



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



Politechnika
Świętokrzyska

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Materiały dydaktyczne pomocnicze i informacyjne do przedmiotu

PODSTAWY ELEKTRONIKI

Część II: „Badania laboratoryjne elementów i układów elektronicznych”,

zrealizowana w ramach zadania nr 9 projektu:

**„Program Rozwojowy Potencjału Dydaktycznego Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach: kształcenie na miarę sukcesu.”,
nr umowy: UDA-POKL 04.01.01. – 175/08-00.**

Ćwiczenie 5: Badanie tranzystorów polowych złączowych JFET.

dr inż. Marek Fijałkowski

**Katedra Elektroniki i Systemów Inteligentnych
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej
Al. 1000-lecia P.P. 7, 25-314 Kielce
tel.: +48 41 34 24 203, e-mail: m.fijałkowski@tu.kielce.pl**



Spis treści

1. Wstęp teoretyczny

1.1. Budowa i zasada działania tranzystora polowego złączowego

1.2. Układy pracy tranzystora

1.3. Charakterystyki tranzystora w układzie wspólne źródło

1.4. Parametry tranzystora polowego złączowego

2. Przebieg ćwiczenia laboratoryjnego

2.1. Cel ćwiczenia

2.2. Wyznaczanie charakterystyk tranzystora polowego złączowego

2.3. Opracowanie wyników pomiarów

3. Symulacje charakterystyk tranzystora



1. Wstęp teoretyczny

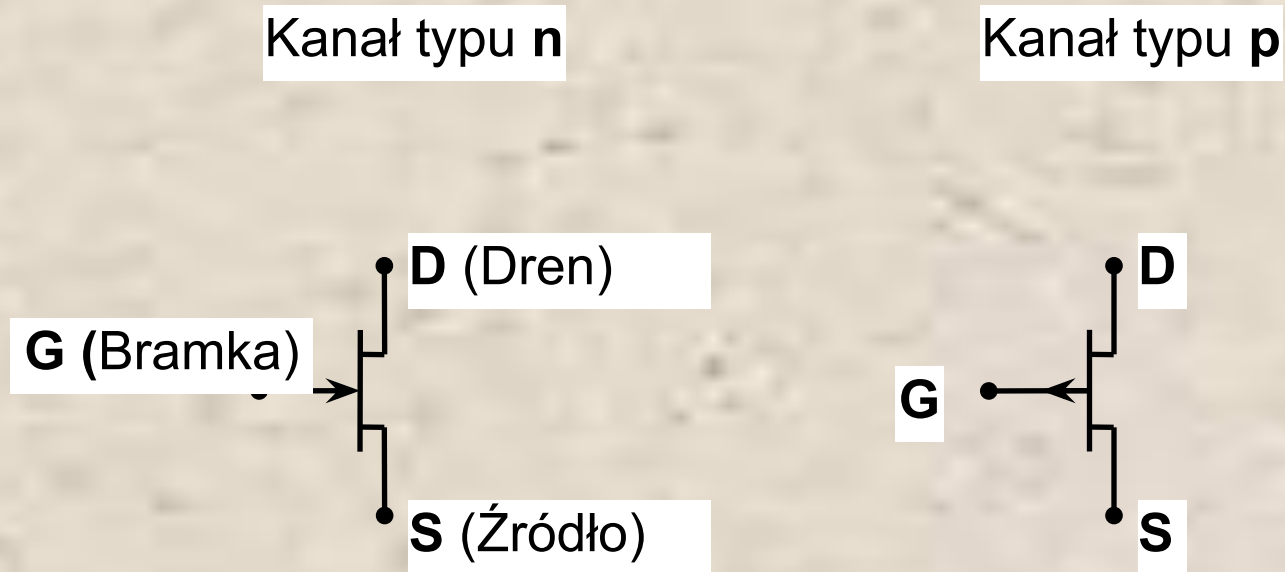
Tranzystory unipolarne (polowe) stanowią obok tranzystorów bipolarnych drugą ważną klasę elementów elektronicznych. Przewodzenie prądu w tych tranzystorach oparte jest tylko na jednym rodzaju nośników większościowych, stąd nazwa unipolarne. Wspólną cechą wszystkich tranzystorów unipolarnych jest oddziaływanie pola elektrycznego na rezystancję półprzewodnika, stąd nazwa polowe. Tranzystory unipolarne są sterowane napięciowo – napięciem U_{GS} .

Do grupy tranzystorów unipolarnych należą:

- tranzystory unipolarne złączowe (JFET) ;
- tranzystory unipolarne z izolowaną bramką (IGFET) ;

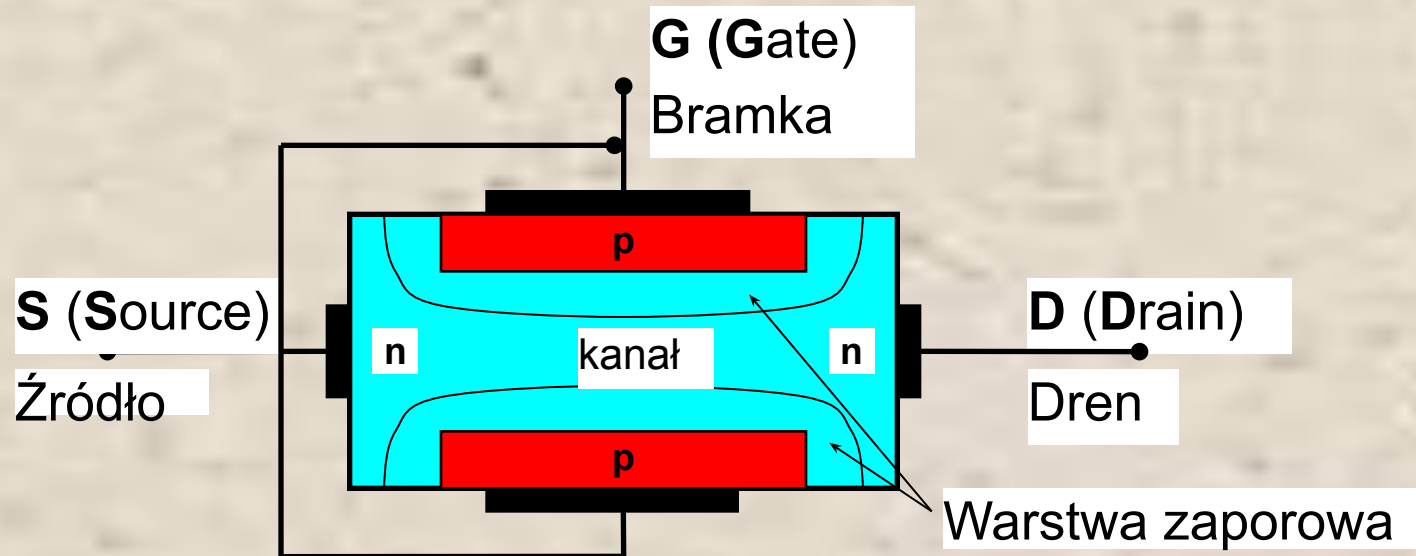
Tranzystory unipolarne złączowe dzielą się na dwa rodzaje :

- z kanałem typu **p**
- z kanałem typu **n**.



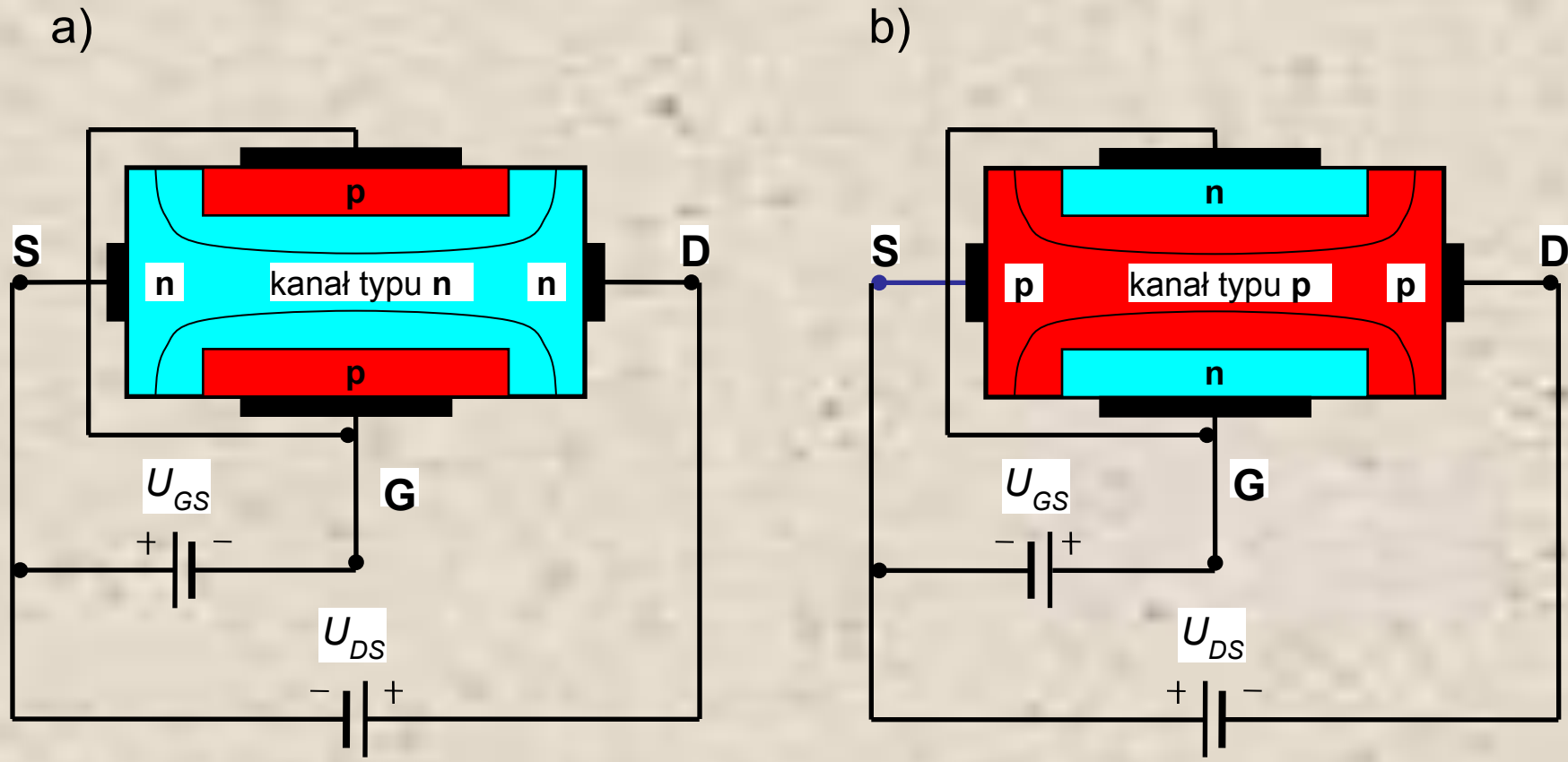
Rys. 1. Oznaczenie graficzne tranzystora unipolarnego złączowego.
a) z kanałem typu n, b) z kanałem typu p

1.1. Budowa i zasada działania tranzystora polowego złączowego



Rys. 2. Budowa wewnętrzna tranzystora unipolarnego złączowego z kanałem typu **n**

Tranzystor **JFET** składa się z obszaru półprzewodnika typu **n** lub **p**, do którego w jednym końcu dołączona jest elektroda **S** (*źródło*) a na drugim końcu elektroda **D** (*dren*). Trzecia elektroda **G** (*bramka*) połączona jest z obszarem typu przeciwnego do obszaru kanału. Tworzy się dookólne złącze **p-n** wytworzone metodą dyfuzji lub wtopienia.



Rys. 3. Układy prawidłowej polaryzacji tranzystorów unipolarnych złączowych:
 a) z kanałem typu **n**, b) z kanałem typu **p**.



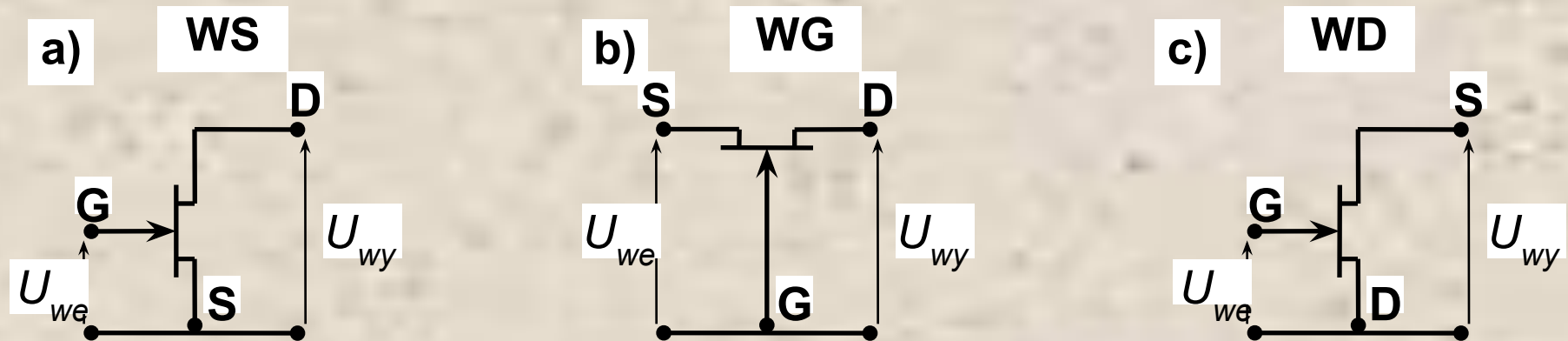
Jak pokazano na rysunku 3, źródło i dren są tak spolaryzowane, aby umożliwić przepływ nośników większościowych przez kanał od źródła do drenu. W tranzystorach z kanałem **n** przepływają elektrony, a w tranzystorach z kanałem **p** przepływają dziury. Złącze bramka-kanał musi być spolaryzowane w kierunku zaporowym.

Jak wiadomo, w pobliżu złącza **p–n** powstaje warstwa zaporowa. Warstwa ta jest szersza od strony kanału, a węższa od strony bramki. Wynika to z niejednakowego domieszkowania tych warstw (silniejsze w bramce, słabsze w kanale). Warstwa zaporowa ma dużą rezystancję i powoduje zmniejszenie czynnego przekroju kanału, przez który przepływa prąd. Wraz ze zwiększeniem polaryzacji złącza **p–n** w kierunku zaporowym (zwiększenie napięcia U_{GS}) rozszerza się warstwa zaporowa i jej głębokość wnikania w kanał. Dla napięcia $U_{GS} = U_p$ kanał jest zablokowany i prąd drenu przestaje płynąć. Zatem dla ustalonego napięcia między źródłem a drenem, rezystancja kanału, a więc i prąd drenu będzie funkcją napięcia między bramką a źródłem.

1.2. Układy pracy tranzystora

Tranzystory polowe złączowe mogą występować w trzech konfiguracjach układowych:

- wspólnego źródła **WS**,
- wspólnego drenu **WD**,
- wspólnej bramki **WG**.



Rys. 4. Układy pracy tranzystora: a) ze wspólnym źródłem (**WS**),
b) ze wspólną bramką (**WG**), c) ze wspólnym drenem (**WD**).



1.3. Charakterystyki tranzystora w układzie wspólne źródło

Właściwości statyczne tranzystora unipolarnego opisują rodziny charakterystyk przejściowych i wyjściowych.

Charakterystyki przejściowe (bramkowe) przedstawiają zależność prądu I_D od napięcia bramka-źródło U_{GS} , przy stałym U_{DS} .

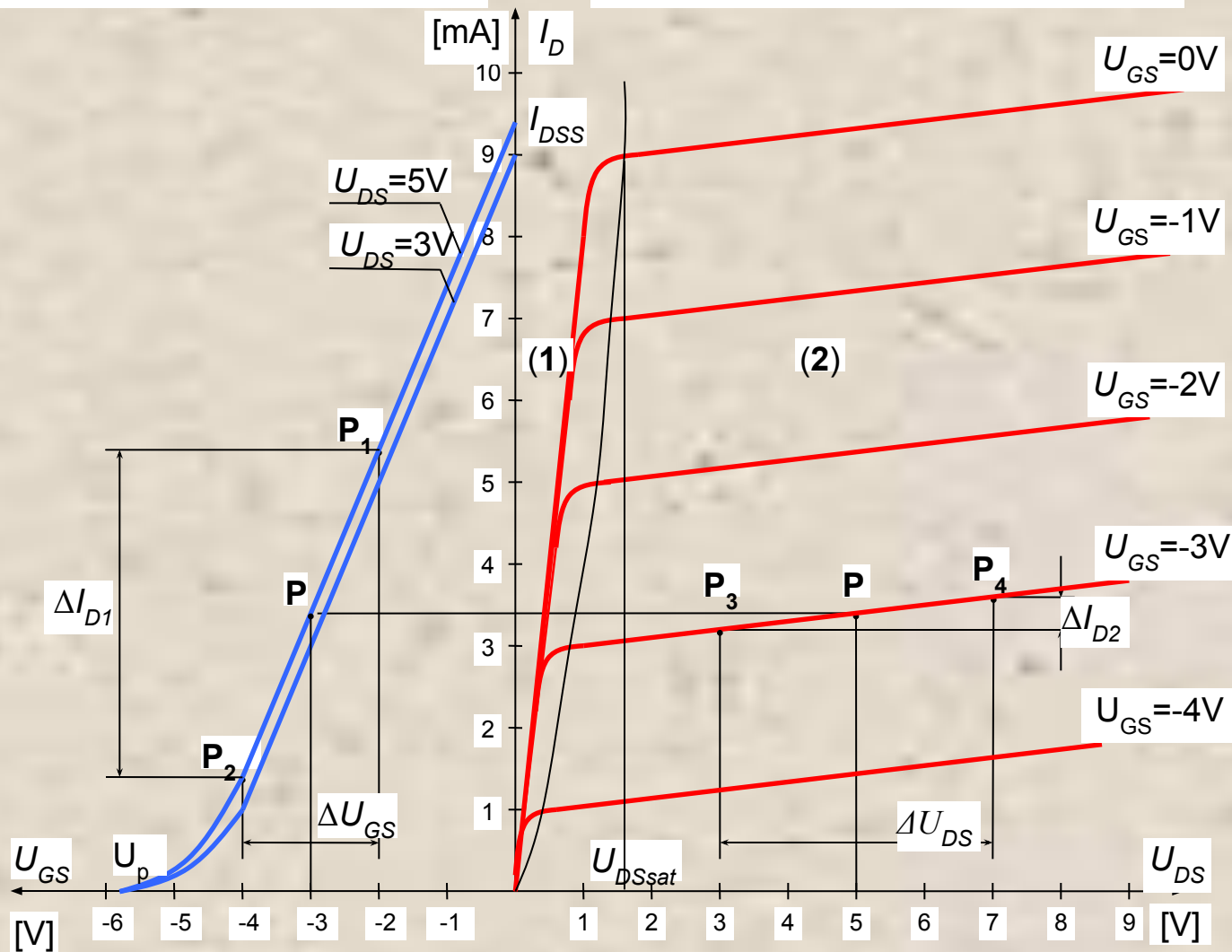
$$I_D = f(U_{GS})|_{U_{DS} = const}$$

Charakterystyczne wielkości krzywych:

- U_p – napięcie odcięcia bramka-źródło – napięcie jakie należy doprowadzić do bramki, aby przy ustalonym napięciu U_{DS} nie płynął prąd drenu.
- I_{DSS} – prąd nasycenia – prąd drenu płynący przy napięciu $U_{GS}=0$ i określonym napięciu U_{DS} .

Ch-ka przejściowa

Ch-ka wyjściowa



Rys. 5. Charakterystyki tranzystora polowego złączowego z kanałem typu n



Charakterystyki wyjściowe (drenowe) przedstawiają zależność między prądem drenu I_D i napięciem dren-źródło U_{DS} , przy stałym U_{GS} .

$$I_D = f(U_{DS}) \Big|_{U_{GS} = \text{const}}$$

Wyróżnia się cztery zasadnicze zakresy charakterystyk tranzystora unipolarnego złączowego:

- (1) Zakres liniowy (triodowy). Ze wzrostem napięcia dren-źródło U_{DS} , prąd drenu I_D wzrasta w przybliżeniu liniowo.

$$|U_{GS}| < |U_P| \quad |U_{DS}| \leq |U_{DSsat}| \quad I_D = G_1 \left(1 + \frac{U_{GS} - \frac{1}{2} \cdot U_{DSsat}}{G_2} \right) \cdot U_{DS}$$

gdzie: G_1 - konduktancja kanału przy $U_{GS} = 0$

$$G_2 = \frac{Q_C}{C_G} \quad \text{gdzie: } Q_C - \text{ładunek elektryczny przy } U_{GS} = 0$$

C_G - pojemność złącza



- (2) Zakres nasycenia (pentodowy). Napięcie dren-źródło U_{DS} nieznacznie wpływa na wartość prądu drenu, zaś bramka zachowuje właściwości sterujące.

$$|U_{GS}| < |U_P| \quad |U_{DS_{max}}| \geq |U_{DS}| > |U_{DS_{sat}}| \quad I_D \approx I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2$$

- (3) Zakres powielania lawinowego.

$$|U_{DS}| > |U_{DS_{max}}|$$

- (4) Zakres zatkania (nieprzewodzenia)

$$|U_{GS}| > |U_P| \quad |U_{DS}| < |U_{DS_{max}}|$$



1.4. Parametry tranzystora unipolarnego w układzie WS

Dla tranzystora unipolarnego można wyznaczyć parametry statyczne dla dużych wartości sygnałów oraz parametry dynamiczne dla małych wartości sygnałów.

Parametry statyczne – to przede wszystkim parametry graniczne:

- I_{Dmax} – dopuszczalny prąd drenu (od kilku do kilkudziesięciu mA),
- U_{DSmax} – dopuszczalne napięcie dren-źródło (od kilkunastu do kilkudziesięciu V),
- P_{max} – dopuszczalne straty mocy (od kilkudziesięciu do kilkuset mW).

Parametry dynamiczne – to parametry małosygnałowe:

- g_m – konduktancja wzajemna (transkonduktancja) w punkcie $\mathbf{P}(U_{GS}, I_D)$ (zgodnie z oznaczeniami z rys 5. $\mathbf{P}_1(U_{GS1}, I_{D1}), \mathbf{P}_2(U_{GS2}, I_{D2})$).
Punkty \mathbf{P}_1 i \mathbf{P}_2 powinny być położone symetrycznie względem punktu \mathbf{P} .
W interpretacji graficznej jest to tangens kąta nachylenia stycznej do charakterystyki przejściowej w określonym punkcie \mathbf{P} .

$$g_m = \frac{|I_{D2} - I_{D1}|}{|U_{GS2} - U_{GS1}|} = \frac{\Delta I_{D1}}{\Delta U_{GS}} \Big|_{U_{DS} = const}$$



□ g_d – konduktancja drenu (konduktancja wyjściowa) w punkcie $\mathbf{P}(U_{DS}, I_D)$ (zgodnie z oznaczeniami z rys 5. $\mathbf{P}_3(U_{GS3}, I_{D3})$, $\mathbf{P}_4(U_{GS4}, I_{D4})$). Punkty \mathbf{P}_3 i \mathbf{P}_4 powinny być położone symetrycznie względem punktu \mathbf{P} . W interpretacji graficznej jest to tangens kąta nachylenia stycznej do charakterystyki wyjściowej w określonym punkcie \mathbf{P} .

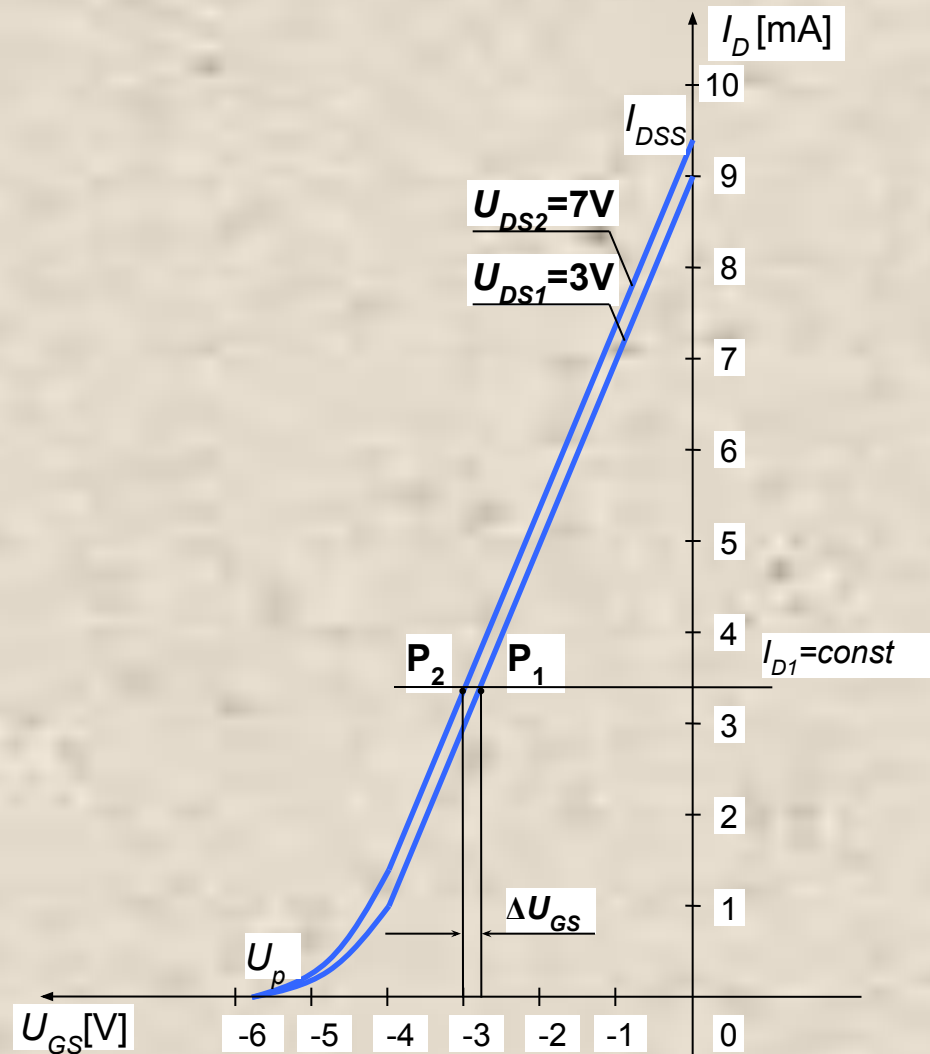
$$g_d = \frac{1}{r_d} = \frac{|I_{D4} - I_{D3}|}{|U_{DS4} - U_{DS3}|} = \frac{\Delta I_{D2}}{\Delta U_{DS}} \Big|_{U_{GS} = const}$$

□ r_d – rezystancja drenu (rezystancja wyjściowa) (w zakresie liniowym – przyjmuje niewielkie wartości, w zakresie nasycenia – od kilkudziesięciu do kilkuset k Ω).

$$r_d = \frac{1}{g_d} = \frac{|U_{DS4} - U_{DS3}|}{|I_{D4} - I_{D3}|} = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_{D2}} \Big|_{U_{GS} = const}$$

□ k_u – współczynnik wzmocnienia napięciowego.

$$k_U = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta U_{GS}} \Big|_{I_D = const}$$



Rys. 6. Wyznaczanie współczynnika wzmocnienia napięciowego k_U z charakterystyk przejściowych tranzystora polowego złączowego z kanałem typu **n**.

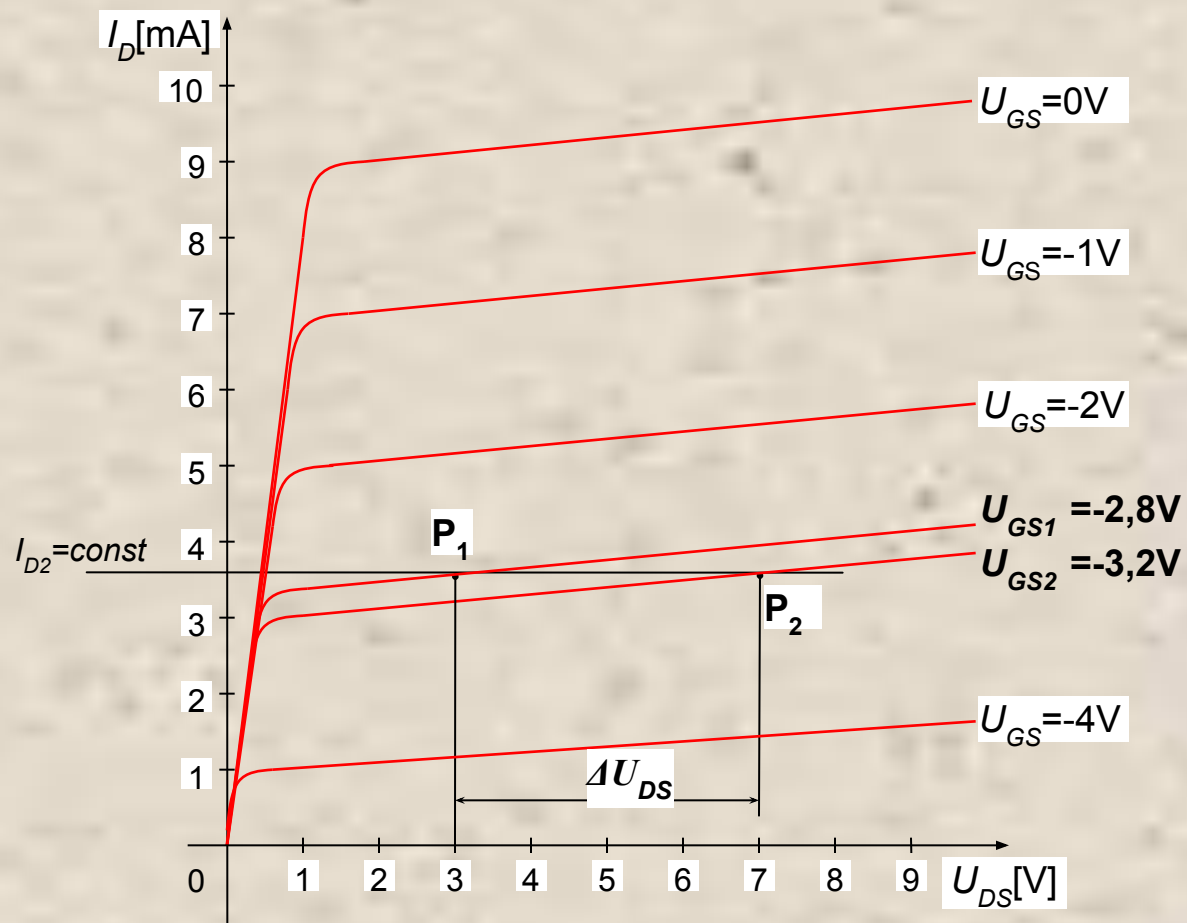


Wartość współczynnika wzmocnienia napięciowego można wyznaczyć graficznie z charakterystyk statycznych tranzystora (rys. 6 – charakterystyki przejściowe, rys. 7 – charakterystyki wyjściowe) lub analitycznie, posługując się wzorem

$$k_U \cong g_m \cdot r_d$$

W przypadku charakterystyk przejściowych należy wykreślić linię stałego prądu drenu I_{D1} , która przecina dwie gałęzie charakterystyki w punktach \mathbf{P}_1 i \mathbf{P}_2 . Po zrzutowaniu współrzędnych tych punktów na oś napięcia U_{GS} otrzymuje się bezpośrednio przyrost napięcia ΔU_{GS} , natomiast przyrost napięcia ΔU_{DS} oblicza się jako różnicę dwóch wartości stałych, przy których wyznaczano odpowiednie gałęzie charakterystyk. Tak więc zgodnie z oznaczeniami na rys. 6, współczynnik wzmocnienia napięciowego oblicza się jako:

$$k_U = \frac{U_{DS2} - U_{DS1}}{\Delta U_{GS}} \Big|_{I_{D1} = const}$$



Rys. 7. Wyznaczanie współczynnika wzmacnienia napięciowego k_U z charakterystyk wyjściowych tranzystora polowego złączowego z kanałem typu n



W przypadku charakterystyk wyjściowych należy wykreślić linię stałego prądu drenu I_{D2} , która przecina dwie gałęzie charakterystyki w punktach P_1 i P_2 . Po zrzutowaniu współrzędnych tych punktów na oś napięcia U_{DS} otrzymuje się bezpośrednio przyrost napięcia ΔU_{DS} , natomiast przyrost napięcia ΔU_{GS} oblicza się jako różnicę dwóch wartości stałych, przy których wyznaczano odpowiednie gałęzie charakterystyk. Tak więc zgodnie z oznaczeniami na rys. 7, współczynnik wzmocnienia napięciowego oblicza się jako:

$$k_U = \frac{\Delta U_{DS}}{|U_{GS2} - U_{GS1}|} \Big|_{I_{D2} = const}$$

Należy zwrócić uwagę, że wyznaczone powyższymi trzema sposobami wartości współczynnika wzmocnienia napięciowego tranzystora mogą się różnić ze względu na niejednakowe punkty pracy, w których zostały obliczone.



2. Przebieg ćwiczenia laboratoryjnego

2.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie zasady działania i własności tranzystora polowego złączowego z kanałem typu **n** poprzez wyznaczenie jego charakterystyk statycznych i parametrów układzie o wspólnym źródle **WS**. Będą wyznaczone rodziny charakterystyk wyjściowych oraz przejściowych. Parametry będą wyznaczone w określonym punkcie **P**.

2.2. Pomiar charakterystyk statycznych tranzystora polowego złączowego z kanałem typu n

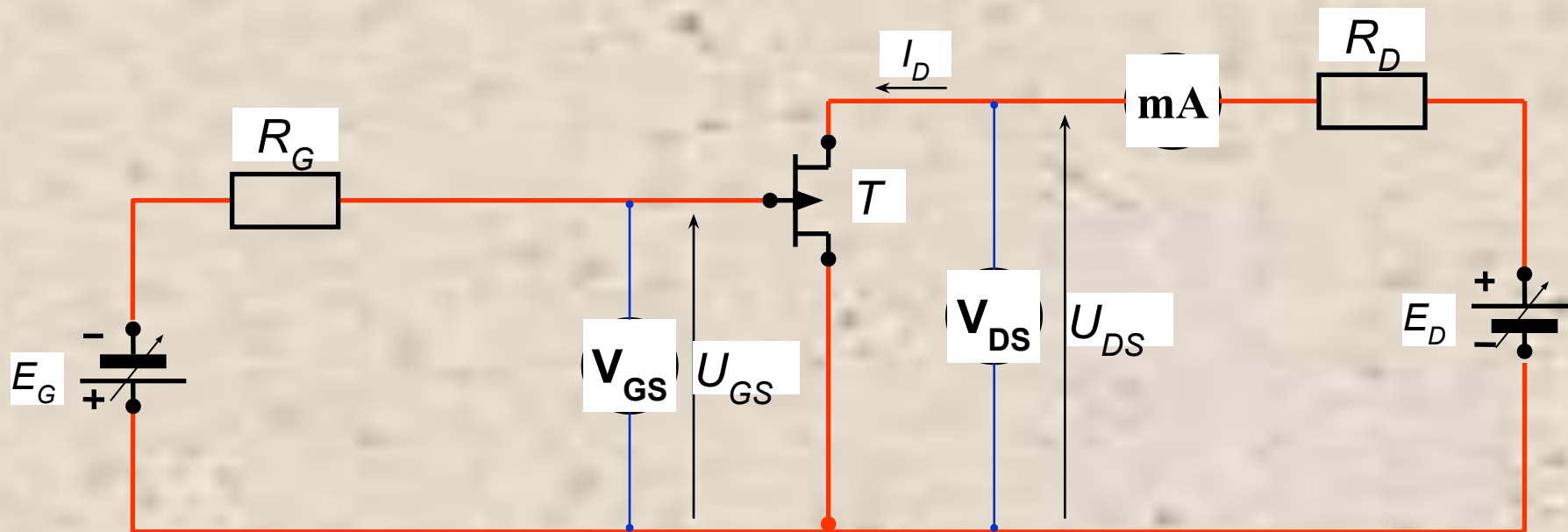
Charakterystyki będą wyznaczone na podstawie pomiarów multimetrami:

□ napięć wejściowych układu – U_{GS} ,

□ napięć wyjściowych układu – U_{DS} ,

□ prądów wyjściowych – I_D .

Schematy pomiarowe



Rys. 8. Układ do pomiaru statycznych charakterystyk tranzystora polowego złączowego z kanałem typu **n**

Sposób przeprowadzenia pomiarów

- Połączyć układ pomiarowy przedstawiony na rys.8. ($R_G = 560\text{k}\Omega$, $R_D = 1\text{k}\Omega$, T – tranzystor polowy złączowy z kanałem typu **n** BF 245).
- Określić napięcie progowe tranzystora U_P . Ustawić zasilaczem E_D napięcie U_{DS} na wartość około 2V. Zwiększając (co do bezwzględnej wartości) zasilaczem E_G napięcie U_{GS} obserwujemy zmniejszające się wartości prądu drenu I_D . Odczytujemy napięcie $U_P = U_{GS}$, jeżeli wartość prądu drenu będzie bliska zeru np. $I_D = 0,05 \text{ mA}$.
- Wypełnić w Tabeli 1 kolumnę napięcia U_{GS} od wartości 0 do napięcia U_P .
- Wykonać pomiary charakterystyki przejściowej dla kilku (określa prowadzący) stałych wartości napięć U_{DS} . Pomiar polega na ustawieniu regulowanym zasilaczem E_G napięcia U_{GS} (woltomierz V_{GS}), ustawieniu regulowanym zasilaczem E_D określonej stałej wartości napięcia U_{DS} (woltomierzem V_{DS}), i odczycie prądu drenu I_D (miliamperomierz **mA**). Ustawić kolejną wartość napięcia U_{DS} i odczytać prąd I_D . Wyniki notujemy w tabeli 1., którą wypełniamy kolejnymi wierszami.
- Wykonać pomiary charakterystyki wyjściowej dla stałych wartości napięcia U_{GS} : $U_{GS1}=0$, $U_{GS2}=0,5U_P-0,2$, $U_{GS3}=0,5U_P$, $U_{GS4}=0,5U_P+0,2$, $U_{GS5}=0,75U_P$. Pomiary wykonujemy analogicznie jak dla charakterystyki przejściowej. Wyniki notujemy w tabeli 2., którą wypełniamy kolumnami.



Tabela 1. Pomiar charakterystyki przejściowej $I_D = f(U_{GS}) | U_{DS} = const.$

Lp	$U_{GS}[\text{V}]$	$U_{DS1}[\text{V}] =$	$U_{DS2}[\text{V}] =$	$U_{DS3}[\text{V}] =$	$U_{DS4}[\text{V}] =$	$U_{DS5}[\text{V}] =$
		$I_D[\text{mA}]$	$I_D[\text{mA}]$	$I_D[\text{mA}]$	$I_D[\text{mA}]$	$I_D[\text{mA}]$
1.	0					
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
9.						
10.						
11.						
12.						
13.						
14.						



Tabela 2. Pomiar charakterystyki wyjściowej $I_D = f(U_{DS}) | U_{GS} = const.$

Lp	U_{DS} [V]	U_{GS1} [V]=	U_{GS2} [V]=	U_{GS3} [V]=	U_{GS4} [V]=	U_{GS5} [V]=
		I_D [mA]	I_D [mA]	I_D [mA]	I_D [mA]	I_D [mA]
1.	0					
2.	0,2					
3.	0,4					
4.	0,6					
5.	0,8					
6.	1					
7.	2					
8.	3					
9.	4					
10.	5					
11.	6					
12.	7					
13.	8					
14.	9					

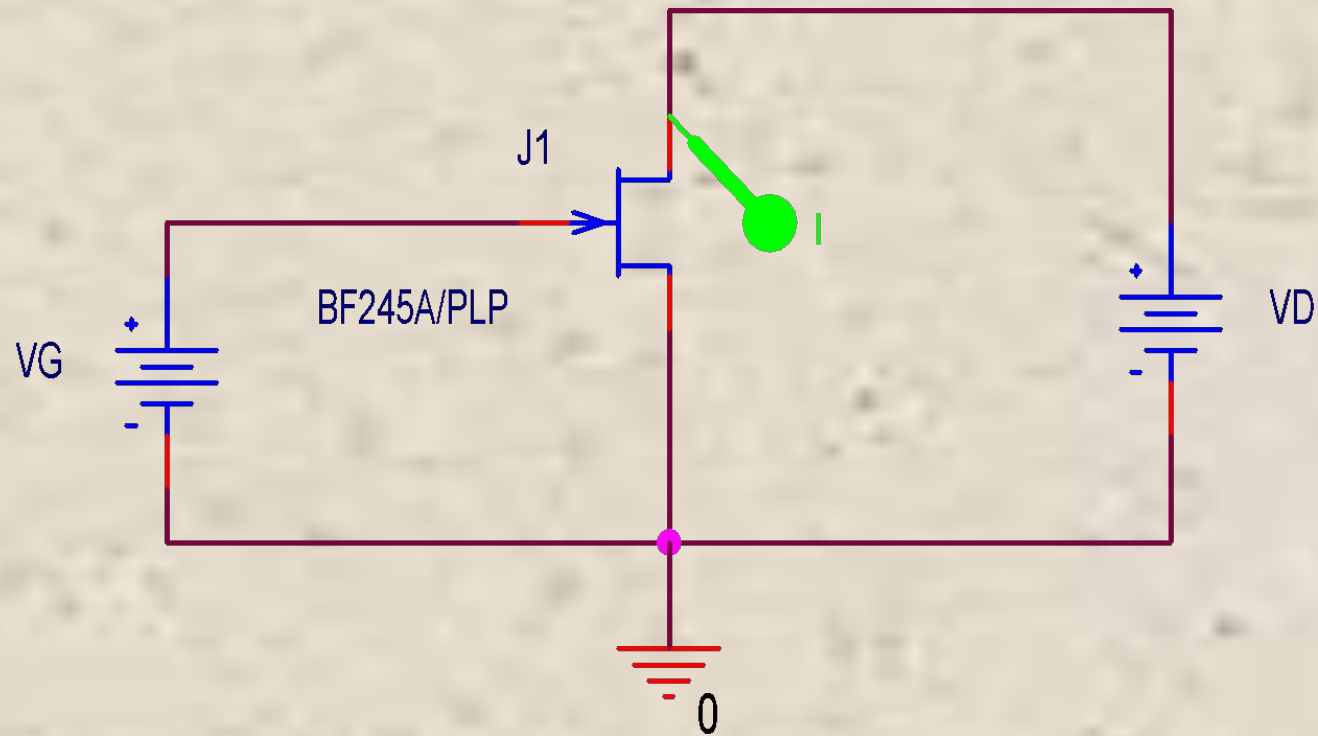
2.3. Opracowanie wyników pomiaru

W sprawozdaniu należy zamieścić:

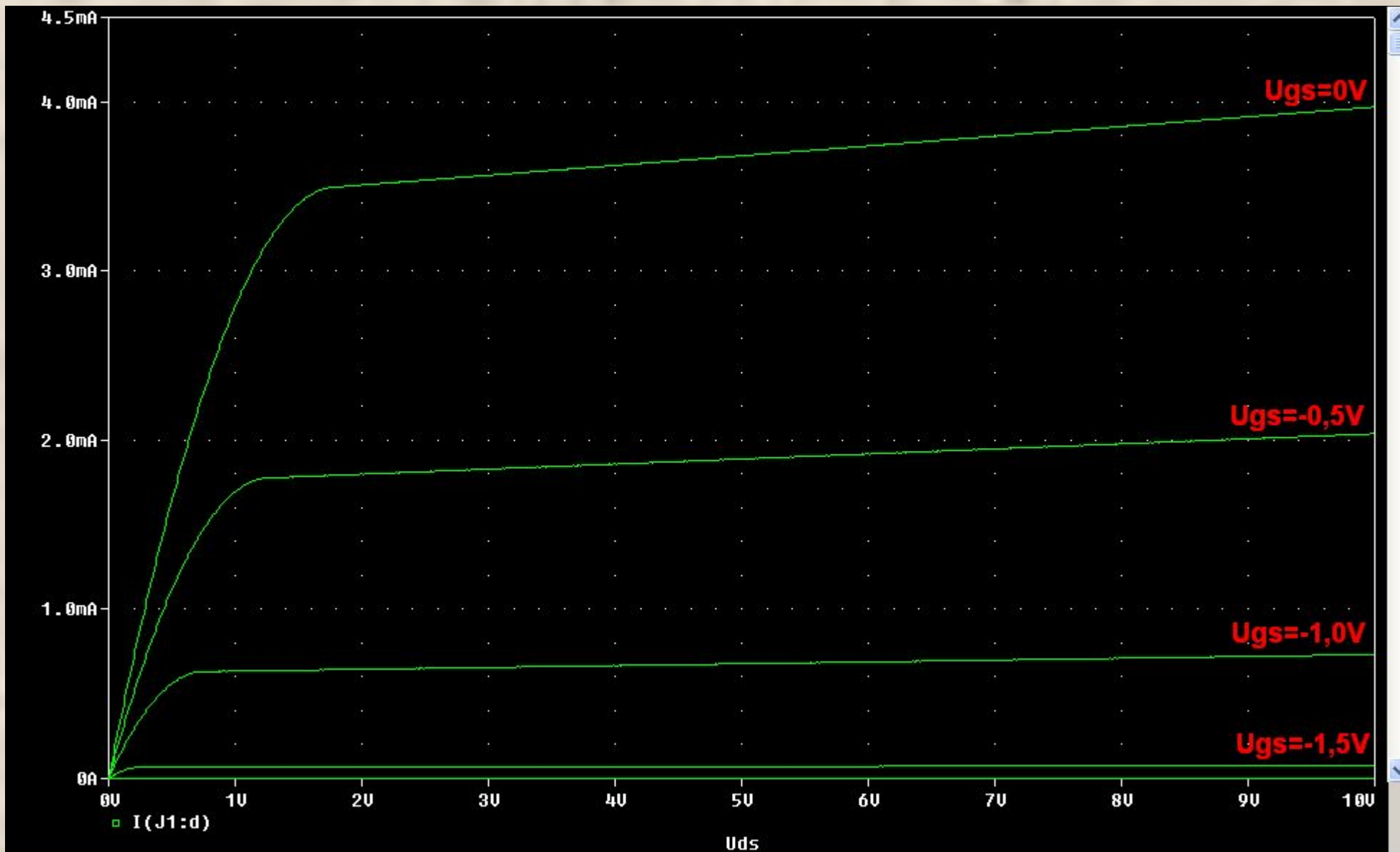
- Schematy układów pomiarowych realizowanych na ćwiczeniu.
- Tabele pomiarowe z wynikami.
- Charakterystyki tranzystora polowego złączowego sporządzone na podstawie przeprowadzonych pomiarów.
- Wyznaczenie parametrów r_d , g_m , k_u dla określonego punktu pracy **P** (U_{GS3} , U_{DS3}).
W tabelach pomiarowych należy zaznaczyć (np. innym kolorem, pogrubić) pomiary (punkty **P**₁, **P**₂, **P**₃, **P**₄), które posłużyły do wyznaczenia parametrów. Na wykreślonych charakterystykach statycznych tranzystora zaznaczyć punkty **P** oraz punkty pomocnicze **P**₁, **P**₂, **P**₃, **P**₄.
- Wnioski.



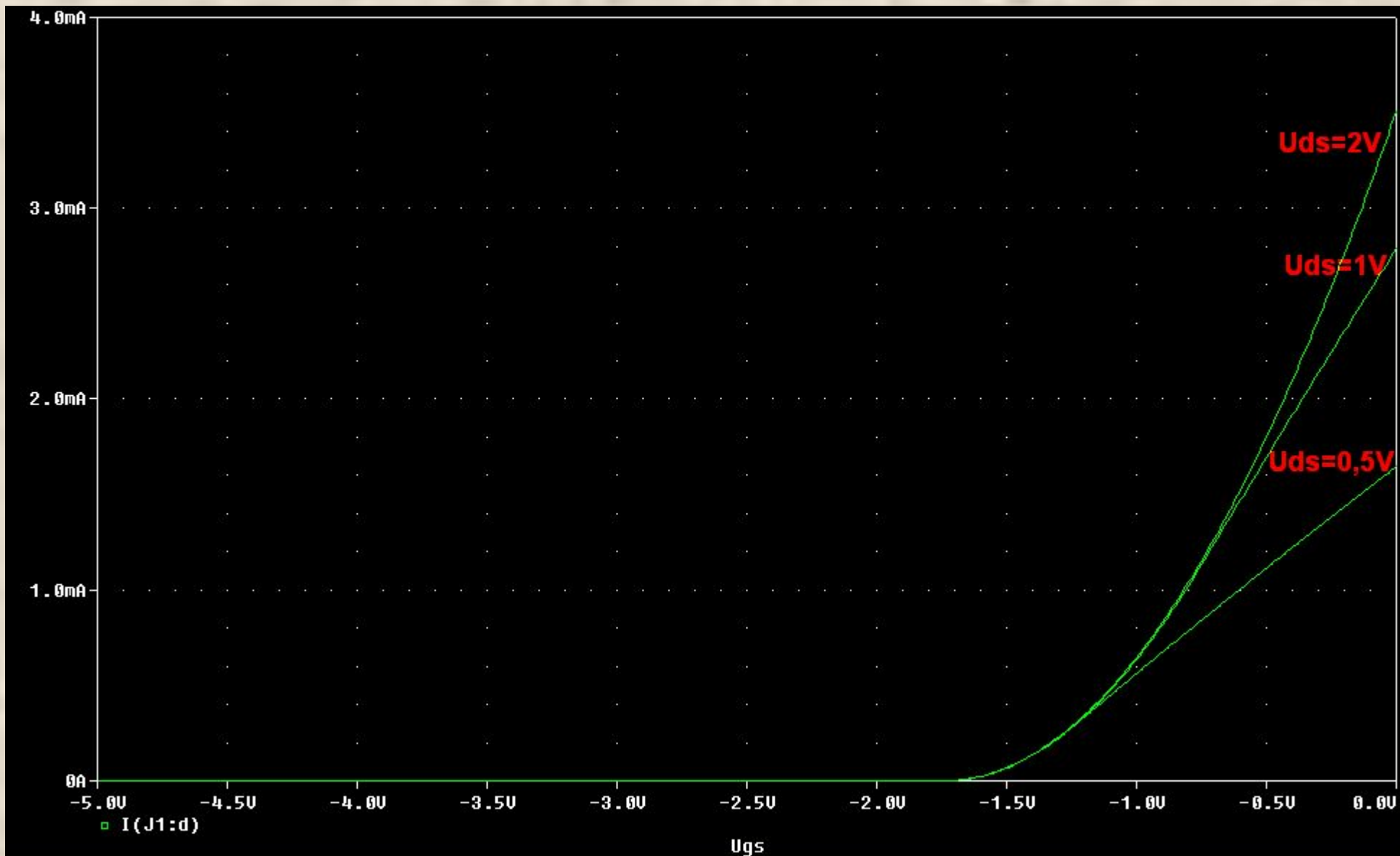
Symulacje charakterystyk tranzystorów polowych złączowych z kanałem typu n BF 245 w programie OrCad Capture CIS Demo v. 16.3



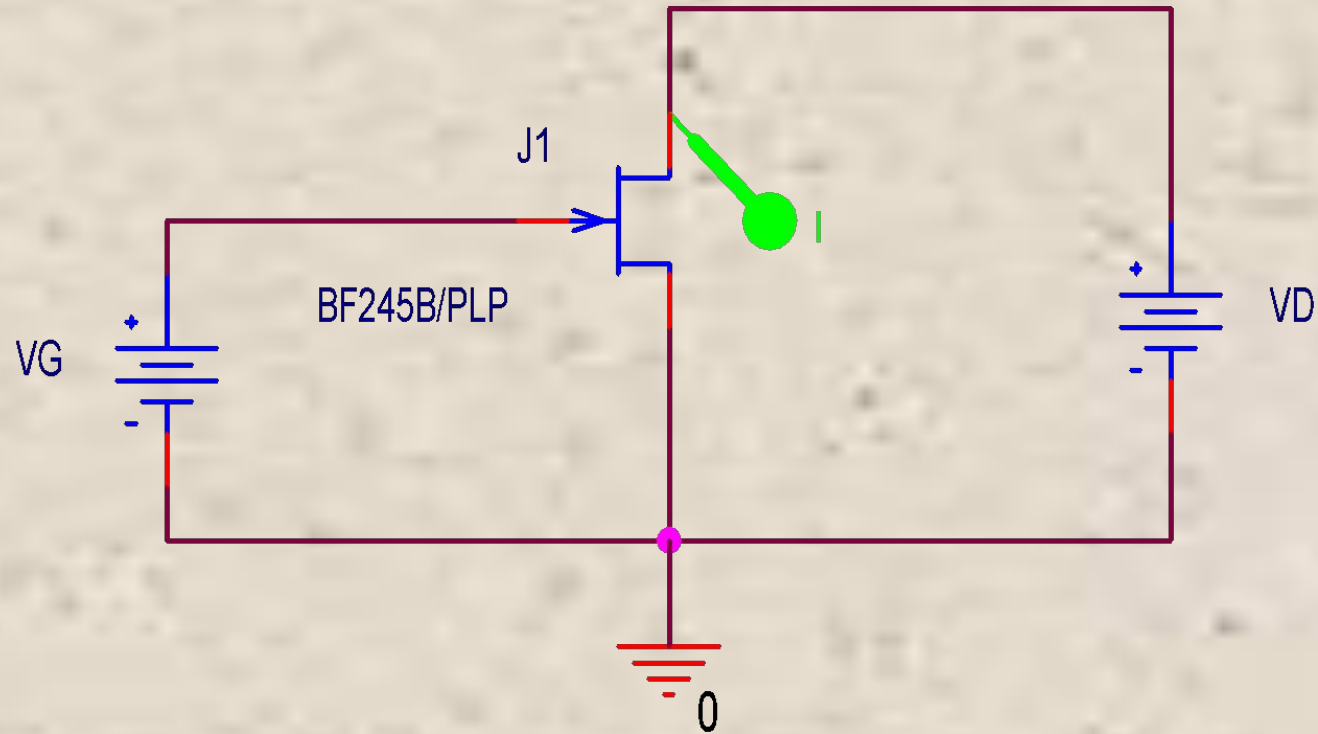
Rys. 9. Układ do wyznaczania charakterystyk tranzystora polowego złączowego z kanałem typu n **BF 245A**



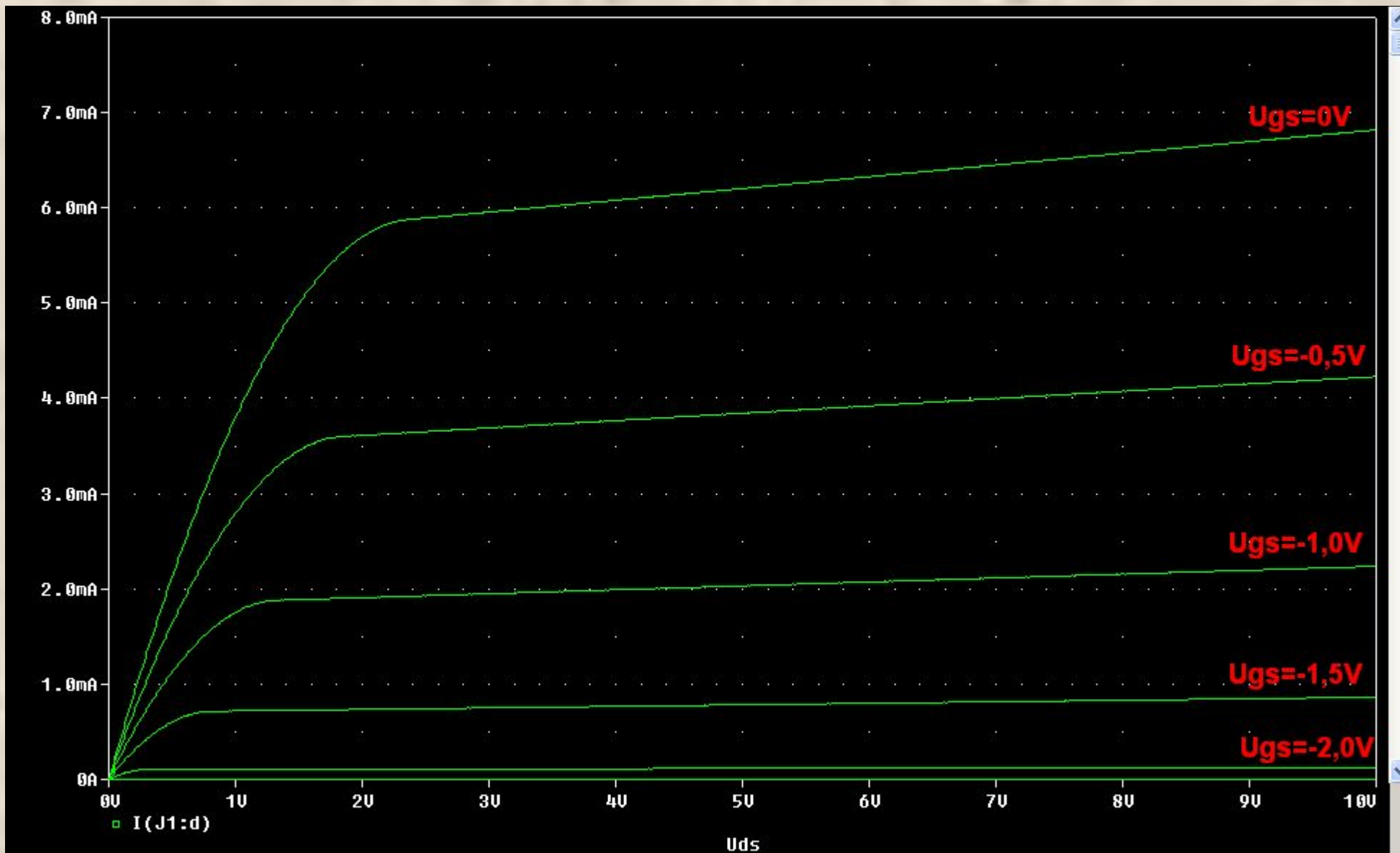
Rys. 10. Rodzina charakterystyk wyjściowych tranzystora polowego złączowego z kanałem typu n BF 245A w układzie WS



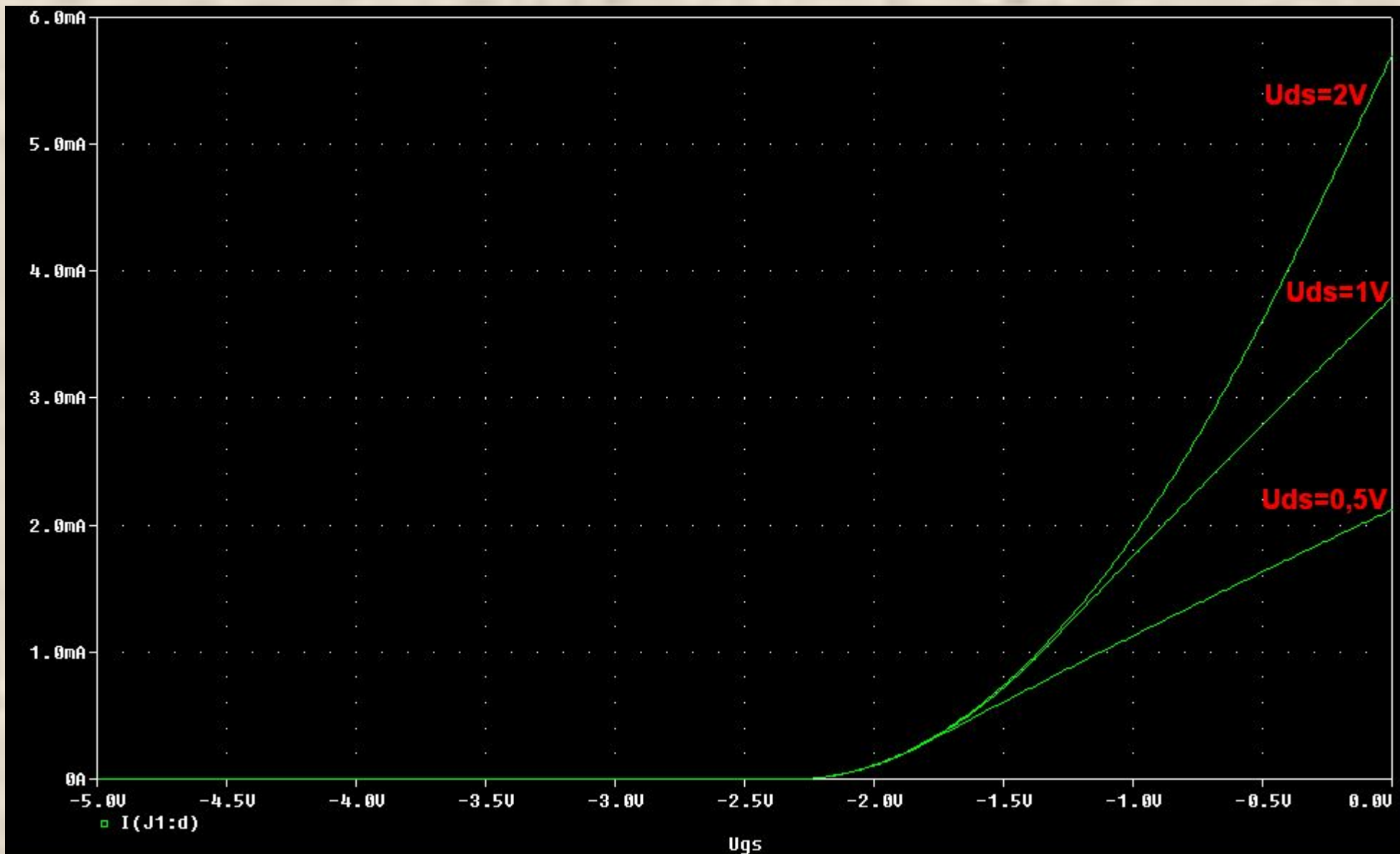
Rys. 11. Rodzina charakterystyk przejściowa tranzystora polowego złączowego z kanałem typu n BF 245A w układzie WS



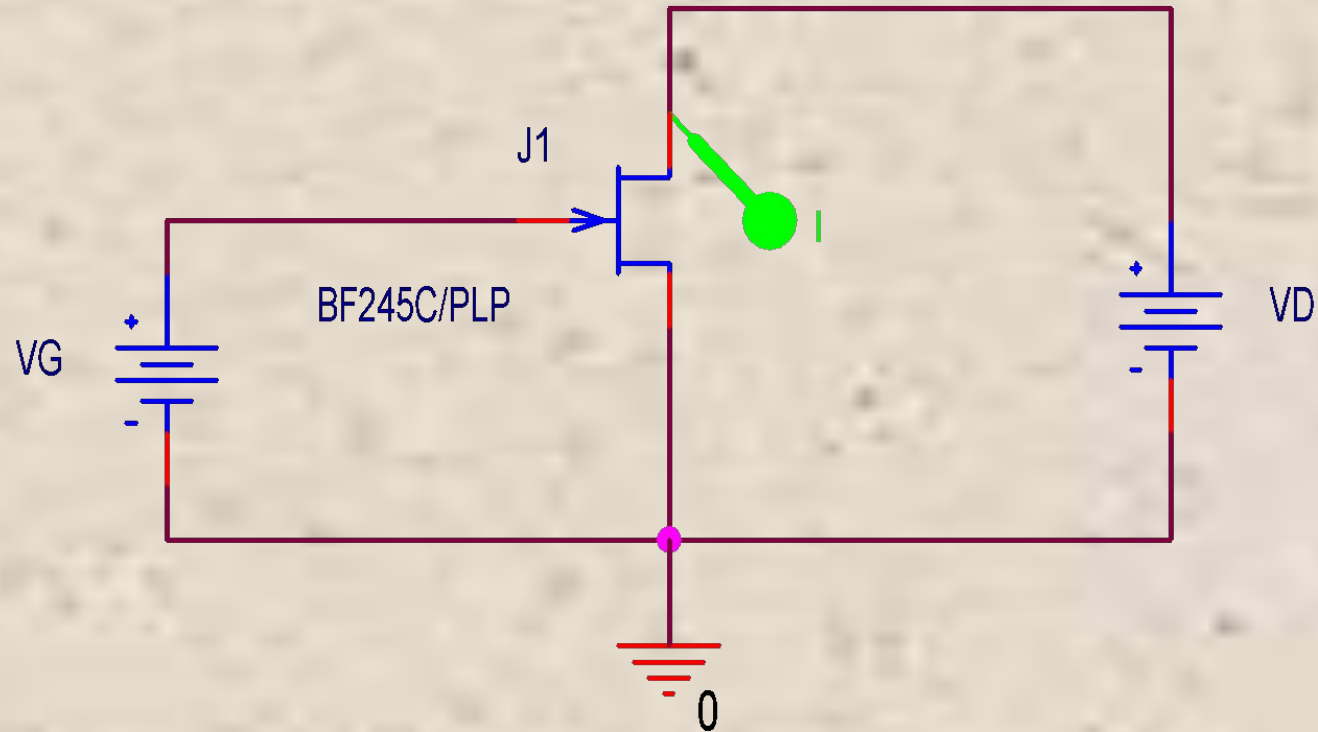
Rys. 12. Układ do wyznaczania charakterystyk tranzystora polowego złączowego z kanałem typu **n BF 245B**



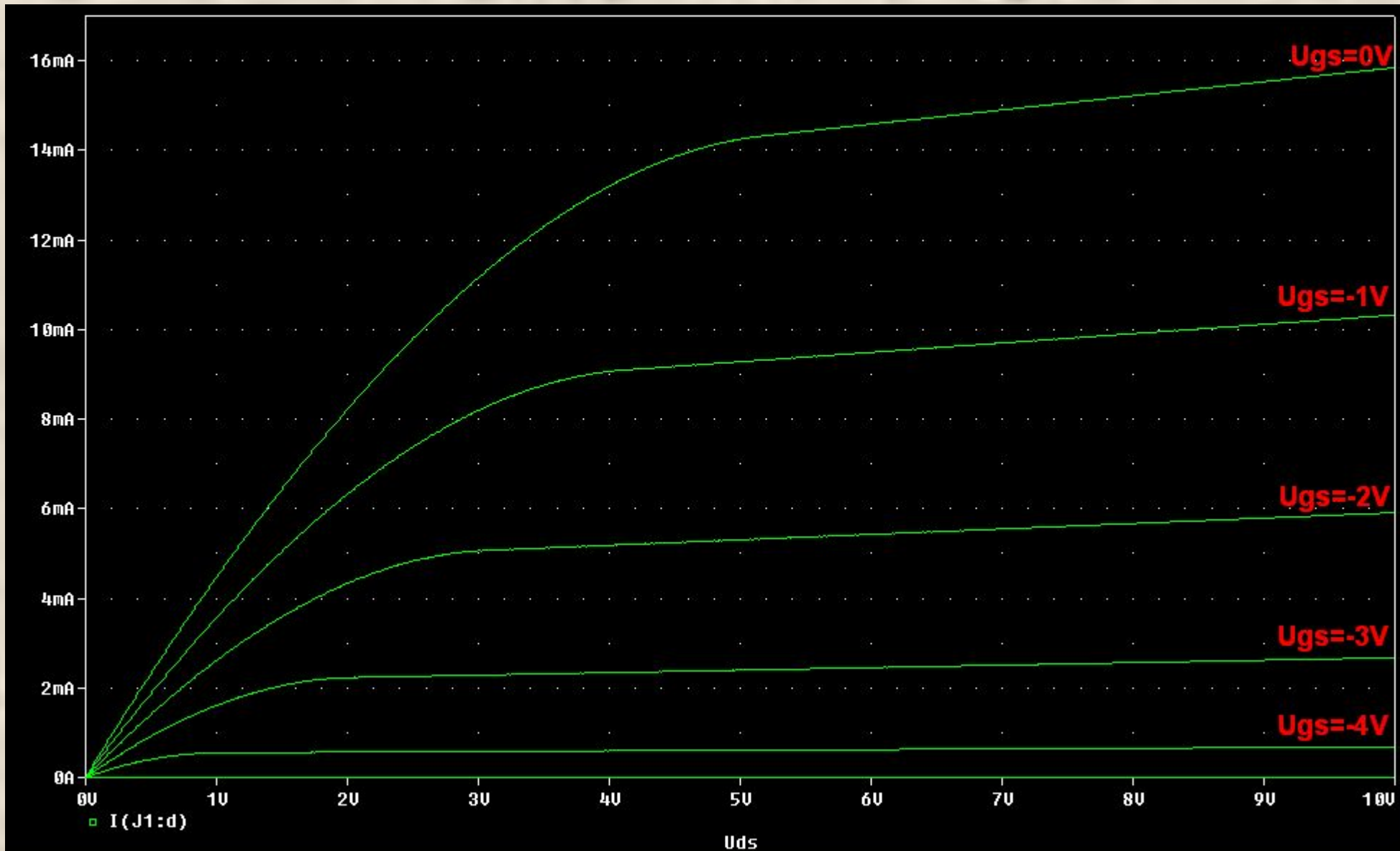
Rys. 13. Rodzina charakterystyk wyjściowych tranzystora polowego złączowego z kanałem typu n **BF 245B** w układzie **WS**



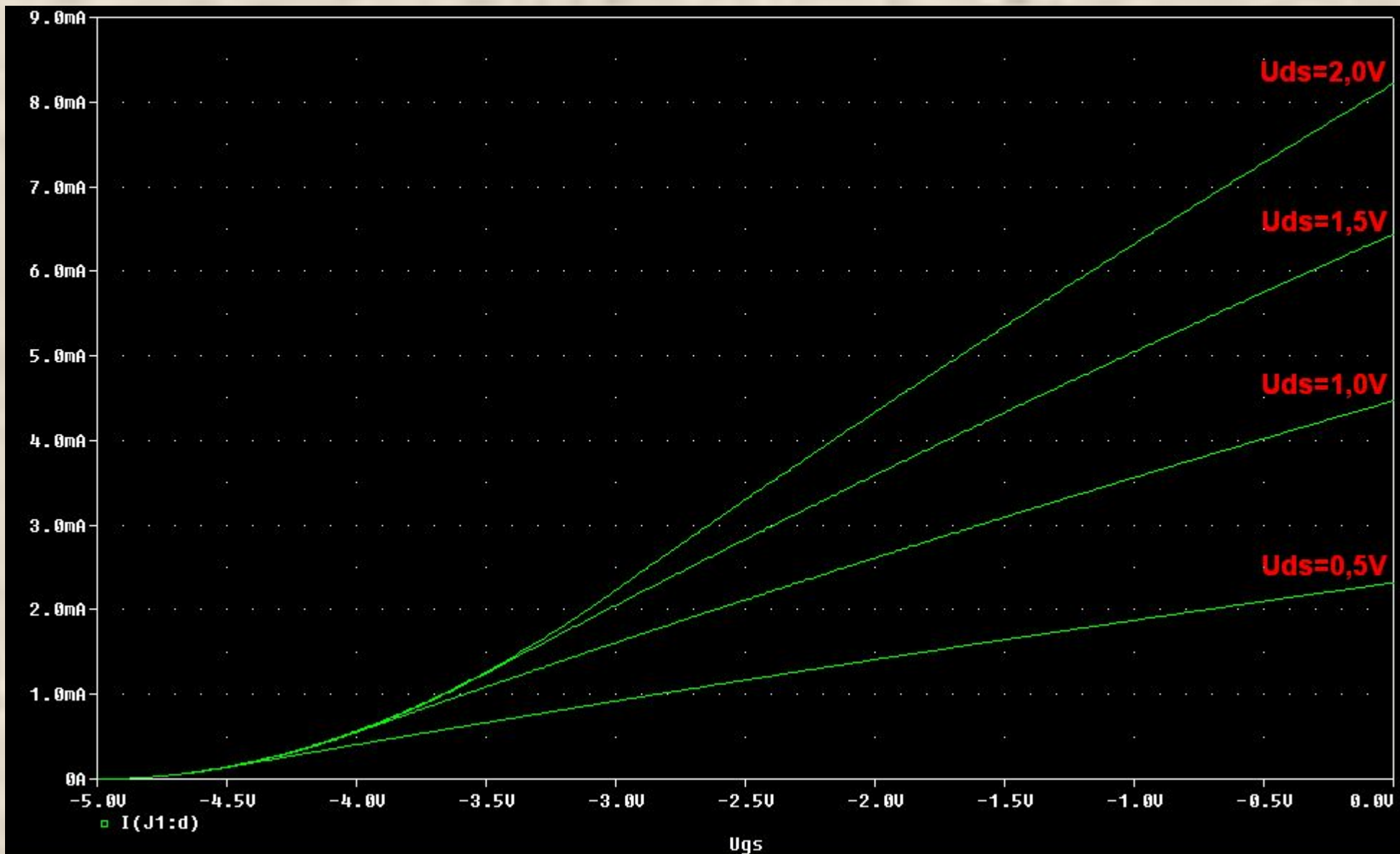
Rys. 14. Rodzina charakterystyk przejściowa tranzystora polowego złączowego z kanałem typu n **BF 245B** w układzie **WS**



Rys. 15. Układ do wyznaczania charakterystyk tranzystora polowego złączowego z kanałem typu **n BF 245C**



Rys. 16. Rodzina charakterystyk wyjściowych tranzystora polowego złączowego z kanałem typu n BF 245C w układzie WS



Rys. 17. Rodzina charakterystyk przejściowa tranzystora polowego złączowego z kanałem typu n BF 245C w układzie WS



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



Politechnika
Świętokrzyska

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Materiały dydaktyczne pomocnicze i informacyjne do przedmiotu

PODSTAWY ELEKTRONIKI

Część II: „Badania laboratoryjne elementów i układów elektronicznych”,

zrealizowana w ramach zadania nr 9 projektu:

**„Program Rozwojowy Potencjału Dydaktycznego Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach: kształcenie na miarę sukcesu.”,
nr umowy: UDA-POKL 04.01.01. – 175/08-00.**

DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ!

Następna prezentacja pt.:

Ćwiczenie 6:

Badanie tranzystorów polowych MOSFET