



Elementy elektroniczne

dr inż. Piotr Ptaś

Politechnika Rzeszowska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Katedra Podstaw Elektroniki

A-303, pptak@prz.edu.pl, tel. 178651113
konsultacje: pn. – cz. 11-12



Plan wykładu



Tranzystory unipolarne

- Podział i budowa
- Charakterystyki statyczne
- Układy polaryzacji
- Obliczanie punktu pracy

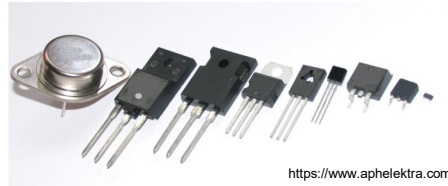


Tranzystory unipolarne



Tranzystor unipolarny (polowy) – transport tylko jednego rodzaju nośników (większościowych) – stąd nazwa unipolarny.

Sterowanie odbywa się za pomocą poprzecznego pola elektrycznego (dlatego polowy) – z ang. FET (Field Effect Transistor).



<https://www.aphelakra.com>

Zasada działania:

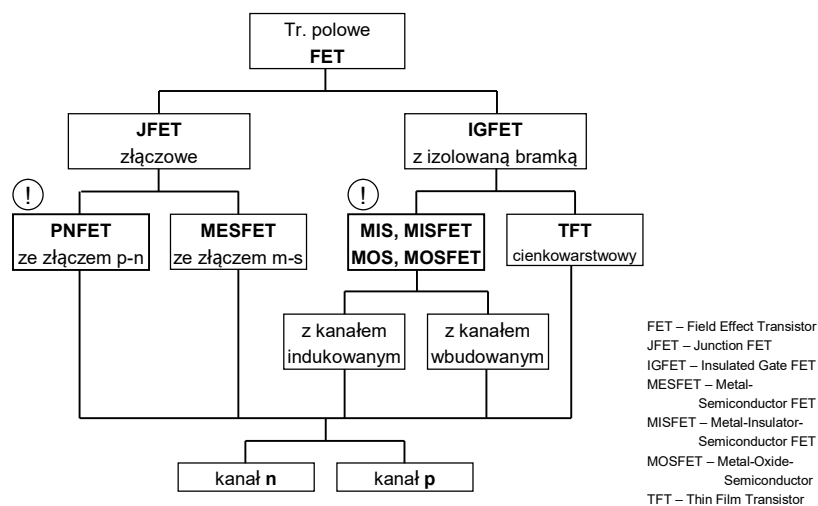
tranzystor polowy jest sterowany napięciem, a dokładnie jest sterowany dzięki tzw. efektowi polowemu – czyli zmianie konduktywności ciała stałego wskutek oddziaływania pola elektrycznego.

Elementy elektroniczne I – tranzystory unipolarne

3



Tranzystory unipolarne - podział



Elementy elektroniczne I – tranzystory unipolarne

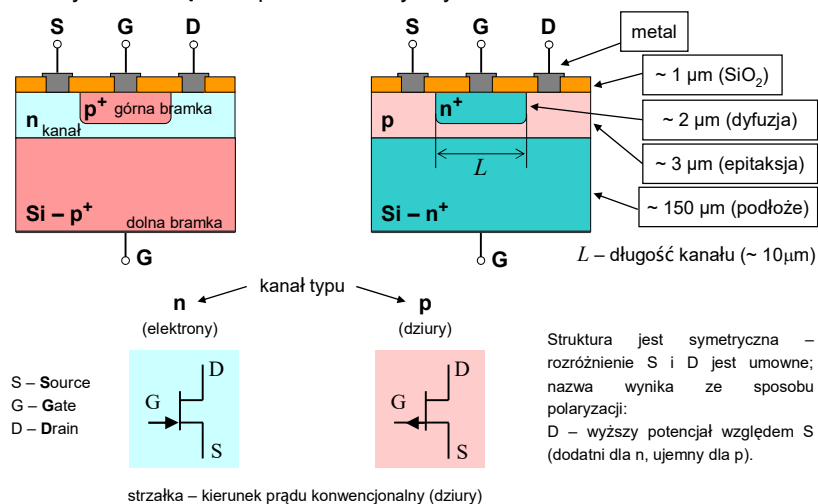
4



Tranzystor złączowy PNJFET (JFET)



Tranzystor ze złączem p-n – struktury i symbole



Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNJFET

5

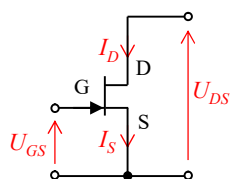


Tranzystor złączowy PNJFET



Tranzystor ze złączem p-n – oznaczanie prądów i napięć

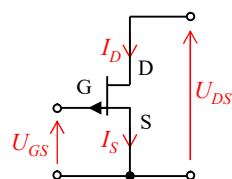
Tranzystor z kanałem typu n



$$I_G \approx 0$$
$$I_D \approx I_S$$

$$U_{GS} < 0$$
$$U_{DS} > 0$$

Tranzystor z kanałem typu p



$$U_{GS} > 0$$
$$U_{DS} < 0$$

W stanie ustalonym prąd bramki jest, praktycznie biorąc, równy zeru.

Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNJFET

6



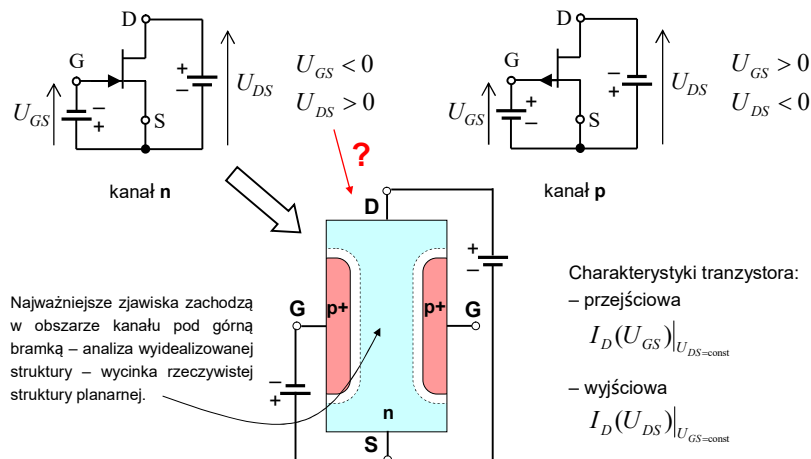
Tranzystor złączowy PNFET - polaryzacja

KPE



Tranzystor pracuje tylko przy zaporowej polaryzacji złącza bramka-kanal –

– jeden sposób polaryzacji tranzystora.



Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

7

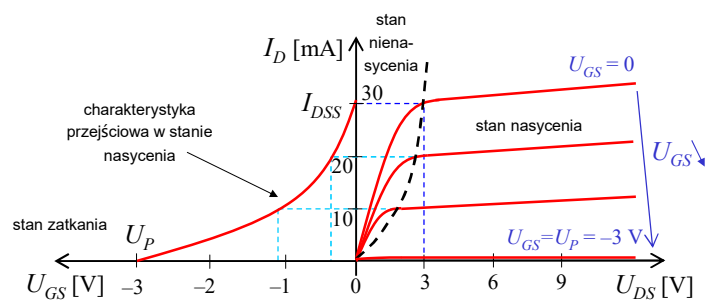


Tranzystor PNFET – ch-ki statyczne

KPE



Charakterystyki statyczne – kanał typu n



Stany pracy tranzystora

- nieprzewodzenia (zatkania): $|U_{GS}| > |U_p|$, U_{DS} – dowolne
- nienasylenia: $|U_{GS}| < |U_p|$ i $|U_{DS}| \leq |U_{Dsat}|$
- nasycenia: $|U_{GS}| < |U_p|$ i $|U_{DS}| > |U_{Dsat}|$

Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

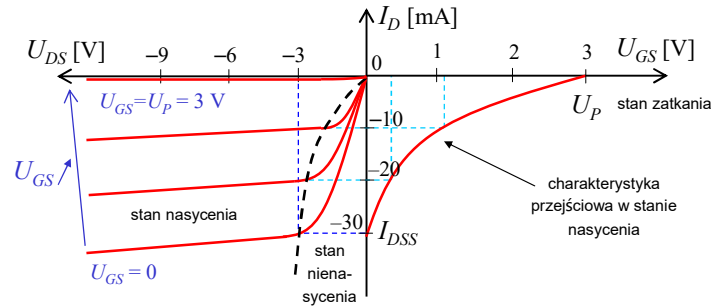
8



Tranzystor PNFET – ch-ki statyczne



Charakterystyki statyczne – kanał typu p



Stany pracy tranzystora

- nieprzewodzenia (zatkania): $|U_{GS}| > |U_P|$, U_{DS} – dowolne
- nienasycenia: $|U_{GS}| < |U_P|$ i $|U_{DS}| \leq |U_{Dsat}|$
- nasycenia: $|U_{GS}| < |U_P|$ i $|U_{DS}| > |U_{Dsat}|$

Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

9



Tranzystor PNFET – ch-ki statyczne

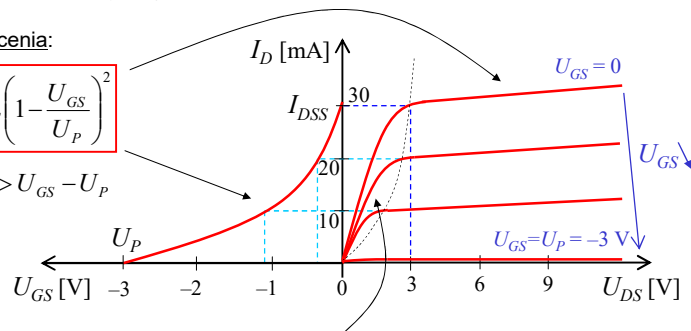


Równania charakterystyk statycznych – kanał typu n: $I_D = I_{DSS} = \text{const}$
(analogicznie dla kanału typu p)

Stan nasycenia:

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

dla $U_{DS} > U_{GS} - U_P$



Stan nienasycenia: (zakres liniowy)

$$I_D = G_0 \left(1 - \sqrt{\frac{U_{GS}}{U_P}} \right) U_{DS}$$

dla $U_{DS} < U_{GS} - U_P$

$$G_0 = \frac{qaW\mu_n N_d}{L}$$

– konduktancja kanału

Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

10

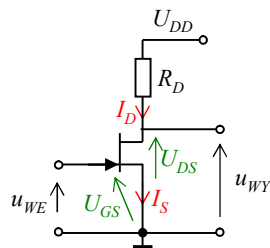


Punkt pracy tranzystora – wzmacniacz WS

KPE



Obliczenie punktu pracy tranzystora (I_D , U_{DS}) – w stanie nasycenia



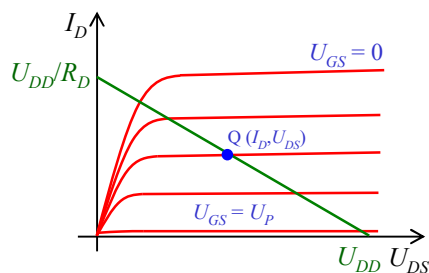
U_{GS} – z oczka

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

Prosta pracy: $U_{DD} - I_D R_D - U_{DS} = 0$

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D R_D$$

$$I_D = -\frac{1}{R_D} \cdot U_{DS} + \frac{U_{DD}}{R_D}$$



Elementy elektroniczne I – tranzystor złączowy PNFET

11

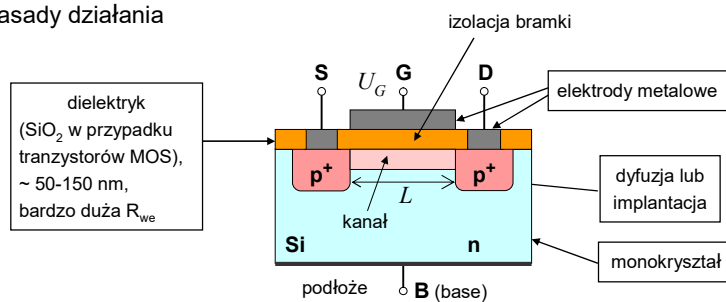


Tranzystory z izolowaną bramką IGFET

KPE



Zasady działania



Kanał – obszar przypowierzchniowy pod warstwą dielektryka, przez który płynie prąd od S do D.

L – długość kanału (~ kilka-kilkadziesiąt μm)

Przewodność kanału jest sterowana poprzecznym polem elektrycznym (napięciem U_G), które działa poprzez warstwę dielektryka, izolującą kanał od bramki.

Elementy elektroniczne I – tranzystory MOSFET

12

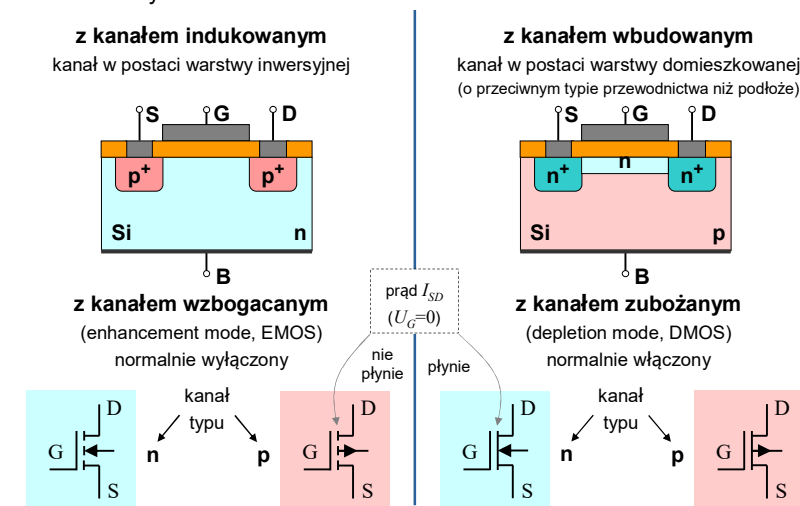


Tranzystory z izolowaną bramką MOSFET

KPE



Podział tranzystorów



Elementy elektroniczne I – tranzystory MOSFET

13

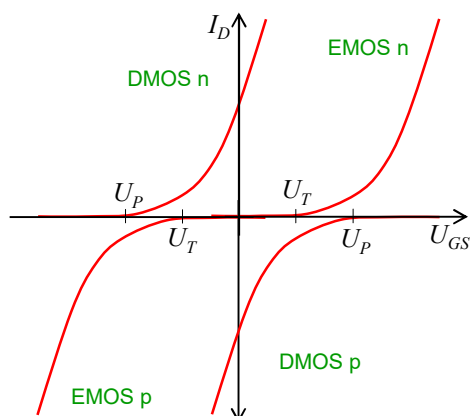


Charakterystyki przejściowe

KPE



Statyczne ch-ki przejściowe tranzystorów MOSFET w stanie nasycenia



Stan nasycenia:

EMOS:

$$I_D = K(U_{GS} - U_T)^2$$

$K [A/V^2]$

DMOS
(PNFET):

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

Elementy elektroniczne I – tranzystory MOSFET

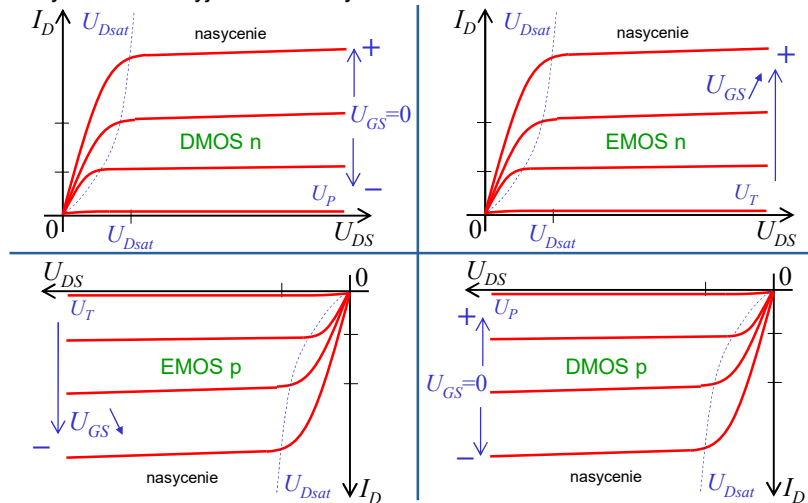
14



Charakterystyki wyjściowe



Statyczne ch-ki wyjściowe tranzystorów MOSFET



Elementy elektroniczne I – tranzystory MOSFET

15



Zakresy pracy tranzystorów polowych

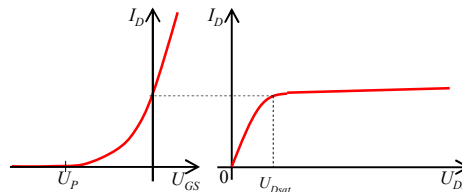


Napięcie progowe

PNFET, DMOS: U_P

EMOS: $U_P = U_T$

$$U_{Dsat} = U_{GS} - U_P$$



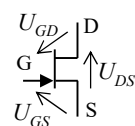
Stan nienasycenia		Stan nasycenia		Stan odcięcia	
n	p	n	p	n	p
$U_{GS} > U_P$	$U_{GS} < U_P$	$U_{GS} > U_P$	$U_{GS} < U_P$	$U_{GS} < U_P$	$U_{GS} > U_P$
$U_{GD} > U_P$	$U_{GD} < U_P$	$U_{GD} < U_P$	$U_{GD} > U_P$		

Przykład – PNFET n

St. N: $U_{DS} > U_{Dsat}$

$$U_{DS} > U_{GS} - U_P \Rightarrow U_P > U_{GS} - U_{DS} = U_{GD}$$

$$U_{GD} = U_{GS} - U_{DS}$$



Elementy elektroniczne I – tranzystory MOSFET

16



Układy polaryzacji tranzystorów polowych

KPE

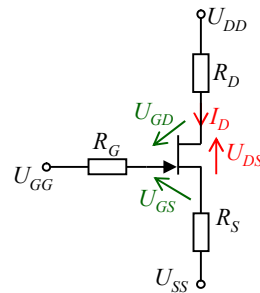


Analityczne oszacowanie stałości p.p. jest utrudnione z dwóch powodów:

- równanie ch-ki przejściowej jest funkcją kwadratową – złożone zależności na współczynniki stabilizacji,
- zależności I_{DSS} , K , U_p , $U_T = f(T)$ są złożone i w dużym stopniu zależą od właściwości materiałowych i technologicznych.

Ogólny układ polaryzacji –

dla dowolnego tranzystora polowego – można do niego sprowadzić wiele innych układów polaryzacji



Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów polowych

17



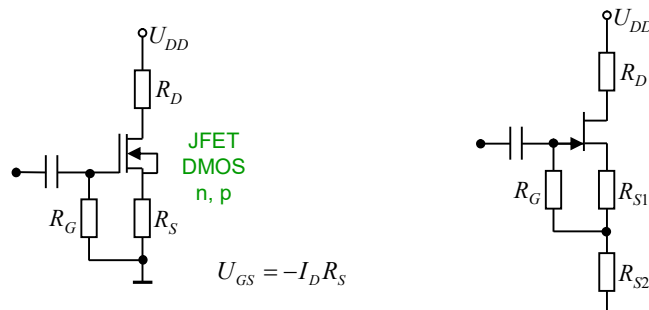
Układy polaryzacji tranzystorów polowych

KPE



Układ z automatyczną polaryzacją bramki – JFET, DMOS

- ujemne prądowe sprzężenie zwrotne w obwodzie źródła –
- punkt pracy w znacznym stopniu nie zależy od zmian parametrów tranzystora
- I_D nie zależy od U_{DD} i R_D – zastosowanie jako źródło prądowe



Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów polowych

18

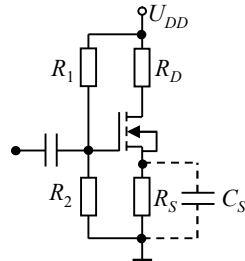


Układy polaryzacji tranzystorów polowych

KPE

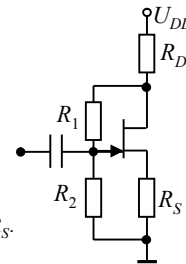


Układ z potencjometrycznym zasilaniem bramki – dowolny tranzystor



- układ posiada automatyczną polaryzację bramki,
- unika się sytuacji, w której wymagana jest duża wartość R_S (ze względu na stabilność punktu pracy), co powoduje duże U_{GS} ,
- C_S eliminuje sprzężenie zwrotne dla sygnału zmiennego.

Układ ze sprzężeniem drenowym



Nie ma konieczności stosowania dużych R_S .

Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów polowych

19



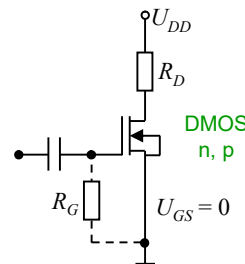
Układy polaryzacji tranzystorów polowych

KPE



Układ umożliwiający pełne wykorzystanie dużej R_{WE} – tylko dla tr. DMOS

(nie wymaga wstępnej polaryzacji bramki: $U_{GS} = 0$)



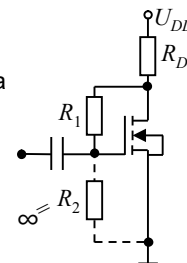
DMOS
n, p

R_G – służy odprowadzaniu ładunków zbierających się elektrostatycznie w bramce (niebezpieczeństwo przebicia dielektryka)

Układ wymuszający stan nasycenia

$$R_2 = \infty \Rightarrow U_{GS} = U_{DS}$$

– tranzystor pracuje w stanie nasycenia



Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów polowych

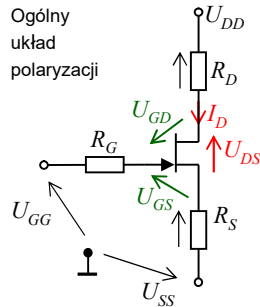
20



Obliczanie punktu pracy tr. polowych

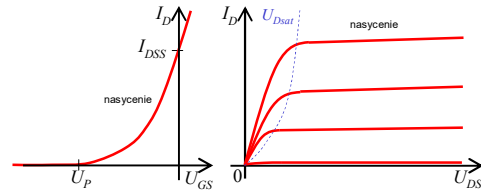


Tranzystor w stanie nasycenia! (punkt pracy: I_D , U_{DS})



- ① Założenie: tranzystor w st. N,
 $I_G = 0$, $I_D = I_S$

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



② U_{GS} : $U_{GG} - U_{GS} - I_D R_S - U_{SS} = 0$
 $U_{GG} - U_{GS} - I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2 R_S - U_{SS} = 0$
 – równanie kwadratowe

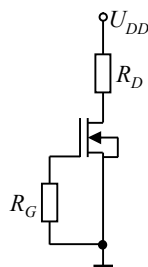
$U_{GS1} \vee U_{GS2} ? \rightarrow I_D$ ③

④ U_{DS} : $U_{DD} - I_D R_D - U_{DS} - I_D R_S - U_{SS} = 0$

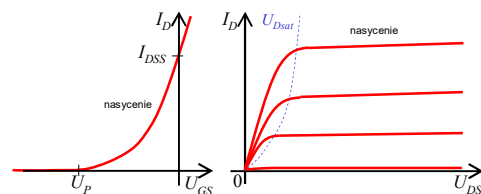
⑤ Weryfikacja st. N: $U_{GD} \leq U_P ?$



Obliczanie punktu pracy tr. polowych



Układ umożliwiający pełne wykorzystanie dużej R_{WE}



Założenie: tranzystor w st. N,
 $I_G = 0$, $I_D = I_S$

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

$$U_{GS} = 0$$

$$I_D = I_{DSS}$$

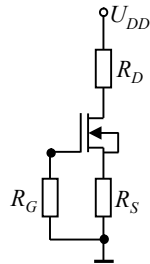
$$U_{DS} = U_{DD} - I_D R_D$$

$$U_{GD} \leq U_P ?$$



Obliczanie punktu pracy tr. polowych

KPE



Układ z automatyczną polaryzacją bramki

Założenie: tranzystor w st. N,

$$I_G = 0, I_D = I_S$$

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

$$U_{GS} = -I_D R_S$$

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

$$U_{GS1} \vee U_{GS2} ? \rightarrow I_D$$

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D (R_D + R_S)$$

$$U_{GD} \leq U_P ?$$

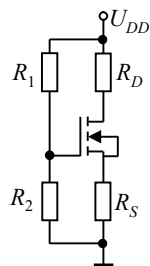
Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów polowych

23



Obliczanie punktu pracy tr. polowych

KPE



Układ z potencjometrycznym zasilaniem bramki

Założenie: tranzystor w st. N,

$$I_G = 0, I_D = I_S$$

$$I_D = K (U_{GS} - U_T)^2 \quad K [A/V^2]$$

$$U_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - U_{GS} - I_D R_S = 0$$

$$U_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - U_{GS} - K (U_{GS} - U_T)^2 R_S = 0$$

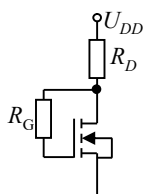
$$U_{GS1} \vee U_{GS2} ? \rightarrow I_D$$

$$U_{DS} = U_{DD} - I_D (R_D + R_S)$$

$$U_{GD} \leq U_P ?$$

Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów polowych

24



Układ wymuszający stan nasycenia

Założenie: tranzystor w st. N,

$$I_G = 0, I_D = I_S$$

$$I_D = K(U_{GS} - U_T)^2 \quad K [A/V^2]$$

$$U_{GS} = U_{DS}, \quad U_{GD} = 0$$

$$U_{DD} - I_D R_D - U_{GS} = 0$$

$$U_{DD} - K(U_{GS} - U_T)^2 R_D - U_{GS} = 0 \quad \vee$$

$$I_D = K(U_{DD} - I_D R_D - U_T)^2 \rightarrow I_{D1} \vee I_{D2}$$