

Podstawowe elementy elektroniczne, cz. 2 - Tranzystory - charakterystyki			
Krzyszczuk Michał Lis Przemysław	15 V 2018 22 V 2018	Wt 12:00	B7

1. Cel ćwiczenia.

Celem ćwiczenia było poznanie działania układów opartych o tranzystory bipolarne oraz unipolarne.

Badane zostały następujące układy tranzystora bipolarnego npn:

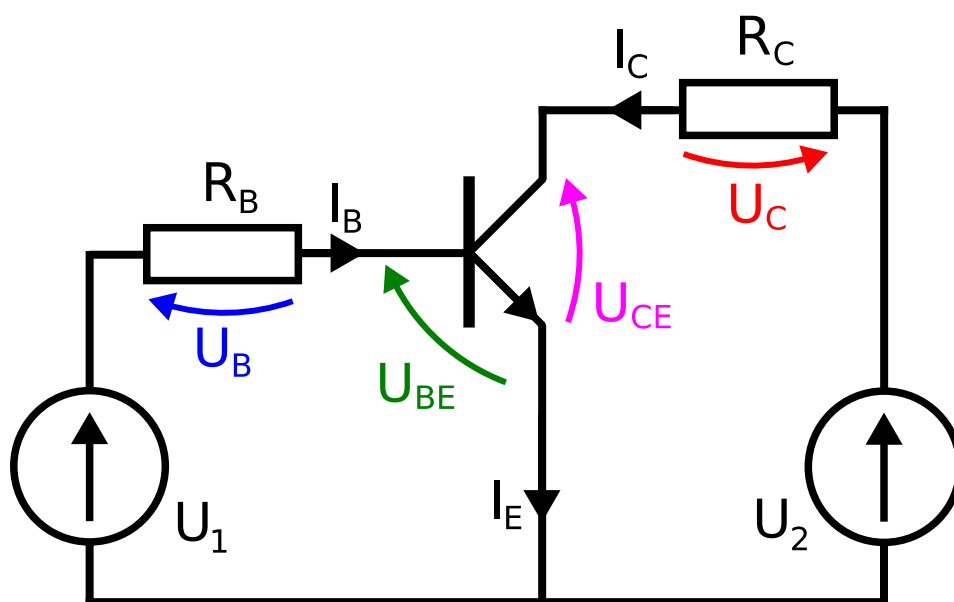
- układ OE wyznaczeniem β tranzystora.
- układ OE wyznaczenie charakterystyki $I_B = f(U_{BE})$.
- układ OE wyznaczenie charakterystyk $I_C = f(U_{CE})$.
- układ OE tranzystor jako klucz obliczenia.
- Tranzystor bipolarny npn pracujący jako klucz.

Badane zostały następujące układy tranzystora unipolarnego J-FET:

- układ OS wyznaczenie charakterystyki $I_D = F(U_{GS})$.
- Sterowanie sygnałem PWM kluczem wykorzystującym tranzystor J-FET.

2. Przebieg ćwiczenia.

a. Układ odwracający OE, wyznaczenie β tranzystora npn BC547B.



Rys 1. Układ OE npn (źródło: Instrukcja do ćwiczeń TM1, UPEL AGH).

Tabela 1. Pomiary dla układu wyznaczenia β tranzystora npn.

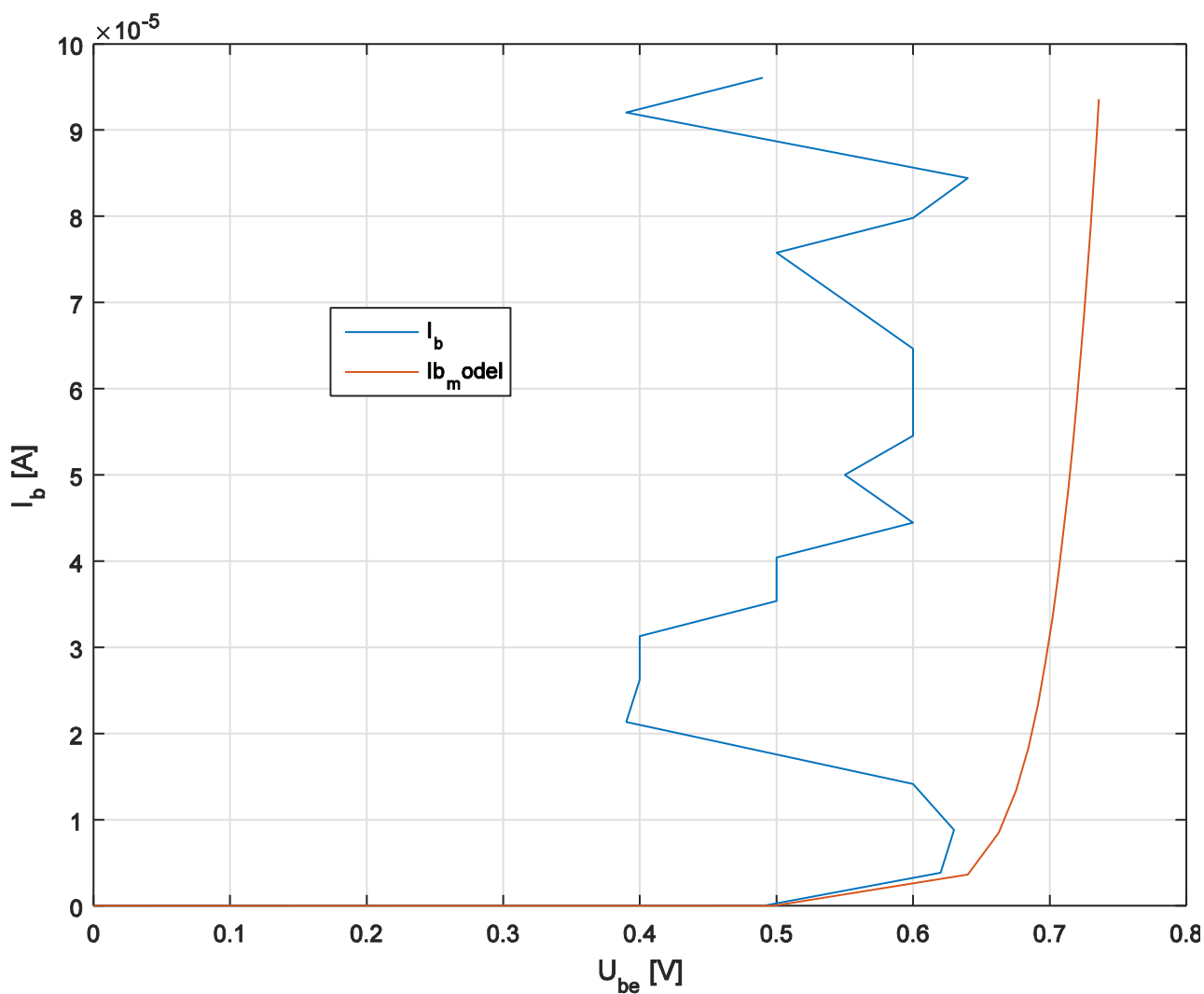
Rb [Ohm]	Rc[Ohm]	Ub [V]	Uc [V]	Beta (obliczona)	Beta (typ.)	Różnica
99000	99,70	9,36	3,57	378,73	330	48,73

Tranzystor w konfiguracji OE posiada wzmacnienie 330, jest to o 48,73 większe niż deklaruje producent. Różnica ta jest spowodowana różnymi warunkami podczas wyznaczania współczynnika β (współczynnik wzmacnienia prądowego tranzystora), również deklarowana wartość jest silnie zależna od temperatury struktury.

b. Układ odwracający OE, wyznaczenie charakterystyki $I_B = f(U_{BE})$.

Tabela 2. Tabela pomiarów.

U1 [V]	0,00	0,48	1,03	1,52	1,98	2,49	3,07	3,53	4,04	4,56	5,02	5,58	6,05	6,55	7,03	7,50	8,07	8,55	9,06	9,56	10,01
U2 [V]	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Rb [Ohm]	99000,00	99000,00	99000,00	99000,00	99000,00	99000,00	99000,00	99000,00	99000,00	99000,00	99000,00	99000,00	99000,00	99000,00	99000,00	99000,00	99000,00	99000,00	99000,00	99000,00	99000,00
Ub [V]	0,00	0,00	0,40	0,87	1,31	1,85	2,43	2,91	3,41	3,96	4,43	5,03	5,46	6,00	6,48	6,93	7,49	7,96	8,44	8,91	9,40
IB	0	0	4,0404E-06	8,78788E-06	1,32525E-05	1,87071E-05	2,45455E-05	2,9404E-05	3,44444E-05	0,00004	4,47475E-05	5,08081E-05	5,51515E-05	6,08081E-05	6,54545E-05	0,00007	7,56566E-05	8,0404E-05	8,52525E-05	0,00009	9,49495E-05
UBE	0,00	0,48	0,63	0,65	0,65	0,64	0,64	0,62	0,63	0,60	0,59	0,53	0,59	0,55	0,55	0,57	0,58	0,59	0,62	0,65	0,61

Rys 2. Charakterystyka $I_B = f(U_{BE})$.

Przedstawiona charakterystyka empiryczna różni się znacznie od charakterystyki modelowej, powodem tego jest błąd metody pomiarowej, ponieważ dokonywaliśmy pomiaru prądu oraz napięć metodami pośrednimi. Ponadto przewody połączeniowe nie są idealnym połączeniem, następstwem czego podczas przełączania przewodów multimetra mogliśmy zmieniać wartość oporu połączeń. Jednak trend pomiarów jest analogiczny do charakterystyki modelowej, sugeruje to podobną charakterystykę fizyczną do modelowej.

c. Układ odwracający OE, wyznaczenie charakterystyk $I_C = f(U_{CE})$.

Tabela3. Pomiary dla $U_1=3V$

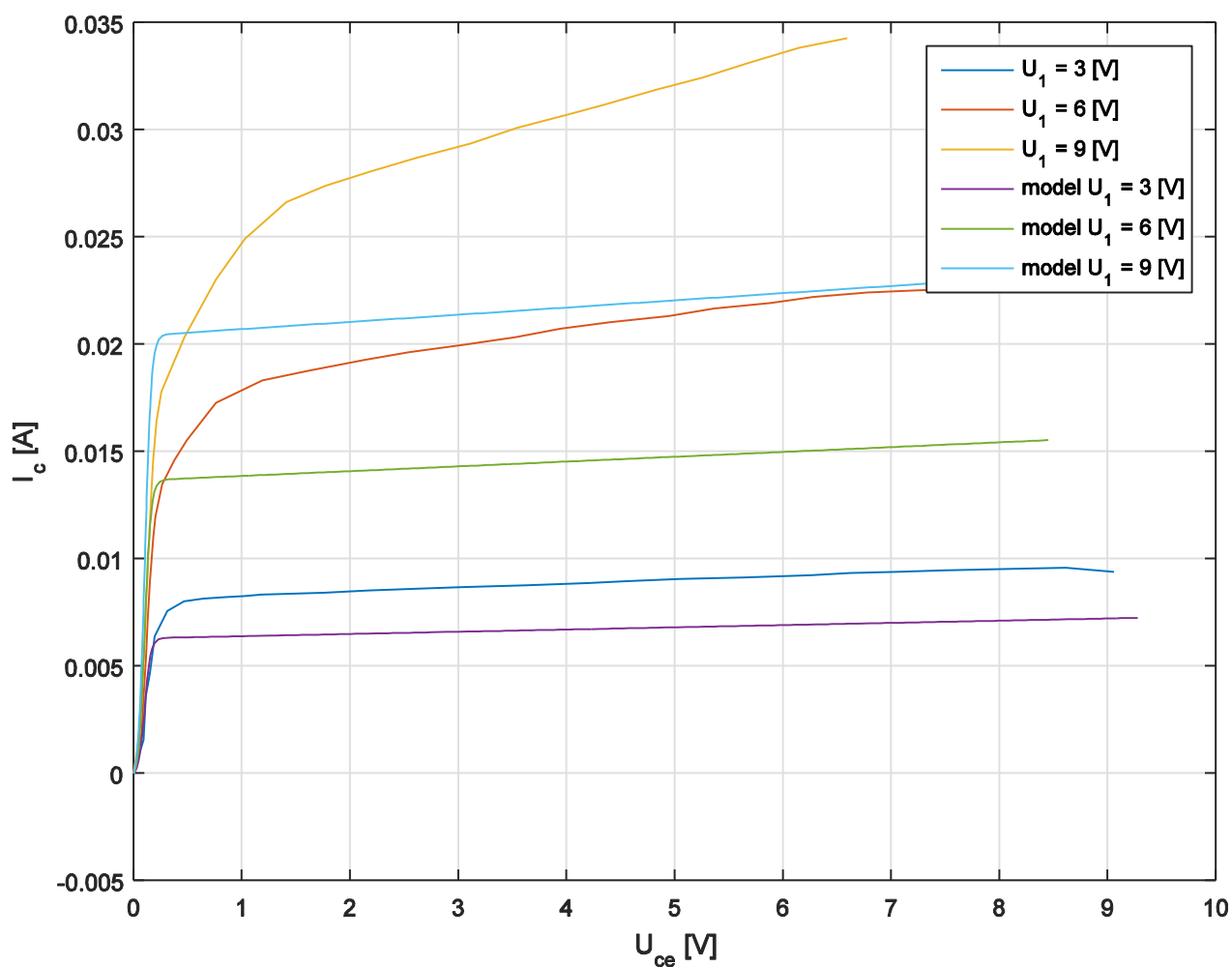
U1 [V]	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
U2 [V]	0,00	0,25	0,47	0,62	0,83	1,07	1,27	1,45	1,66	1,85	2,01	2,61	3,02	3,51	3,90	4,51	5,09	5,45	5,96	6,55	7,18	7,56	7,98	8,45	9,06	9,57	10,00
Uc [V]	0,00	0,16	0,36	0,47	0,64	0,76	0,80	0,81	0,82	0,83	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,89	0,91	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,95	0,96	0,94
Rc [Ω]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Uce [V]	0,00	0,09	0,11	0,15	0,20	0,31	0,47	0,64	0,84	1,03	1,18	1,77	2,17	2,65	3,03	3,63	4,20	4,55	5,05	5,64	6,25	6,62	7,04	7,50	8,11	8,61	9,06
Ic [mA]	0	1,55	3,58	4,66	6,37	7,55	8,01	8,13	8,2	8,25	8,31	8,4	8,5	8,6	8,67	8,76	8,86	8,94	9,05	9,12	9,22	9,33	9,37	9,45	9,52	9,56	9,38

Tabela 4. Pomiary dla $U_1=6V$

U1 [V]	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05	6,05
U2 [V]	0	0,252	0,384	0,673	0,842	1,043	1,277	1,4	1,61	1,834	2,045	2,489	3,021	3,49	4,06	4,51	5,03	5,56	6,02	6,5	7,08	7,53	8,08	8,5	9,02	9,51	10,05
Uc [V]	0	0,181	0,297	0,556	0,71	0,891	1,095	1,196	1,345	1,458	1,552	1,726	1,83	1,875	1,926	1,963	1,995	2,032	2,072	2,102	2,13	2,165	2,192	2,22	2,24	2,25	2,26
Rc [Ω]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Uce [V]	0,00	0,07	0,09	0,12	0,13	0,15	0,18	0,20	0,27	0,38	0,49	0,76	1,19	1,62	2,13	2,55	3,04	3,53	3,95	4,40	4,95	5,37	5,89	6,28	6,78	7,26	7,79
Ic [mA]	0	1,81	2,97	5,56	7,1	8,91	10,95	11,96	13,45	14,58	15,52	17,26	18,3	18,75	19,26	19,63	19,95	20,32	20,72	21,02	21,3	21,65	21,92	22,2	22,4	22,5	22,6

Tabela 4. Pomiary dla $U_1=9V$

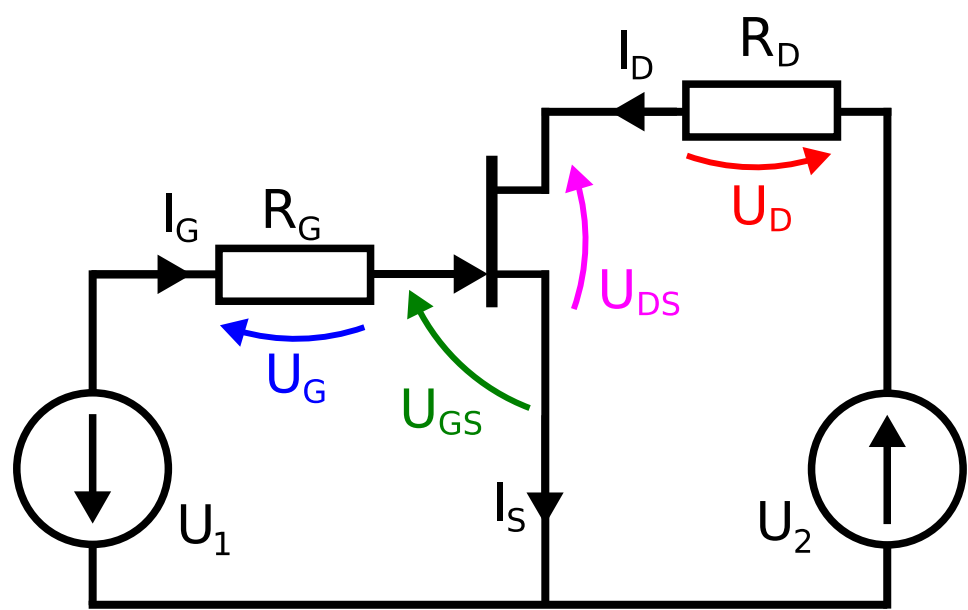
U1 [V]	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02	9,02
U2 [V]	0	0,251	0,385	0,648	0,872	1,005	1,239	1,438	1,646	1,855	2,035	2,5	3,062	3,518	4,076	4,515	5,019	5,49	6,05	6,55	7,07	7,45	8,02	8,5	9	9,53	10,02
Uc [V]	0	0,193	0,313	0,553	0,758	0,881	1,096	1,278	1,464	1,643	1,778	2,031	2,301	2,49	2,662	2,738	2,808	2,868	2,935	3,007	3,069	3,114	3,186	3,242	3,312	3,381	3,426
Rc [Ω]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Uce [V]	0	0,058	0,072	0,095	0,114	0,124	0,143	0,16	0,182	0,212	0,257	0,469	0,761	1,028	1,414	1,777	2,211	2,622	3,115	3,543	4,001	4,336	4,834	5,258	5,688	6,149	6,594
Ic [mA]	0	1,93	3,13	5,53	7,58	8,81	10,96	12,78	14,64	16,43	17,78	20,31	23,01	24,9	26,62	27,38	28,08	28,68	29,35	30,07	30,69	31,14	31,86	32,42	33,12	33,81	34,26



Rys 3. Rodzina charakterystyk $I_C = f(U_{CE})$.

Charakterystyki otrzymane z symulacji nieznacznie różnią się od charakterystyk otrzymanych z pomiaru fizycznego układu, najprawdopodobniej różnice te wynikają ze zmienności wzmocnienia prądowego β zastosowanego tranzystora. Ponadto struktury krzemowe mają ujemny przyrost oporności temperatury, co może tłumaczyć niewielkie różnice dla niskich prądów oraz większe różnice dla większych prądów.

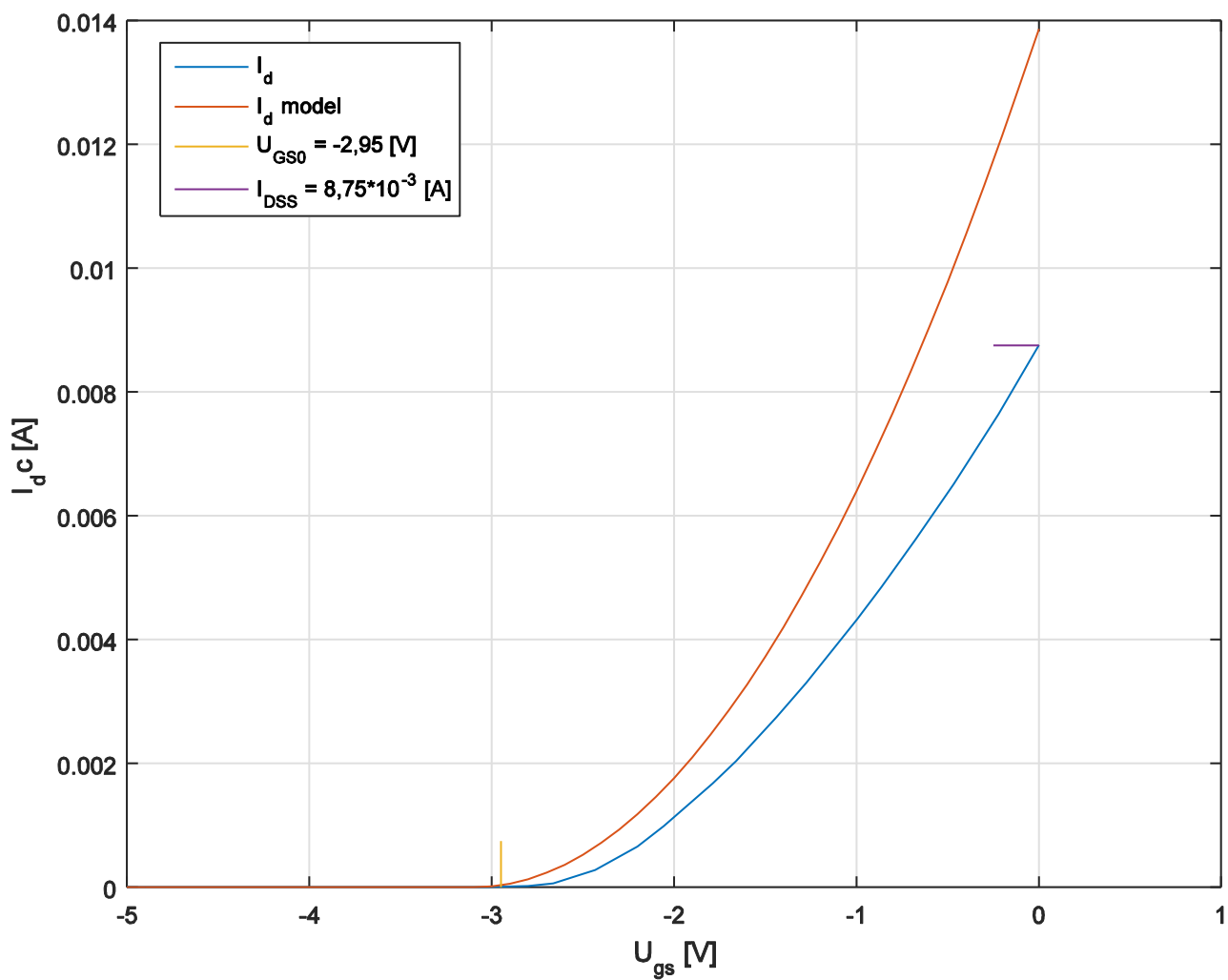
d. układ OS, wyznaczenie charakterystyki $I_D = F(U_{GS})$.



Rys 4. Układ tranzystora polowego J-FET (źródło: Instrukcja do ćwiczeń TM1, UPEL AGH).

Tabela5. Pomiar $I_D=f(U_{GS})$.

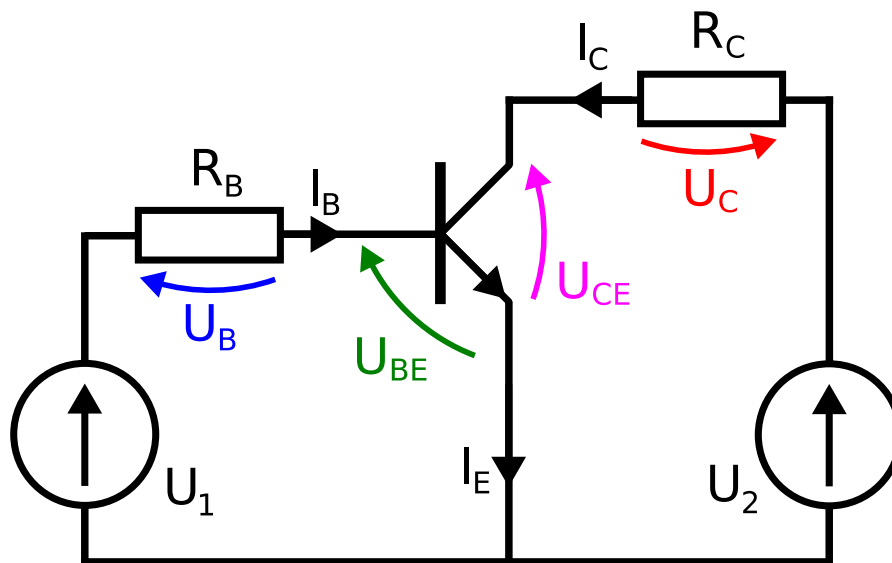
U1 [V]	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	4,2	4,4	4,6	4,8	5
U2 [V]	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
RD [Ohm]	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
UD [V]	0,88	0,76	0,65	0,56	0,49	0,43	0,33	0,28	0,20	0,17	0,10	0,07	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
UGS [V]	0,00	0,22	0,47	0,68	0,86	1,00	1,28	1,44	1,66	1,79	2,06	2,20	2,43	2,66	2,80	3,07	3,09	3,41	3,65	3,85	4,26	4,43	4,48	4,65	4,89	5,00



Rys 5. Charakterystyka $I_D=f(U_{GS})$ tranzystora unipolarnego.

Zamieszczone charakterystyki różnią się nieznacznie, choć trend jest analogiczny. Różnice mogą wynikać z nieidealności modelu, oraz ze różnic fizycznego tranzystora polowego od jego odpowiednika teoretycznego. Naszym zdaniem wyniki otrzymane empirycznie pokrywają się z wartościami modelowymi.

e. Tranzystor jako klucz pomiar wzmocnienia prądowego β .

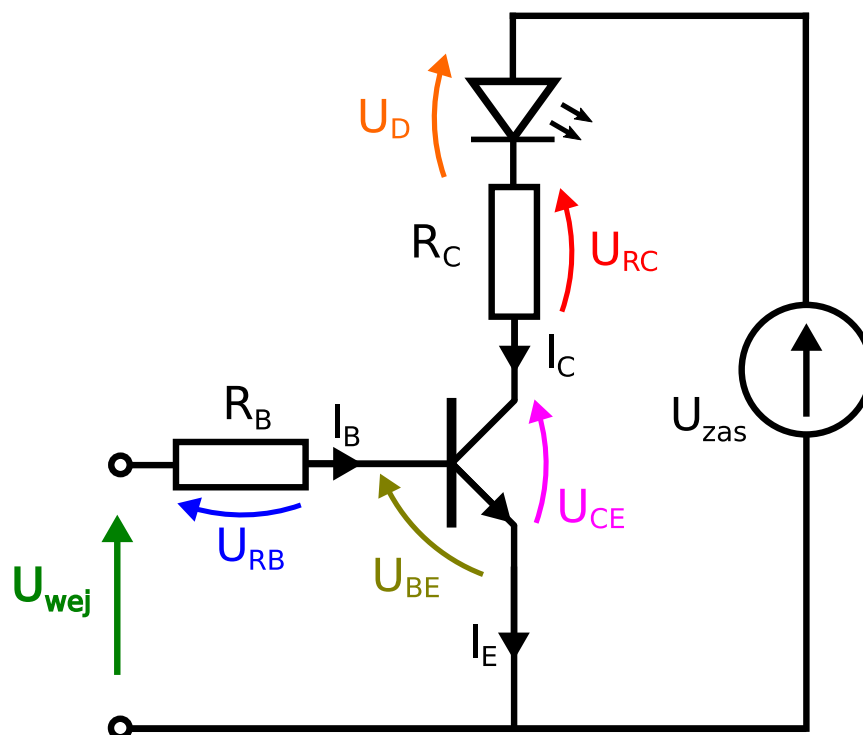


Rys 6. Układ OE npn (źródło: Instrukcja do ćwiczeń TM1, UPEL AGH).

Wartość wzmocnienia β tranzystora została wyznaczona analogicznie jak w pkt. a i wynosi:

$$\beta = 391 \left[\frac{A}{A} \right]$$

f. Tranzystor jako klucz obliczenia.



Rys. 7 Schemat klucz tranzystorowy sterujący diodą LED. (źródło: Instrukcja do ćwiczeń TM1, UPEL AGH).

Obliczenie R_C :

$$U_{zas} = 10 \text{ V.}$$

$$U_{CE(sat)} = 0,2 \text{ V}$$

$$U_D = 1,7 \text{ V (sprawdzone multimetrem).}$$

$$I_C = 10 \text{ mA}$$

$$R_C = \frac{U_{zas} - U_{CE} - U_D}{I_C}$$

$$R_C = \frac{10 - 0,2 - 1,7}{0,01} = 810 \Omega$$

Ponieważ nie znaleźliśmy takiego rezystora zastosowaliśmy najbliższy większy o wartości 908Ω .

Obliczenie R_B :

$$U_{wej} = 5 \text{ V}$$

$$U_{BE} = 0,7 \text{ V}$$

$$I_C = 10 \text{ mA}$$

$$I_{B1} = \frac{I_C}{\beta} = \frac{0,01}{391} = 0,000026 \text{ A}$$

$$R_{B1} = \frac{5 - 0,7}{0,000026} = 165 \text{ k}\Omega$$

Ponieważ nie znaleźliśmy takiego rezystora zastosowaliśmy najbliższy o wartości $146 \text{ k}\Omega$.

$$I_{B2} = 2 * \frac{I_C}{\beta} = \frac{0,02}{391} = 0,000052 \text{ A}$$

$$R_{B2} = \frac{5 - 0,7}{0,000052} = 83 \text{ k}\Omega$$

Ponieważ nie znaleźliśmy takiego rezystora zastosowaliśmy najbliższy o wartości $99 \text{ k}\Omega$.

$$I_{B3} = 4 * \frac{I_C}{\beta} = \frac{0,04}{391} = 0,0001023 \text{ A}$$

$$R_{B3} = 4 * \frac{5 - 0,7}{0,0001023} = 42 \text{ k}\Omega$$

Ponieważ nie znaleźliśmy takiego rezystora zastosowaliśmy najbliższy większy o wartości $46,8 \text{ k}\Omega$.

g. Tranzystor bipolarny npn pracujący jako klucz.

Tabela 6. Pomiar dla $I_{B1} = \frac{I_C}{\beta}$

R_C [ohm]	R_B [ohm]	czas otwierania [us]	czas zamykania [us]	U_{RB} [V]	U_{BE} [V]	U_{RC} [V]	U_{CE} [V]
908	168000	5,52	6,72	4,32	0,695	7,93	0,267

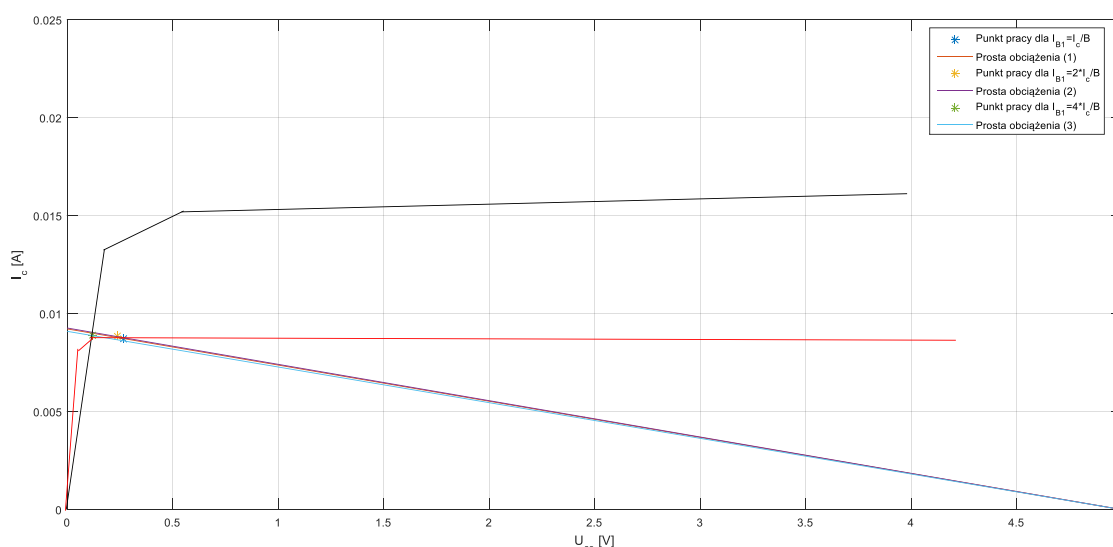
Tabela 7. Pomiar dla $I_{B1}=2\frac{I_C}{\beta}$

RC [ohm]	RB [ohm]	czas otwierania [us]	czas zamykania [us]	URB [V]	UBE [V]	URC [V]	UCE [V]
908	99000	3	5,8	4318	0,697	8,02	0,2374

Tabela 8. Pomiar dla $I_{B1}=4\frac{I_C}{\beta}$

RC [ohm]	RB [ohm]	czas otwierania [us]	czas zamykania [us]	URB [V]	UBE [V]	URC [V]	UCE [V]
908	46800	1,1	4,72	4,3	0,7	8,07	0,118

Czasy otwarcia oraz zamknięcia tranzystora są różne, wynika z procesów zachodzących na poziomie nośników ładunków, zauważamy że czas zamykania jest większy niż czas otwarcia. Najmniejsze czasu występują gdy tranzystor pracuje w stanie głębokiego nasycenia.



Rys. 7. Rodzina charakterystyk wyjściowych tranzystora BC547B wraz z prostą obciążenia.

Dla wyznaczonych punktów pracy tranzystora, zostały naszkicowane charakterystyki wyjściowe $I_C=f(U_{CE})$. Widoczna na rysunku 7. czarna krzywa obrazuje przypadek gdy punkt pracy znajduje się w liniowej części charakterystyki (stan aktywny), natomiast krzywa czerwona wizualizuje sytuację gdy punkt pracy znajduje się na części charakterystyki, gdy tranzystor jest w stanie nasycenia.

Moc wydzielana na tranzystorze BC547B

Katalogowa moc rozproszenia dla tranzystora BC547B wynosi 500mW dla temp 25°C

$$P=I_C \cdot U_{CE}$$

$$P_1=0,00873 \cdot 0,267=0,00233W$$

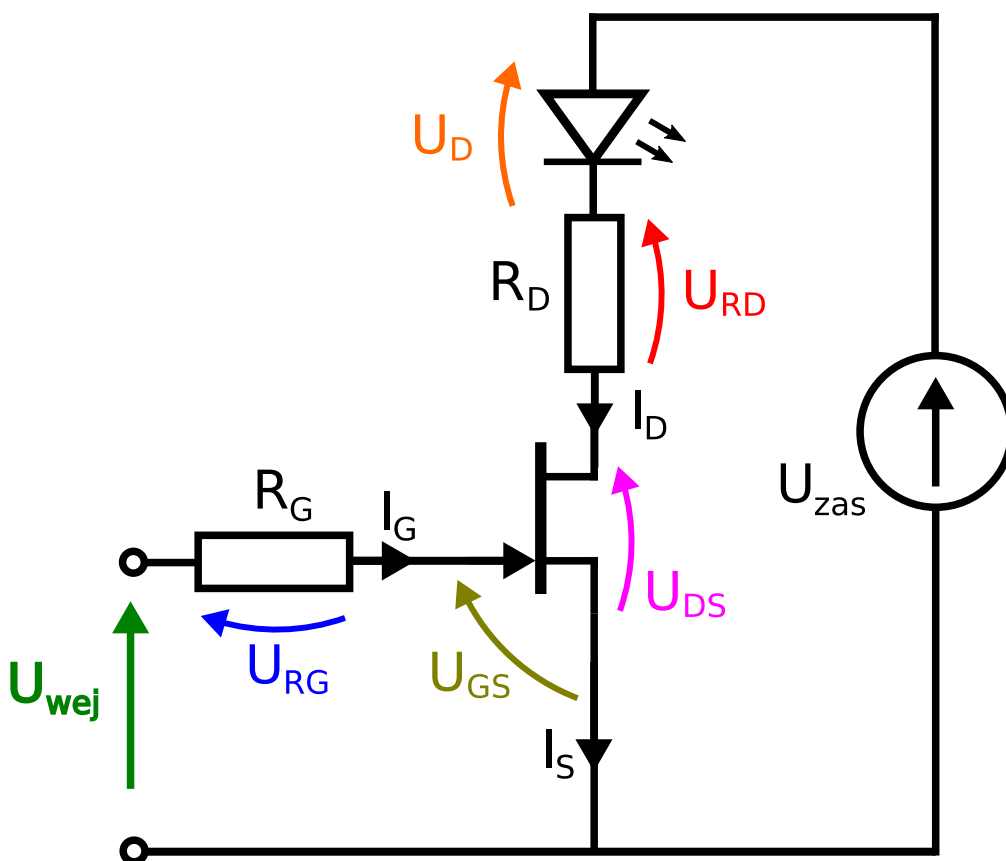
$$P_2=0,00883 \cdot 0,2374=0,021W$$

$$P_3=0,00889 \cdot 0,118=0,00105W$$

Moc wydzielająca się na tranzystorze zawiera się w przedziale 1-3mW oznacza to bardzo niewielką wartość w porównaniu do mocy maksymalnej wynoszącej 500mW, oznacza to, że zastosowany tranzystor będzie musiał rozproszyć moc niemal znikomą.

Tranzystor jako klucz najlepiej działa, gdy pracuje możliwie najkrócej w stanie pośrednim między nasyceniem a zatkaniem. Z naszych pomiarów wynika że tranzystor najlepiej gdy $I_{B1} = 4 \frac{I_C}{\beta}$. W stanie nasycenia jest najlepiej dla niego ponieważ wtedy odkłada się na nim najmniejsze napięcie, następstwem czego jest najmniejsza moc strat wydzielanych na tranzystorze.

h. Sterowanie sygnałem PWM kluczem wykorzystującym tranzystor J-FET



Rys. 8. Klucz tranzystorowy wykorzystujący tranzystor J-FET.

Czy tranzystor będzie całkowicie zamknięty i otwarty zależy od napięcia odcięcia $U_{GS(sat)}$.

Dla wypełnienia PWM 50% nie zauważamy migania diody już przy 40Hz. przy paśmie od 40Hz do 3MHz nie zauważamy mniejszej jasności diody, oznacza to że tranzystor do 3MHz dobrze przenosi sygnał PWM. Brak efektu przyciemnienia diody może być spowodowany nie wyłączaniem się tranzystora J-FET.

3. Wnioski z wykonanego ćwiczenia.

Pomimo dwukrotnego pomiaru charakterystyki prądu bazy I_b (Rysunek 2) znacząco różni się ona od zasymulowanej w programie LTspice. Pozostałe pomiary zostały przeprowadzone bez trudności i zasadniczo są zgodne z zasymulowanymi charakterystykami. Szczególnie ważnym punktem laboratoriów było badanie pracy tranzystora jako klucza. Konfiguracja ta jest często stosowana w układach elektronicznych do sterowania elementami potrzebującymi dużo większej mocy niż ta, którą mogą zapewnić urządzenia sterujące. Ze względu na niski koszt tego typu elementów oraz ich szerokie zastosowanie są one obecne w ogromnej ilości aplikacji.