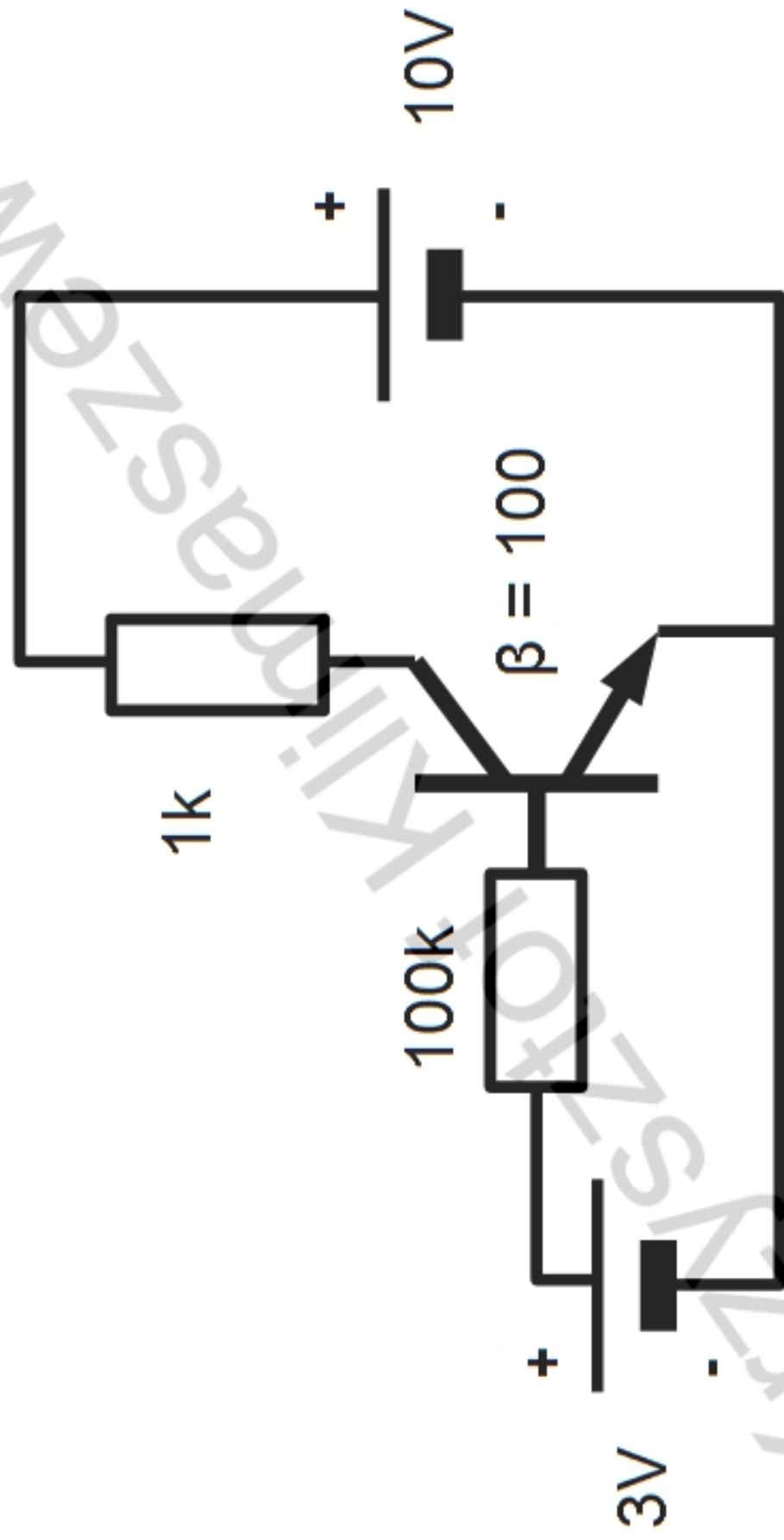


Jak podłączać napięcia do PNP?





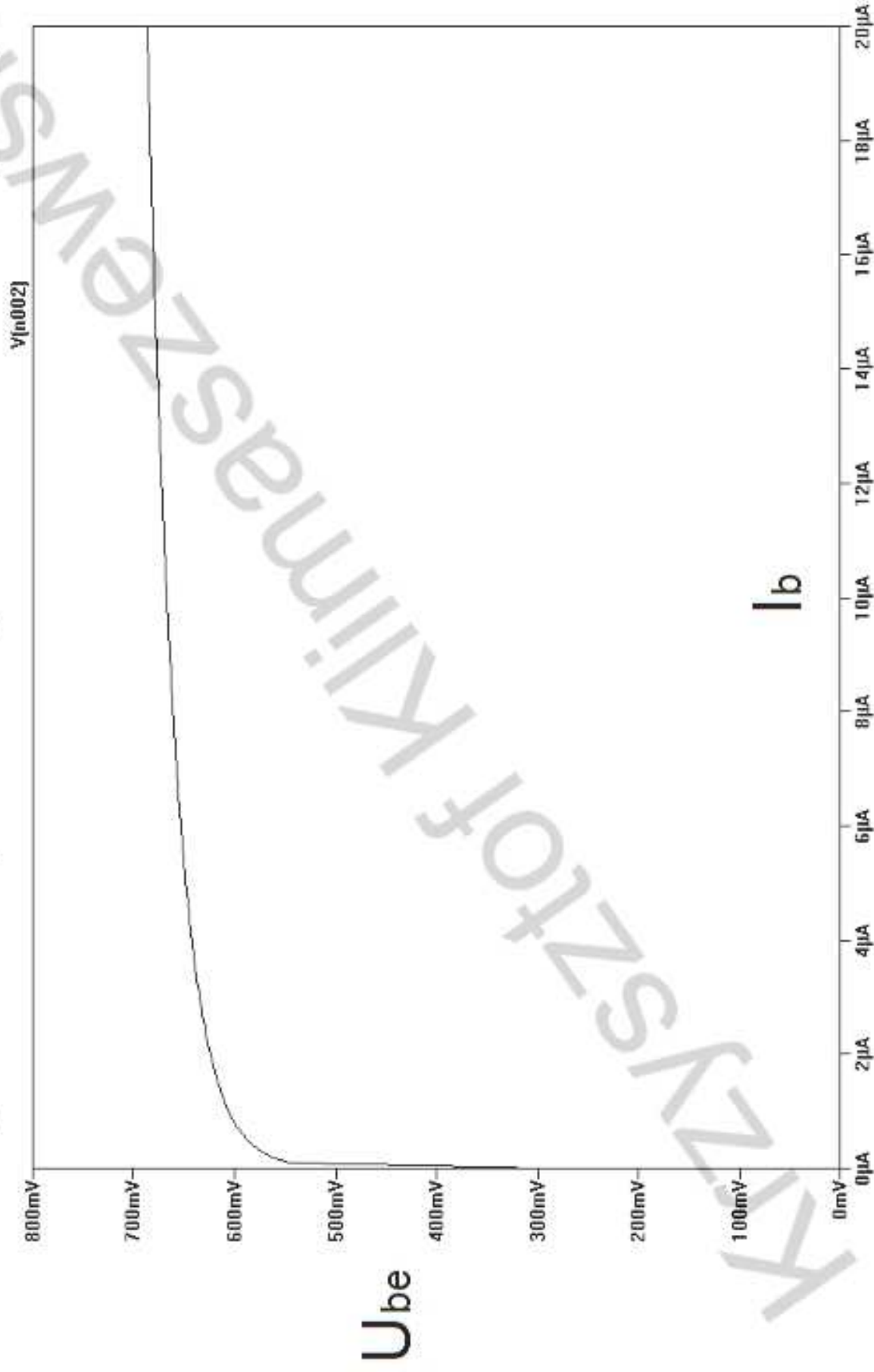
# Prosty układ z tranzystorem



# Tranzystor bipolarny

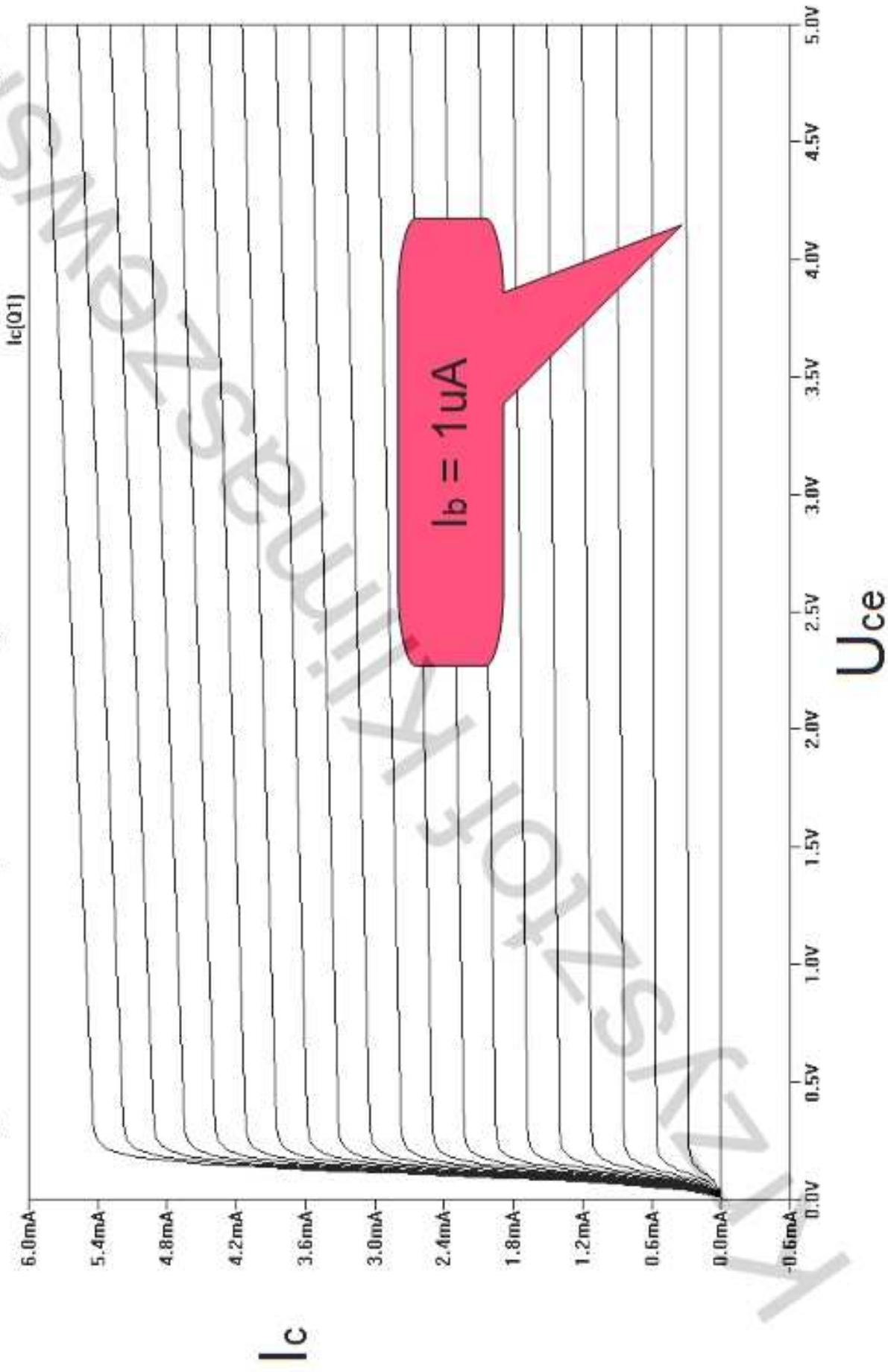
- 3 zakresy pracy
  - odcięcie
  - praca liniowa
  - nasycenie

# Tranzystor bipolarny - charakterystyki

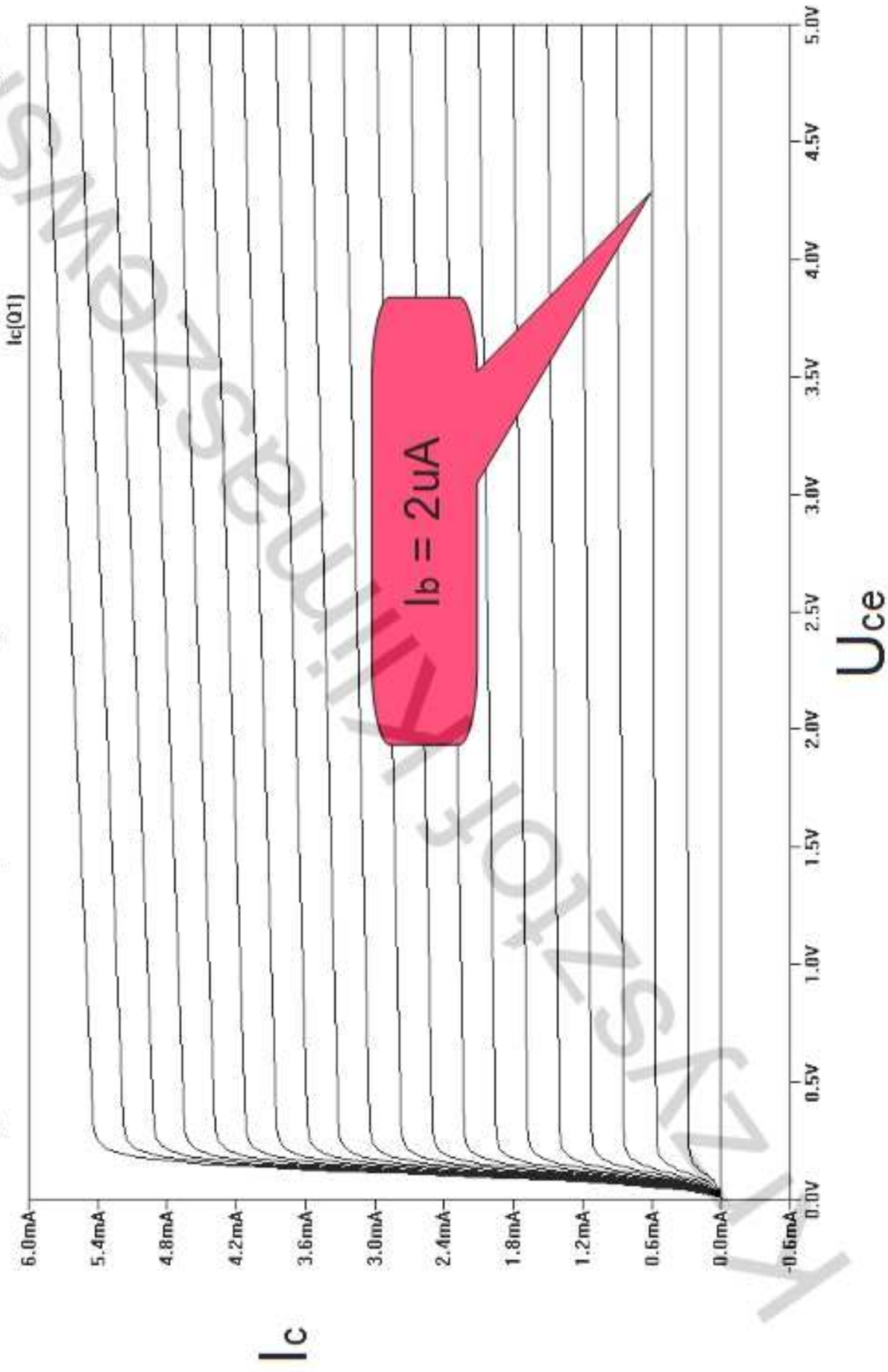




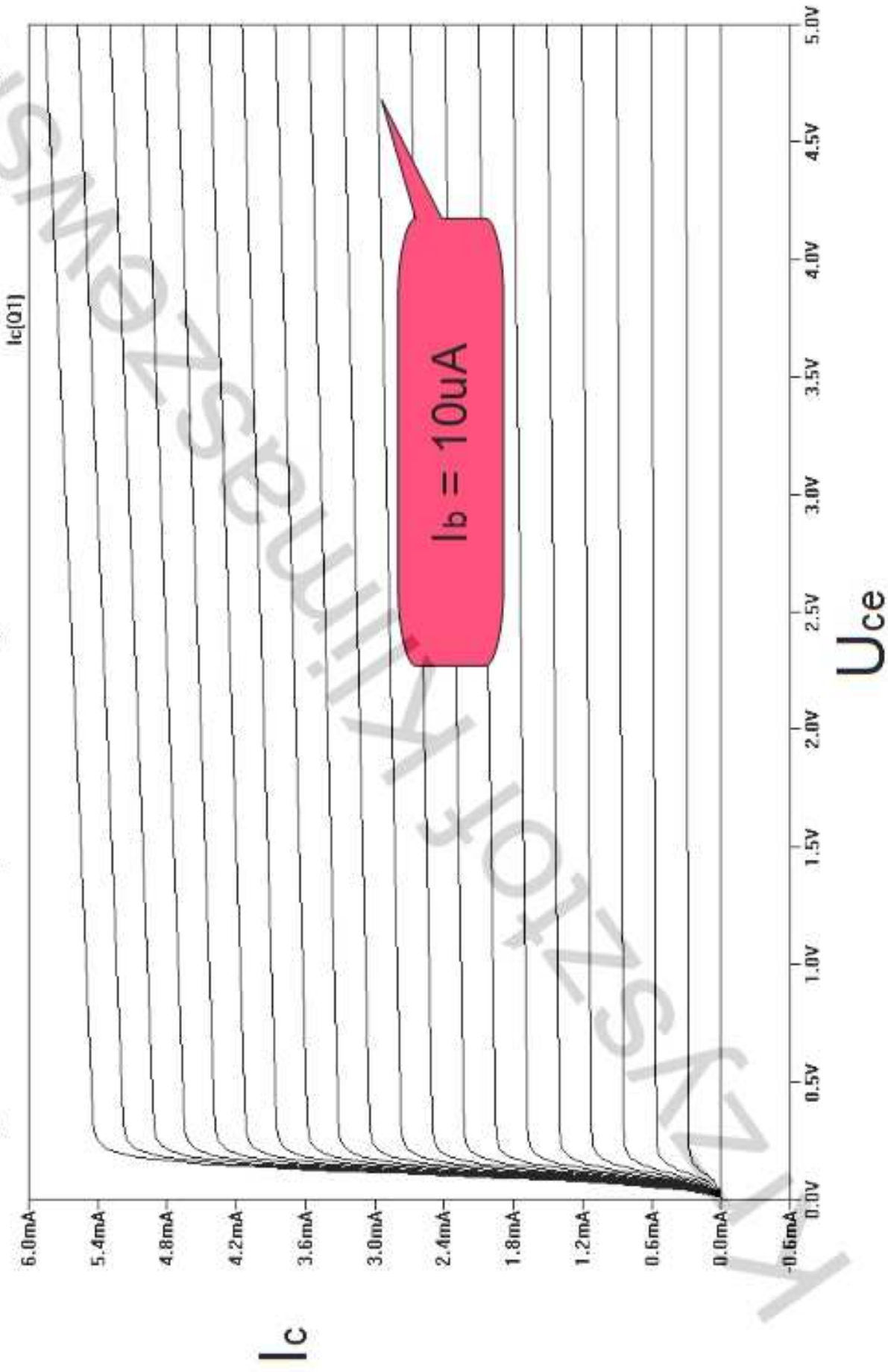
# Tranzystor bipolarny - charakterystyki



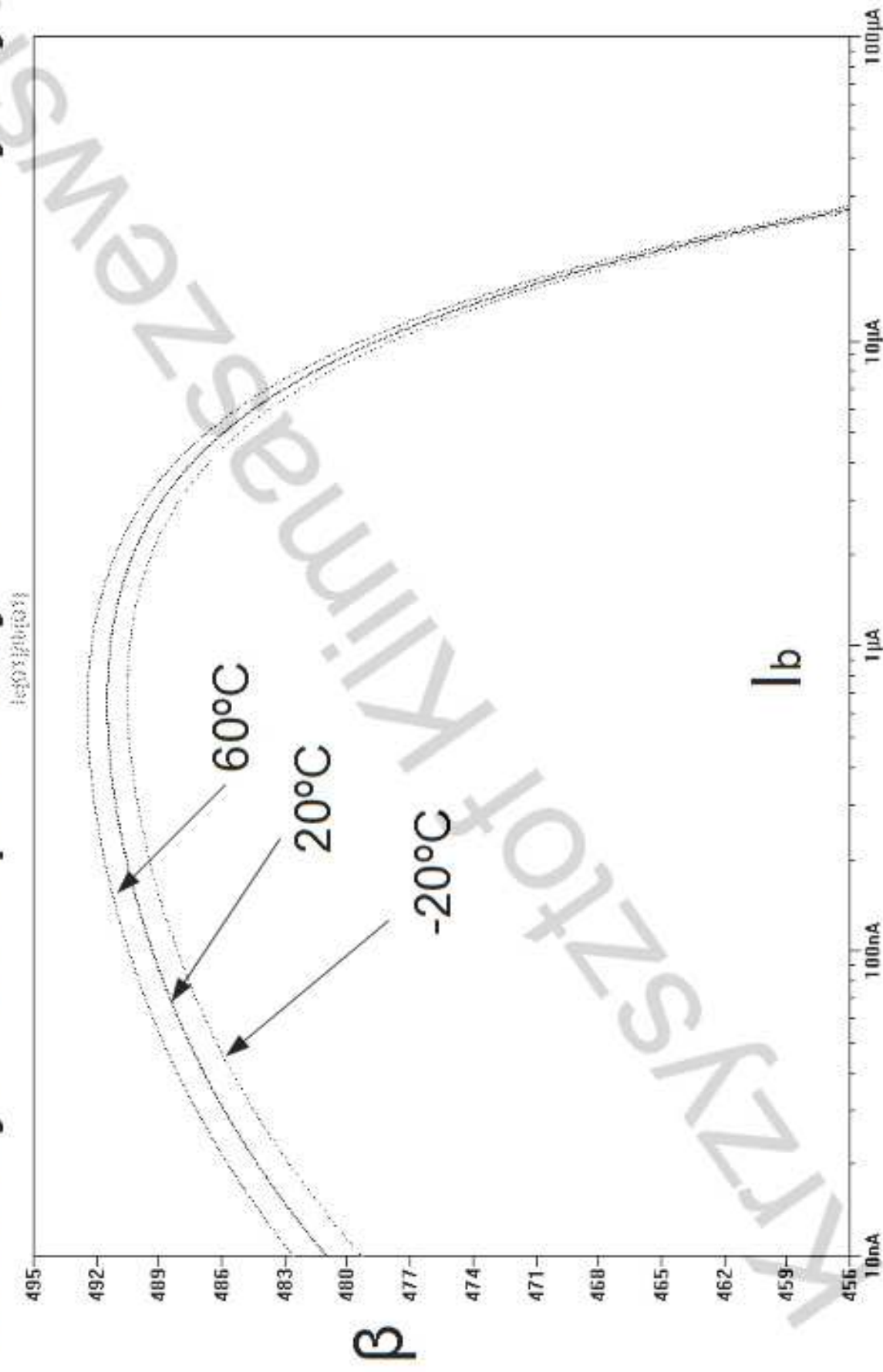
# Tranzystor bipolarny - charakterystyki



# Tranzystor bipolarny - charakterystyki

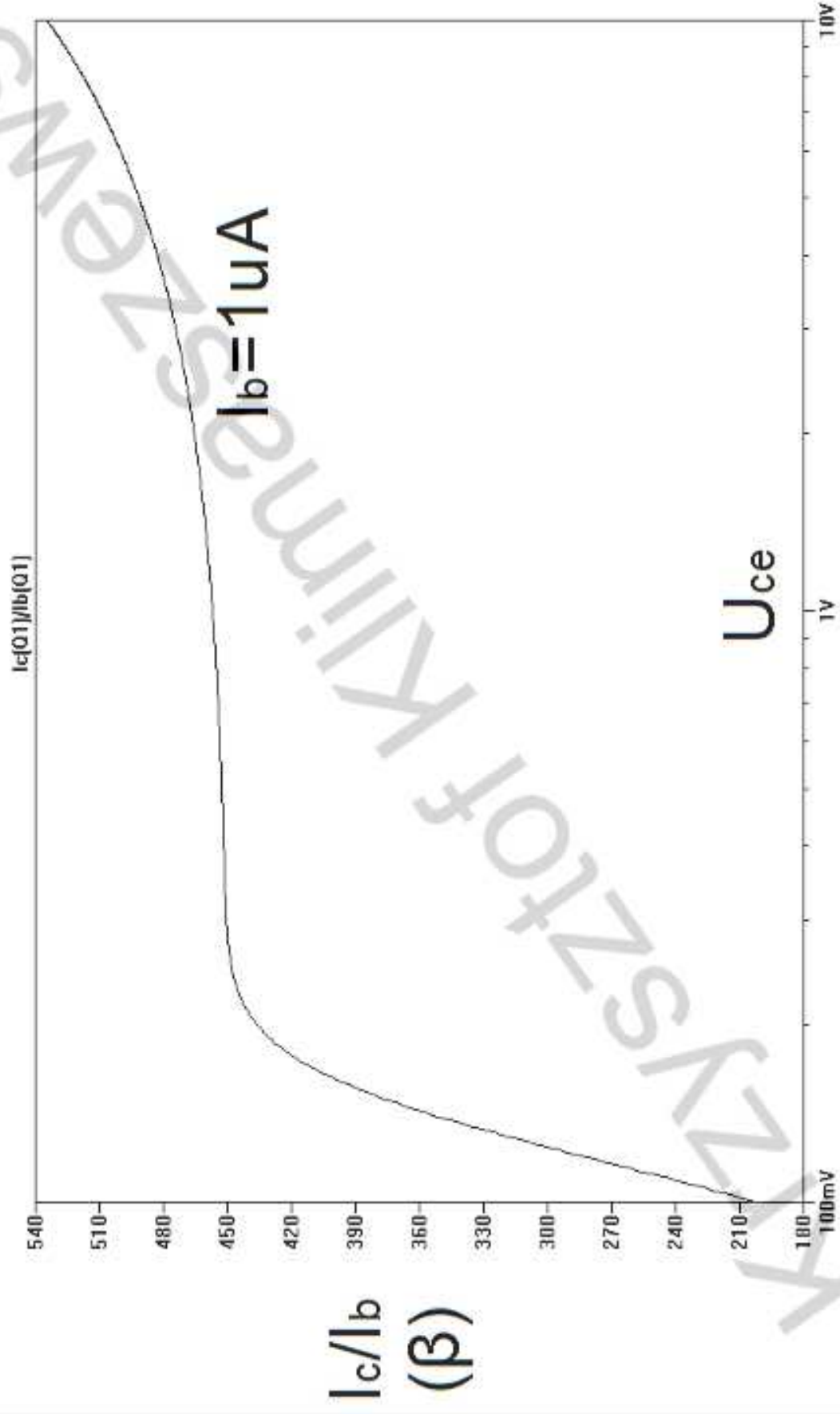


# Tranzystor bipolarny - charakterystyki





# Tranzystor bipolarny - charakterystyki

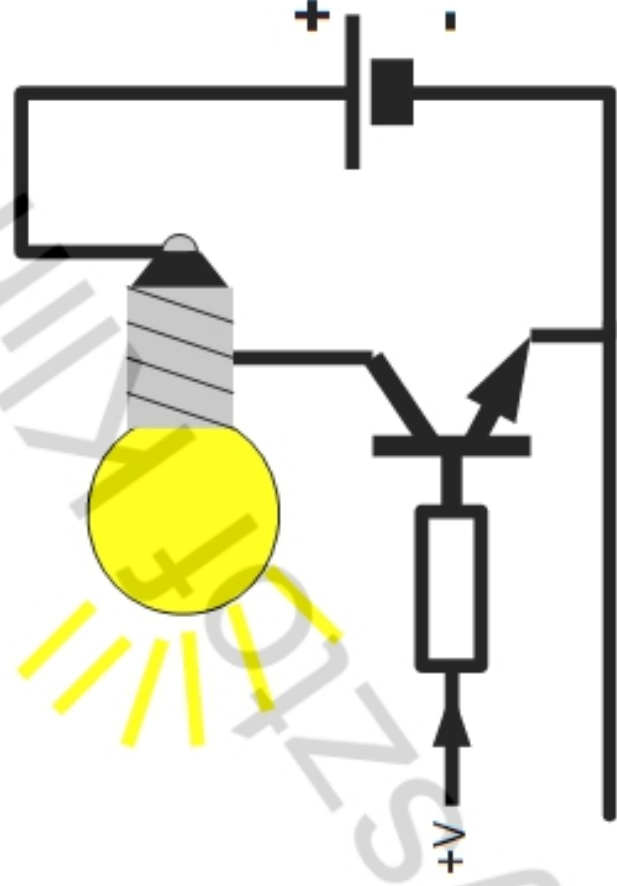


# Tranzystor jako przełącznik

- Tranzystor znajduje się w jednym z 2 stanów:
  - w stanie nasycenia (gdy przewodzi prąd)
  - w stanie odcięcia (gdy nie przewodzi prądu)

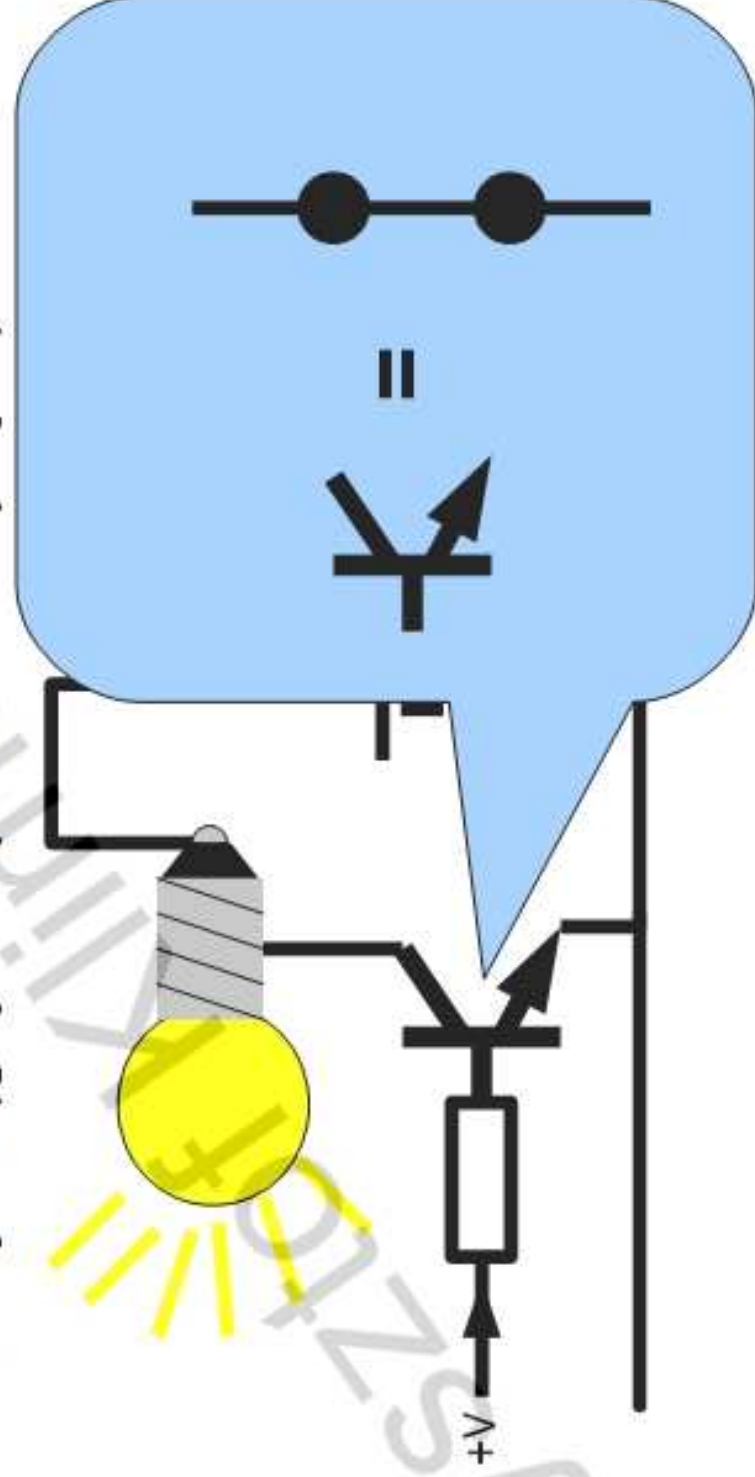
# Tranzystor jako przełącznik

- Tranzystor znajduje się w jednym z 2 stanów:
  - w stanie nasycenia (gdy przewodzi prąd)
  - w stanie odcięcia (gdy nie przewodzi prądu)



# Tranzystor jako przełącznik

- Tranzystor znajduje się w jednym z 2 stanów:
  - w stanie nasycenia (gdy przewodzi prąd)
  - w stanie odcięcia (gdy nie przewodzi prądu)



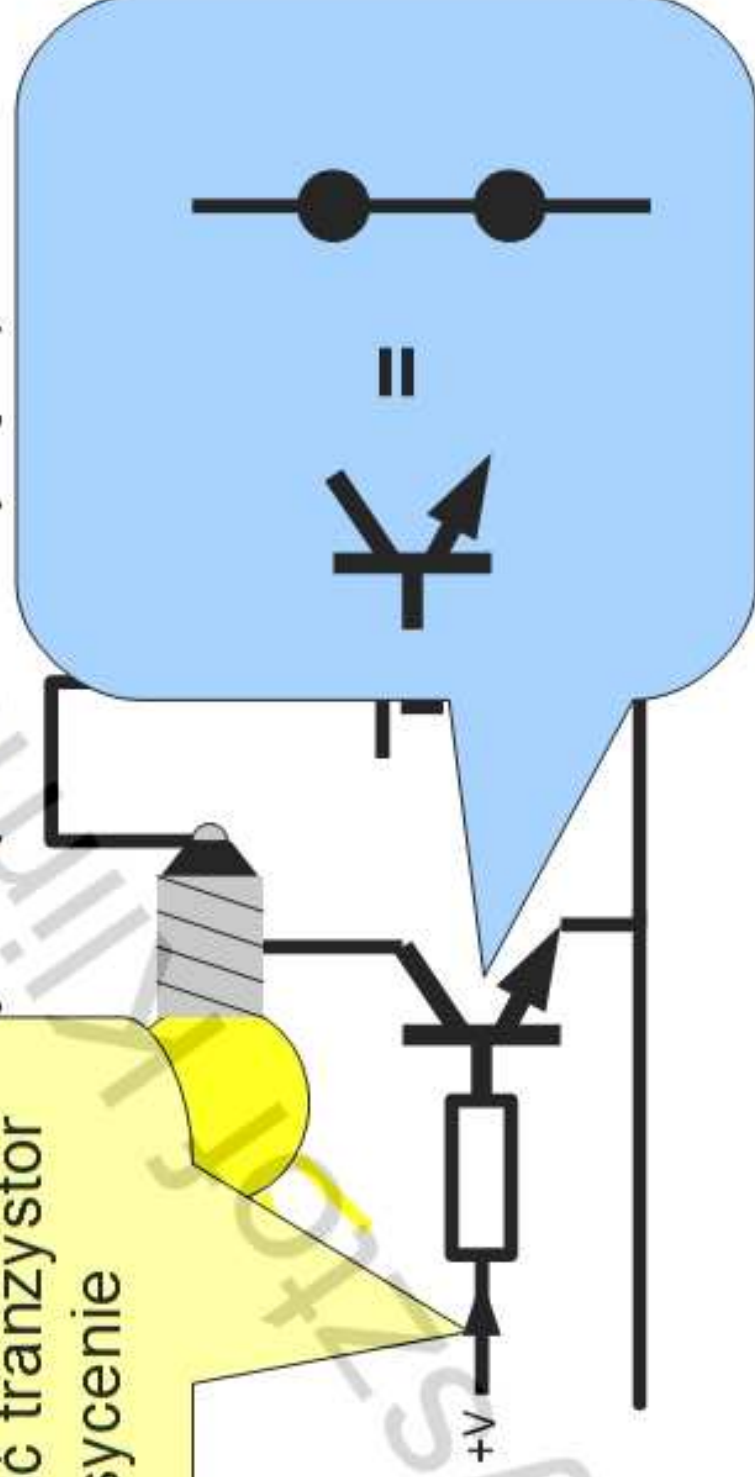
# Tranzystor jako przełącznik

- Tranzystor znajduje się w jednym z 2 stanów:

prąd bazy musi być wystarczająco duży, żeby wprowadzić tranzystor w nasycenie

(gdy przewodzi prąd)

czy nie przewodzi prądu)

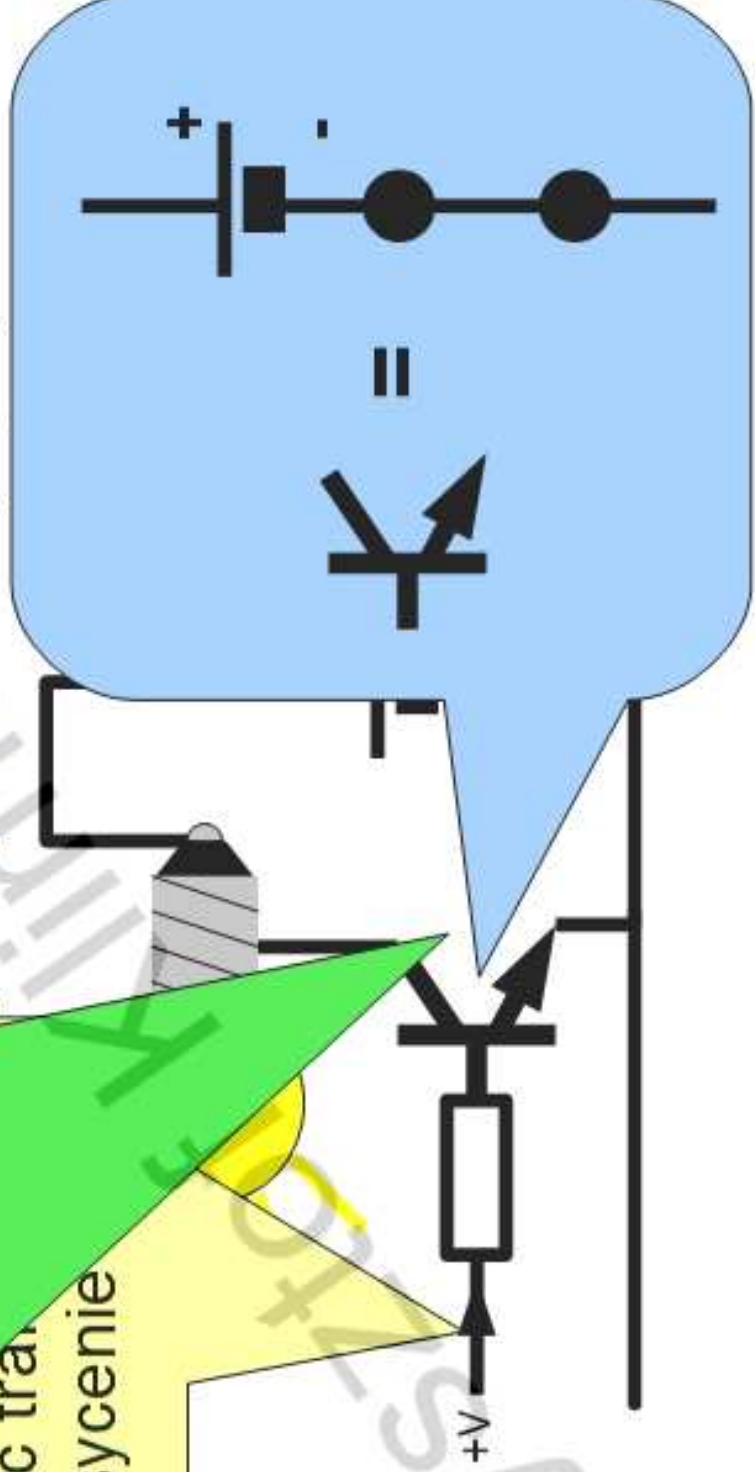


# Tranzystor jako przełącznik

Na tranzystorze występuje jednak spadek napięcia – napięcie nasycenia!

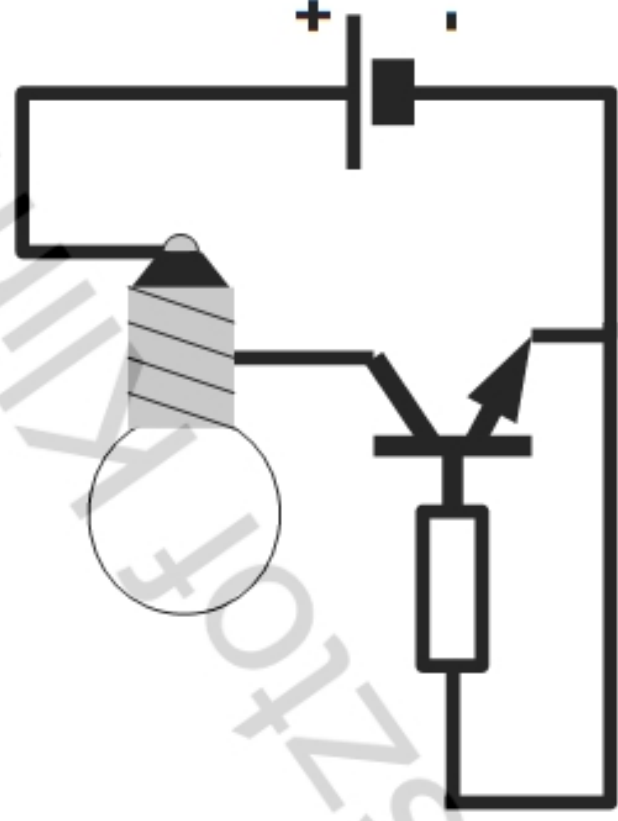
prąd wystarczająco  
wprowadzić tranzystor  
w nasycenie

nie przewodzi prądu)



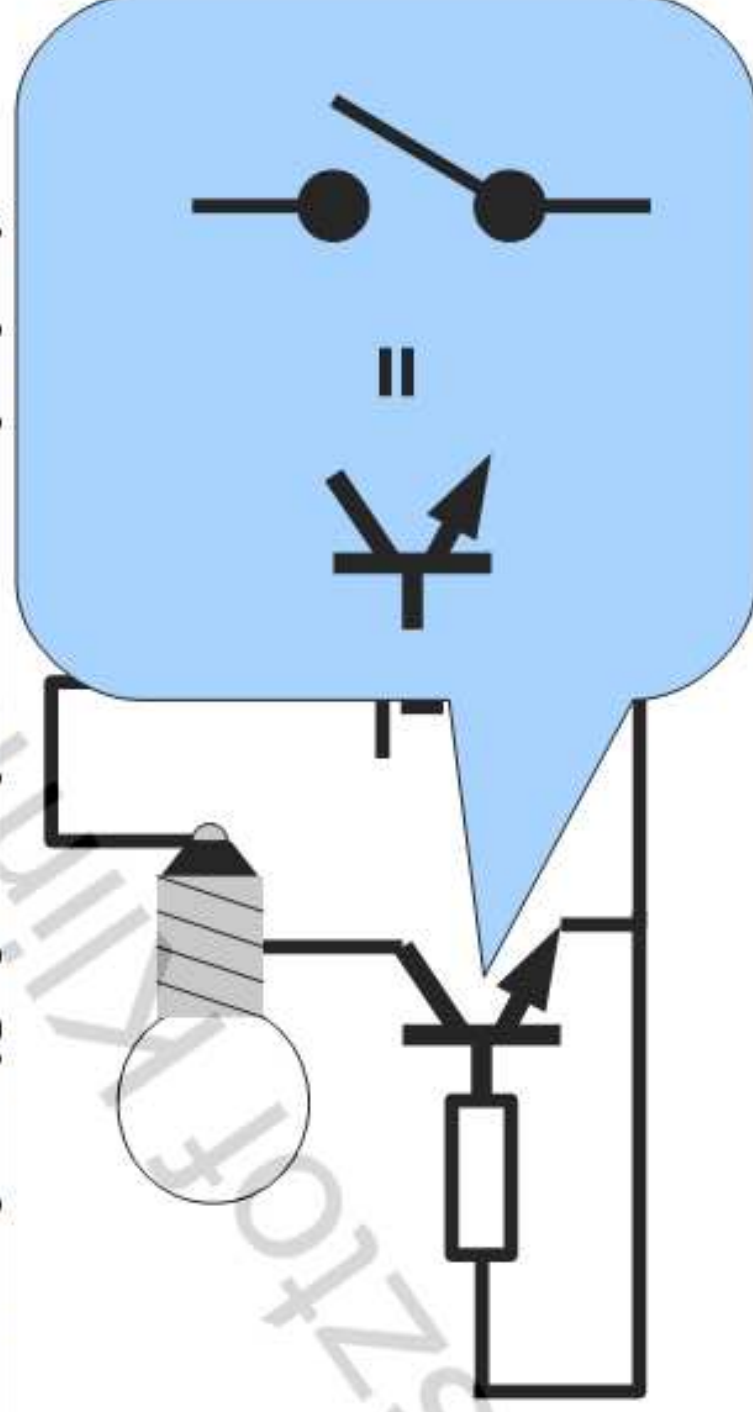
# Tranzystor jako przełącznik

- Tranzystor znajduje się w jednym z 2 stanów:
  - w stanie nasycenia (gdy przewodzi prąd)
  - w stanie odcięcia (gdy nie przewodzi prądu)



# Tranzystor jako przełącznik

- Tranzystor znajduje się w jednym z 2 stanów:
  - w stanie nasycenia (gdy przewodzi prąd)
  - w stanie odcięcia (gdy nie przewodzi prądu)



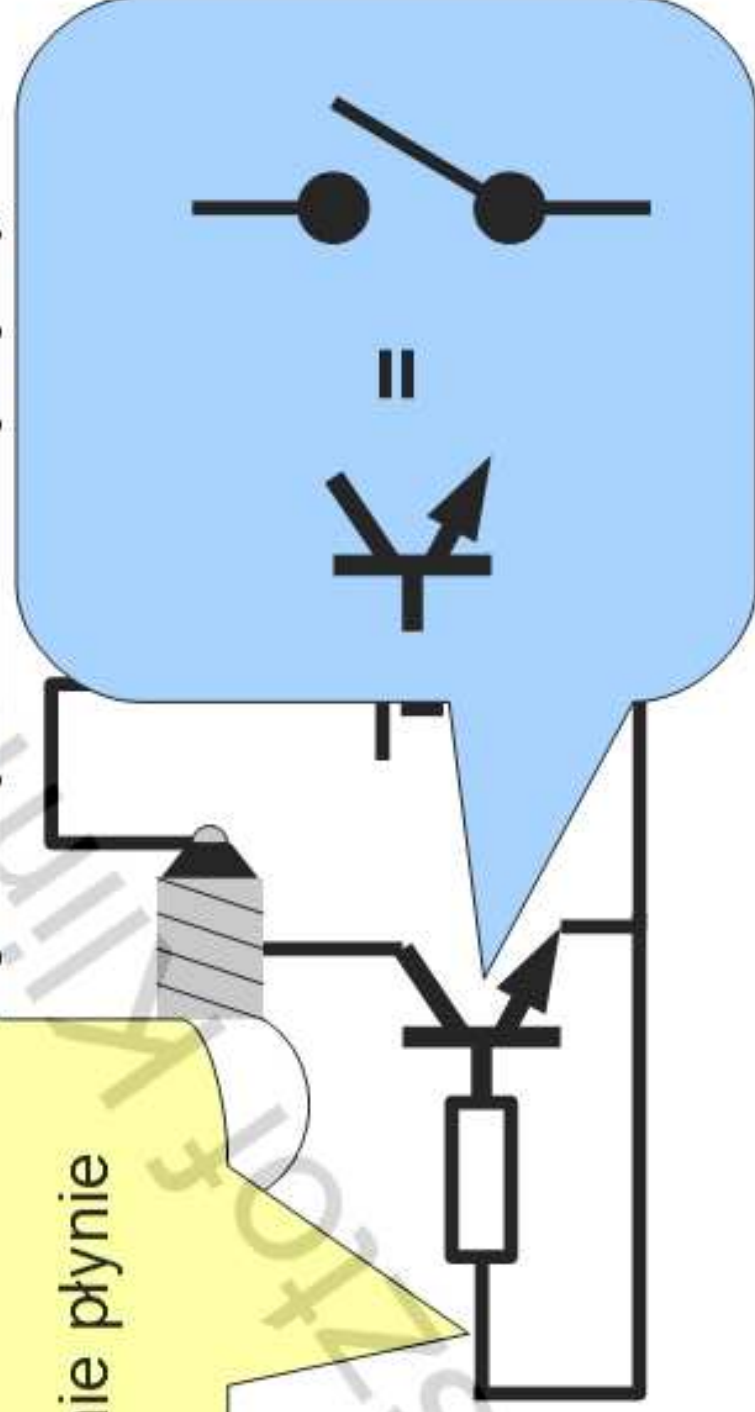


# Tranzystor jako przełącznik

- Tranzystor znajduje się w jednym z 2 stanów:
- w stanie nasycenia (gdy przewodzi prąd)

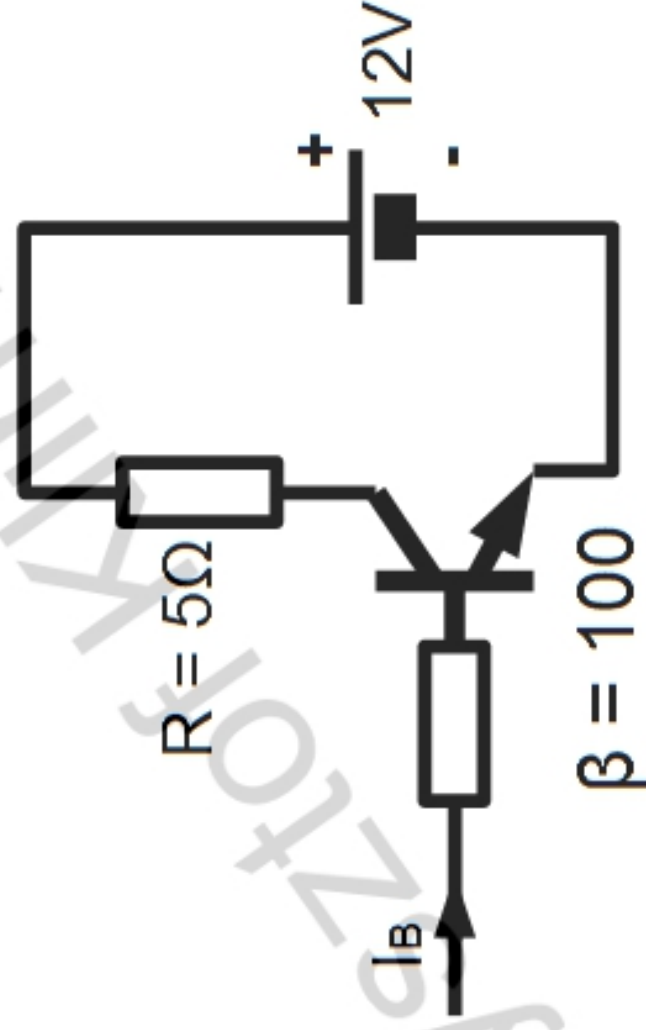
(gdy nie przewodzi prądu)

prąd bazy nie płynie

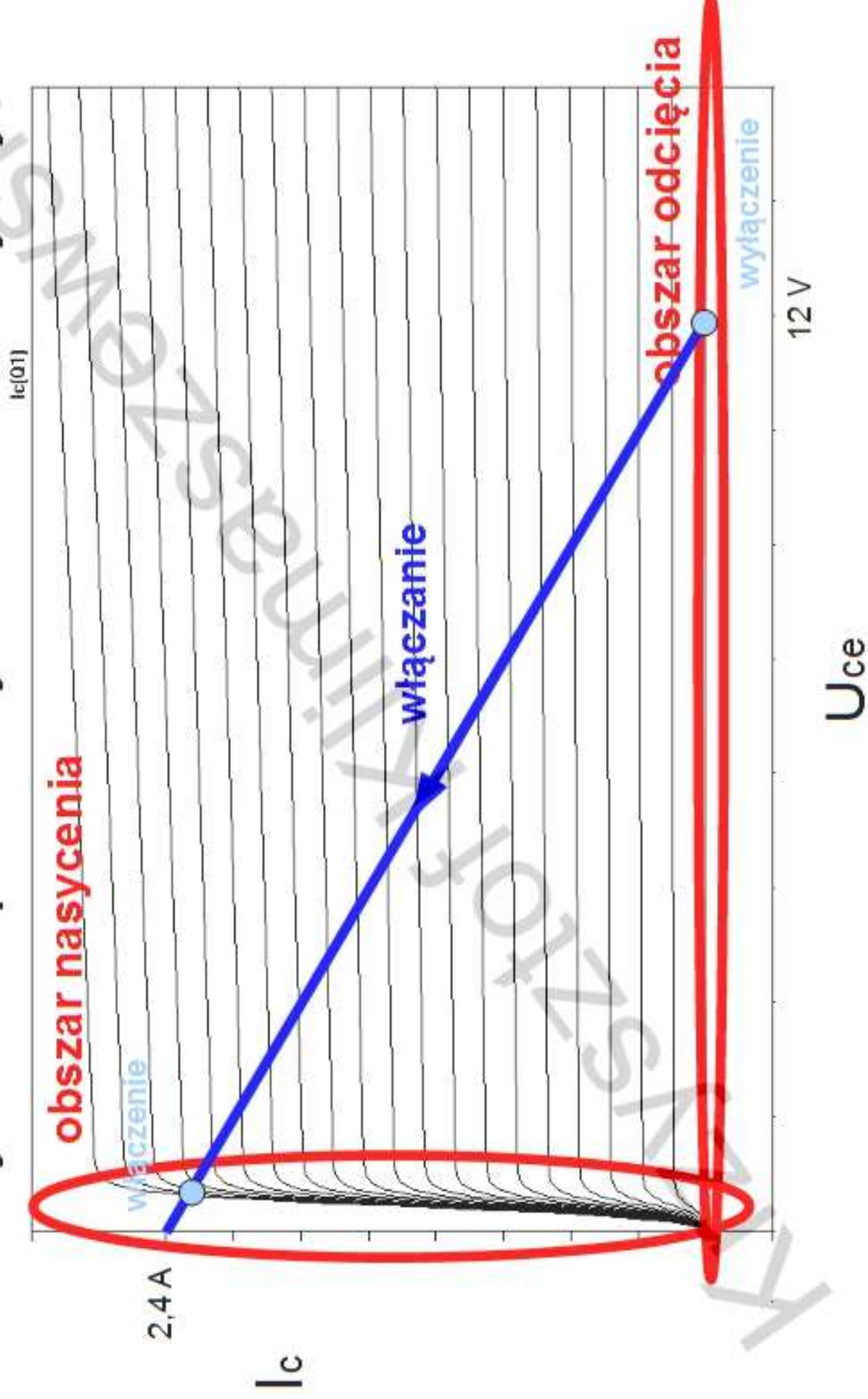


## Tranzystor jako przełącznik

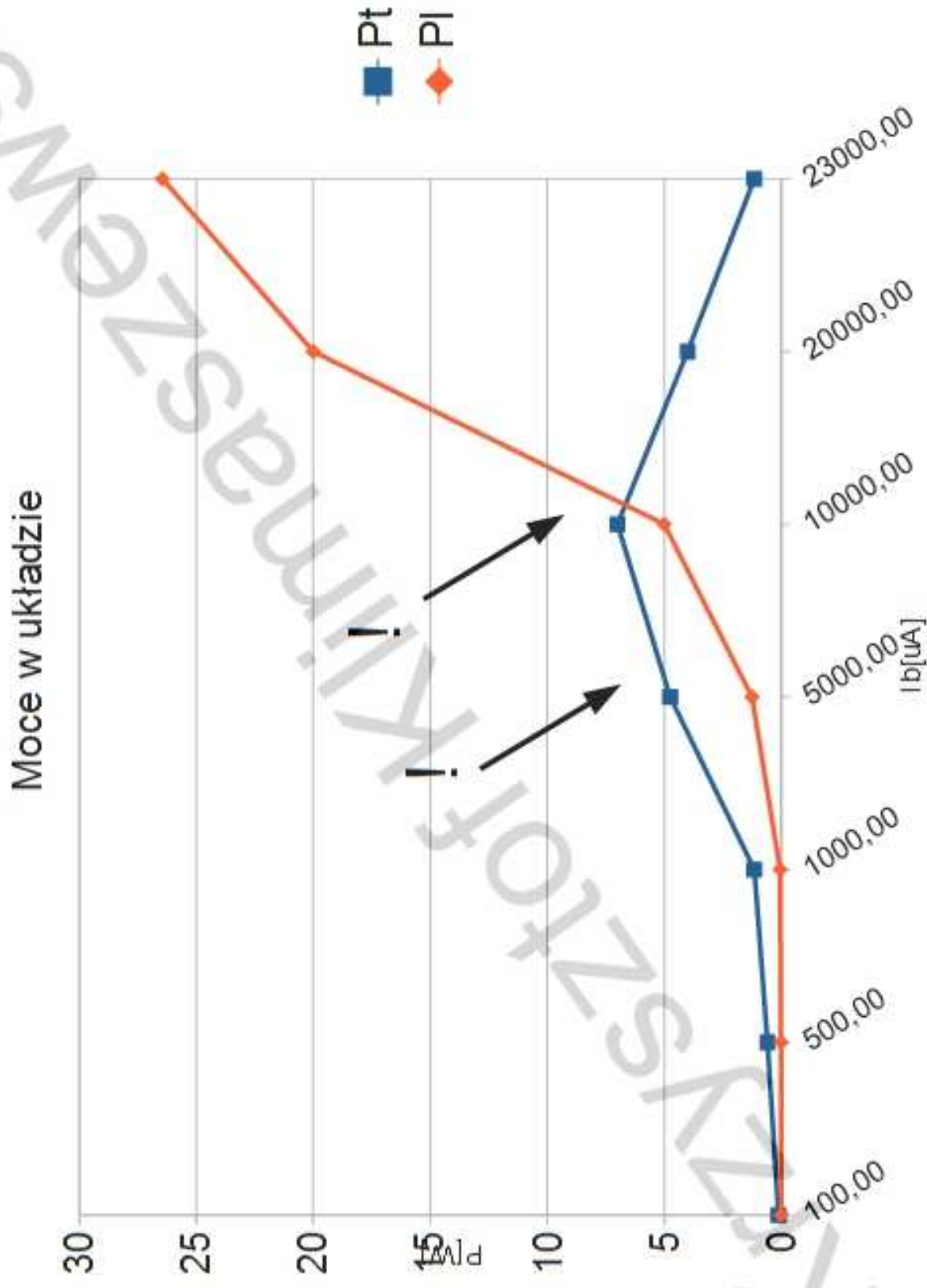
- Przejście między stanami odcięcia i nasycenia przez obszar pracy liniowej – ryzyko przegrzania tranzystora



# Tranzystor bipolarny - charakterystyki



# Tranzystor jako przełącznik

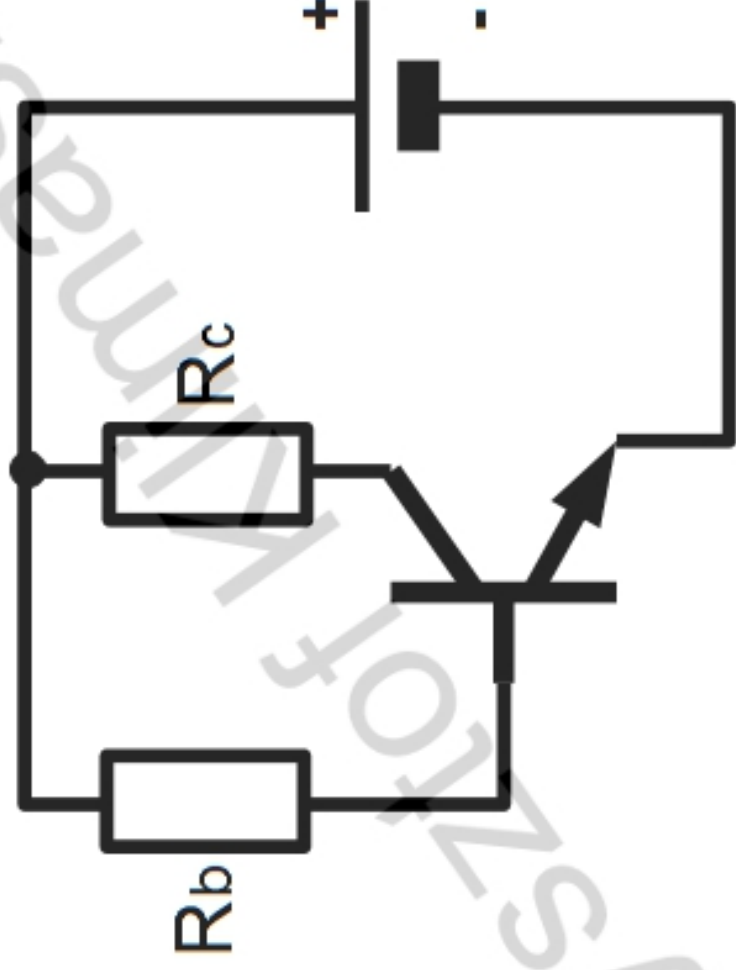


## Tranzystor jako wzmacniacz

- Tranzystor pracuje w obszarze aktywnym
- Konieczna jest odpowiednia polaryzacja tranzystora, ustalająca punkt pracy

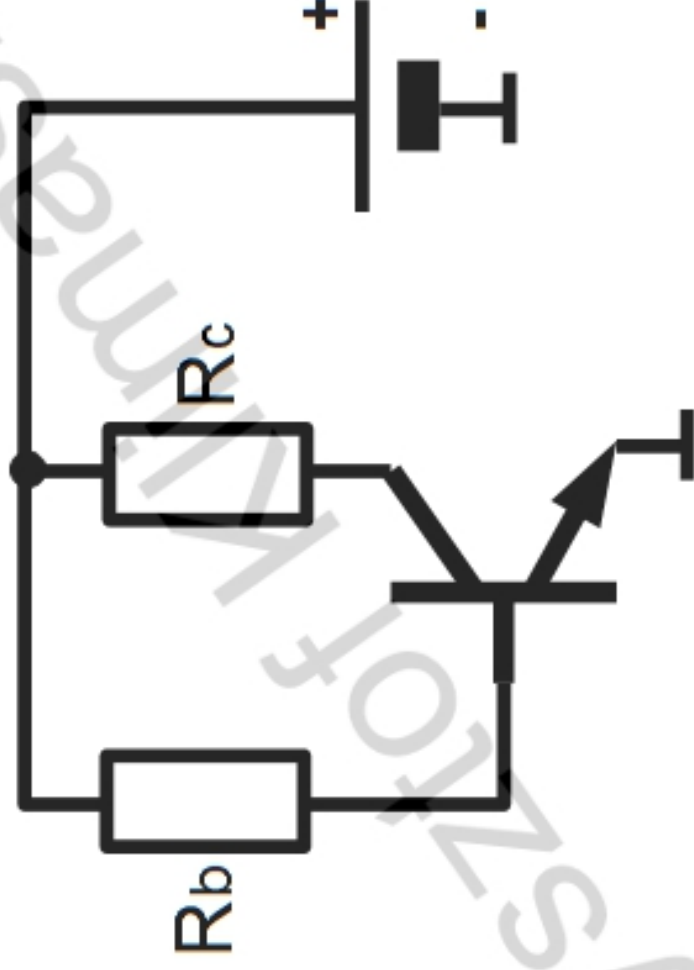
# Układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

- układ ze stałym prądem bazy



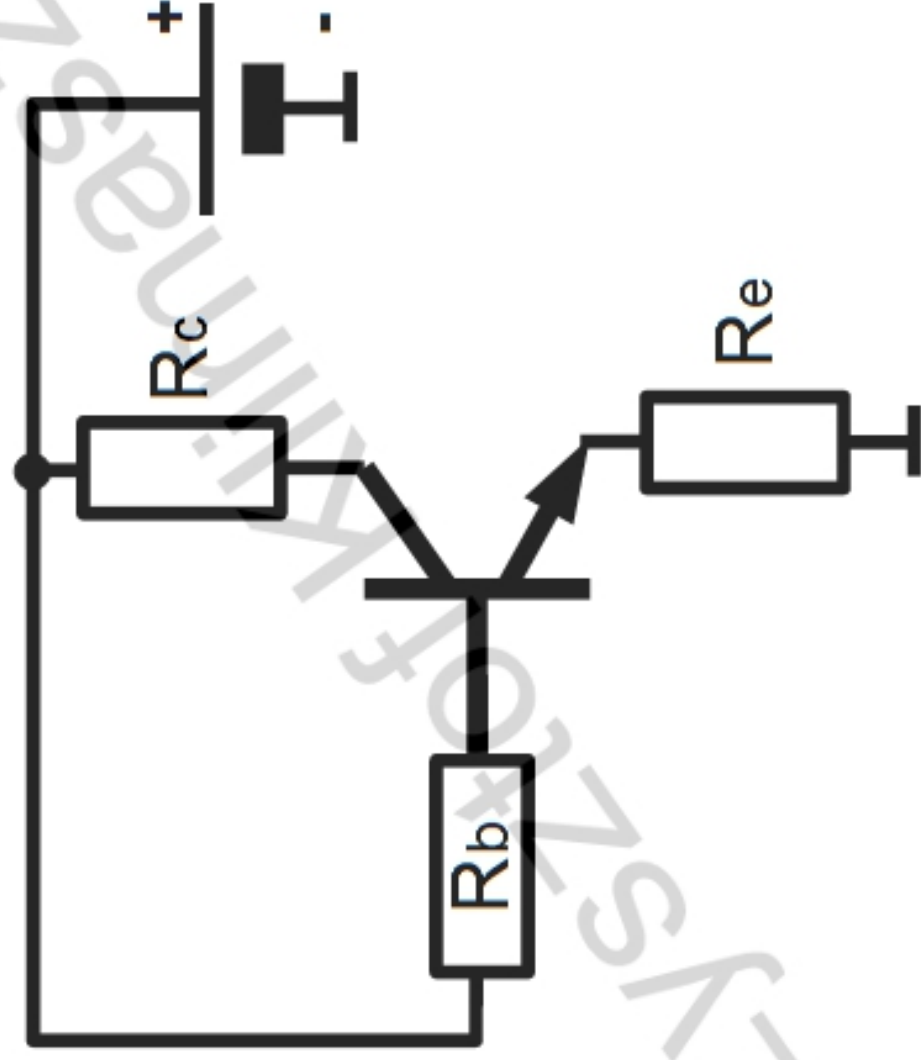
# Układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

- układ ze stałym prądem bazy



# Układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

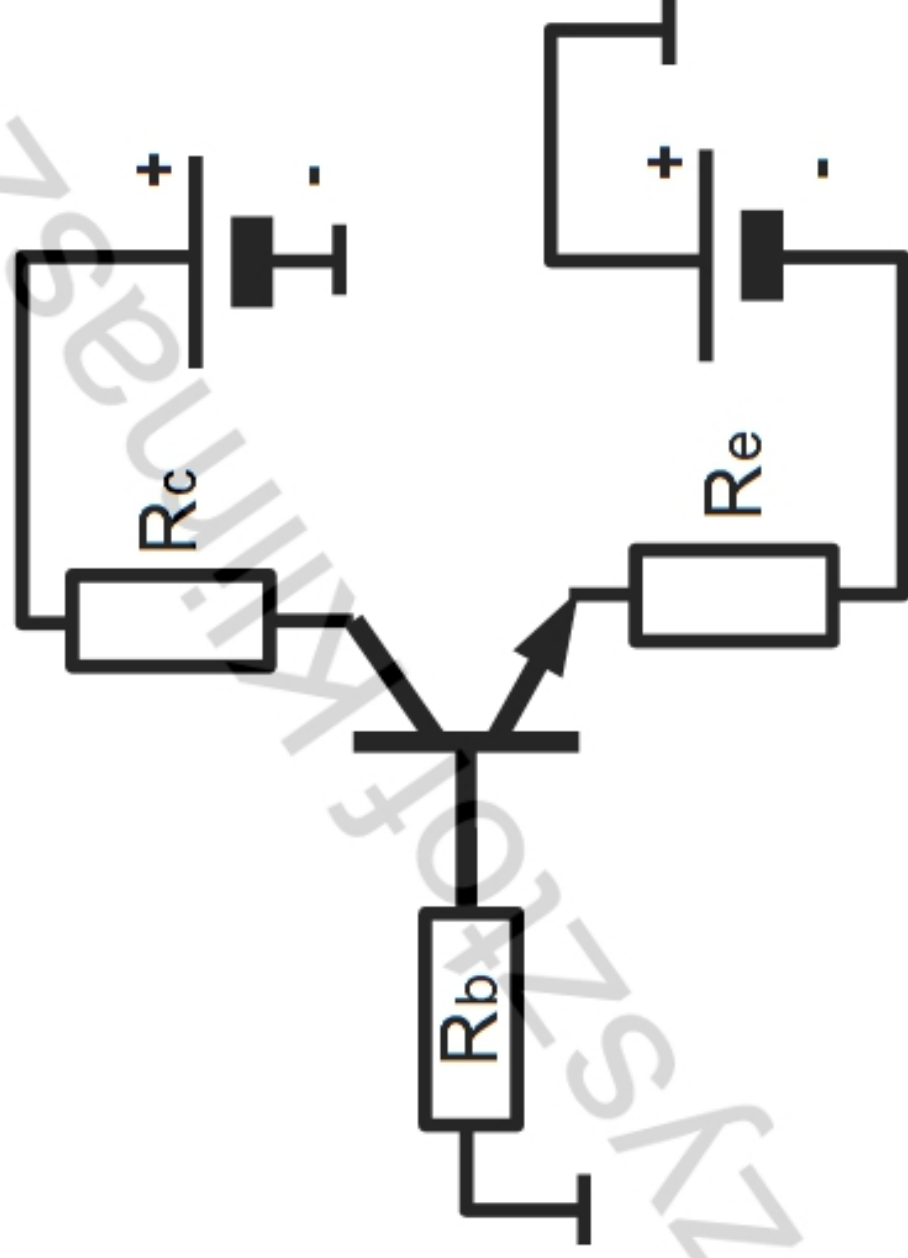
- układ ze sprzężeniem zwrotnym z emitera





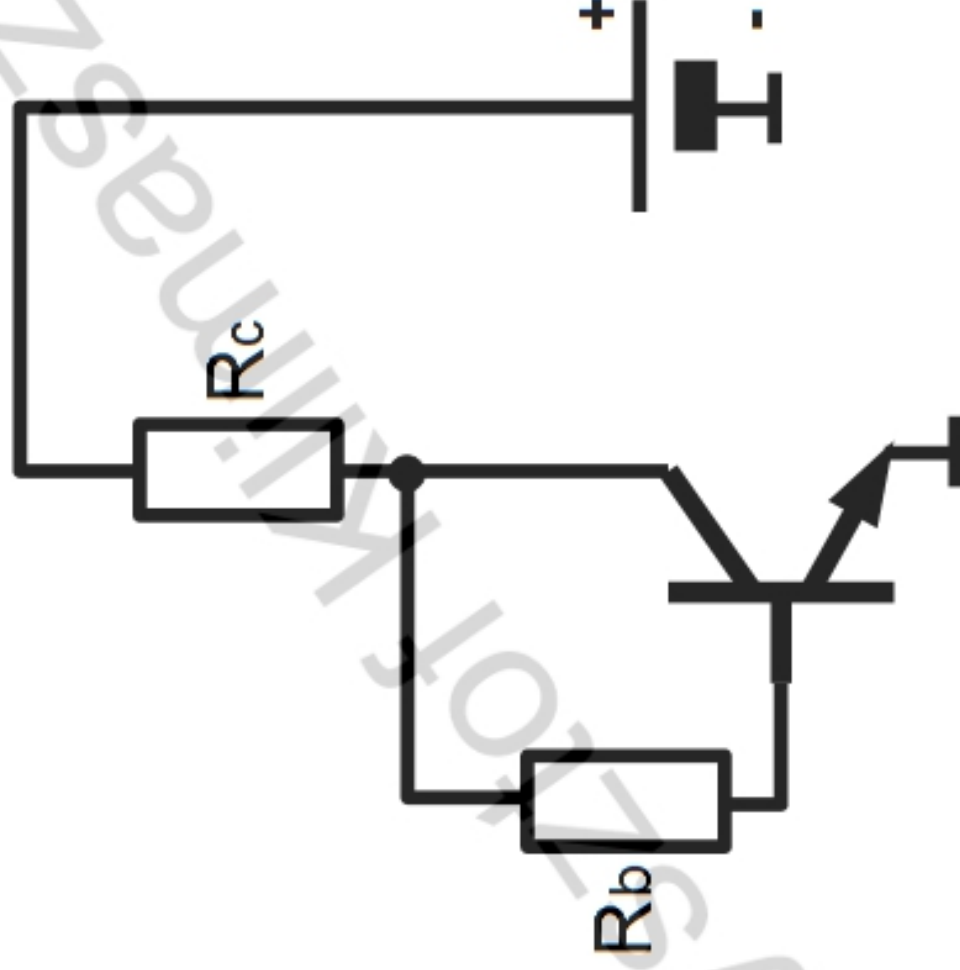
# Układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

- układ ze stałym prądem emitera



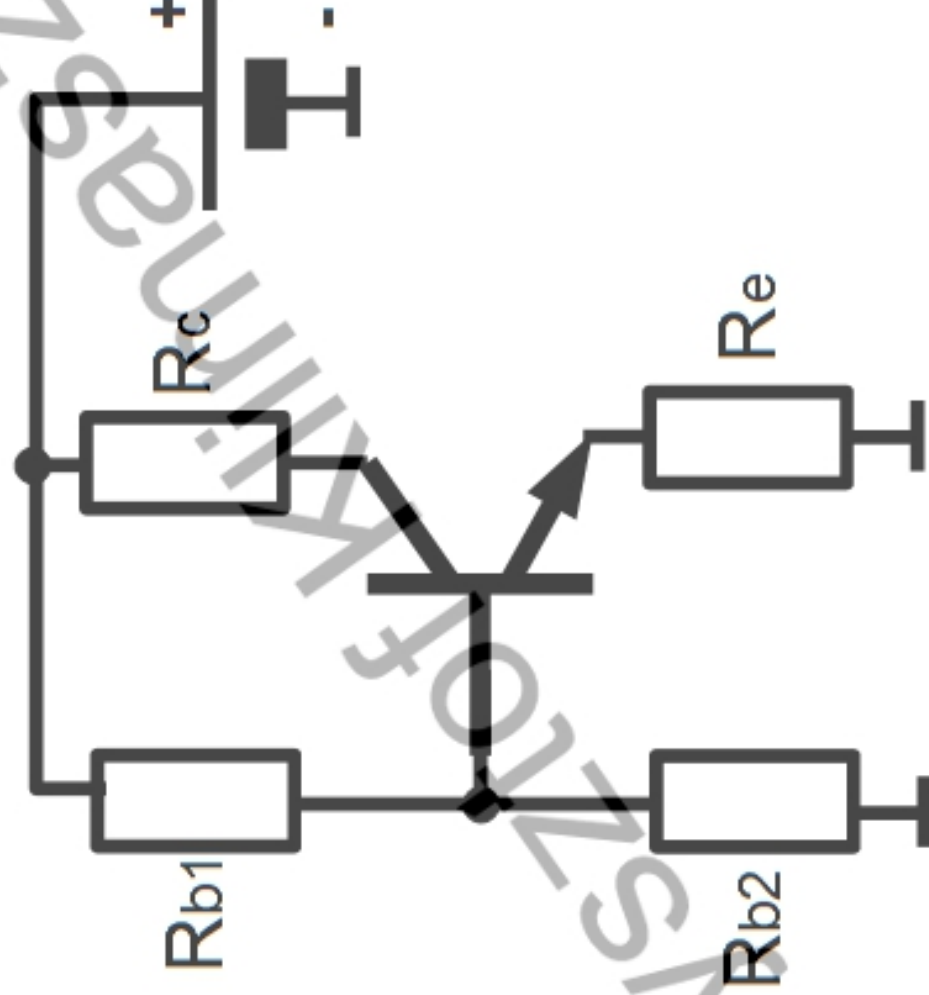
# Układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

- układ ze sprzężeniem zwrotnym z kolektora



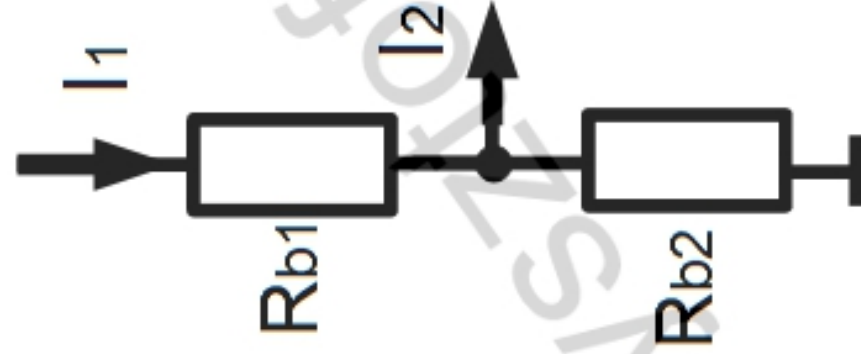
# Układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

- układ z dzielnikiem (4 rezystorowy)



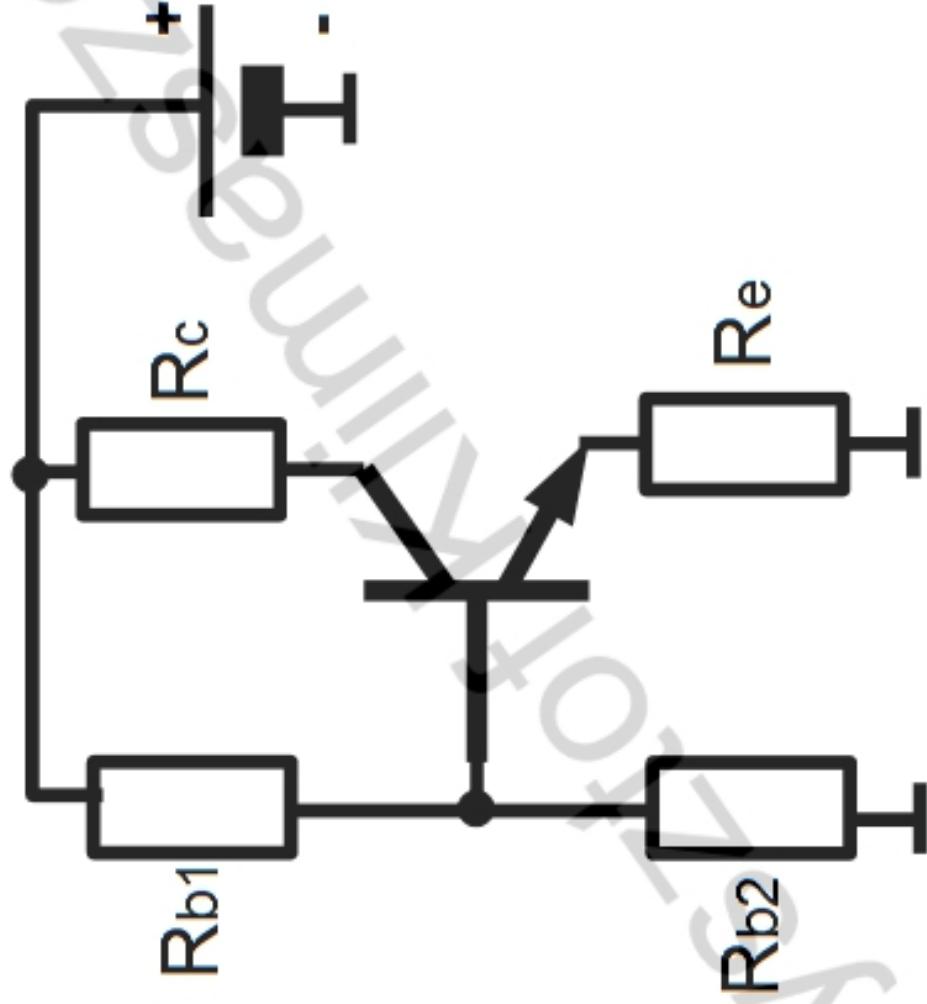
# Układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

- układ z dzielnikiem (4 rezystorowy)

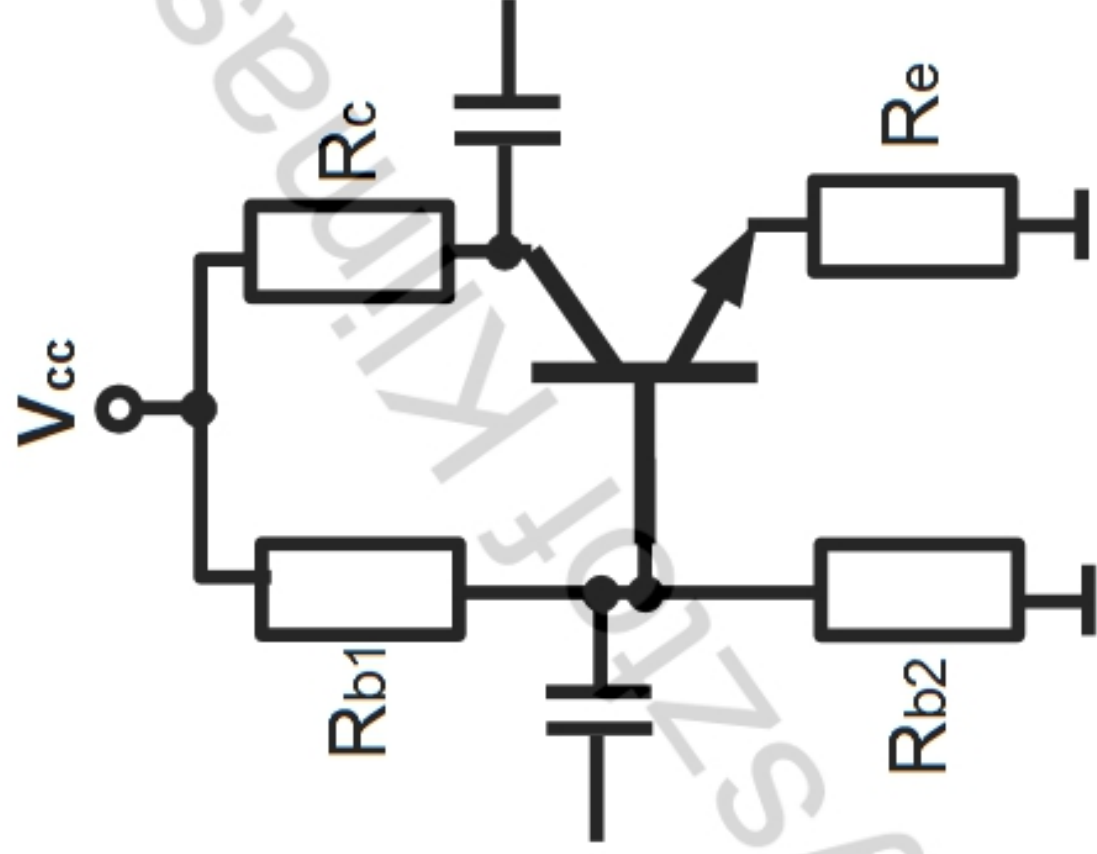


Jeśli  $I_1 \gg I_2$ , to  
zaniedbujemy  $I_2$  przy  
obliczaniu napięcia na  
wyjściu dzielnika

# Wzmacniacz tranzystorowy



# Wzmacniacz tranzystorowy



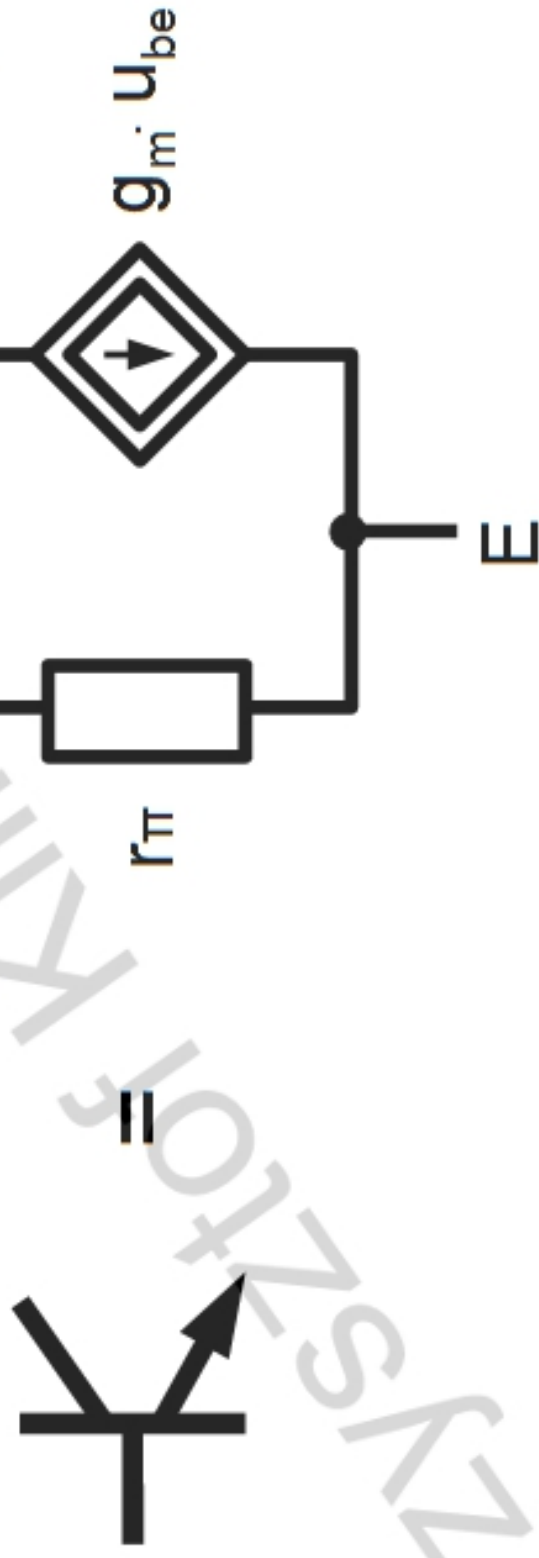
## Wzmacniacz tranzystorowy

- Odrębne 2 etapy obliczeń
  - obliczenia punktu pracy (napięcia i prądy stałe)
  - obliczenia parametrów małosygnałowych (wzmocnienia, impedancje, zakres częstotliwości itp)

**BARDZO WAŻNE!**

# Model małosygnalowy tranzystora

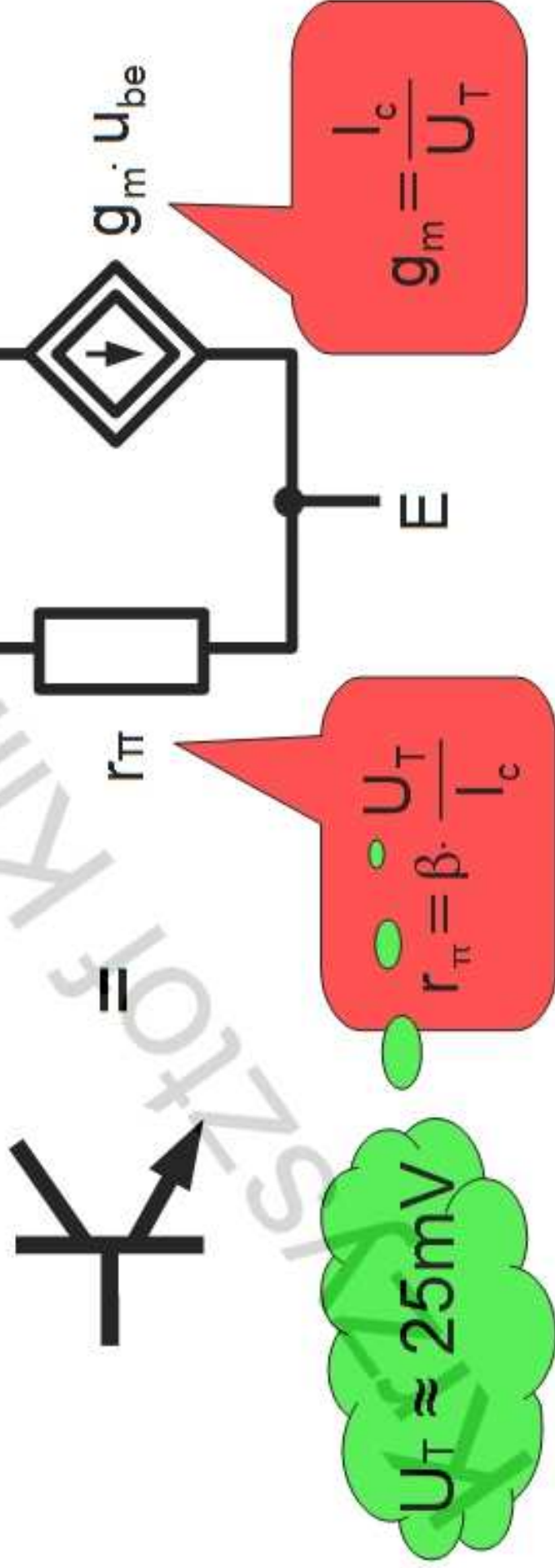
- najprostszly model tranzystora bipolarnego





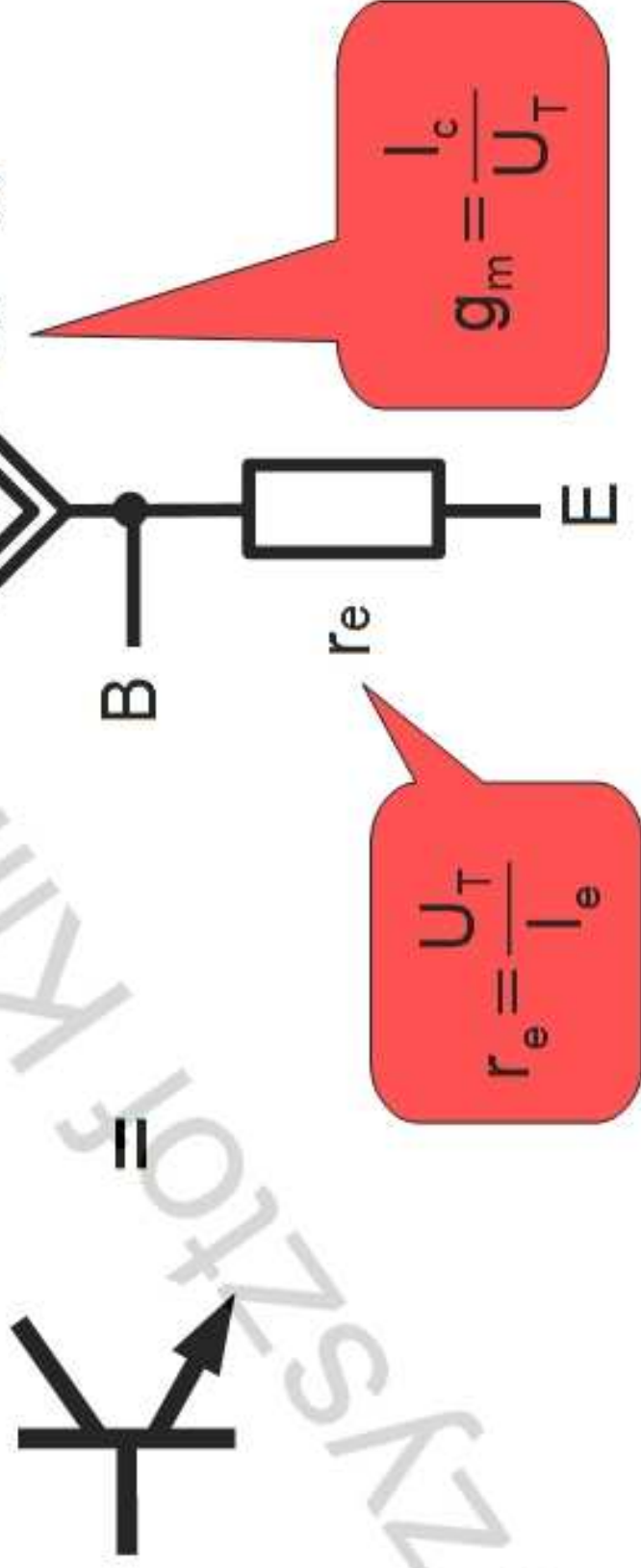
# Model małosygnalowy tranzystora

- najprostszly model tranzystora bipolarnego



# Model małosygnałowy tranzystora

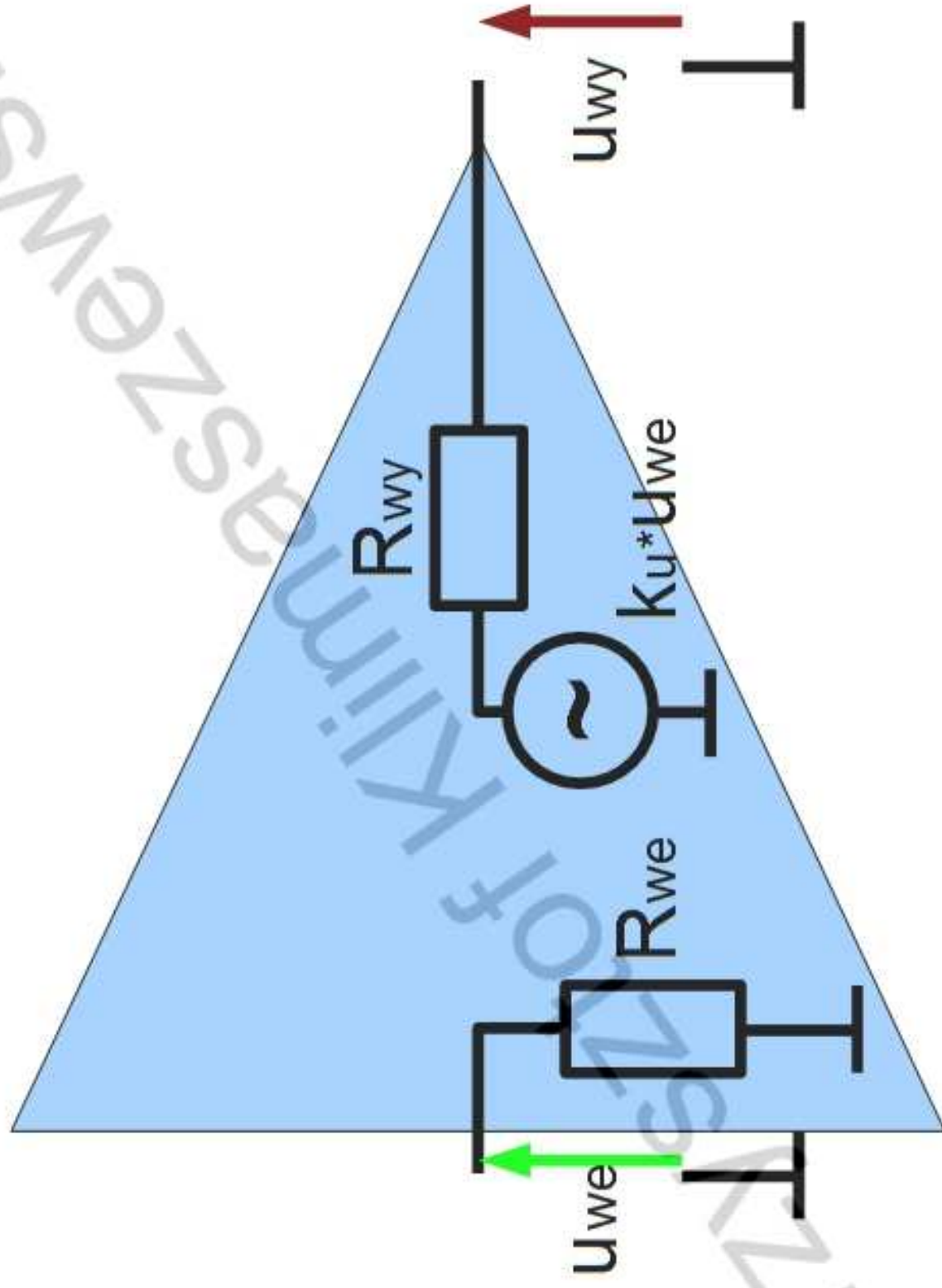
- alternatywny model tranzystora bipolarnego



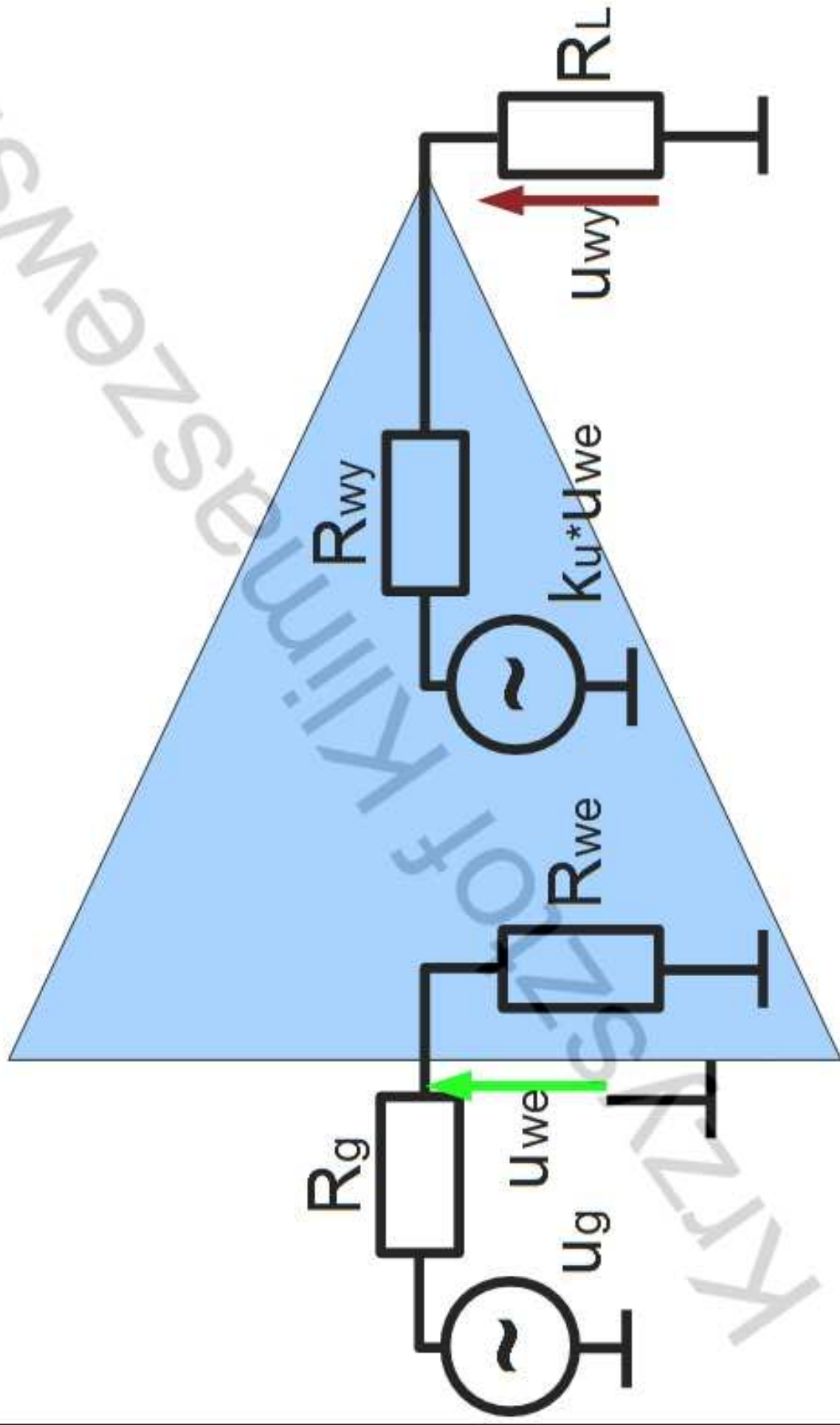
# Wzmacniacz tranzystorowy

- Kolejność postępowania przy analizie układu
  1. Wyznaczenie  $I_C$  dla oryginalnego układu
  2. Przerysowanie układu (z modelem małosygnałowym tranzystora)
  3. Zastąpienie kondensatorów zwarciami
  4. Zastąpienie źródeł napięcia stałego zwarciami ( $U_{CC}$ !)
  5. Wyznaczenie parametrów wzmacniacza

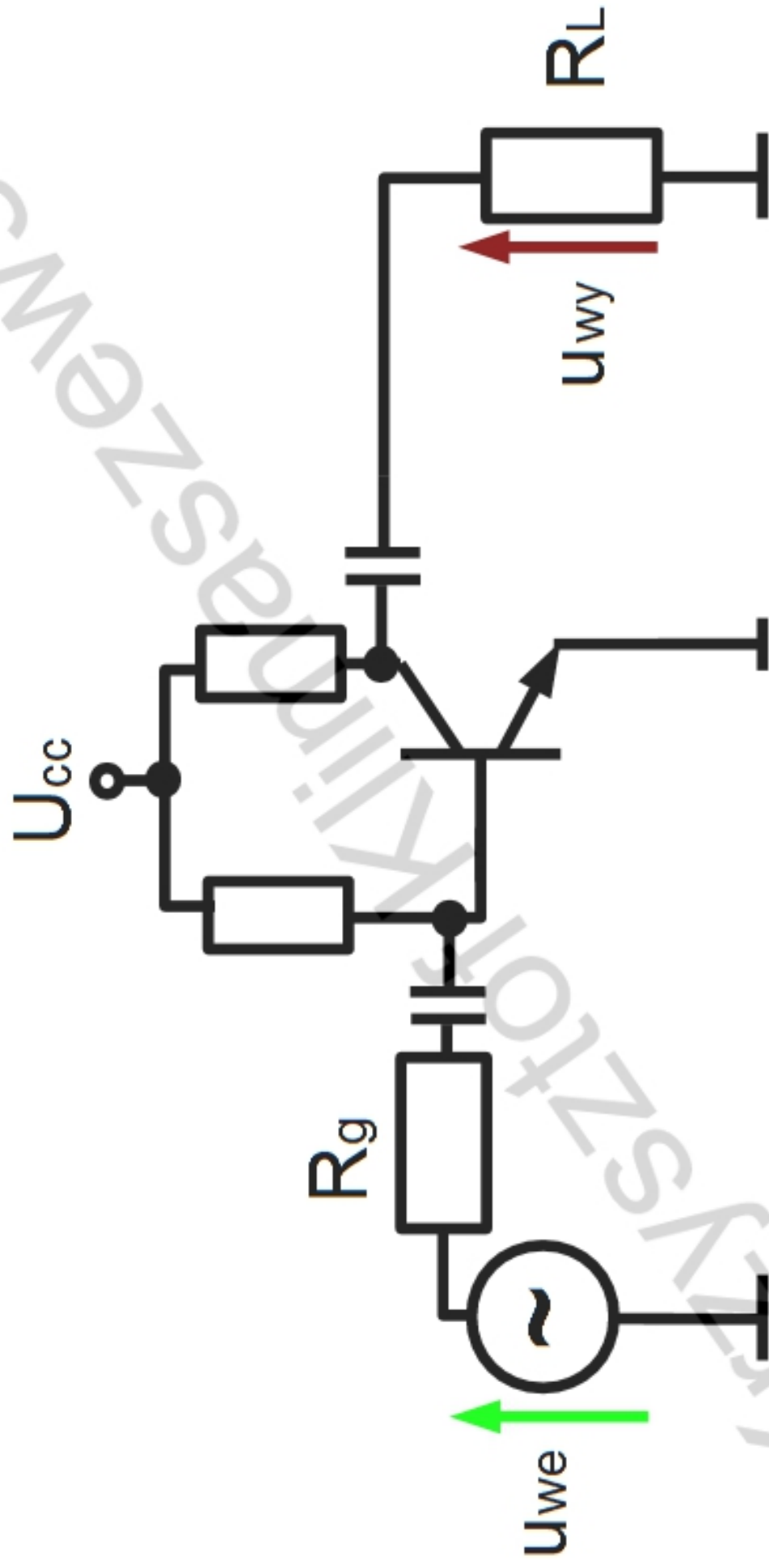
# Parametry wzmacniacza



# Parametry wzmacniacza



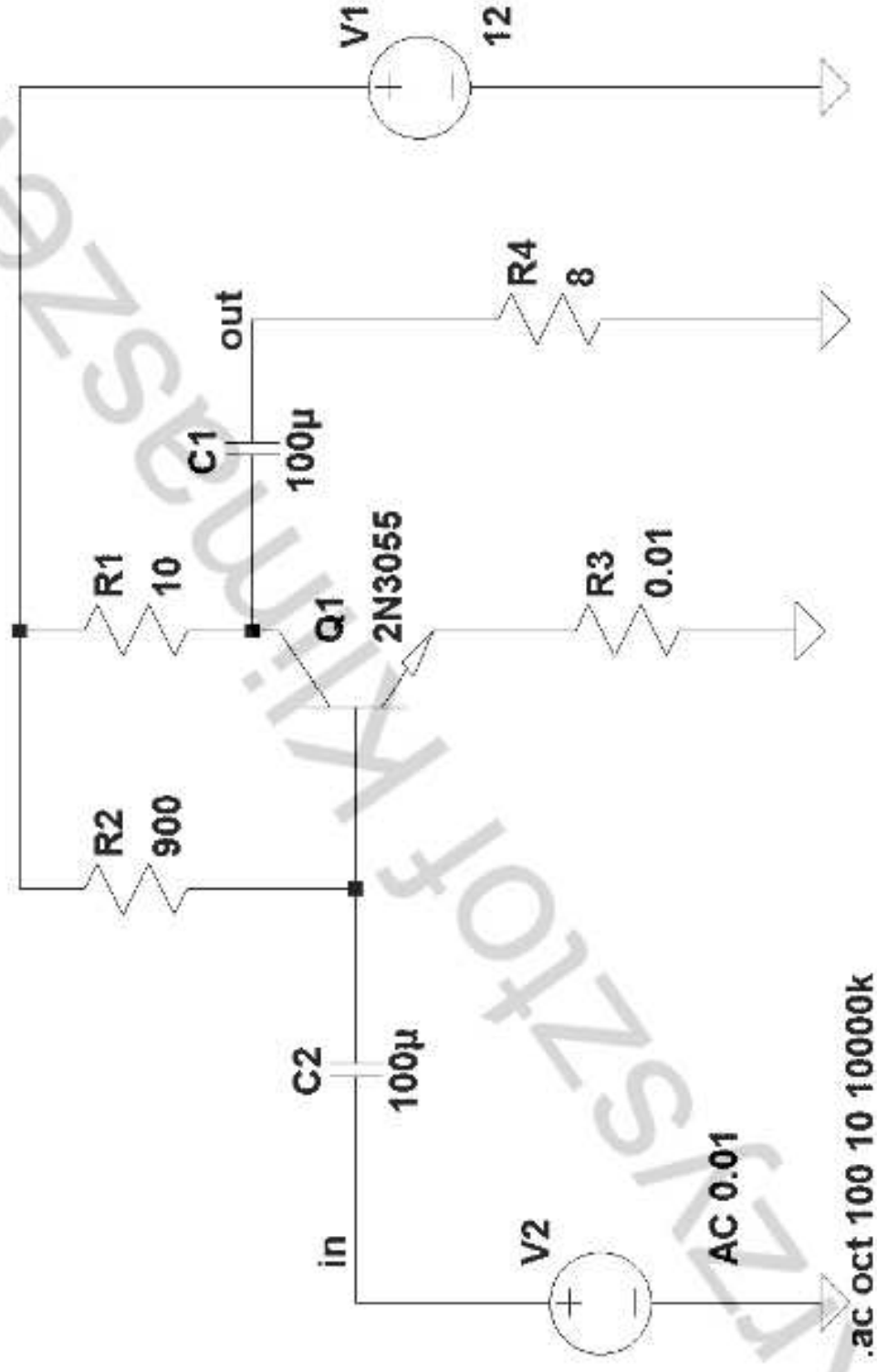
# Parametry wzmacniacza



# Wzmacniacz tranzystorowy

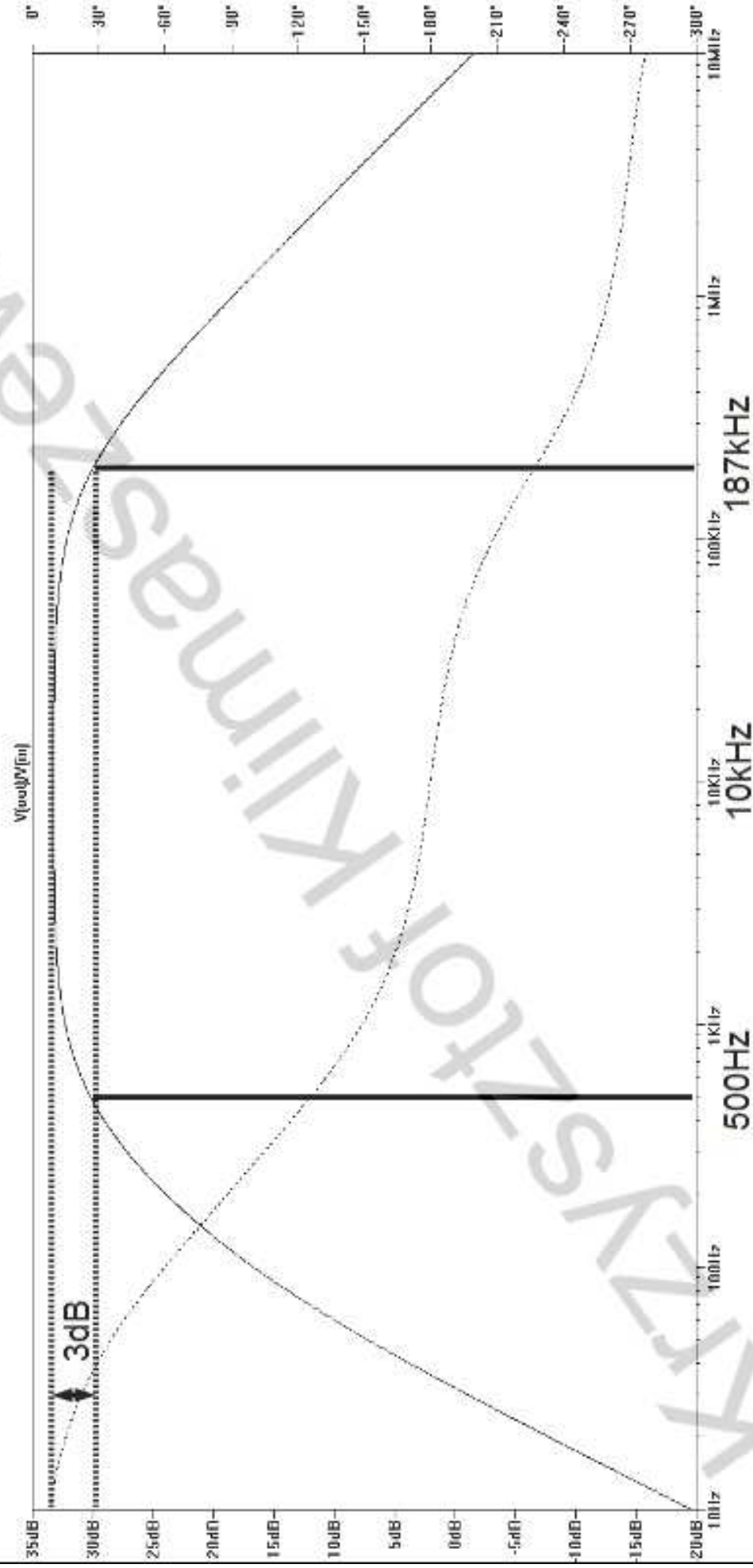
- 3 podstawowe układy wzmacniaczy
  - ze wspólnym emiterem (Common Emitter)
    - wejście na bazie
    - wyjście na kolektorze
  - ze wspólnym kolektorem (CC)
    - wejście na bazie
    - wyjście na emiterze
  - ze wspólną bazą (CB)
    - wejście na emiterze
    - wyjście na kolektorze
    - baza połączona kondensatorem z masą (uziemia na dla przebiegów zmiennych)

# Typowa charakterystyka amplitudowa wzmacniacza

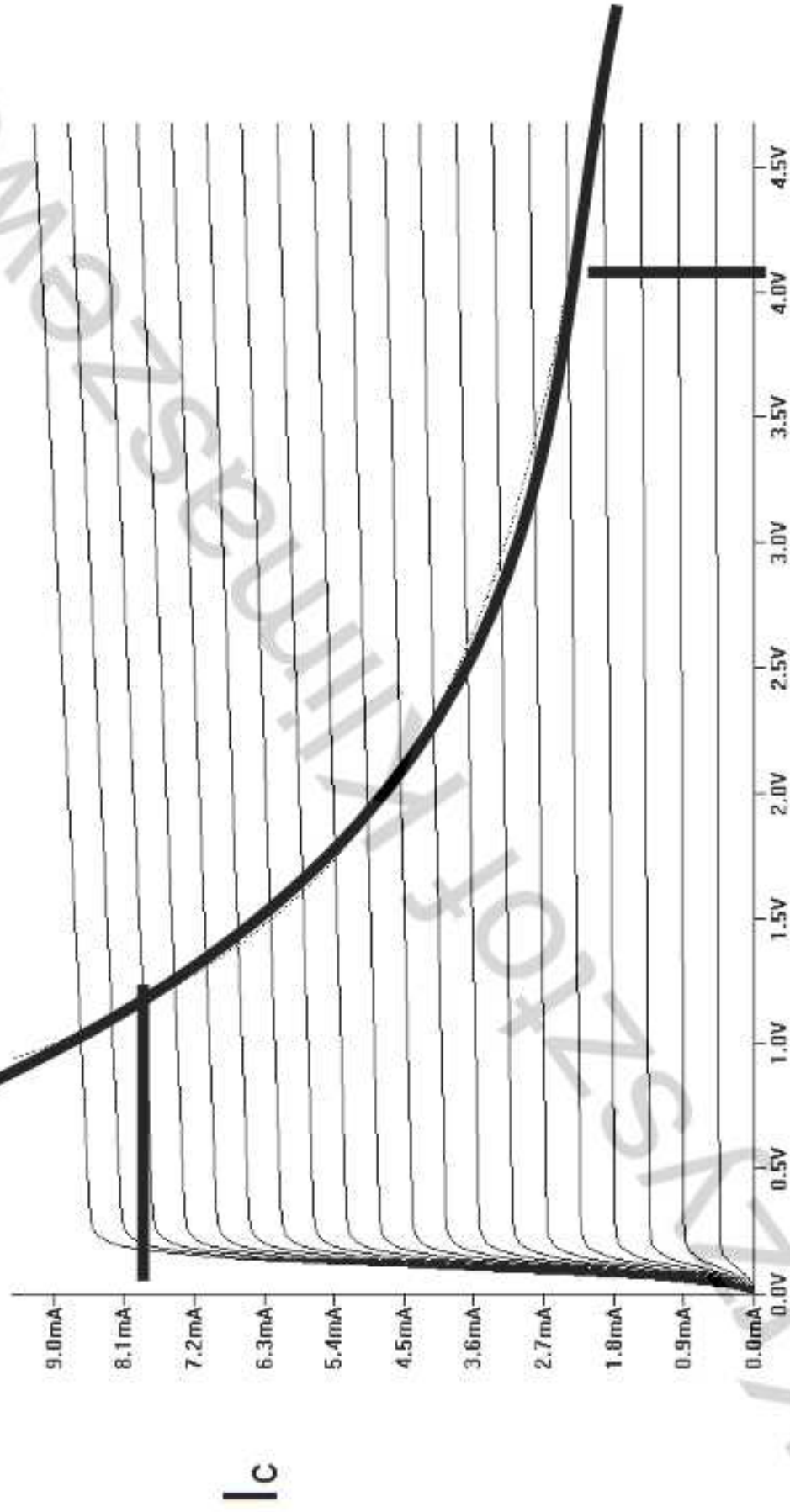




# Typowa charakterystyka amplitudowa wzmacniacza

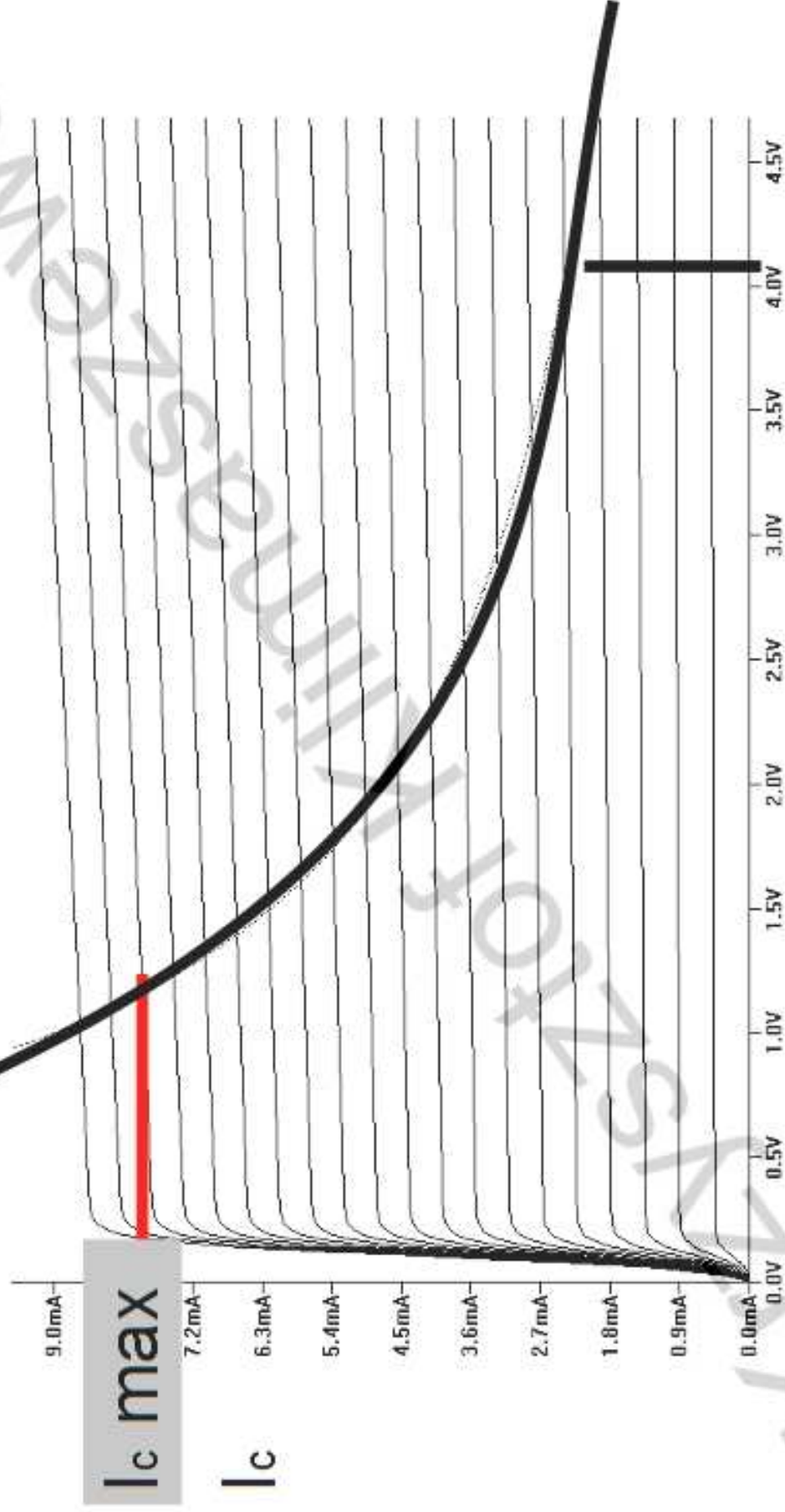


# Wydzielana moc



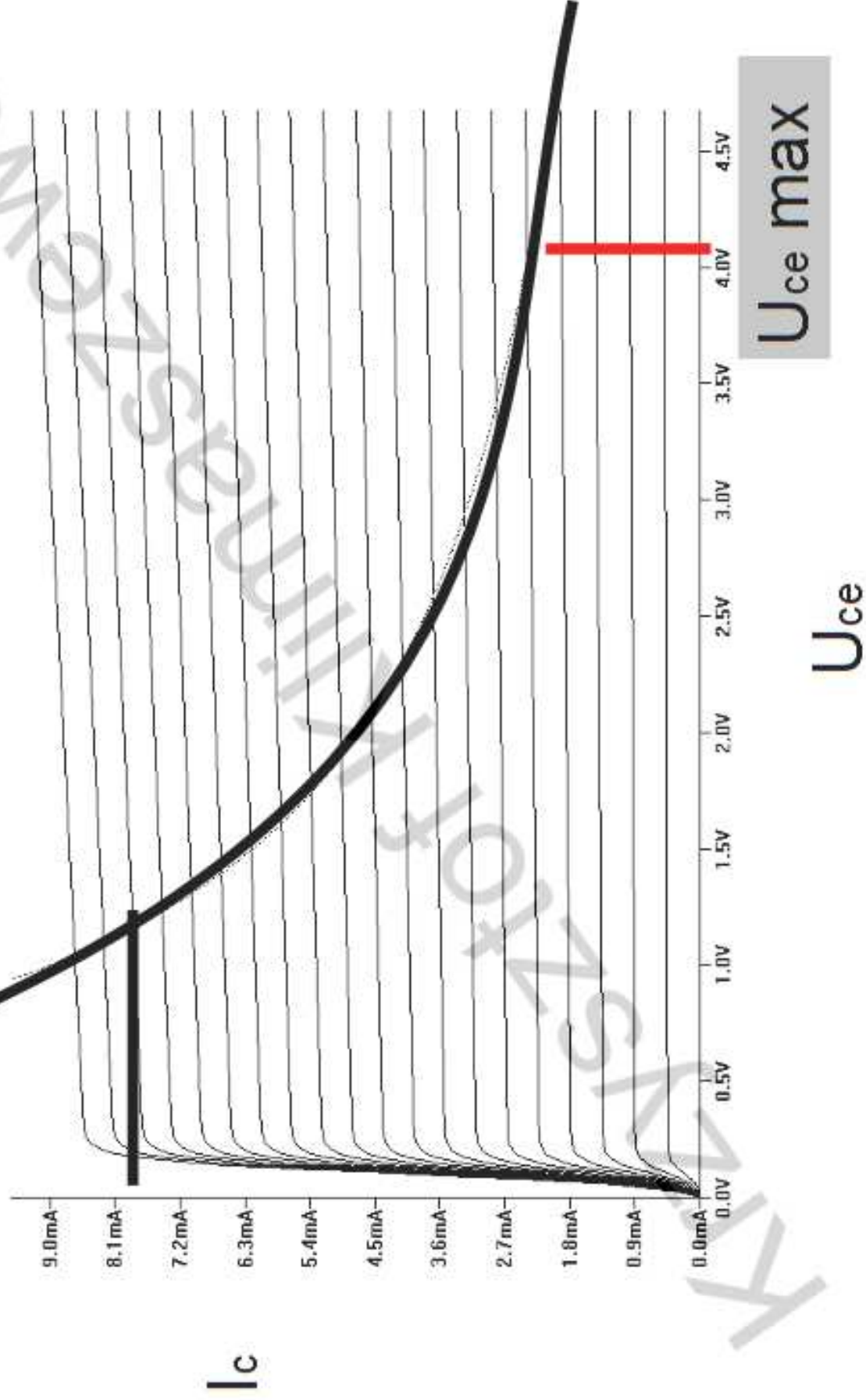
$U_{ce}$

# Wydzielana moc

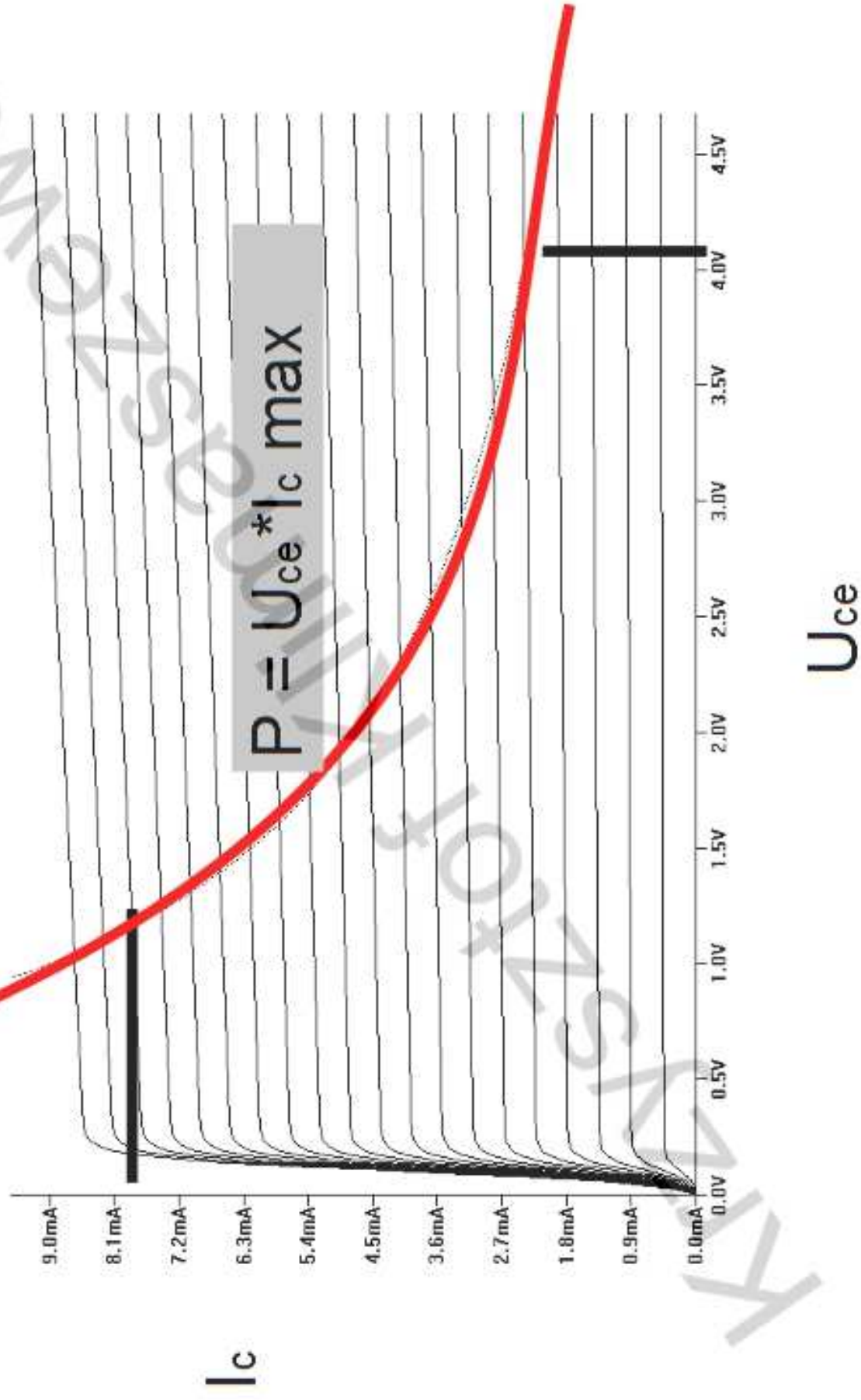


$U_{ce}$

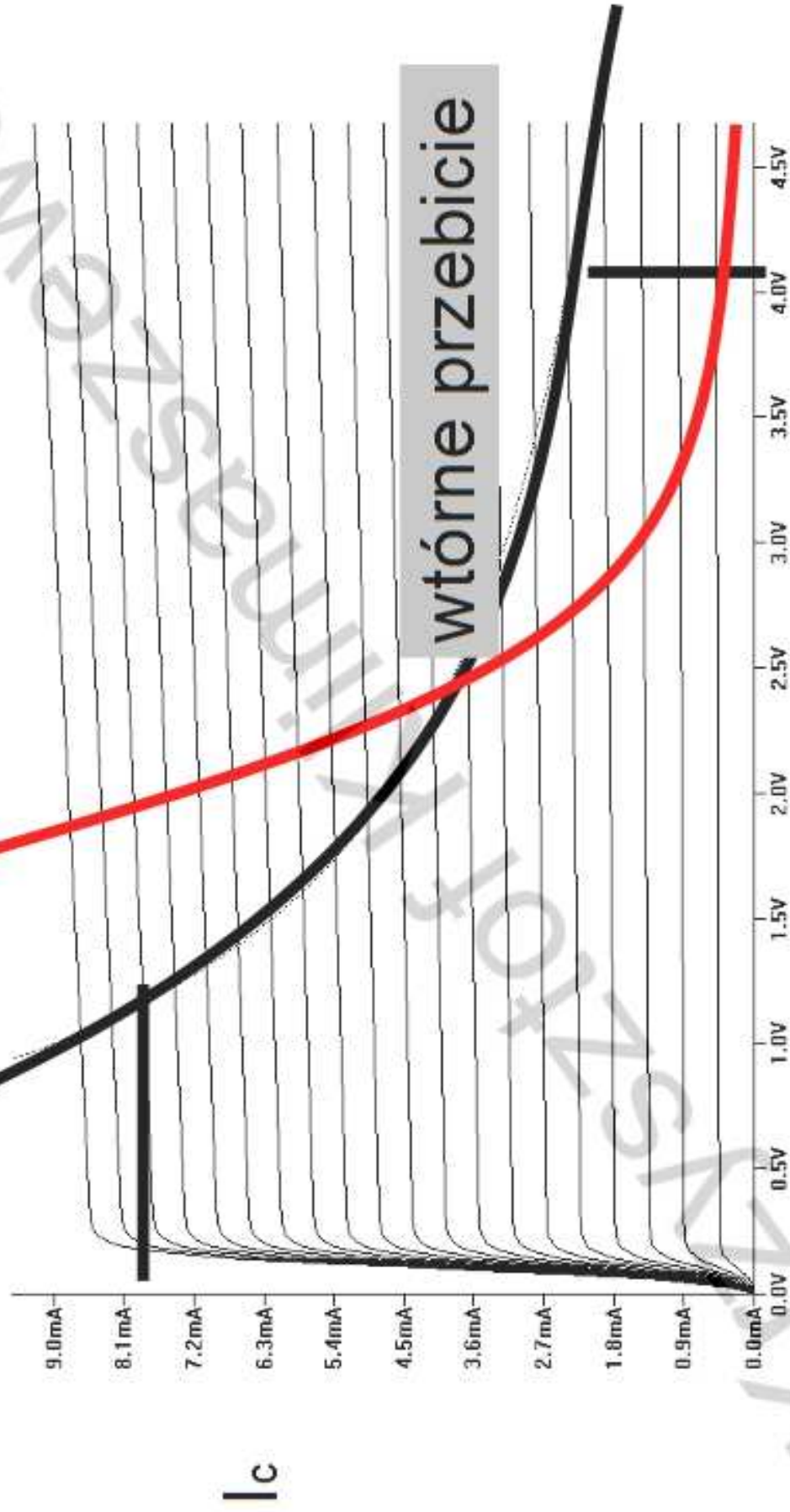
# Wydzielana moc



# Wydzielana moc



Wydzielana moc

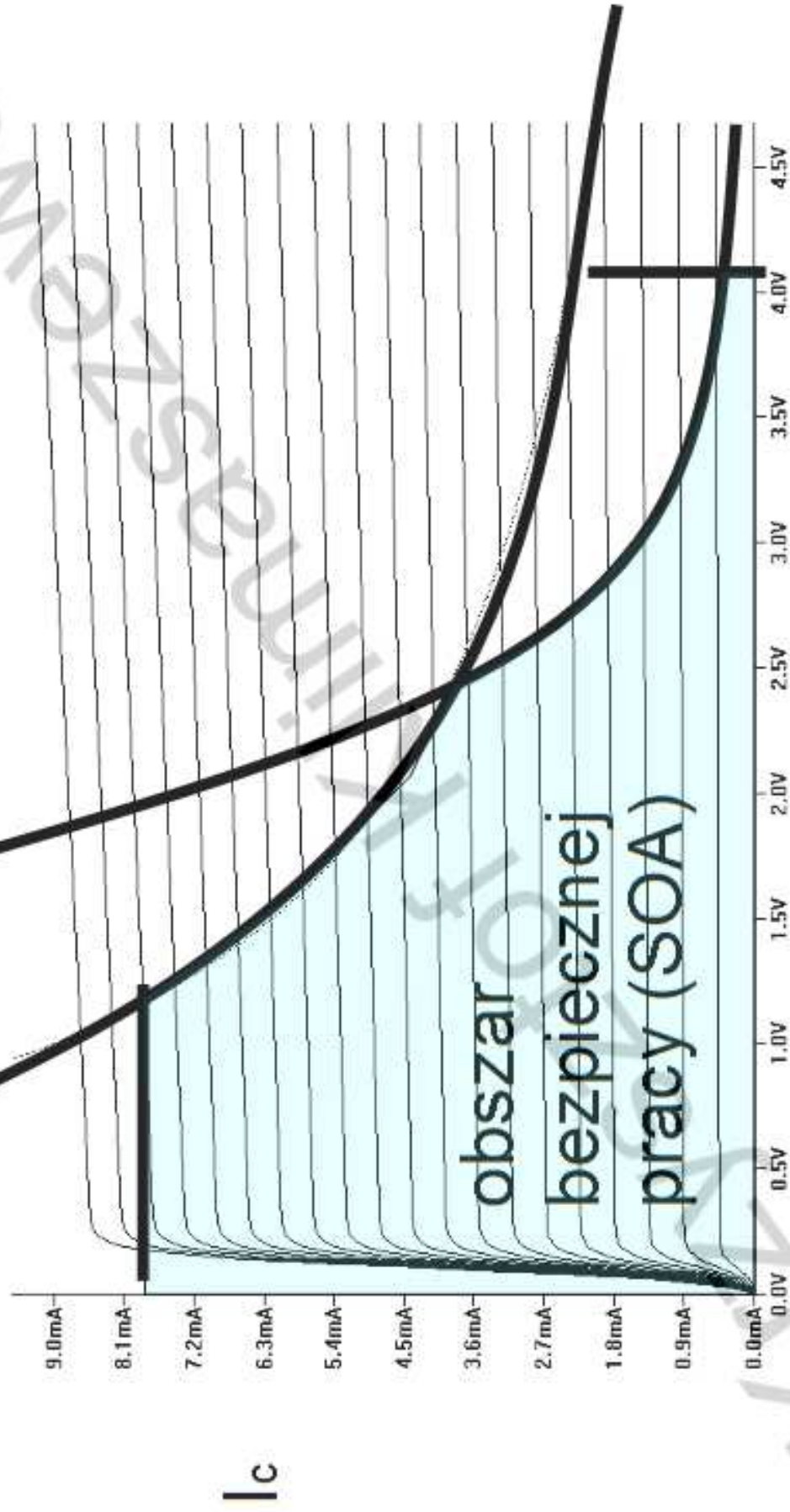


wtórne przebiecie

$U_{ce}$

$I_c$

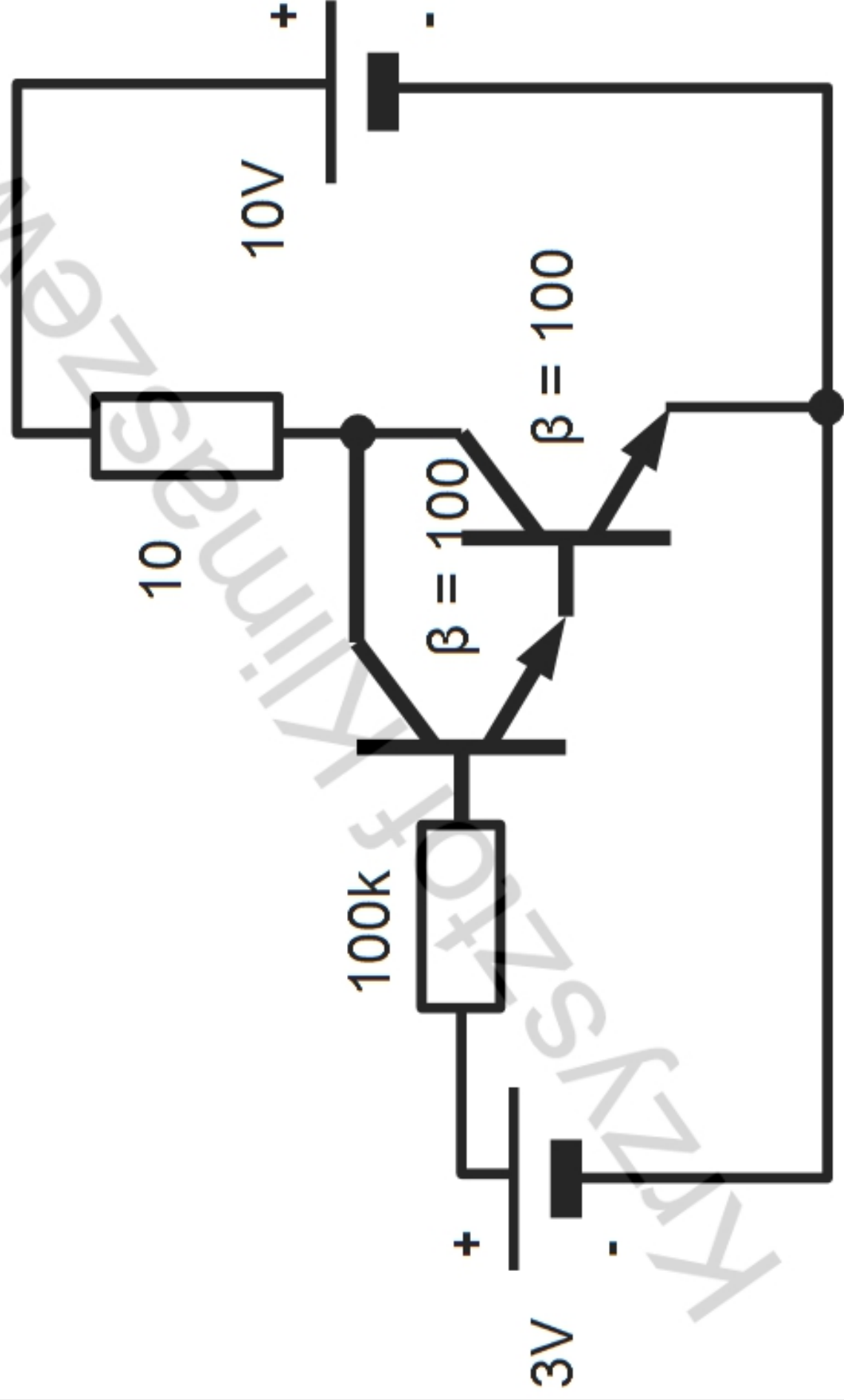
Wydzielana moc



obszar  
bezpiecznej  
pracy (SOA)

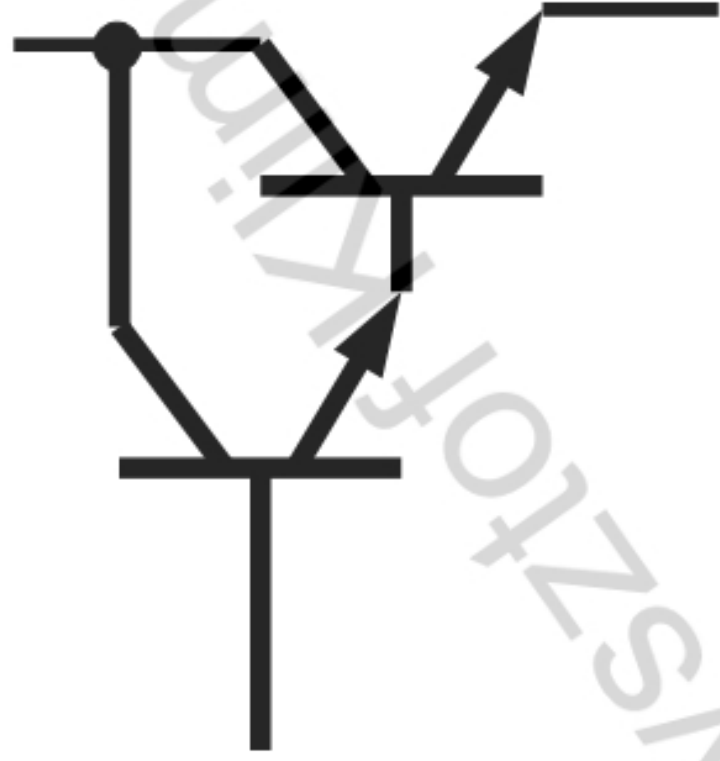
$U_{ce}$

# Inny układ z tranzystorami



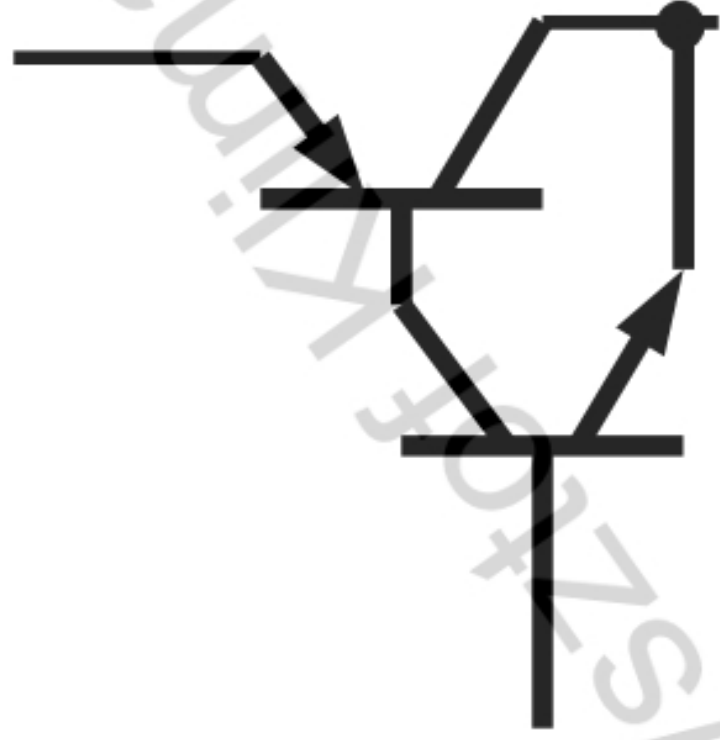


Inny układ z tranzystorami



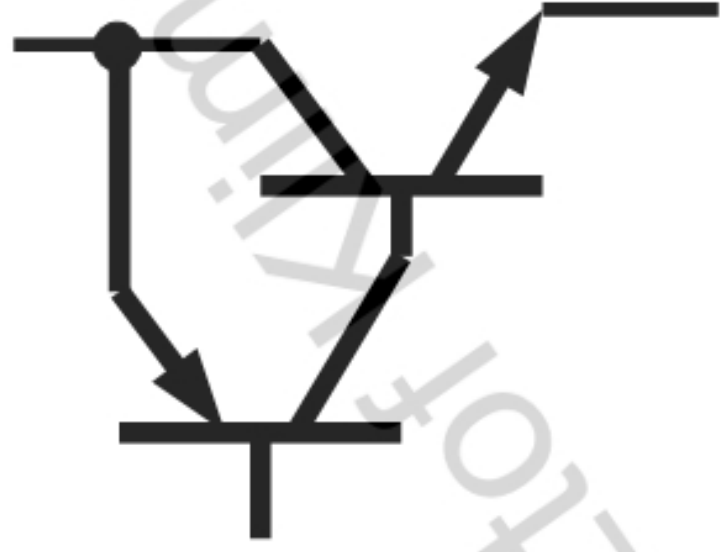
układ Darlingtona

Inny układ z tranzystorami



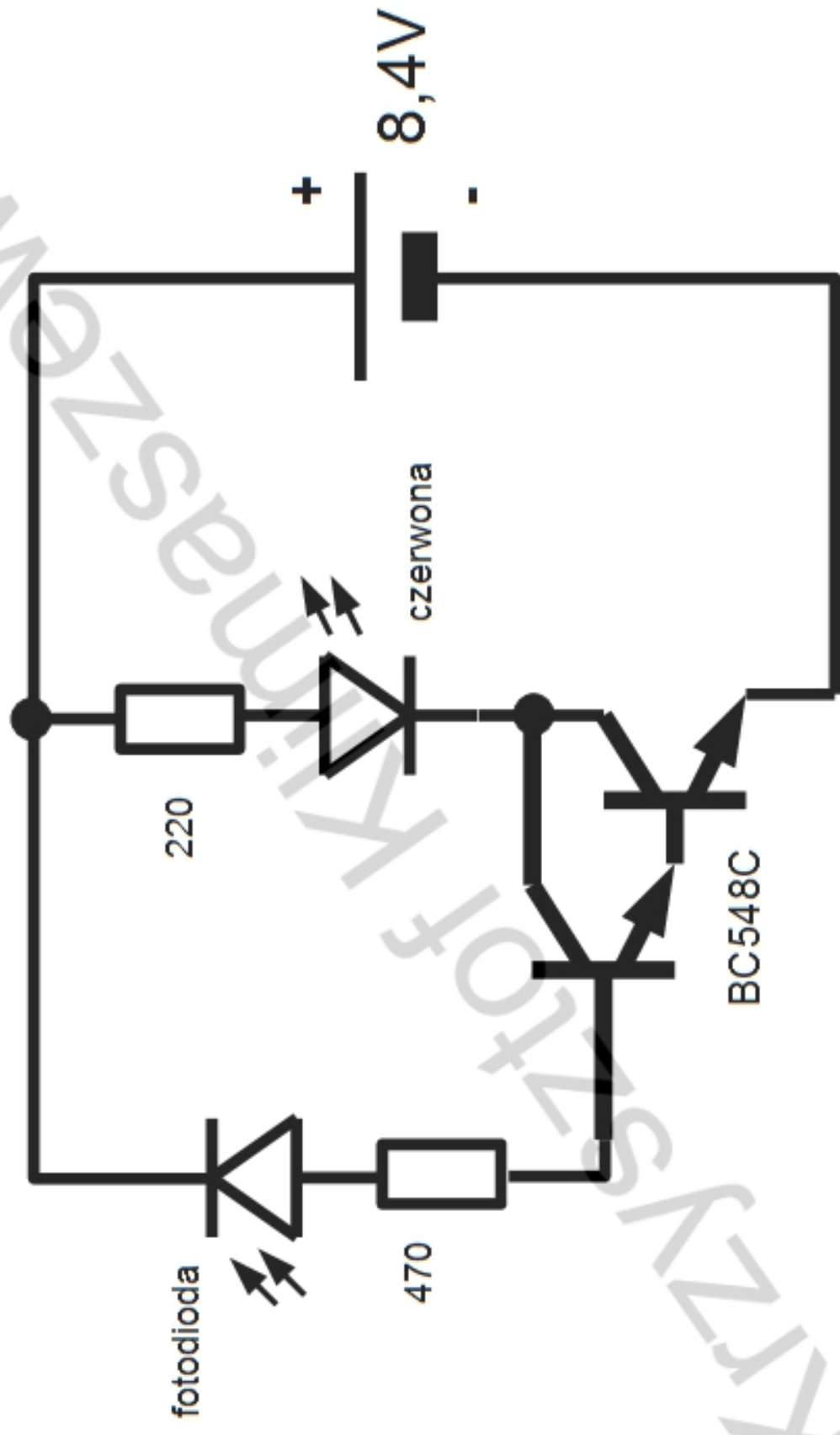
**układ Sziklaiego**

Inny układ z tranzystorami



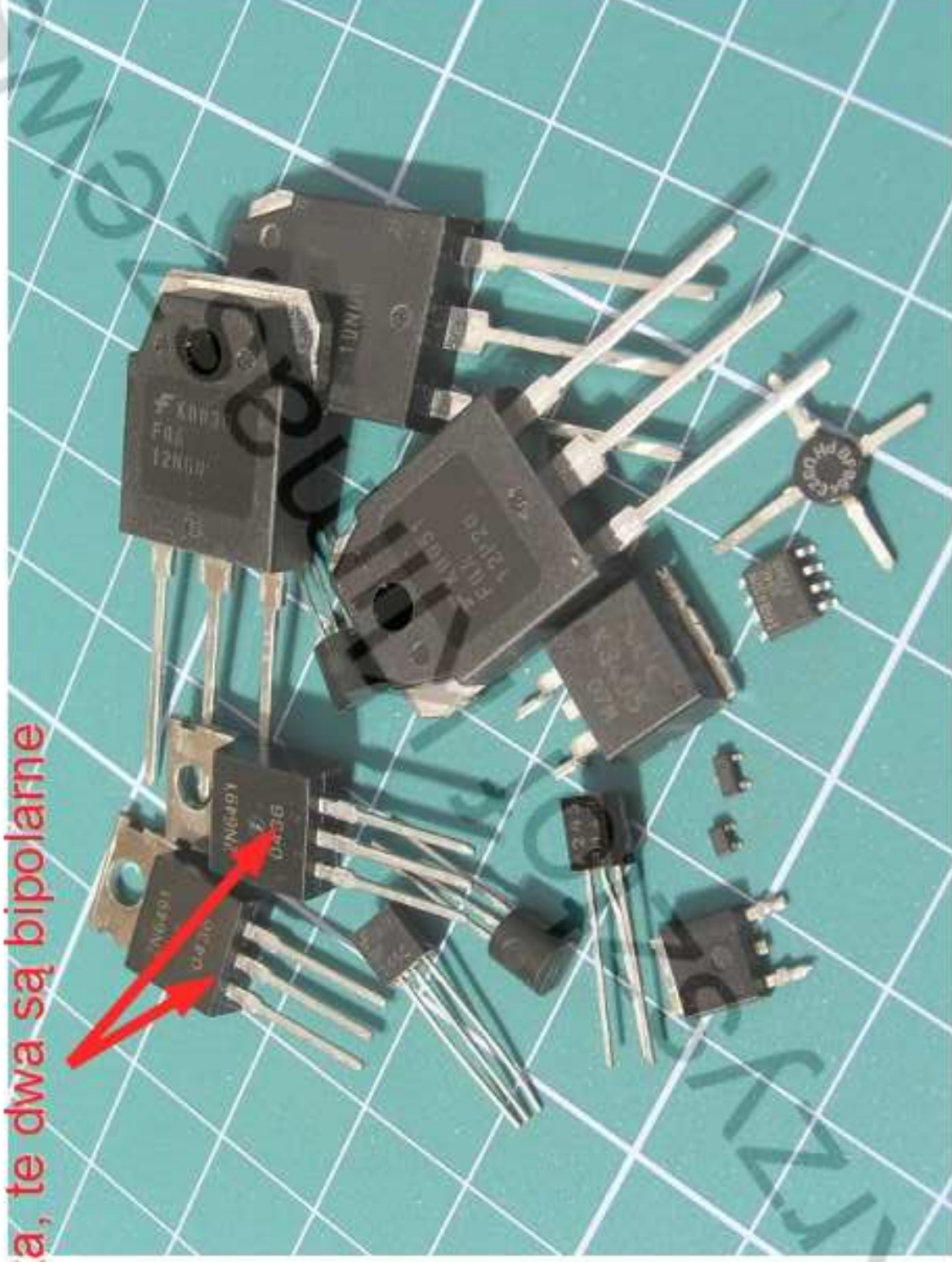
**układ Sziklaiego**

# Po co nam tranzystor?



# Tranzystory polowe

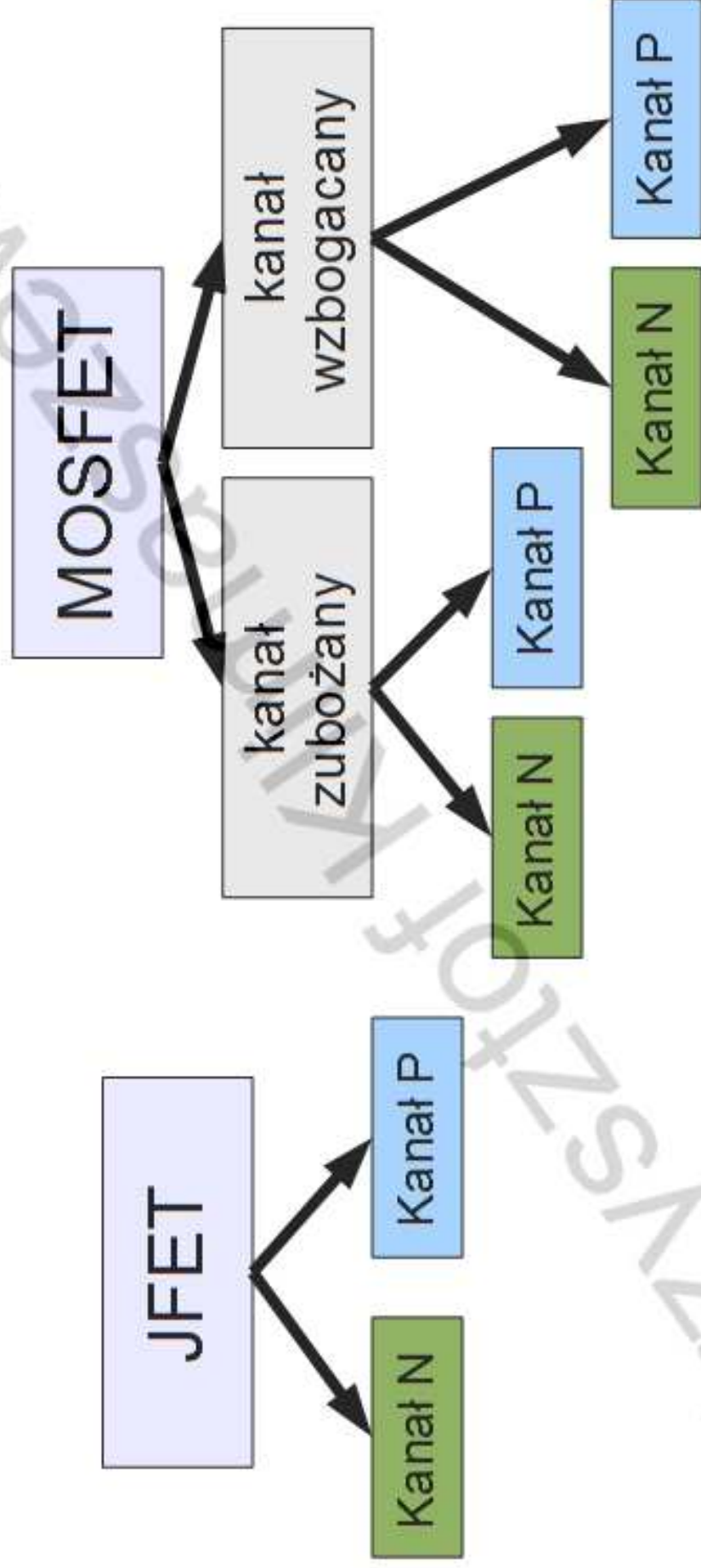
pomyłka, te dwa są bipolarnie



# Tranzystory polowe

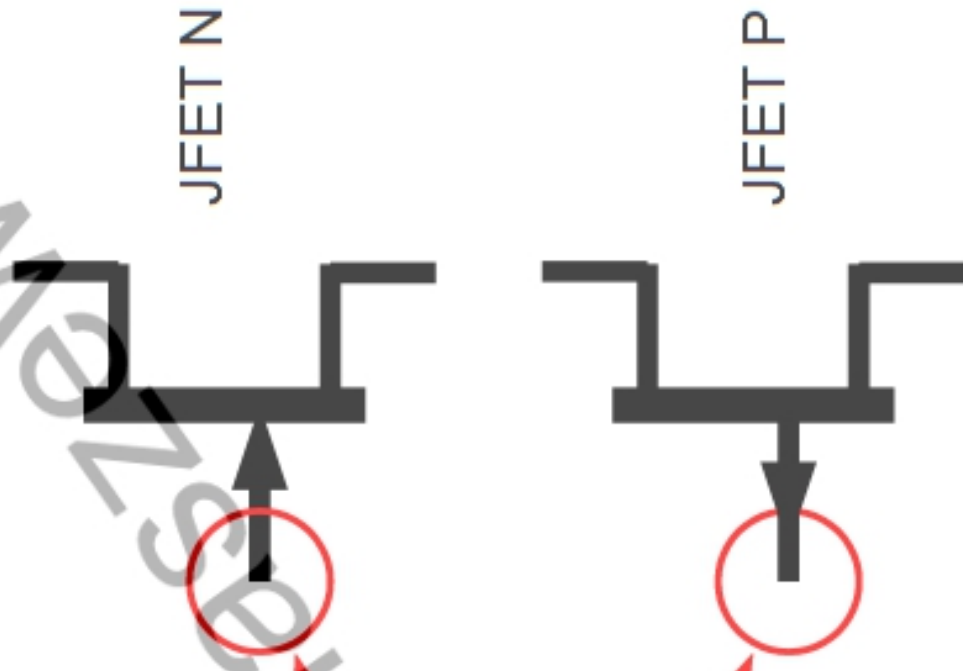
- tranzystory złączowe **JFET** (junction field effect transistor)
- tranzystory z izolowaną bramką **MOSFET** (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
  - zubożane (depletion mode)
  - wzbogacane (enhancement mode)

# Tranzystory polowe



# JFET

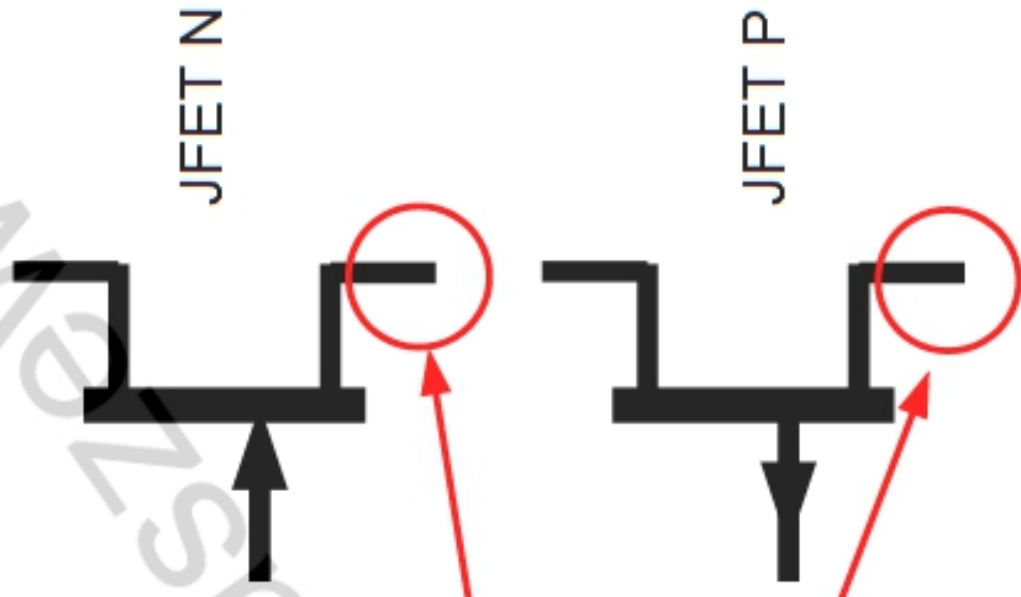
- ma 3 elektrody („końcówki”)
- bramka (G)
- źródło (S)
- dren (D)





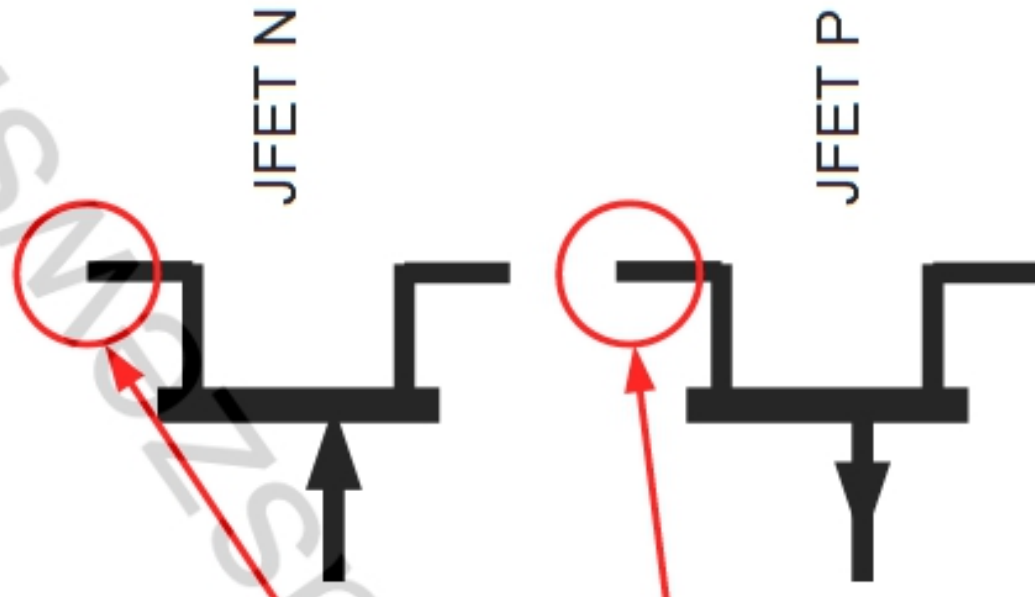
# JFET

- ma 3 elektrody („końcówki”)
- bramka (G)
- źródło (S)
- dren (D)

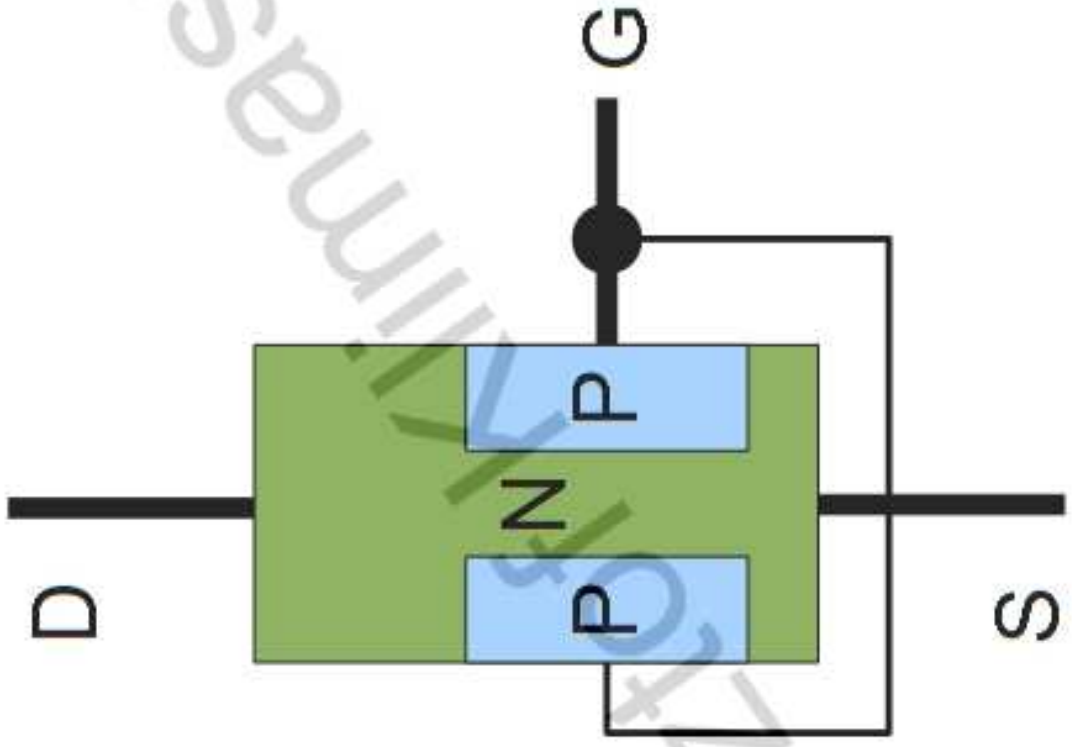


# JFET

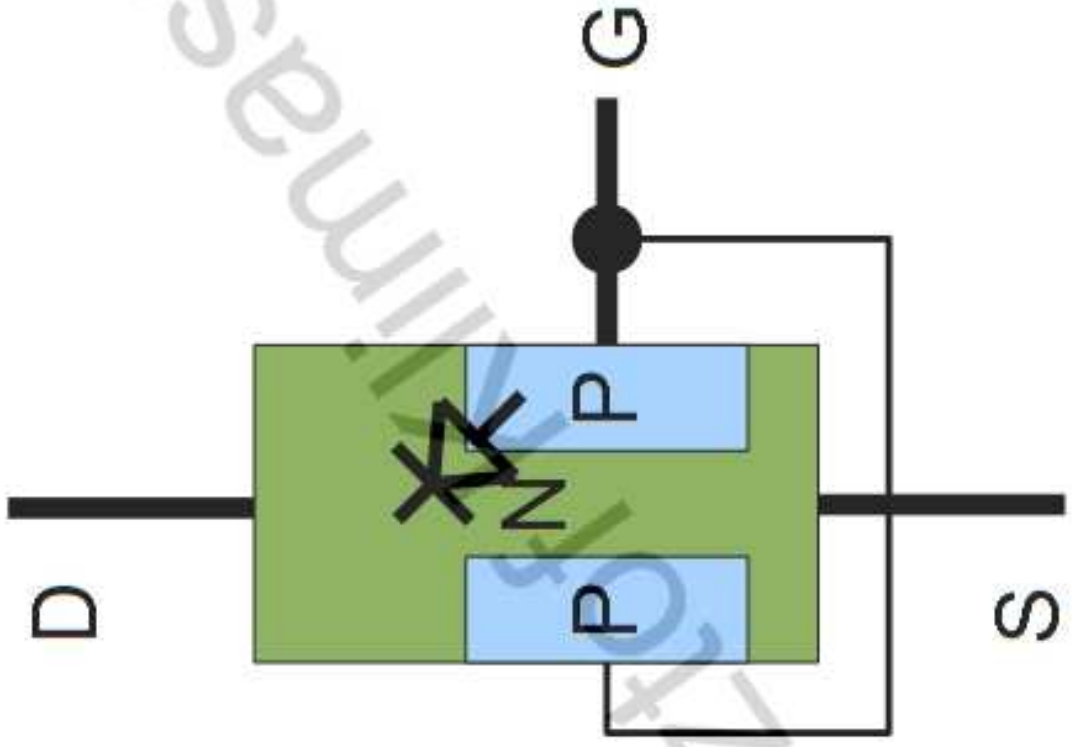
- ma 3 elektrody („końcówki”)
- bramka (G)
- źródło (S)
- dren (D)



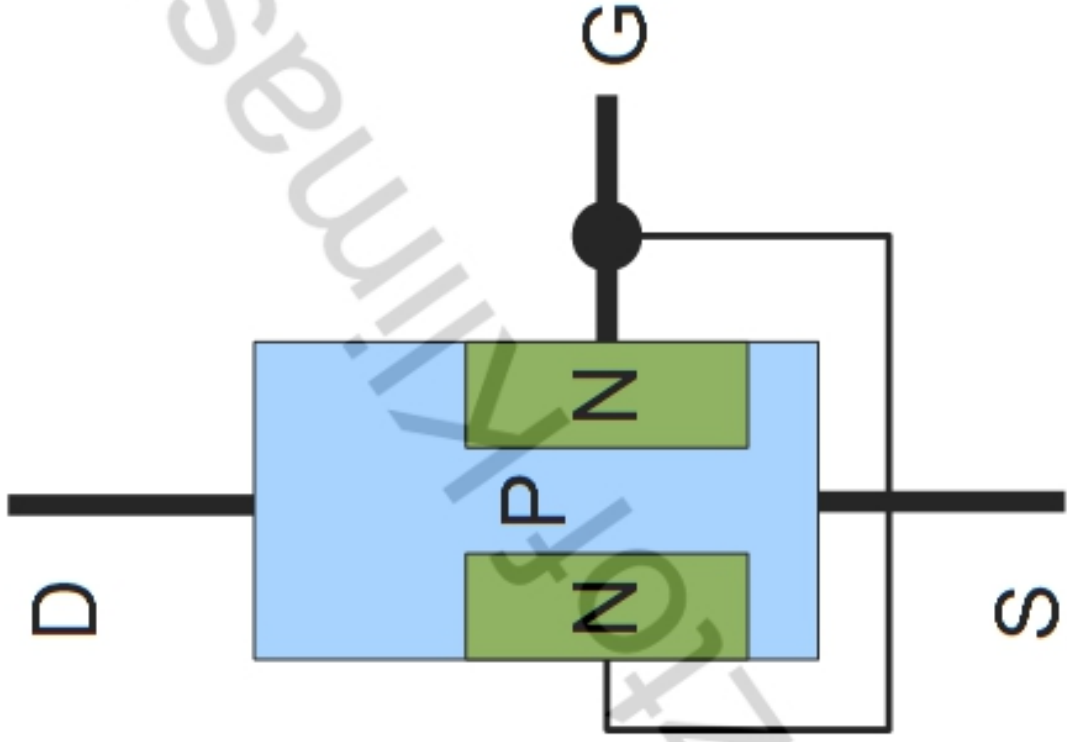
JFET N



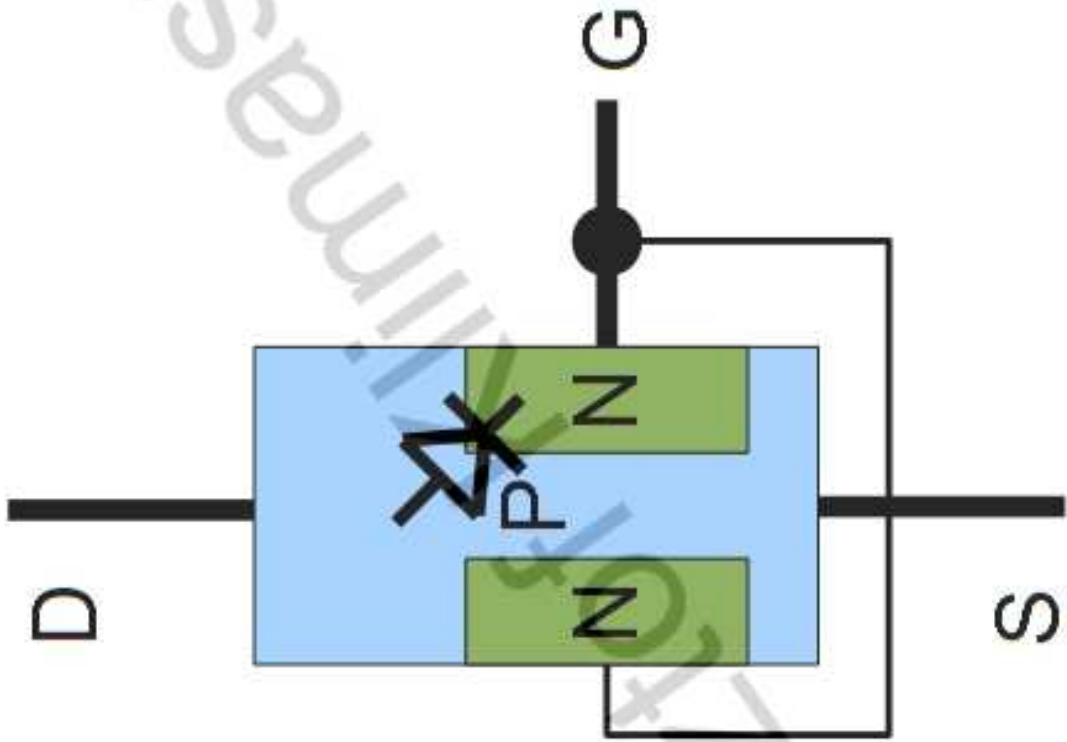
JFET N



# JFET P

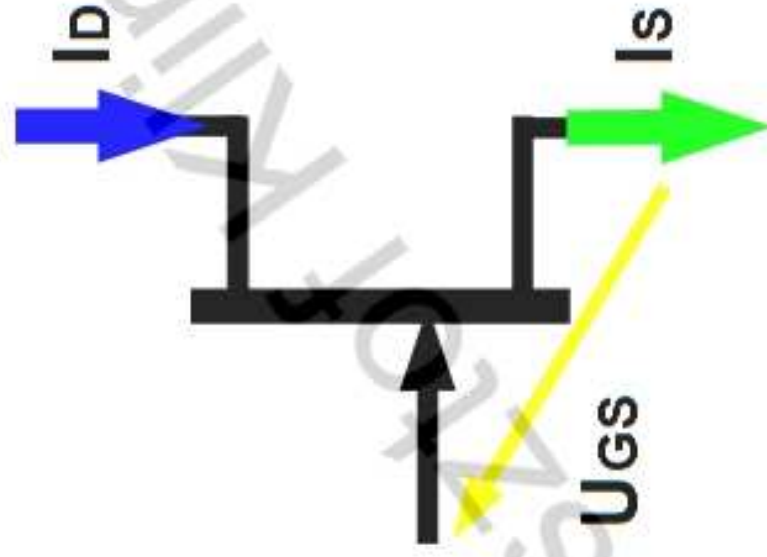


# JFET P



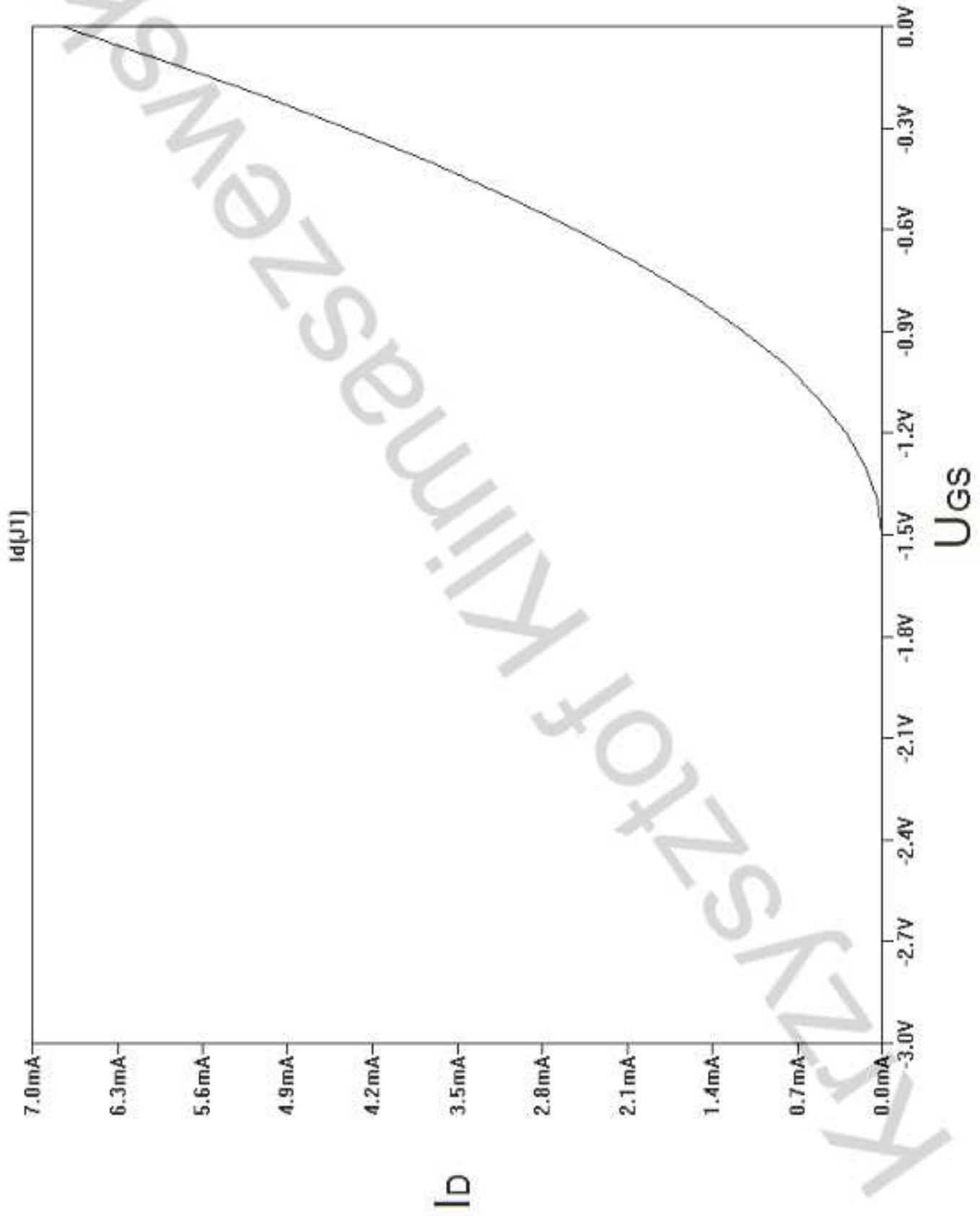
# JFET

- Prąd drenu jest sterowany przez napięcie bramka - źródło

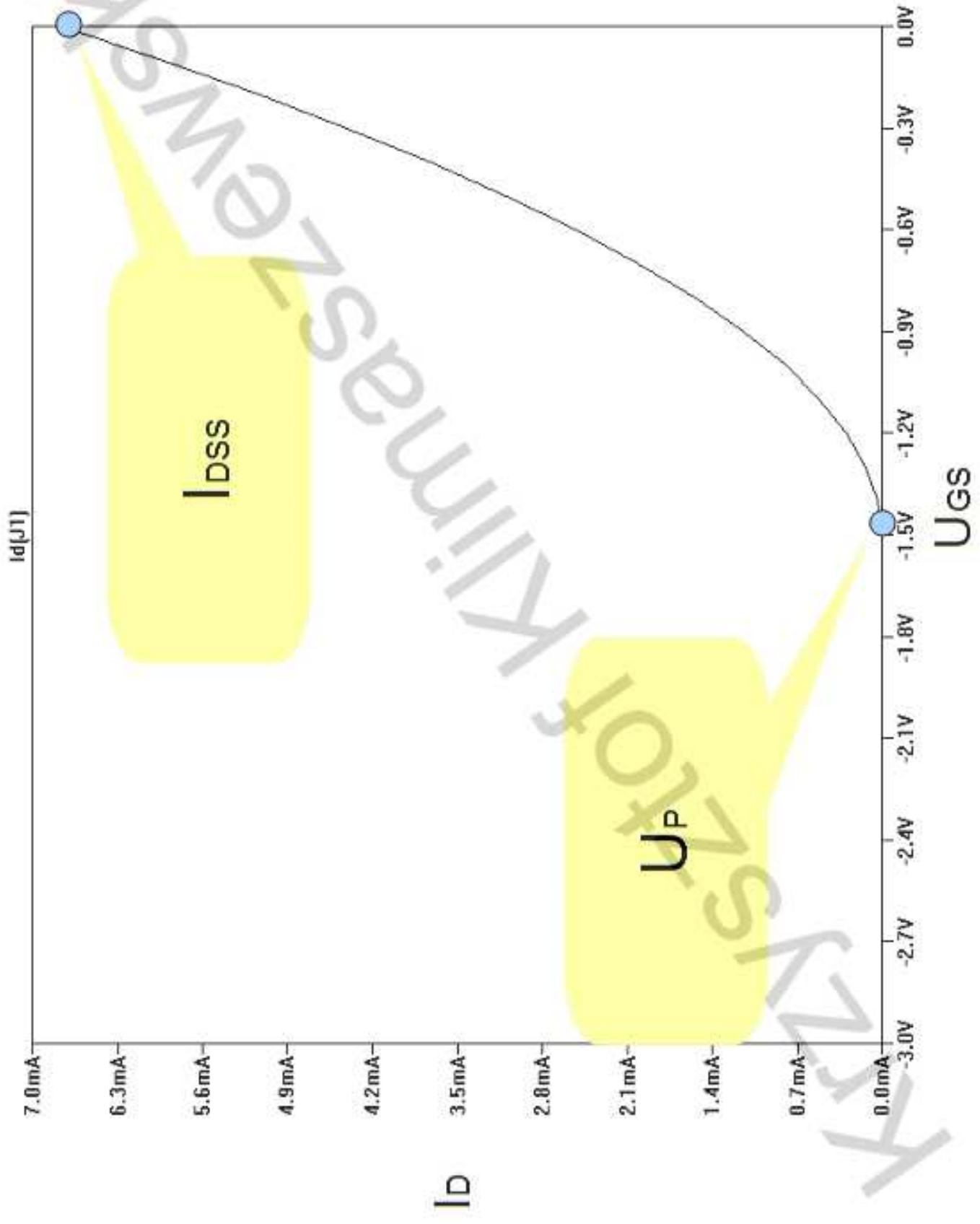


$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2$$

$$I_D = I_S$$







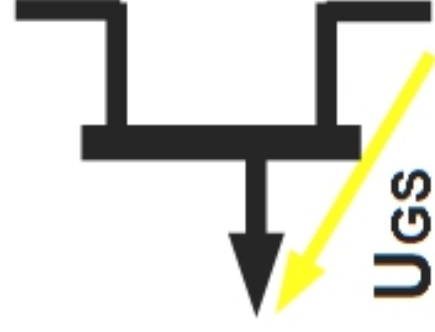
# Zasady sterowania JFET

- Złącze bramka – źródło spolaryzowane zaporowo (albo przynajmniej – poniżej napięcia przewodzenia diody!)

JFET N



JFET P



## Zasady sterowania JFET

• (podobnie jak w przypadku tranzystora BJT, należy pamiętać o polaryzacji bramki – nie należy jej podłączać do źródła!)

$$U_{GS} < 0$$

potencjał bramki  
niższy niż źródła

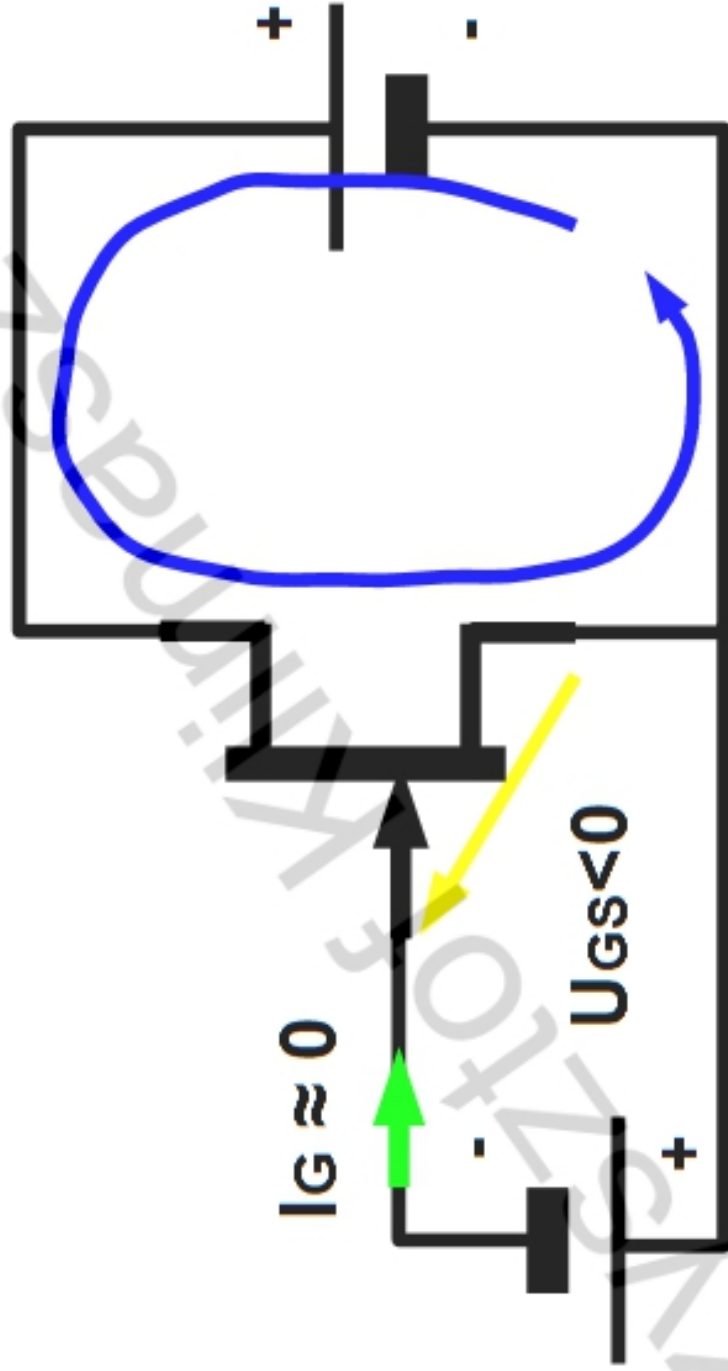


$$U_{GS} > 0$$

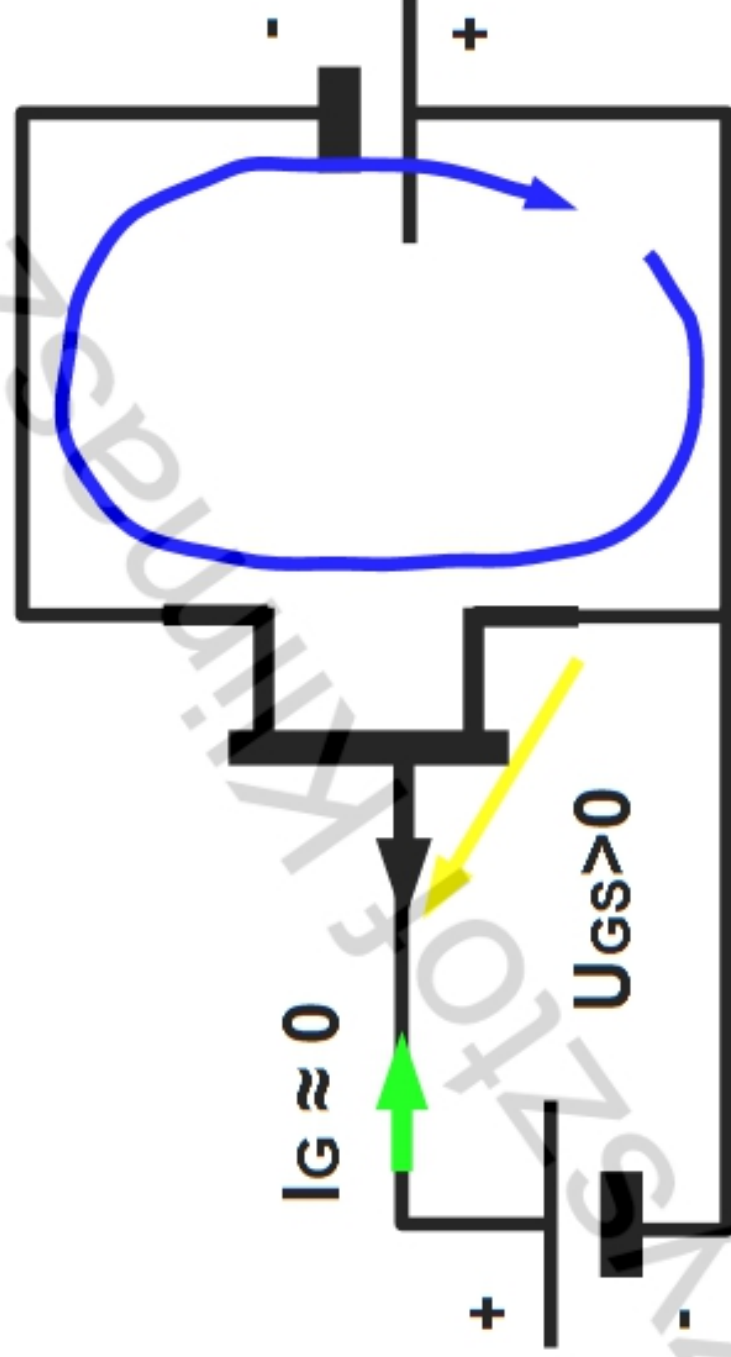
potencjał bramki  
wyższy niż źródła



Jak podłączać napięcia do JFET N?

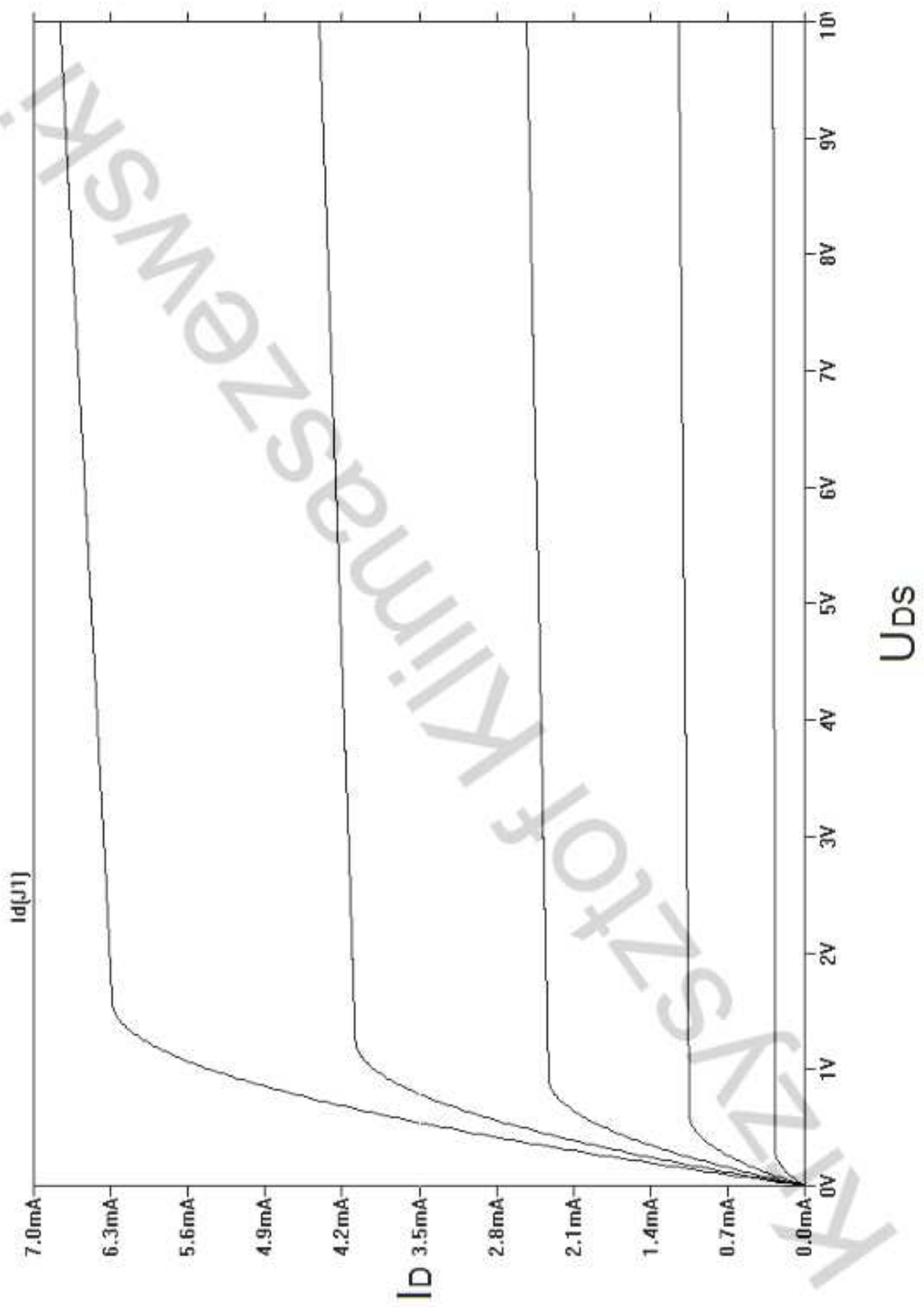


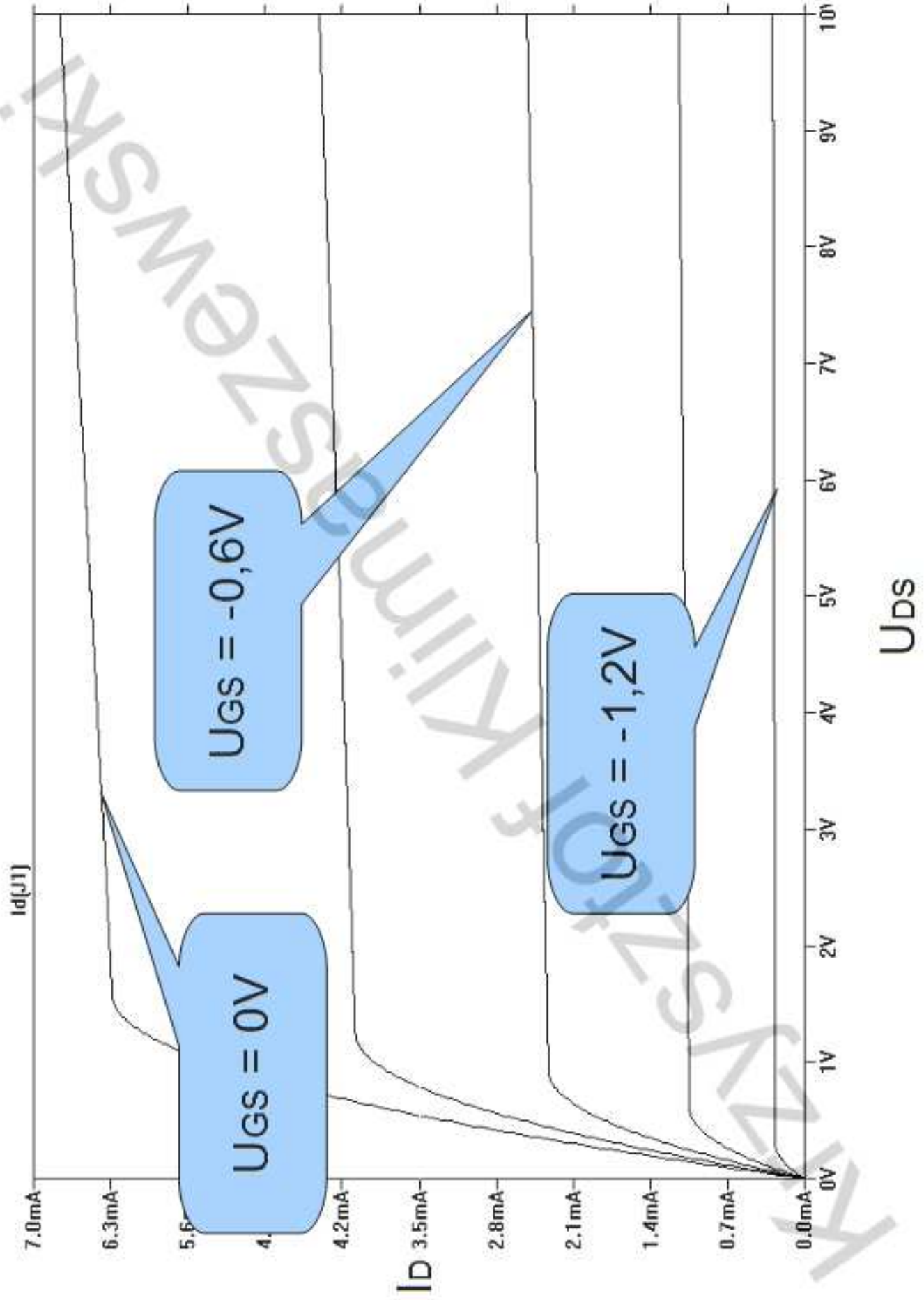
Jak podłączać napięcia do JFET P?



# Tranzystor JFET

- 3 zakresy pracy
  - odcięcie
  - obszar triodowy
  - obszar nasycenia







# Tranzystor JFET

- Praca w roli regulowanego rezystora
- obszar triodowy

$$I_D = \frac{I_{DSS}}{U_P^2} \left( 2 \cdot (U_{GS} - U_P) \cdot U_{DS} - U_{DS}^2 \right)$$

# Tranzystor JFET

- Praca w roli regulowanego rezystora
- obszar triodowy

$$I_D = \frac{I_{DSS}}{U_P^2} \left( 2 \cdot (U_{GS} - U_P) \cdot U_{DS} - U_{DS}^2 \right)$$

- zakładamy, że  $U_{DS}$  jest bardzo małe, w okolicach zera

# Tranzystor JFET

- Praca w roli regulowanego rezystora
- obszar triodowy

$$I_D = \frac{I_{DSS}}{U_P^2} \left( 2 \cdot (U_{GS} - U_P) \cdot U_{DS} - U_{DS}^2 \right)$$

możemy zaniedbać

- zakładamy, że  $U_{DS}$  jest bardzo małe, w okolicach zera

# Tranzystor JFET

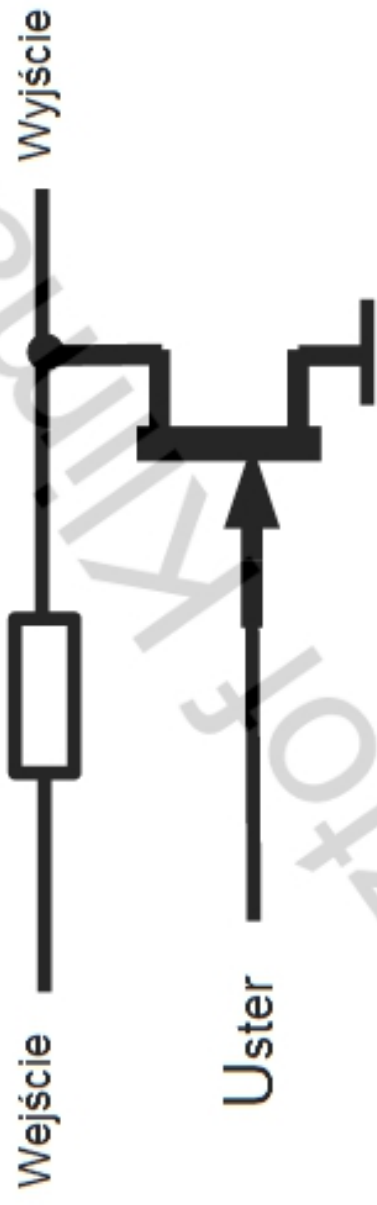
- Praca w roli regulowanego rezystora
- obszar triodowy

$$I_D = \frac{I_{DSS}}{U_P^2} \left( 2 \cdot (U_{GS} - U_P) \cdot U_{DS} - U_{DS}^2 \right)$$

- zakładamy, że  $U_{DS}$  jest bardzo małe, w okolicach zera

$$r_{DS} = \frac{U_{DS}}{I_D} \approx \frac{U_P^2}{2 \cdot I_{DSS} \cdot (U_{GS} - U_P)}$$

# Tranzystor JFET



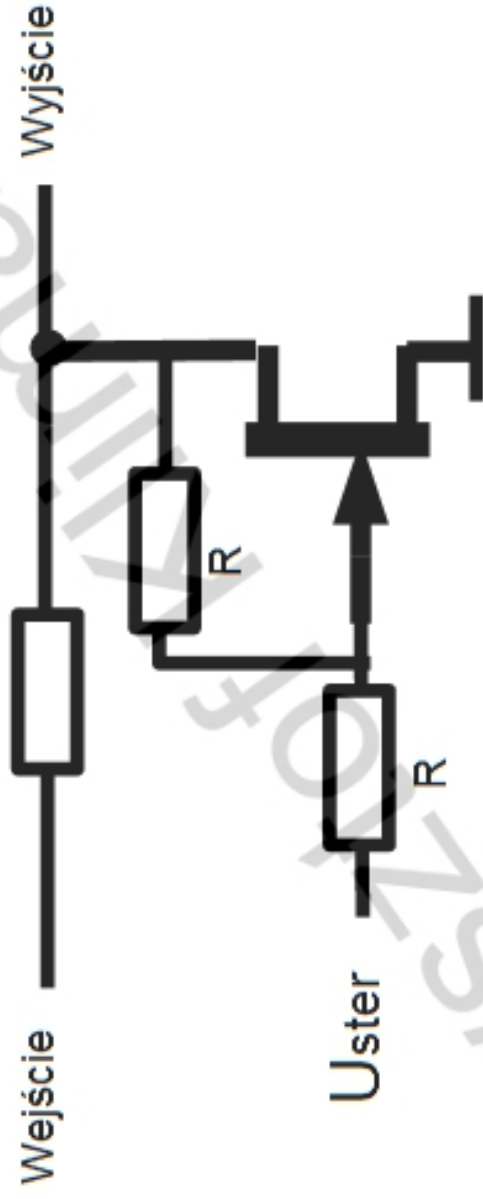
# Tranzystor JFET



minimalne  $r_d$  rzędu setek omów

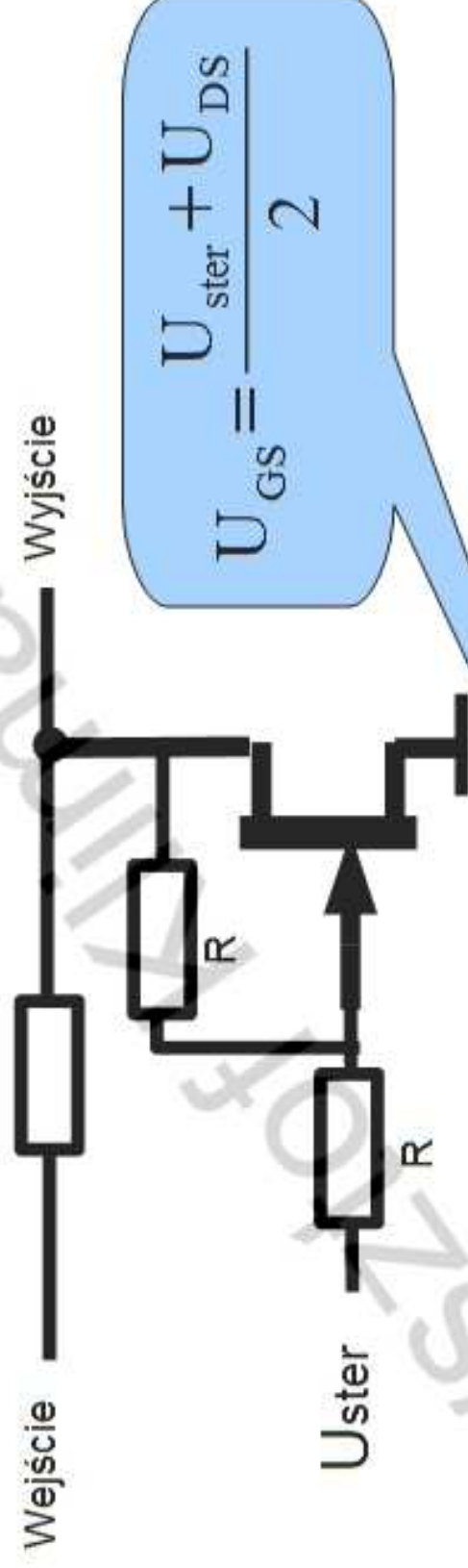
# Tranzystor JFET

- układ z mniejszymi zniekształceniami dla dużych sygnałów



# Tranzystor JFET

- układ z mniejszymi zniekształceniami dla dużych sygnałów

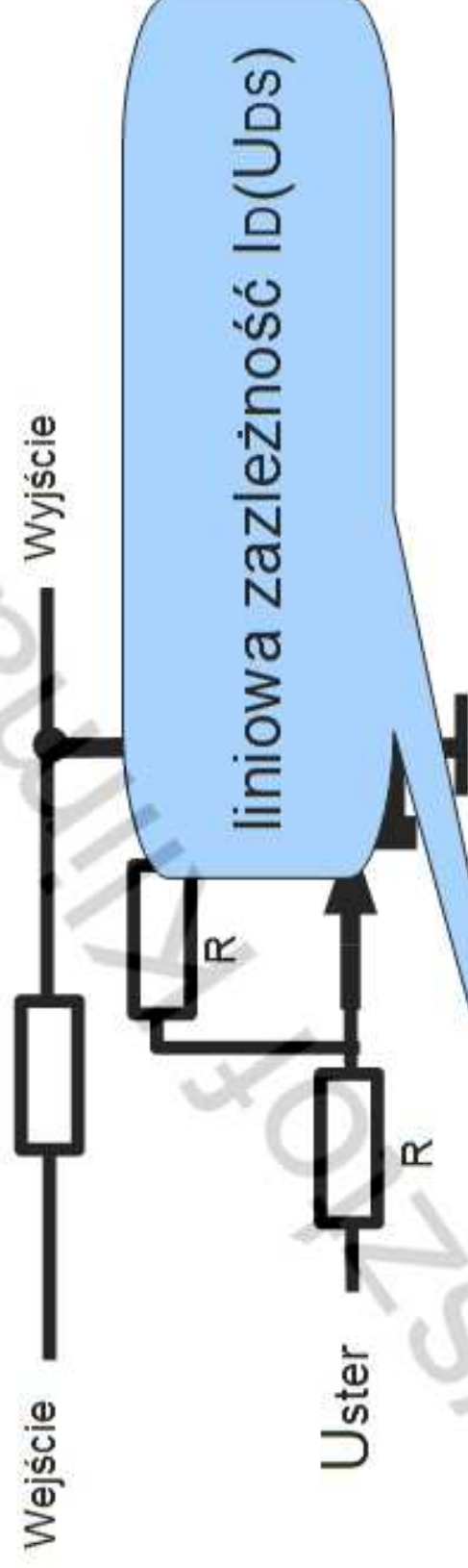


$$I_D = \frac{I_{DSS}}{U_P^2} (2 \cdot (U_{GS} - U_P) U_{DS} - U_{DS}^2)$$



# Tranzystor JFET

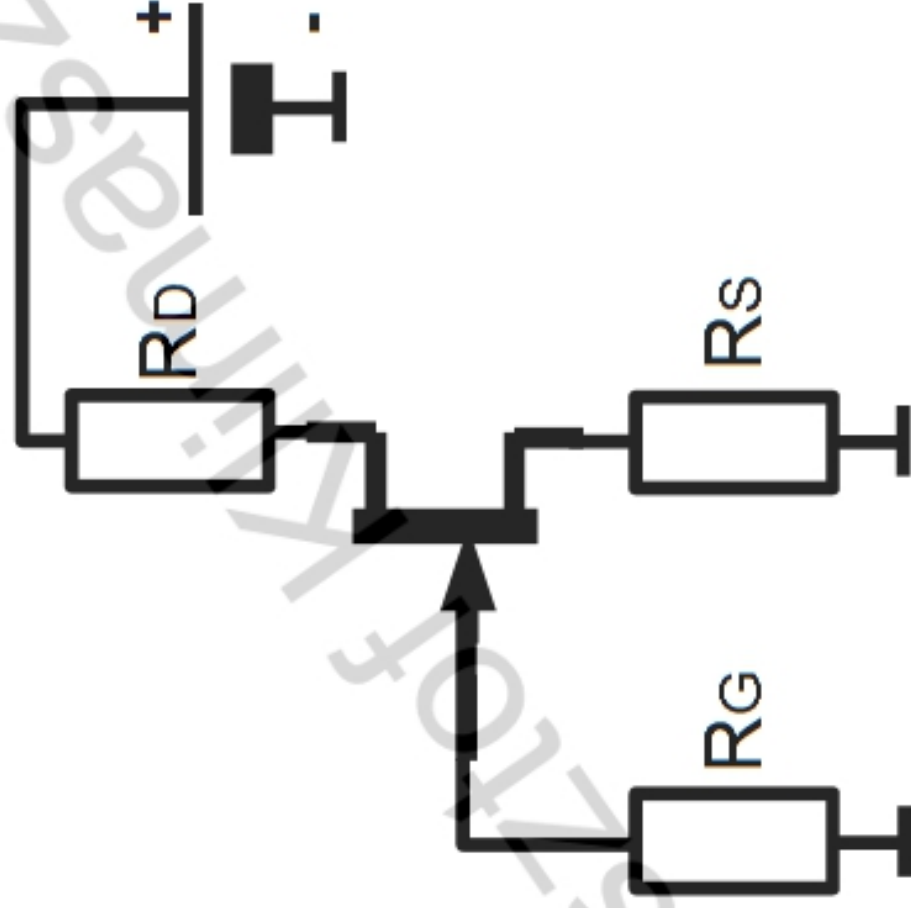
- układ z mniejszymi zniekształceniami dla dużych sygnałów



$$I_D = U_{DS} \cdot \frac{I_{DSS}}{U_P^2} (U_{ster} - 2 \cdot U_P)$$

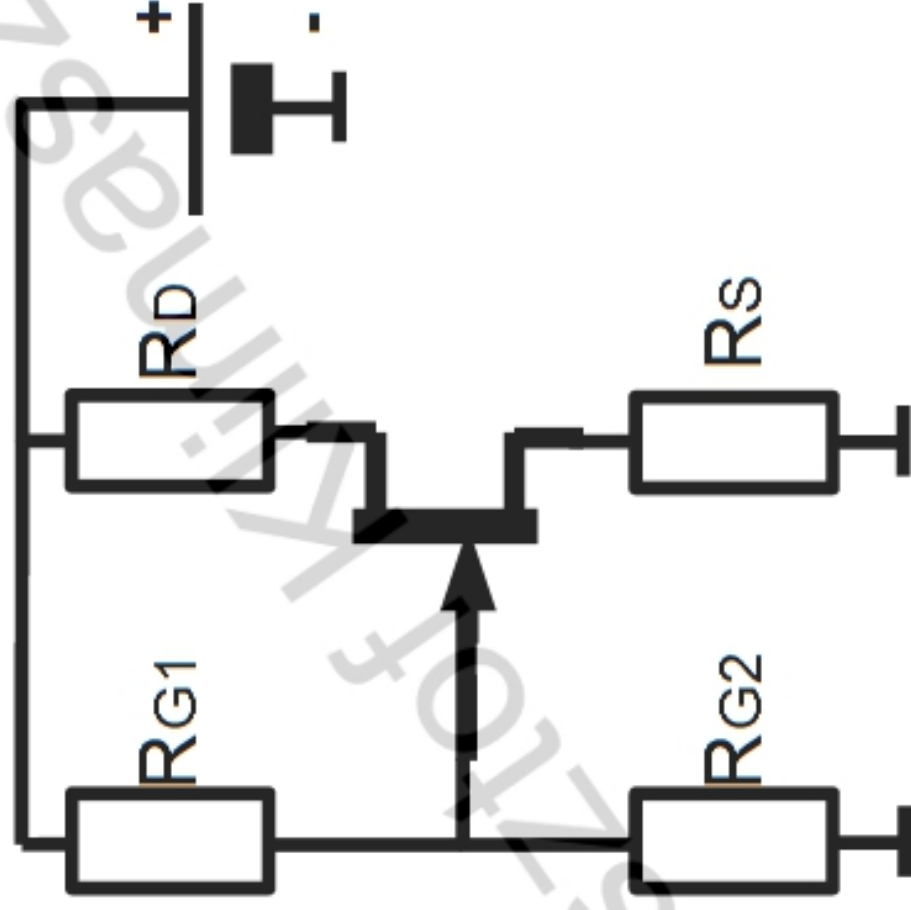
## Układy polaryzacji JFET-ów

- Układ polaryzacji automatycznej

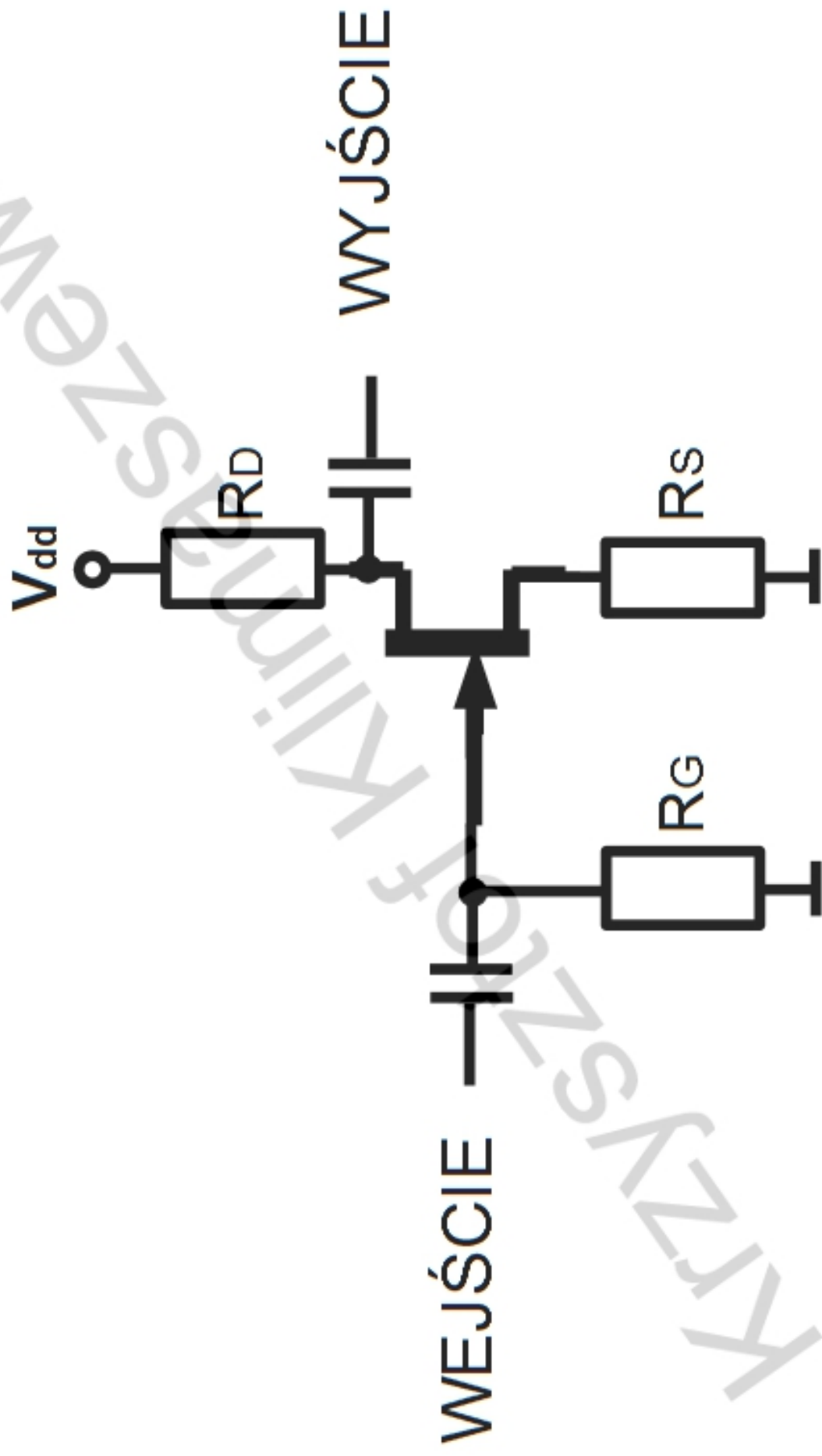


## Układy polaryzacji JFET-ów

- Układ polaryzacji z dzielnikiem napięciowym



# Wzmacniacz JFET-owy

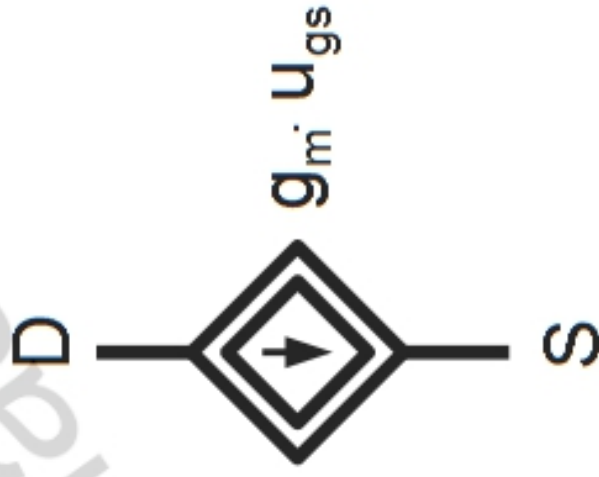


## Model małosygnałowy JFET

- najprostszy model tranzystora JFET



=



# Model małosygnałowy JFET

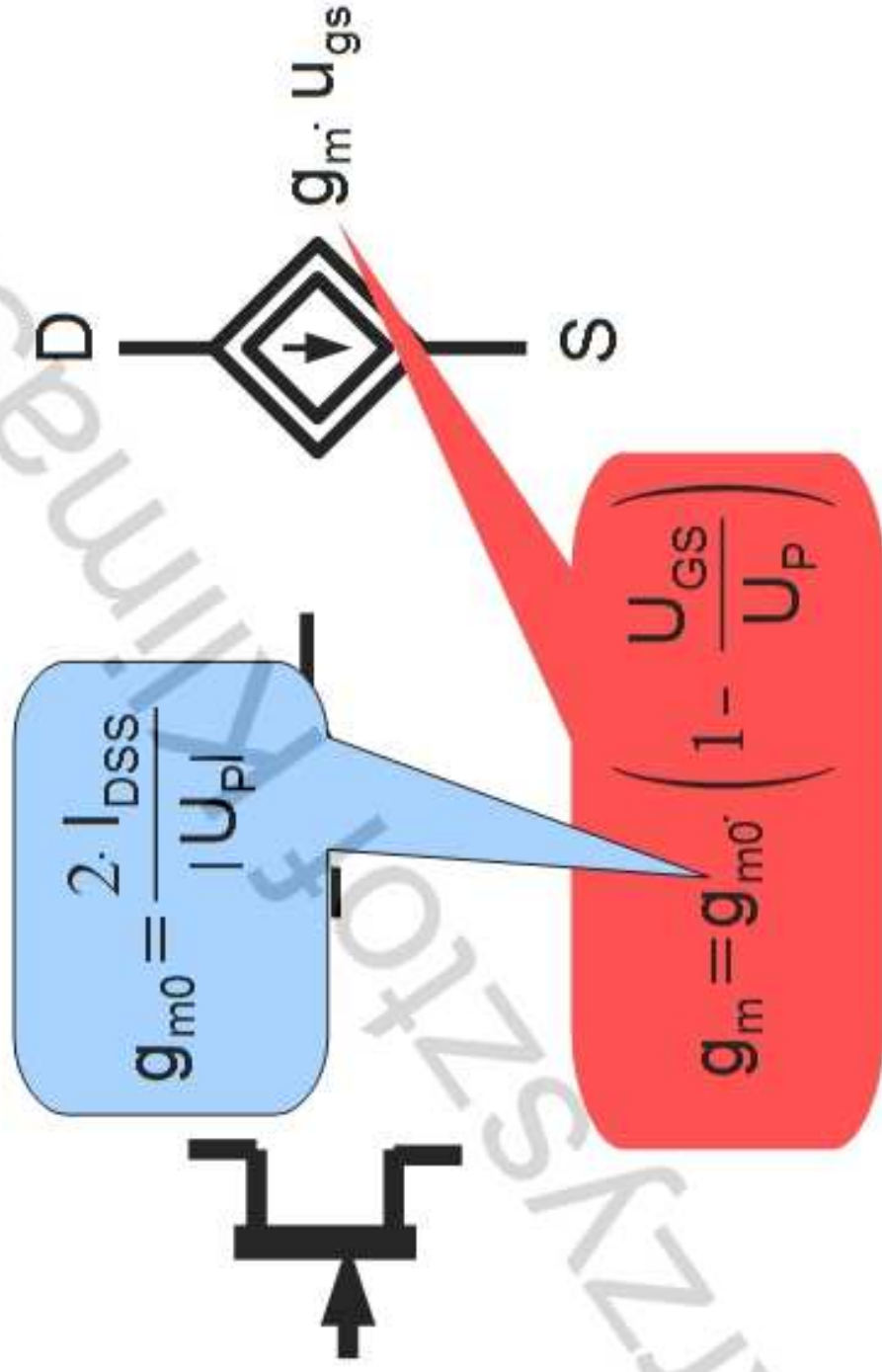
- najprostszly model tranzystora JFET



$$g_m = g_{m0} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)$$

# Model małosygnałowy JFET

- najprostszly model tranzystora JFET



# Wzmacniacz tranzystorowy

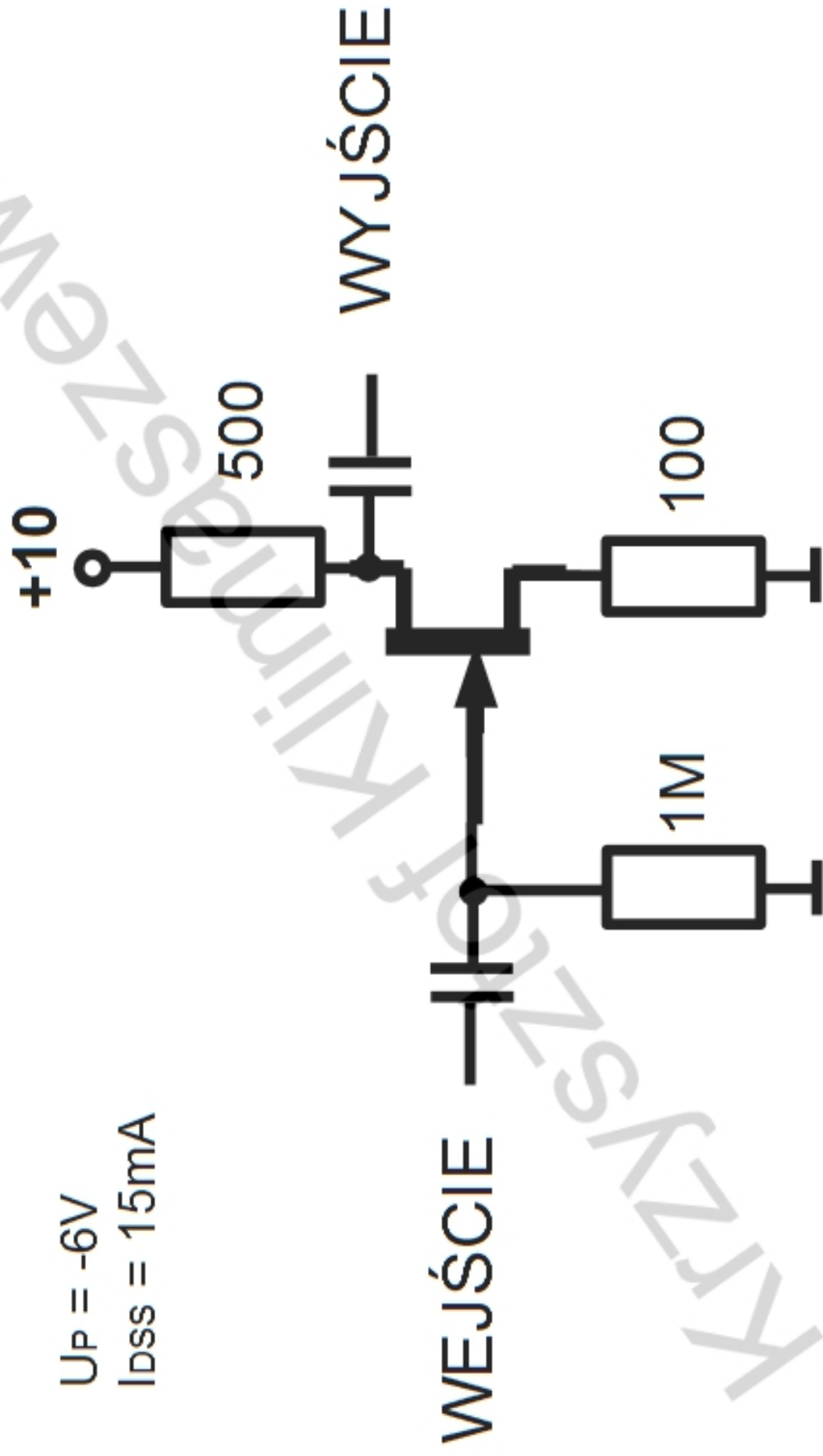
- 3 podstawowe układy wzmacniaczy
  - ze wspólnym źródłem (Common Source)
    - wejście na bramce
    - wyjście na drenie
  - ze wspólnym drenem (CD)
    - wejście na bramce
    - wyjście na źródle
  - ze wspólną bramką (CG)
    - wejście na źródle
    - wyjście na drenie
    - bramka połączona z masą



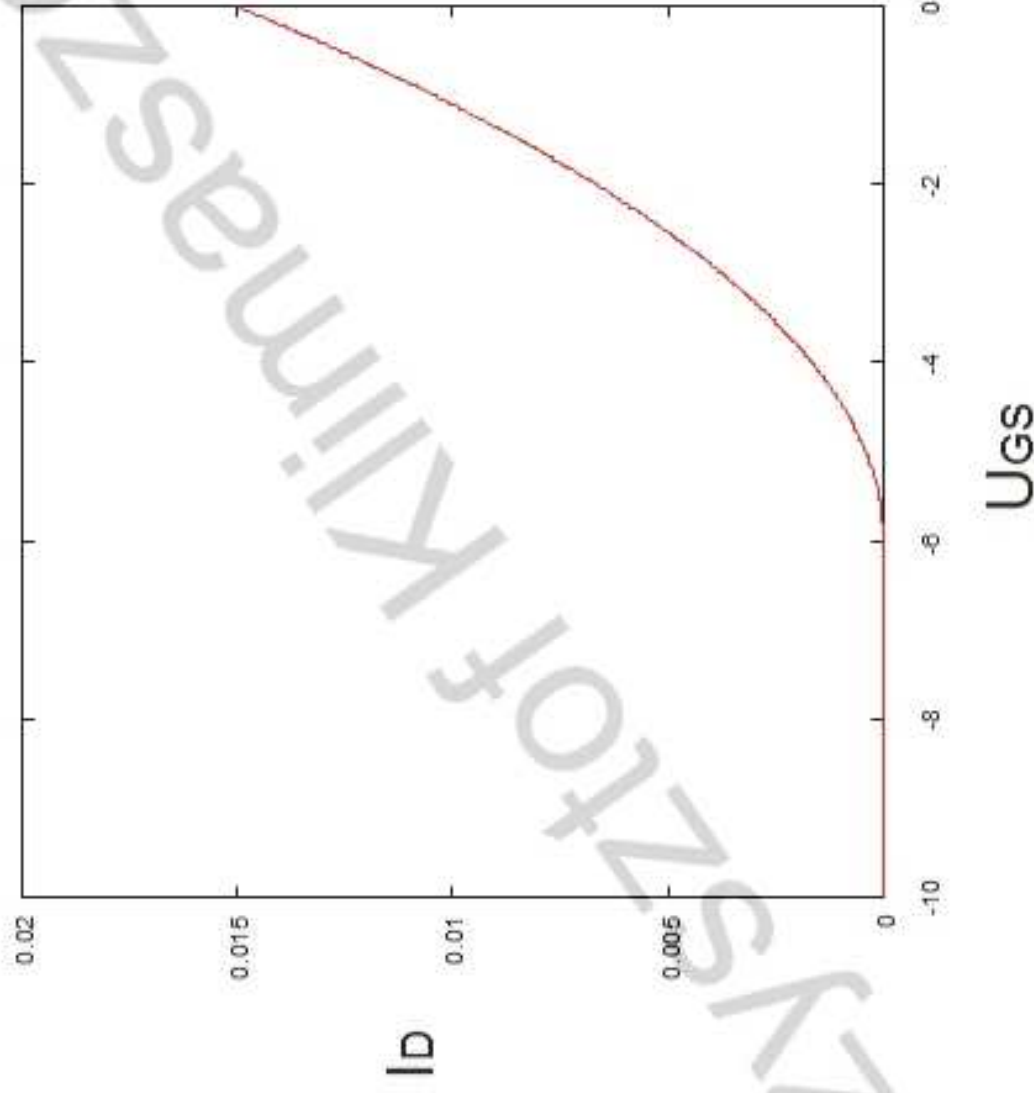
# Ustalanie punktu pracy

$$U_P = -6V$$

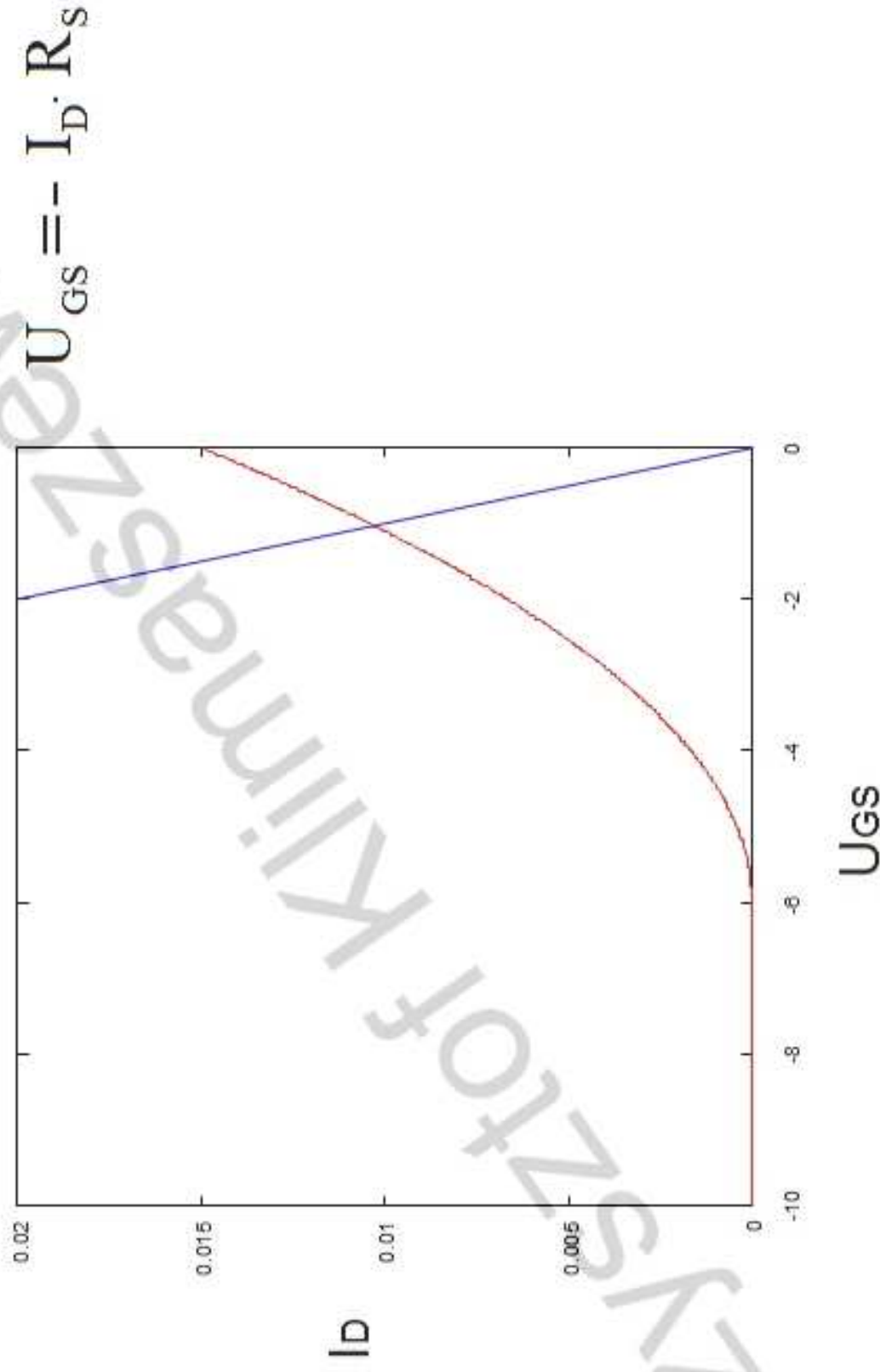
$$I_{DSS} = 15mA$$



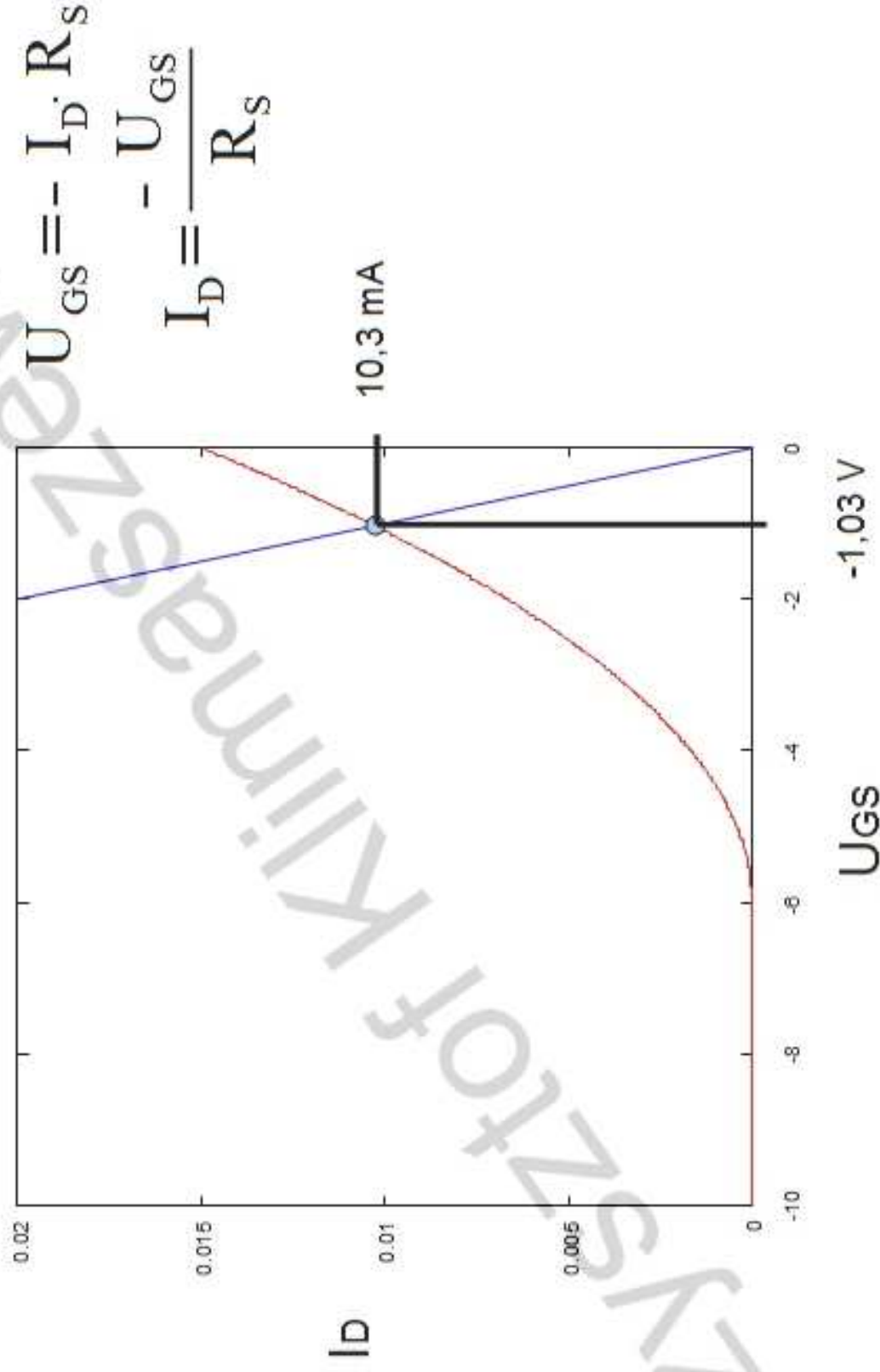
# Ustalenie punktu pracy



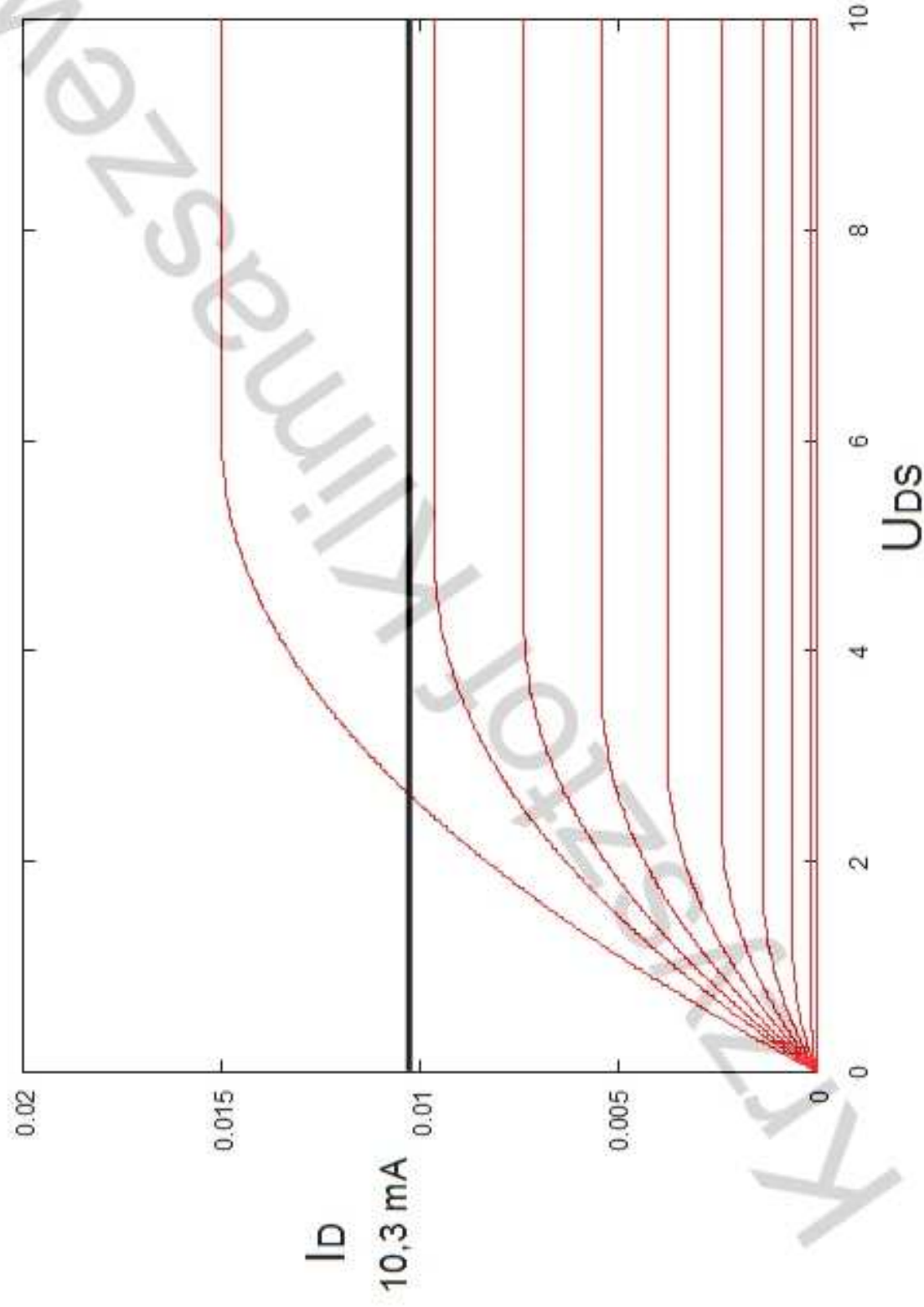
# Ustalenie punktu pracy



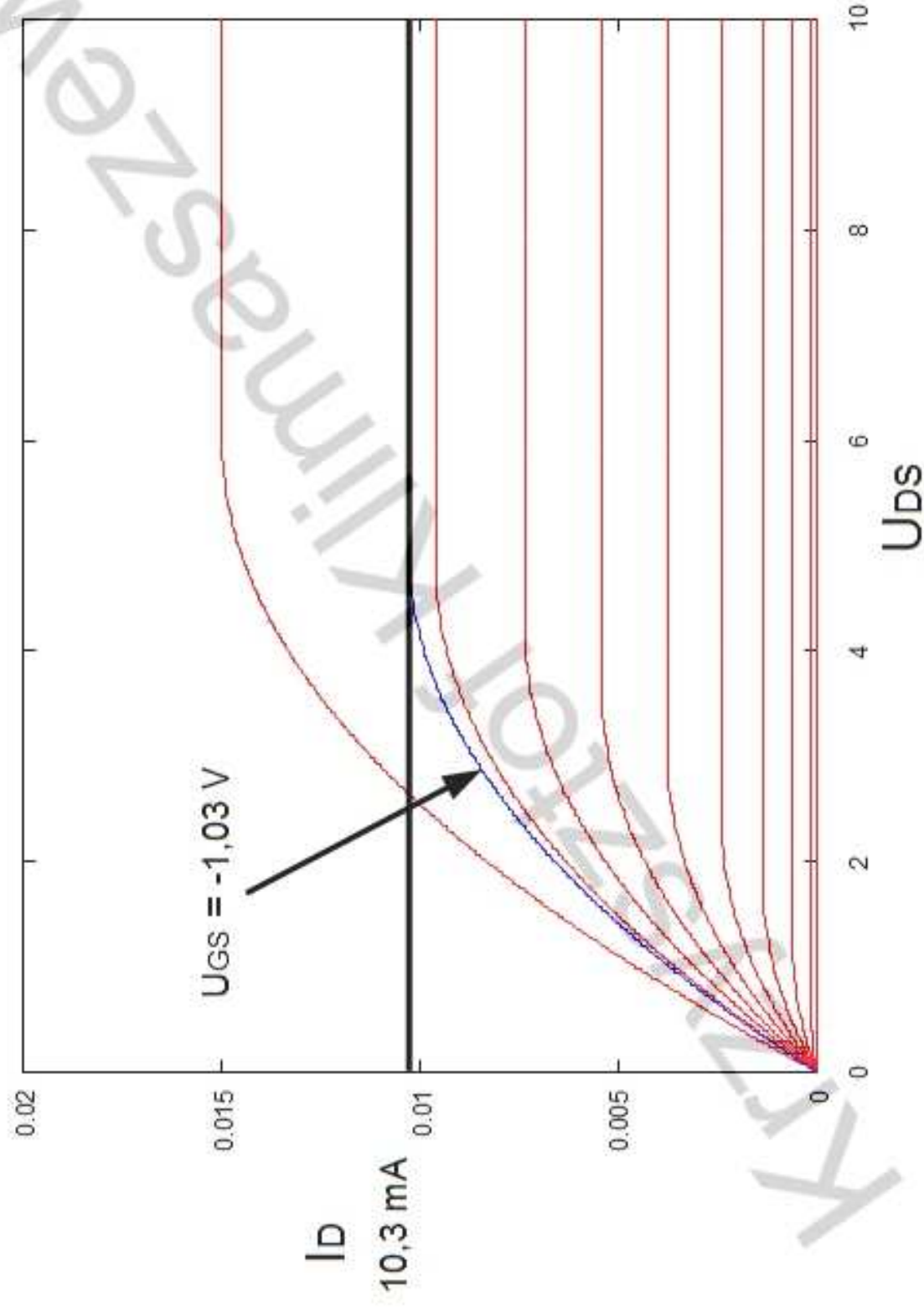
# Ustalenie punktu pracy



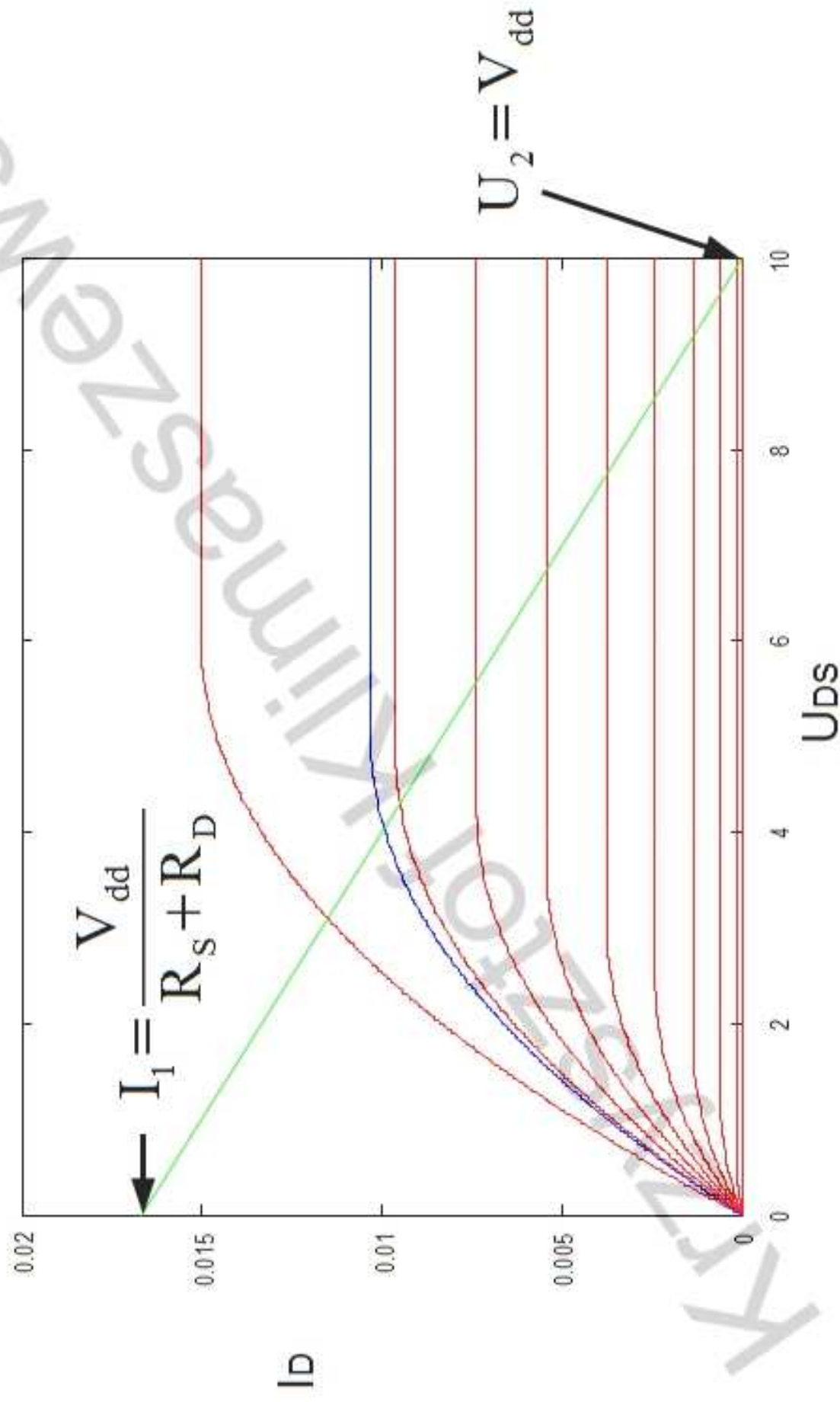
# Ustalenie punktu pracy



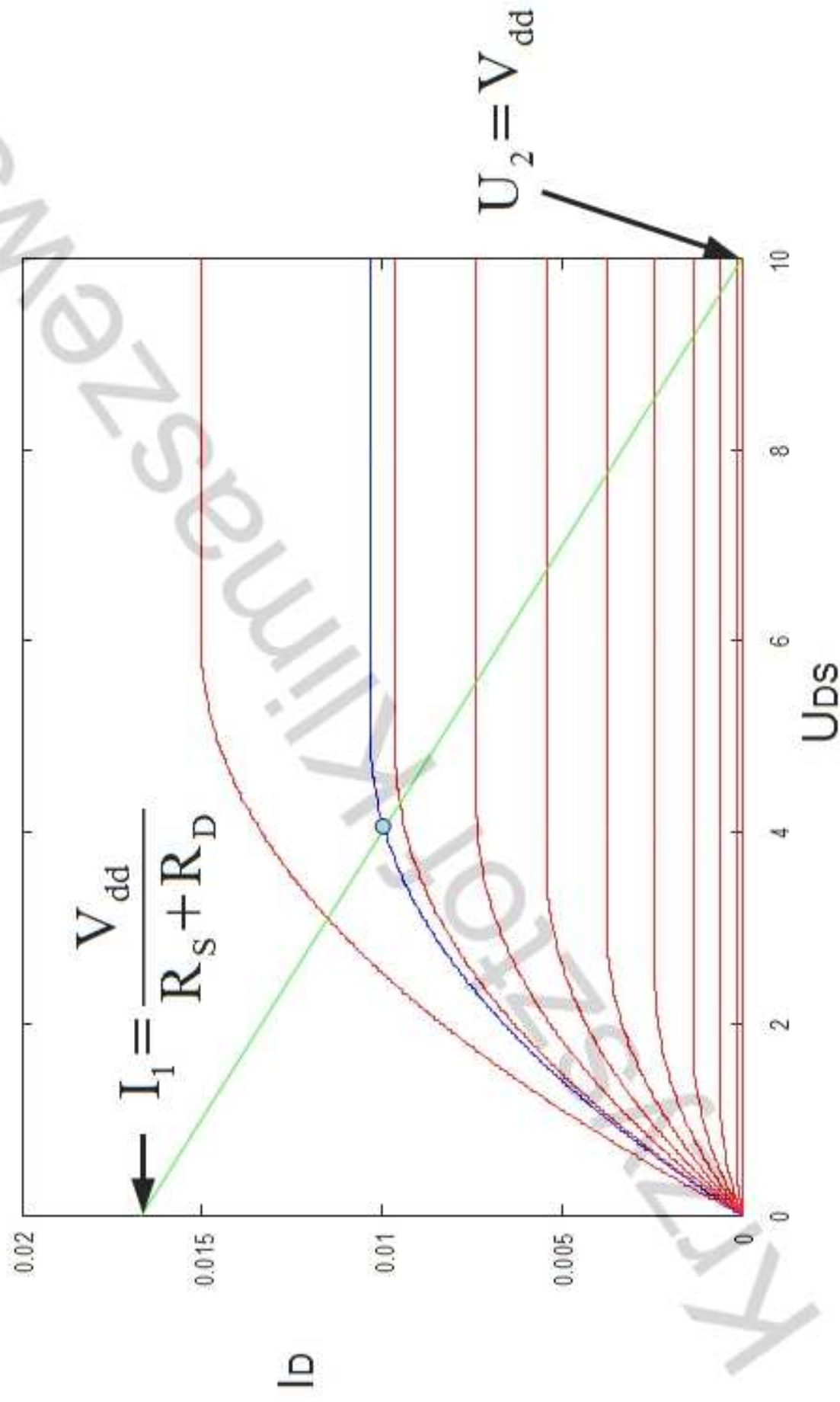
# Ustalenie punktu pracy



# Ustalenie punktu pracy

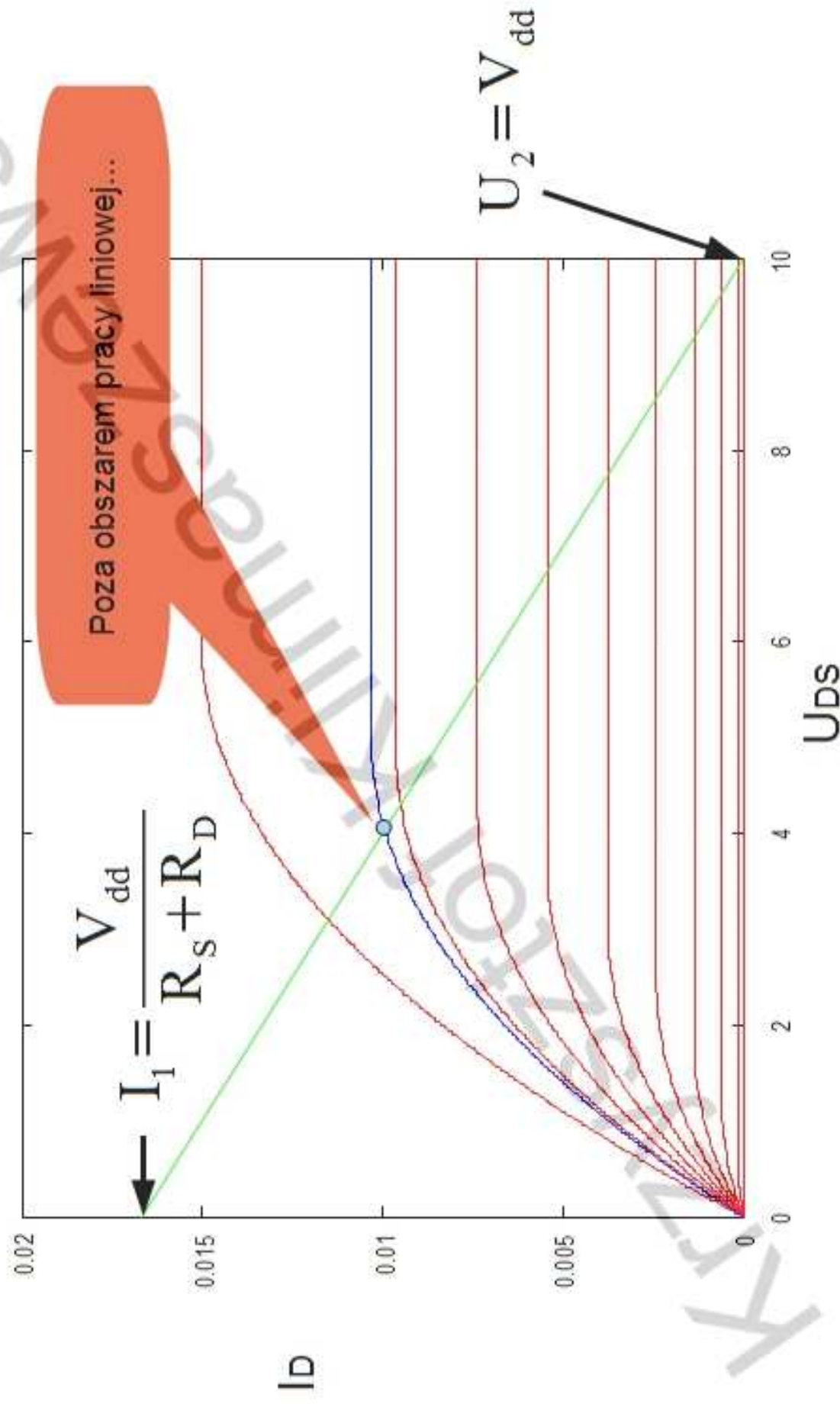


# Ustalenie punktu pracy





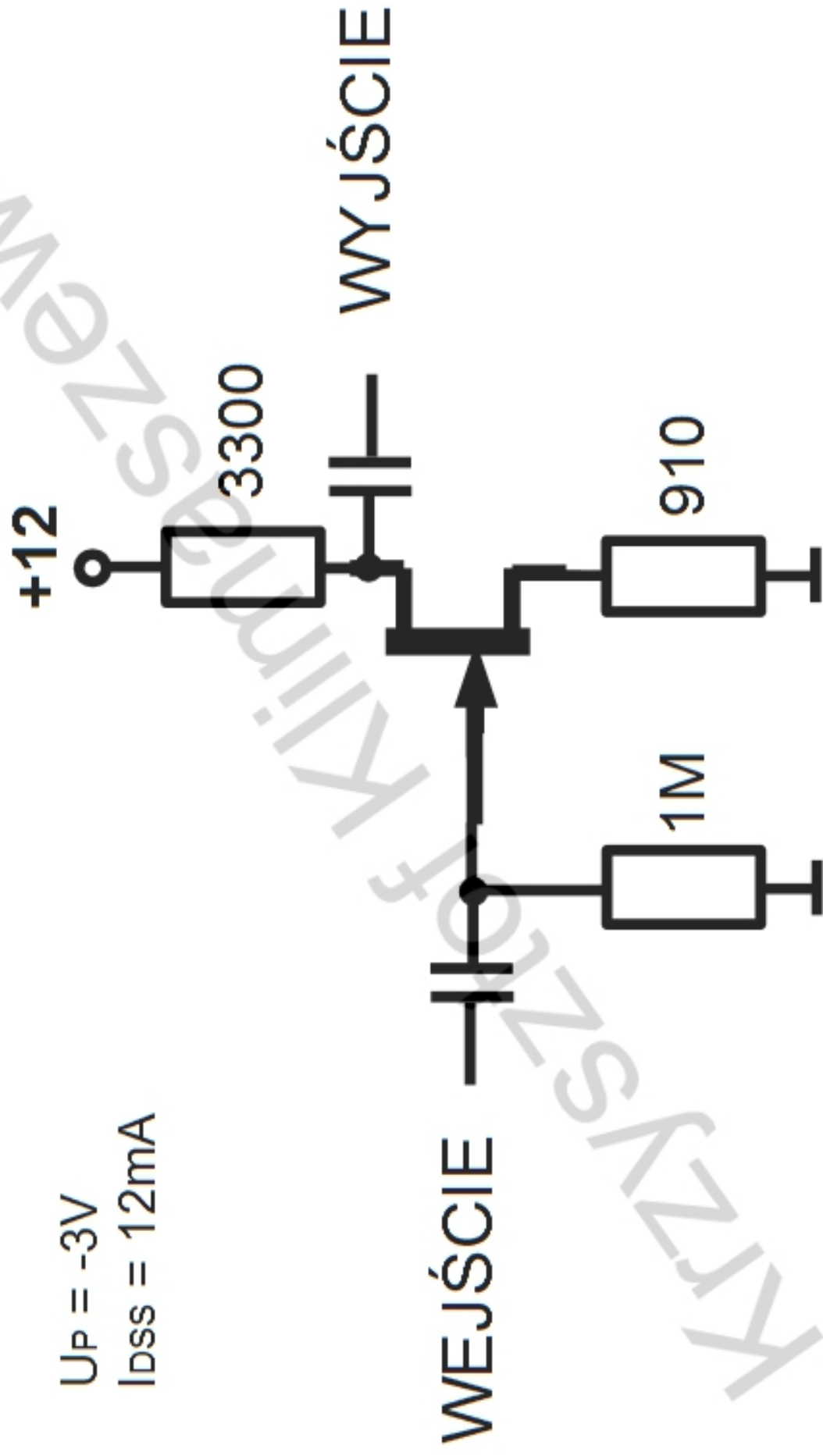
# Ustalenie punktu pracy



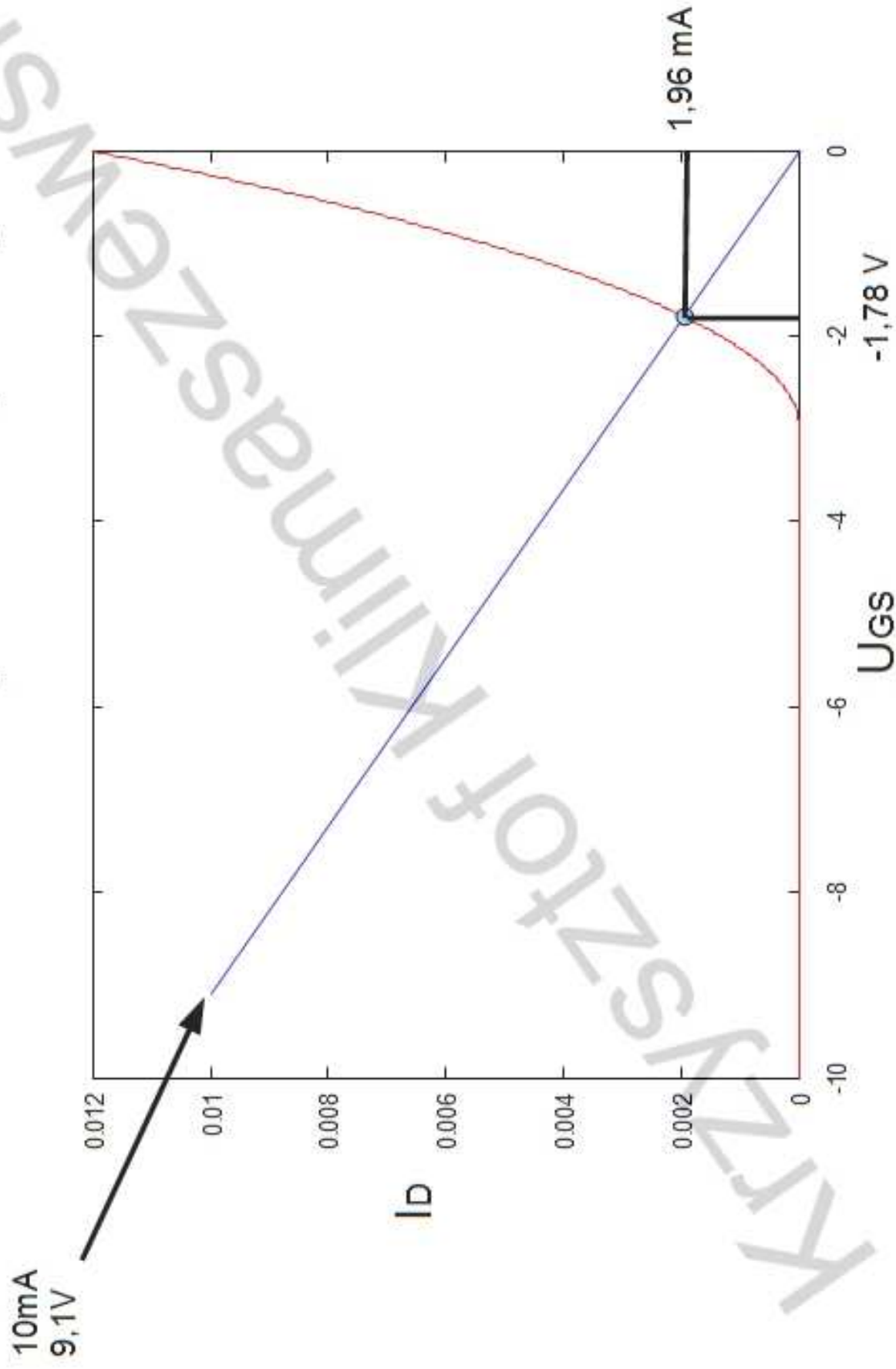
# Ustalanie punktu pracy

$$U_P = -3V$$

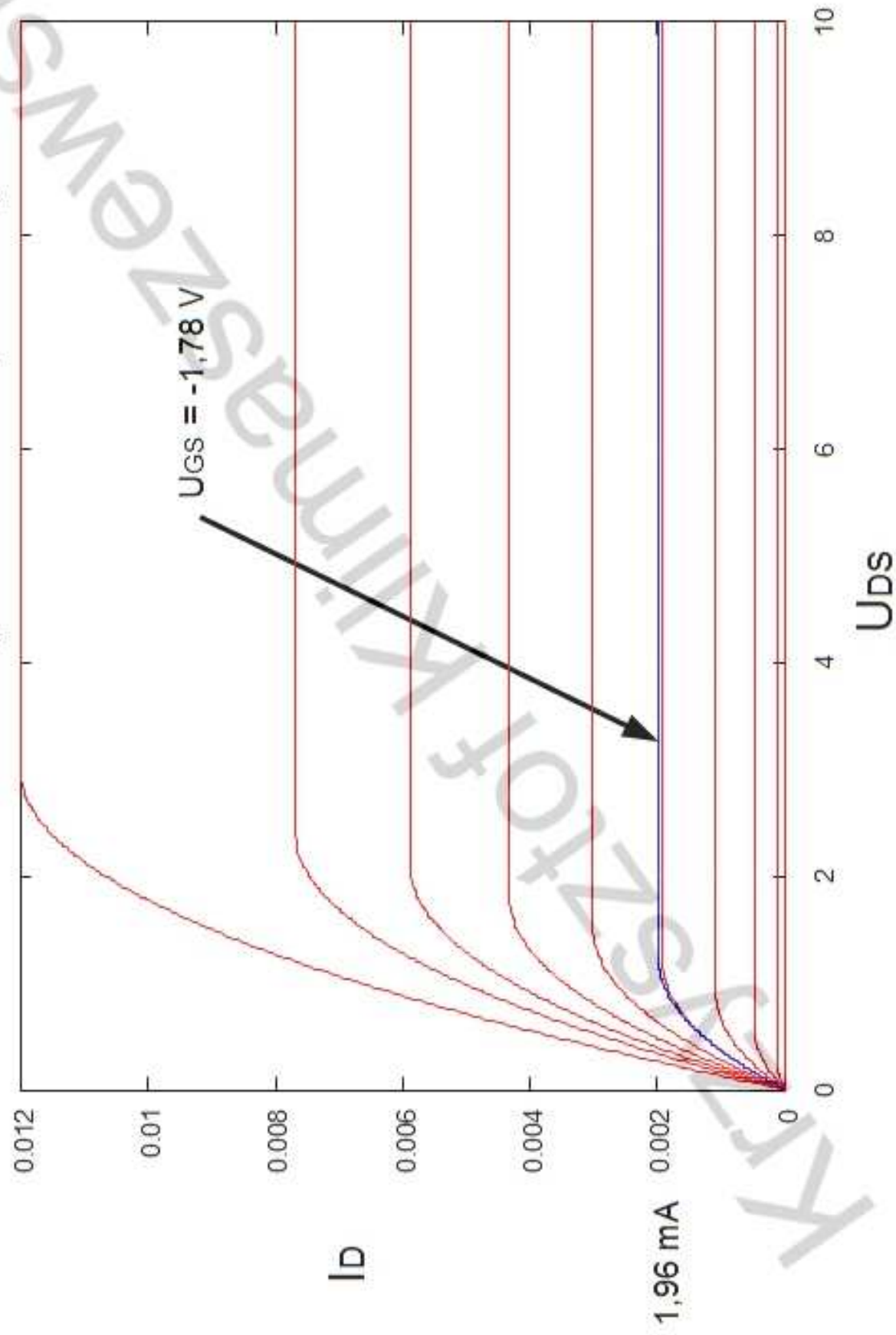
$$I_{DSS} = 12mA$$



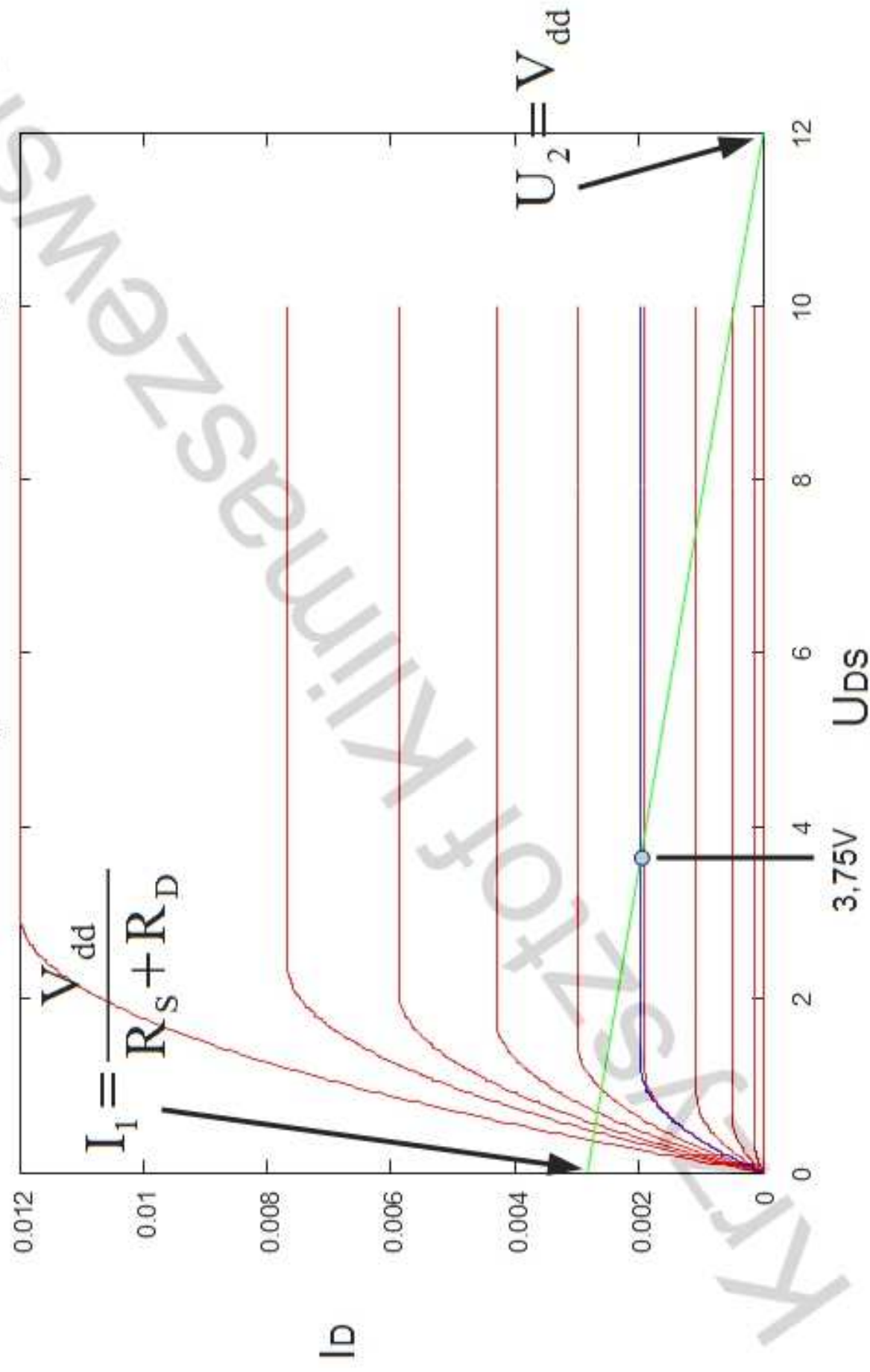
# Ustalenie punktu pracy



# Ustalenie punktu pracy



# Ustalenie punktu pracy



## źródło prądowe z JFET-a

- źródło prądowe – dostarcza stały prąd niezależnie od wartości napięcia na zaciskach

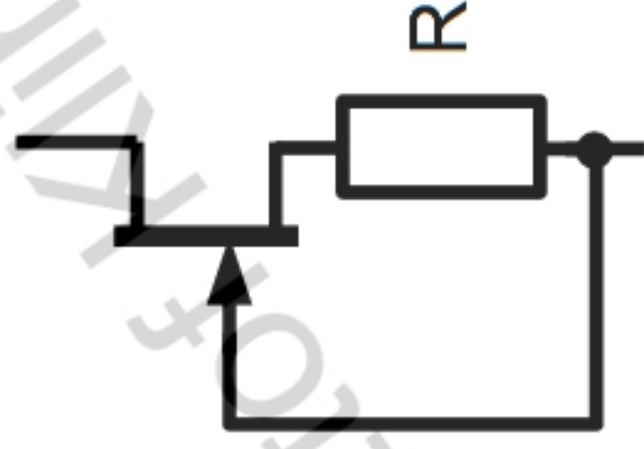
## źródło prądowe z JFET-a

- źródło prądowe – dostarcza stały prąd niezależnie od wartości napięcia na zaciskach



## źródło prądowe z JFET-a

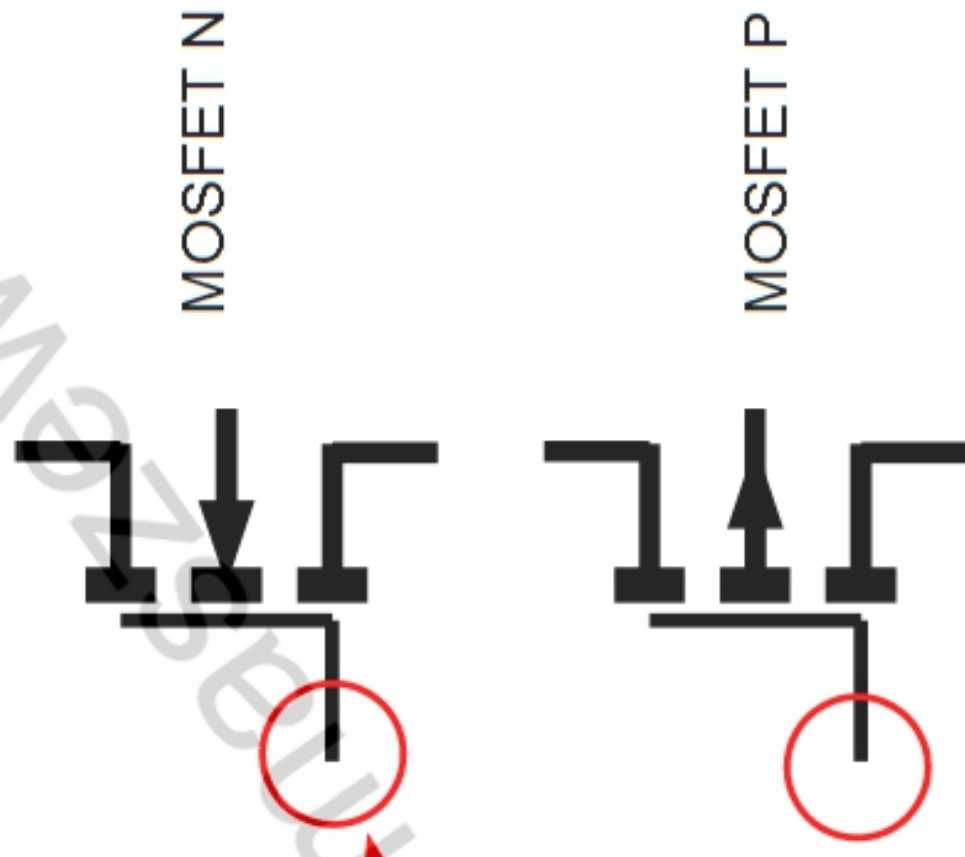
- źródło prądowe – dostarcza stały prąd niezależnie od wartości napięcia na zaciskach





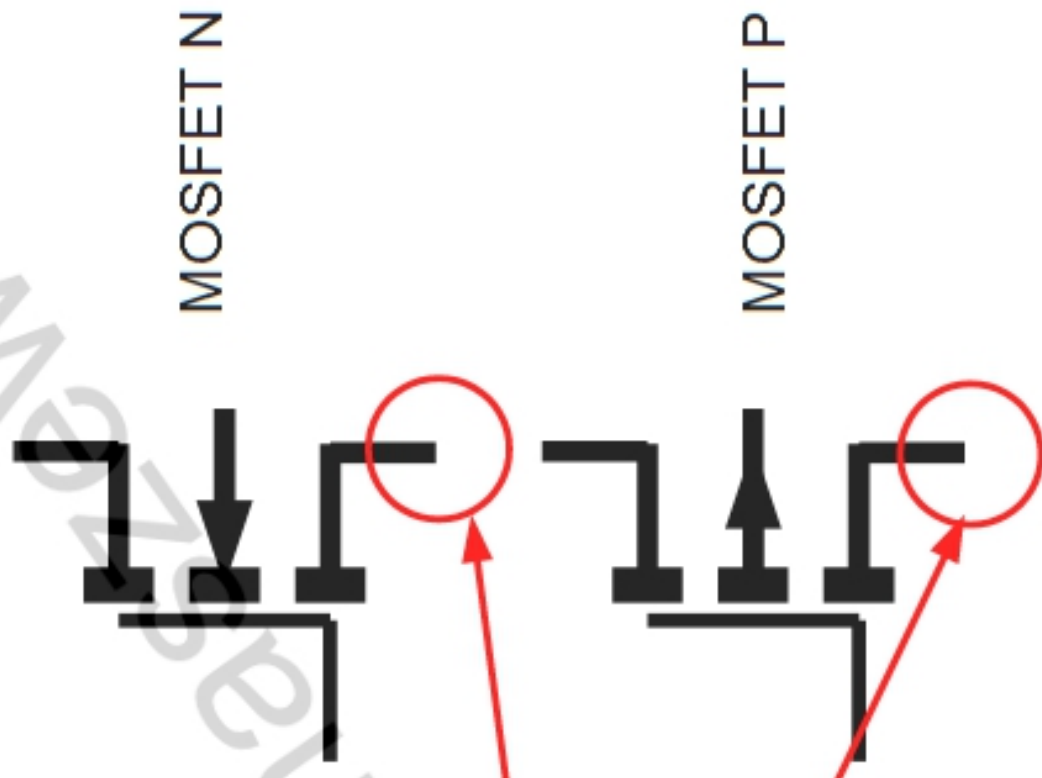
# MOSFET wzbogacany

- ma 3(4) elektrody („końcówki”)
- bramka (G)
- źródło (S)
- dren (D)
- podłoże (B - bulk)



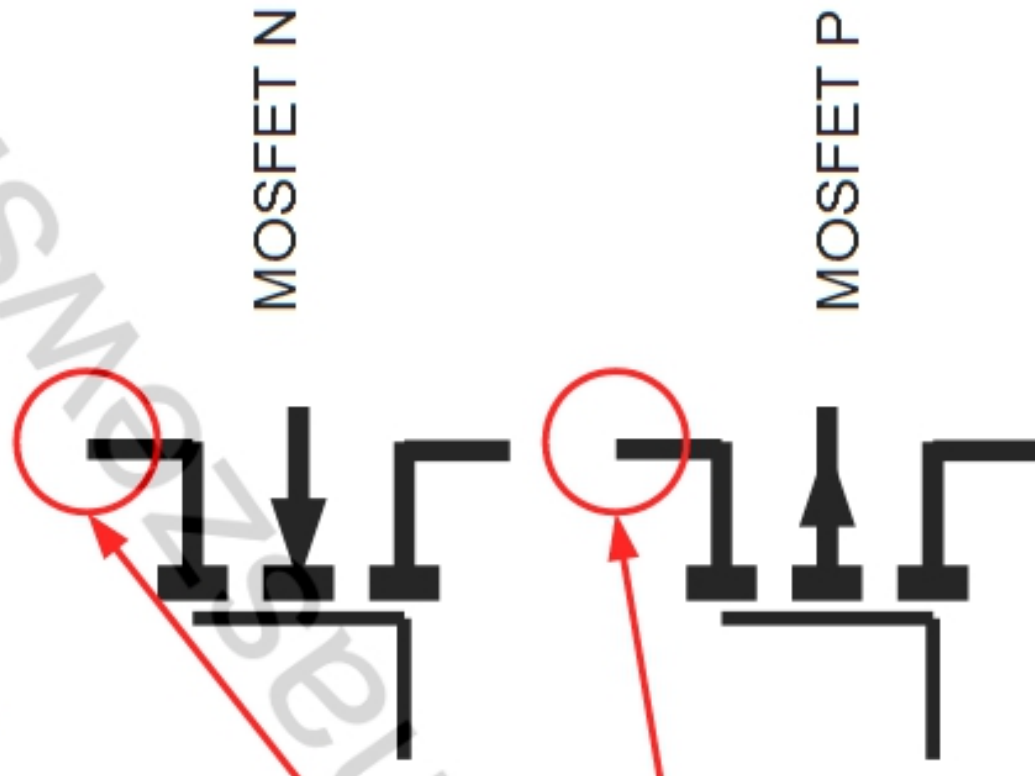
# MOSFET wzbogacany

- ma 3(4) elektrody („końcówki”)
- bramka (G)
- źródło (S)
- dren (D)
- podłoże (B - bulk)



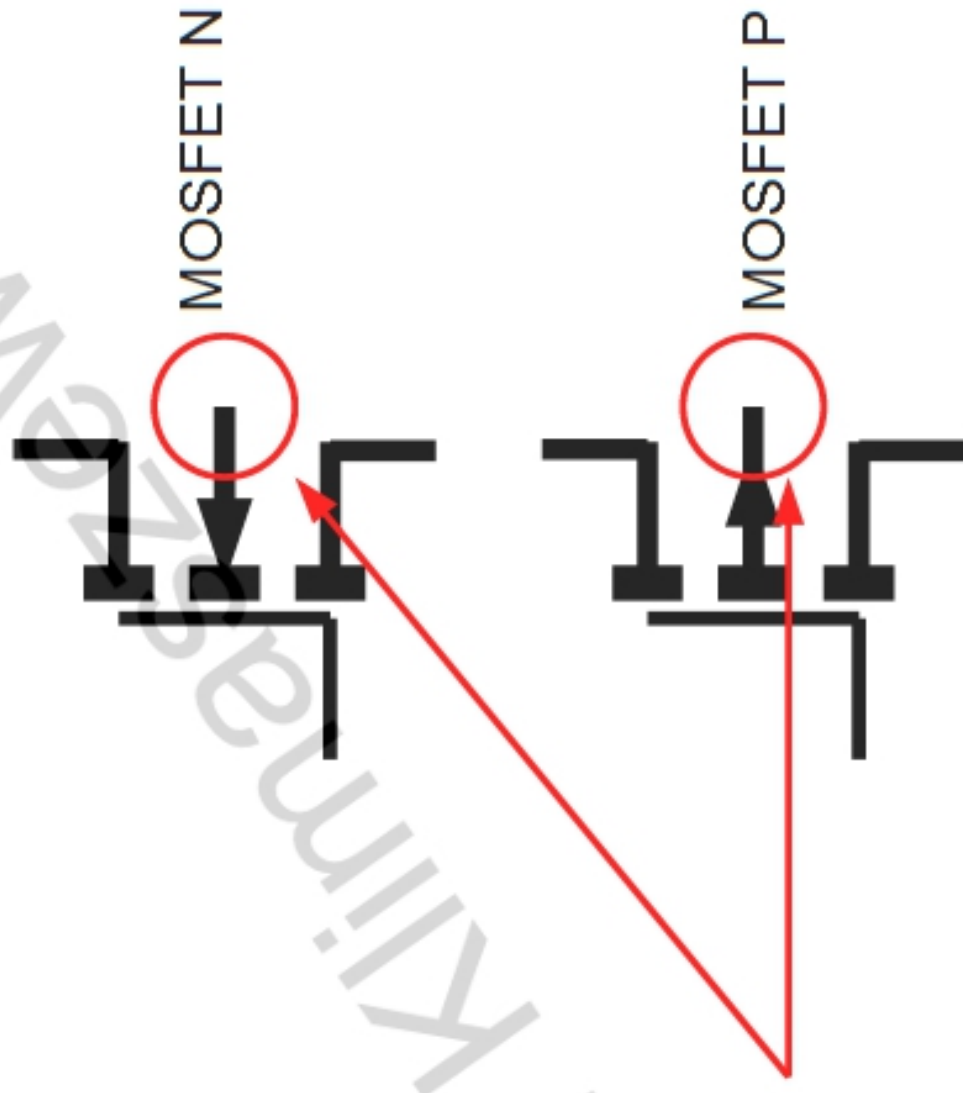
# MOSFET wzbogacany

- ma 3(4) elektrody („końcówki”)
- bramka (G)
- źródło (S)
- dren (D)
- podłoże (B - bulk)



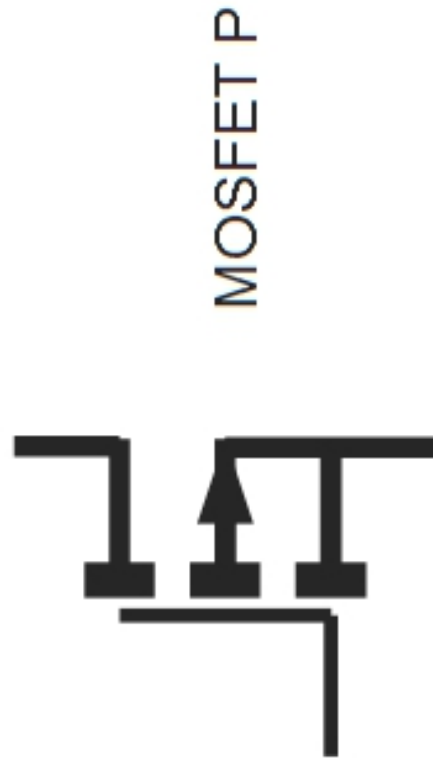
# MOSFET wzbogacany

- ma 3(4) elektrody („końcówki”)
- bramka (G)
- źródło (S)
- dren (D)
- podłoże (B - bulk)



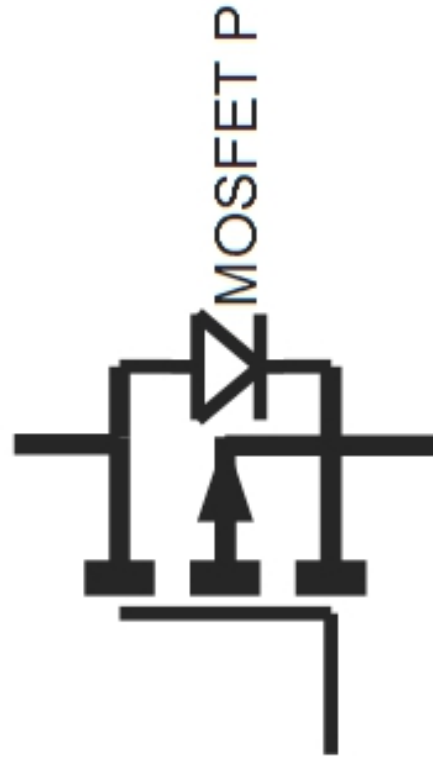
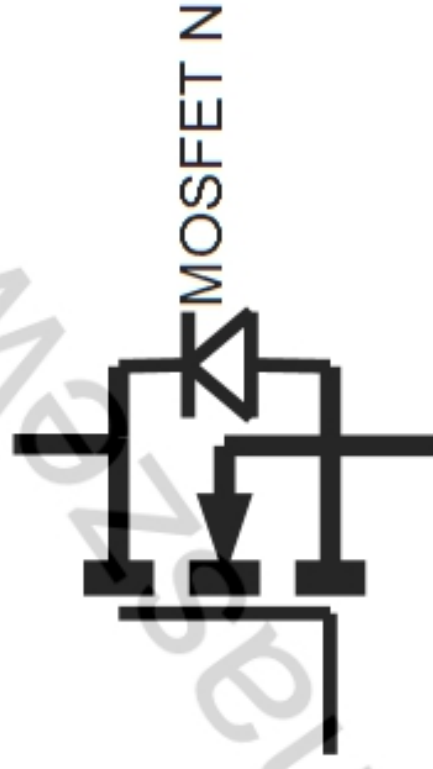
# MOSFET wzbogacany

- ma 3(4) elektrody („końcówki”)
- bramka (G)
- źródło (S)
- dren (D)
- podłoże (B - bulk)

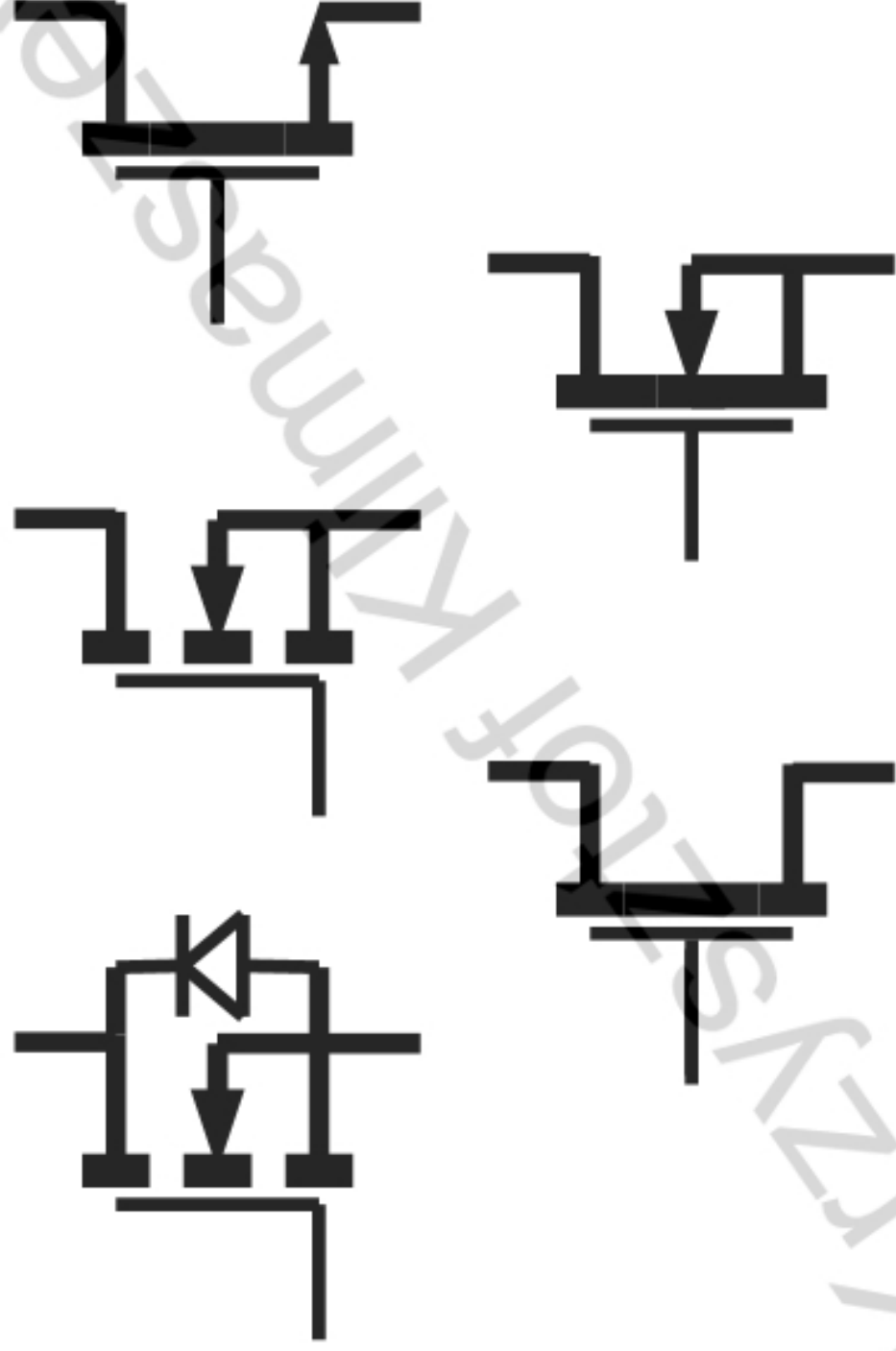


# MOSFET wzbogacany

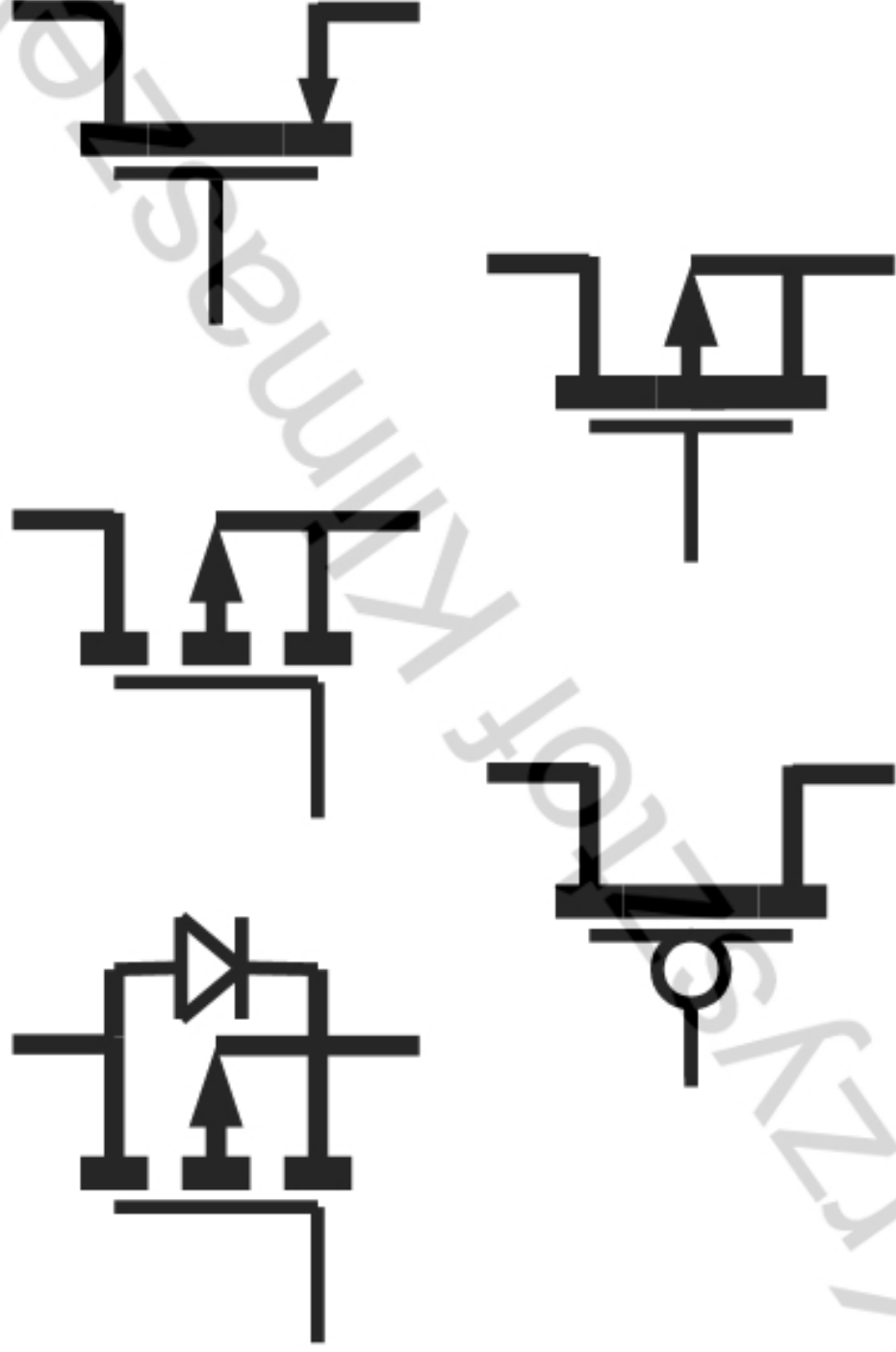
- ma 3(4) elektrody („końcówki”)
- bramka (G)
- źródło (S)
- dren (D)
- podłoże (B - bulk)



# MOSFET N wzbogacany



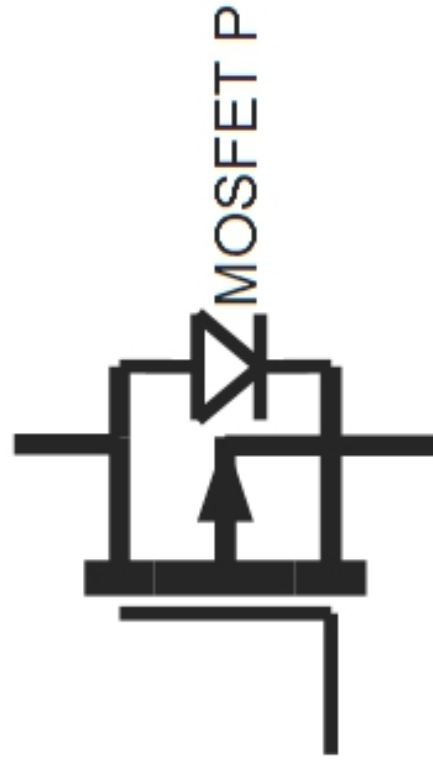
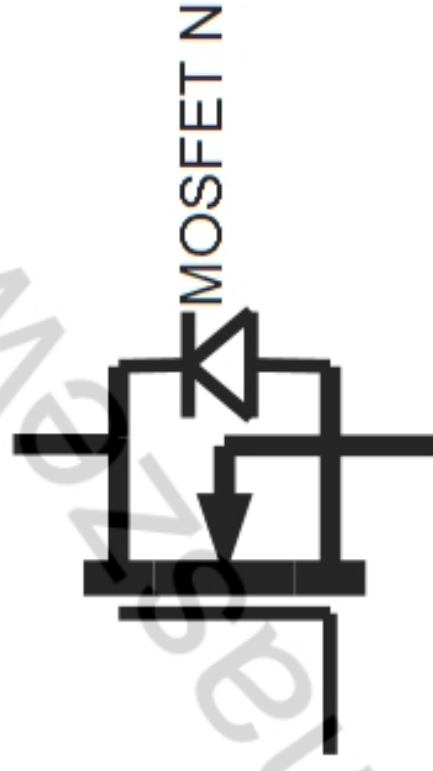
# MOSFET P wzbogacany



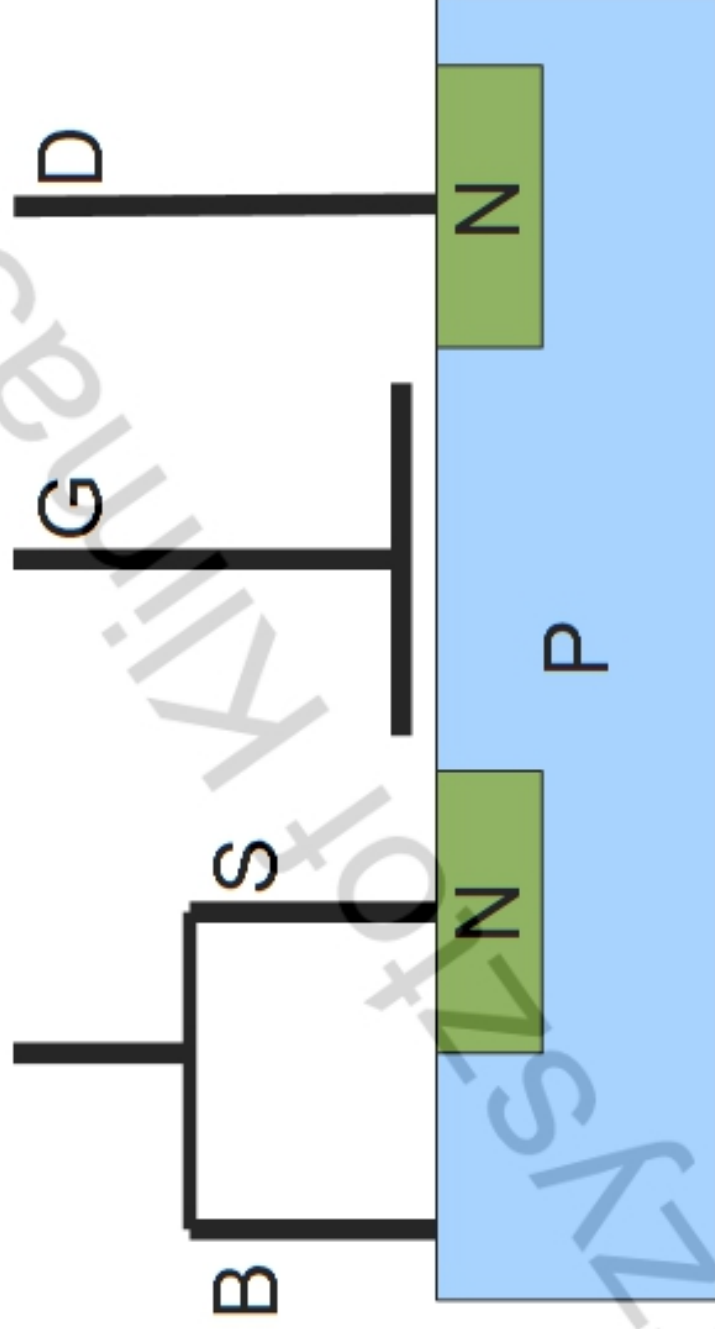
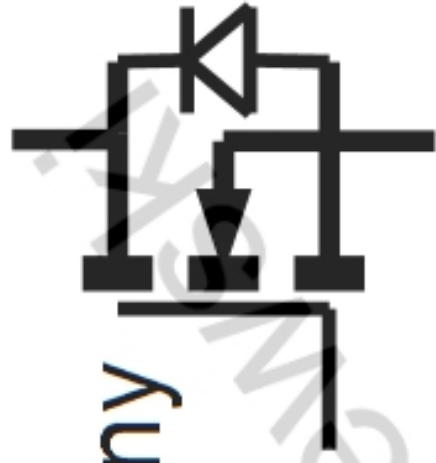


# MOSFET zubożany

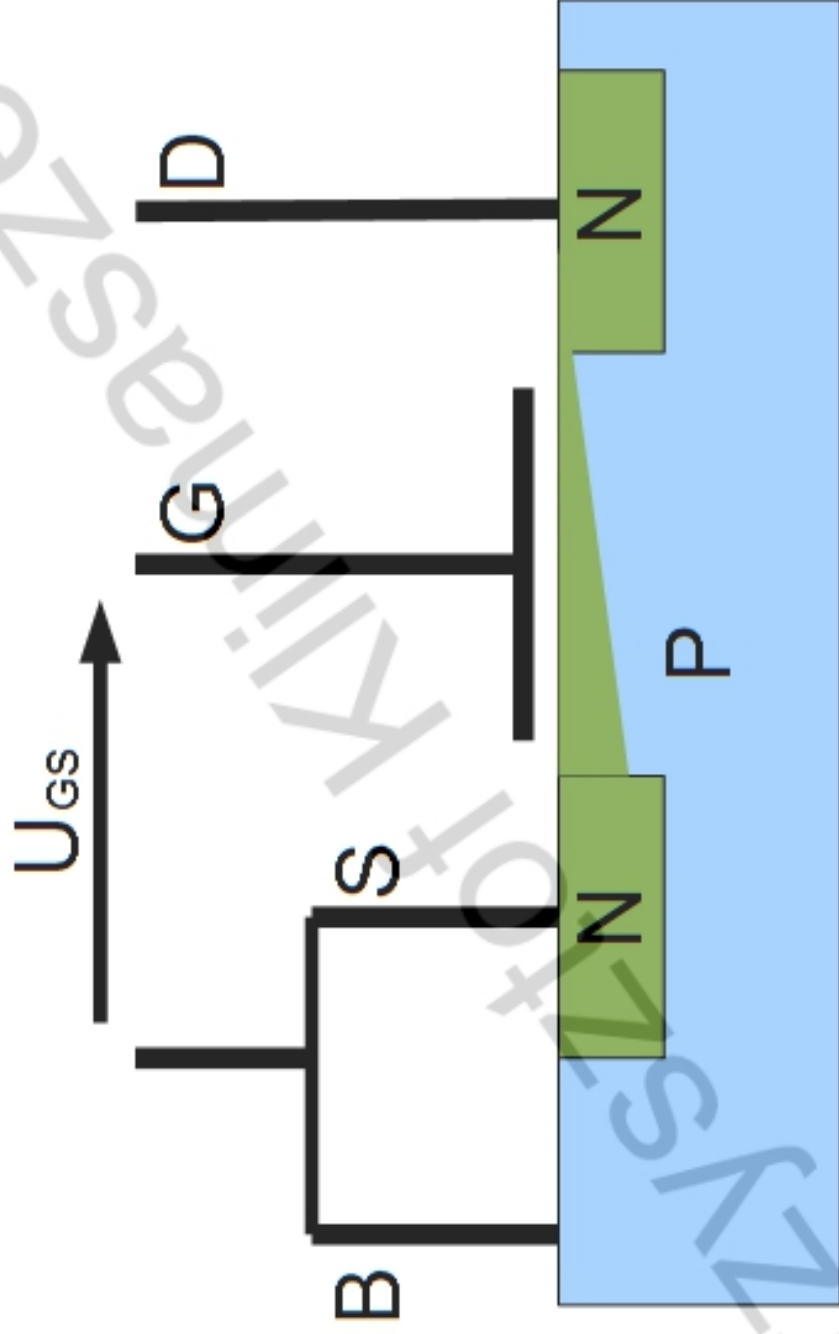
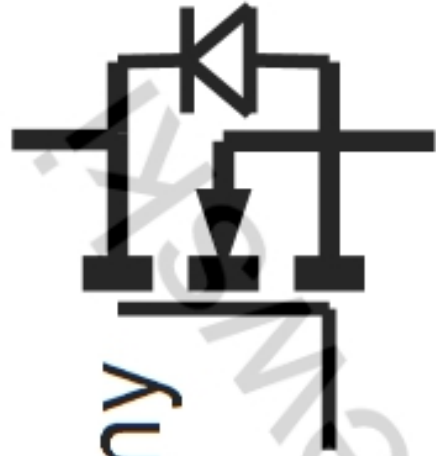
- ma 3(4) elektrody („końcówki”)
- bramka (G)
- źródło (S)
- dren (D)
- podłoże (B - bulk)



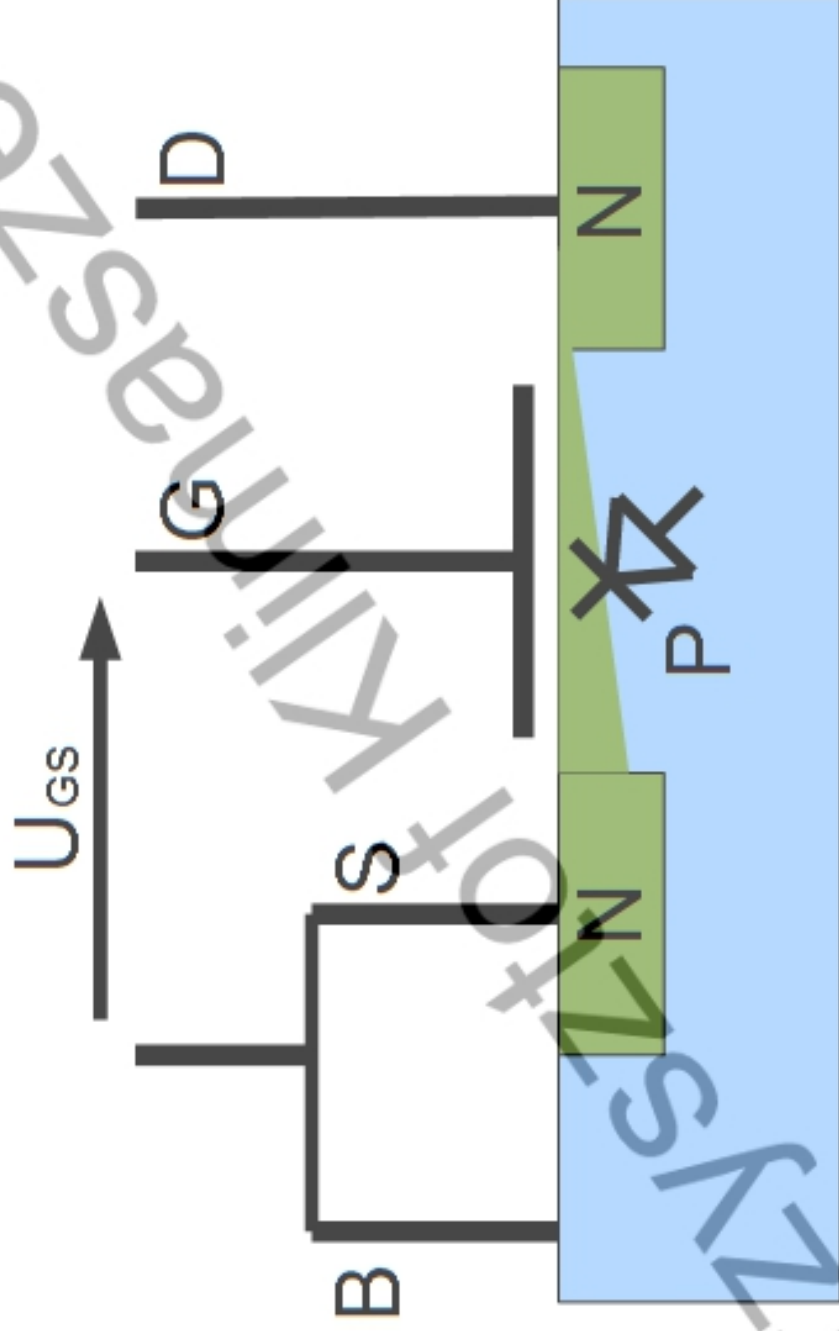
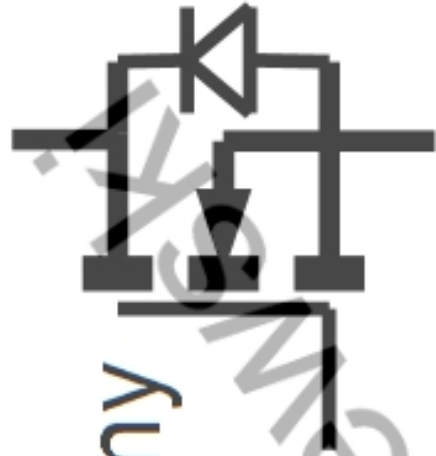
# MOSFET N wzbogacany



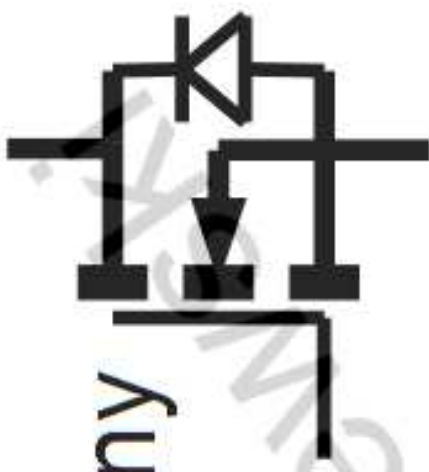
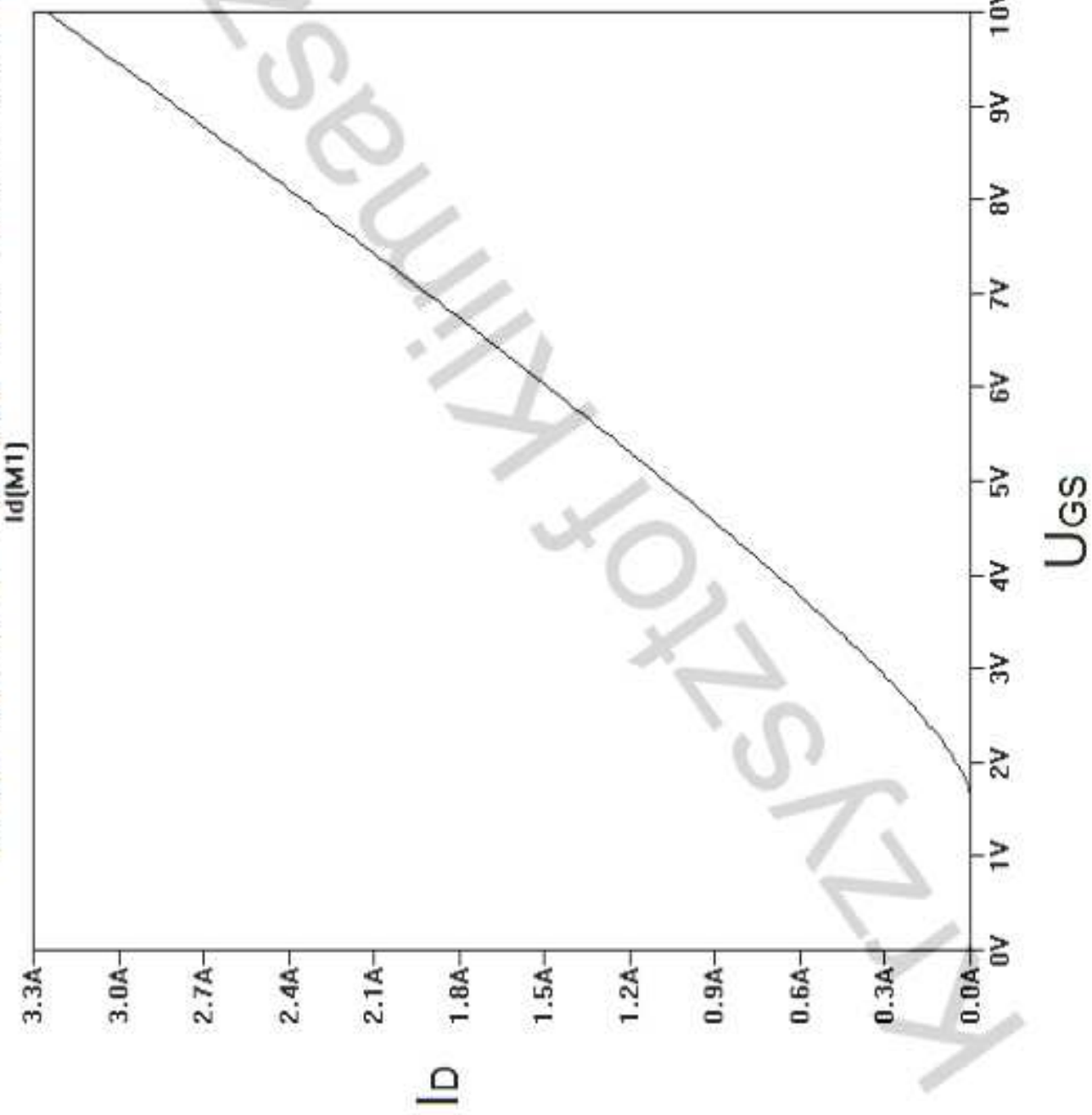
# MOSFET N wzbogacany



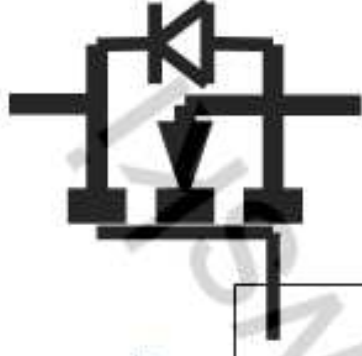
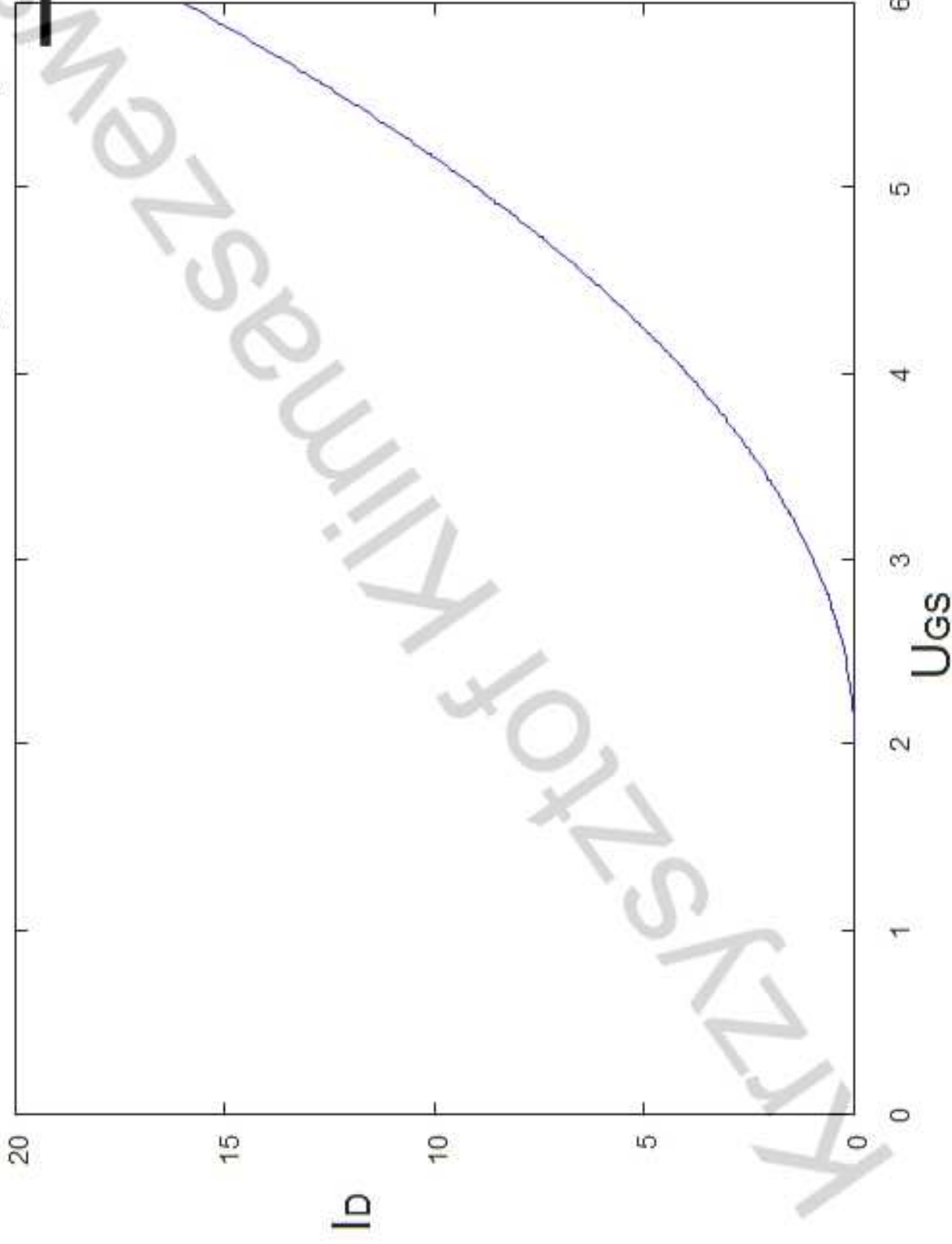
# MOSFET N wzbogacany



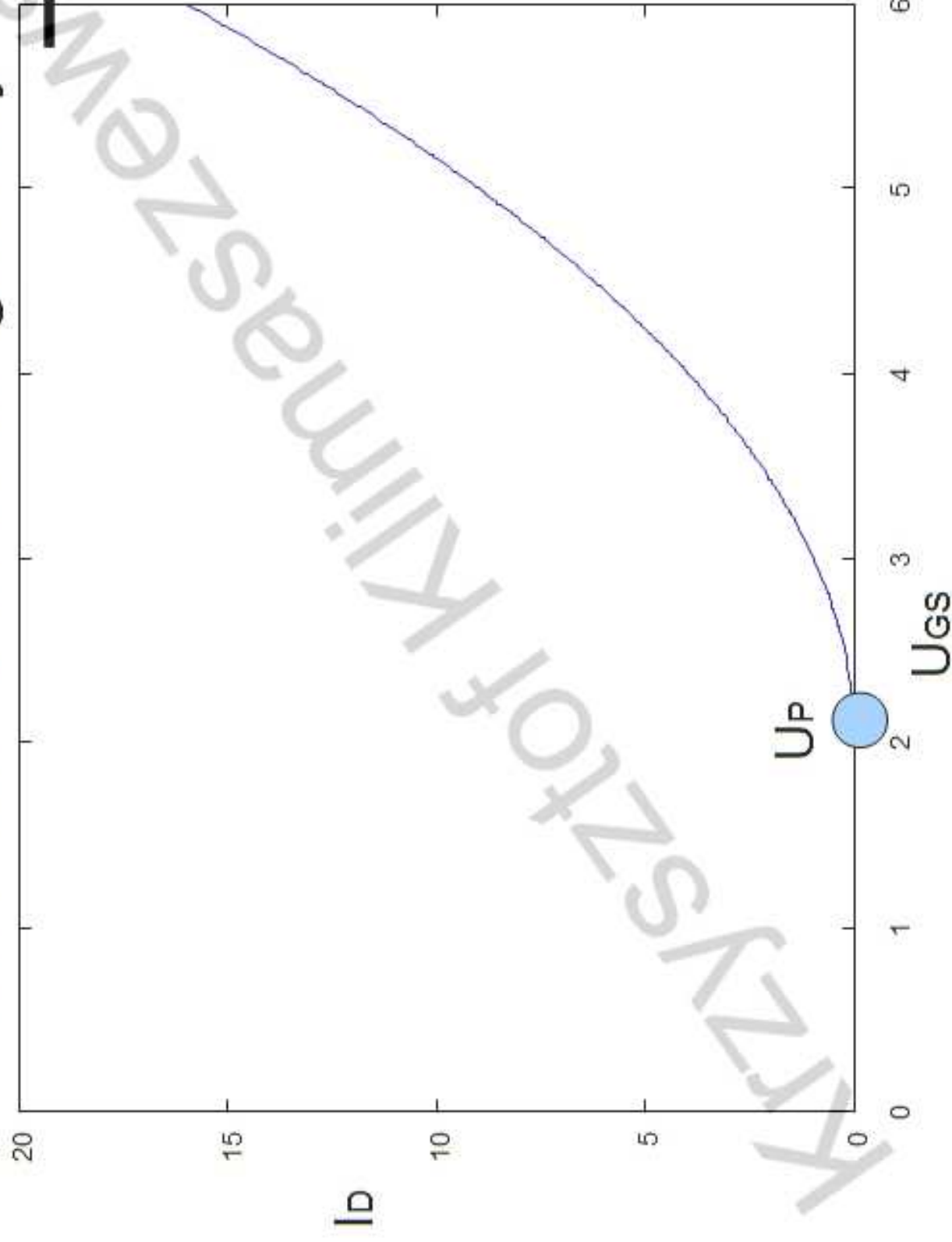
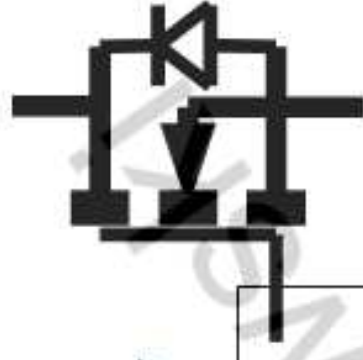
МОДЕЛЬ MOSFET N1



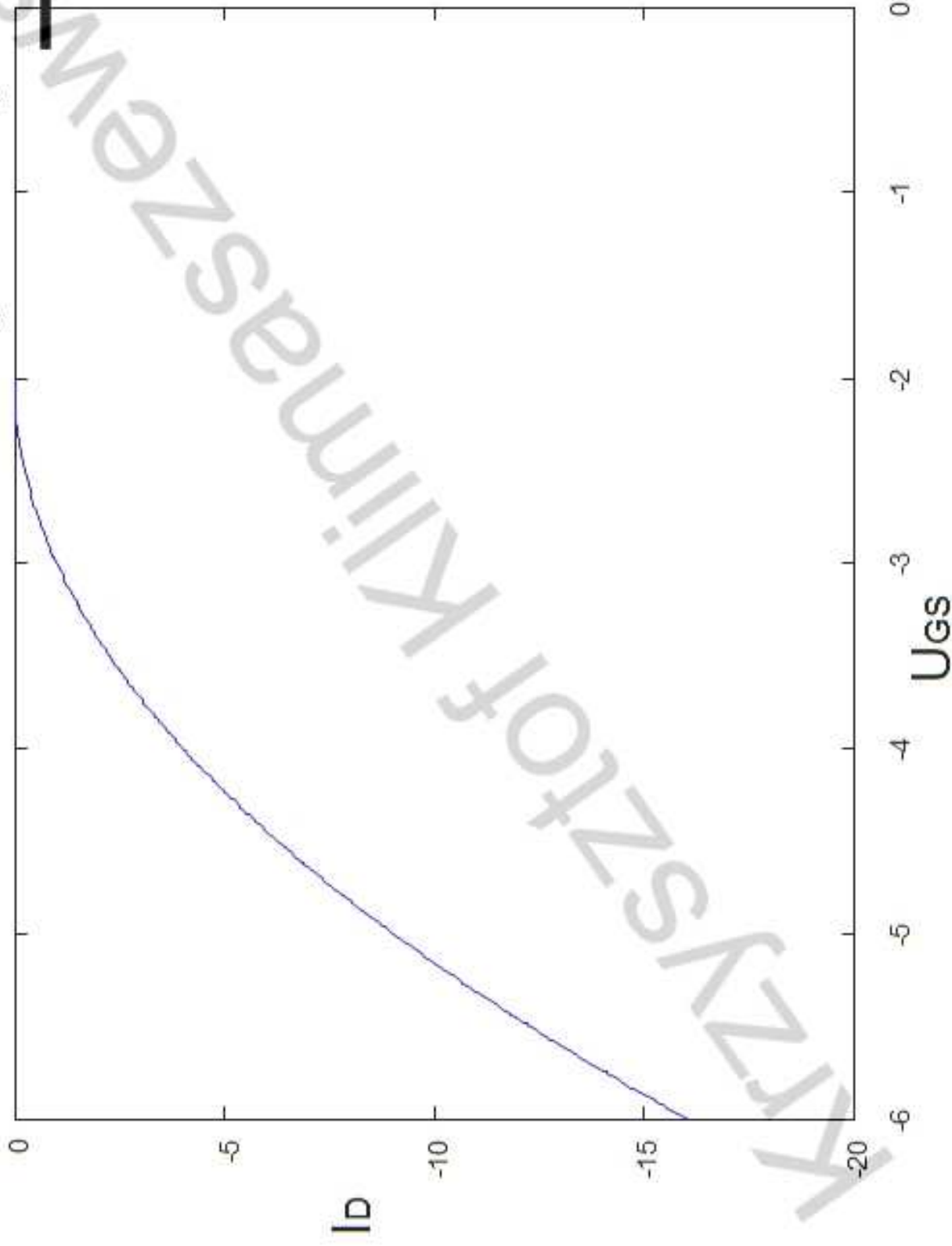
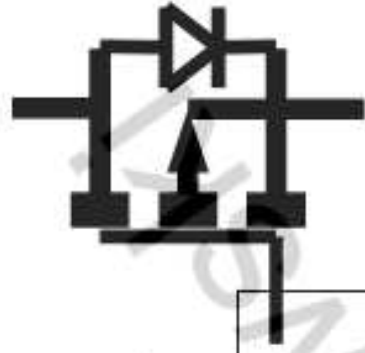
# MOSFET N wzbogacany



# MOSFET N wzbogacany

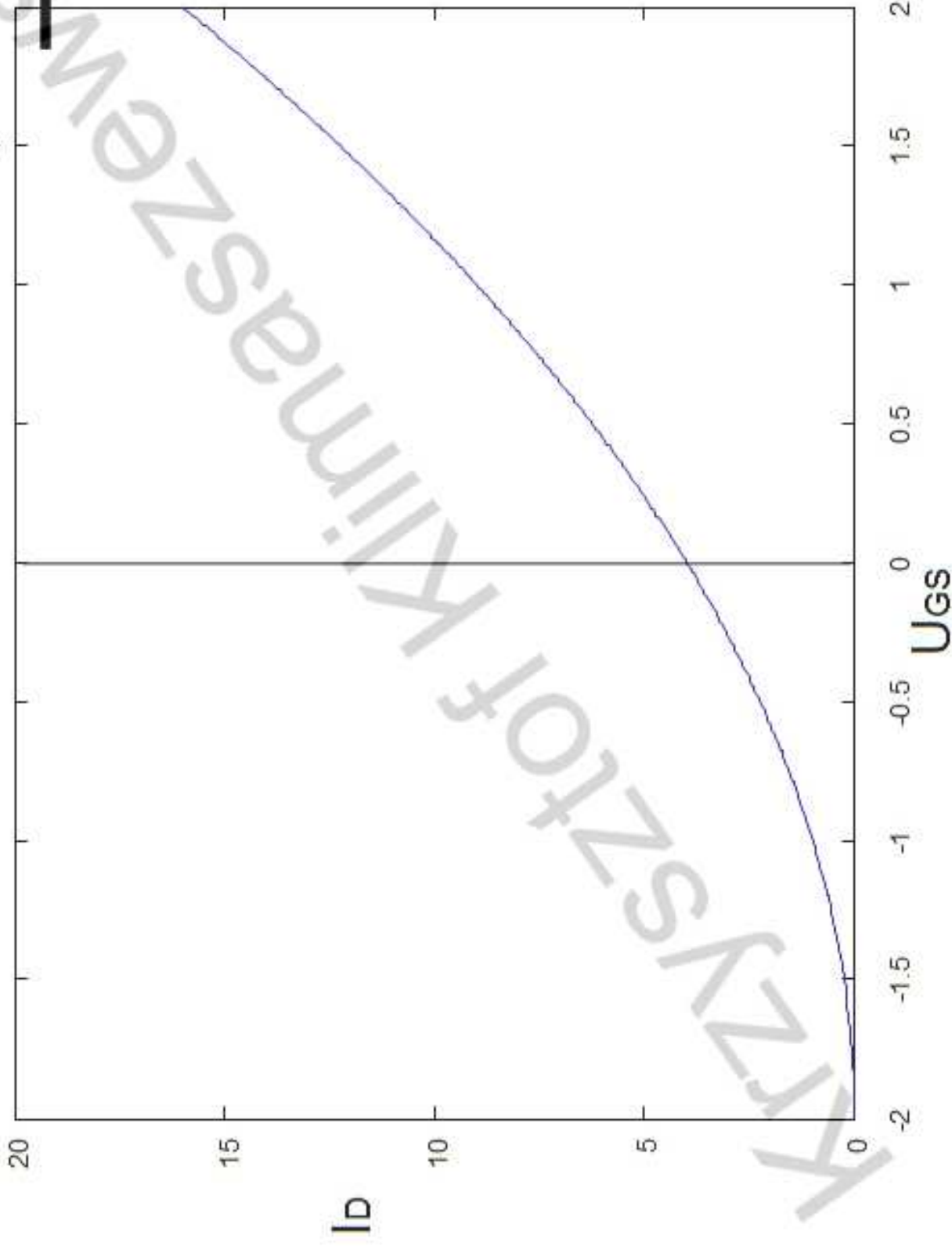
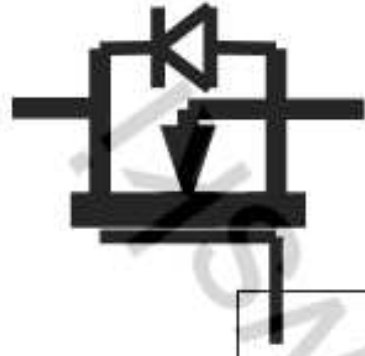


# MOSFET P wzbogacany

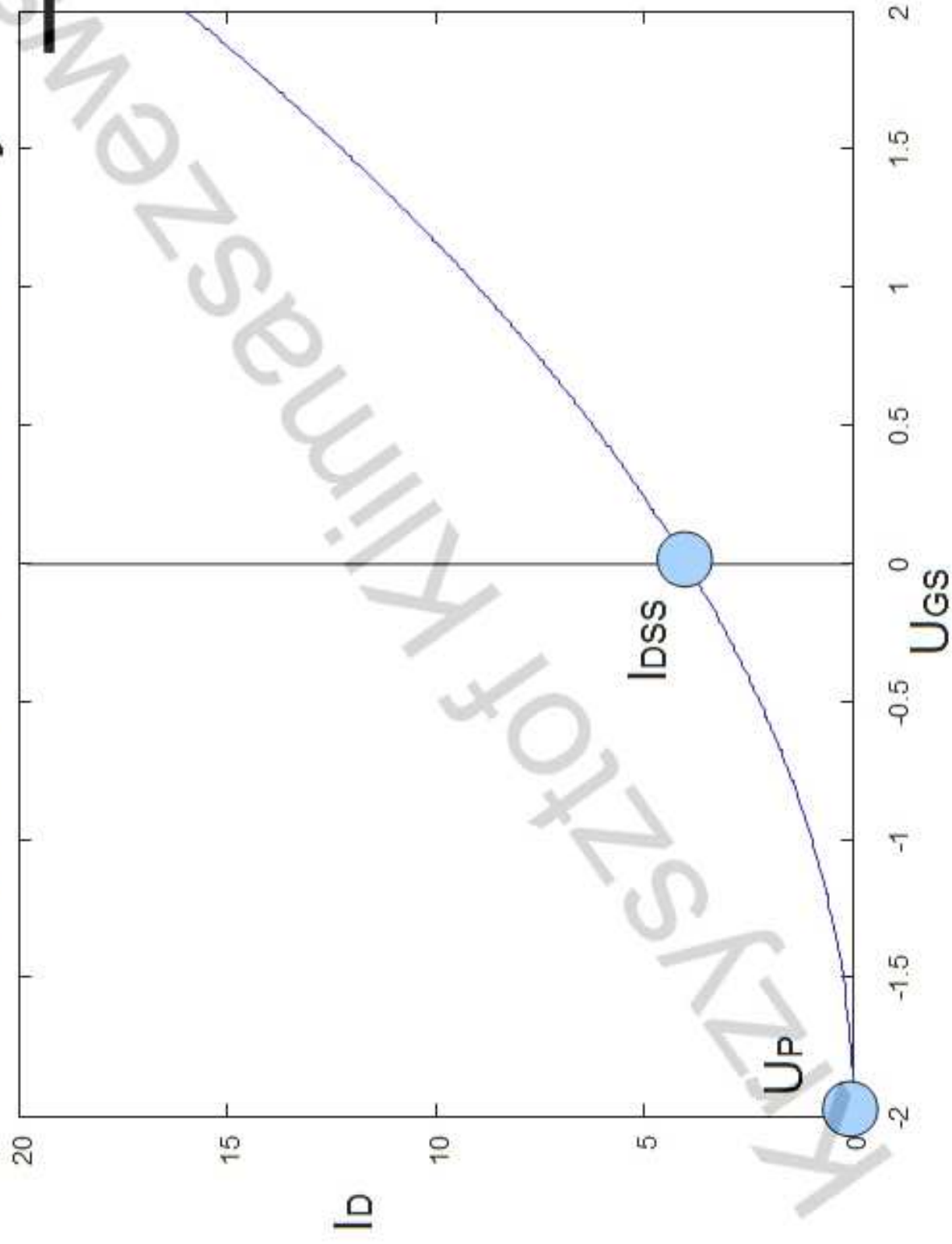
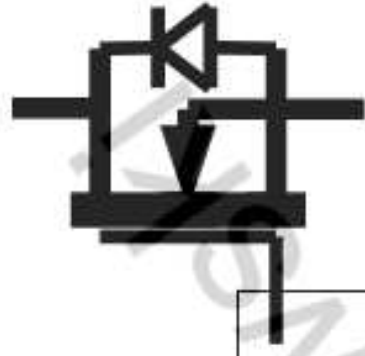




# MOSFET N zubożany



# MOSFET N zubożany

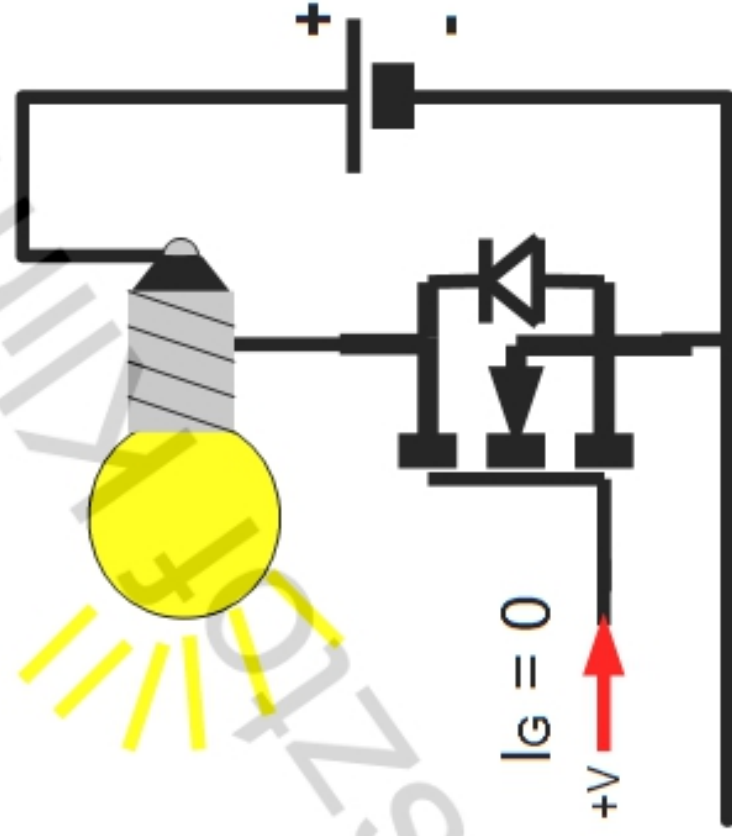


# Tranzystor jako przełącznik

- Typowe zastosowanie MOSFET-ów
- Tranzystor znajduje się w jednym z 2 stanów:
  - w stanie otwarcia (gdy przewodzi prąd) –  $U_{DS}$  bliskie zeru!
  - w stanie odcięcia (gdy nie przewodzi prądu)

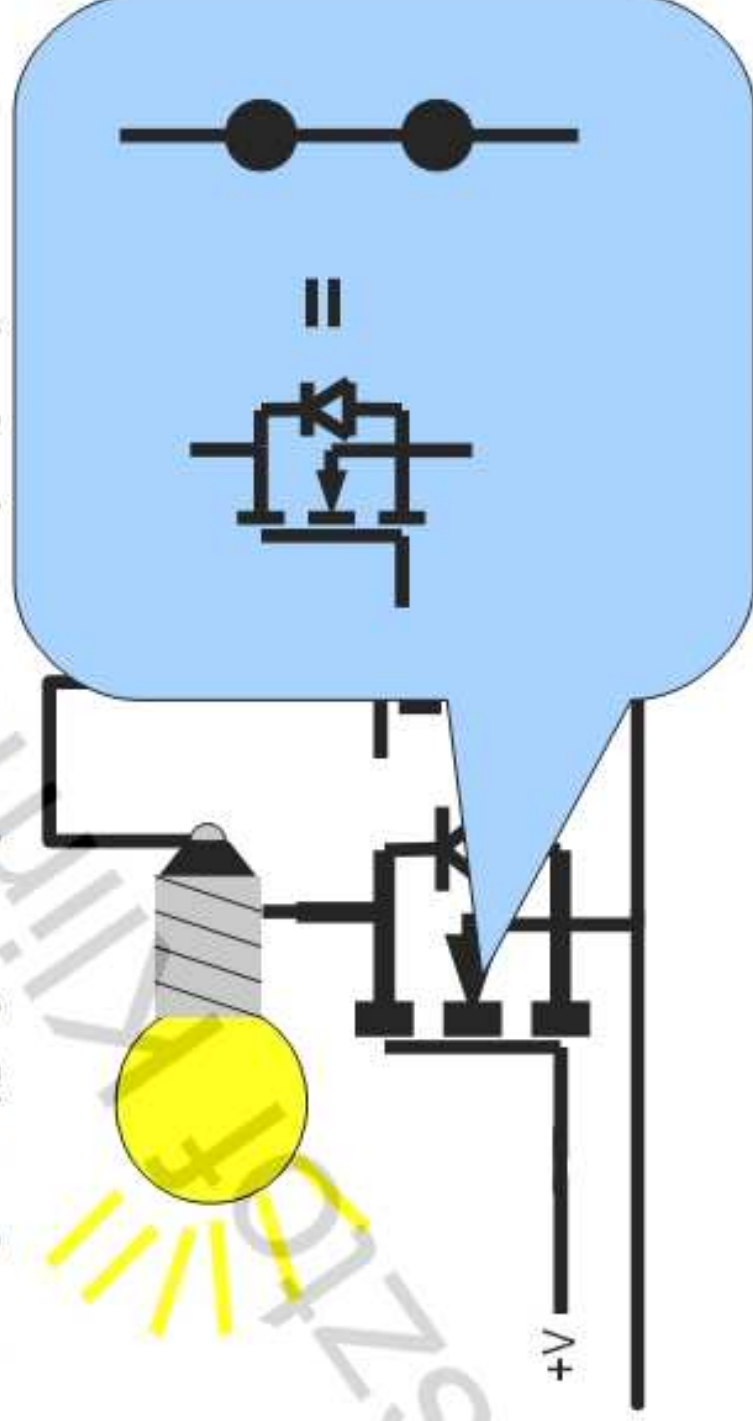
# Tranzystor jako przełącznik

- w stanie otwarcia (gdy przewodzi prąd) –  $U_{DS}$  bliskie zeru!



# Tranzystor jako przełącznik

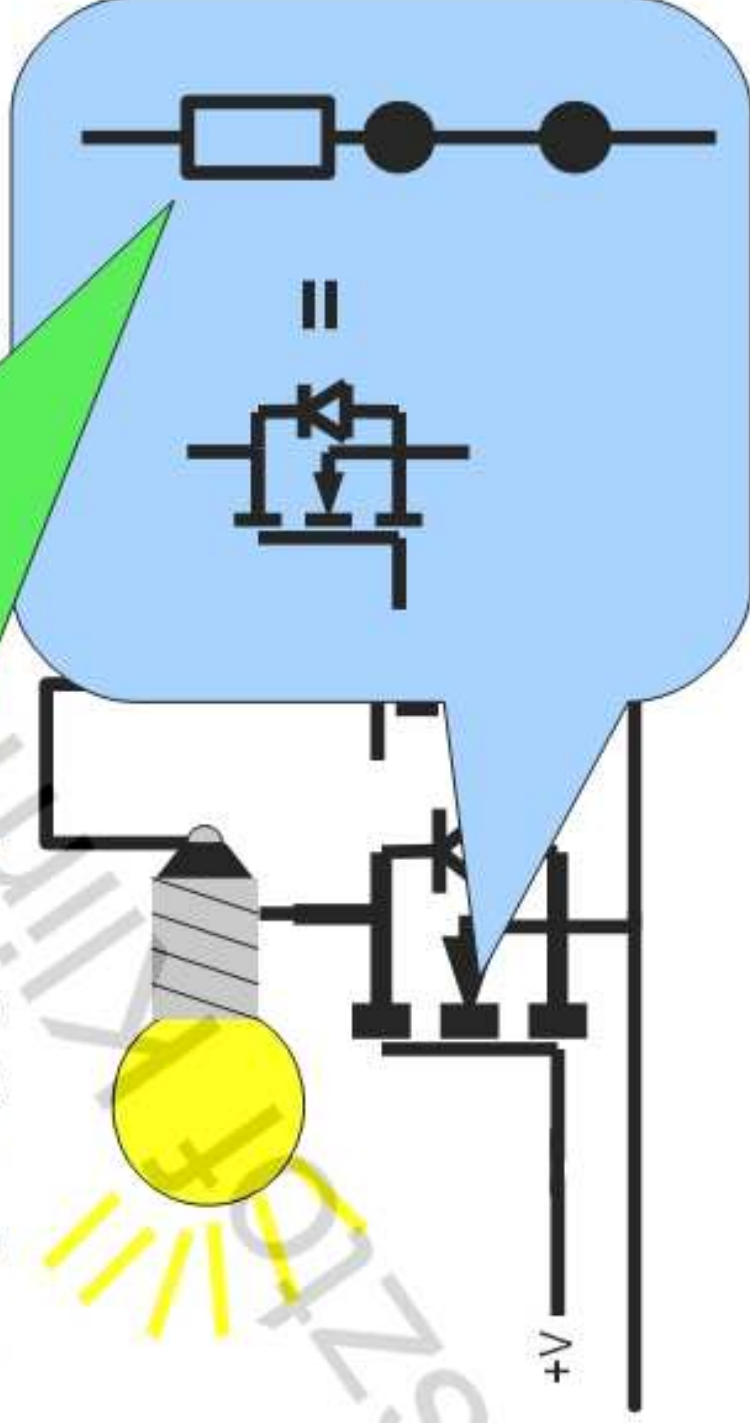
- Tranzystor znajduje się w jednym z 2 stanów:
  - w stanie otwarcia (gdy przewodzi prąd)
  - w stanie odcięcia (gdy nie przewodzi prądu)



# Tranzystor jako przełącznik

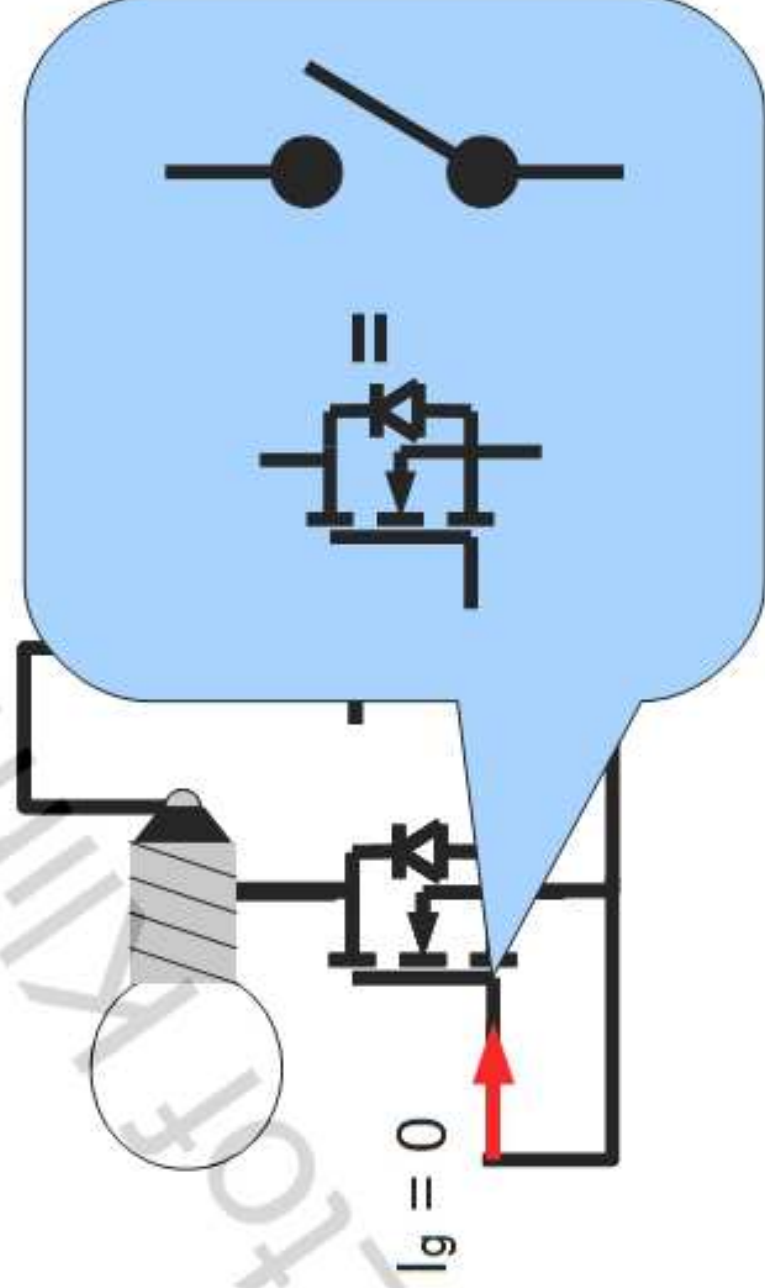
- Tranzystorze występuje jednak spadek napięcia – rezystancja  $R_{Dson}$ !

• w stanie odcięcia (gdy nie przepływa prąd)

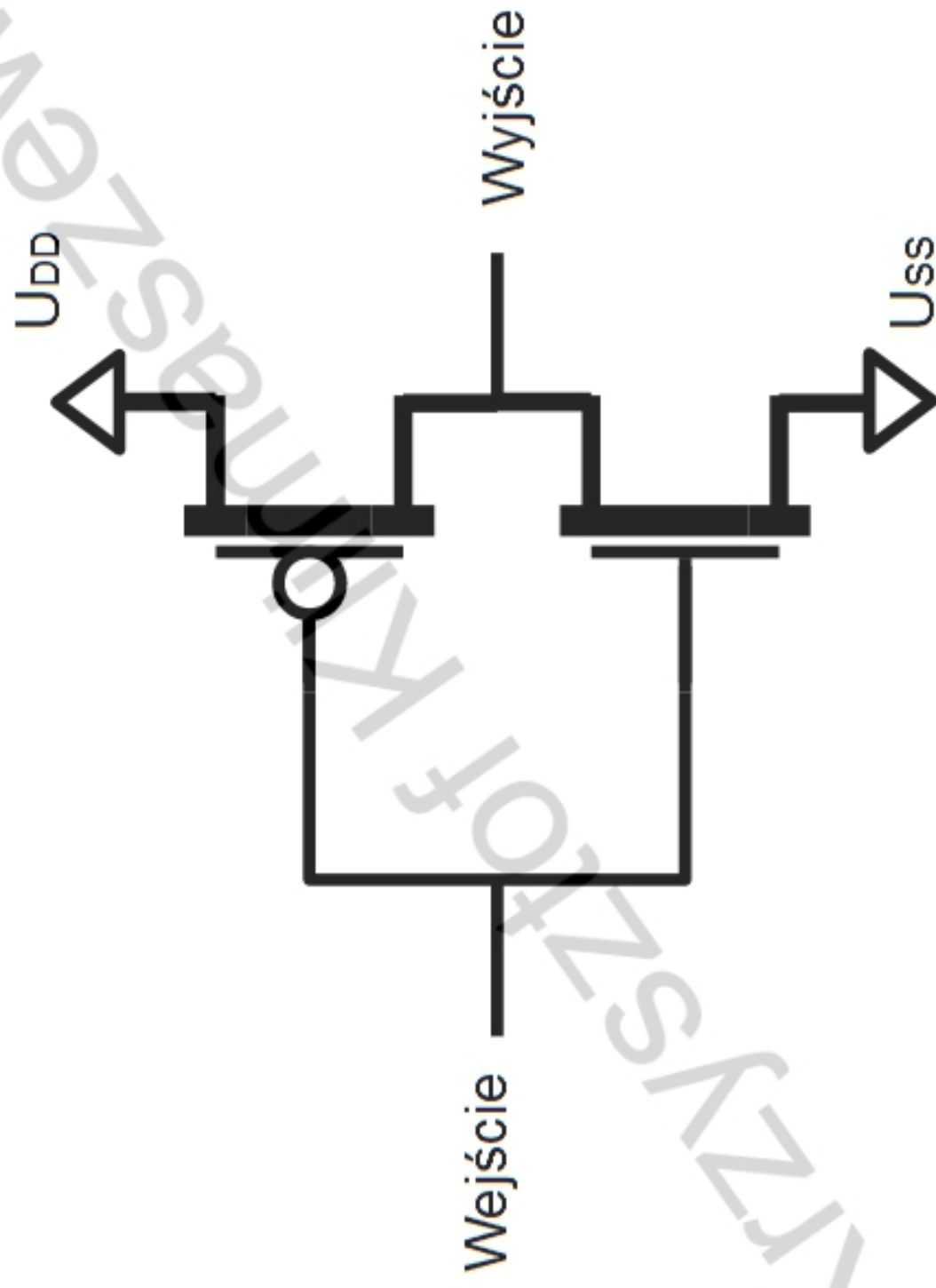


# Tranzystor jako przełącznik

- Tranzystor znajduje się w jednym z 2 stanów:
  - w stanie otwarcia (gdy przewodzi prąd)
  - w stanie odcięcia (gdy nie przewodzi prądu)



# Inverter CMOS



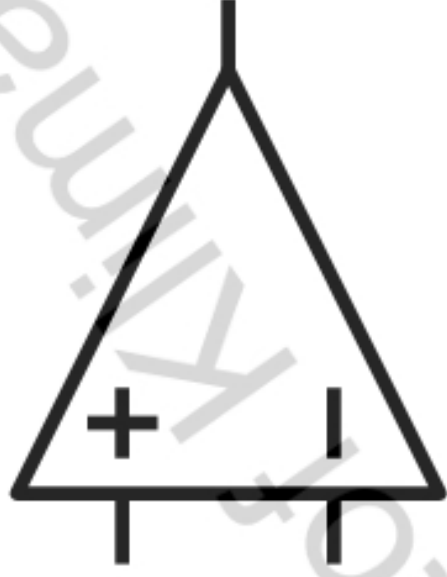




# Wzmacniacz operacyjny

- Wzmacniacz, ale dlaczego operacyjny?
  - Można z jego pomocą realizować operacje matematyczne (np. dodawanie, odejmowanie, całkowanie, różniczkowanie)
- Wzmacniacz Operacyjny = WO

# Wzmacniacz operacyjny



# Wzmacniacz operacyjny

wejście nieodwracające

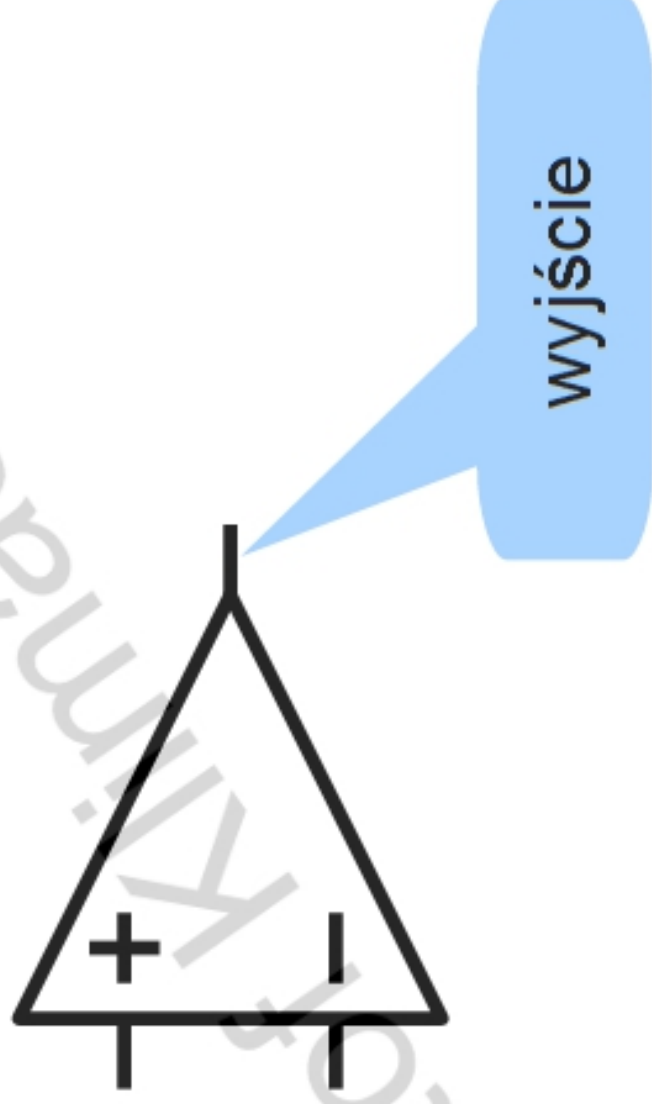


# Wzmacniacz operacyjny

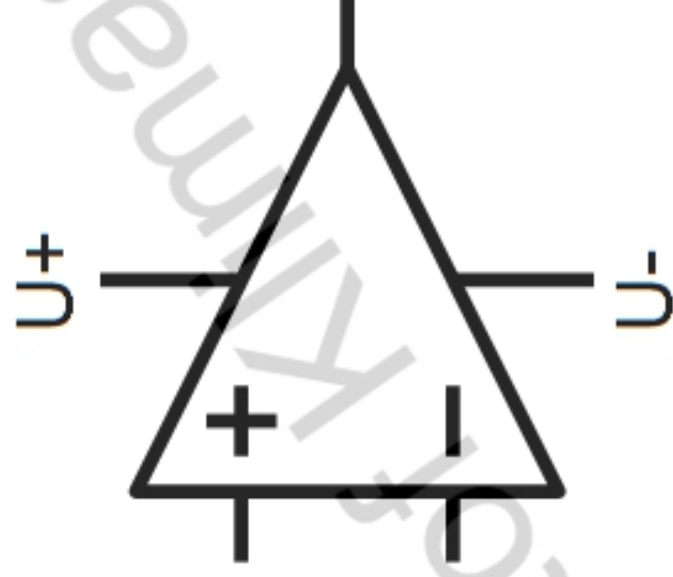


wejście odwracające

# Wzmacniacz operacyjny

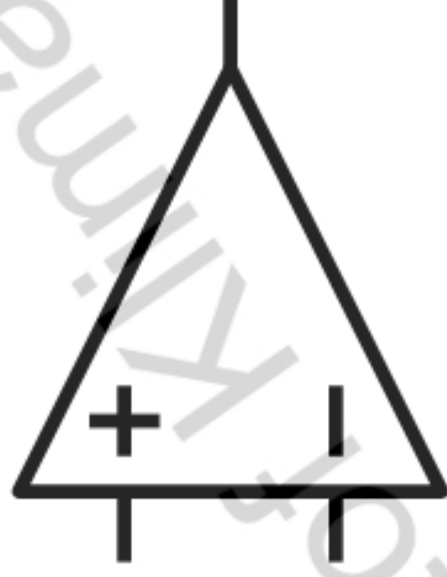


Każdy układ działa lepiej, jeśli jest podłączony do zasilania!



## Wzmacniacz operacyjny

- Wzmacnia napięcia stałe i przemiennie





# Wzmocnienie wzmacniacza operacyjnego

- idealny wzmacniacz operacyjny ma nieskończone wielkie wzmocnienie napięcia przyłożonego pomiędzy wejście nieodwracające a odwracające



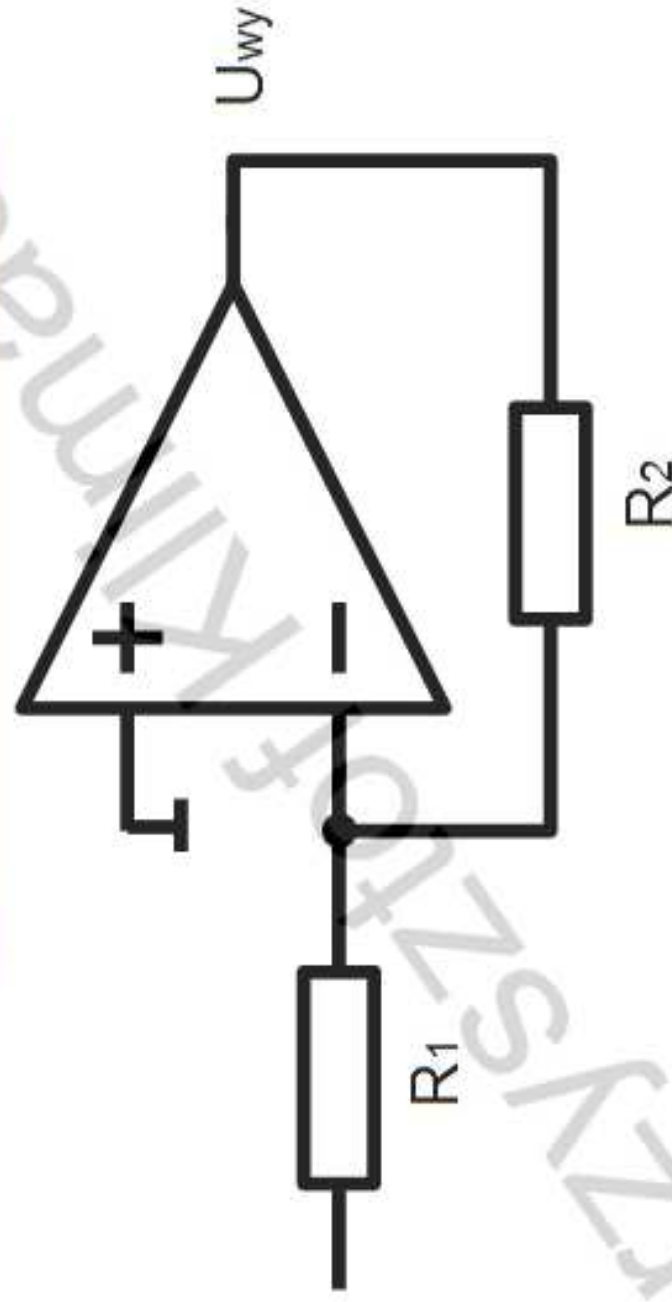
# Wzmocnienie wzmacniacza operacyjnego

- idealny wzmacniacz operacyjny ma nieskończone wielkie wzmocnienie napięcia przyłożonego pomiędzy wejście nieodwracające a odwracające

Jak można wykorzystać element, który ma tak wielkie wzmocnienie?

# Wzmacniacz operacyjny jako... wzmacniacz

WO używamy zwykle w układzie ze sprzężeniem zwrotnym!

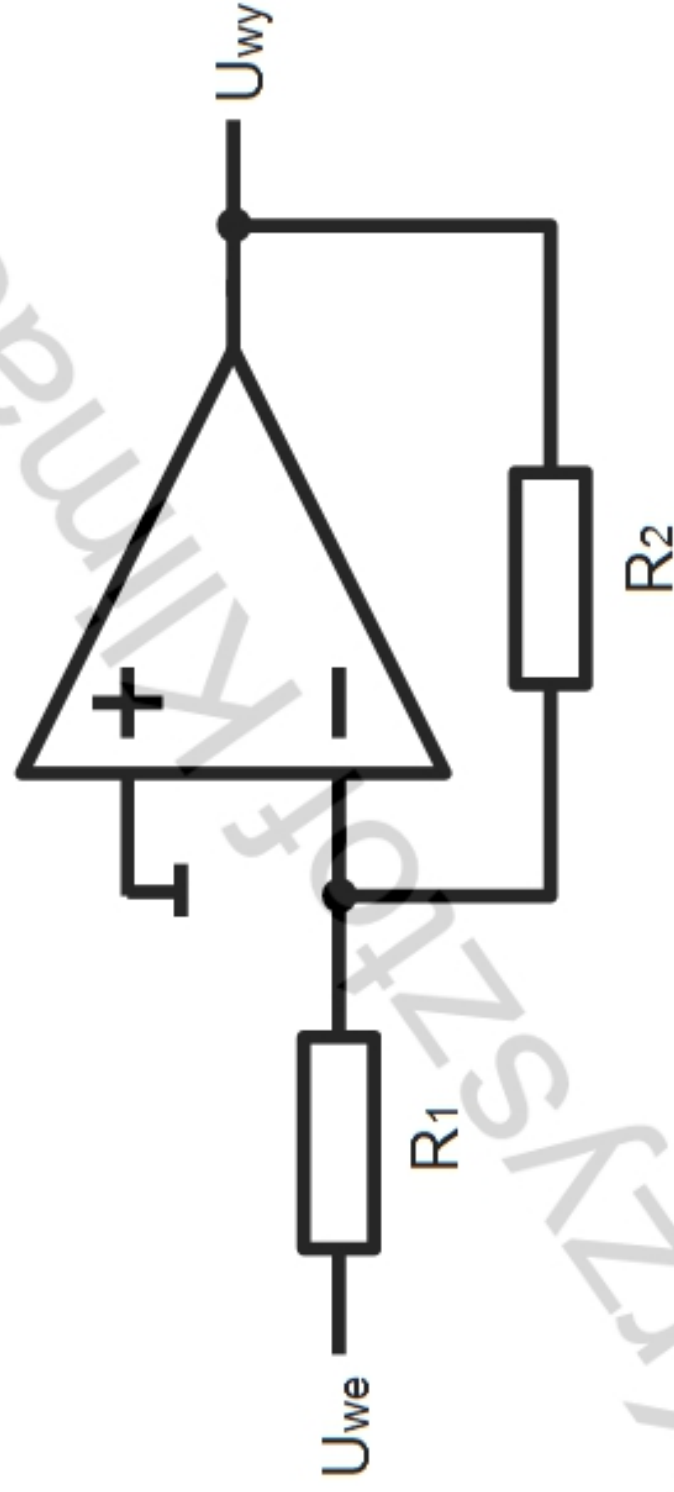


## 2 proste zasady

- dla wzmacniacza idealnego
- $W_O$  wymusza napięcie między wejściami = 0
  - prąd wpływający do wejść  $W_O = 0$

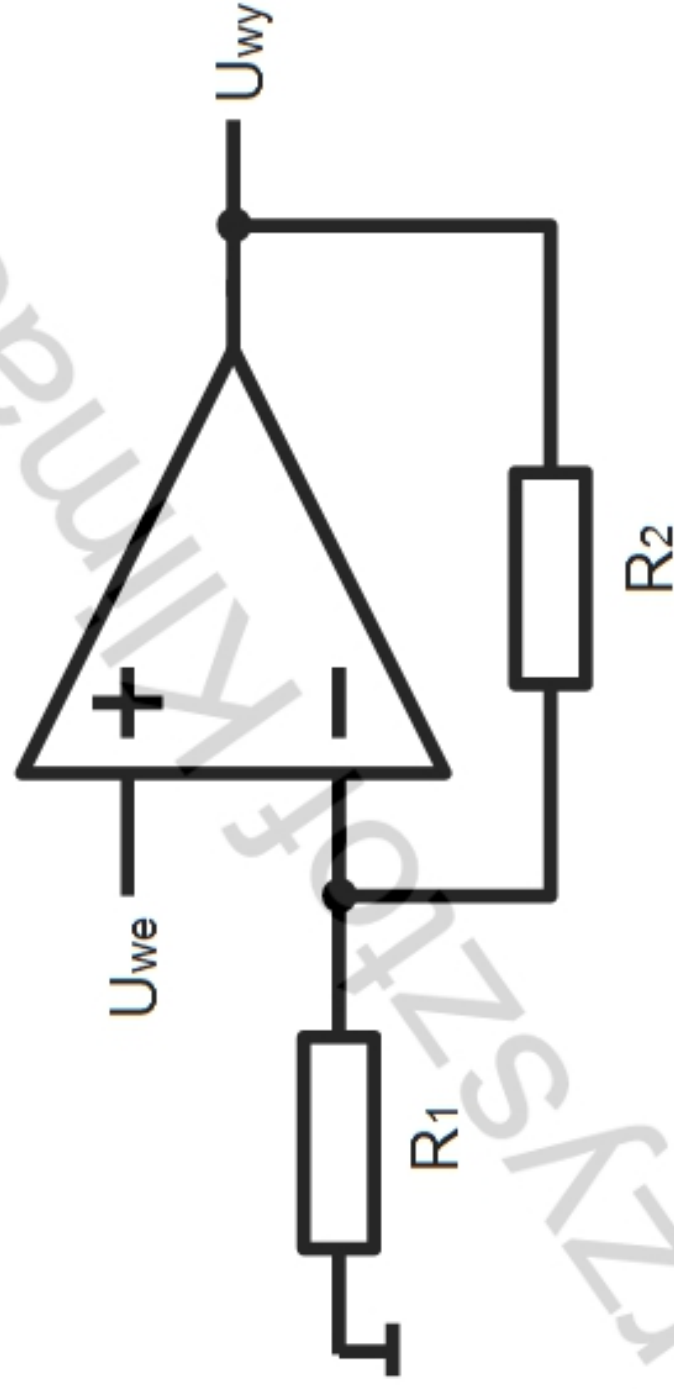
# Typowe układy z WO

- Wzmacniacz odwracający



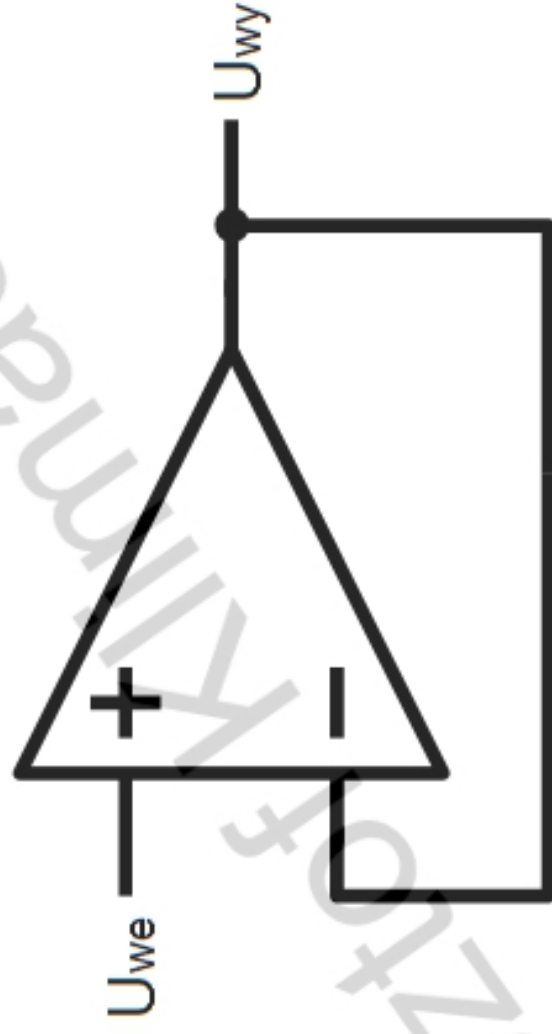
# Typowe układy z WO

- Wzmacniacz nieodwracający



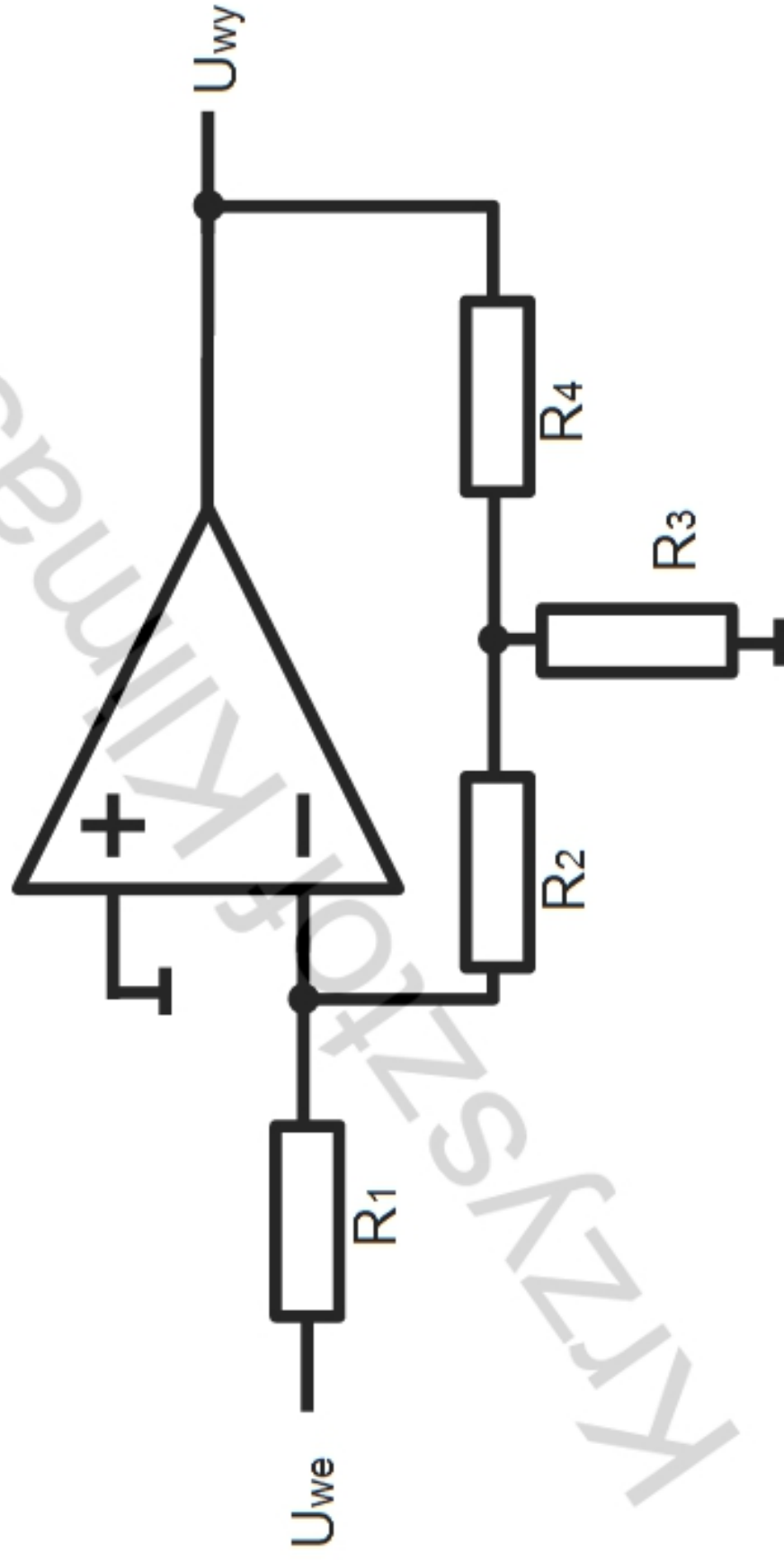
# Typowe układy z WO

- Wtórnik



# Typowe układy z WO

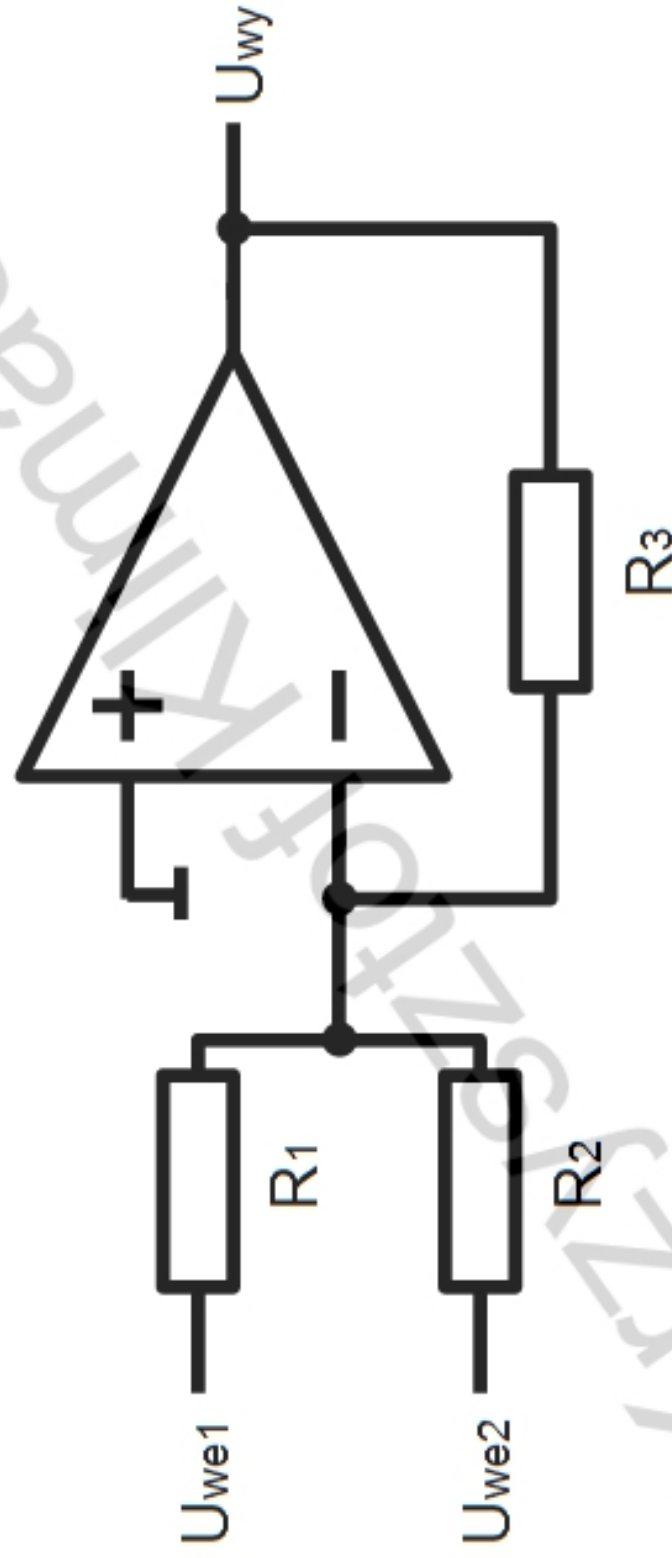
- Wzmacniacz odwracający 2





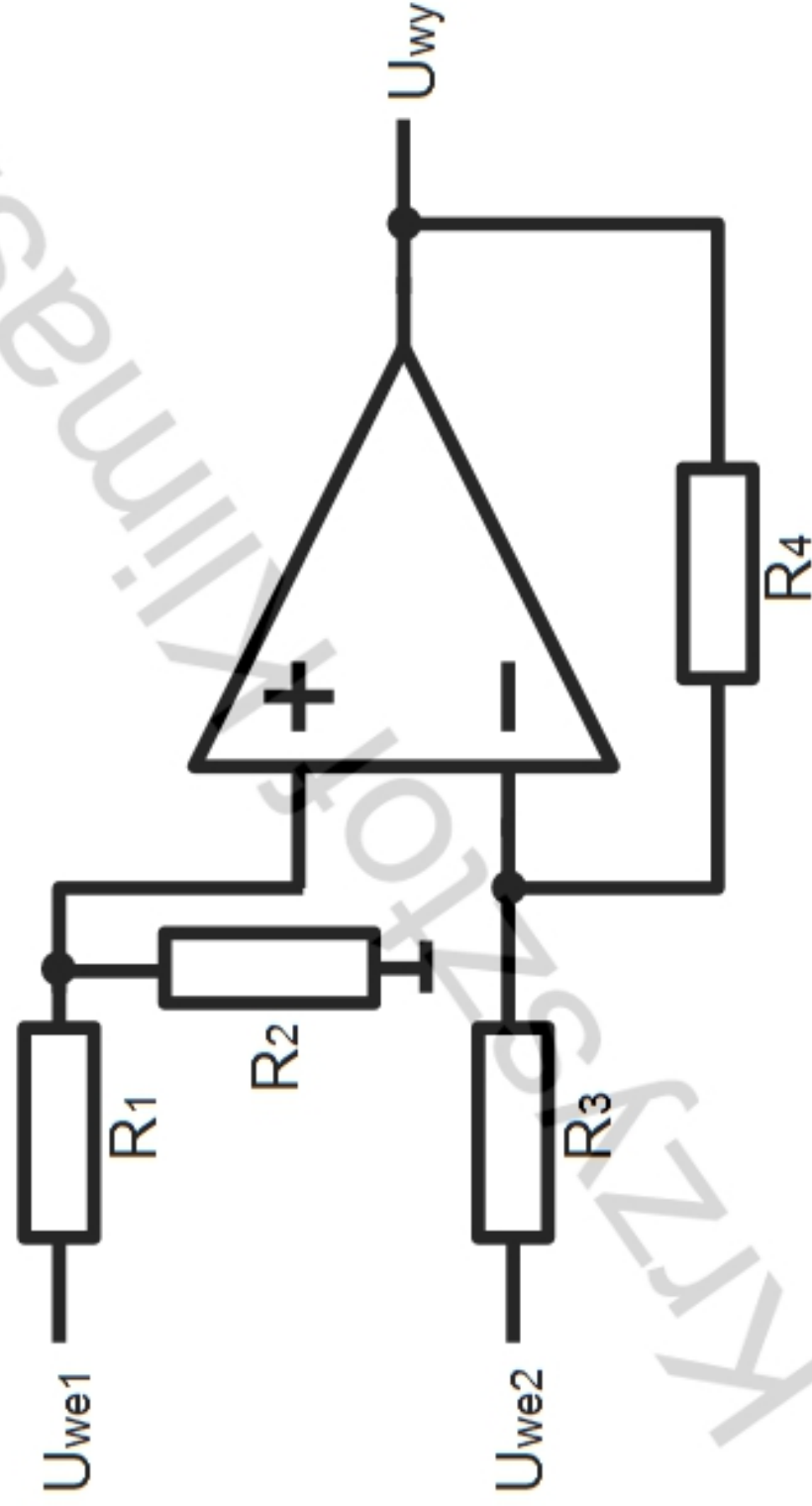
# Typowe układy z WO

- Wzmacniacz sumujący



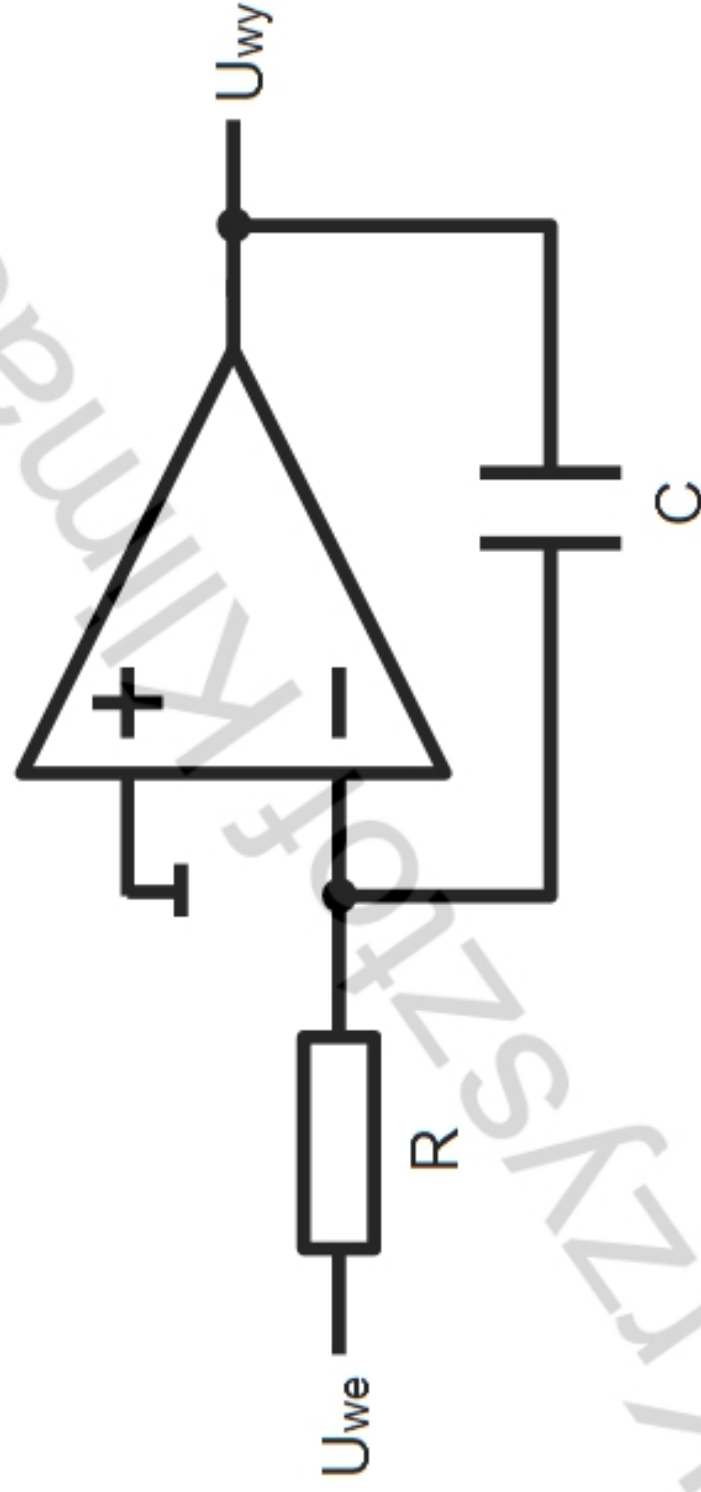
# Typowe układy z WO

- Wzmacniacz różnicowy



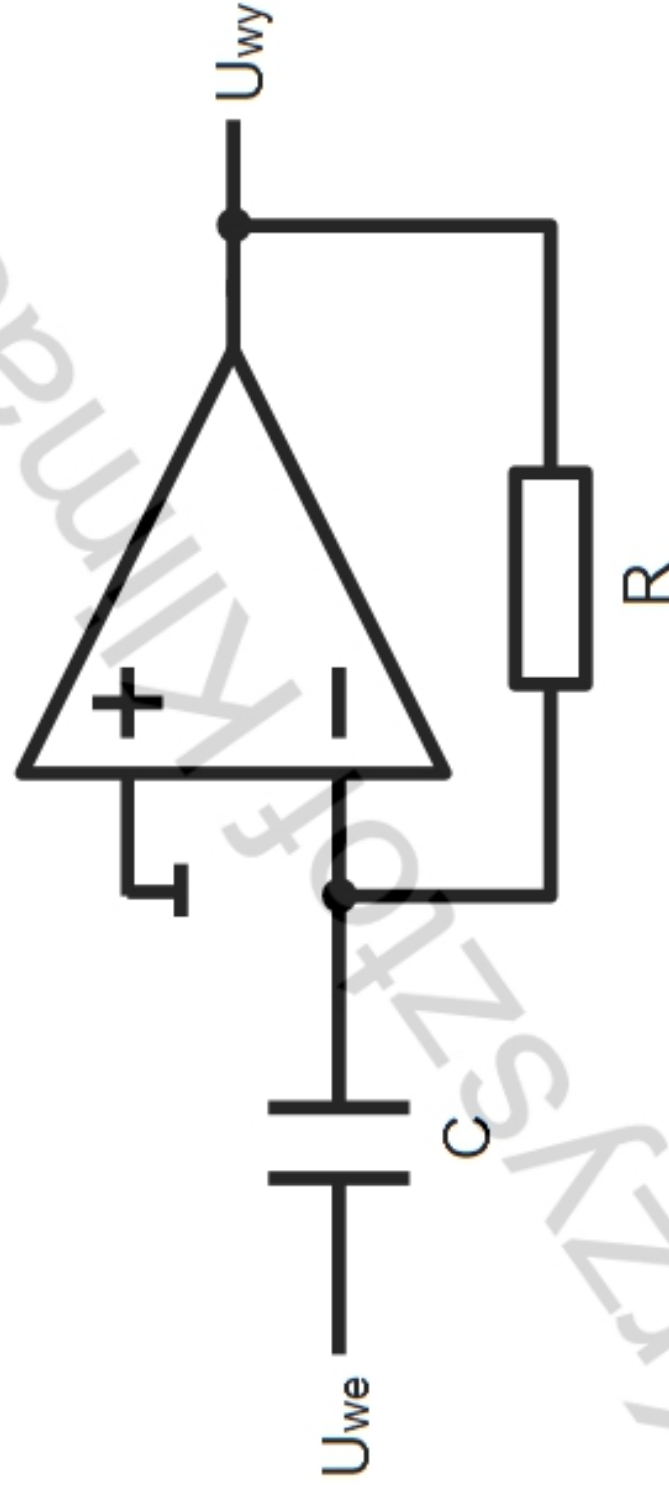
# Typowe układy z WO

- układ całkujący (integrator)



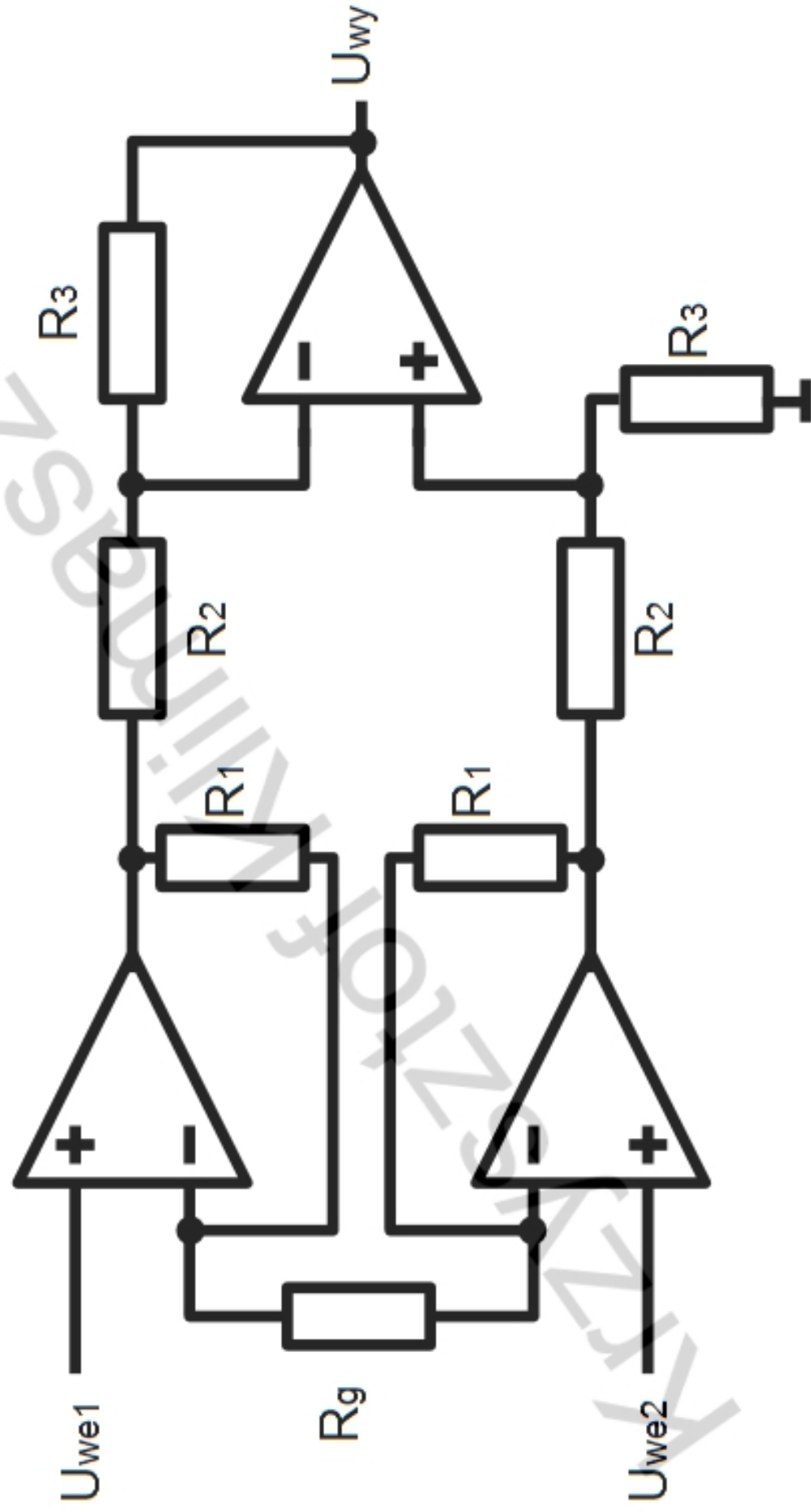
# Typowe układy z WO

- układ różniczkujący



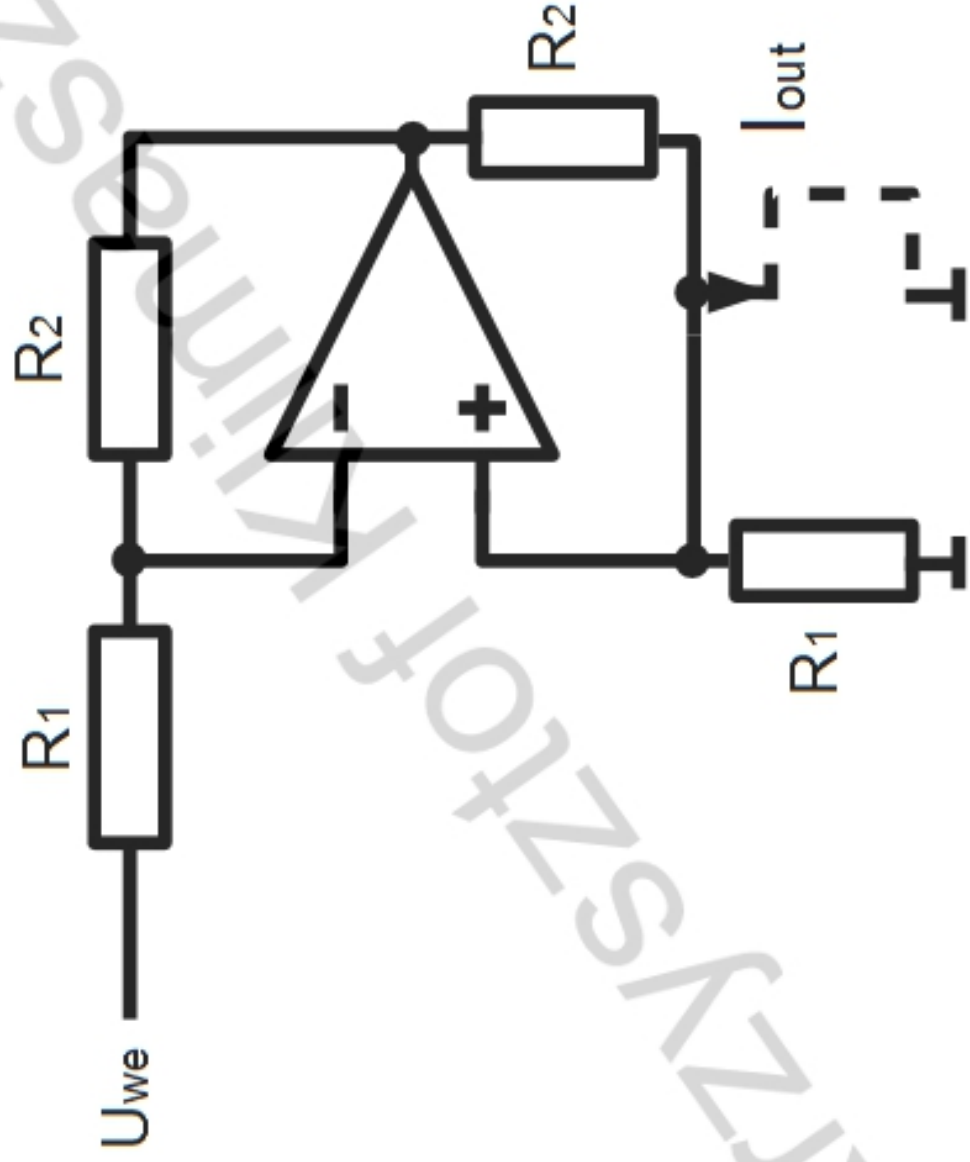
# Typowe układy z WO

- wzmacniacz różnicowy (instrumentacyjny)



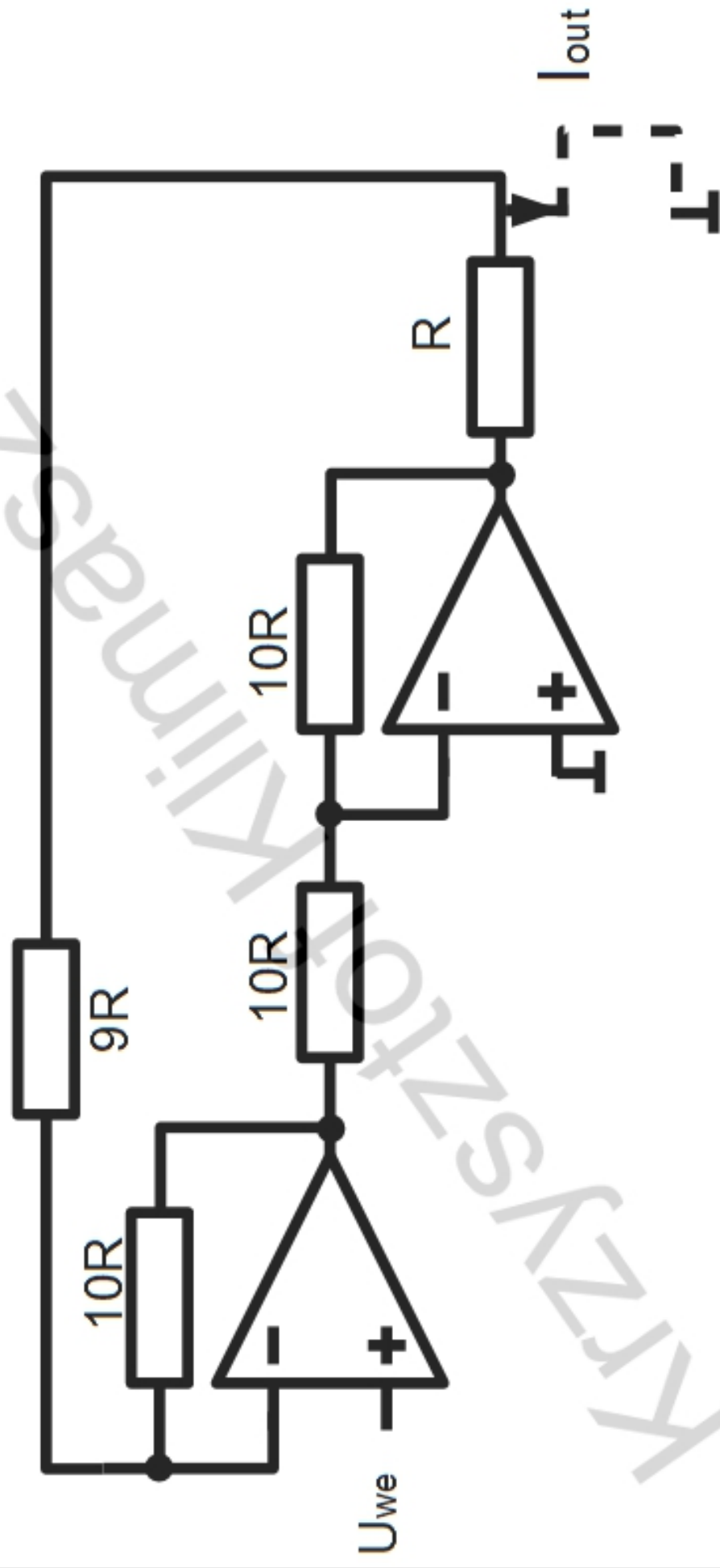
# Typowe układy z WO

- źródło prądowe sterowane napięciem



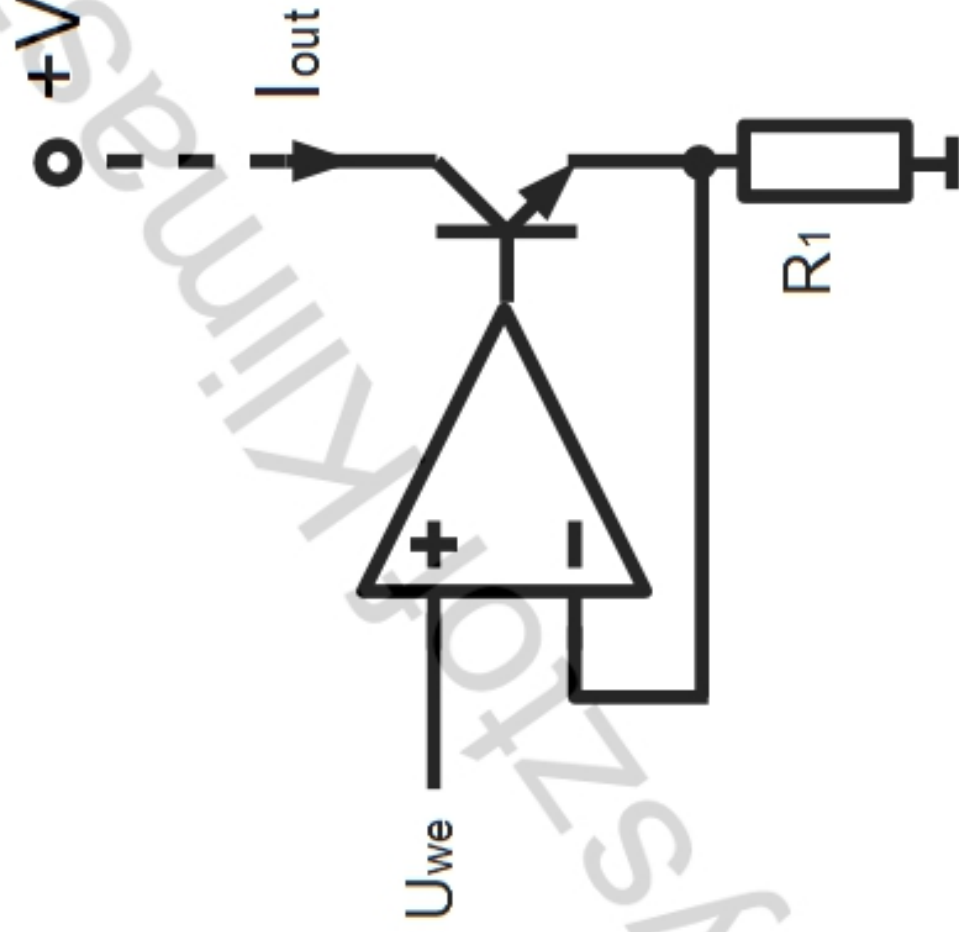
# Typowe układy z WO

- źródło prądowe sterowane napięciem 2



## Typowe układy z WO

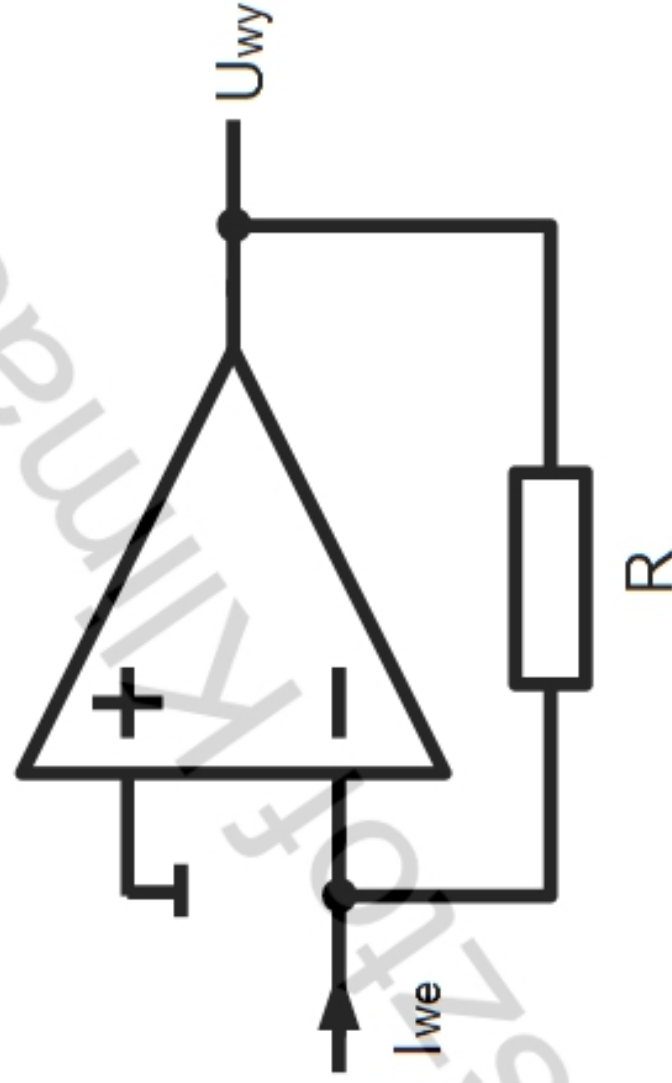
- źródło prądowe sterowane napięciem 3





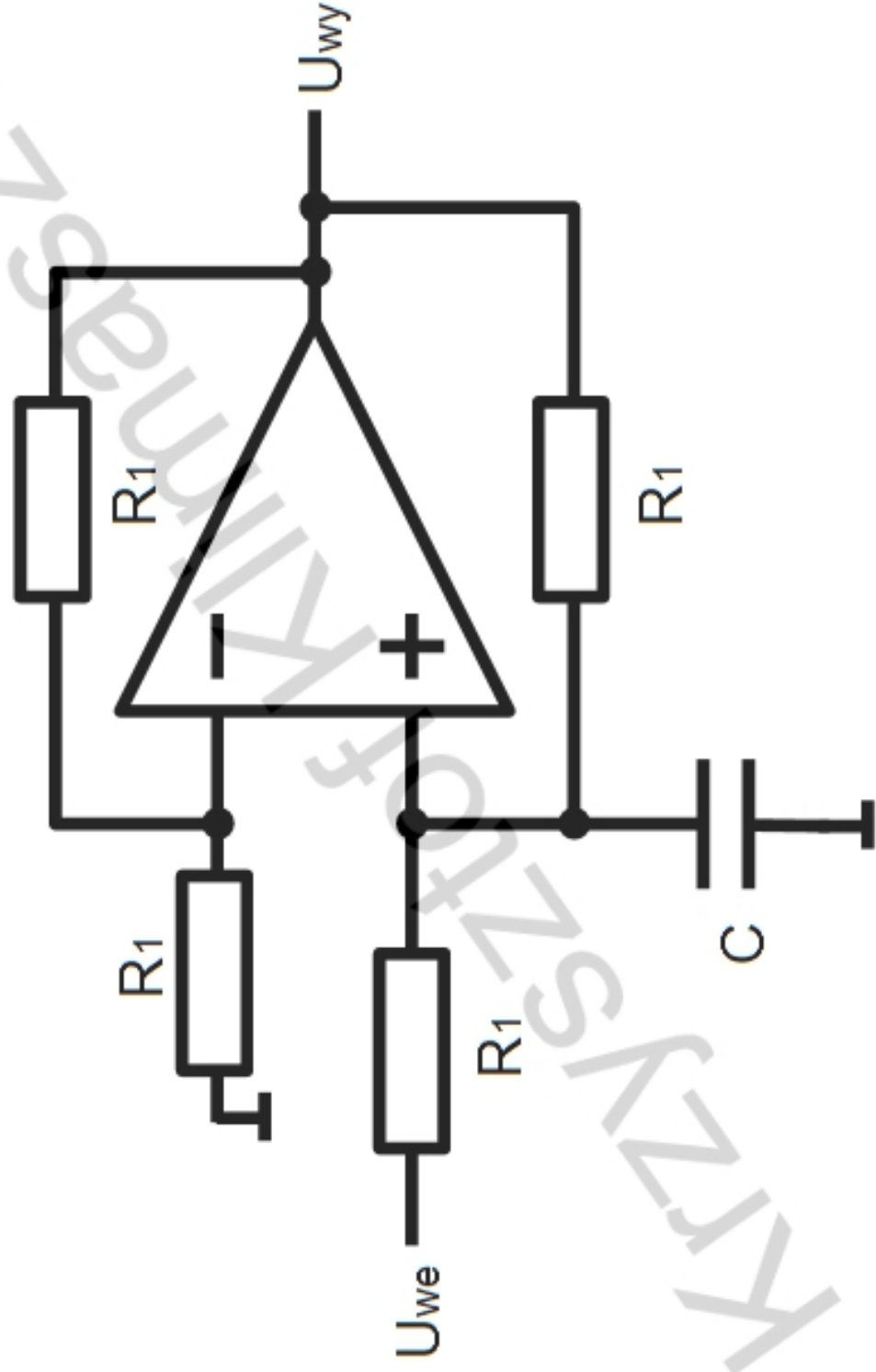
## Typowe układy z WO

- Źródło napięcia sterowane prądem



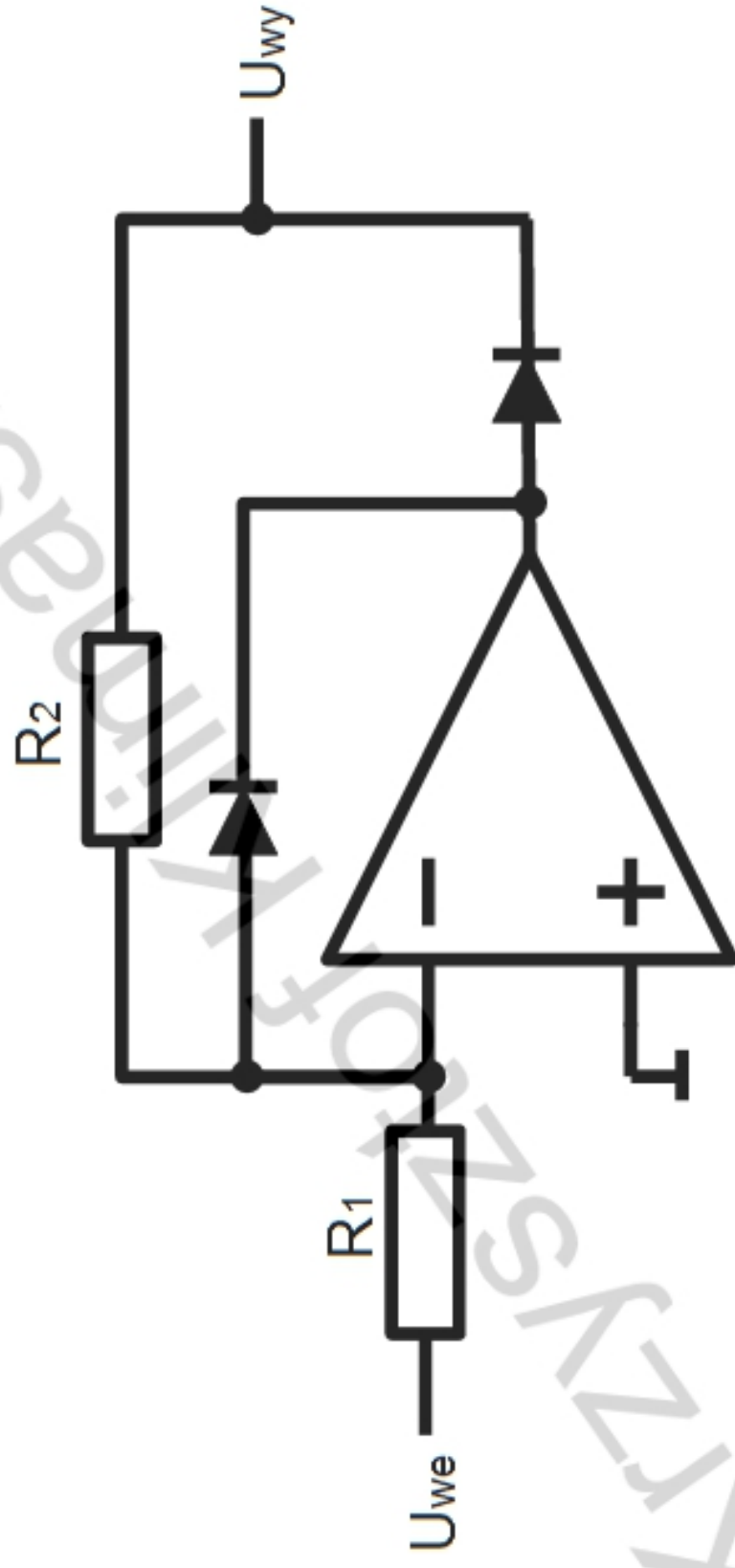
# Typowe układy z WO

- układ całkujący (integrator) 2



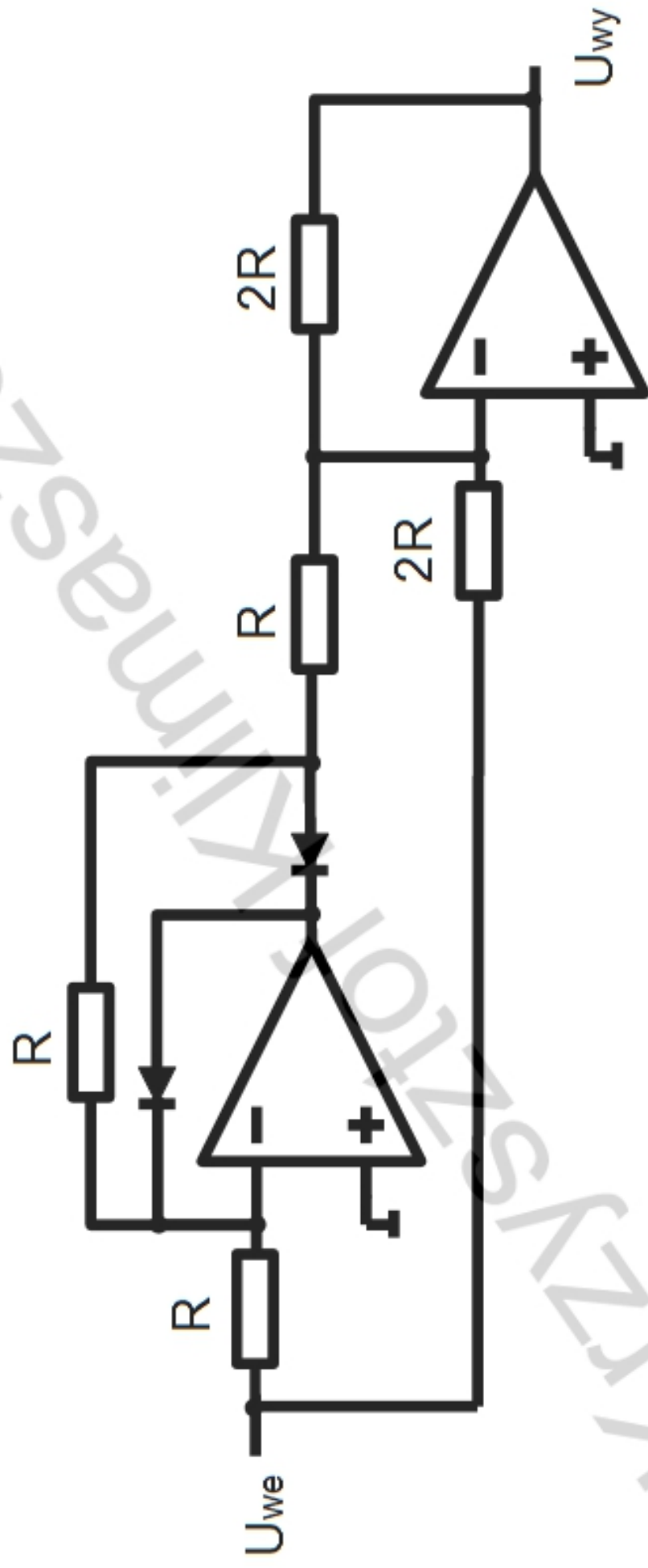
# Typowe układy z WO

- układ prostownika



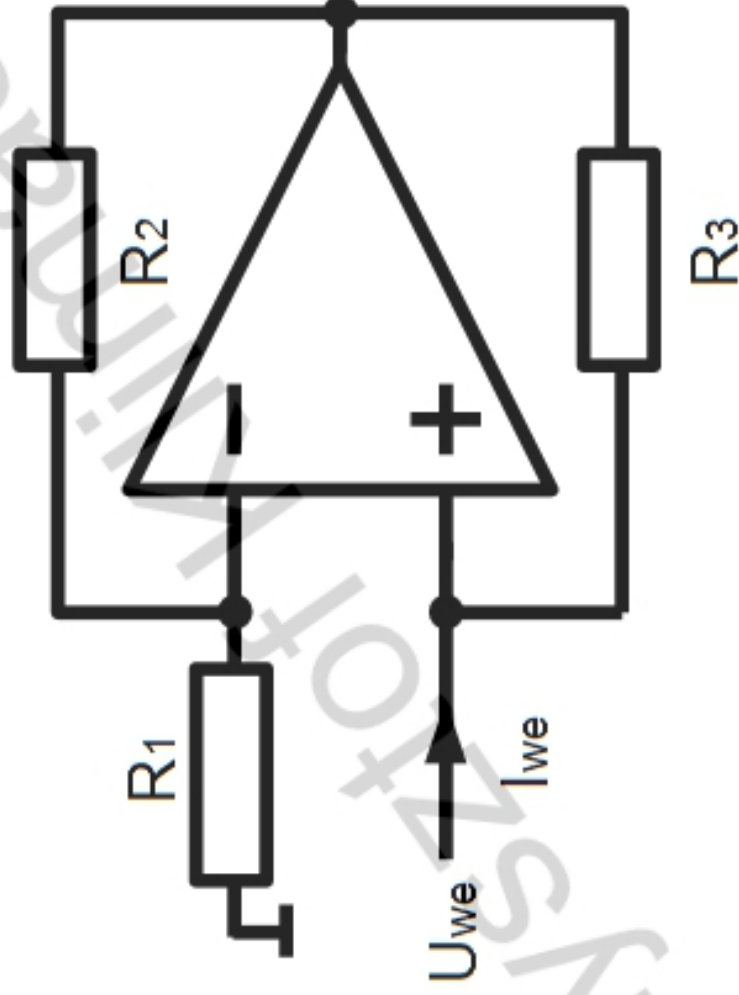
# Typowe układy z WO

- układ prostownika pełnokresowego



# Typowe układy z WO

- konwerter impedancji



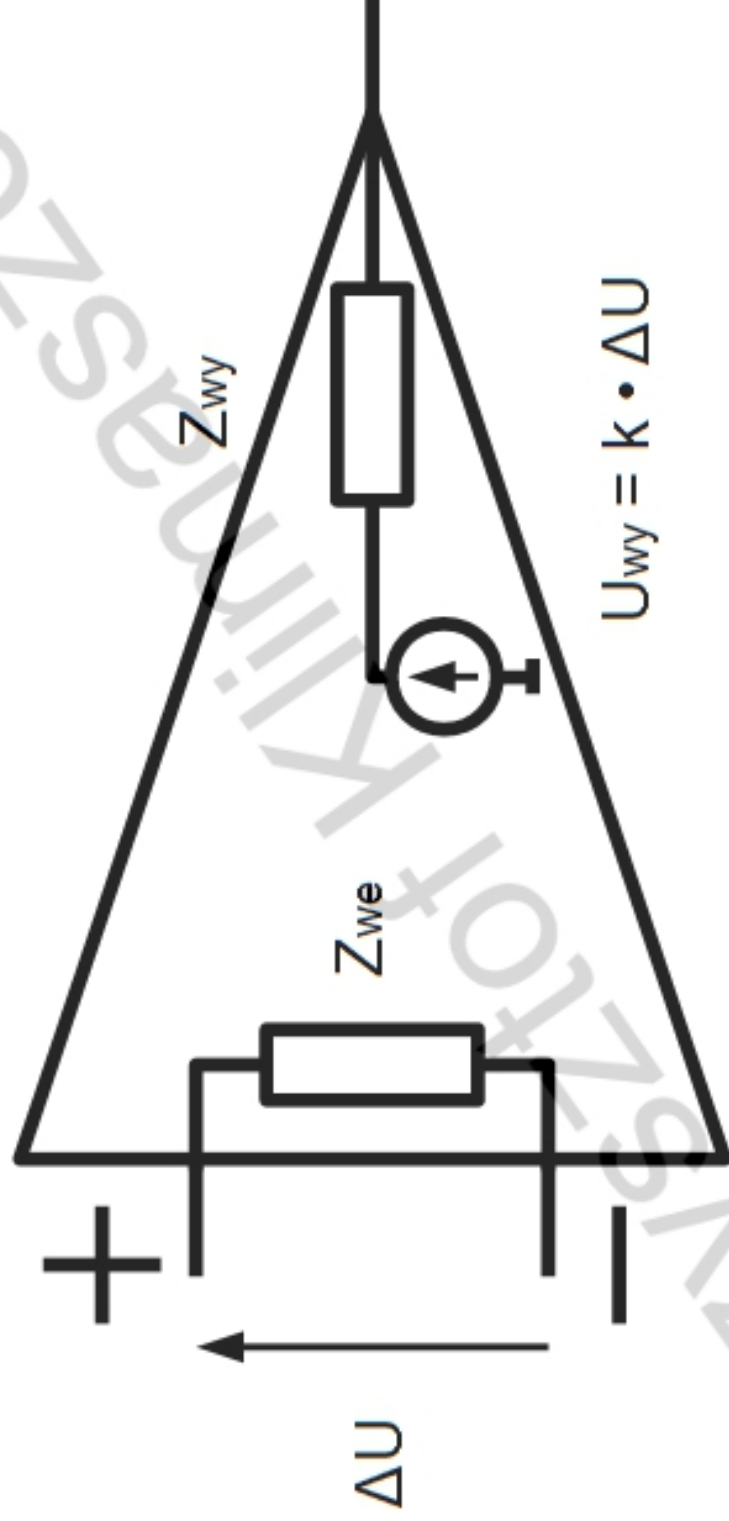


# Rzeczywisty wzmacniacz operacyjny

- Wzmacnia napięcia stałe i przemienne



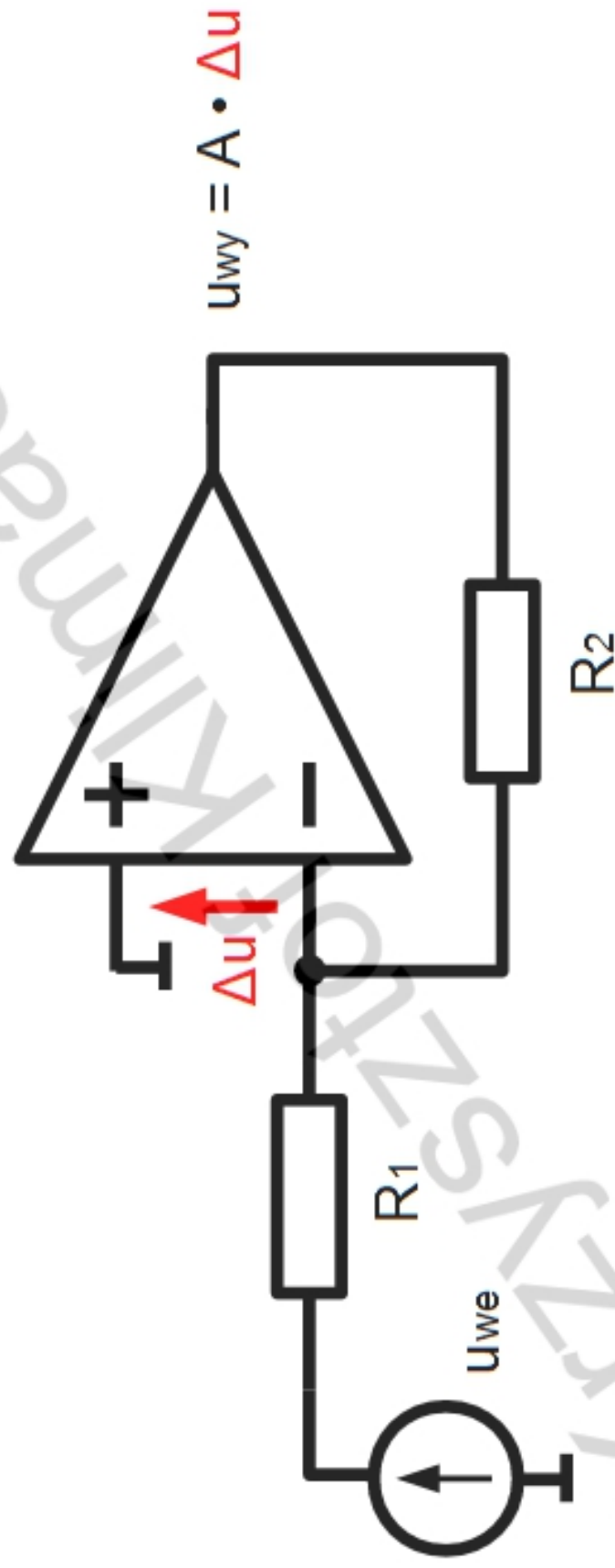
# Rzeczywisty wzmacniacz operacyjny



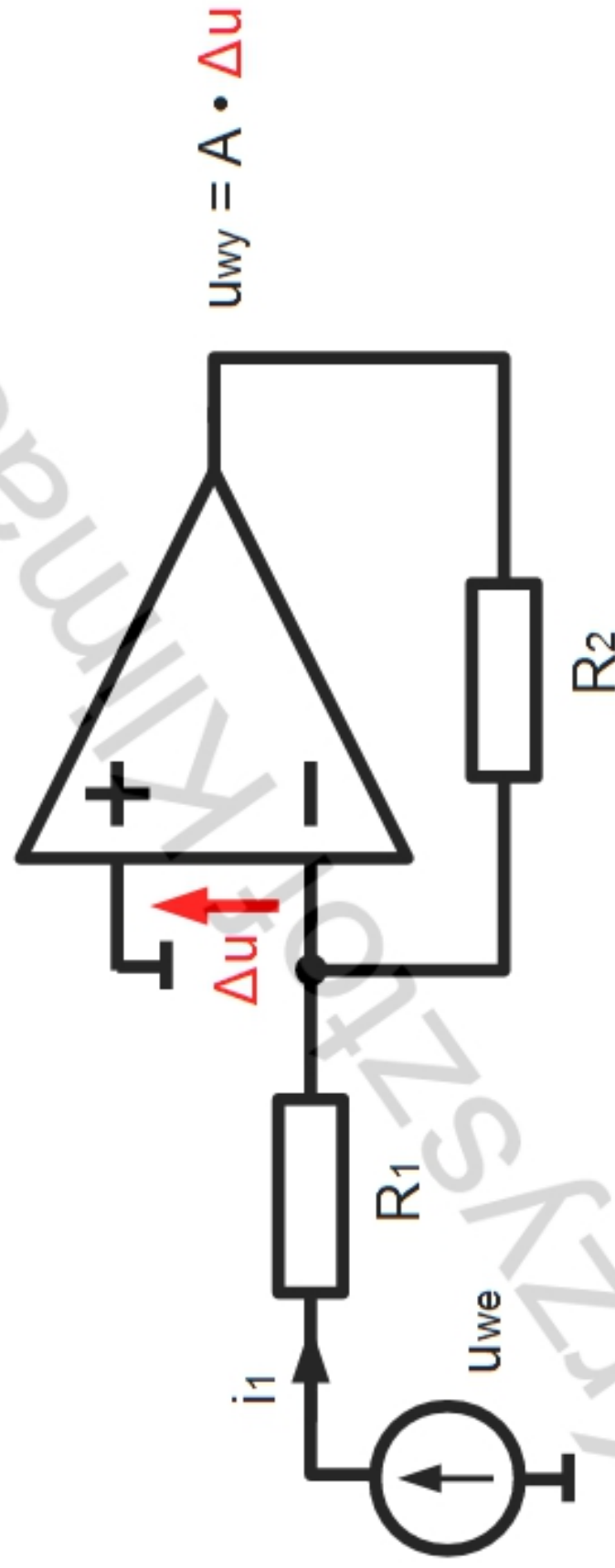
$$U_{wy} = k \cdot \Delta U$$



# Wzmacniacz operacyjny jako... wzmacniacz

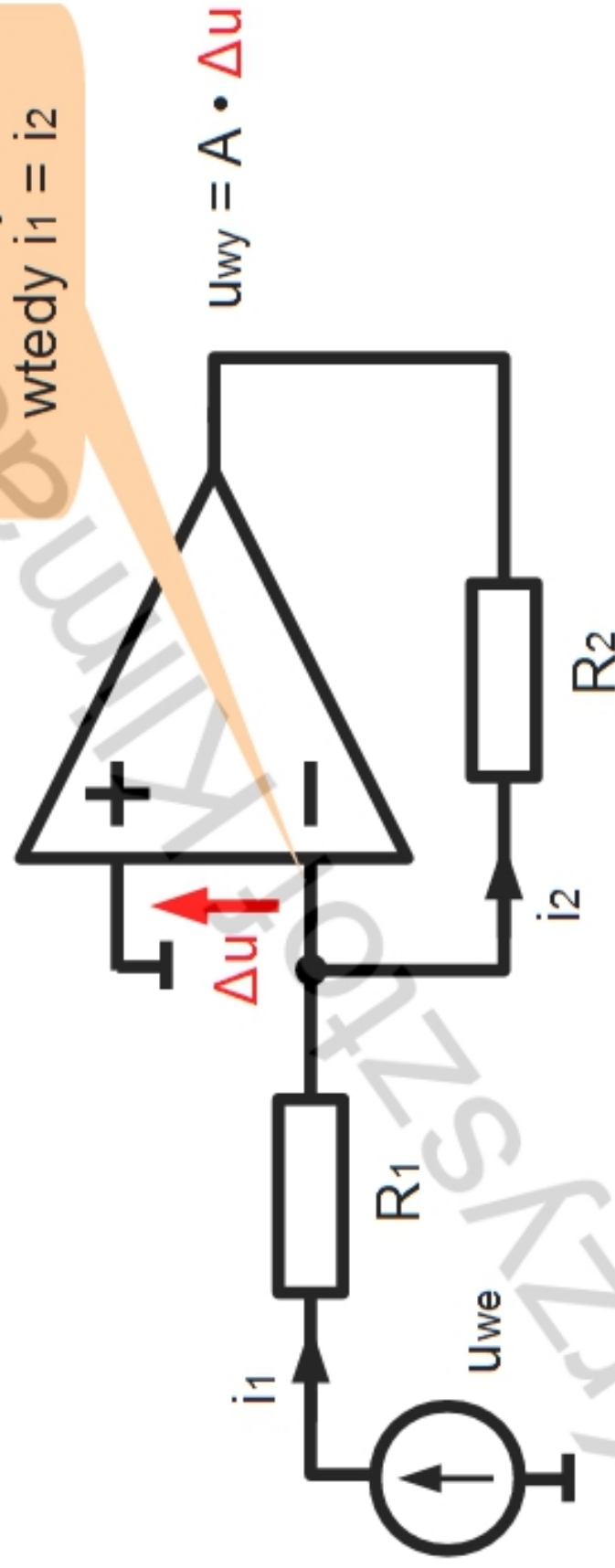


# Wzmacniacz operacyjny jako... wzmacniacz



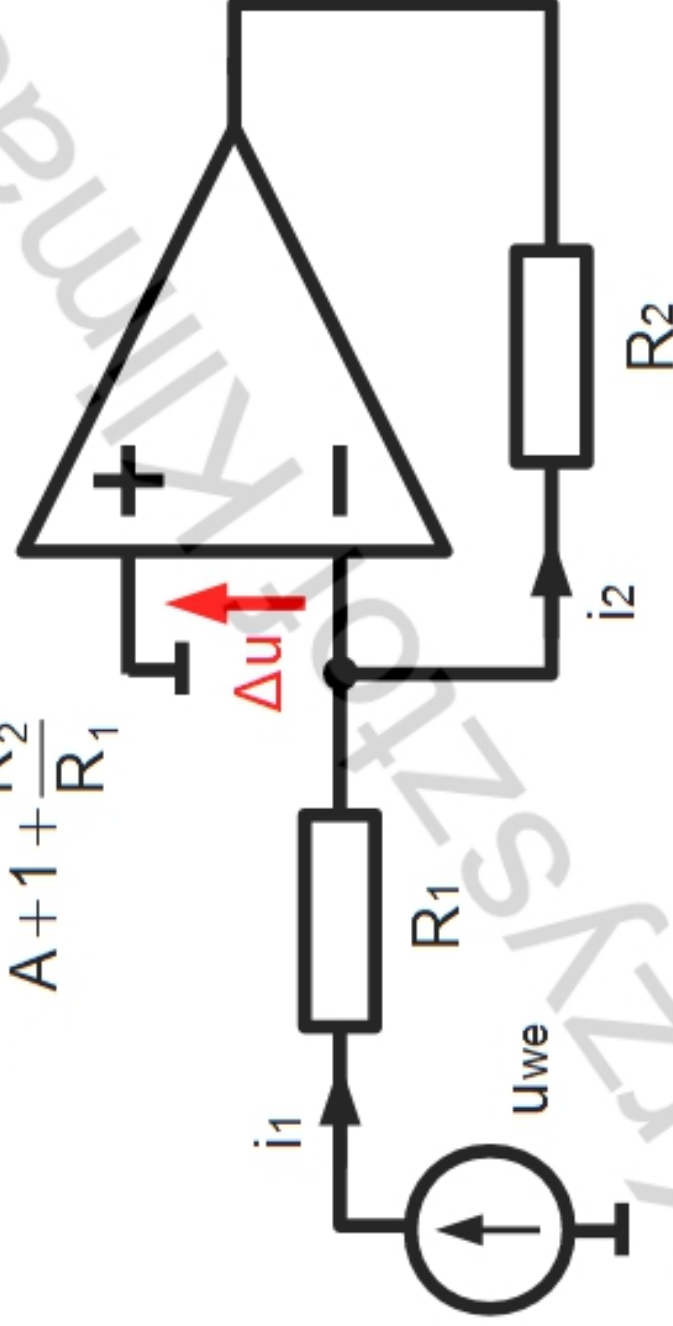
# Wzmacniacz operacyjny jako... wzmacniacz

zakładamy  $I_b = 0$   
wtedy  $i_1 = i_2$



# Wzmacniacz operacyjny jako...! wzmacniacz

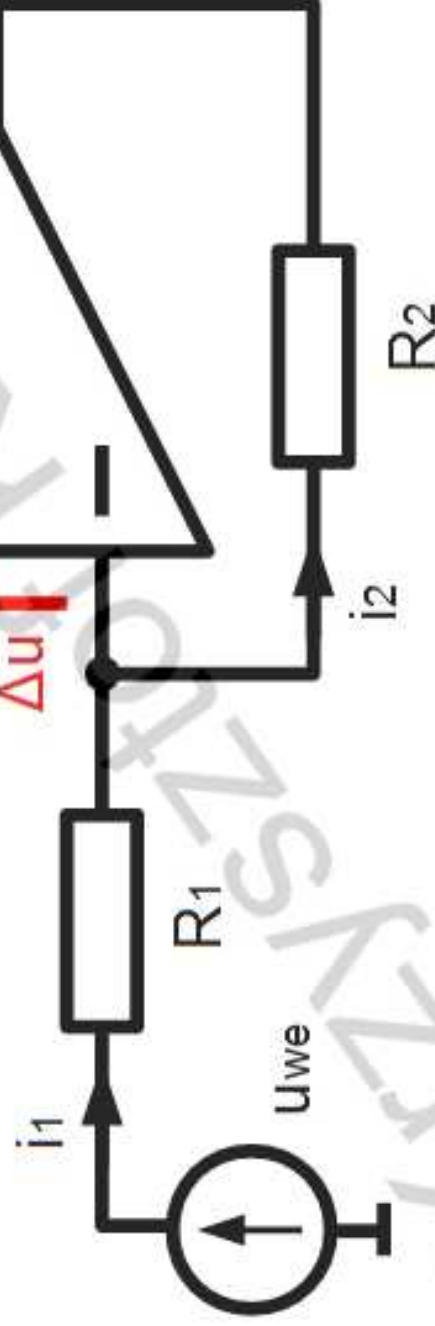
$$\Delta u = - u_{we} \frac{\frac{R_2}{R_1}}{A+1 + \frac{R_2}{R_1}}$$



# Wzmacniacz operacyjny jako... wzmacniacz

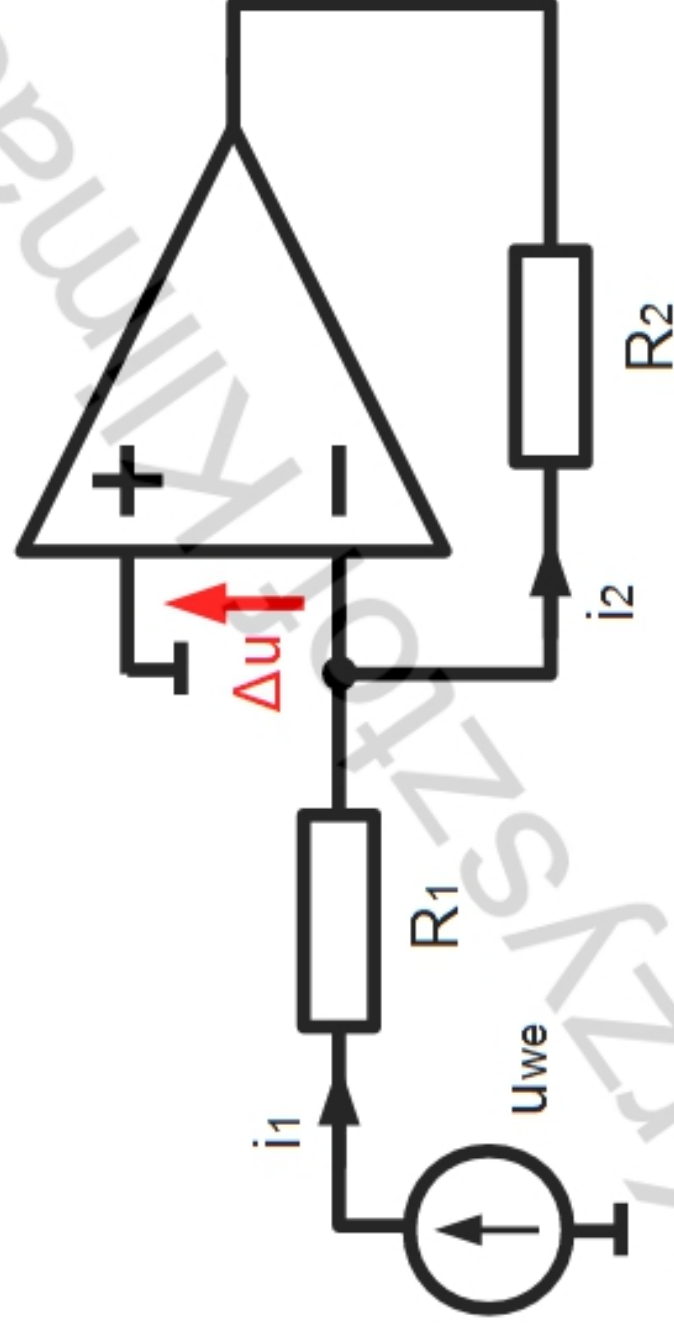
$$\Delta u = -u_{we} \frac{\frac{R_2}{R_1}}{A+1+\frac{R_2}{R_1}}$$

dla  $A = \infty$   
 $\Delta u = 0$



# Wzmacniacz operacyjny jako... wzmacniacz

$$U_{wy} = - U_{we} \frac{\frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_2}{R_1}}$$
$$1 + \frac{R_2}{R_1}$$

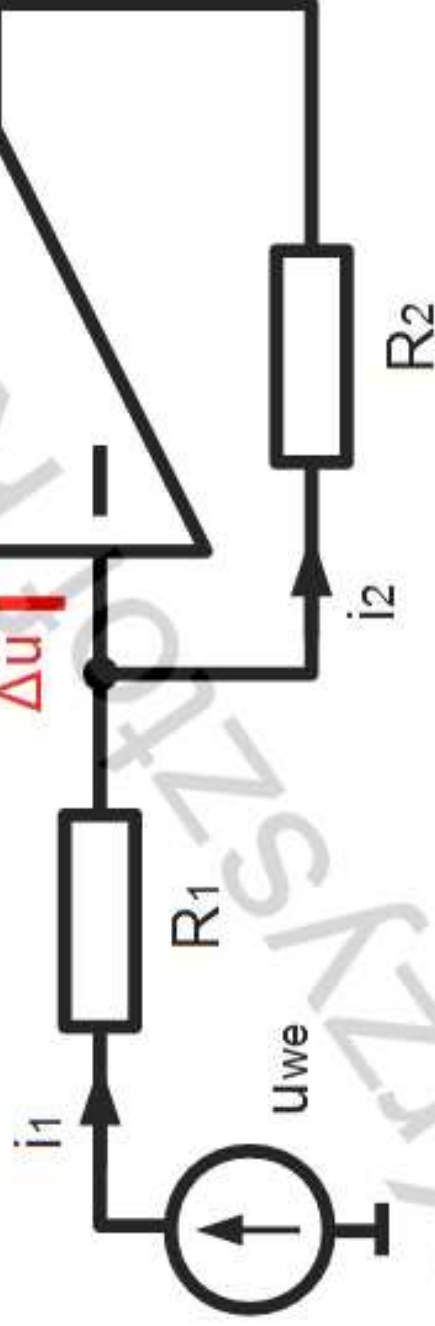


# Wzmacniacz operacyjny jako.... wzmacniacz

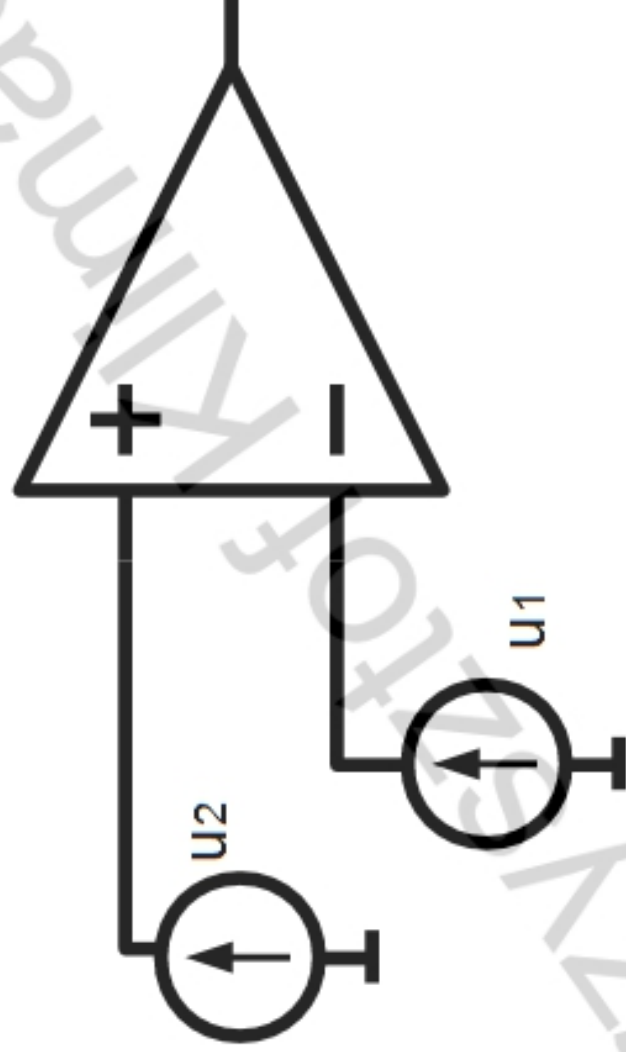
dla  $A = \infty$

$$U_{wy} = - U_{we} \frac{R_2}{R_1}$$

$$U_{wy} = - U_{we} \frac{\frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_2}{R_1}}$$
$$1 + \frac{R_2}{R_1}$$



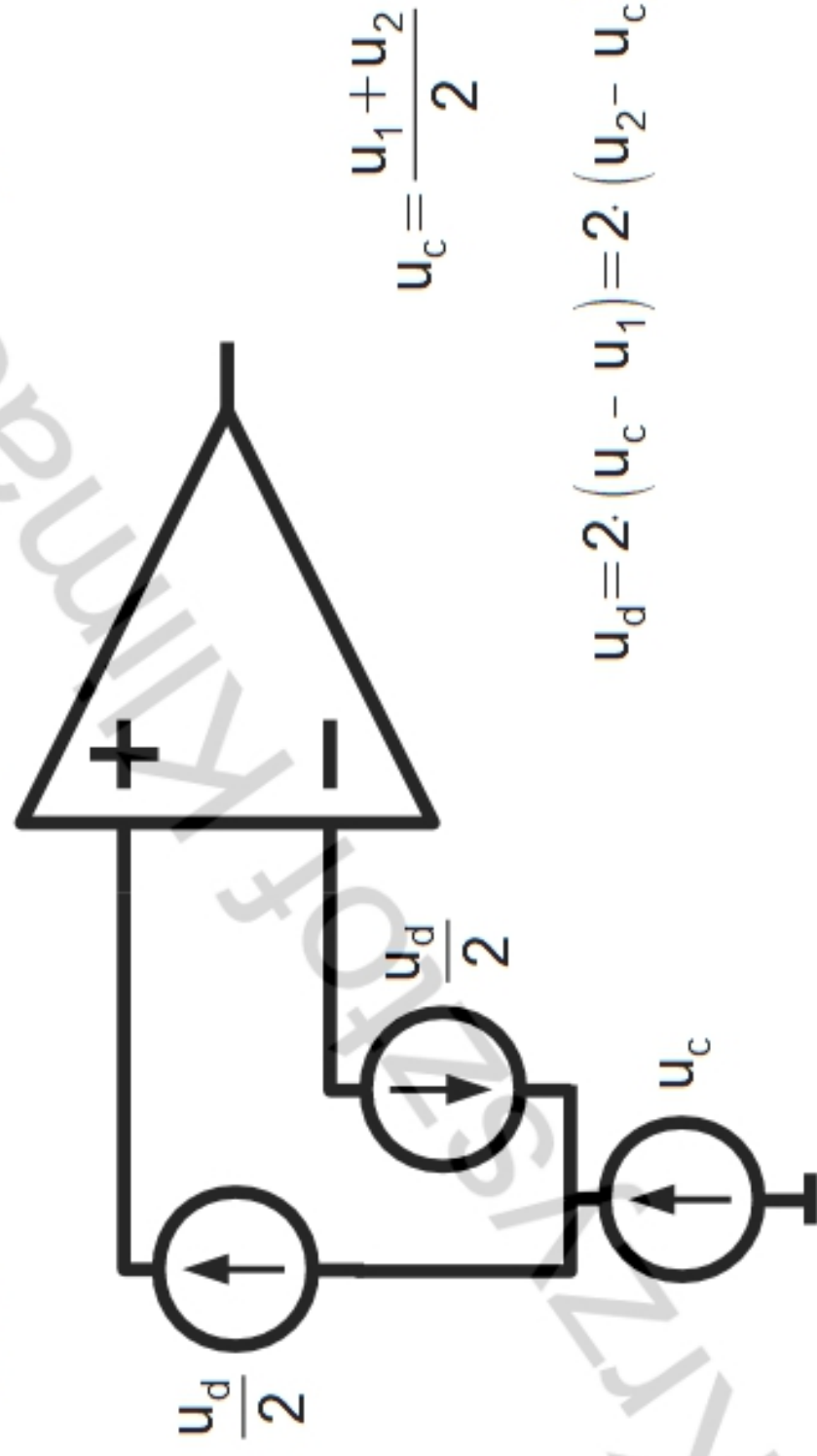
# Napięcia wejściowe





# Napięcia wejściowe

- napięcie sumacyjne (common mode)
- napięcie różnicowe (differential mode)



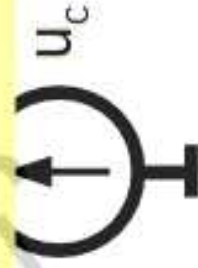
# Wzmocnienie

- wzmacnienie sumacyjne (common mode)
- wzmacnienie różnicowe (differential mode)

CMRR – współczynnik tłumienia  
sygnału wspólnego  
(common-mode rejection ratio)

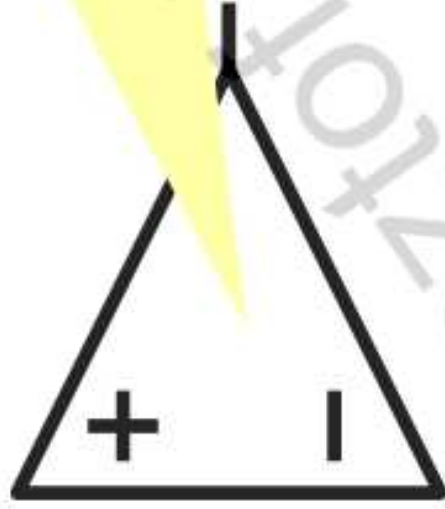
$$\text{CMRR} = 20 \log_{10} \frac{k_d}{k_c}$$

$$u_{\text{wy}} = u_c k_c + u_d k_d$$



# Tłumienie zmian napięcia zasilania

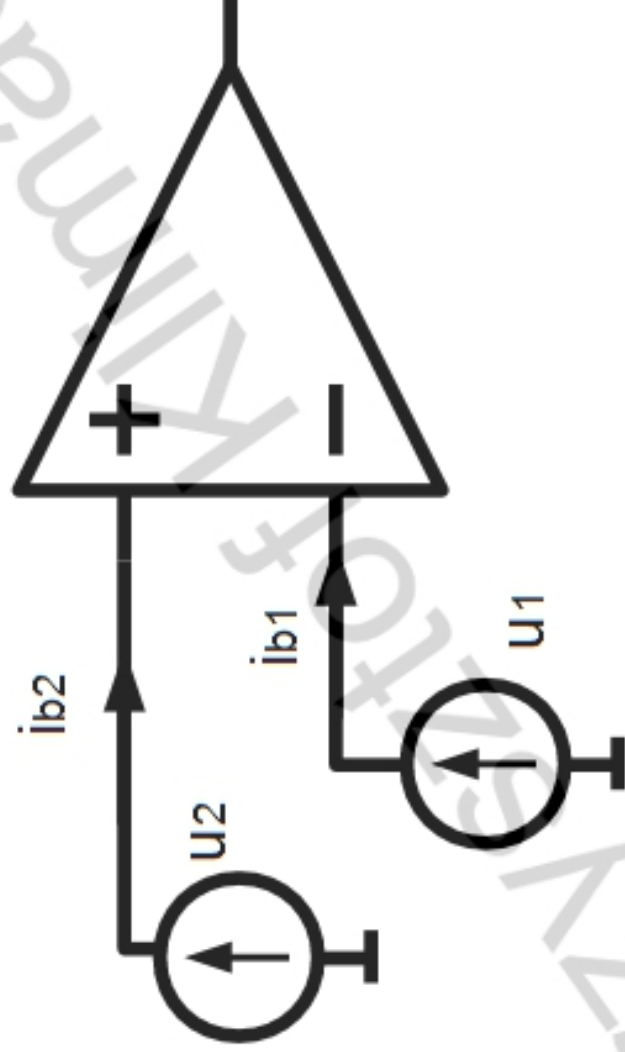
- Napięcie wyjściowe zmienia się przy zmianie napięcia zasilania



PSRR – współczynnik tłumienia zmian napięcia zasilania (power supply rejection ratio)

$$\text{PSRR} = 20 \log_{10} \frac{\Delta V_{\text{zasilania}}}{\Delta V_{\text{wyj}}}$$

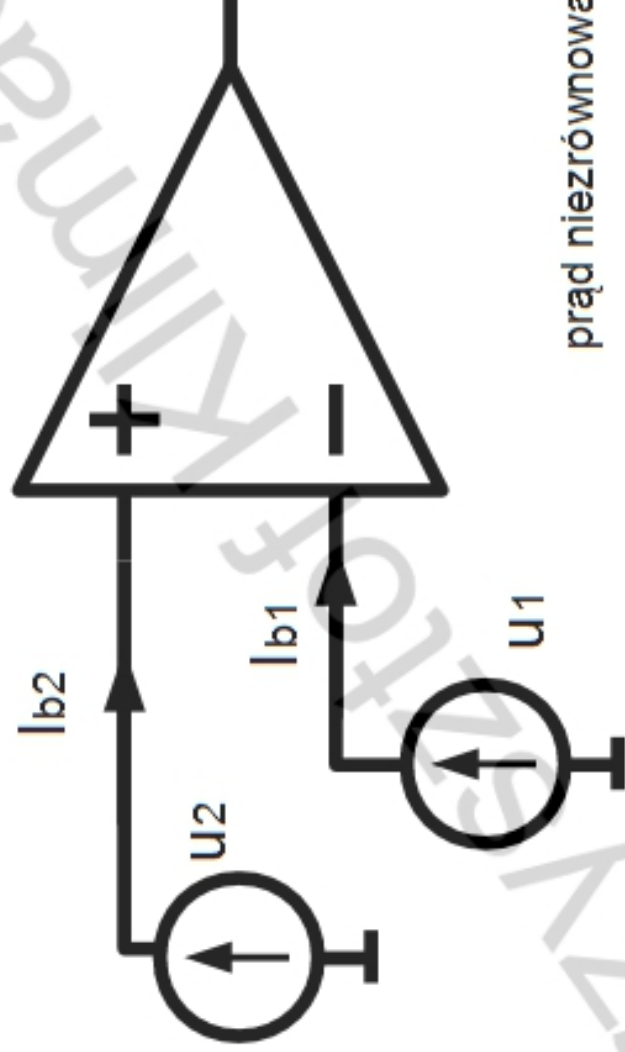
# Impedancja wejściowa



# Impedancja wejściowa

$$I_b = \frac{I_{b1} + I_{b2}}{2}$$

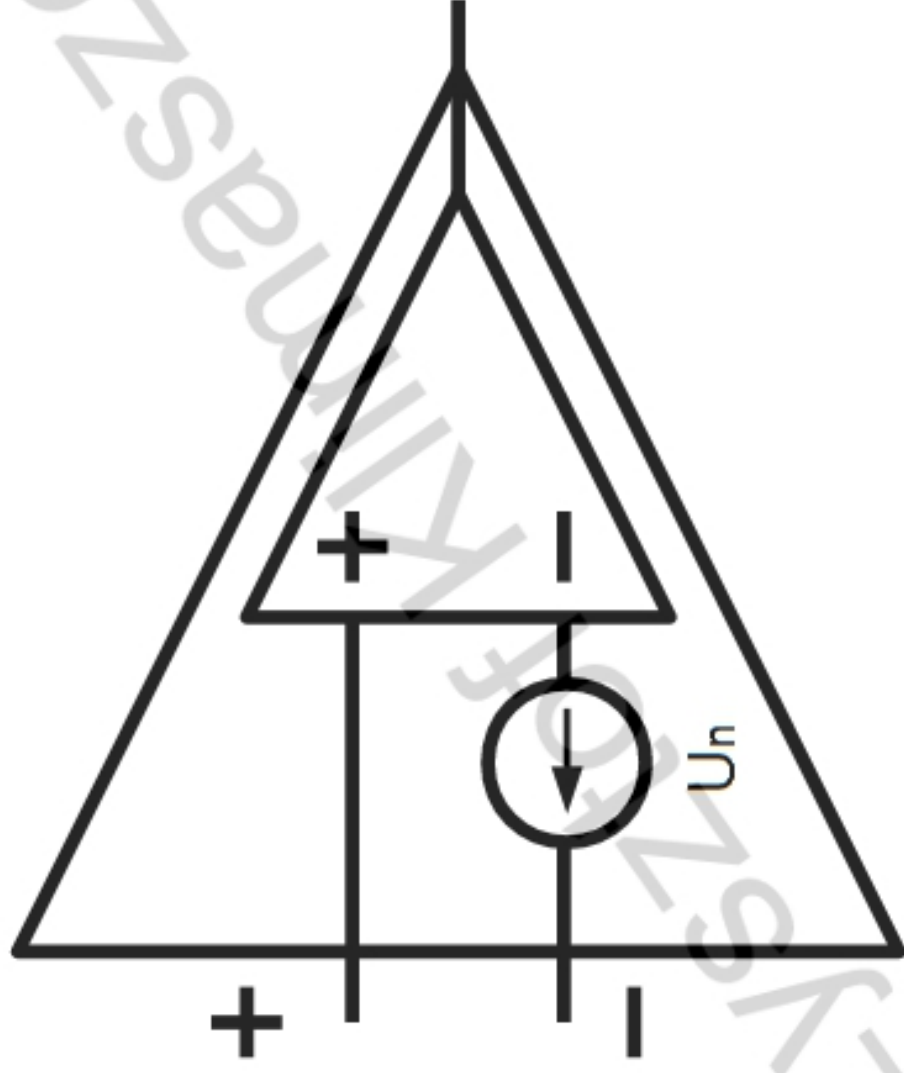
prąd polaryzacji wejść



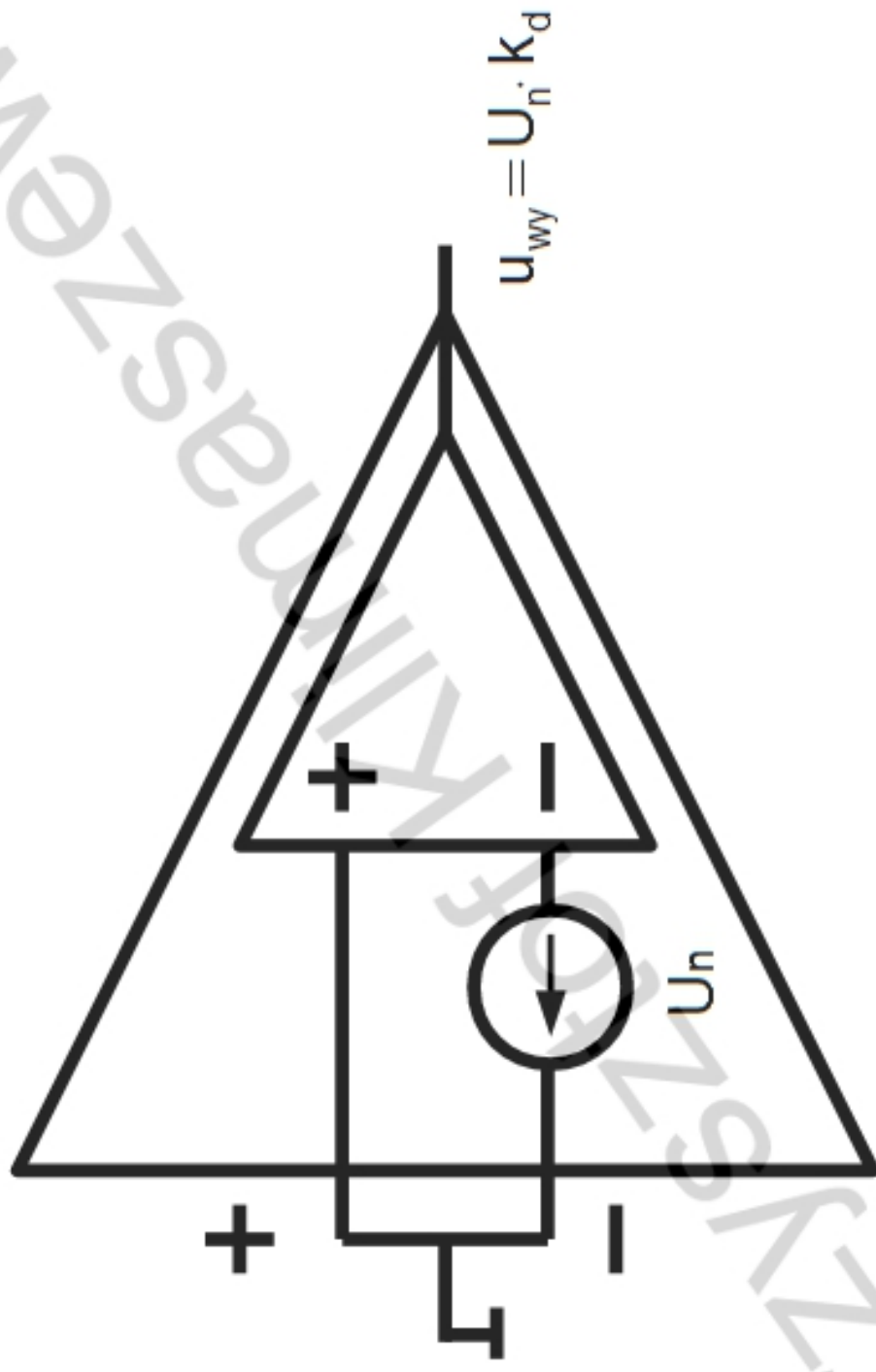
prąd niezrównoważenia

$$I_n = |I_{b1} - I_{b2}|$$

# Napięcie niezrównoważenia



# Napięcie niezrównoważenia



# Przykładowe wartości

	$U_n$ [V]	CMRR [dB]	SVRR [dB]	$i_b$ [A]	$i_n$ [A]	$\Delta U_n$ [V/°C]	$\Delta i_n$ [A/°C]
LM358	2m	85	100	20n	2n	7u	10p
MAX4239	0,1u	140	140	1p	2p	10n	
MCP6031	150u	89	88	1p	1p	3u	~1p
MCP6021	500u	85	90	1p	1p	3,5u	~0,5p
LM741	1m	90	96	80n	20n	15u	0,5n
LM7171	0,2m	105	90	2,7u	0,1u	35u	



# Komparator

- Układ porównujący napięcia wejściowe podłączone do dwóch wejść



# Komparator

- Układ porównujący napięcia podłączone do dwóch wejść.

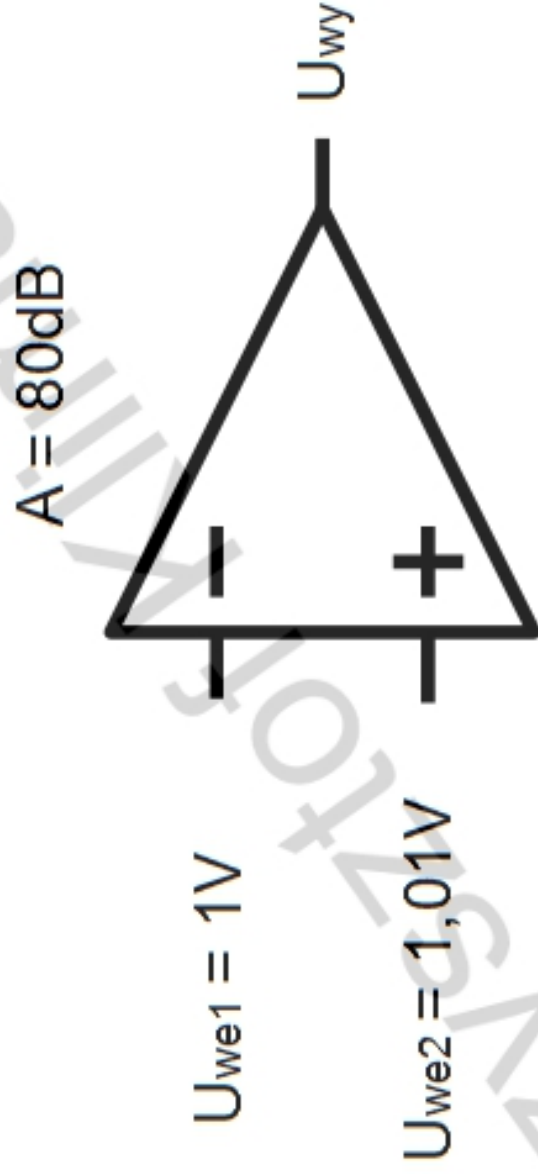
Wzmacniacz operacyjny wzmacnia różnicę napięć między wejściami.

Wzmocnienie to jest **bardzo duże**.



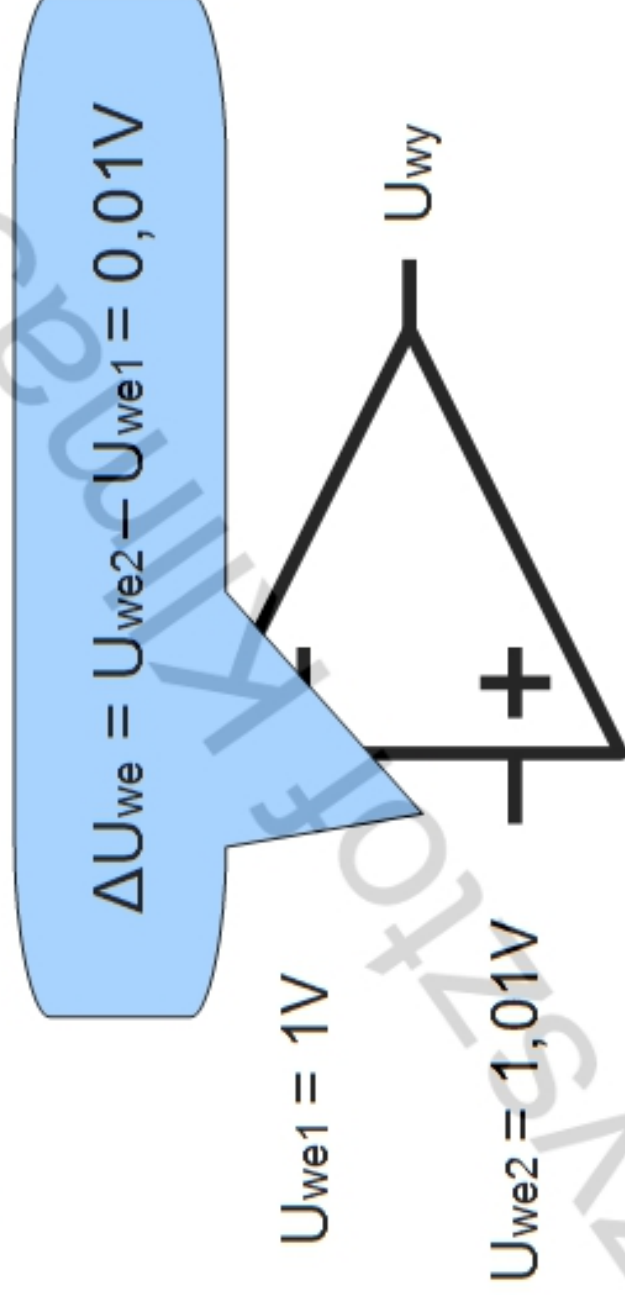
# Komparator

- Układ porównujący napięcia wejściowe podłączone do dwóch wejść



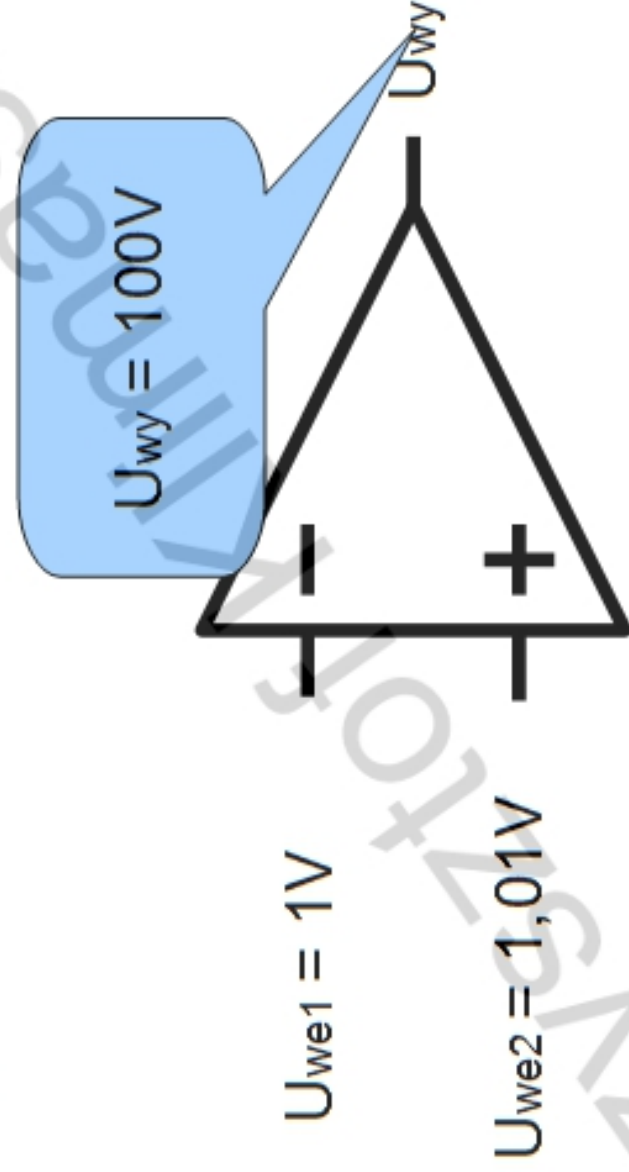
# Komparator

- Układ porównujący napięcia wejściowe podłączone do dwóch wejść



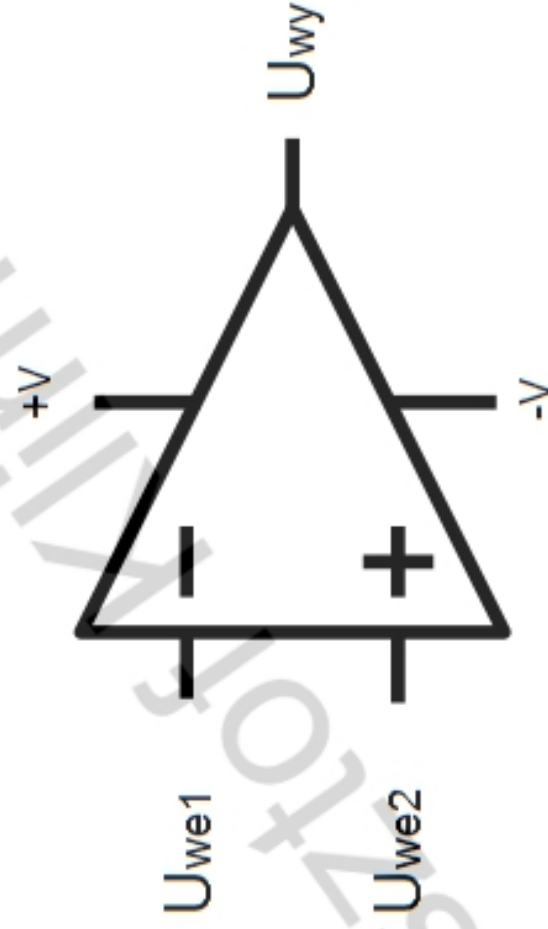
# Komparator

- Układ porównujący napięcia wejściowe podłączone do dwóch wejść



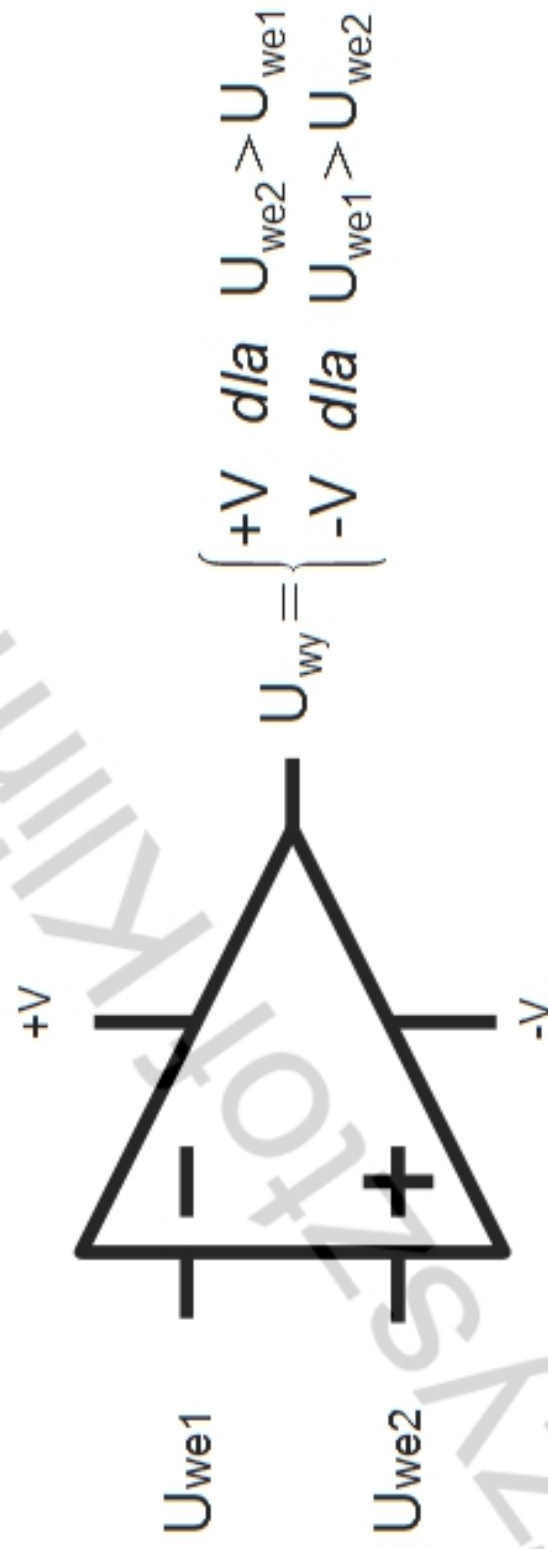
# Komparator

- Układ porównujący napięcia wejściowe podłączone do dwóch wejść



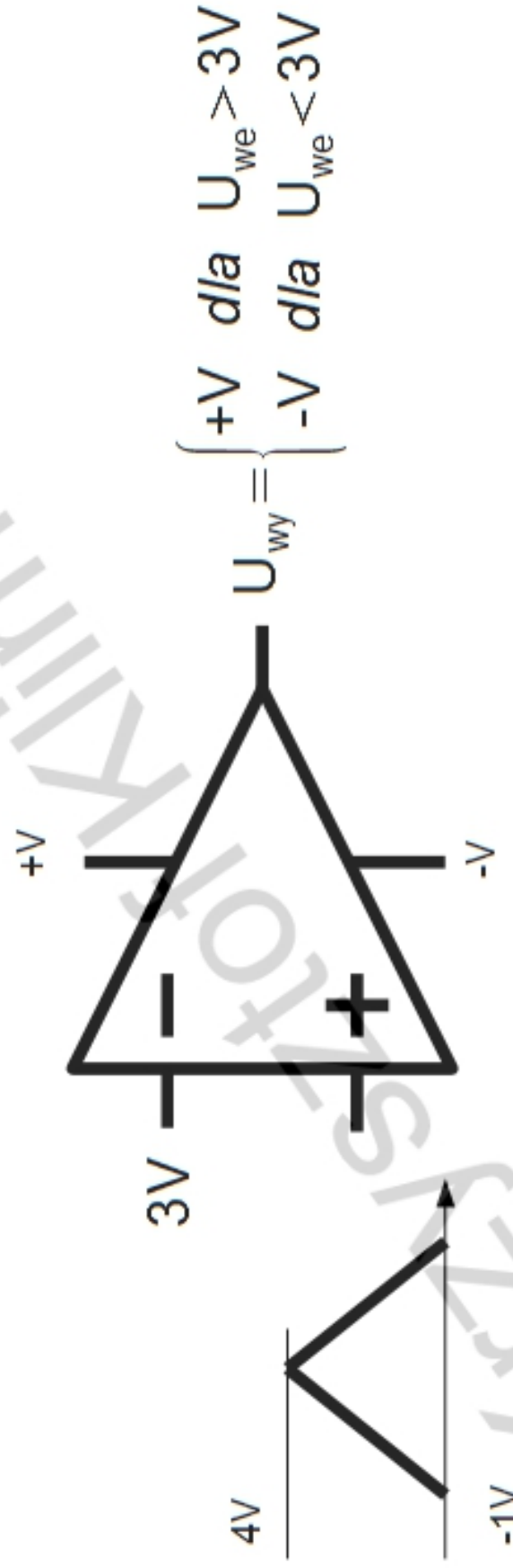
# Komparator

- Układ porównujący napięcia wejściowe podłączone do dwóch wejść



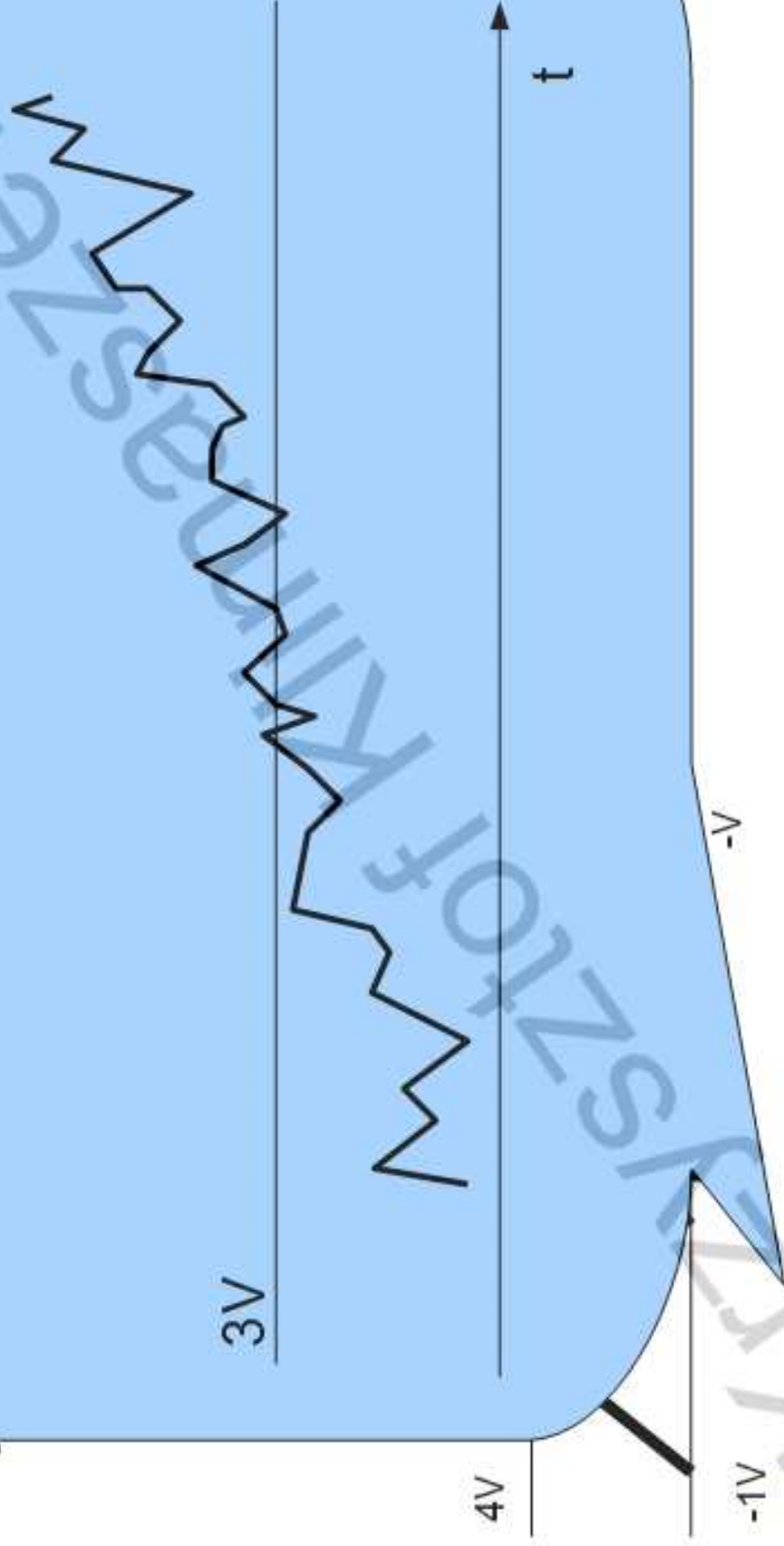
# Komparator

- Porównywanie napięcia wejściowego zadaną wartością odniesienia

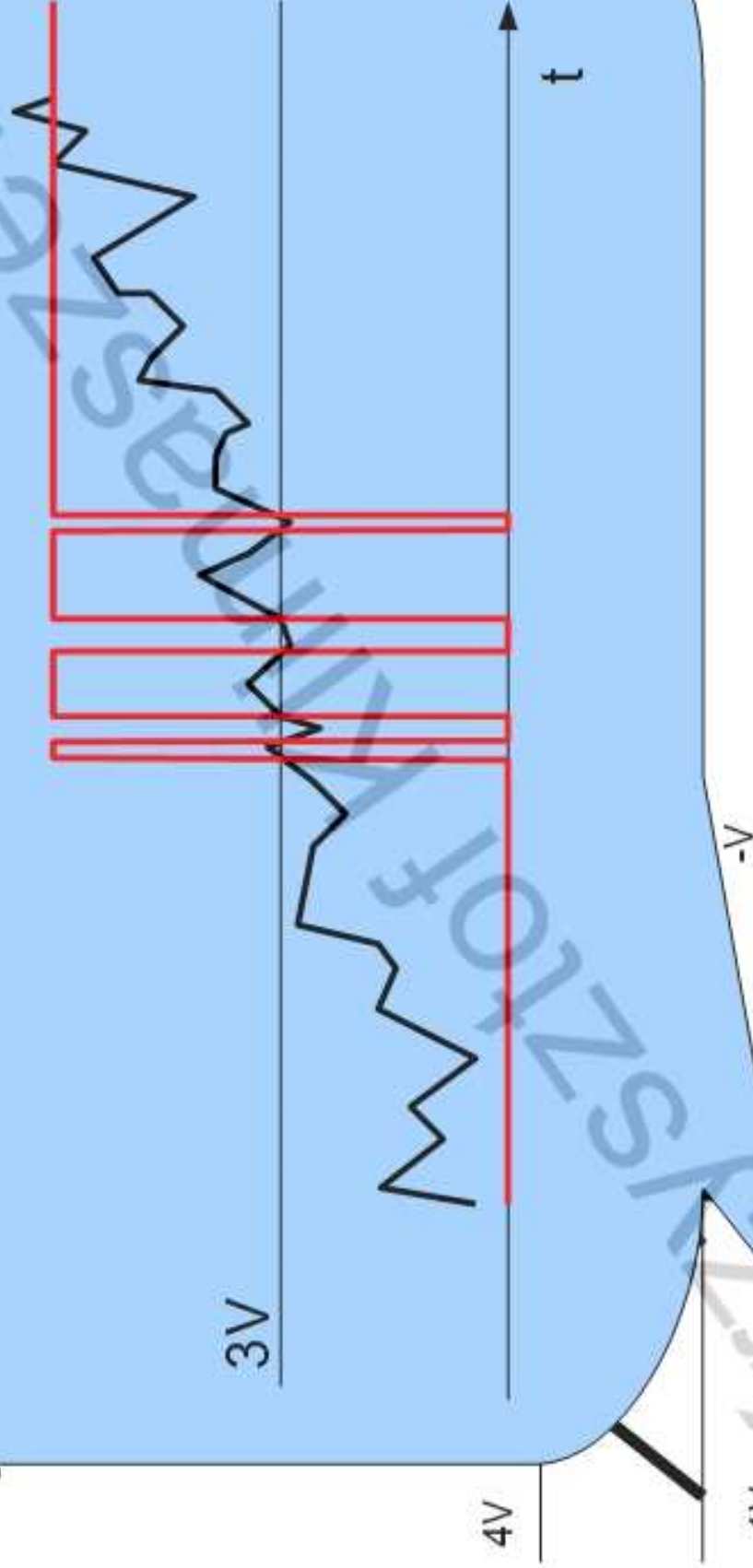




Szумы powodują, że zamiast szybkiego przełączenia napięcia na wyjściu komparatora pojawiają się wielokrotne przełączenia.

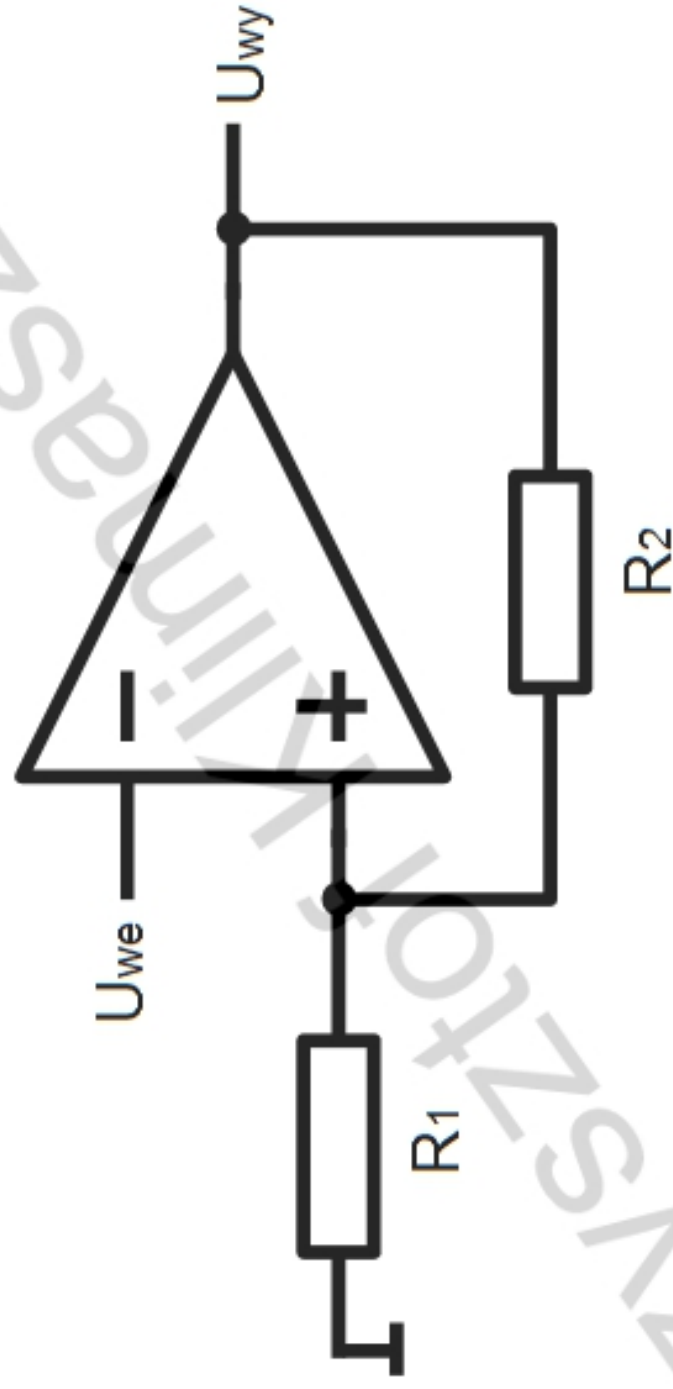


Szumy powodują, że zamiast szybkiego przełączenia napięcia na wyjściu komparatora pojawiają się wielokrotne przełączenia.

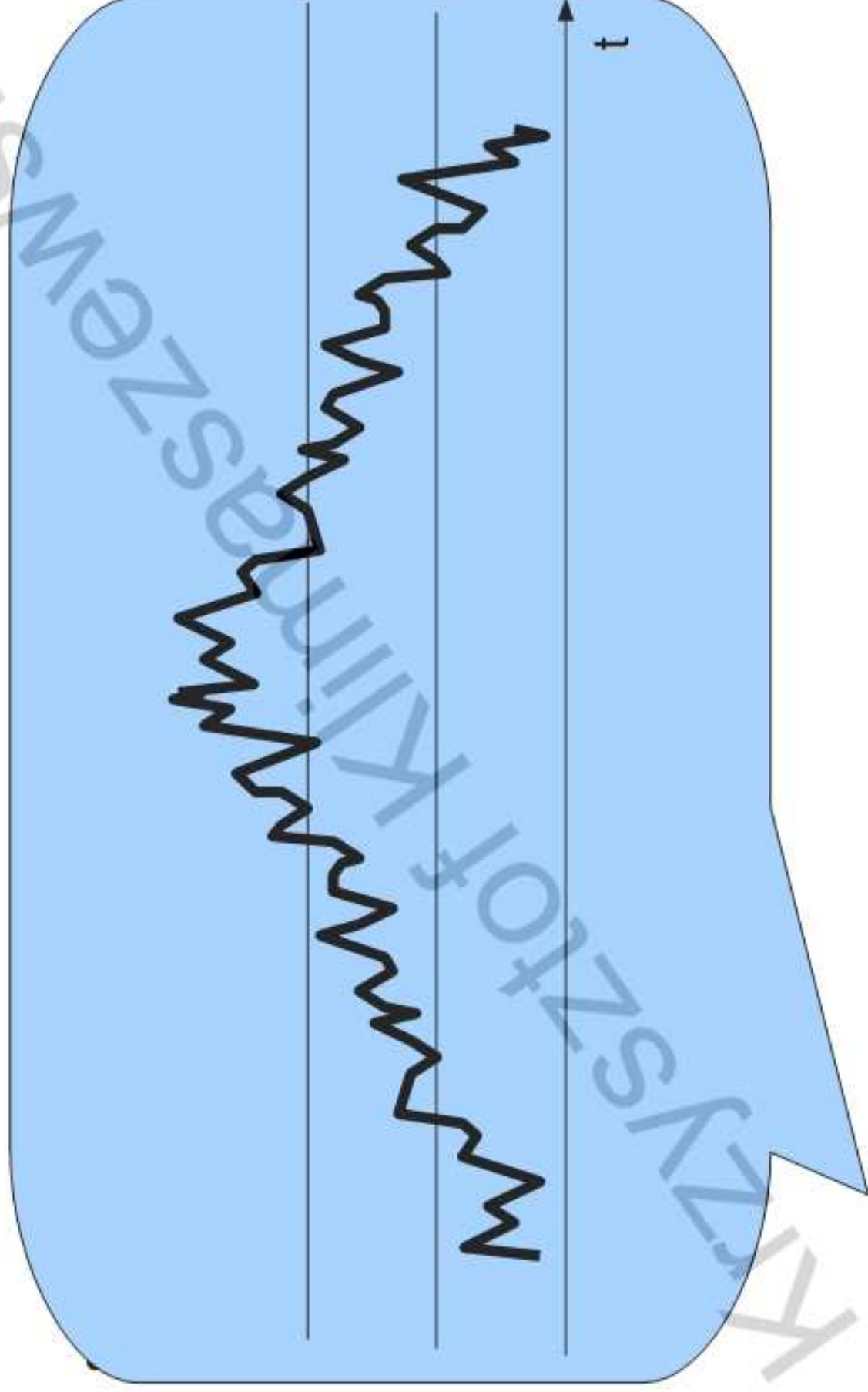


# Komparator z histerezą

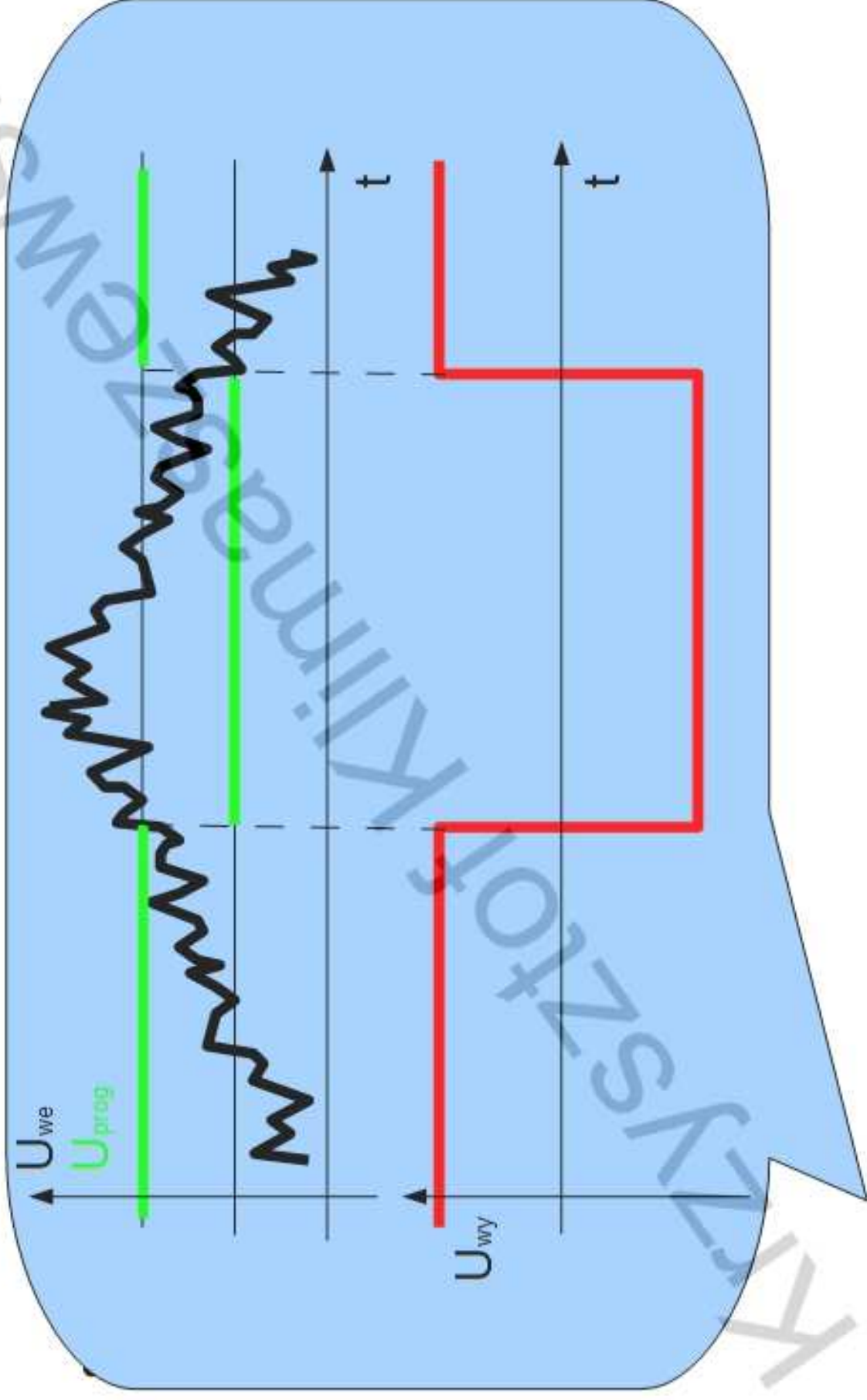
- Przerzutnik Schmitta odwracający fazę



# Komparator z histerezą

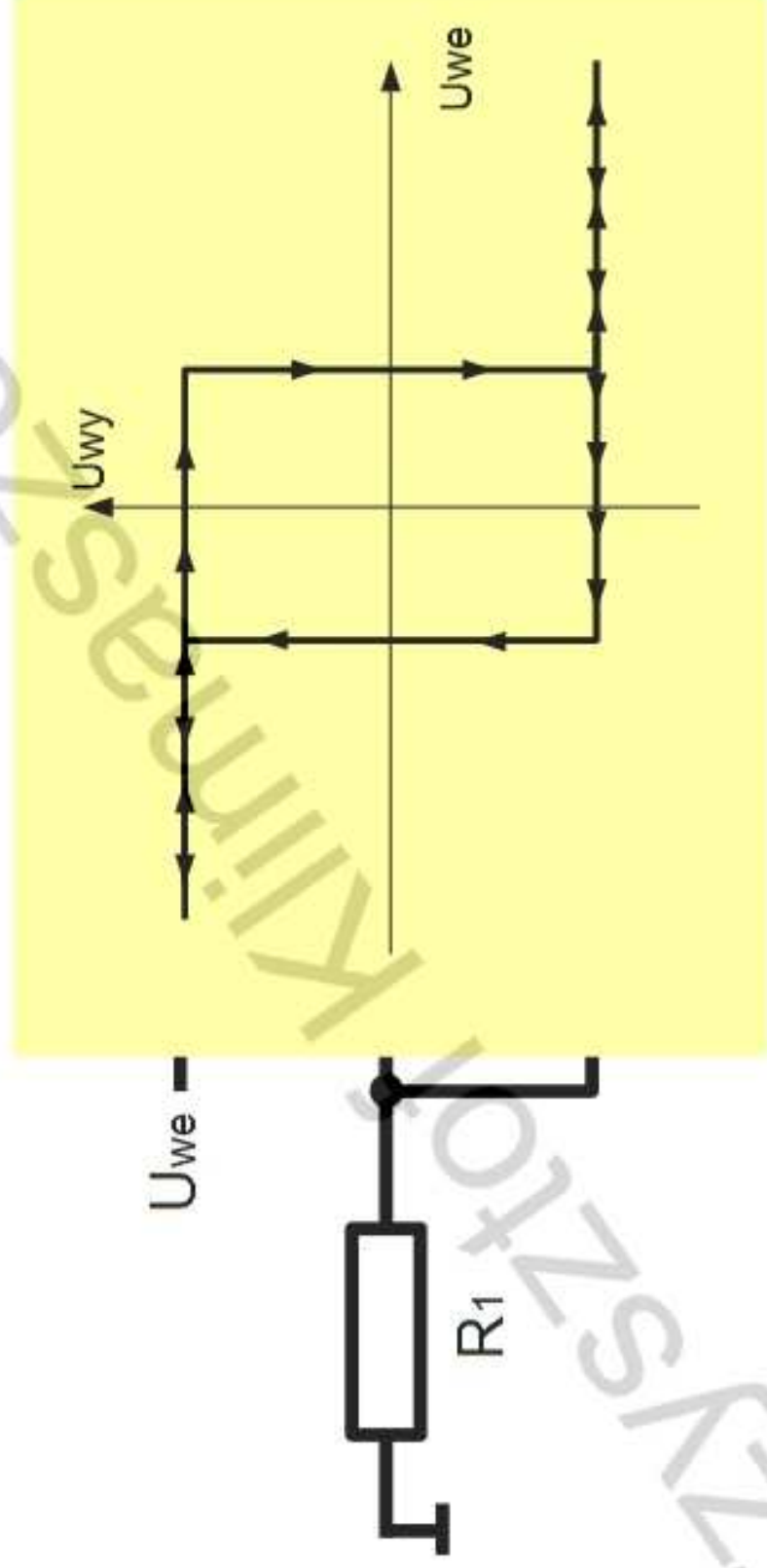


# Komparator z histerezą



# Komparator z histerezą

- Przerzutnik Schmitta odwracający fazę



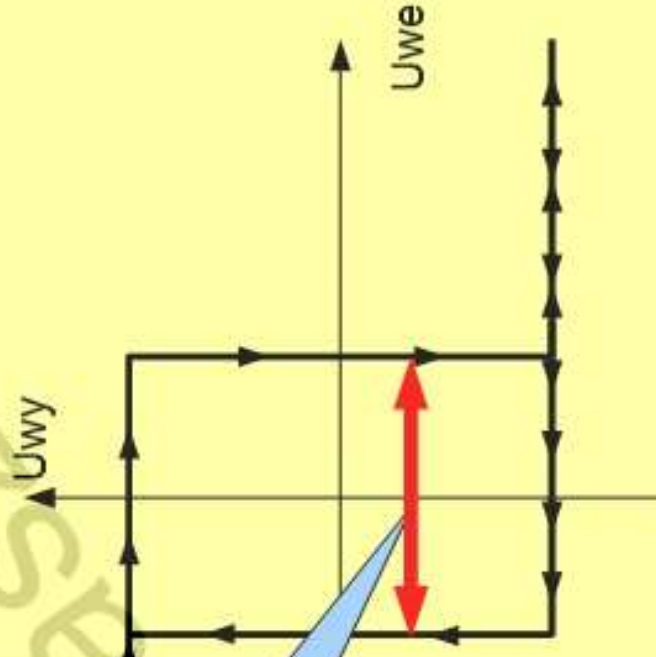
# Komparator z histerezą

- Przez

Szerokość pętli histerezy:

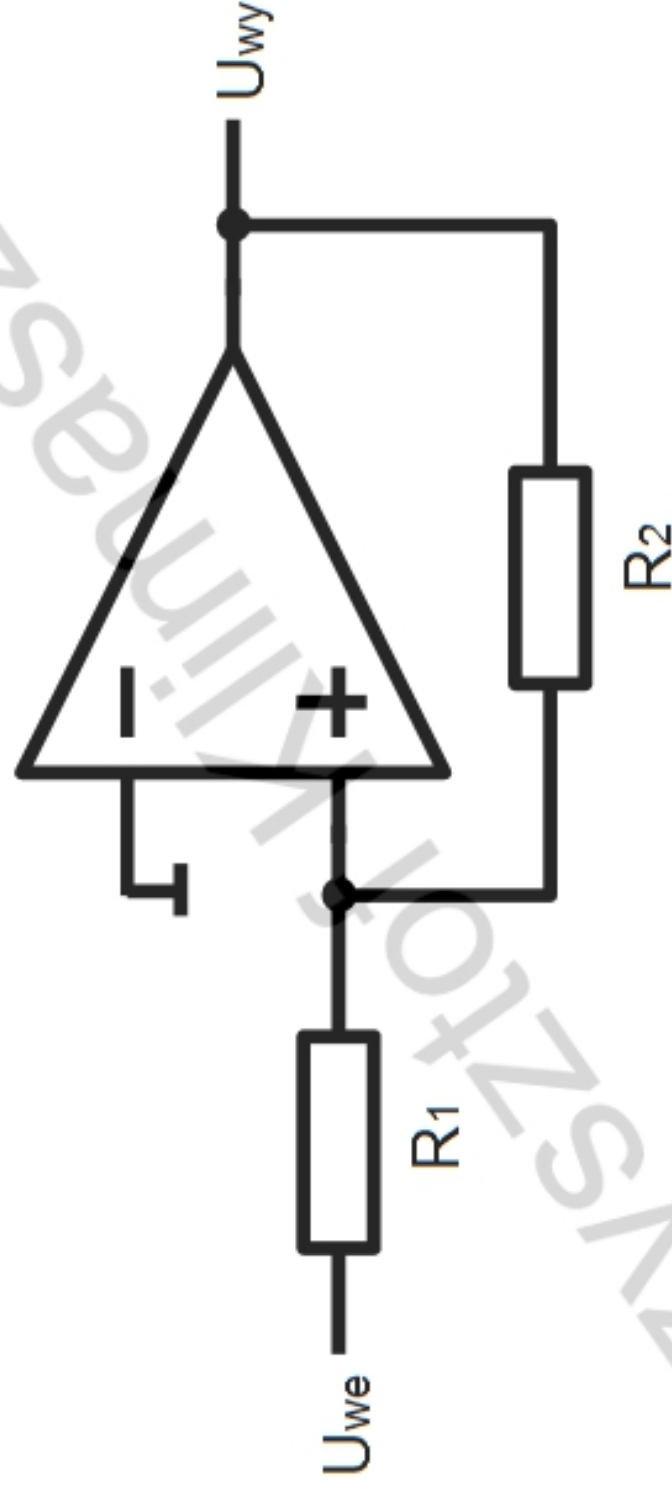
$$(V_{+} - V_{-}) \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

ający fazę



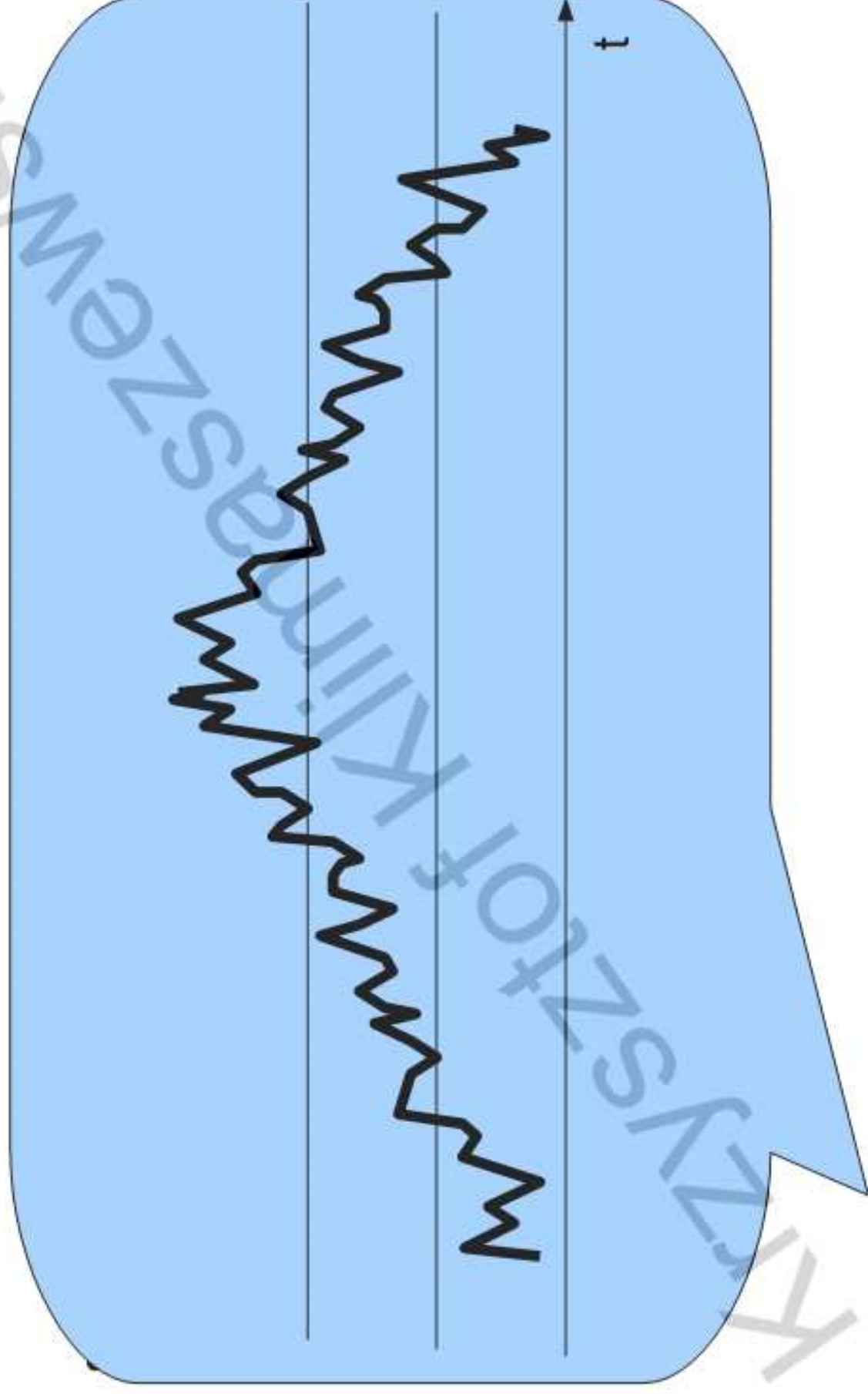
# Komparator z histerezą

- Przerzutnik Schmitta nieodwracający fazy

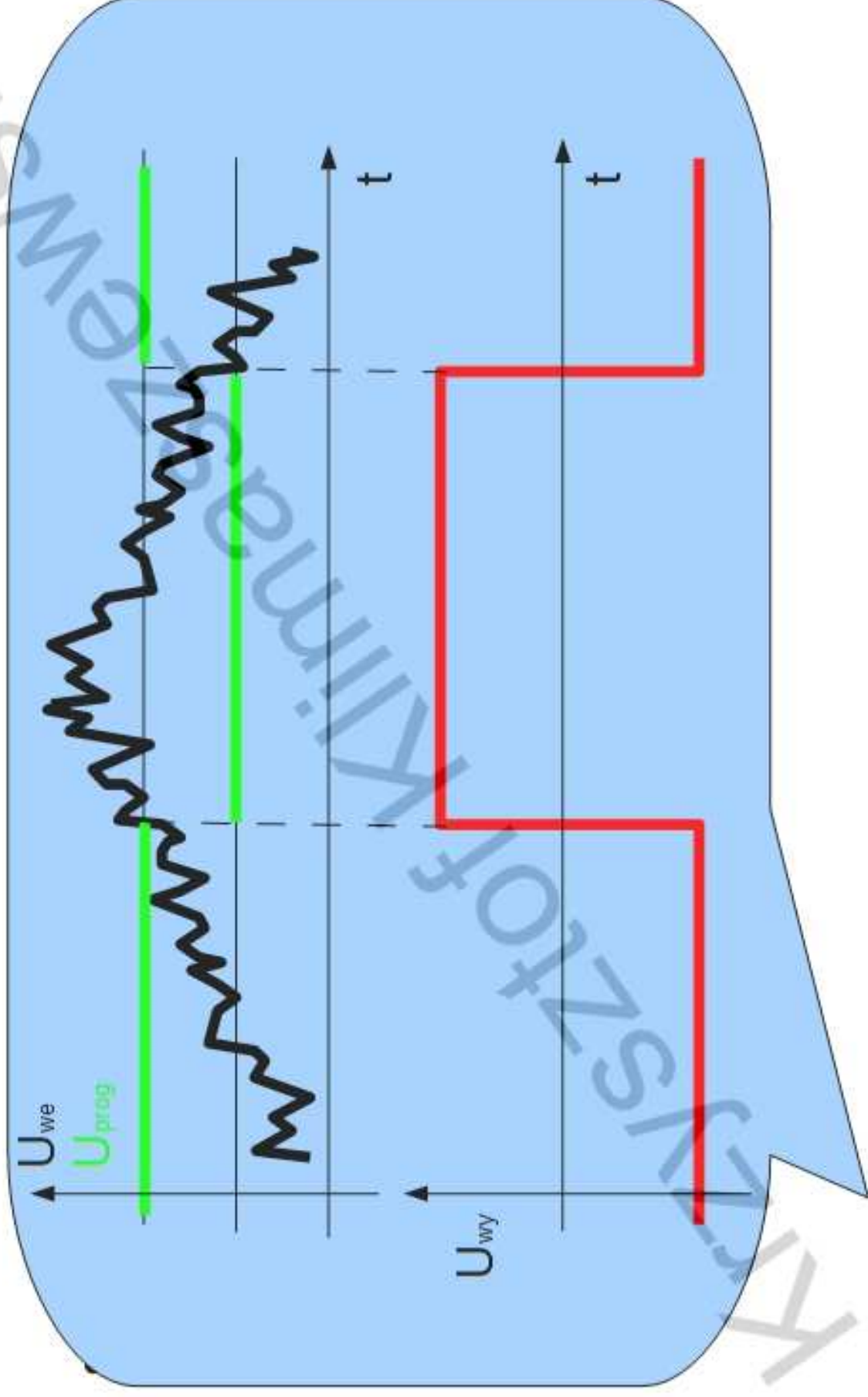




# Komparator z histerezą

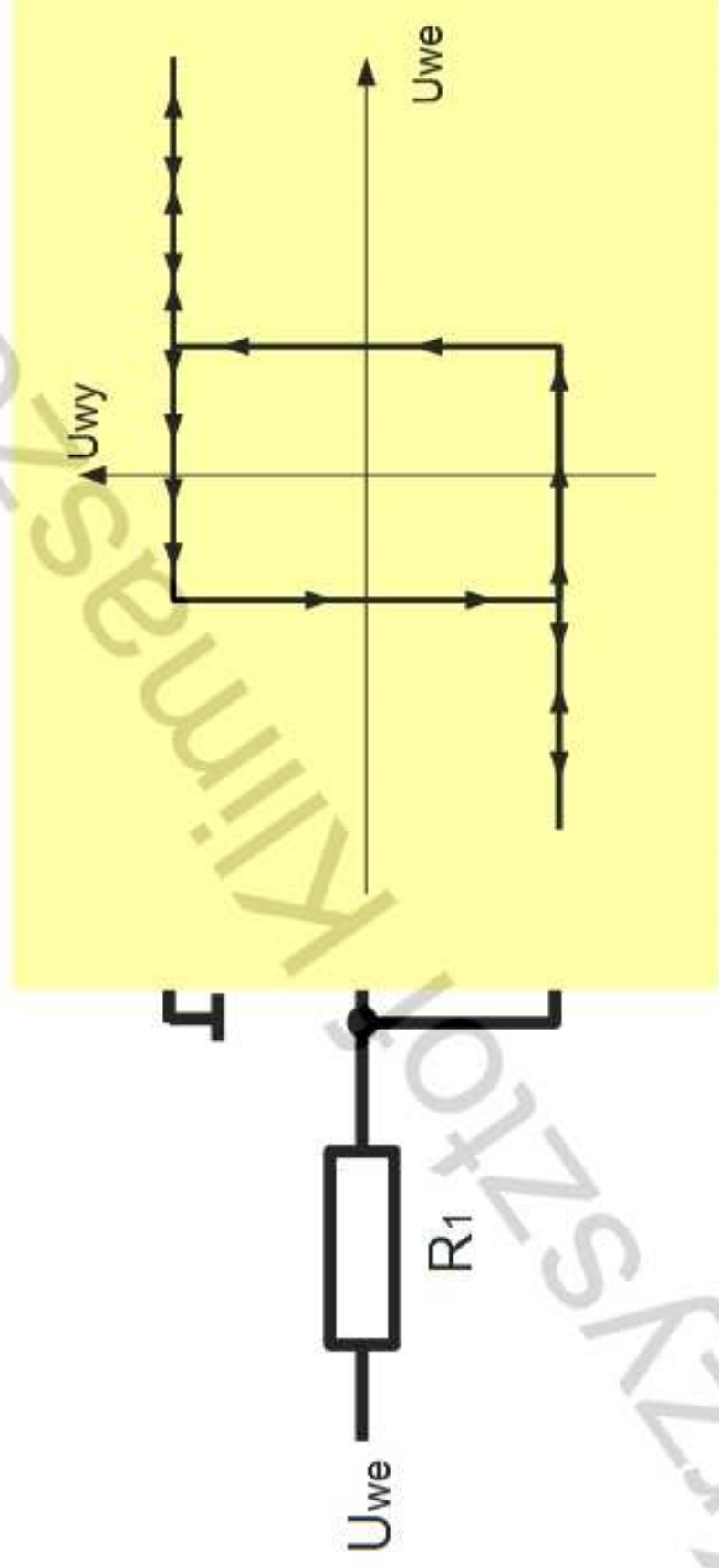


# Komparator z histerezą



# Komparator z histerezą

- Przerzutnik Schmitta nieodwracający fazy

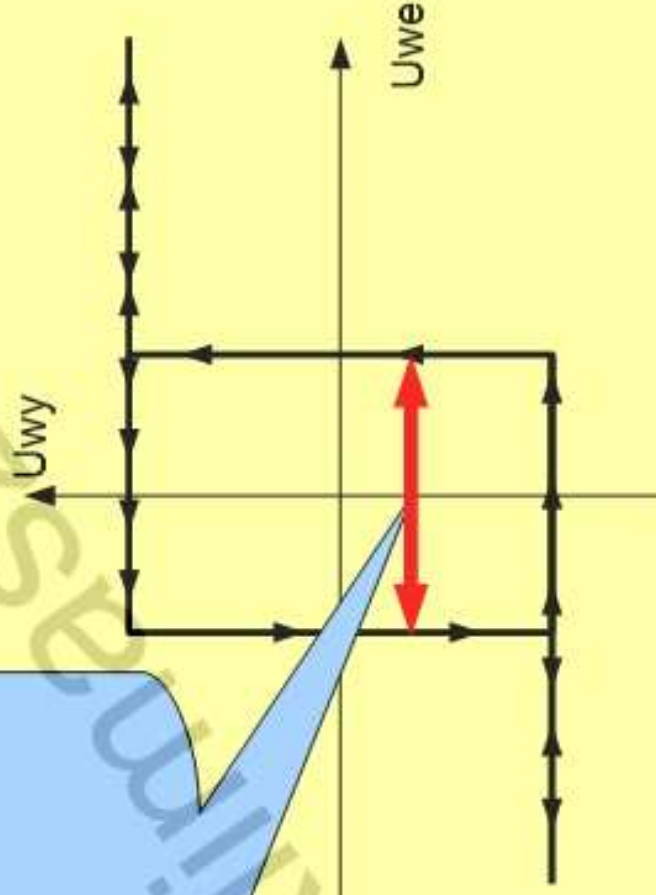


# Komparator z histerezą

- Przer...
- Pracujący fazy

Szerokość pętli histerezy:

$$(V_+ - V_-) \frac{R_1}{R_2}$$



# Komparator

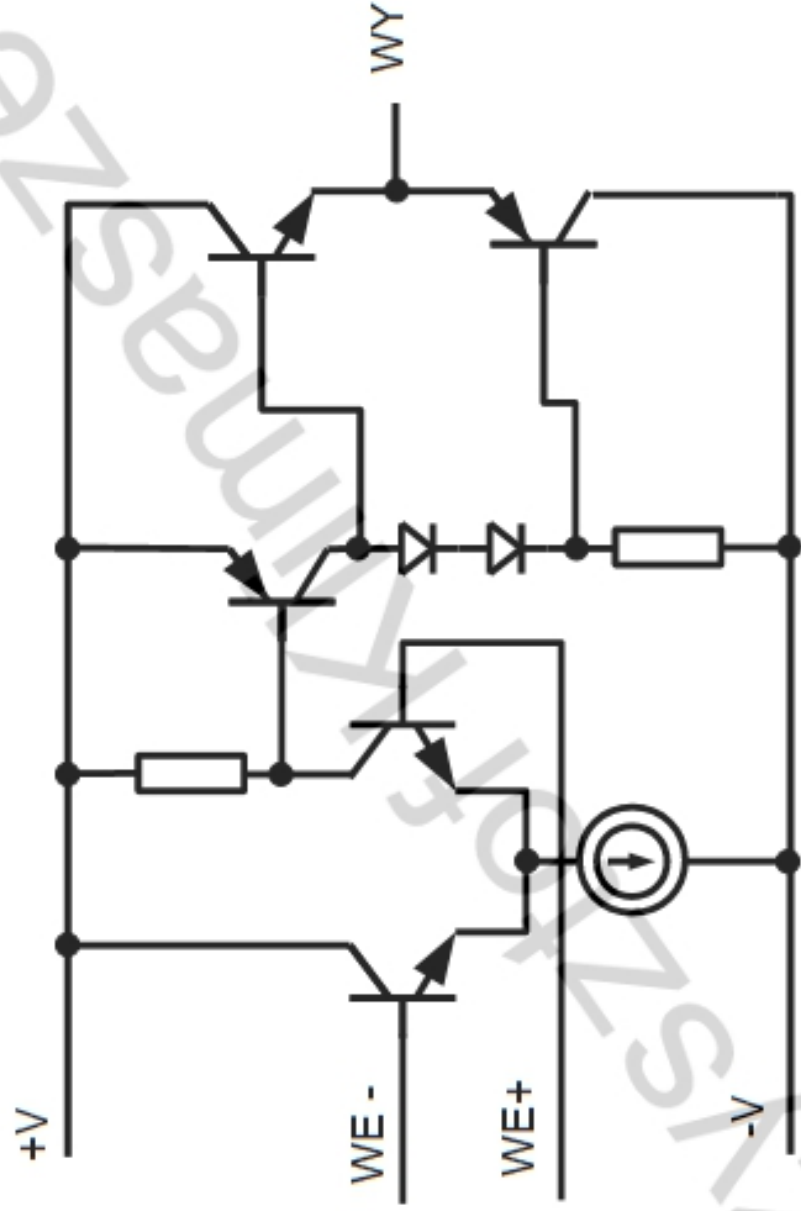
- UWAGA!
- Układ komparatora nie jest układem liniowym!
- Nie działa zasada superpozycji!

Jeśli znamy  $U_{wyA}$  dla  $U_{weA}$  oraz  $U_{wyB}$  dla  $U_{weB}$ , to wcale nie wiemy, co dostaniemy na wyjściu po podaniu  $U_{weC} = U_{weA} + U_{weB}$

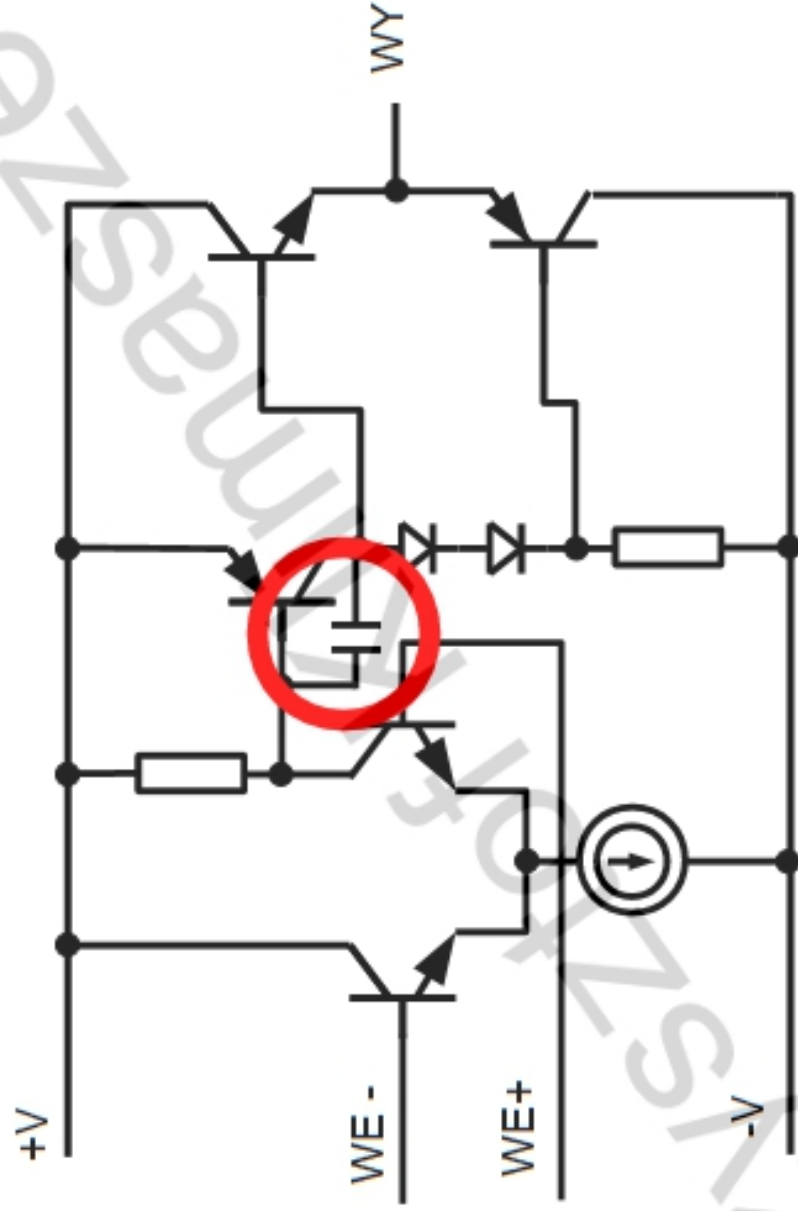
# Wzmacniacz operacyjny w środku

Jak zbudowany jest w środku wzmacniacz operacyjny?

# Prosty wzmacniacz operacyjny

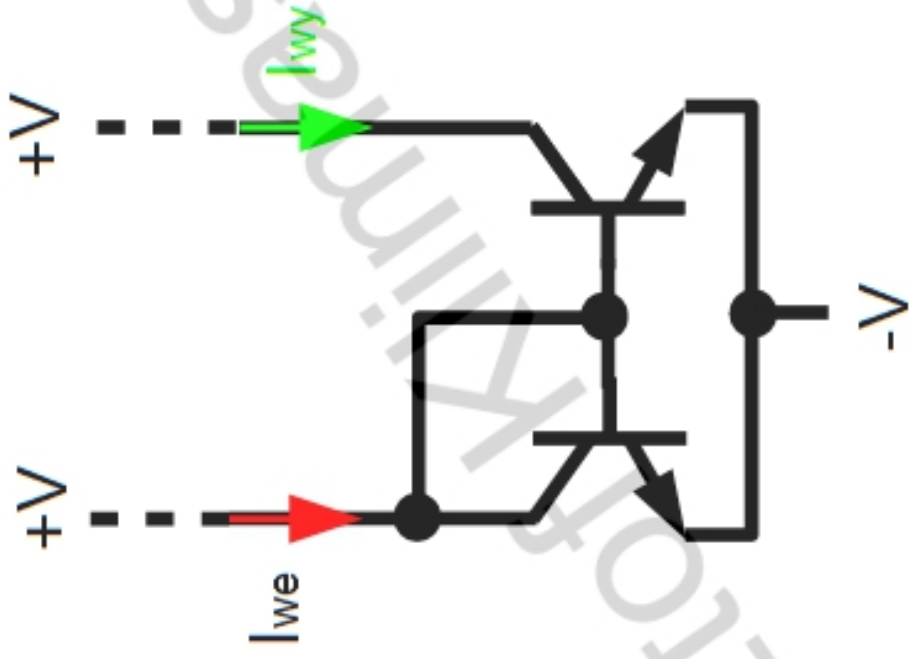


# Prosty wzmacniacz operacyjny

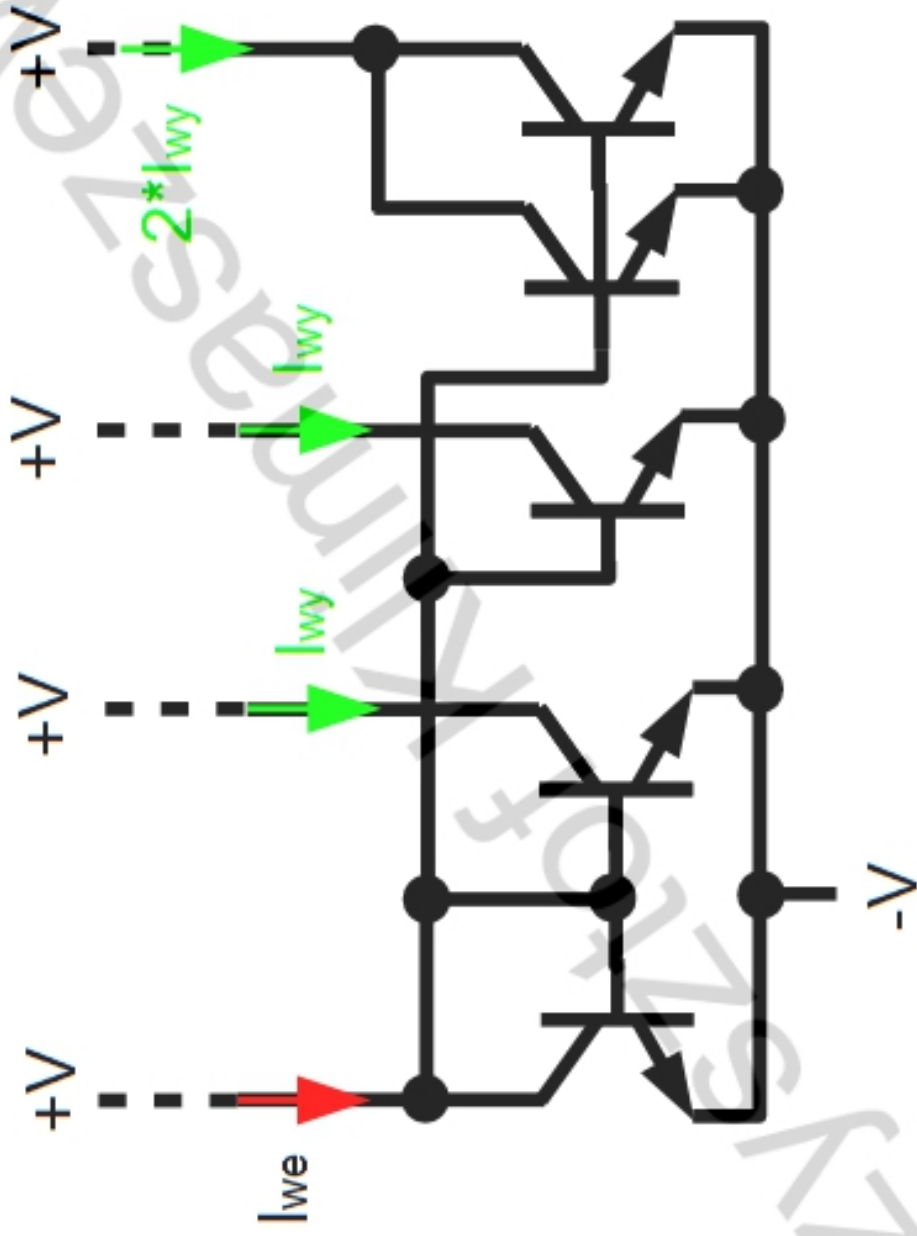




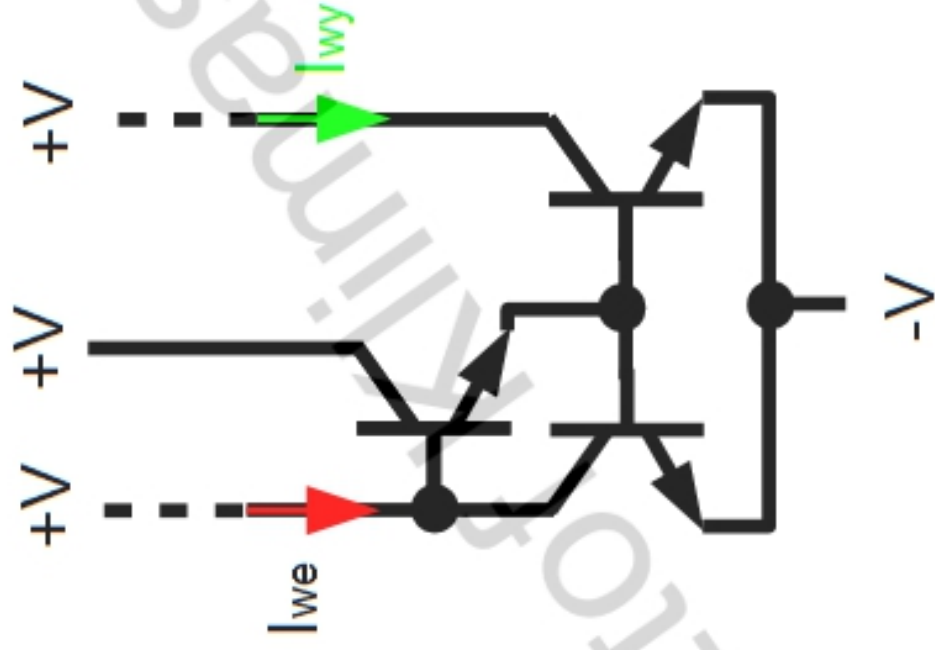
# Lustro prądowe



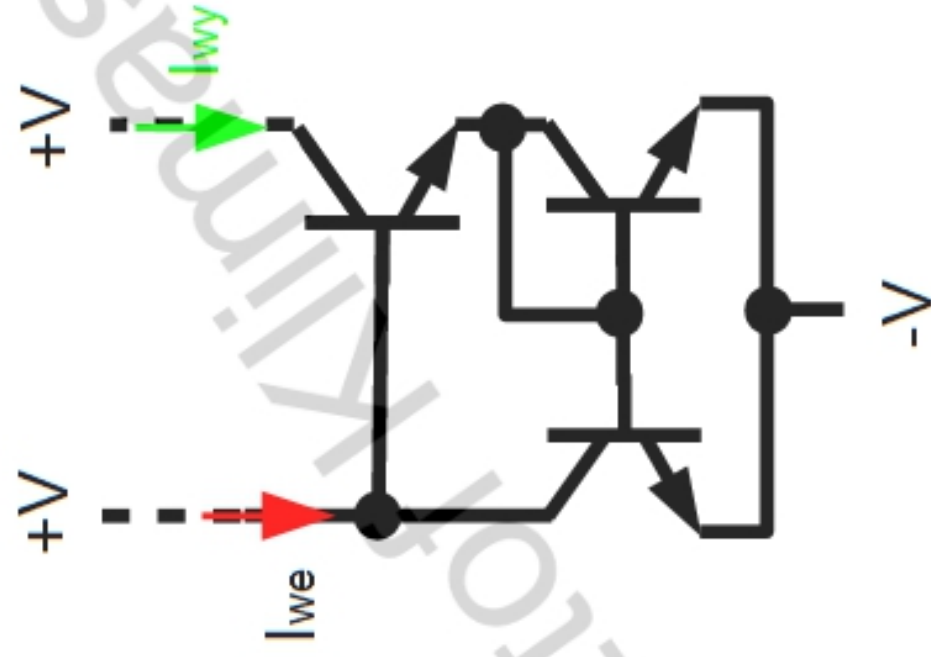
# Lustro prądowe



## Lustro prądowe 2



# Lustro prądowe 3



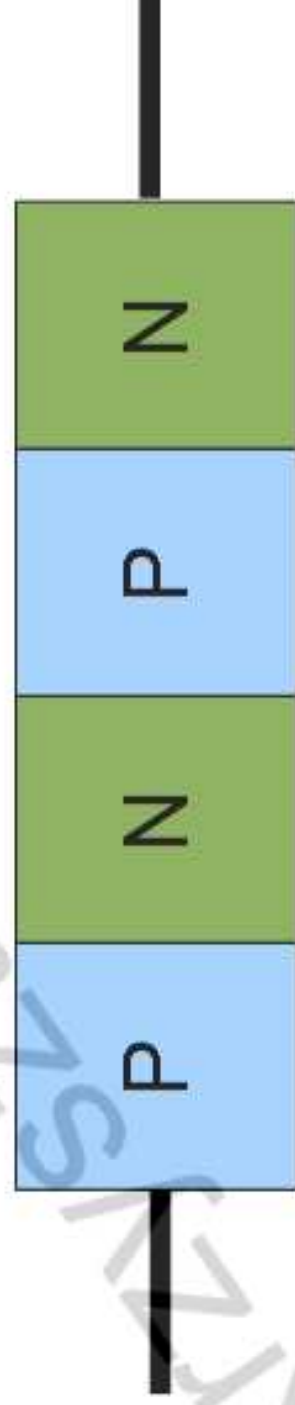
## Dioda czterowarstwowa

- Dioda czterowarstwowa (dynistor) ma 2 elektrody (2 nóżki)

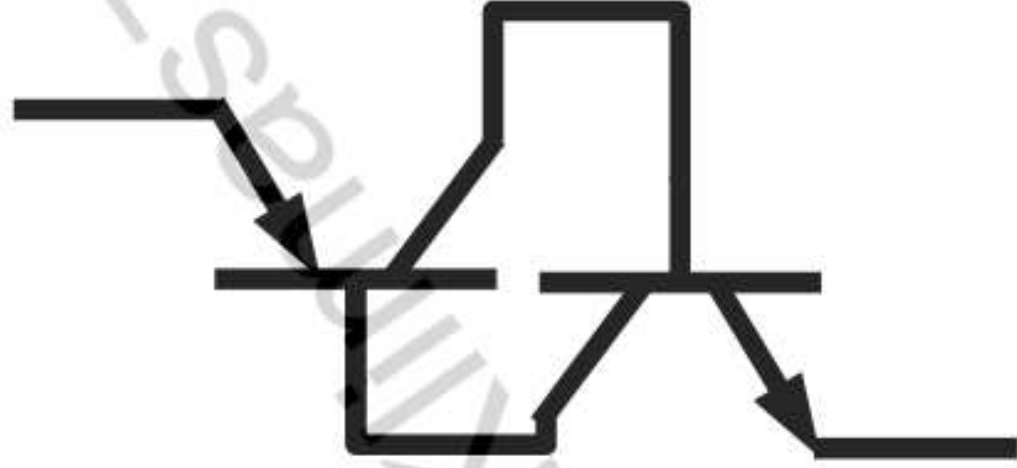


# Dioda czterowarstwowa

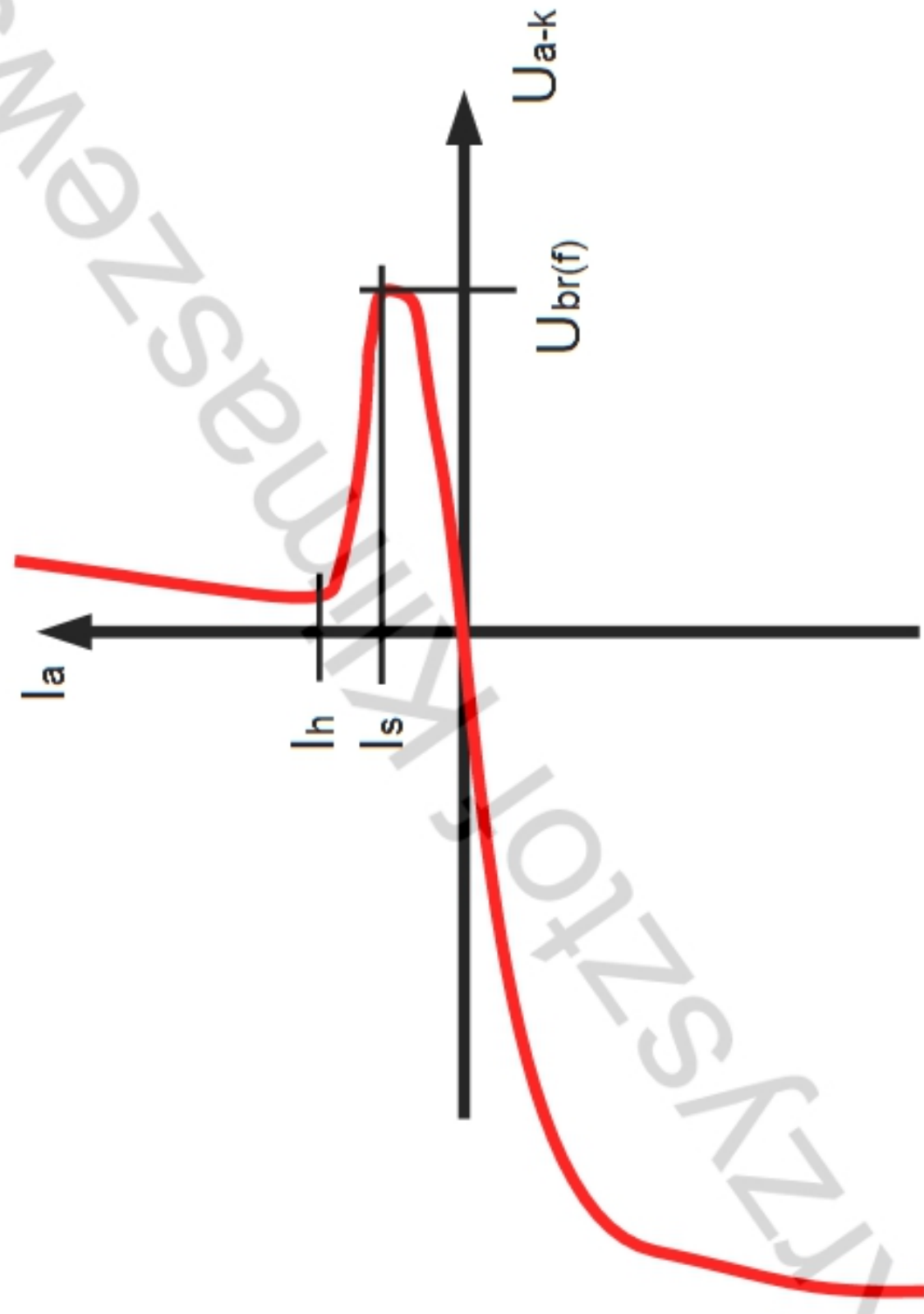
- Dioda czterowarstwowa (dynistor) ma 2 elektrody (2 nóżki)
- złożona jest z 4 warstw półprzewodnikowych



# Dioda czterowarstwowa

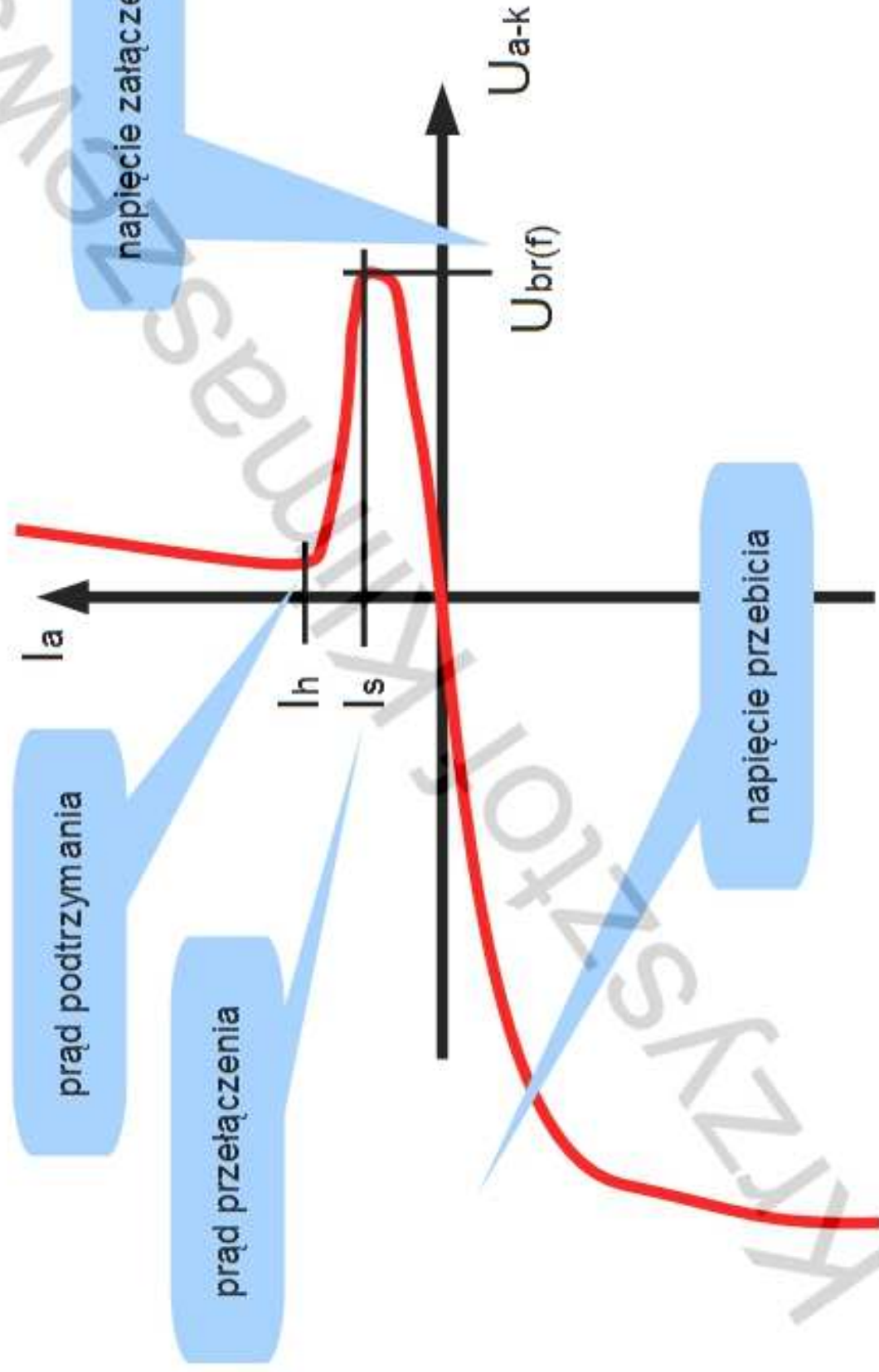


# Dioda czterowarstwowa





# Dioda czterowarstwowa



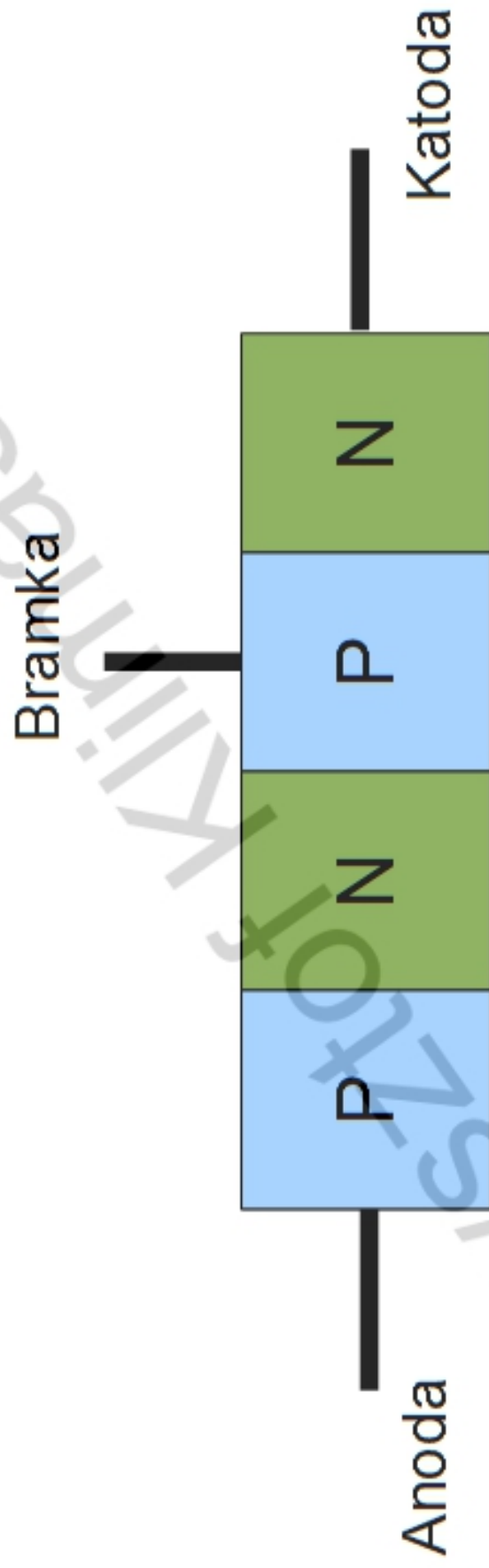
# Tyrystor (SCR – Silicon Controlled Rectifier)

- Tyrystor ma 3 końcówki

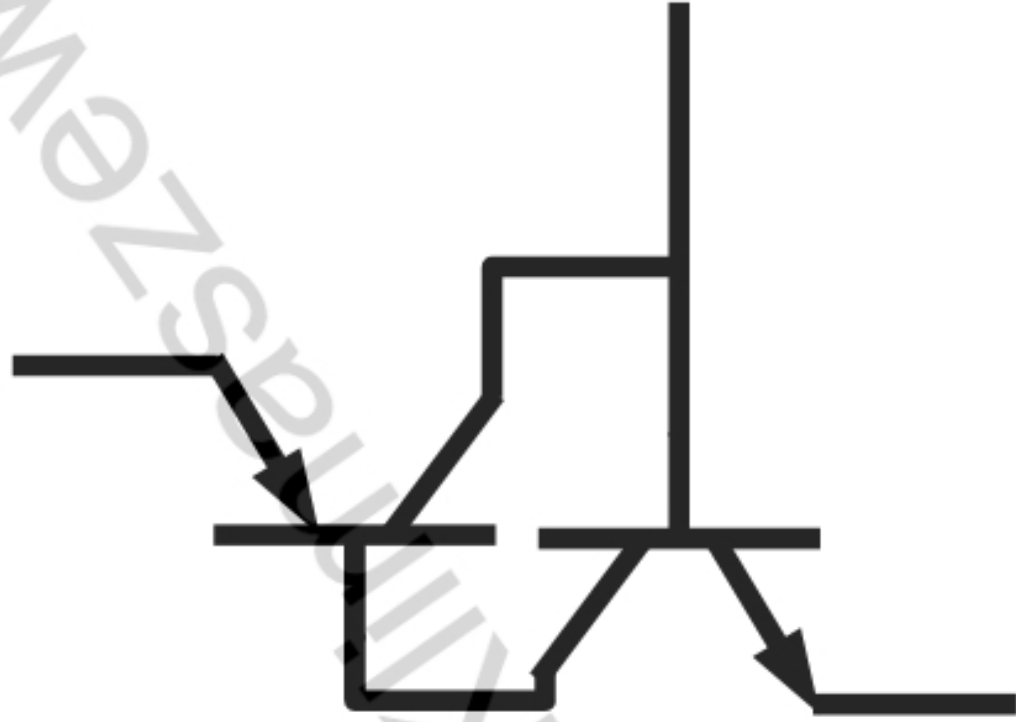
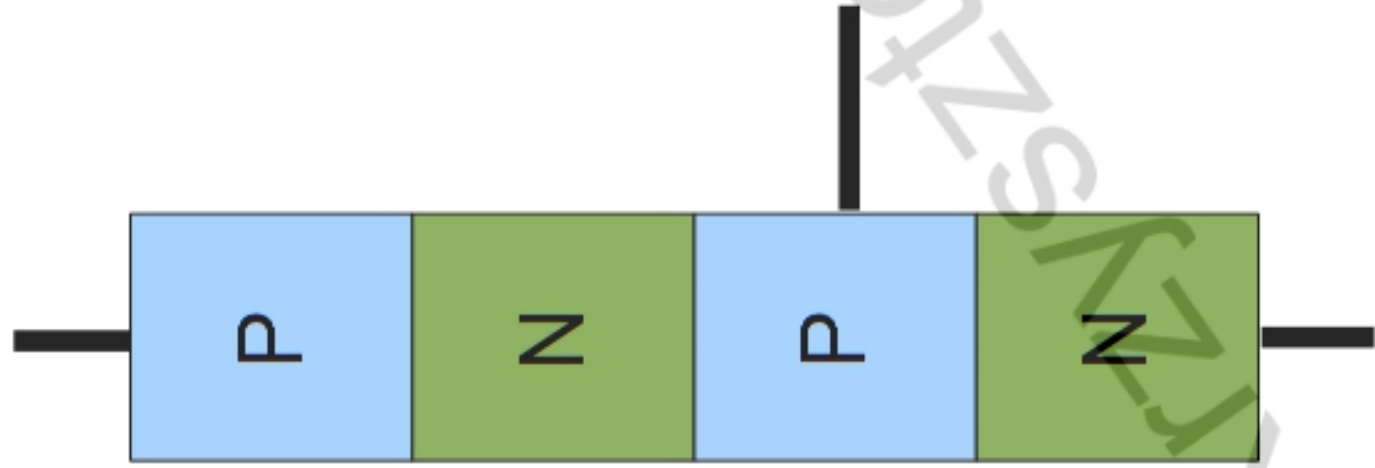


# Tyrystor (SCR – Silicon Controlled Rectifier)

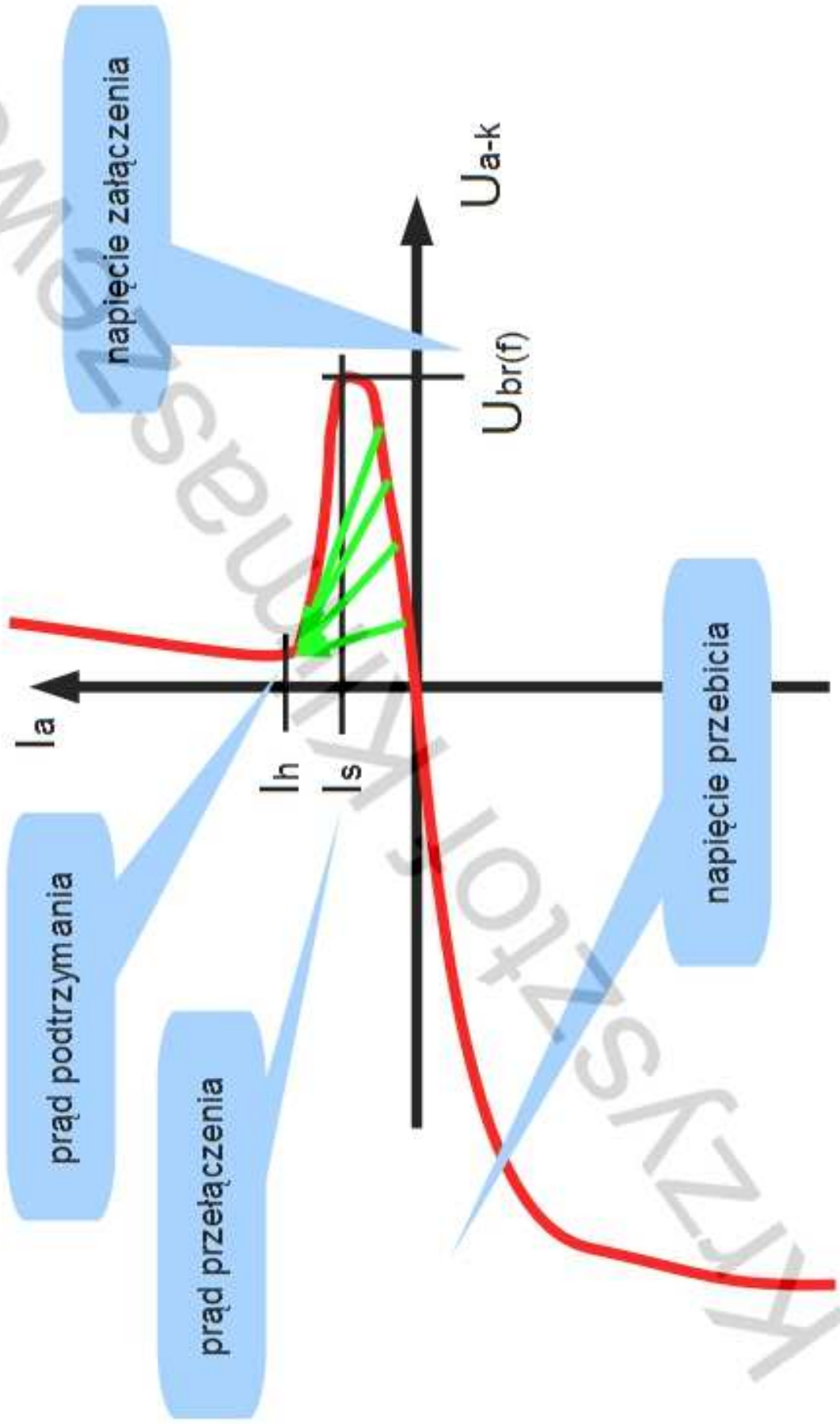
- Tyrystor ma 3 końcówki



# Tyristor



# Tyristor



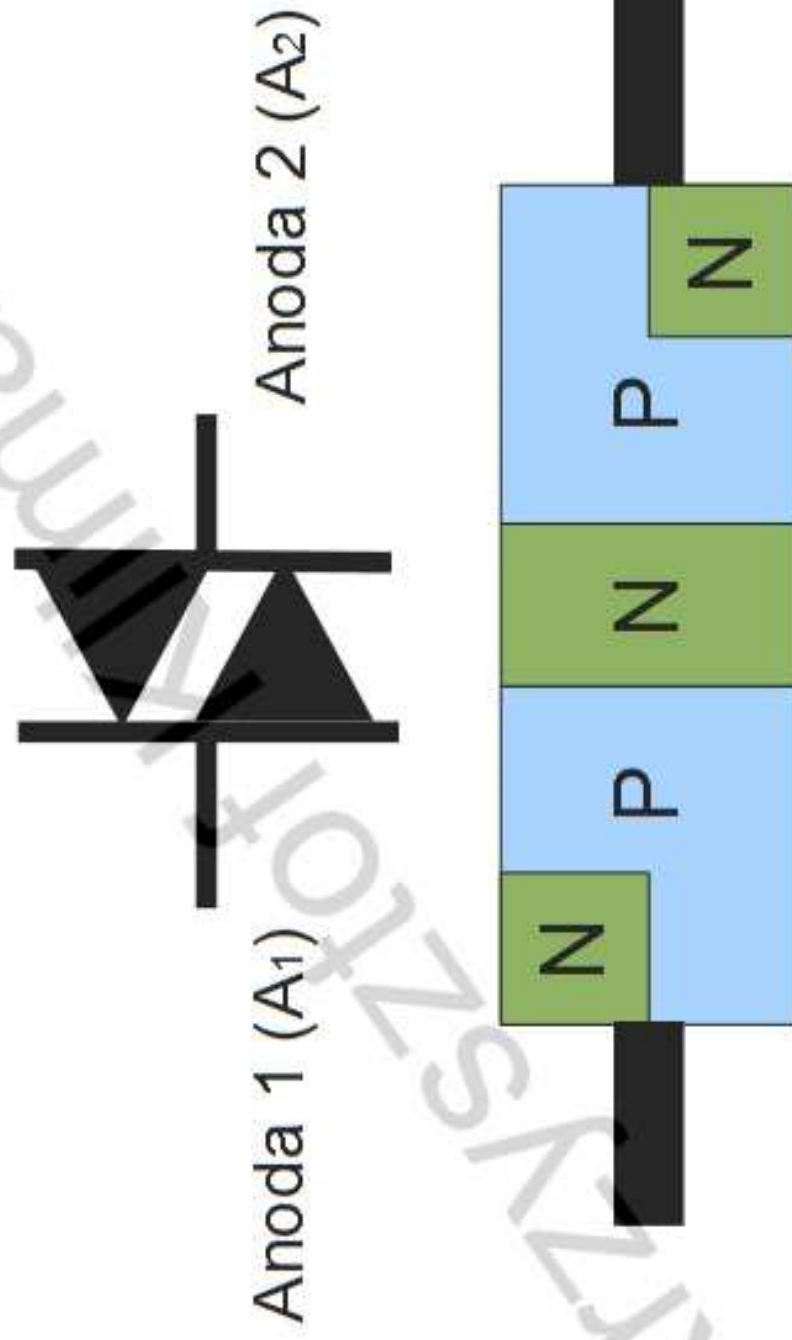
# Diak

- Diak ma 2 elektrody (2 nóżki). Działa jak 2 połączone przeciwnie diody czterowarstwowe.

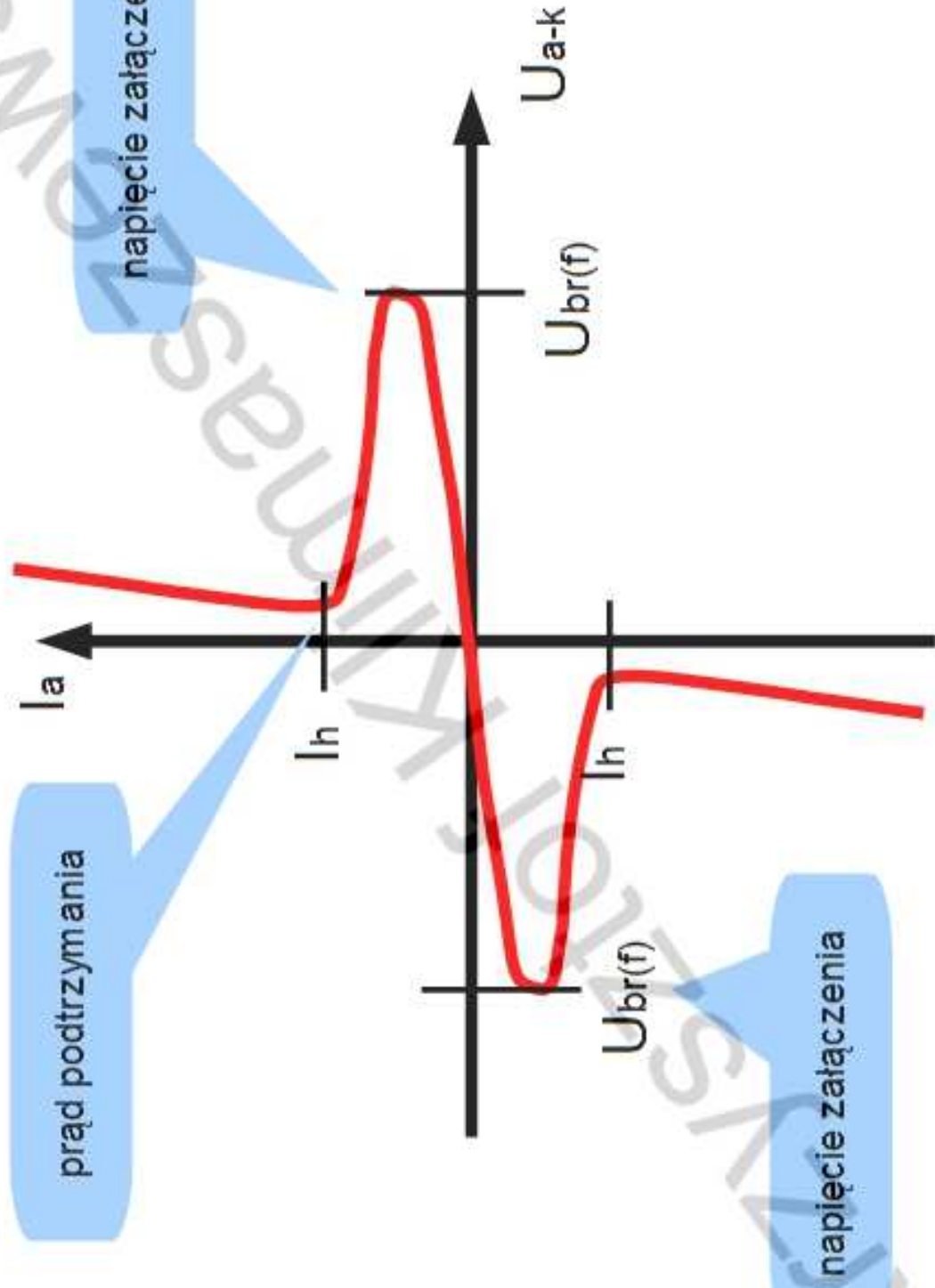


# Diak

- Diak ma 2 elektrody (2 nóżki). Działa jak 2 połączone przeciwnie diody czterowarstwowe.



# Diak



prąd podtrzymywania

napięcie złączenia

napięcie złączenia

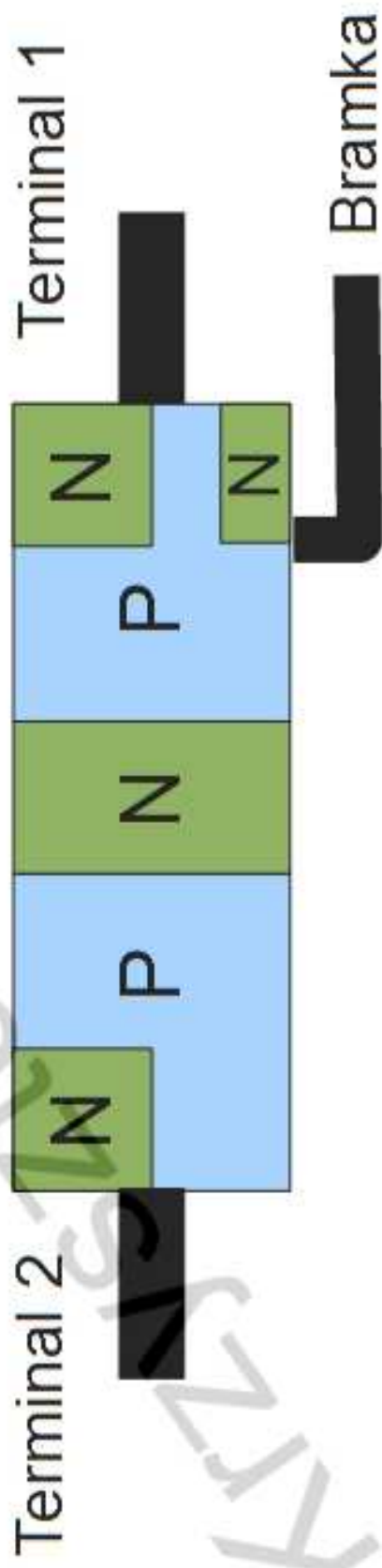


# Triak

- Triak ma 3 końcówki, działa podobnie jak 2 połączone przeciwnie tyristory.



# Triak

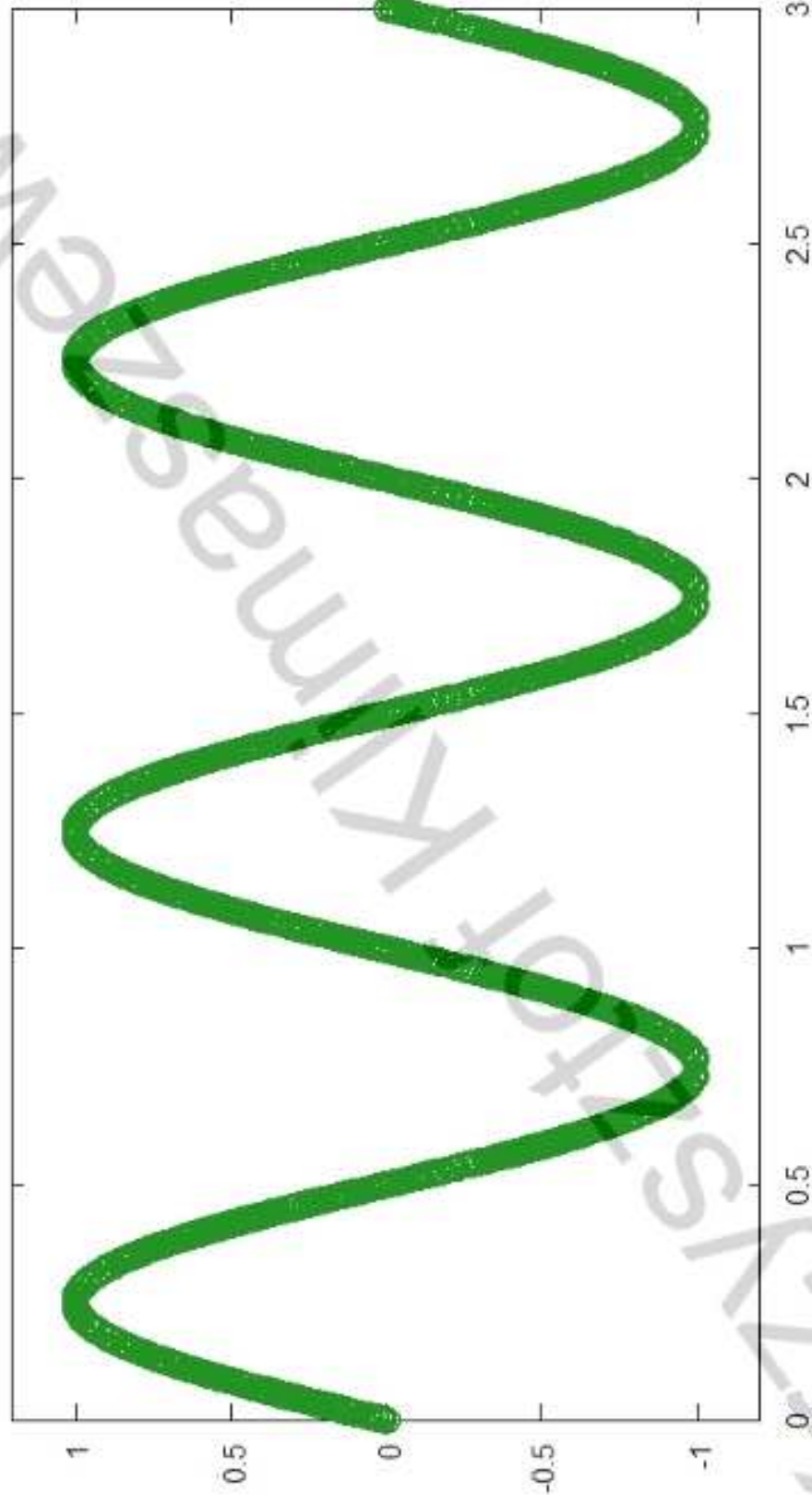




# Regulacja mocy

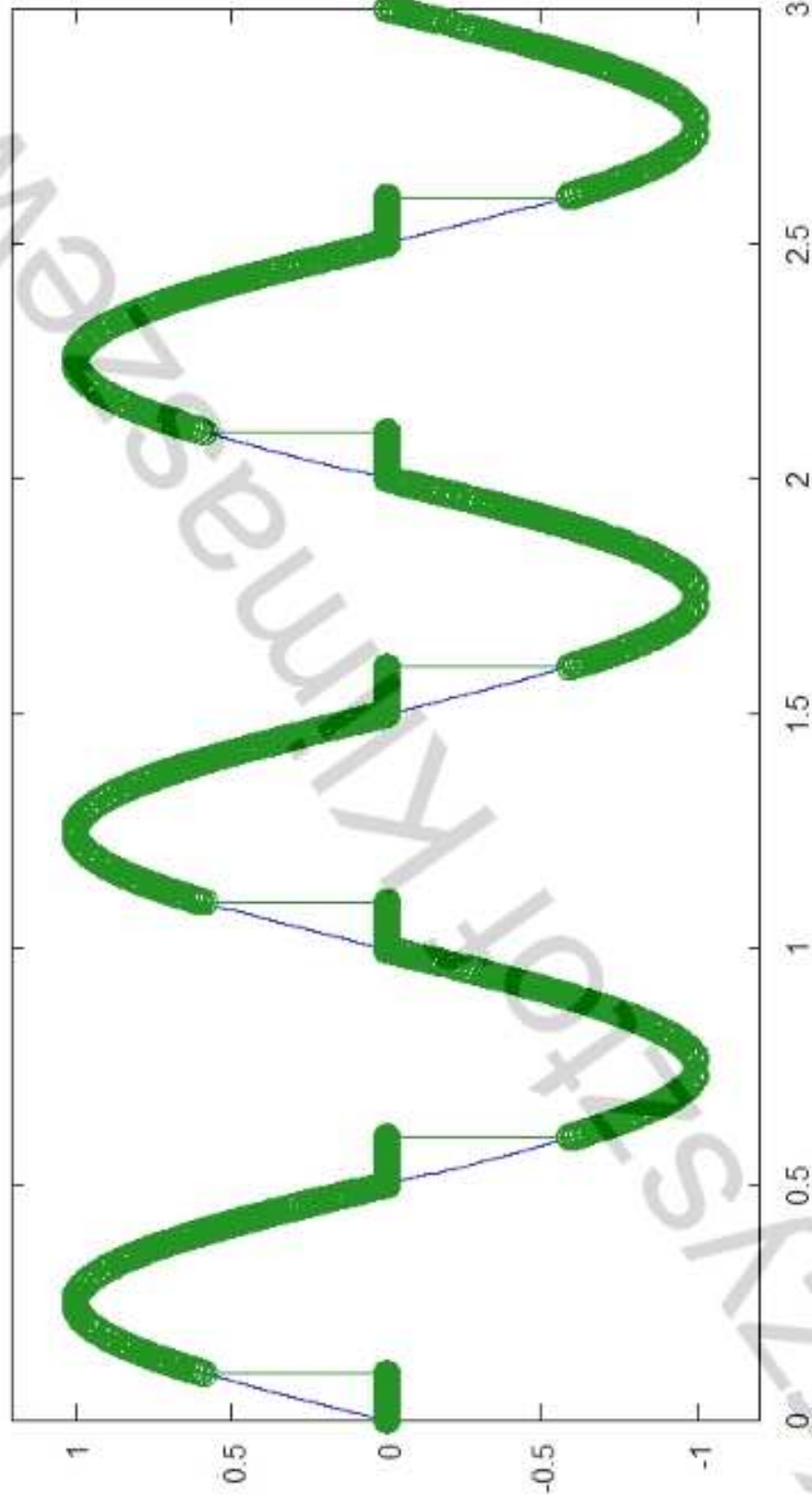
- Regulacja fazowa
  - triak załączany w zerze się nie nadaje
- Regulacja grupowa

# Regulacja fazowa



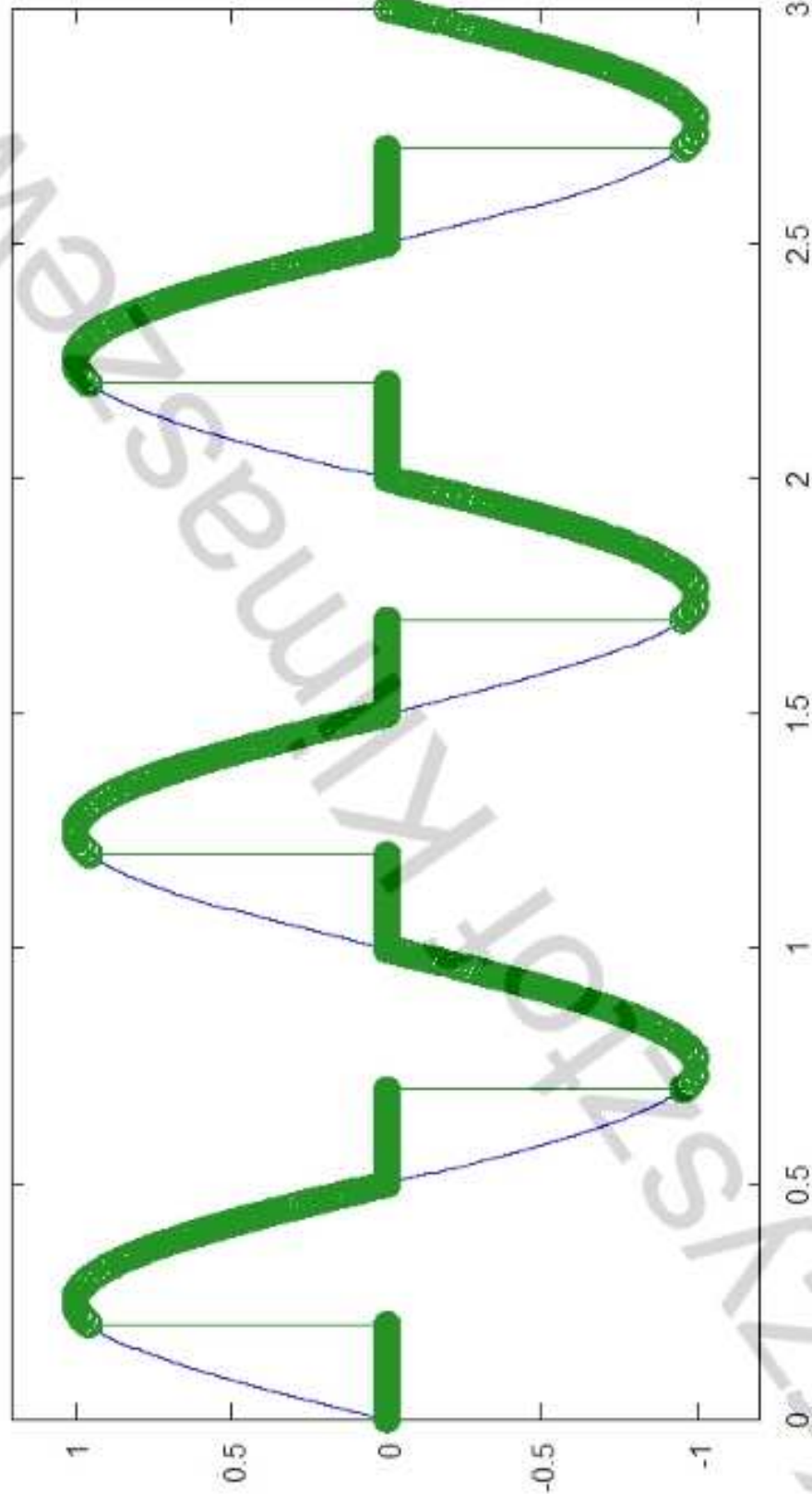
$P = 100\%$

# Regulacja fazowa



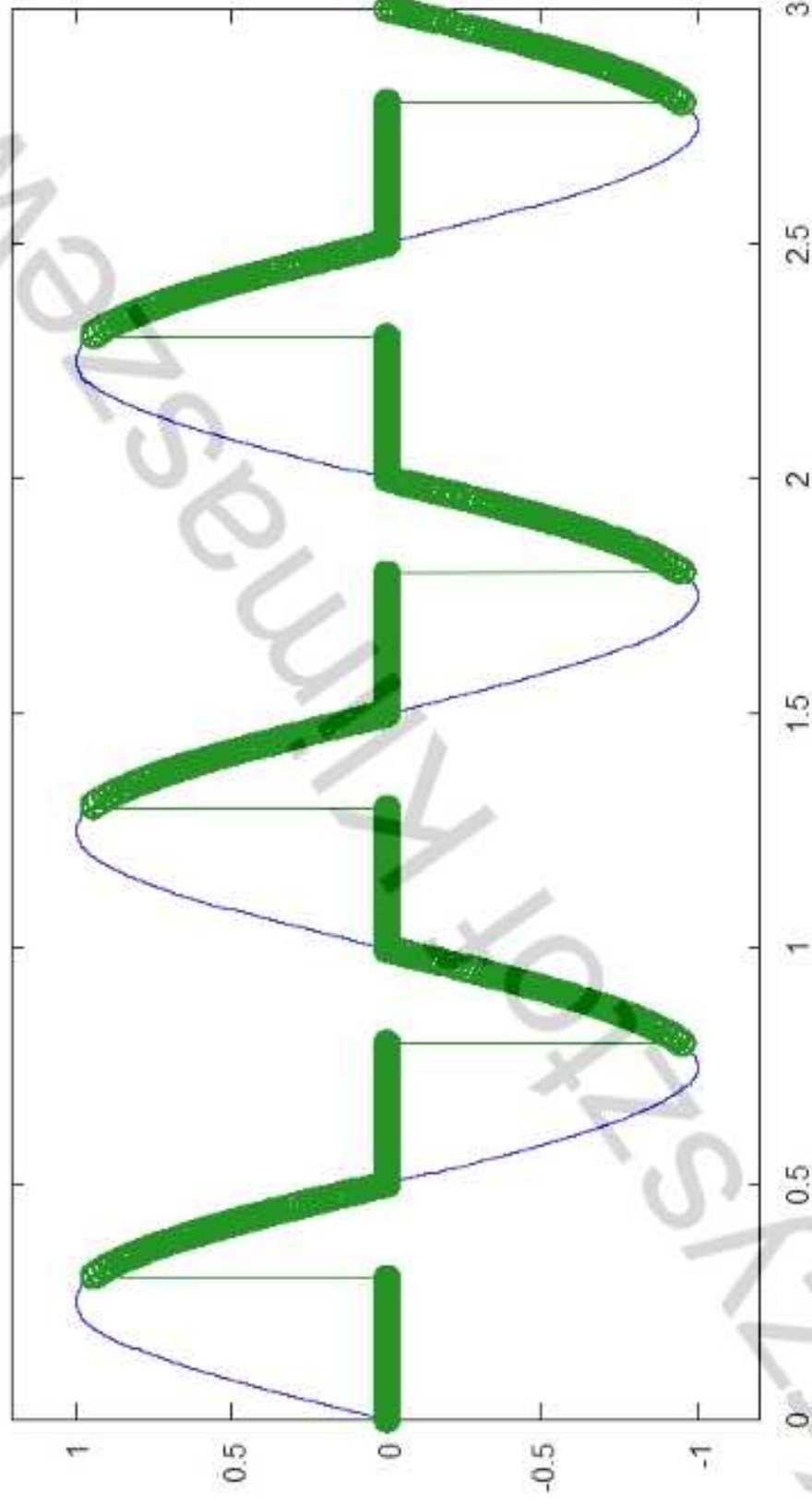
P = 95%

# Regulacja fazowa



P = 69%

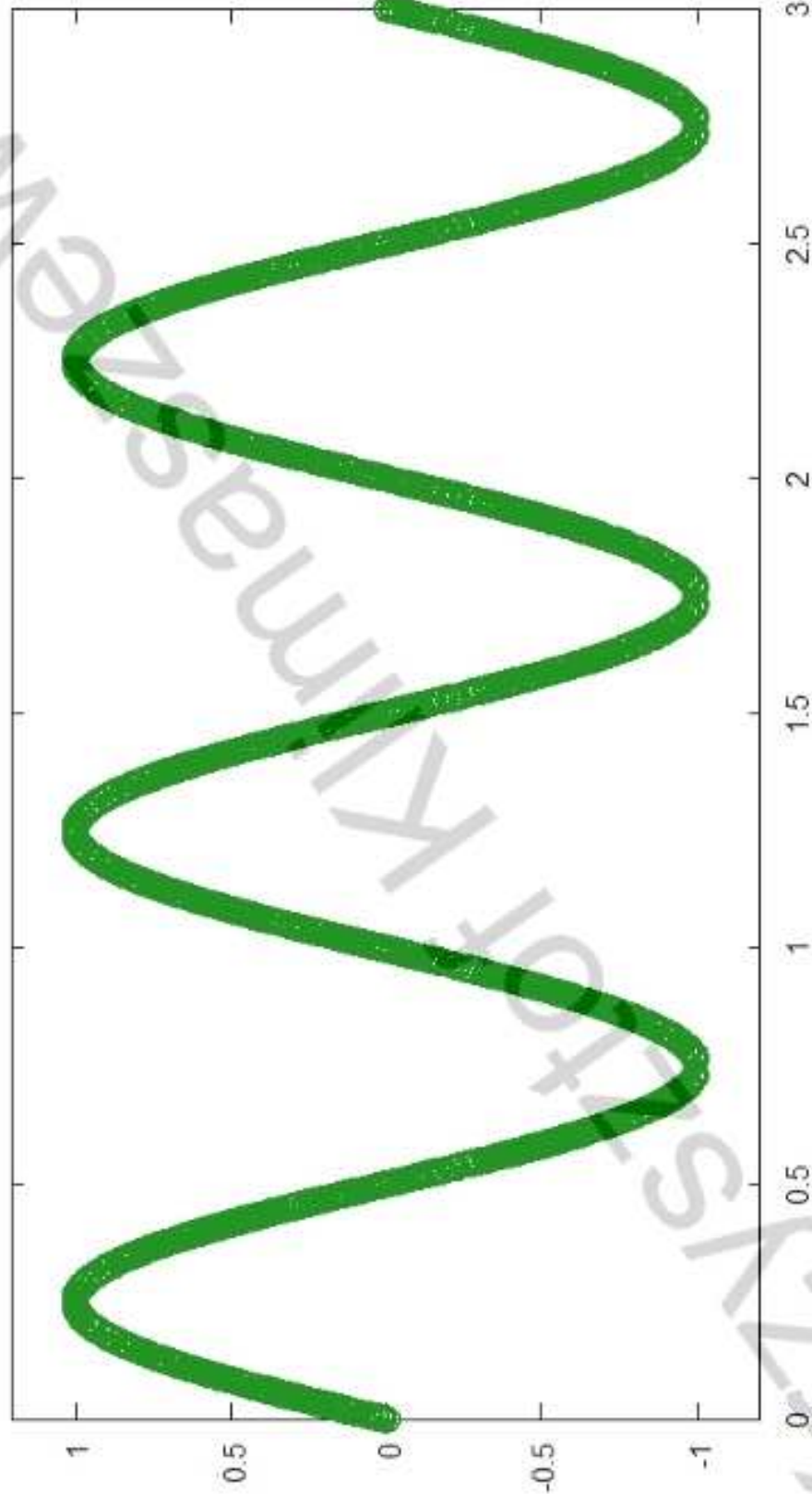
# Regulacja fazowa



$P = 30\%$

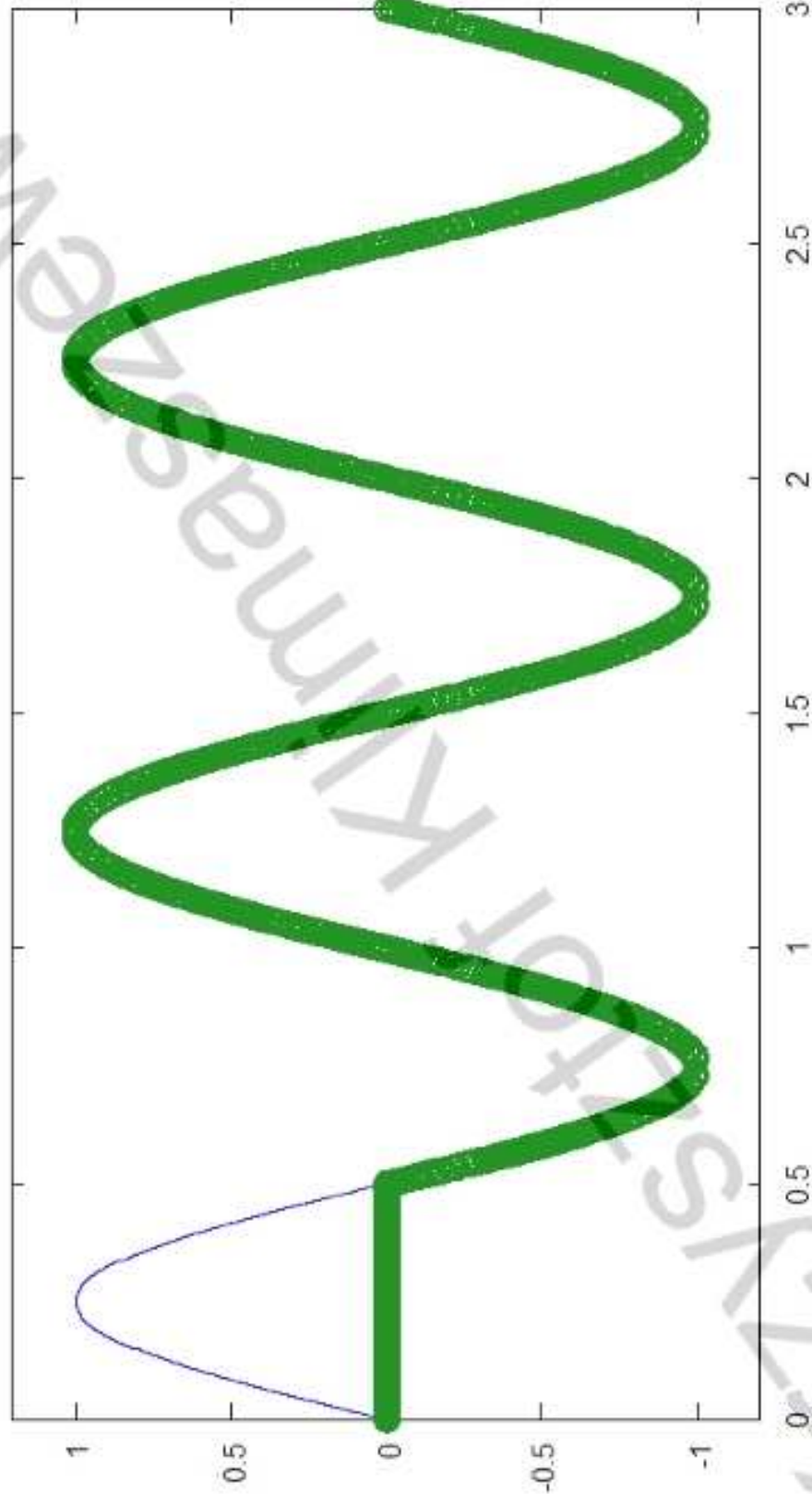


# Regulacja grupowa



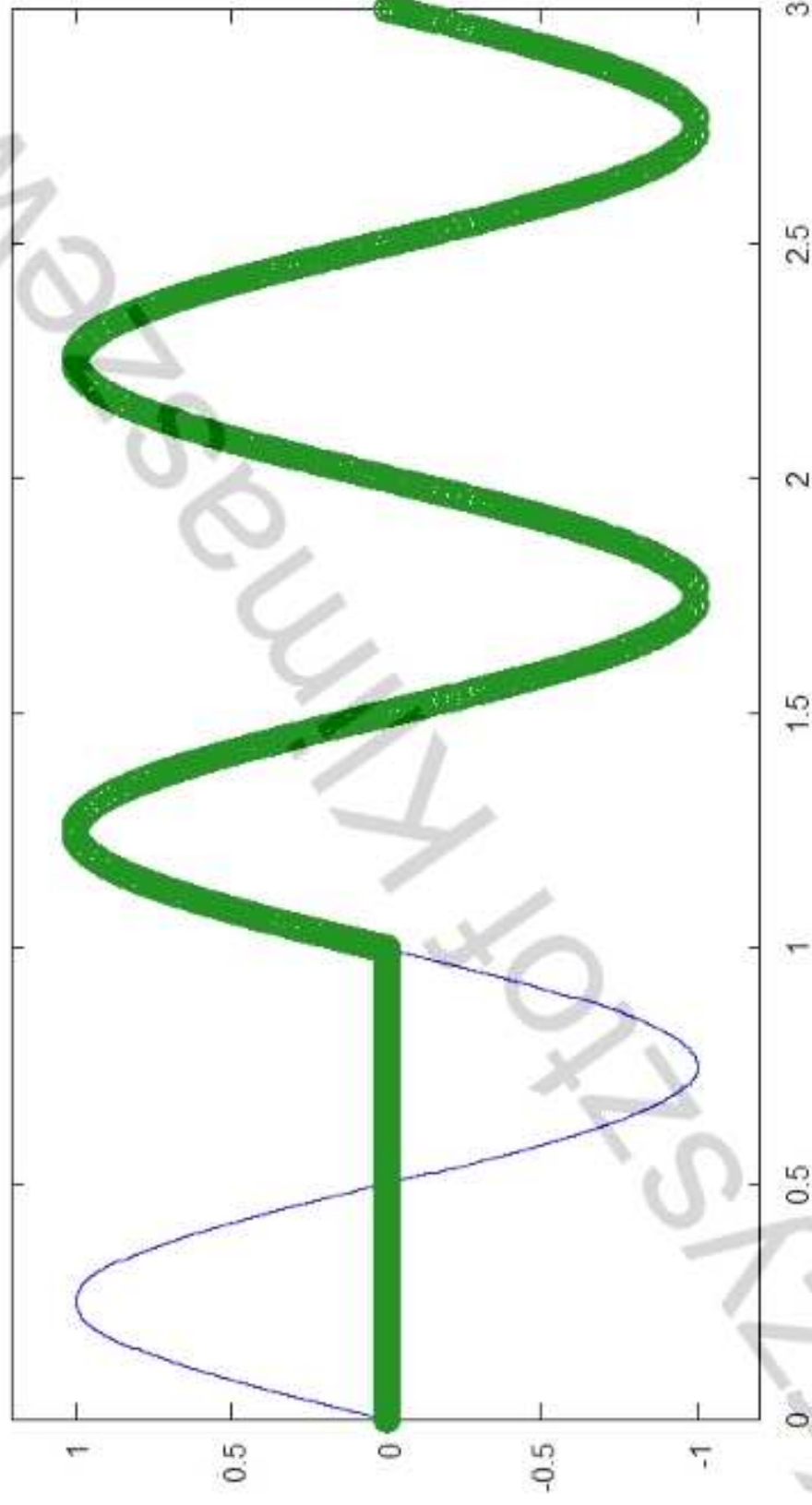
$P = 100\%$

# Regulacja grupowa



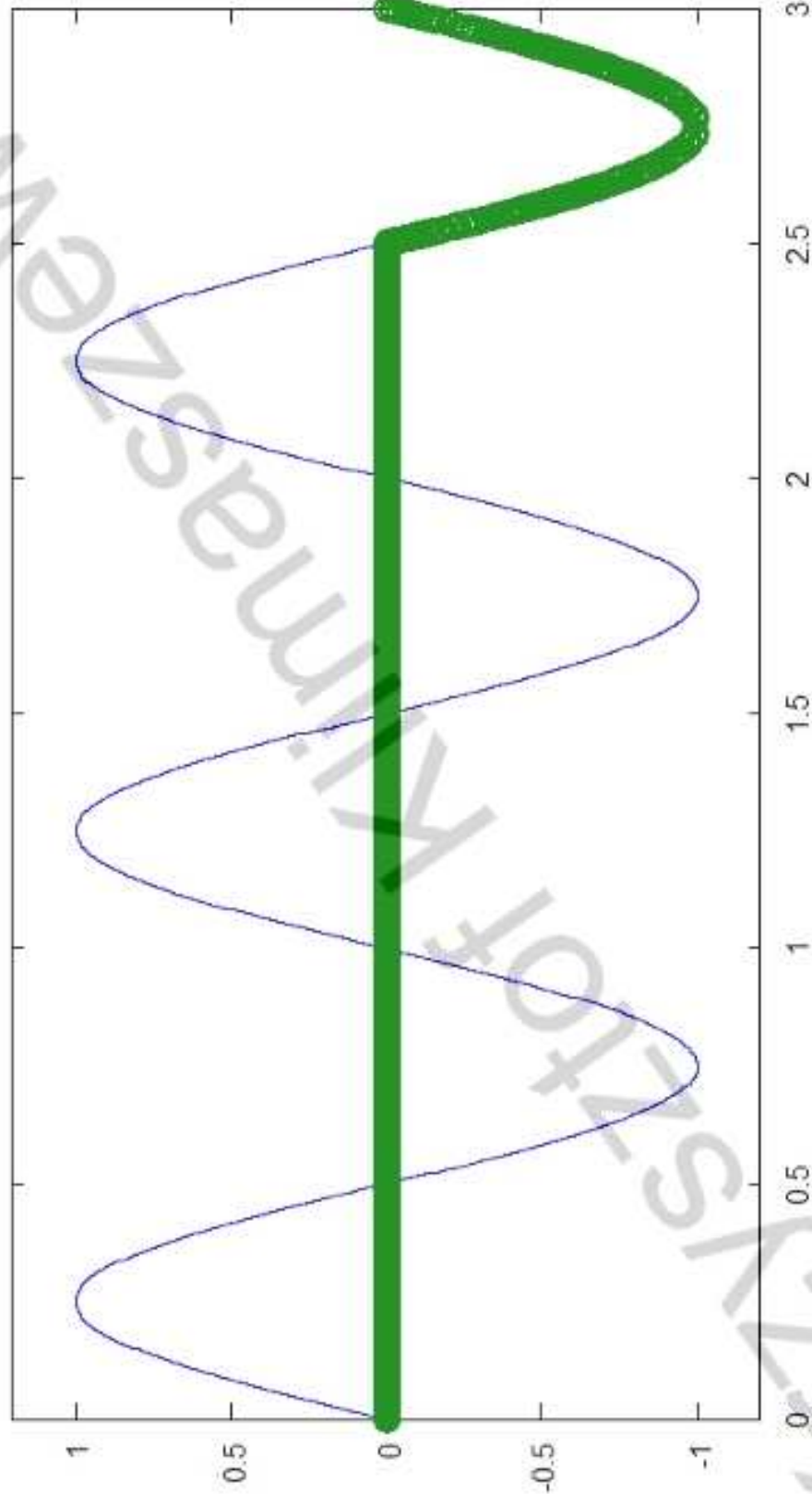
P = 83%

# Regulacja grupowa



$P = 67\%$

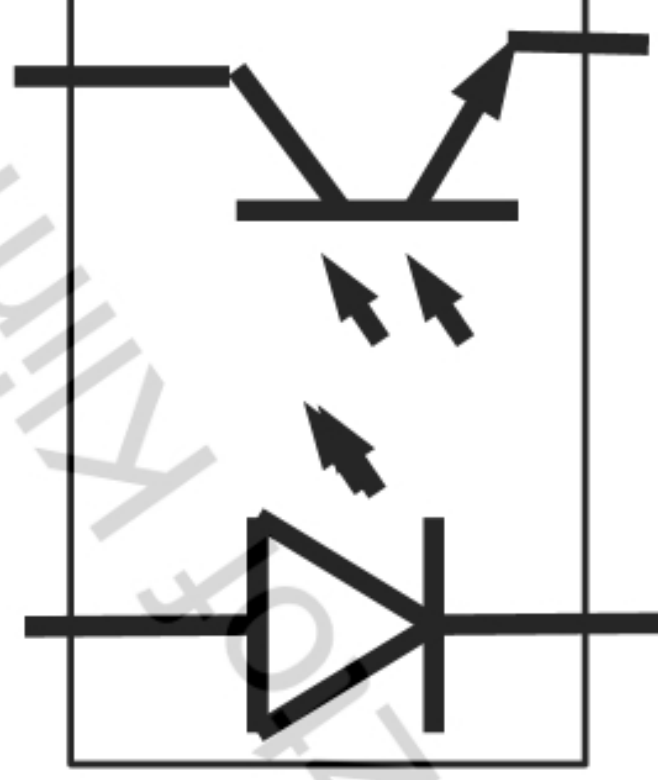
# Regulacja grupowa



$P = 17\%$

# Transoptor

- Tranzystor uruchamiany światłem
- Prąd bazy generowany jest przez promienie światła z diody LED



# Tranzystor IGBT

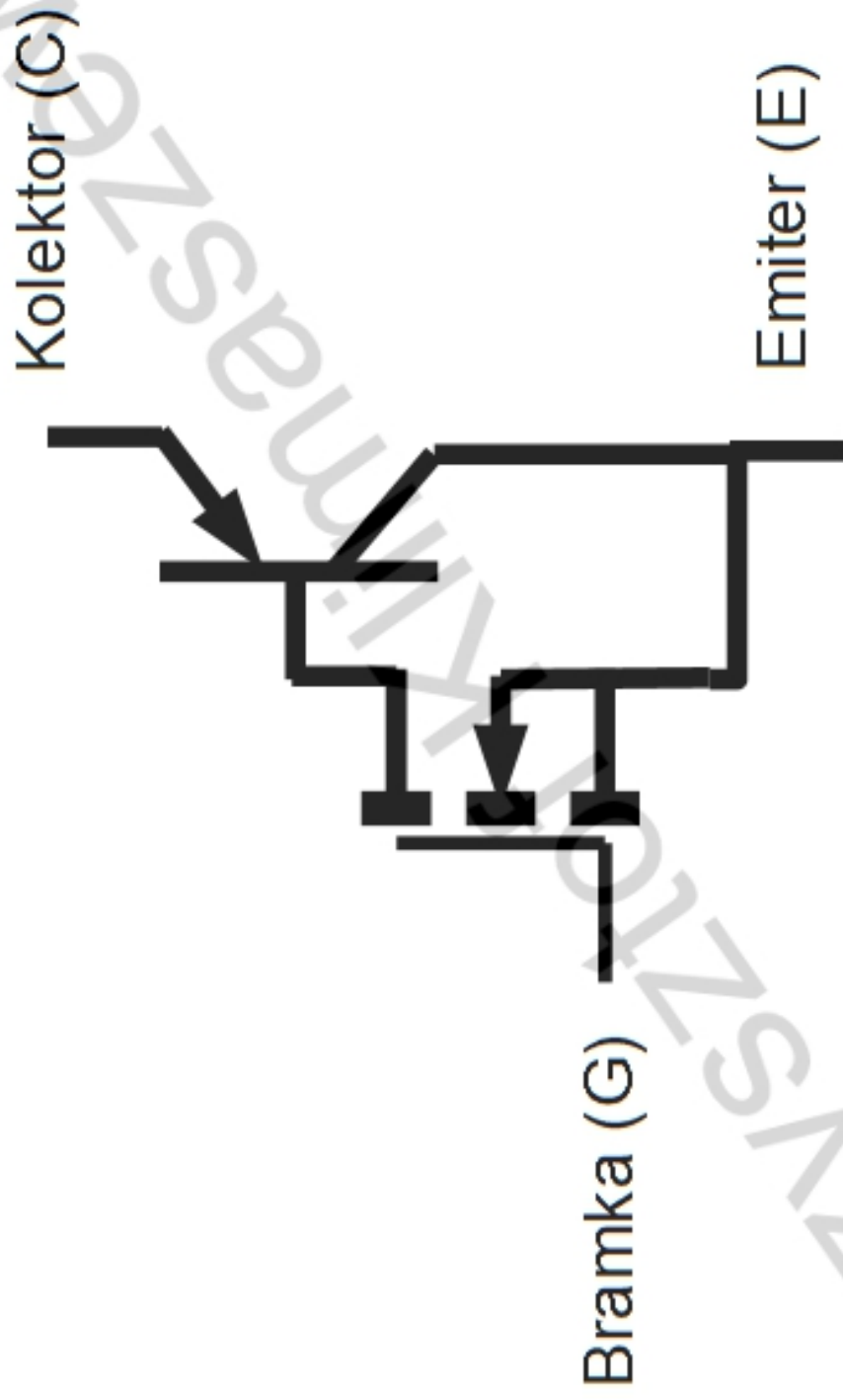
Kolektor (C)



Bramka (G)

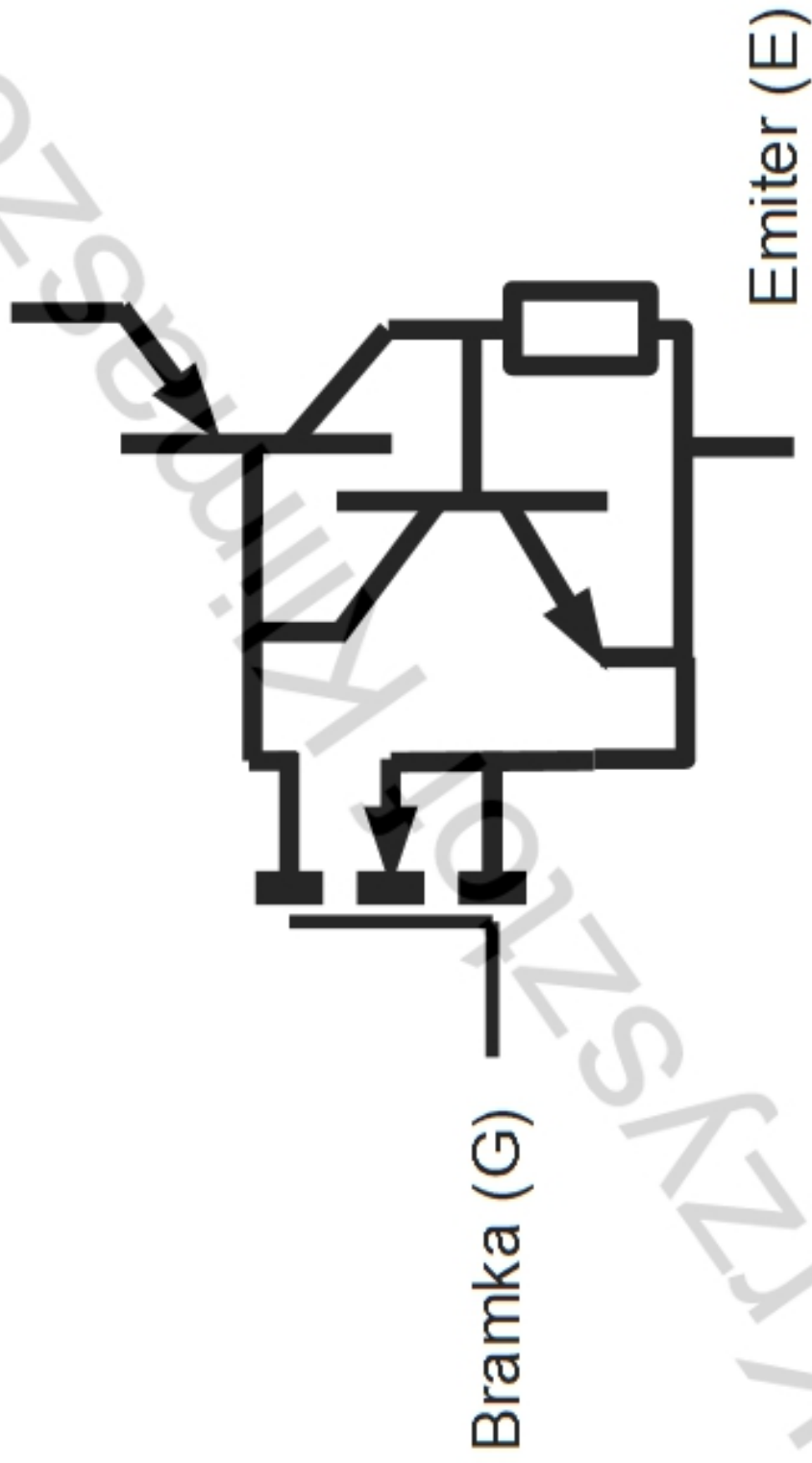
Emiter (E)

# Tranzystor IGBT



# Tranzystor IGBT

Kolektor (C)

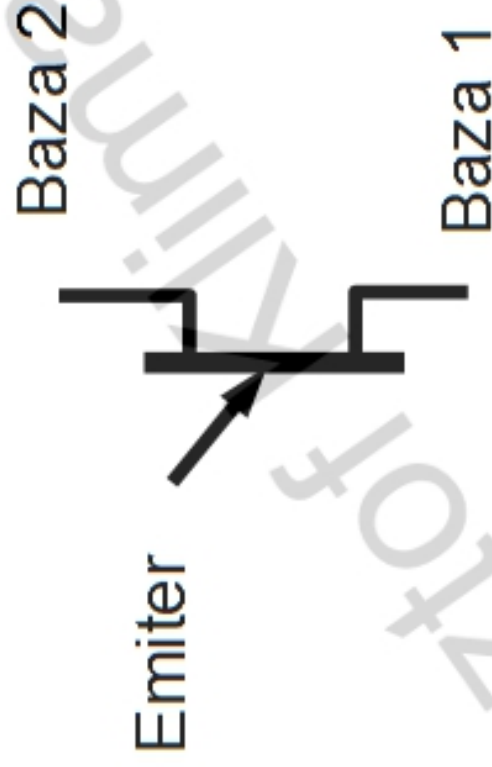


Bramka (G)

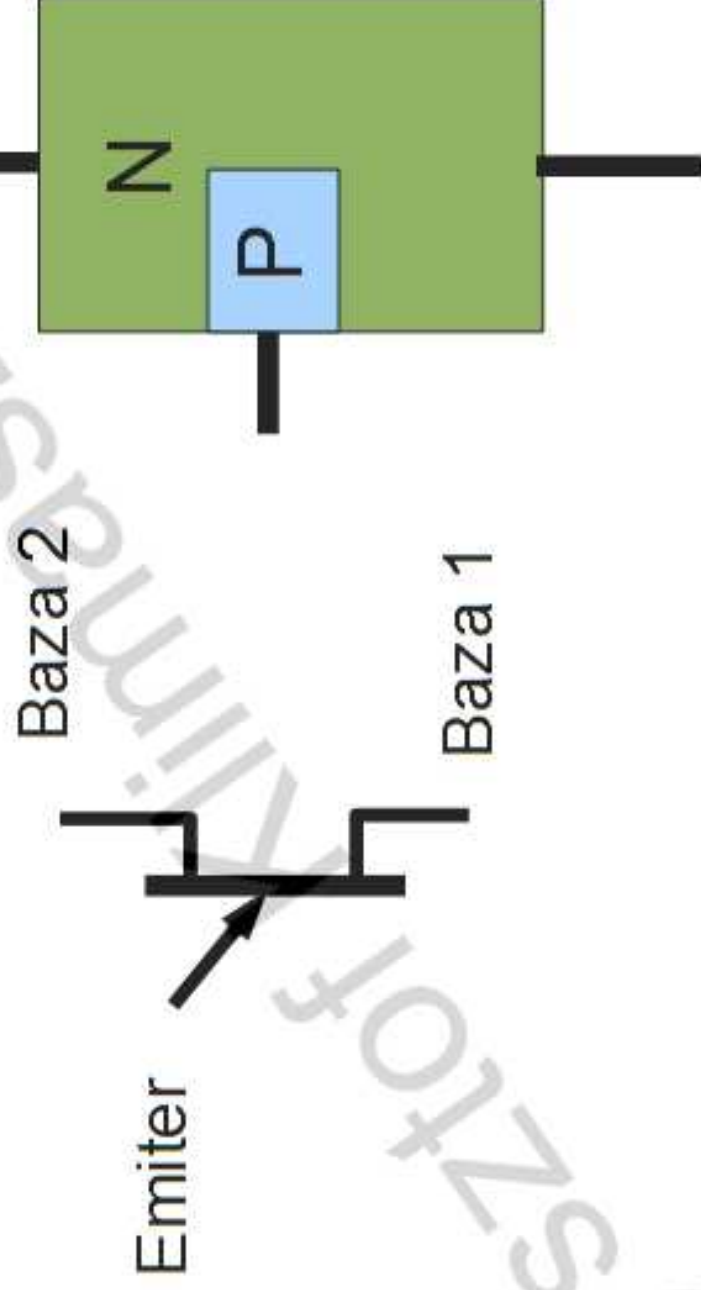
Emiter (E)



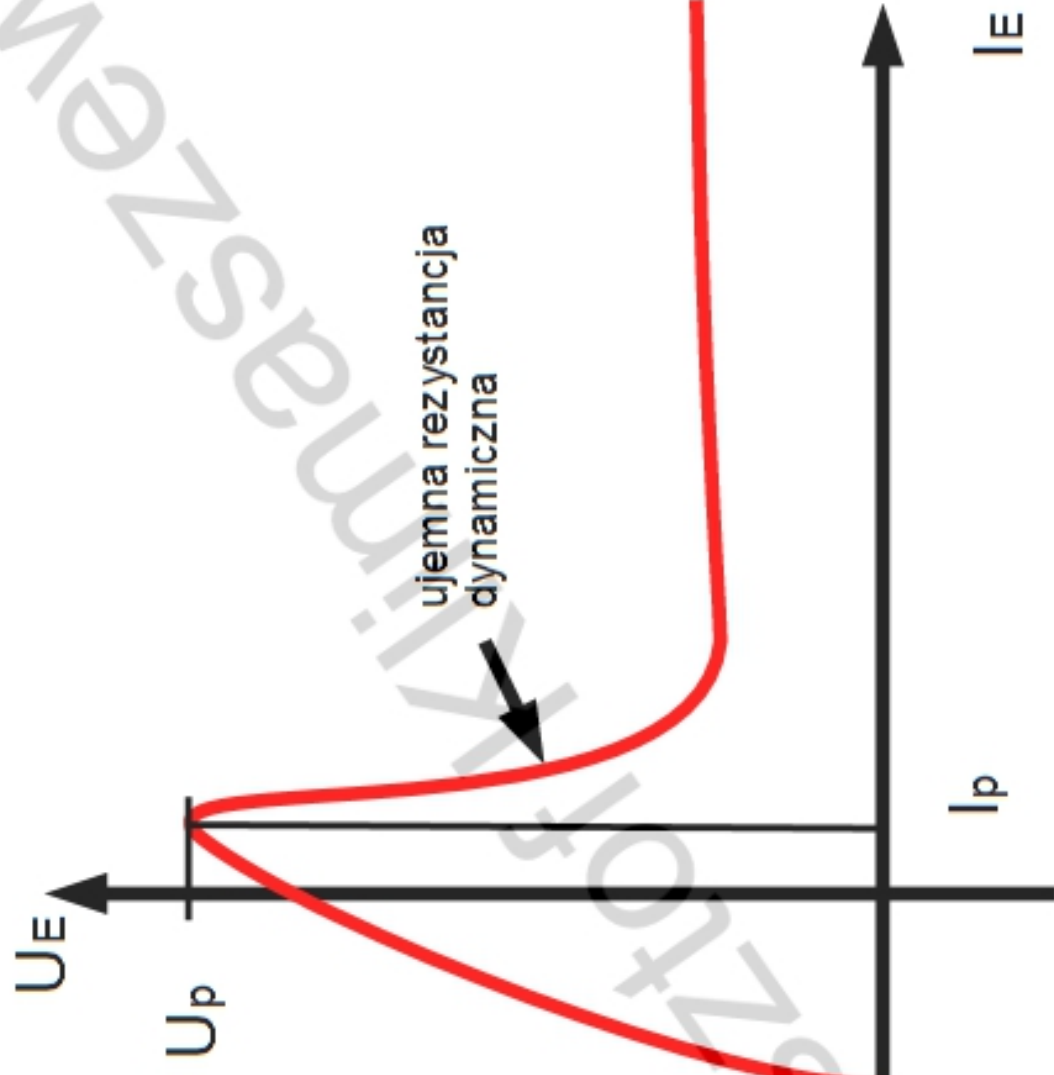
# Tranzystor jednozłączowy (UJT)



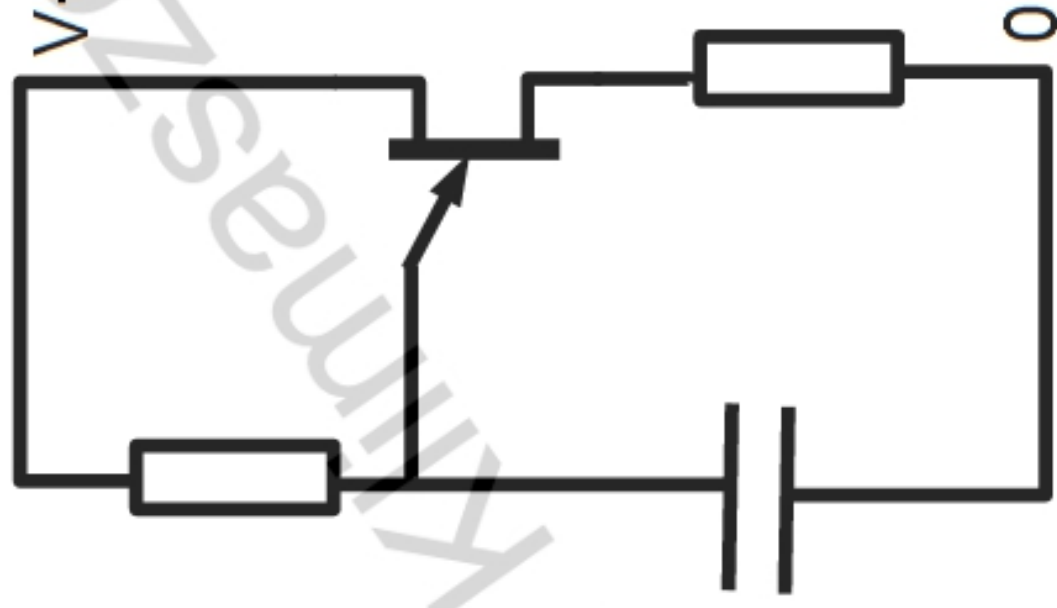
# Tranzystor jednozłączowy (UJT)



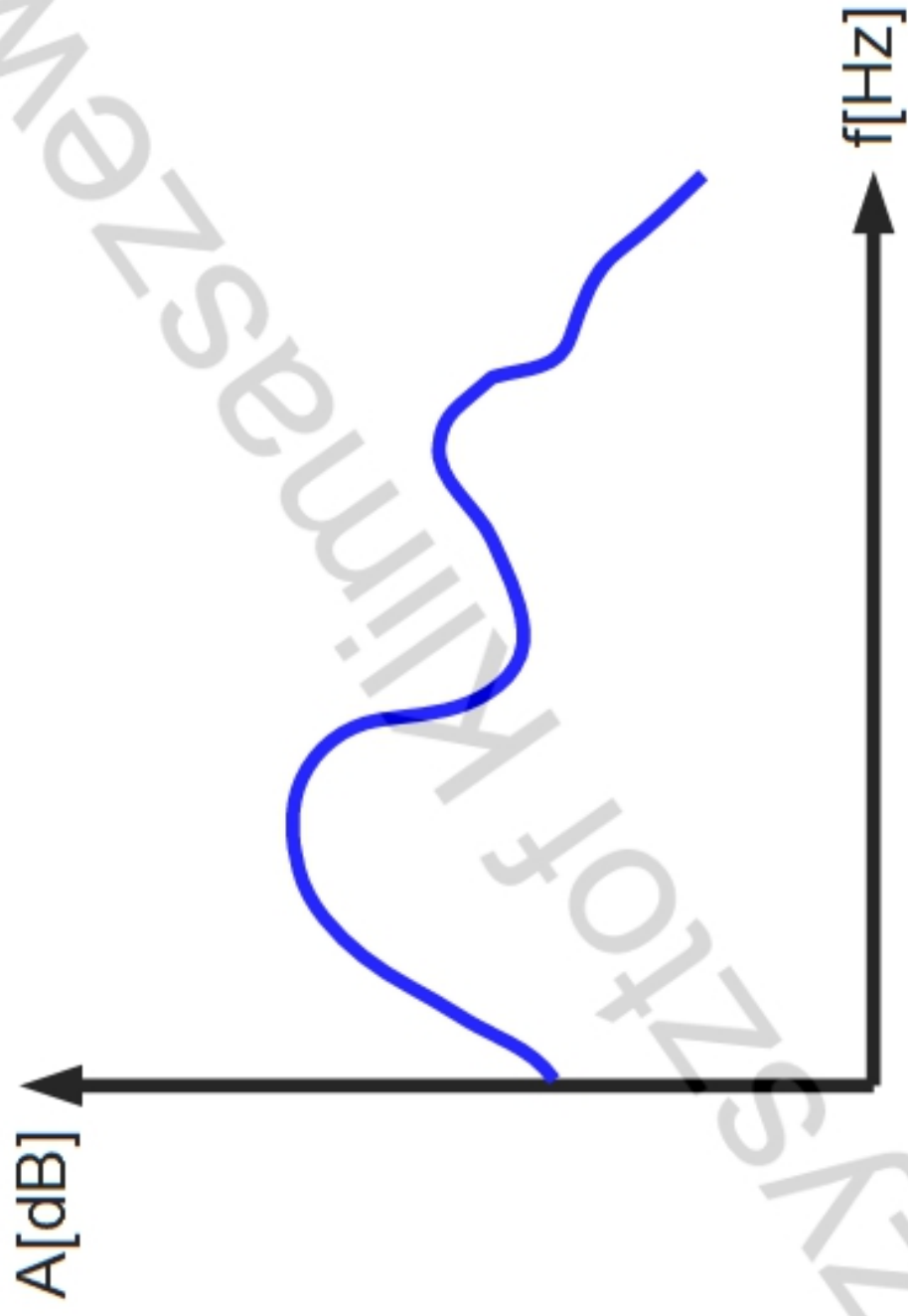
# Tranzystor jednozłączowy (UJT)



# Tranzystor jednozłączowy (UJT)



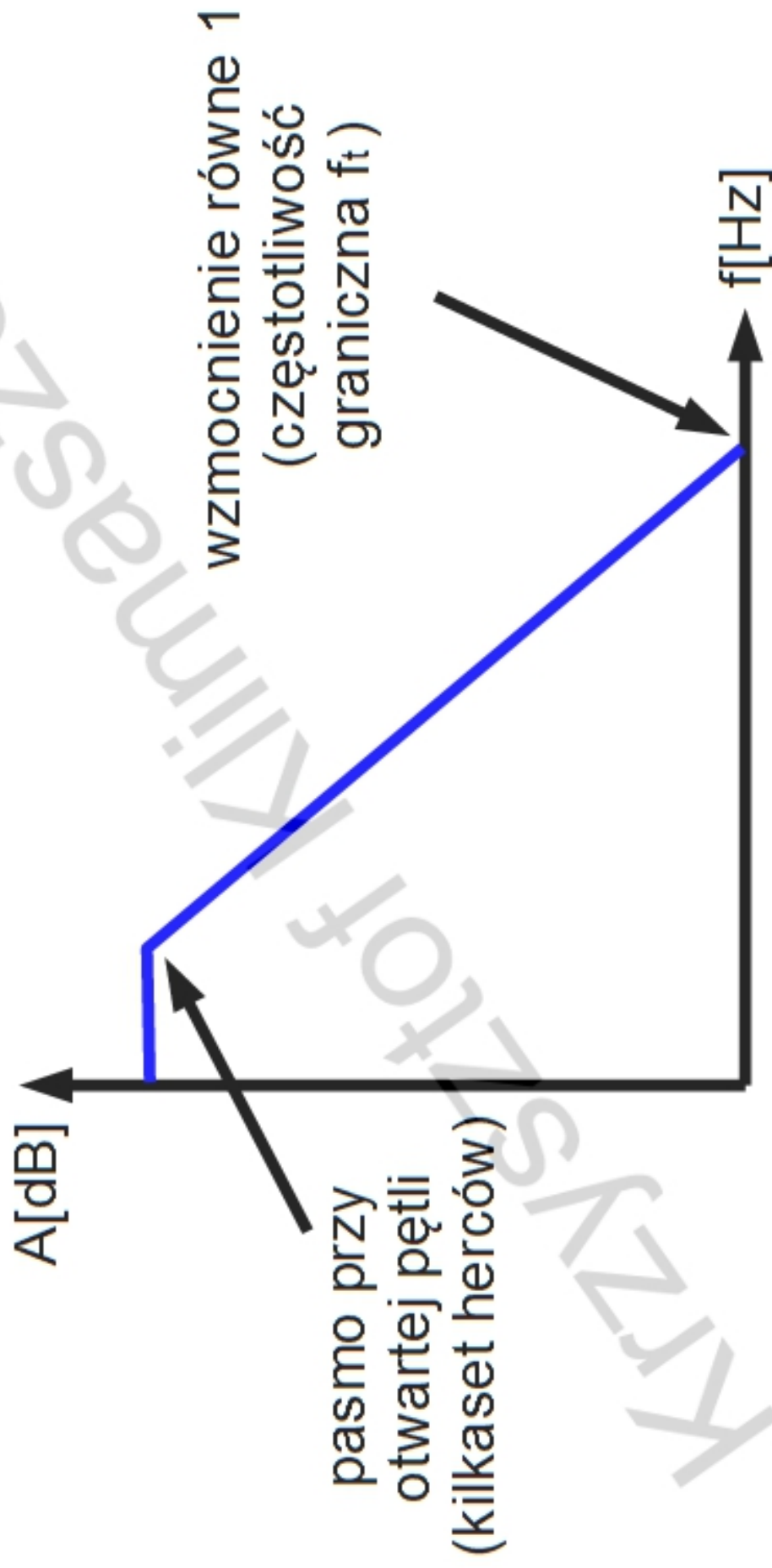
# Charakterystyki częstotliwościowe



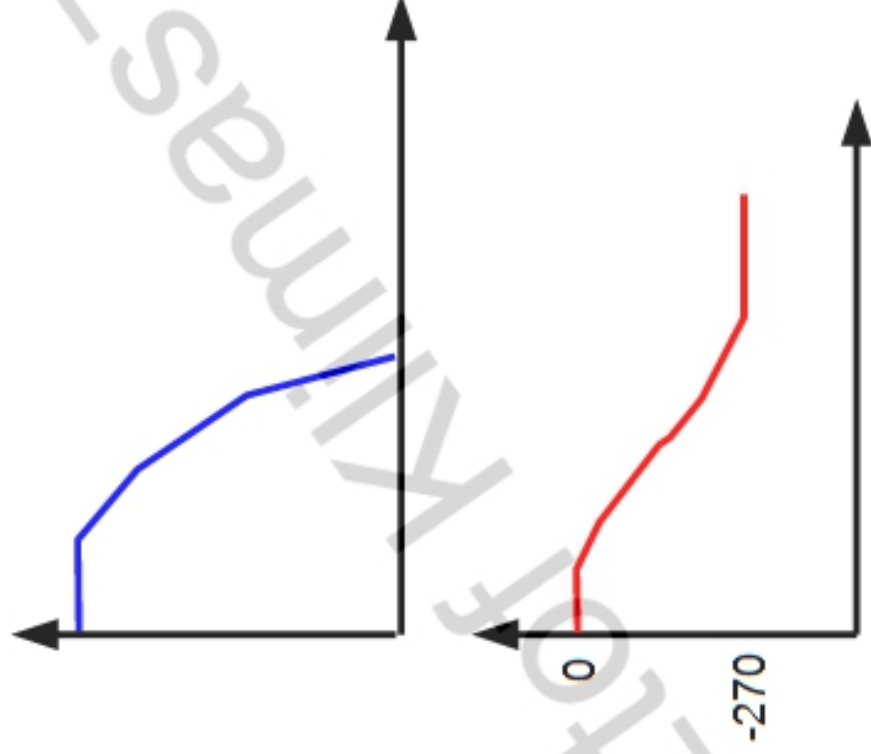
# Charakterystyki częstotliwościowe

- Wzmacniacz operacyjny:
  - wzmacnia przebiegi od 0Hz (wzmacnia też napięcia stałe)
  - wzmocnienie w otwartej pętli zależy od częstotliwości
  - przesunięcie fazowe zależy od częstotliwości

# Charakterystyka amplitudowa

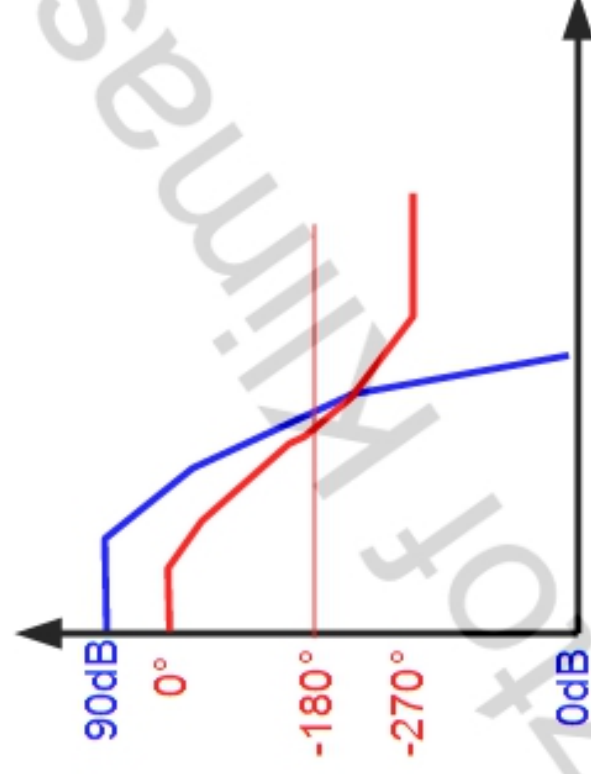


# Charakterystyka fazowa

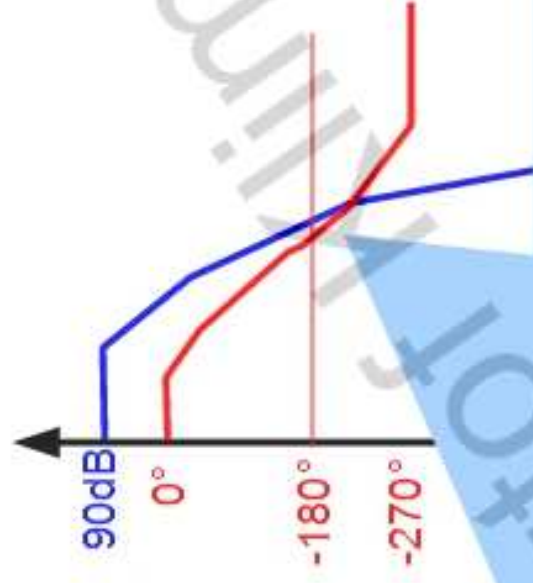




# Charakterystyka fazowa



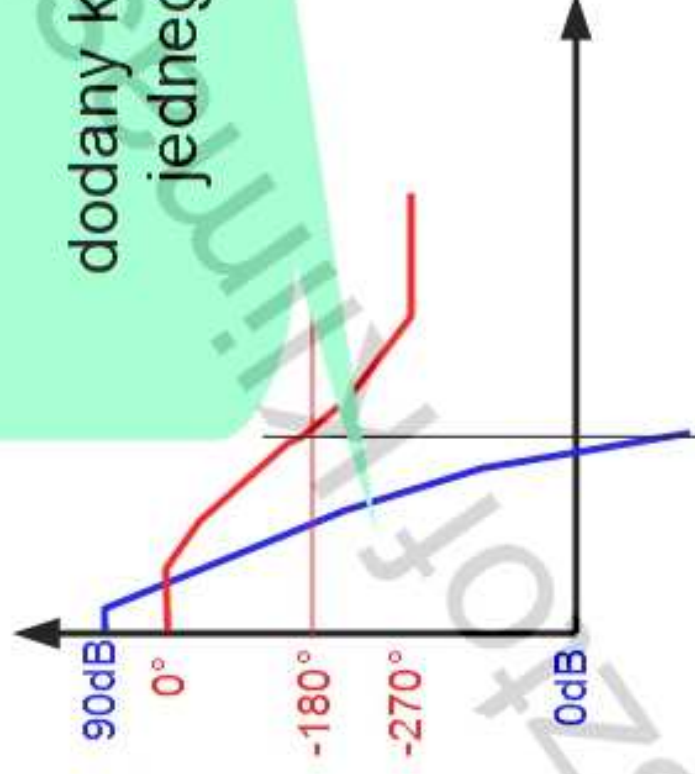
# Charakterystyka fazowa



Jeśli wzmacnienie  $> 0\text{dB}$  dla tego punktu, to wzmacniacz staje się generatorem. Spełnia warunek amplitudy i fazy.

# Charakterystyka fazowa

po kompensacji częstotliwości  
dodany kondensator do  
jednego ze stopni



## Pole wzmacnienia

- Dla wzmacniacza skompensowanego częstotliwościowo z zamkniętą pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego iloczyn pasma i wzmacnienia jest stały i równy co do wartości ft:

$$f_T = k_{cl} f_{cl}$$

Wzmacnienie w skali liniowej

## Pole wz

- Dla wzmacniacza składowego z częstotliwościowo zwróconego sprzężenia zwrotnego wzmacnienia jest stały i różni się tylko o do wartości  $f_T$ :

$$f_T = 1\text{MHz}$$

$$\text{wzmocnienie} = 100x$$

$$\text{pasmo} = 10\text{ kHz}$$

$$f_T = k_{cl} f_{cl}$$

Wzmocnienie w skali liniowej

# Pole wzmacnienia

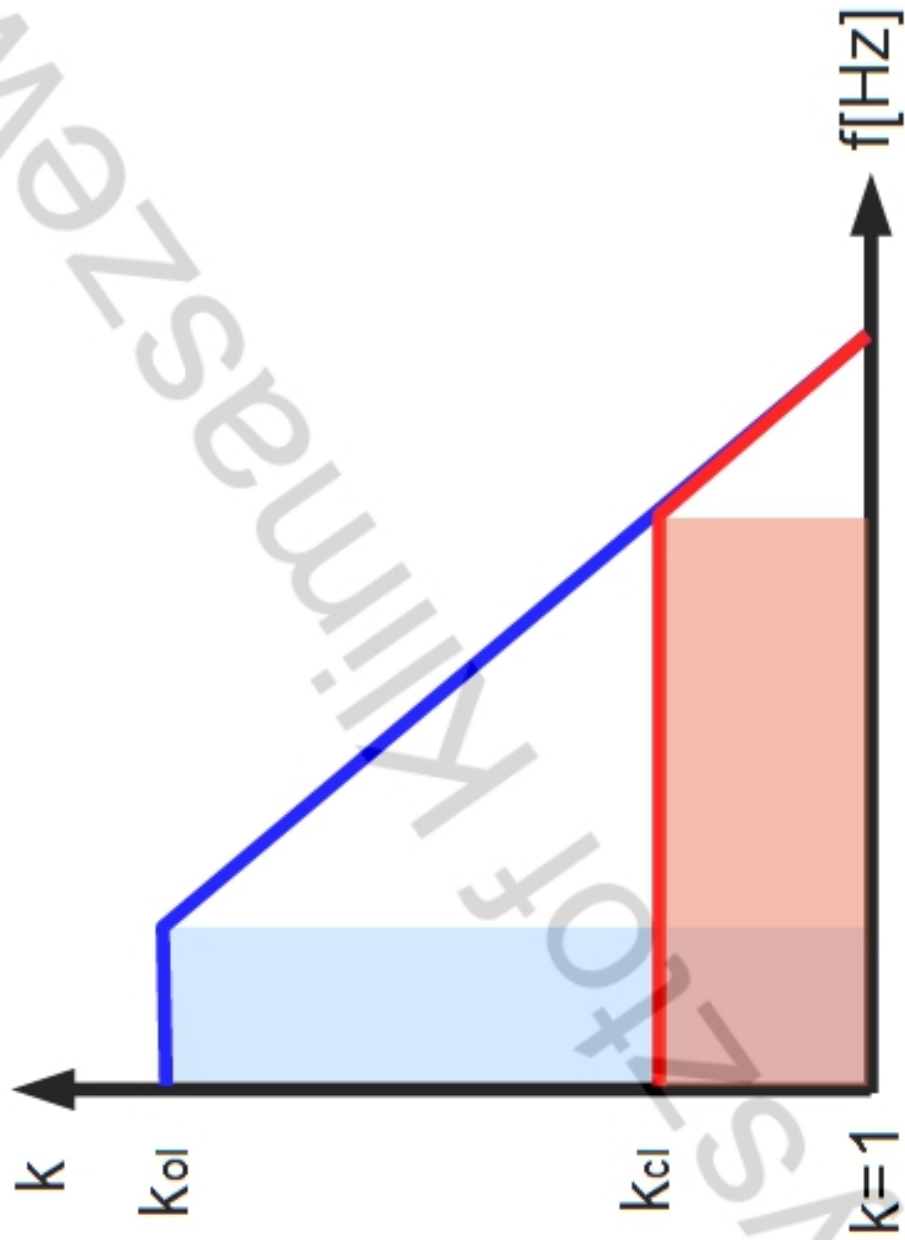
- Dla wzmacniacza z pominiętym opóźnieniem fazowym i pominiętym zerem przesłanym, wzmocnienie jest stałe i równe  $k_{cl}$  do wartości II.

Gain Bandwidth product (GBW)

$$f_T = k_{cl} f_{cl}$$

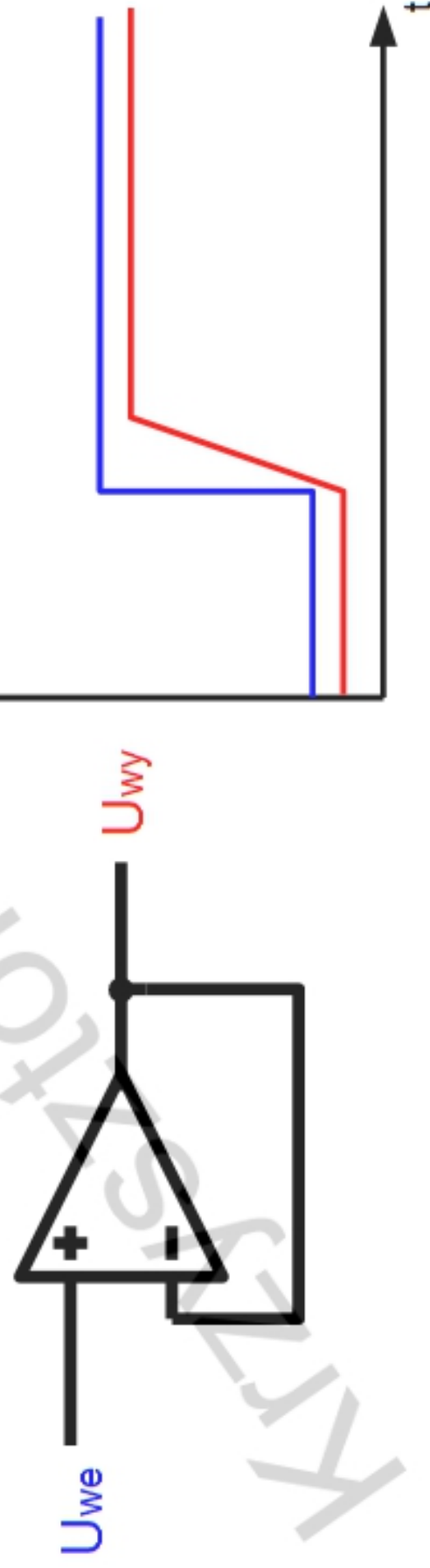
Wzmocnienie w skali liniowej

# Pole wzmacnienia



# Szybkość wzmacniacza operacyjnego

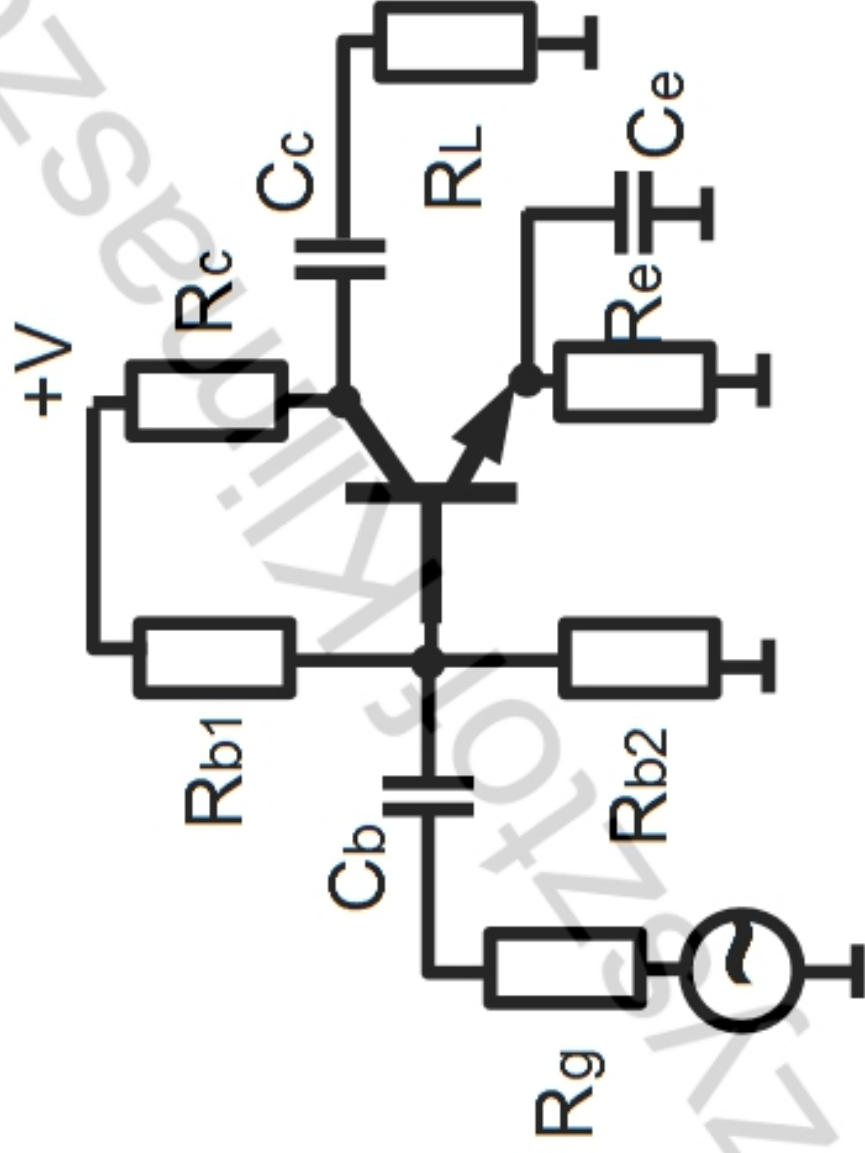
- Napięcie wyjściowe wzmacniacza nie zmienia się z nieograniczoną prędkością
- maksymalna prędkość zmian napięcia na wyjściu (slew rate) podawana w  $V/\mu s$  – parametr wzmacniacza





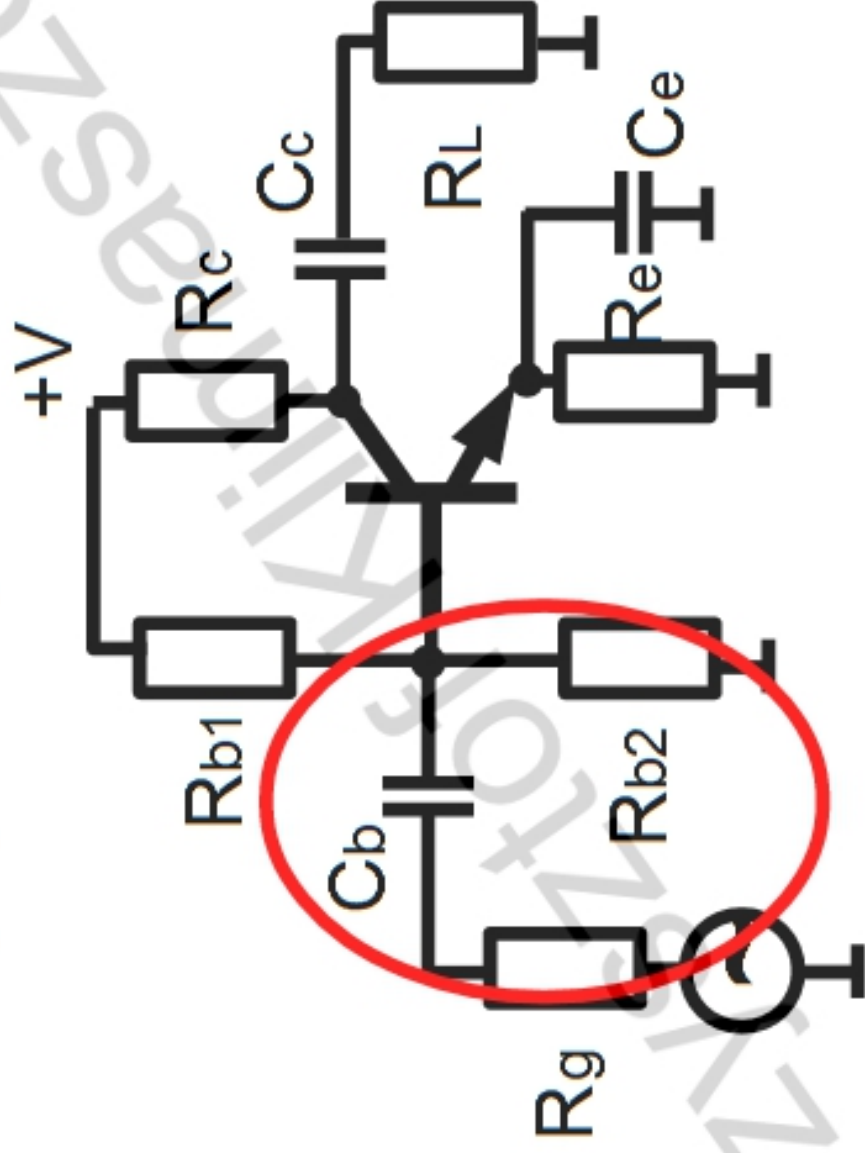
# Wzmacniacz tranzystorowy

- Charakterystyka częstotliwościowa



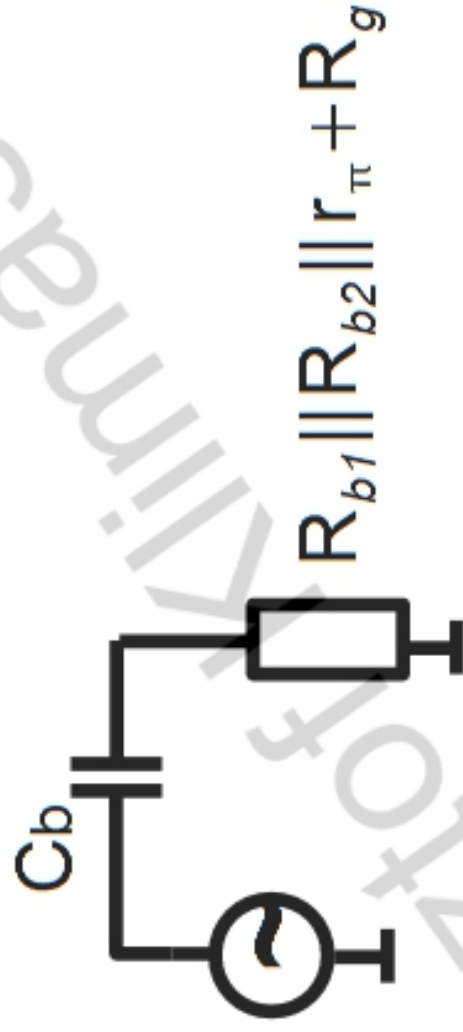
# Wzmacniacz tranzystorowy

- Charakterystyka częstotliwościowa



# Wzmacniacz tranzystorowy

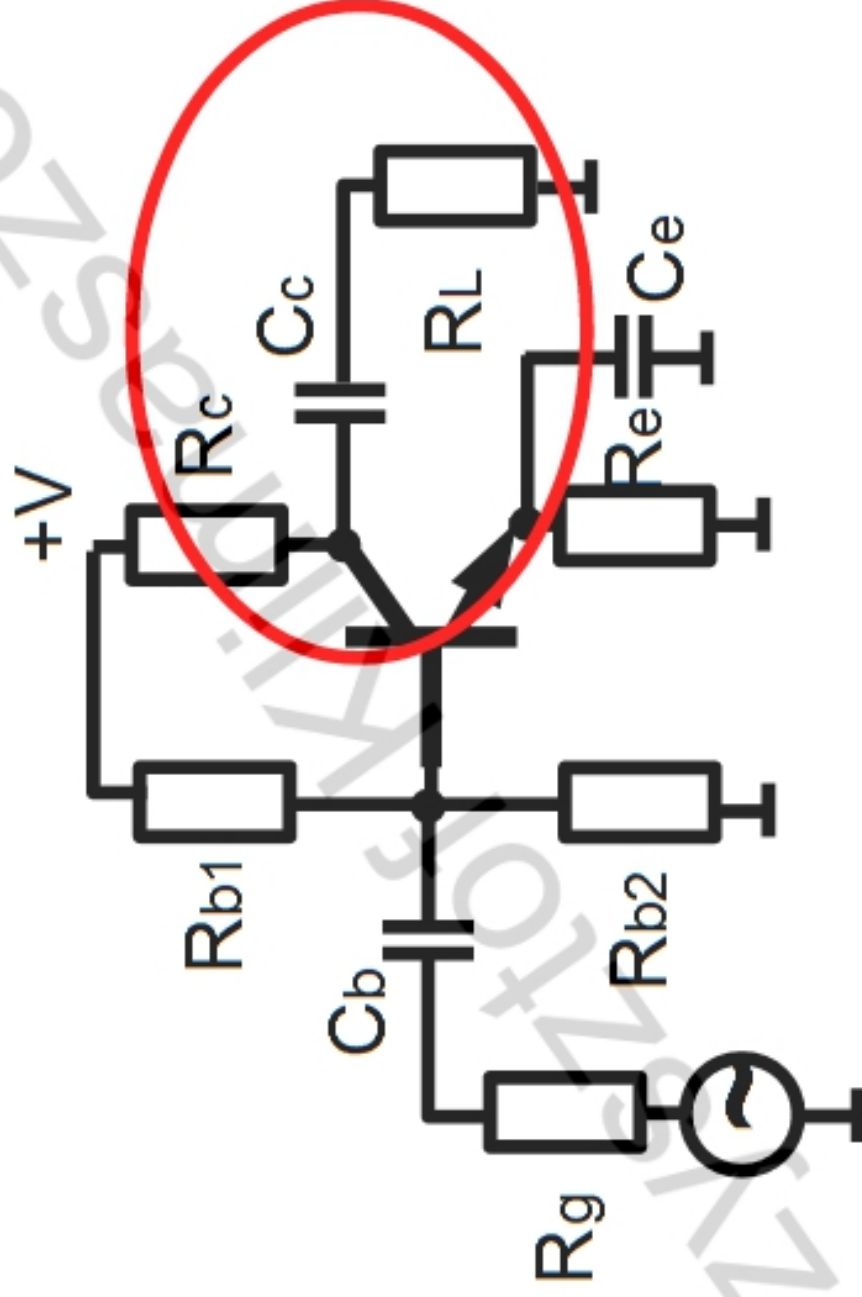
- Charakterystyka częstotliwościowa



$$f_{gr} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

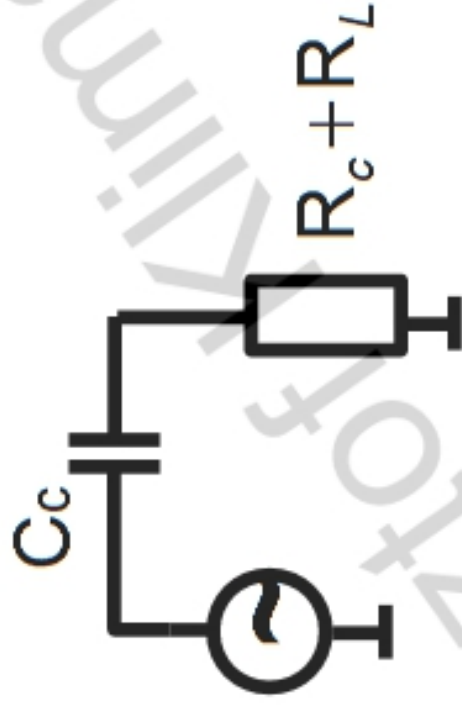
# Wzmacniacz tranzystorowy

- Charakterystyka częstotliwościowa



# Wzmacniacz tranzystorowy

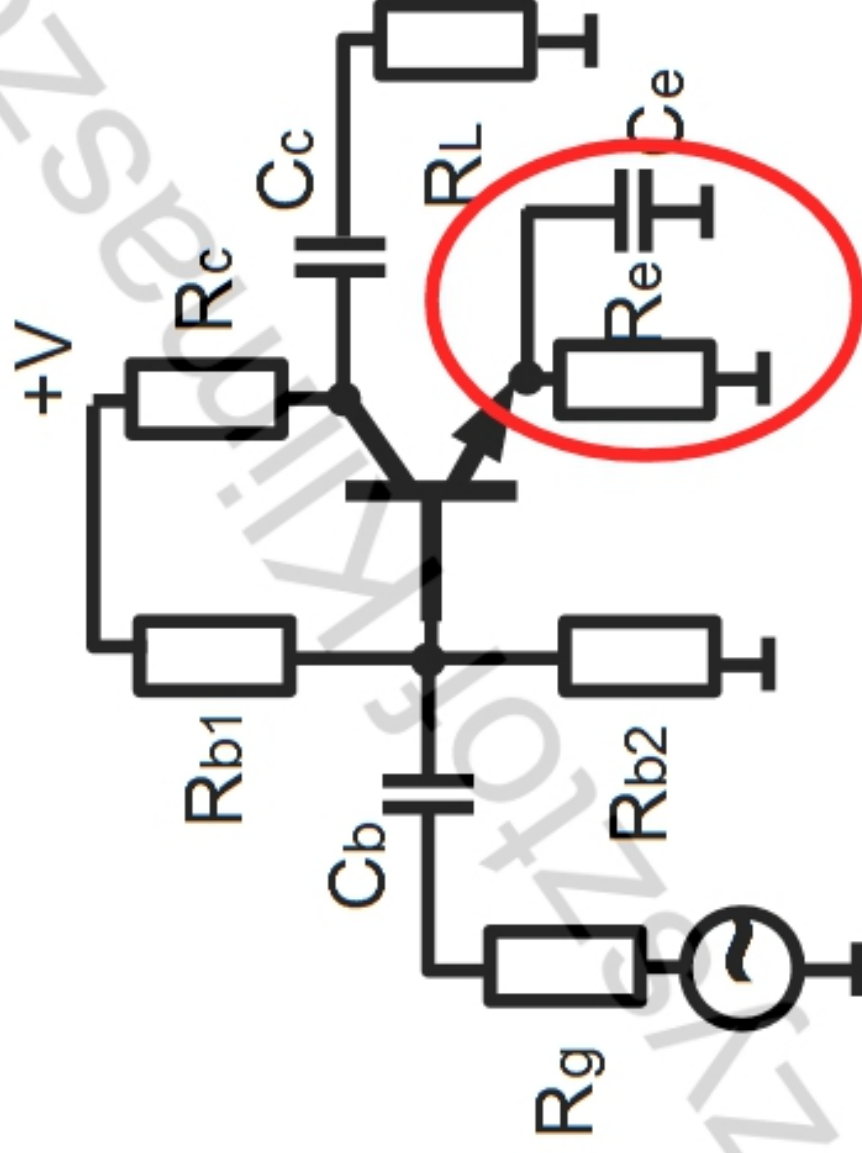
- Charakterystyka częstotliwościowa



$$f_{gr} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

# Wzmacniacz tranzystorowy

- Charakterystyka częstotliwościowa



# Wzmacniacz tranzystorowy

- Charakterystyka częstotliwościowa

$$R_e \parallel \left( r_e + \frac{R_{b1} \parallel R_{b2} \parallel R_g}{\beta + 1} \right)$$



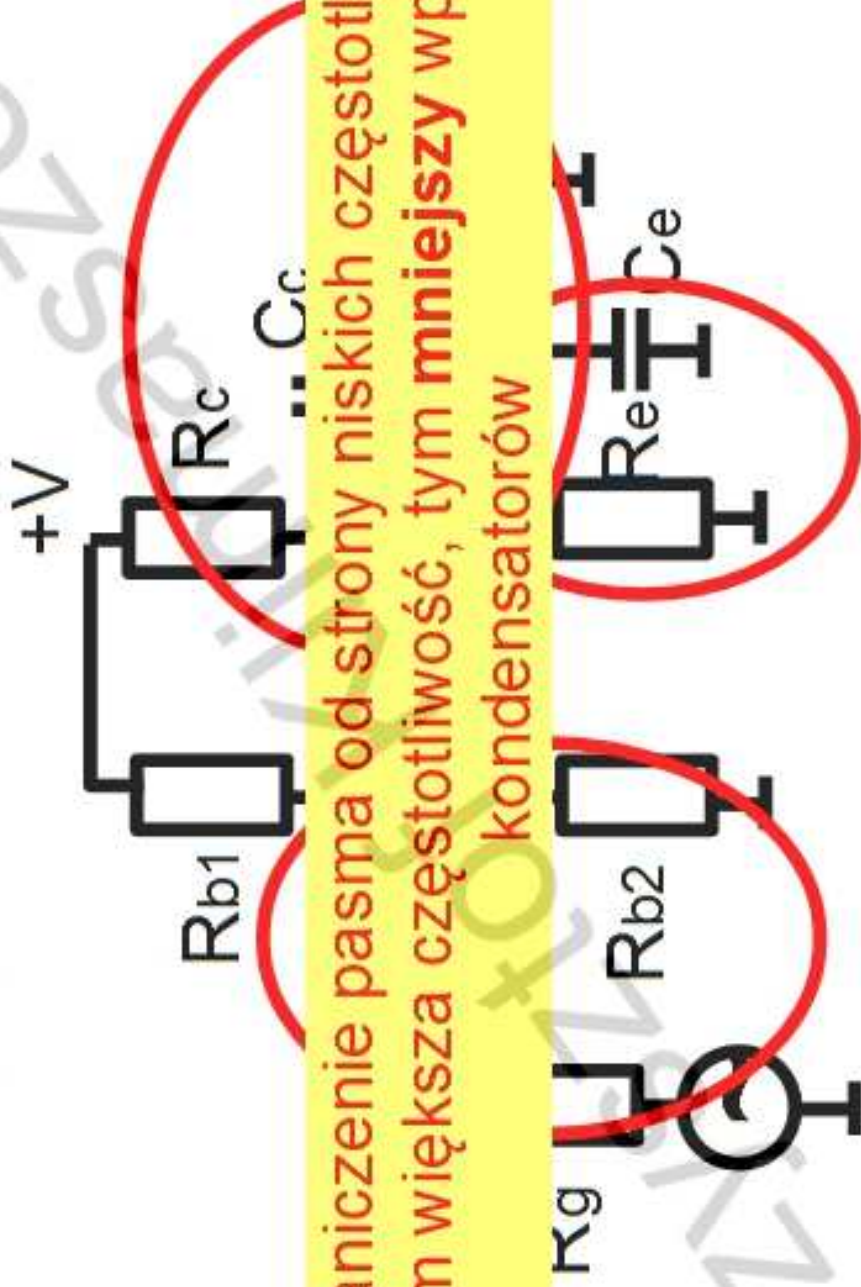
W przypadku tego kondensatora, zależy nam aby napięcie na nim było jak najmniejsze.

Szukamy zatem końca pasma przepustowego.

$$f_{gr} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

# Wzmacniacz tranzystorowy

- Charakterystyka częstotliwościowa



Ograniczenie pasma od strony niskich częstotliwości.  
Im większa częstotliwość, tym **mniejszy** wpływ kondensatorów

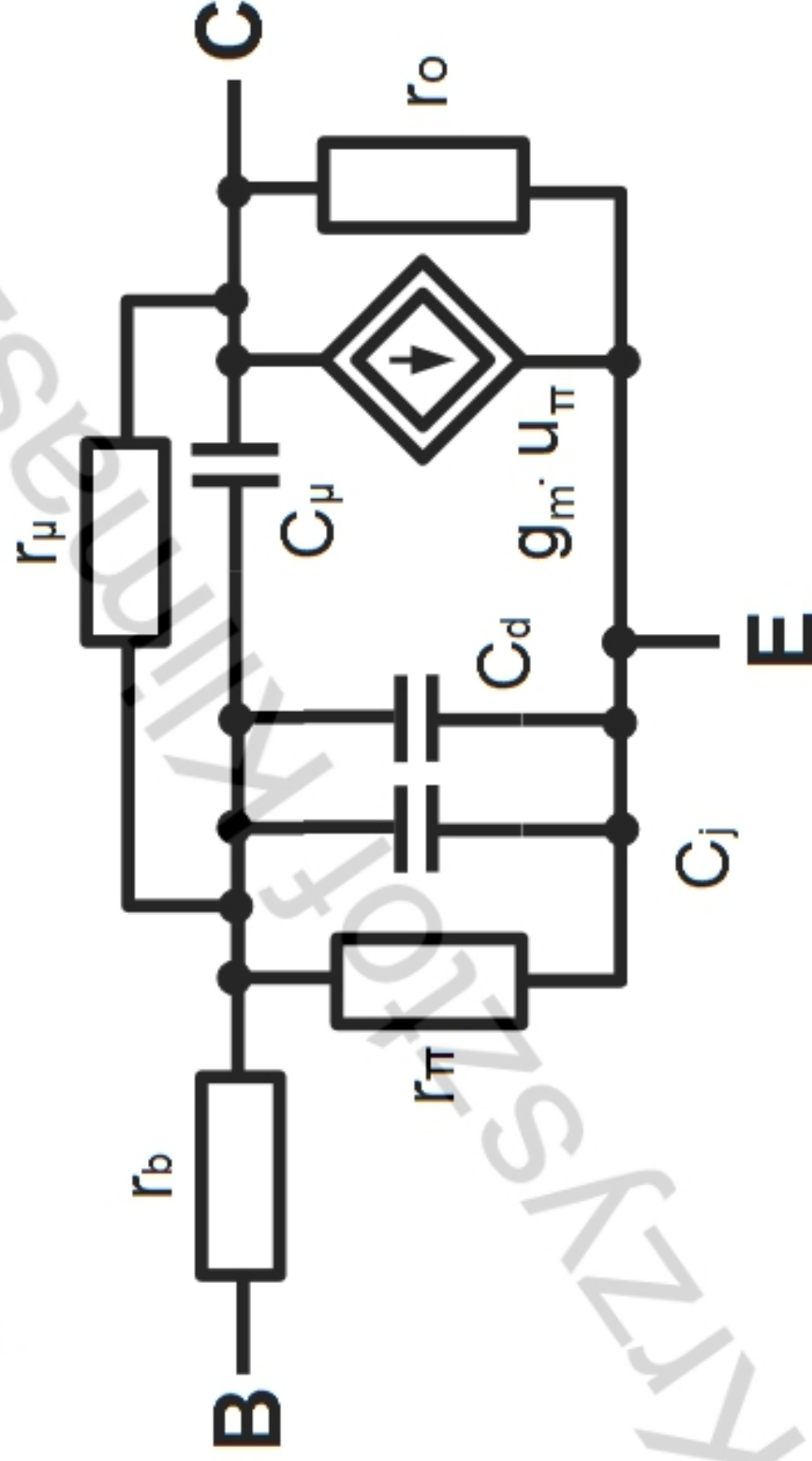


## Wzmacniacz tranzystorowy

- Co ogranicza pasmo od strony wysokich częstotliwości?

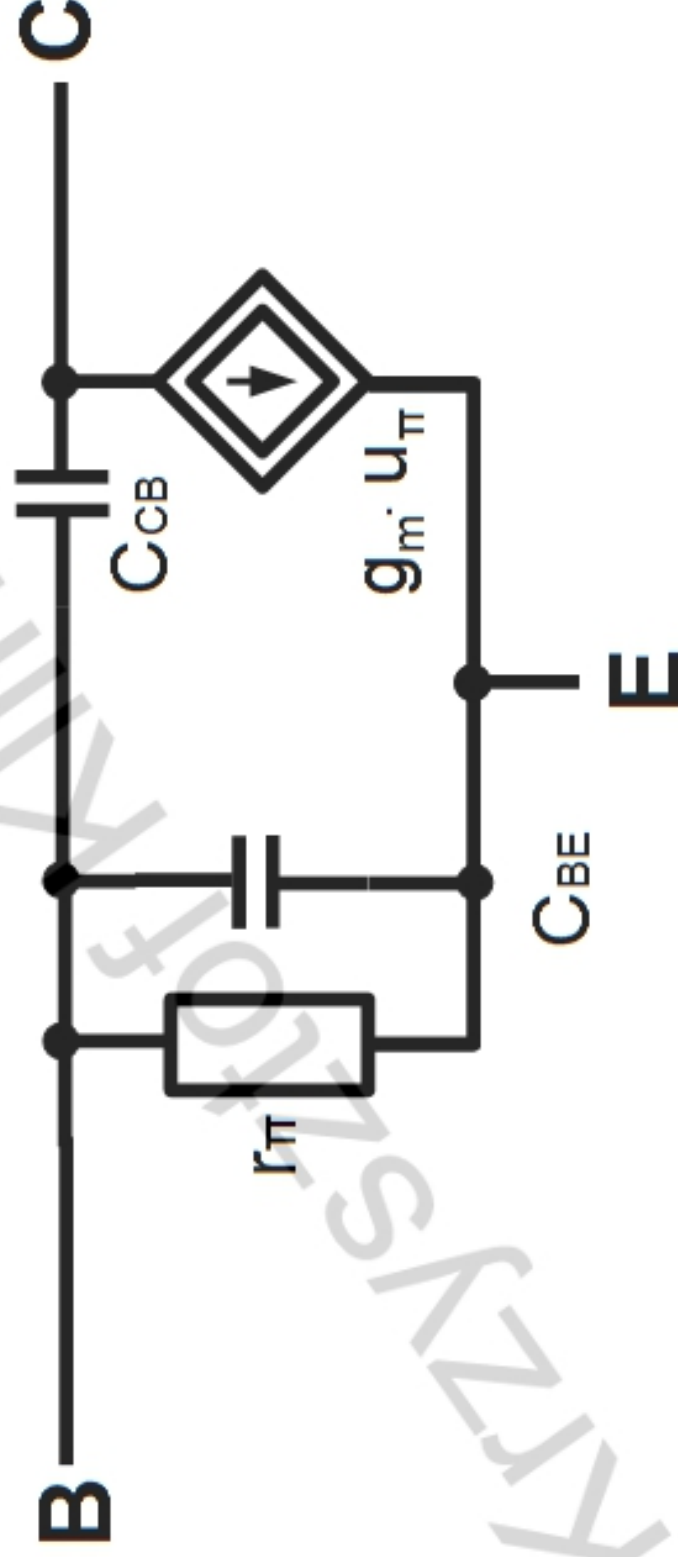
## Wzmacniacz tranzystorowy

- Co ogranicza pasmo od strony wysokich częstotliwości?



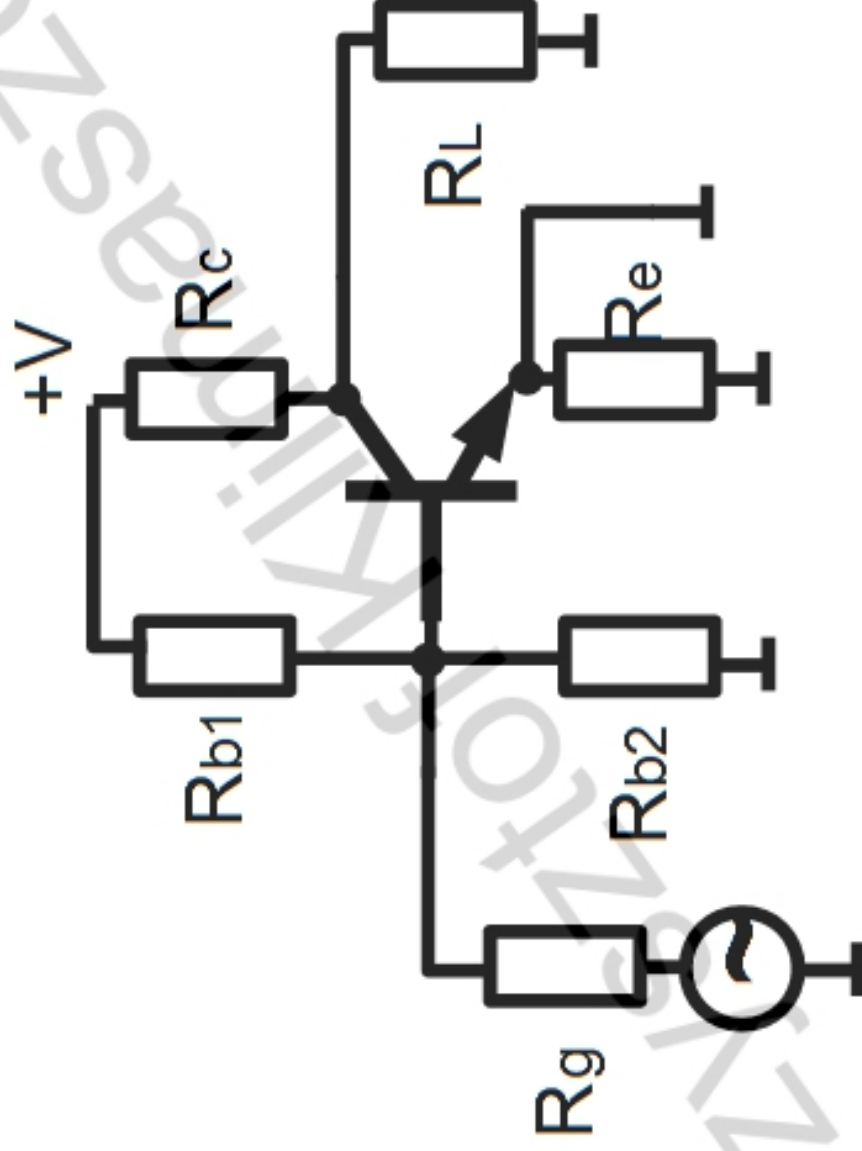
## Wzmacniacz tranzystorowy

- Co ogranicza pasmo od strony wysokich częstotliwości?



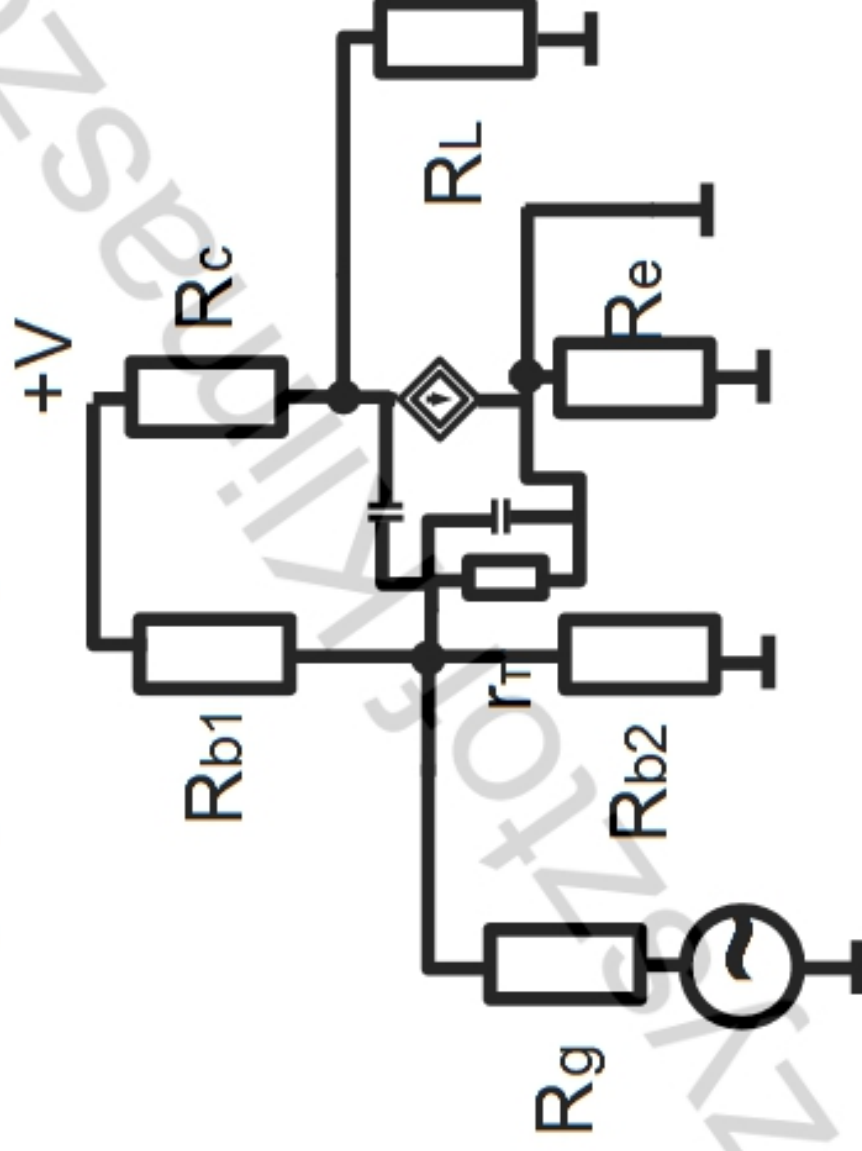
# Wzmacniacz tranzystorowy

- Charakterystyka częstotliwościowa dla dużych  $f$



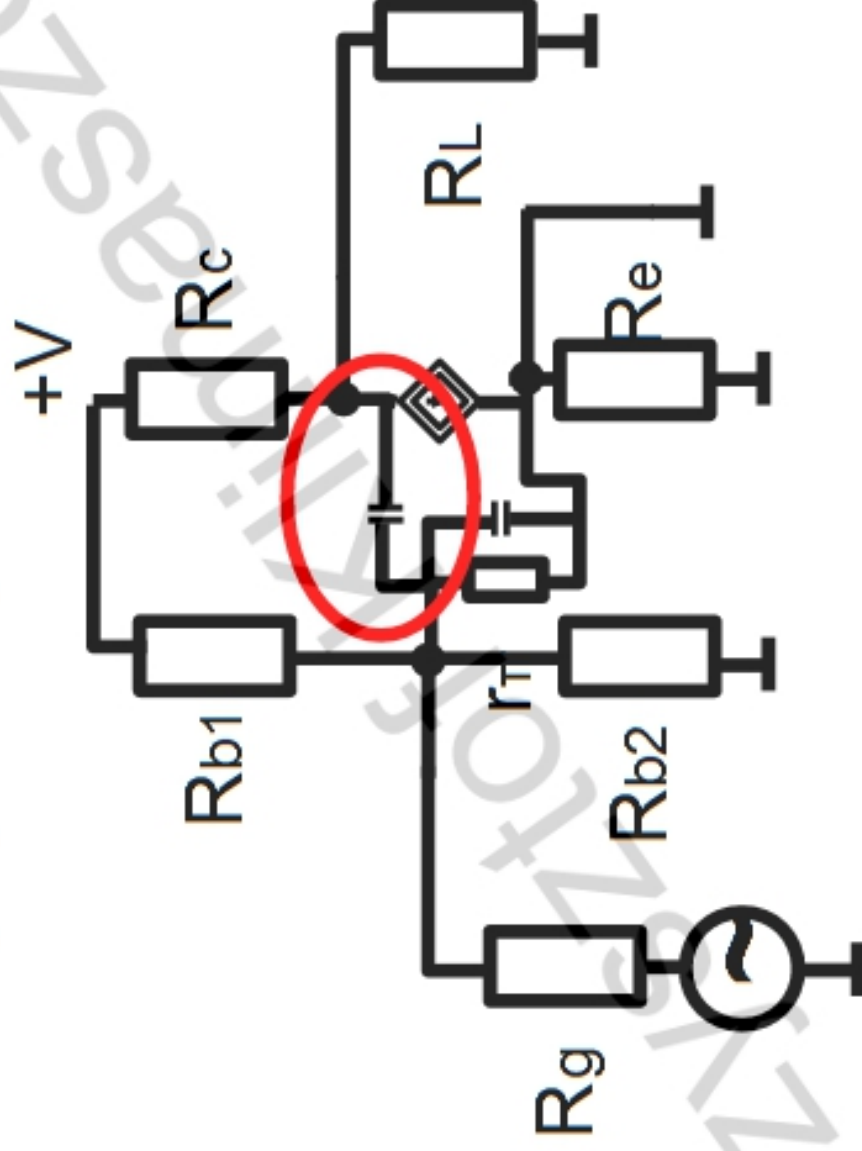
# Wzmacniacz tranzystorowy

- Charakterystyka częstotliwościowa dla dużych  $f$

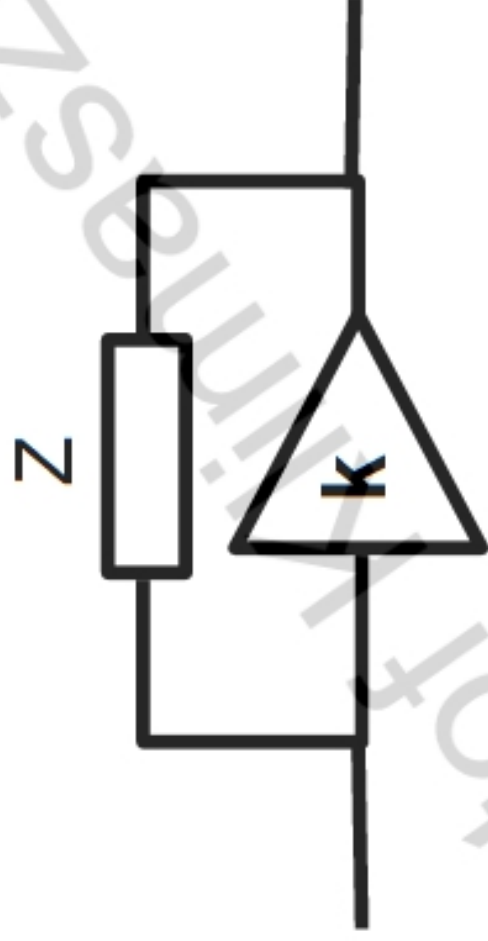


# Wzmacniacz tranzystorowy

- Charakterystyka częstotliwościowa dla dużych  $f$



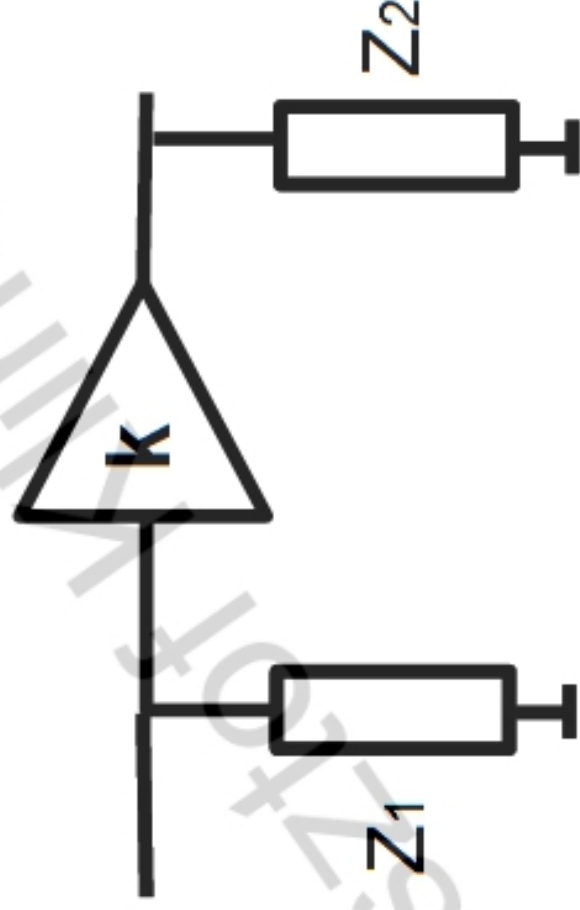
# Twierdzenie Millera



# Twierdzenie Millera

$$Z_1 = \frac{Z}{1 - k}$$

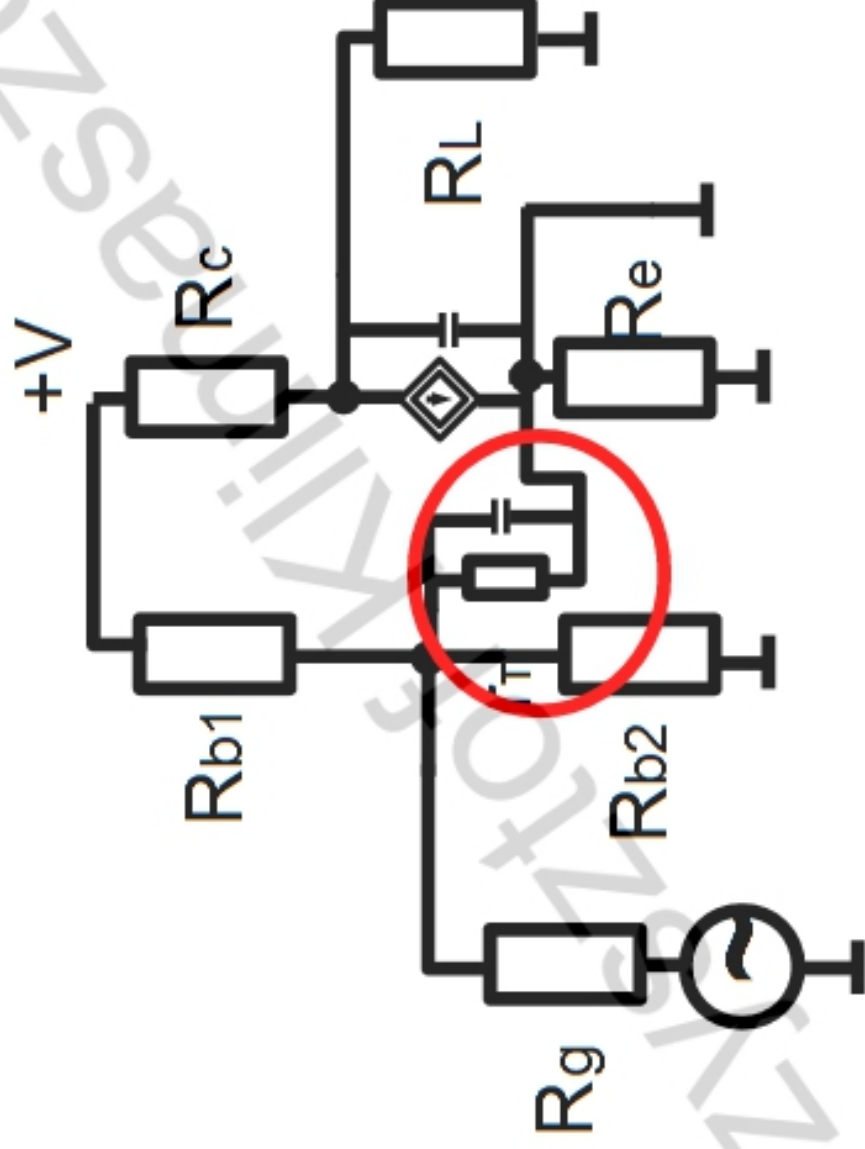
$$Z_2 = Z \cdot \frac{k}{k - 1}$$





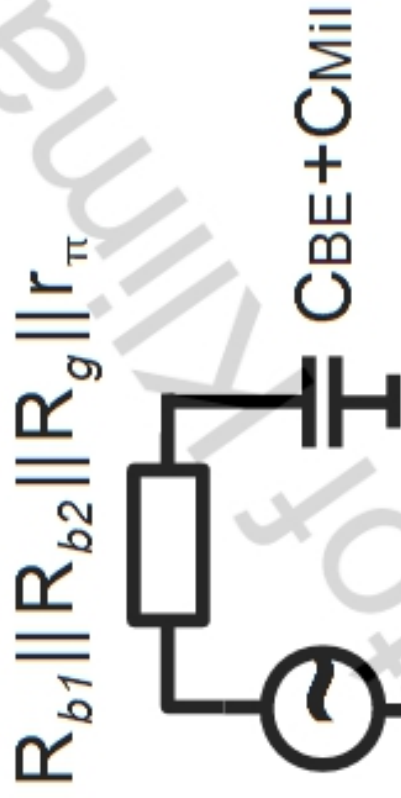
# Wzmacniacz tranzystorowy

- Charakterystyka częstotliwościowa dla dużych f



# Wzmacniacz tranzystorowy

- Charakterystyka częstotliwościowa dla dużych f

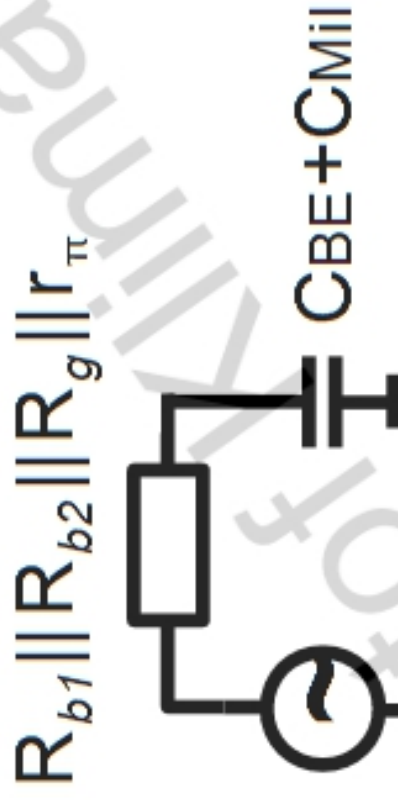


$$C_{MiI} = C_{CB} (1 - k)$$

$$f_{gr} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

# Wzmacniacz tranzystorowy

- Charakterystyka częstotliwościowa dla dużych f



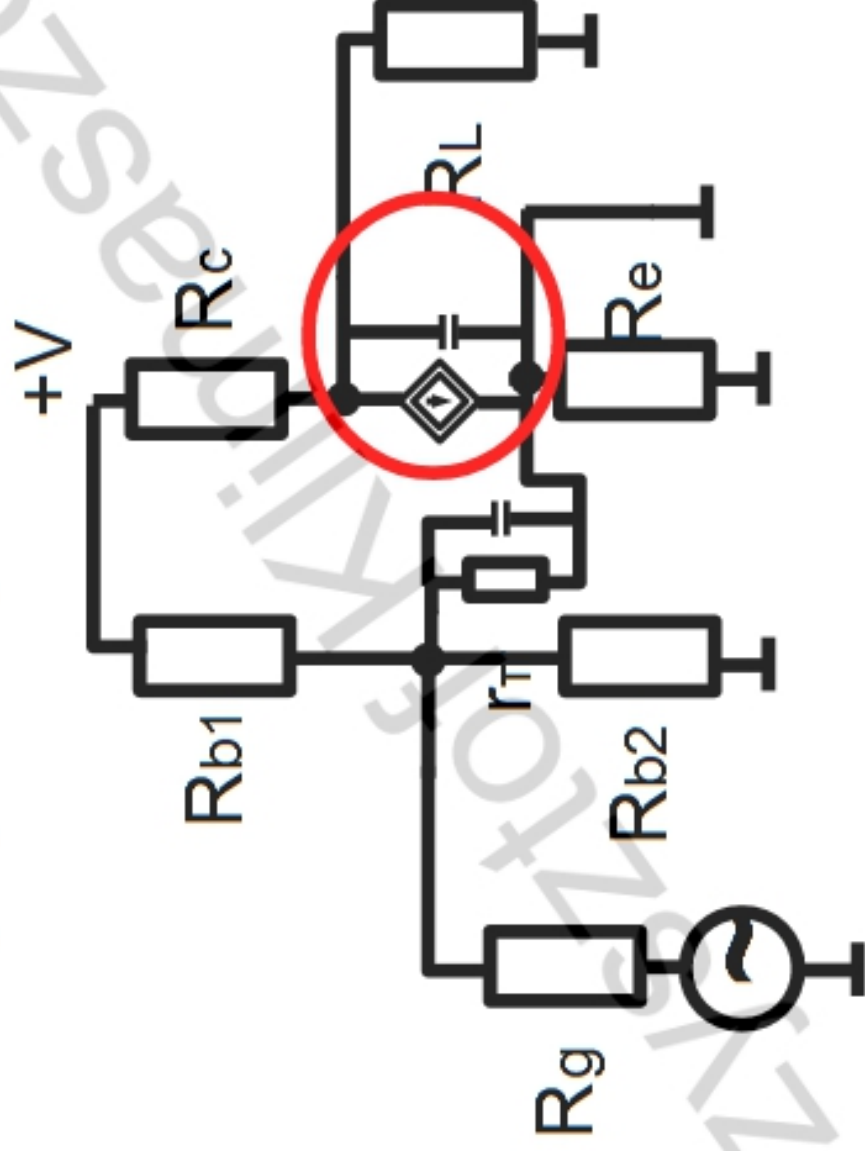
$$k < 0$$

$$C_{MiI} = C_{CB} (1 - k)$$

$$f_{gr} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

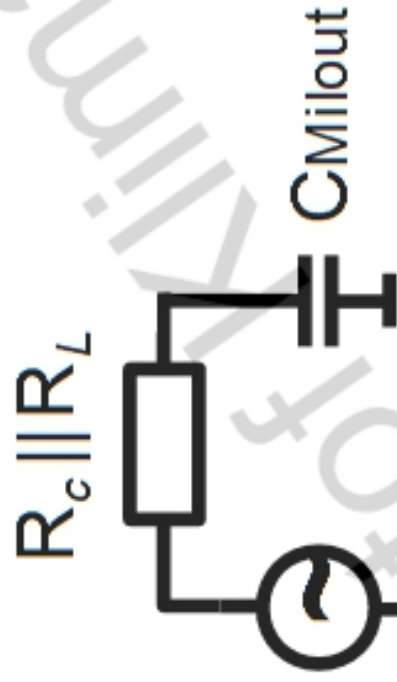
# Wzmacniacz tranzystorowy

- Charakterystyka częstotliwościowa dla dużych  $f$



# Wzmacniacz tranzystorowy

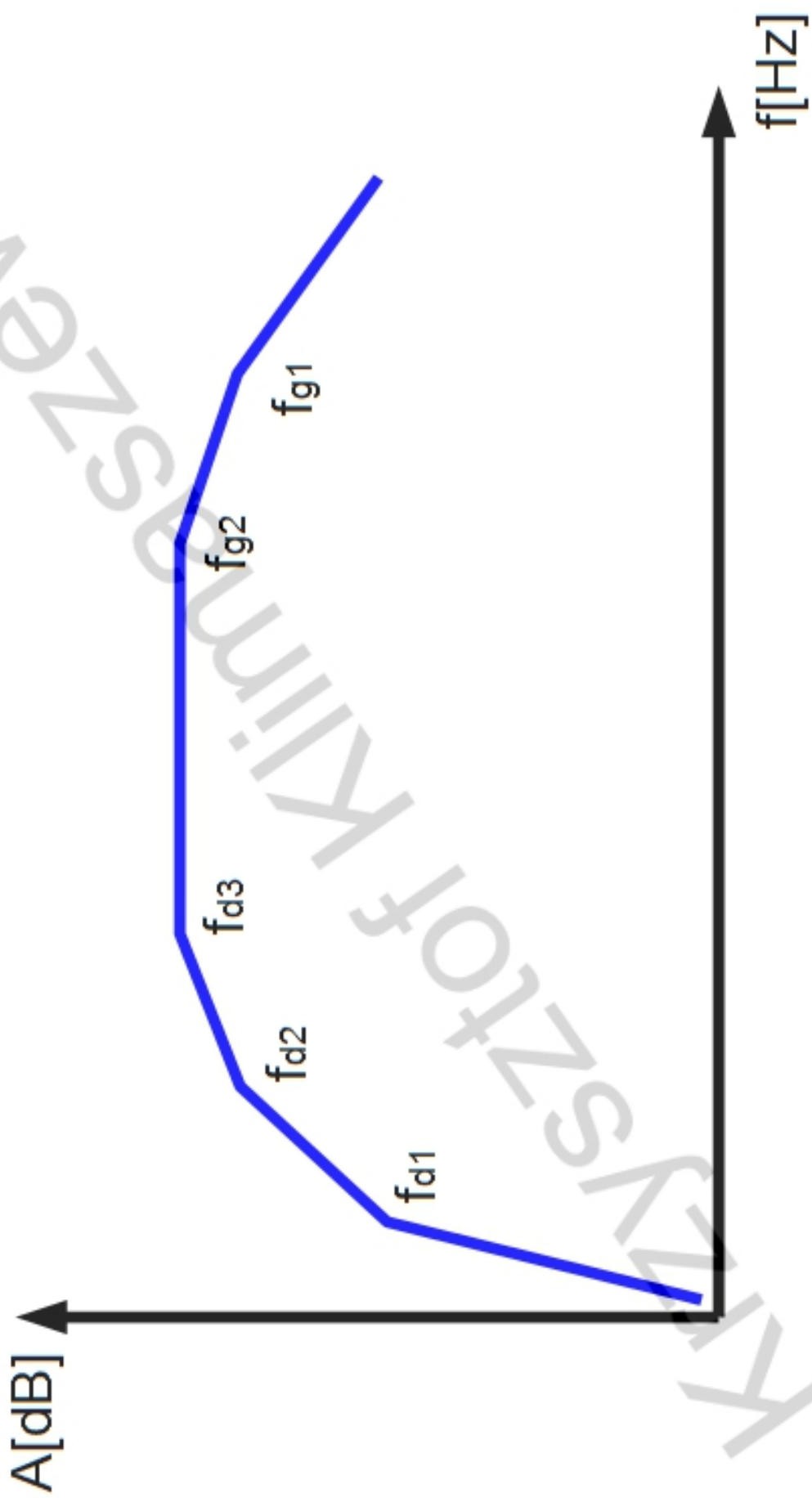
- Charakterystyka częstotliwościowa dla dużych f



$$k < 0$$

$$C_{Milout} = C_{CB} \frac{k-1}{k}$$

$$f_{gr} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$



# pomiar pasma

- Częstotliwość górna

$$U = U_{\max} \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$$



$$f_g = \frac{0,35}{t_r}$$

Czas narastania  
od 10% do 90%

# pomiar pasma

- Częstotliwość dolna

Wielokrotnie większa  
skala czasu niż  
w poprzednim przypadku



$$f_d = \frac{0,35}{t_f}$$

Czas opadania  
od 90% do 10%