



Elektronika przyrządów półprzewodnikowych

Laboratorium nr 6

Tranzystor E-MOSFET w układzie sterowania mocą metodą PWM

Zagadnienia obowiązujące na kartkówce

- Symbole, zasady polaryzacji, charakterystyki statyczne, parametry, zasada działania tranzystorów polowych MOSFET.
- Współczynnik wypełnienia sygnału – definicja, wyjaśnienie na wykresie, sposób przeliczania.
- Sterowanie mocą za pomocą metody PWM (ang. Pulse Width Modulation).
- Tranzystor MOSFET jako element wykonawczy w układach sterowania mocą – wyjaśnienie jakie parametry są istotne, jaka powinna być konstrukcja tranzystora MOSFET, aby mógł pracować w układach przełączania dużej mocy bądź częstotliwości.
- Czasy przełączania tranzystora MOSFET – definicja i od czego zależą.
- Przepięcia powstające podczas pracy impulsowej tranzystora MOSFET.
- Schemat układu sterowania mocą za pomocą metody PWM z tranzystorem MOSFET – schemat, zasada działania, rola elementów.
- Zadania obliczeniowe związane z programem ćwiczenia.

Literatura

- W. Marciniak, Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone, WNT, Warszawa 1987, podrozdział 6.3. Tranzystor MIS,
- Toshiba Power MOSFET Electrical Characteristics, nota aplikacyjna, 2018,
- Vishay Power MOSFET Basics: Understanding Gate Charge and Using it to Assess Switching Performance, nota aplikacyjna AN608A, 2016,
- Vishay Power MOSFET Basics: Understanding the Turn-On Process, nota aplikacyjna AN850, 2015.

Wykonując pomiary **PRZESTRZEGAJ** przepisów BHP związanych z obsługą urządzeń elektrycznych.

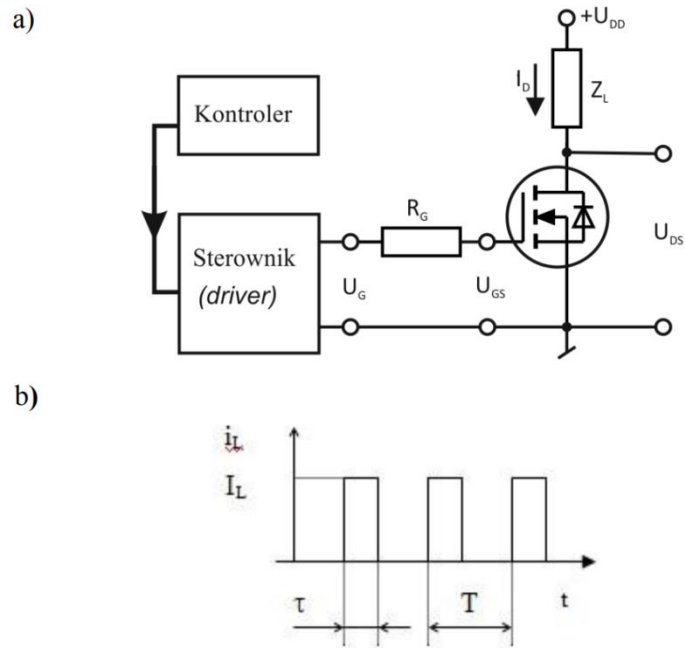
IV. Wiadomości wstępne

Tranzystory przełącznikowe są powszechnie stosowane do regulacji mocy dostarczanej do urządzenia będącego obciążeniem tranzystora. Urządzeniem tym może być np. silnik prądu stałego, transformator w zasilaczu impulsowym (obciążenie o charakterze indukcyjnym), żarówka samochodowa czy element grzejny w piecu oporowym (obciążenie rezystancyjne).

Uproszczony, blokowy schemat aplikacyjny do sterowania mocą w obciążeniu z użyciem tranzystora MOSFET pokazany jest na rysunku 1. Kontroler to najczęściej scalony układ logiczny (mikrokontroler), który po odpowiednim zaprogramowaniu realizuje funkcje użytkownika, czyli decyduje o konkretnym sposobie dostarczania mocy do obciążenia. Układ sterownika (ang. *driver*) przetwarza sygnały z kontrolera na napięcie lub prąd o wartościach odpowiednich do działania przełączającego tranzystora mocy, w tym przypadku tranzystora MOSFET normalnie wyłączonego z kanałem typu n. Symbol MOSFETA zawiera istniejącą w strukturze wewnętrznej tranzystora zintegrowaną diodę. W niektórych zastosowaniach dioda ta pełni pożyteczną rolę, w innych jest elementem pasożytniczym. Rezystor zewnętrzny R_G umieszczony jest w obwodzie wejściowym tranzystora. Jego wartość wraz z pojemnością bramki tranzystora MOSFET wnosi stałą czasową obwodu wejściowego, która decyduje o szybkości przełączania tranzystora. Zasilacz prądu stałego U_{DD} to źródło, z którego moc jest przekazywana do odbiornika (obciążenia) o impedancji Z_L .

Najczęściej regulacja mocy odbywa się poprzez zmianę współczynnika wypełnienia D przebiegu prostokątnego (ang. *pulse-width modulation* - PWM) prądu i_L w obciążeniu. Współczynnik wypełnienia definiowany jest jako $D = \tau/T$ (Rys. 1b). Widać, że moc wydzielana w obciążeniu będzie wzrastać wraz ze wzrostem współczynnika D . Dalsze rozważania ograniczymy do obciążenia typu rezystancyjnego, wtedy $Z_L = R_L$.

Moc dostarczana z zasilacza DC wydziela się w obciążeniu, $P_L = I_L \times (U_{DD} - U_{DS}) \times D$ oraz w tranzystorze przełączającym, $P_{Tr} = I_L \times U_{DS} \times D$. W celu zwiększenia sprawności dostarczania mocy do obciążenia należy minimalizować moc traconą w tranzystorze, tj. minimalizować napięcie U_{DS} na tranzystorze w stanie włączenia (parametr U_{DSON}).



Rys. 1. Układ sterowania mocą z tranzystorem MOSFET w roli elementu przełączającego:
 a) schemat układu, b) przykład przebiegu czasowego prądu w obciążeniu $I_L = I_D$: τ - czas, w którym tranzystor jest w stanie włączenia, $(T - \tau)$ - czas, w którym tranzystor jest wyłączony, T - okres przebiegu prostokątnego

W impulsowym sterowaniu mocą, o którym tu mowa, tranzystor pracuje dwustanowo. W stanie blokowania, czyli w stanie wyłączenia lub nieprzewodzenia tranzystora napięcie $U_{DS} = U_{DD}$, a prąd $i_L = 0$ (pomijając prąd upływu tranzystora) i wówczas moce $P_L = 0$ i $P_{Tr} = 0$. W stanie przewodzenia, czyli w stanie włączenia tranzystora, amplituda prądu $i_L = I_L$, a napięcie $U_{DS} = U_{DSON}$, gdzie wielkość U_{DSON} nazywana jest napięciem włączenia i określa je zależność $U_{DSON} = R_{DSON} \times I_L$. Wielkość R_{DSON} to rezystancja włączenia, która jest ważnym parametrem tranzystorów MOSFET. Parametr ten jest podawany w katalogach, jako odpowiednik napięcia nasycenia U_{CE-SAT} tranzystorów bipolarnych. Ze względu na konieczność minimalizacji mocy traconej w tranzystorze, konstruktorzy dążą do uzyskania jak najmniejszej wartości R_{DSON} .

Większą sprawność dostarczania mocy do obciążenia można uzyskać stosując większe częstotliwości przebiegu prostokątnego, czyli większe częstotliwości przełączania tranzystora $f = 1/T$. Jednak wraz ze wzrostem częstotliwości wzrasta moc tracona w tranzystorze. Dzieje się tak za sprawą mocy traconej podczas przełączania, czyli przechodzenia tranzystora ze stanu wyłączenia do stanu włączenia i odwrotnie. W tych stanach przejściowych występują w tranzystorze jednocześnie duże napięcia i prądy. Można wykazać, że moc tracona jest

proporcjonalna nie tylko do wielkości U_{DD} , I_L , ale także do częstotliwości przełączania i czasów przełączania (czasu włączania t_{on} i czasu wyłączenia t_{off}).

Wielkości U_{DD} i I_L decydują o mocy dostarczanej do obciążenia, czyli powinny być jak największe. Dla pewnych częstotliwości (w praktyce powyżej 100 kHz) moc tracona podczas przełączania tranzystora MOSFET przewyższa moc strat w stanie włączenia tranzystora i może osiągać wielkość przekraczającą moc admissyjną, czyli moc dopuszczalną dla określonego typu tranzystora. Jest to główny czynnik ograniczający wielkość sterowanej mocy, a także ograniczający maksymalną częstotliwość przełączania. Dlatego bardzo ważnymi parametrami tranzystora decydującymi o mocy traconej są jego czasy przełączania. Czasy przełączania wynikają z konieczności naładowania i rozładowania pojemności wejściowej tranzystora, czyli pojemności kondensatora MOS, bramka-kanal odpowiedzialnego za indukowanie kanału w tranzystorze.

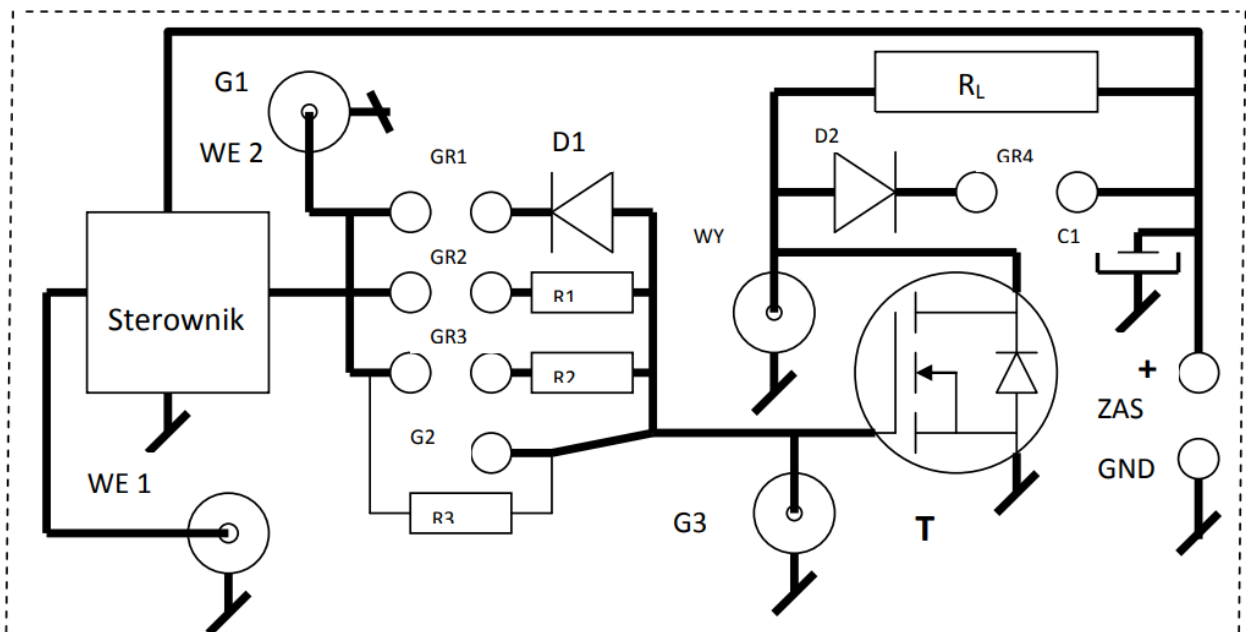
W celu uzyskania krótkich czasów przełączania wymagane są duże chwilowe (impulsowe) wartości prądów bramki, niezbędne do przeładowywania dużych pojemności tranzystora mocy MOSFET wynikających z jego rozbudowanej konstrukcji. Powyższe fakty stawiają wysokie wymagania na wydajność prądową układów sterowników, czyli tzw. *driverów*. Optymalne wartości impulsów prądu bramki i_G można uzyskać także poprzez dobór odpowiednich wartości rezystorów R_G dołączonych do bramki.

Z punktu widzenia wartości napięcia podawanego na bramkę, istnieją dwa typy tranzystorów mocy MOSFET. Pierwszy standardowy o napięciu progowym $U_T = 2-4$ V (zwykle 3 V) i drugi logiczny oznaczany często przez LLMOSFET (*Logic Level MOSFET*) o napięciu $U_T = 1-2$ V (zwykle 1,5 V). W celu uzyskania minimalnych wartości rezystancji włączenia $R_{DS(on)}$ tranzystora, stosuje się napięcia sterujące bramki znacznie przewyższające napięcia progowe U_T . Są to: $U_{GG} = 10$ V dla typu standardowego i $U_{GG} = 5$ V dla typu logicznego. Jednak im wyższe napięcia bramki U_{GG} tym dłuższe czasy przeładowywania pojemności wewnętrznych tranzystora, a w konsekwencji dłuższe czasy jego przełączania. Wynika to stąd, że tam gdzie istotna jest duża częstotliwość przełączania (małe czasy przełączania), przy jednocześnie małych mocach przełączanych, projektant systemu może stosować niższe napięcia bramkowe.

Cechą charakterystyczną tranzystorów MOSFET jest to, że czasy wyłączenia są większe od czasów włączania, które decydują o maksymalnej częstotliwości przełączania tych tranzystorów. Dlatego często stosuje się rozwiązanie, gdzie włączenie tranzystora odbywa się poprzez rezystor bramkowy R_G , a wyłączenie (prąd bramki płynie wtedy w przeciwnym kierunku) poprzez inny

rezystor o znacznie mniejszej rezystancji (czasem nawet zerowej) połączony szeregowo z diodą, nazywaną diodą przyspieszającą wyłączenie, pokazaną na rysunku 2 (dioda D1).

Należy zauważyć, iż w niektórych zastosowaniach minimalne czasy przełączania, jakie zapewnia konstrukcja tranzystora nie są korzystne, szczególnie w przypadku obciążeń indukcyjnych. Krótkie czasy przełączania oznaczają gwałtowne zmiany napięcia U_{DS} i prądu obciążenia I_L , który jest jednocześnie prądem drenu tranzystora. Zgodnie z prawem Faradaya napięcie U_L powstające na indukcyjności L podczas zmian wartości prądu płynącego przez tę indukcyjność jest proporcjonalne do szybkości zmian prądu wg zależności $U_L = L \times (dI_L/dt)$. W przypadku obciążenia indukcyjnego, gdzie wartości L są znaczące, napięcie U_L może osiągać duże wartości. Podczas wyłączenia tranzystora, na drenie tranzystora pojawia się napięcie U_L , nazywane w tym przypadku przepięciem. Może ono osiągać wartości wielokrotnie przekraczające wartość napięcia zasilania U_{DD} i może być niszczące dla tranzystora przełączającego. Przepięcia ogranicza się przez zastosowanie diody gaszącej dołączonej równolegle do obciążenia, jak to pokazano na rysunku 2 (dioda D2).



Rys. 2. Widok układu pomiarowego (linią przerywaną zaznaczono obrys płytki)

V. Program ćwiczenia

Program ćwiczenia obejmuje:

- pomiar czasów włączenia i wyłączenia tranzystora MOSFET,
- pomiar przepięć na drenie tranzystora podczas jego wyłączenia,
- pomiar napięcia włączenia U_{DSON} i obliczenie rezystancji włączenia R_{DSON} ,
- obliczenie mocy użytecznej w obciążeniu i mocy traconej w tranzystorze przełączającym w stanie włączenia,
- pomiar impulsów prądu bramki podczas przełączania.

Wszystkie pomiary należy przeprowadzić z wykorzystaniem płytki pomiarowej z układem przedstawionym na rysunku 2. Rolę kontrolera pełni w tym układzie generator napięciowy. Ze względu na wystarczającą wydajność prądową generatora (50 mA) pomija się układ *drivera*, a sygnał sterujący podaje się bezpośrednio na wejście G1 układu. Układ należy połączyć według następującej kolejności:

- podłączyć makietę do zasilacza stabilizowanego i ustawić ograniczenie prądowe na 0,5 A,
- ustawić wyjście wysokiej impedancji (*High-Z*) na generatorze, zadeklarować funkcję przebiegu prostokątnego, ustawić częstotliwość $f = 10$ kHz, poziom niski (*low level*) na 0 V, a poziom wysoki (*high level*) sygnału na ok. 9,5 V,
- zamontować trójnik BNC na wyjściu generatora,
- połączyć przewodem BNC wyjście generatora z wejściem układu (G1),
- podłączyć kanał 1 oscyloskopu do wyjścia generatora, a kanał 2 do wyjścia układu (WY),
- załączyć napięcie na wyjściu zasilacza stabilizowanego i ustawić napięcie wyjściowe na 10 V
- załączyć sygnał na wyjściu generatora.

Po włączeniu sygnału z generatora na obu kanałach oscyloskopu powinny pojawić się przebiegi prostokątne. W przypadku odwrotnego podłączenia zasilacza włączy się ograniczenie prądowe. Wtedy prąd płynie przez zintegrowaną (wewnętrzna) diodę istniejącą w każdym tranzystorze mocy MOSFET. Ten wsteczny przepływ prądu nie jest szkodliwy dla tranzystora gdyż nominalny prąd diody wynosi kilka A, a także nie jest szkodliwy dla układu pomiarowego, gdyż odwrotna polaryzacja układu MOSFET napięciem wyznaczanym przez spadek napięcia na tej diodzie (ok. 1 V) nie jest niszcząca dla układu.

Średni pobór prądu podczas impulsowej pracy układu ze współczynnikiem wypełnienia impulsu $D = 0,5$ wynosi około 0,3 A. Ograniczenie prądowe zasilacza załączy się również wtedy, gdy badany tranzystor pozostaje permanentnie w stanie włączenia, tzn. gdy nie przełącza prądu.

Elementy w układzie pomiarowym:

T – tranzystor mocy MOSFET IRF520 z radiatorem,

R_L – rezystor obciążenia o rezystancji ok. 16Ω i mocy około 10 W (rezystor drutowy nawijany z obecną indukcyjnością pasożytniczą),

D1 - dioda przyspieszająca wyłączenie,

D2 - dioda gasząca przepięcia (diody o napięciu wstecznym min. 40 V i prądzie znamionowym min. 1A; najlepiej diody krzemowe Schottky’ego),

rezystory bramkowe R_G : $R_1 = 22 \Omega$, $R_2 = 100 \Omega$, $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ (na stałe podłączone do bramki),

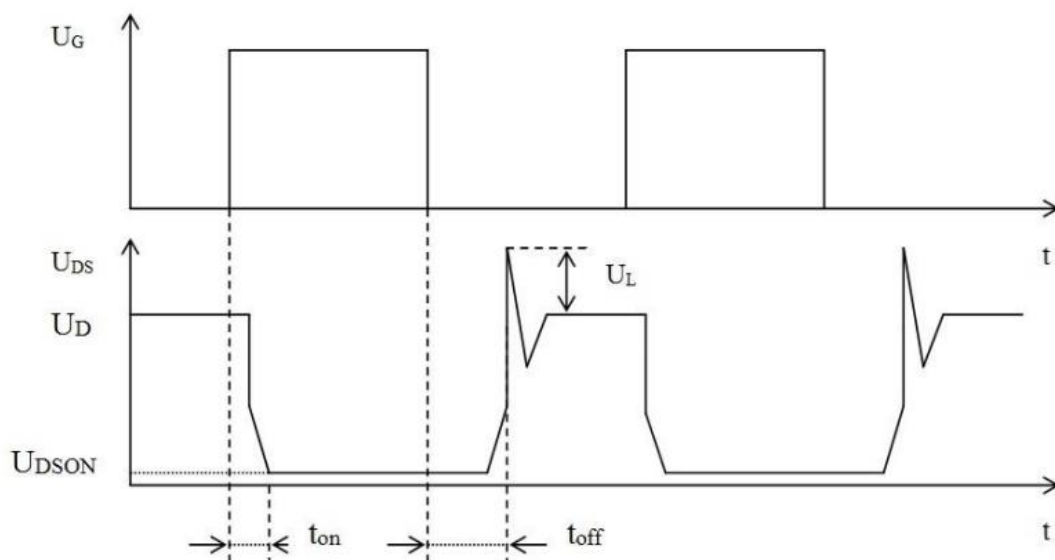
C_1 - kondensator elektrolityczny, blokujący o pojemności min. $2200 \mu\text{F}$ i napięciu znamionowym min. 25 V,

GR – gniazda radiowe,

G – gniazda BNC.

Pomiar czasów włączenia i wyłączenia tranzystora MOSFET oraz przepięć na drenie tranzystora podczas jego wyłączenia

Zmierzyć czasy włączenia i wyłączenia (t_{on} , t_{off}) zdefiniowane na przebiegach napięcia wejściowego i wyjściowego pokazanych na rysunku 3. Pomiar należy przeprowadzić dla trzech wartości rezystancji rezystora bramkowego R_G oraz z dołączoną i odłączoną diodą D1 przyspieszającą wyłączenie badanego tranzystora.



Rys. 3. Typowe przebiegi napięciowe podczas przełączania tranzystora MOSFET. Podano uproszczone definicje do pomiaru czasów włączenia t_{on} , wyłączenia t_{off} oraz przepięć U_L występujących na drenie tranzystora

- $U_G(t)$ - przebieg czasowy napięcia sterującego – napięcie na wyjściu generatora prądowego (gniazdo G1) rejestrowane na kanale pierwszym oscyloskopu.

- $U_{DS}(t)$ - przebieg czasowy napięcia dren-źródło badanego tranzystora – (gniazdo WY) rejestrowane na drugim kanale oscyloskopu, U_{DD} - napięcie zasilacza, jednocześnie napięcie na drenie tranzystora w stanie wyłączenia, U_{DSON} - napięcie na drenie tranzystora w stanie włączenia.

Pomiary wykonać wg kolejności przedstawionej poniżej, a uzyskane wyniki wpisać do tabeli 1. Jeśli istnieje taka możliwość wydrukować przykładowy przebieg napięciowy.

- $R_G = 1\text{ k}\Omega$, przepięcia mierzyć dla włączonej i odłączonej diody gaszącej D2 (zwora GR4),
- $R_G = 1\text{ k}\Omega$ i z diodą przyspieszającą D1 (połączone gniazda GR1), pomiary przepięć przeprowadzić jak dla przypadku poprzedniego,
- $R_G = 90\ \Omega$ (równolegle połączone rezystory $1\text{ k}\Omega$ i $100\ \Omega$) połączone gniazda GR2, diody D1 i D2 odłączone,
- $R_G \approx 22\ \Omega$ (równolegle połączone rezystory $1\text{ k}\Omega$ i $22\ \Omega$) połączone gniazda GR3, diody D1 i D2 odłączone.

Tabela 1. Czasy przełączania i wartości przepięć napięcia na drenie

R_G		1 k Ω D1 odłączona	1 k Ω D1 dołączona	90 Ω D1 odłączona	22 Ω D1 odłączona
t_{on} [μs]					
t_{off} [μs]					
U_L [V]	D2 wył.			X	X
	D2 wł.			X	X

Na podstawie uzyskanych pomiarów ocenić wpływ rezystancji R_G rezystora bramkowego na czasy przełączania badanego tranzystora oraz efekt dołączania diod D1 i D2.

Pomiar napięcia włączenia U_{DSON} i mocy wydzielanej w tranzystorze. Obliczenie rezystancji włączenia R_{DSON} tranzystora MOSFET.

Dla $R_G = 1\text{ k}\Omega$, wyznaczyć z obserwowanych przebiegów wartość napięcia U_{DSON} . W celu uzyskania większej dokładności pomiaru zwiększyć czułość kanału 2. Obliczyć wartość R_{DSON} z zależności $R_{DSON} = U_{DSON}/I_L$, gdzie I_L to prąd w obciążeniu (prąd drenu) w stanie włączenia tranzystora. Ponieważ $U_{DSON} \ll U_{DD}$, wartość prądu można wyliczyć z zależności $I_L = U_{DD}/R_L$.

Wartość rezystancji obciążenia R_L wyliczyć na podstawie oznaczeń na rezystorach. Obliczyć moc użyteczną P_U w obciążeniu i moc traconą P_T w tranzystorze w stanie włączenia. Wielkość P_U wyliczyć z zależności $P_U = I_L \times (U_{DD} - U_{DSON})$, a wielkość P_T z zależności $P_T = I_L \times U_{DSON}$. Zmierzone i wyliczone wielkości umieścić w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry tranzystora podczas pracy

U_{DSON} [mV]	U_{DD} [V]	R_L [Ω]	I_L [A]	R_{DSON} [m Ω]	P_U [W]	P_T [mW]

Pomiar mocy P_L wydzielanej w obciążeniu w funkcji współczynnika wypełnienia impulsów napięcia sterującego. Przykład wykorzystania techniki modulacji szerokości impulsu (PWM)

Pomiary wykonać dla $R_G = 90 \Omega$ oraz diody D1 – wyłączona, D2 – włączona, ustalić częstotliwość sygnału generatora 1 kHz. W celu dokładnego pomiaru prądu pobieranego z zasilacza, należy połączyć dodatni zacisk zasilacza z gniazdem +ZAS na płycie przez cyfrowy amperomierz o zakresie DC co najmniej 1 A. W przypadku przebiegu prostokątnego, wskazywana przez amperomierz cyfrowy wartość skuteczna jest jednocześnie wartością średnią prądu. W czasie pomiarów pokrętle generatora regulujemy wartość współczynnika wypełnienia D zmieniając szerokość impulsu τ (patrz przebieg na rys. 1.). Jak już wspomniano we wprowadzeniu, moc w obciążeniu wynosi $P_L = I_L \times (U_{DD} - U_{DSON}) \times D$. Jednocześnie między wartością średnią i amplitudą prądu sygnału prostokątnego zachodzi zależność $I_{sr}/I_L = D$. Z uwagi na niewielki spadek napięcia na tranzystorze załączonym ($U_{DSON} \ll U_{DD}$), moc w obciążeniu można wyliczyć z zależności $P_L = I_{sr} \times U_{DD}$, gdzie I_{sr} to wskazanie amperomierza DC. Zmierzone wielkości wpisać do tabeli 3. i wykreślić zależność $P_L = f(D)$.

Tabela 3. Parametry tranzystora podczas pracy

τ [μ s]							
D	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
I_{sr} [mA]							
P_L [W]							
Parametry układu: $R_L = \dots\dots\dots$, $U_{DD} = \dots\dots\dots$, $T = \dots\dots\dots$							

Podsumowanie

- Dokonać krótkiego podsumowania wykonanych pomiarów i uzyskanych wyników.
- Opisać wpływ wartości R_G na czasy przełączania.
- Opisać wpływ diody D1 oraz diody D2 na pracę układu.
- Podać względne zmiany mocy w obciążeniu uzyskane metodą PWM $\frac{\Delta P}{P_0} \cdot 100\%$,
- Obliczyć o ile zmienia się moc w obciążeniu przy zmianie współczynnika wypełnienia sygnału o $1\% \frac{\Delta P [W]}{\Delta D [\%]}$, wyjaśnić o czym informuje wyliczona wartość.