



PODZESPOŁY I UKŁADY SCALONE MOCY

Ćwiczenie A13

Wpływ obciążenia na stany dynamiczne

Opracowanie ćwiczenia i instrukcji:
Łukasz Starzak

Łódź 2012

Spis treści

B Wprowadzenie do ćwiczenia	5
1. Cel i przebieg ćwiczenia.....	5
C Doświadczenie	7
2. Pomiary	7
2.1. Opis układu pomiarowego	7
2.2. Przygotowanie do pomiarów	9
Konfiguracja układu pomiarowego	9
Pomiar próbny	10
Konfiguracja pomiaru prądu	11
2.3. Wykonanie pomiarów	12
Pełny cykl przełączania	12
Dokładna obserwacja załączania i wyłączania	12
Zmiana charakteru obciążenia	13
Zmiana wartości obciążenia	13
Zakończenie pomiarów	14
D Wyniki	15
3. Opracowanie wyników	15
3.1. Sprawdzenie poprawności przeliczania prądu	15
3.2. Parametry dla załączania i wyłączania	17
Uruchomienie programu Scilab	17
Parametry dynamiczne	17
Dalsze przypadki	19
3.3. Podsumowanie wyników	21
3.4. Analiza wyników	22
E Informacje	25
4. Literatura	25

Wprowadzenie do ćwiczenia

1. Cel i przebieg ćwiczenia

Celem niniejszego ćwiczenia jest zbadanie wpływu obciążenia na przebieg i parametry przełączania klucza półprzewodnikowego. Jakkolwiek pojęcie „obciążenie” oznacza zasadniczo prąd, w niniejszym ćwiczeniu rozszerzymy powyższe zagadnienie również na napięcie zasilania, którym przyrząd półprzewodnikowy jest „obciążony” w stanie wyłączenia. Obciążenie rozważać będziemy zarówno pod względem ilościowym (wartość prądu przewodzenia, a także napięcia blokowania), jak i jakościowym (charakter obciążenia, czy też charakter odbiornika). Analizie zostanie poddana trajektoria punktu pracy na płaszczyźnie charakterystyk wyjściowych oraz wartości energii wydzielanej w przyrządzie w czasie stanów dynamicznych. Jako przykład przeanalizowany zostanie tranzystor MOSFET, jednak zasadnicze wnioski będą miały zastosowanie do wszystkich tranzystorów mocy, jak również szerzej – do wszystkich przyrządów półprzewodnikowych mocy.

Działanie tranzystora MOSFET typu VDMOS, przebieg procesów dynamicznych oraz straty mocy w tranzystorze MOSFET i sposób ich wyznaczania zostały omówione w literaturze [1] i instrukcji [2].

W instrukcjach [2] i [3] przedstawiono podstawowe różnice między przełączaniem z obciążeniem rezystancyjnym [2] a przełączaniem z obciążeniem indukcyjnym [3]. Pierwszy z przypadków został szczegółowo przeanalizowany w instrukcji [2], nie tylko w funkcji czasu, ale również w zakresie trajektorii punktu pracy na płaszczyźnie charakterystyk wyjściowych. Drugi natomiast odpowiada zasadniczo układowi do wykonywania testu ataku prądowego [1] (z tą różnicą, że bramka tranzystora w niniejszym ćwiczeniu jest sterowana zwyczajnie – stałym napięciem, a nie stałym prądem).

2. Pomiary

2.1. Opis układu pomiarowego

Schemat układu laboratoryjnego w postaci klucza dolnego jest przedstawiony na rys. 1. Zaznaczone punkty układu wyprowadzone są do **gniazd na płycie czołowej**. Ponadto punkty G, D i S doprowadzone są (w kolejności widocznej na panelu układu) do niebieskiej listwy mocującej, co pozwala na włączenie w obwód tranzystora T. Odbiornik – rezystancyjny R_L lub indukcyjny Z_L – jest dołączany poprzez gniazda na panelu wskazane w dalszym ciągu instrukcji.

Sterowanie tranzystorem realizowane jest za pomocą wbudowanego generatora impulsów o parametrach: $f_p \approx 45$ kHz, $D \approx 0,5$. Na wyjściu generatora znajduje się sterownik bramki IR2117 i opornik bramkowy $100\ \Omega$. Amplituda impulsów bramkowych u_g jest w przybliżeniu równa napięciu zasilającemu obwód sterowania U_{GG} . Generator uruchamiany jest przez wciśnięcie jednego z dwóch przycisków K na panelu – czerwonego, który pozwala na trwałe załączenie, lub zielonego, który jest załączony jedynie przez czas jego przytrzymania. Praca generatora sygnalizowana jest przez żółtą diodę.

Oscyloskop będzie odświeżał dane w swojej pamięci wyłącznie w czasie, gdy generator pracuje. W związku z powyższym po każdej zmianie nastaw konieczne jest włączenie generatora. Dotyczy to również sytuacji, gdy nastawy zostały zmienione tylko na urządzeniach pomiarowych (oscylloskopie, sondzie prądowej). **Dopiero po wygenerowaniu nowego ciągu impulsów oscyloskop zarejestruje przebiegi przy nowych ustawieniach i zmiana ustawień odniesie jakikolwiek skutek.** Do tego czasu, nawet jeżeli wydaje się, że przebiegi zostały np. powiększone w poziomie (zmiana podstawy czasu na mniejszą), nie jest to prawdą. W pamięci oscyloskopu nadal będą znajdować się dane zarejestrowane przy poprzednich nastawach; jedynie punkty zostaną rozstrzelone na osi czasu. Tego typu powiększenie jest podobne do funkcji *zoomu* cyfrowego – nie powoduje ono rejestracji dokładniejszego obrazu, a tylko jego rozciągnięcie. Oscyloskop używany w ćwiczeniu sygnalizuje to wyszarzając przebiegi. Powyższe stosuje się również do powiększania w pionie (zmiany wzmocnienia napięciowego oscyloskopu lub współczynnika przetwarzania wzmacniacza sondy prądowej).

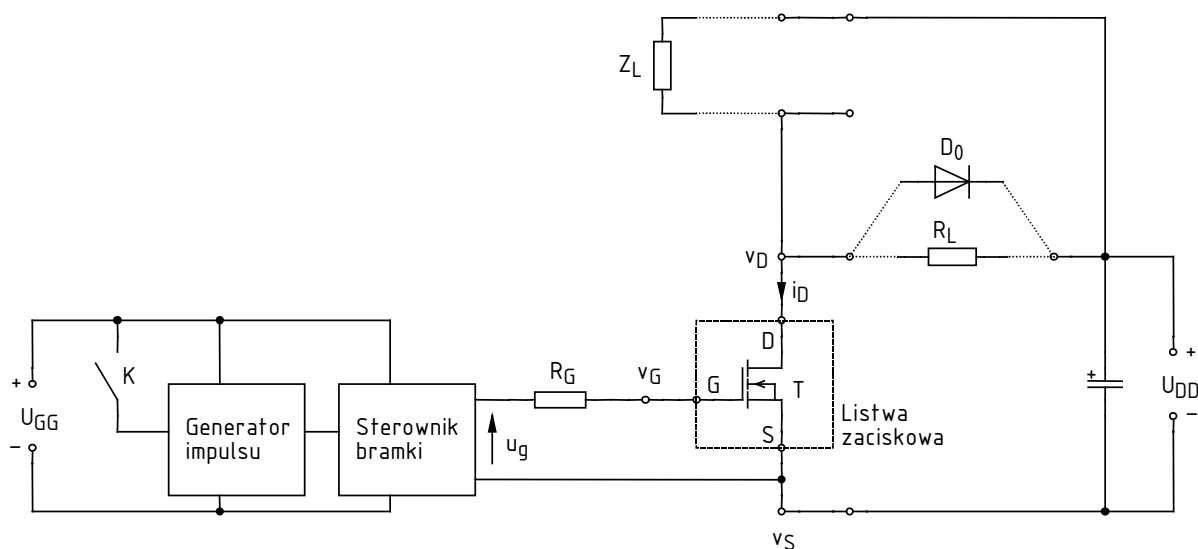
W niniejszym ćwiczeniu, ze względu na niebezpieczeństwo przegrzania tranzystora i odbiornika, generator powinien być przez większość czasu wyłączony i włączany tylko na krótki czas w celu

odświeżenia przebiegów na oscyloskopie. W związku z tym należy korzystać wyłącznie z zielonego przycisku załączającego generator.

Pomiaru napięć dokonuje się za pomocą sond napięciowych z tłumieniem 10:1 podłączonych odpowiednio do wyprowadzeń z gniazd opisanych na rys. 1 jako v_D i v_S .

Pomiaru prądu drenu dokonuje się przez zaciśnięcie sondy prądowej wokół fragmentu przewodu wyprowadzonego na panel oznaczonego na rys. 1 jako i_D . Strzałka na sondzie wskazuje kierunek przyjmowany za dodatni; sonda powinna zostać zaciśnięta w taki sposób, aby był on zgodny z rzeczywistym.

Rejestracji danych z oscyloskopu dokonuje się za pomocą programu WaveStar for Oscilloscopes dostępnego z menu Start, zakładka *Pomiary*, w sposób opisany w dalszym ciągu niniejszej instrukcji.



Rys. 1. Schemat układu laboratoryjnego klucza dolnego

2.2. Przygotowanie do pomiarów

Konfiguracja układu pomiarowego

Aby nie tracić czasu, równolegle z pkt. 1 należy wykonywać kolejne punkty.

1. Włączyć komputer. Po zakończeniu logowania, włączyć oscyloskop i skonfigurować połączenie z komputerem postępując ściśle według instrukcji dostępnej na stanowisku. (Jeżeli zespół korzysta z oscyloskopu TDS224 po raz kolejny, to powtórna konfiguracja nie powinna być potrzebna. Należy ją przeprowadzić w razie problemów z komunikacją.)
2. W niebieskiej listwie zaciskowej na panelu układu laboratoryjnego zamontować tranzystor IRFP350.
3. Do zasilenia układu użyć 2 zasilaczy wskazanych przez prowadzącego. Uprzednio upewnić się, że zasilacze są wyłączone. Wyjścia jednej sekcji regulowanej jednego z zasilaczy połączyć z wejściami U_{DD} na płycie układu. Wyjścia drugiego zasilacza – z wejściami U_{GG} .
4. Oba zasilacze przestawić w tryb niezależnej pracy sekcji – *Independent* (dwa przyciski pośrodku panelu czołowego). Skręcić wszystkie pokręta obu zasilaczy do zera (skrajne położenie przeciwnie do ruchu wskazówek zegara).
5. Sondy napięciowe z tłumieniem 10:1 przyłączyć do układu w taki sposób, by na kanale 1 mierzyć napięcie bramka-źródło u_{GS} , a na kanale 2 – napięcie dren-źródło u_{DS} tranzystora.

Uwaga!

1. Masy sond napięciowych (końcówki krokodylkowe) są na oscyloskopie zwarte ze sobą i połączone z przewodem ochronnym sieci; w związku z tym muszą być zawsze przyłączone do tego samego potencjału. Inne połączenie grozi przepływem prądu przez oscyloskop i uszkodzeniem jego obwodów wejściowych!

2. Podczas wykonywania pomiarów nie należy dotykać elementów, na których występuje napięcie zasilające obwodu mocy (w szczególności wyprowadzenie napięcia u_{DS}). Należy też uważać, by punkty te nie zostały zwarte z innymi (np. poprzez końcówkę sondy napięciowej).

3. Przed wykonaniem kolejnego punktu poprawność połączeń musi sprawdzić prowadzący!

4. Przed wykonaniem pkt. 6 i 7 należy je przeczytać w całości wraz z uwagami!

6. Włączyć zasilacz obwodu sterowania. Zwiększyć nieco prąd graniczny ograniczenia prądowego (pokrętko *Current*) sekcji zasilającej obwód sterowania, do zgaśnięcia czerwonej kontrolki ograniczenia prądowego (C.C.) Ustawić napięcie (pokrętko *Voltage*) na 15 V – jeżeli w trakcie włączy się ograniczenie prądowe, należy najpierw zmniejszyć napięcie, zwiększyć próg ograniczenia prądowego i dopiero wówczas ponownie spróbować zwiększyć napięcie.

Przy poprawnej pracy układu amperomierz zasilacza powinien wykazywać pobór prądu rzędu dziesiątek miliamperów. Jeżeli podczas nastawiania lub później obserwowane jest co innego, należy natychmiast wyłączyć zasilacz i poprosić prowadzącego o ponowne sprawdzenie układu.

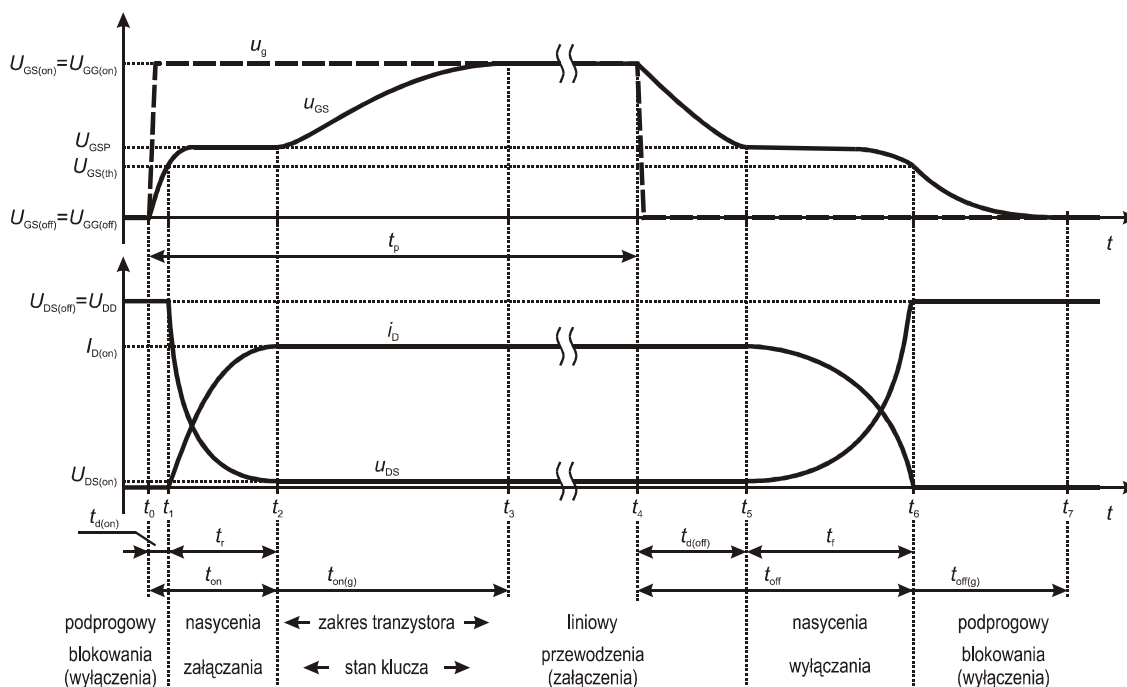
Należy uważać, aby w czasie nastawiania nie przekroczyć nigdy wartości 18 V, gdyż grozi to zniszczeniem układów scalonych.

7. Włączyć zasilacz obwodu mocy. Zwiększyć nieco prąd graniczny ograniczenia prądowego sekcji zasilającej obwód mocy. Ustawić napięcie na 60 V. Na płycie układu powinna zapalić się czerwona dioda sygnalizacyjna.

Przy poprawnej pracy układu zasilacz nie powinien wykazywać poboru prądu poza stałym prądem diody sygnalizacyjnej (ok. 0,01 A) i przejściowym prądem ładowania kondensatora stabilizującego wewnątrz układu (nie więcej niż 0,05 A). Jeżeli podczas nastawiania lub

później obserwowane jest co innego, należy natychmiast wyłączyć zasilacz i poprosić prowadzącego o ponowne sprawdzenie układu.

8. Zwiększyć prąd graniczny sekcji zasilającej obwód mocy do maksimum (skrajne położenie zgodnie z ruchem wskazówek zegara).
9. Za pomocą programu do komunikacji z oscyloskopem, wczytać do oscyloskopu ustawienia początkowe, które znajdują się w katalogu `y:\ELEMS\uep`:
 - z menu wybrać `File ▸ New Datasheet`, wybrać `Notes Sheet` i zatwierdzić;
 - z menu wybrać `File ▸ Open` i otworzyć plik `ustawienia_tds224.sht`, w kolejnym oknie dialogowym wybierając `Offline`;
 - na liście w lewym panelu bocznym rozwinąć zainstalowany oscyloskop, `Data, Settings`; w oknie otwartego pliku zaznaczyć całość wcisnąć `Ctrl+A`;
 - zaznaczony tekst przeciągnąć myszą do pozycji `Full Setup` w lewym panelu bocznym;
 - z powodu błędu w działaniu oprogramowania, należy dodatkowo zaznaczyć linie zaczynające się od `:TRIGGER:` i przeciągnąć do pozycji `Trigger`, następnie linie zaczynające się od `:HORIZONTAL:` i przeciągnąć do pozycji `Horizontal`.
10. Za pomocą przycisków CH1/2/3/4 MENU wyświetlić przebieg z kanału 1, ukryć ze wszystkich pozostałych. (Wyświetlanie danego przebiegu sygnalizowane jest przez strzałkę wskazującą poziom zera z lewej strony podziałki oraz przez symbol kanału „CHx” pod podziałką.)



Rys. 2. Przebiegi podczas przełączania tranzystora VDMOS w układzie klucza dolnego z obciążeniem rezystancyjnym

Pomiar próbny

11. Wyłączyć zasilacz obwodu mocy. W obwód mocy, jak najbliżej zacisków drenu i zasilania (niezgodnie z opisem na panelu, a zgodnie z rys. 1) włączyć odbiornik rezystancyjny R_L w postaci opornika o wartości $47\ \Omega$ (innych elementów uwidoczonych na rys. 1 nie włączać). Obliczyć przewidywaną wartość prądu obciążenia przy napięciu zasilania ustawionym wcześniej.
12. Wygenerować ciąg impulsów przełączających tranzystor na krótko wciskając zielony przycisk na panelu układu. Na oscyloskopie na moment powinien pojawić się komunikat „Trig’d” (Triggered) nad podziałką oraz powinien zostać wyświetlony przebieg napięcia u_{GS} . Jeżeli to nie nastąpi, poprosić prowadzącego o sprawdzenie ustawień oscyloskopu.

13. Dostosować (generując przebieg przełączający po każdej zmianie ustawień) podstawę czasu i położenie chwili wyzwolenia (pokrętła SEC/DIV i HORIZONTAL POSITION) tak, aby widoczny był w całości jeden impuls napięcia u_{GS} (por. rys. 2) i zajmował on w poziomie większość ekranu.
14. Włączyć zasilacz obwodu mocy. Przyciskiem CH2 MENU wyświetlić przebieg z kanału 2 – napięcia u_{DS} . Skontrolować poprawność przebiegu (por. rys. 2).
15. Jeżeli którykolwiek z przebiegów wykracza poza ekran (pominąć ewentualne krótkie szpilki), dla odpowiedniego kanału wyregulować wzmocnienie i położenie poziomu zera (pokrętła VOLTS/DIV i VERTICAL POSITION).

Konfiguracja pomiaru prądu

16. Skonfigurować wzmacniacz sondy prądowej i jego połączenie z oscyloskopem postępując według dostępnej na stanowisku instrukcji do sondy. Obowiązkowo przeczytać i zastosować się do podanych w instrukcji do sondy wskazówek dotyczących konfiguracji oscyloskopu.

W odpowiednim momencie:

- wyjście wzmacniacza przyłączyć do kanału 4;
 - ustawić wstępnie współczynnik przetwarzania prąd-napięcie na wartość umożliwiającą pomiar i wyświetlenie na oscyloskopie przebiegu prądu o amplitudzie obliczonej w pkt. 11 (patrz informacje o działaniu wzmacniacza sondy i jego współpracy z oscyloskopem podane w instrukcji do sondy).
17. Na wzmacniaczu sondy ustawić sprzężenie z przenoszeniem składowej stałej – Coupling: DC.
 18. Zamknąć sondę wokół wyprowadzonego na panel fragmentu przewodu tak, by mierzyć prąd drenu i_D i aby mierzony kierunek tego prądu był zgodny z rzeczywistym.
 19. Generując na krótko przebieg przełączający, dostosować:
 - wzmocnienie w torze pomiarowym w sposób opisany w instrukcji do sondy prądowej (na wzmacniaczu sondy nie na oscyloskopie), oraz
 - położenie przebiegu – pokrętle VERTICAL POSITION kanału 4 (na oscyloskopie),tak, aby przebieg prądu był widoczny optymalnie, tj. wypełniał ekran w pionie w maksymalnym stopniu, ale pozań nie wykraczał.
- Jeżeli współczynnik przetwarzania wzmacniacza sondy został znacznie zmieniony (o rząd wielkości lub więcej), to należy powtórzyć procedurę kalibracji i rozmagnesowania zamykając sondę poza przewodem.
20. Skontrolować poprawność przebiegu prądu i_D (por. rys. 2). Jeżeli wskutek niedoskonałego działania sondy prądowej, poziom zera prądu (por. rys. 2 dla ustalenia, na którym odcinku przebiegu występuje) nie jest widoczny na poziomie zera odpowiedniego kanału oscyloskopu (wskazywanym przez strzałkę na lewo od podziałki), należy go odpowiednio przesunąć pokrętle *Output DC Level* na wzmacniaczu sondy. W razie potrzeby powtórzyć pkt 19.

2.3. Wykonanie pomiarów

Pełny cykl przełączania

1. Wygenerować przebieg przełączający. Upewnić się, że obraz przebiegów jest nadal poprawny. Sprawdzić, czy amplituda impulsu prądu obserwowana na oscyloskopie jest w przybliżeniu równa wartości obliczonej w pkt. 2.2/11 (patrz wskazówka dotycząca odczytu przelicznika napięcie-prąd w instrukcji do sondy prądowej).

Pominięcie powyższego punktu może spowodować duże trudności na etapie opracowywania wyników!

2. W razie potrzeby dostosować:
 - wzmocnienie na kanałach napięciowych (1 i 2) – pokrętko VOLTS/DIV,
 - wzmocnienie w torze pomiaru prądu – na wzmacniaczu sondy,
 - położenie przebiegów – pokrętki VERTICAL POSITION,
 - poziom zera prądu – pokrętko *Output DC Level* na wzmacniaczu sondy,
 tak, aby każdy przebieg, od swojego poziomu zera (wskazywanego przez strzałkę na lewo od podziałki) do swojej wartości maksymalnej, zajmował maksymalny obszar całego ekranu w pionie, ale pozań nie wykaczał (nadal zaniechać ewentualne krótkie szpilki).
3. Zarejestrować komplet 3 przebiegów u_{GS} , u_{DS} i i_D (razem):
 - a) w programie WaveStar utworzyć nowy arkusz typu *YT Sheet*;
 - b) z panelu bocznego (*Local* ► oznaczenie oscyloskopu ► *Data* ► *Waveforms* ► oznaczenie kanału) do utworzonego arkusza przeciągnąć 3 przebiegi wyświetlane na ekranie oscyloskopu;

Raz przeciągnięte przebiegi wystarczy później tylko odświeżać wciskając przycisk *Refresh Sheet* lub z menu *View, Refresh Datasheet*.

Przebieg można usunąć z arkusza klikając na jego numerze z lewej strony podziałki i wciskając klawisz Delete.
 - c) arkusz, zawierający wszystkie 3 przebiegi jednocześnie, zapisać w formacie programu WaveStar (SHT) – przycisk *Save Datasheet* (Ctrl+S);

Nie używać funkcji *Save Worksheet*, która nie powoduje zapisania żadnych danych pomiarowych, a jedynie nazwy otwartych arkuszy.
 - d) zanotować (można do tego celu wykorzystać arkusz typu *Notes Sheet*) bieżące ustawienie wzmocnienia sondy prądowej (patrz instrukcja do sondy prądowej).
4. Ukryć na oscyloskopie przebieg u_{GS} (przycisk MENU odpowiedniego kanału).

Dokładna obserwacja załączania i wyłączania

5. Zarejestrować przebiegi dla załączania tranzystora (nie dla jakiegokolwiek innego stanu pracy):
 - a) ustawić podstawę czasu (SEC/DIV), położenie momentu wyzwalania (HORIZONTAL POSITION) oraz ewentualnie poziom wyzwalania (LEVEL) tak, aby z maksymalną dokładnością obserwować przebieg załączania tranzystora (nie jakiegokolwiek innego stanu pracy) w obwodzie głównym (zjawiska w obwodzie sterowania należy pominąć), tj. na odcinku t_r (zob. rys. 2);
 - b) upewnić się, że ustawienia kanałów nadal spełniają wymagania podane w pkt. 2, jednak obecnie z uwzględnieniem ewentualnych przebiegów, a w razie potrzeby zmodyfikować te ustawienia zgodnie z pkt. 2;

- c) w programie WaveStar utworzyć nowy arkusz typu *YT Sheet* i przeciągnąć do niego przebiegi u_{DS} i i_D (tj. nie u_{GS}) z panelu bocznego;

Przez ukończeniem wszystkich pomiarów opisanych w niniejszej instrukcji, w programie WaveStar nie należy zmieniać żadnych parametrów przebiegów. Jedyne wyjątki to:

- zmiana koloru z paska narzędzi na górze okna arkusza;
- przesunięcie poziomu zera za pomocą strzałki z lewej strony od podziałki.

Wszelkie inne zmiany spowodują niemożność skorzystania z funkcji odświeżania arkuszy, co znacząco wydłuży czas wykonywania ćwiczenia.

- d) zapisać arkusz *YT Sheet* zawierający komplet 2 przebiegów oraz zanotować bieżące ustawienie wzmocnienia sondy prądowej (jeżeli uległo zmianie).
6. Zarejestrować przebiegi dla wyłączania tranzystora:
- a) przełączyć się na wyzwalenie zboczem opadającym napięcia u_{GS} – TRIGGER MENU, Slope: Falling;
- b) powtórzyć pkt 5 z tym że:
- zamiast załączania należy oczywiście rozważać wyłączanie w obwodzie głównym na odcinku t_1 ;
 - zamiast tworzyć nowy arkusz i przeciągać przebiegi, należy go tylko odświeżyć.

Zmiana charakteru obciążenia

7. Wyłączyć zasilacz obwodu mocy.

Przed wykonaniem kolejnego punktu, należy go przeczytać w całości.

8. Zmienić obciążenie na indukcyjne o tej samej wartości (prądu przewodzenia i napięcia blokowania) poprzez:
- zamianę opornika na posiadający dwukrotnie mniejszą rezystancję,
 - włączenie w szereg z opornikiem dławika (cewki) o indukcyjności ok. 3 mH,
 - włączenie równolegle do tak utworzonego odbiornika RL diody zwrotnej tak, aby zamknął się przez nią prąd dławika po wyłączeniu tranzystora.

Przy tym obecnie diody powinna być włączona jak najbliżej zacisków drenu i zasilania (patrz element D_0 na rys. 1); natomiast do włączenia w obwód dławika i opornika należy wykorzystać gniazda „Odbiornik” w górnej części panelu (patrz element Z_L na rys. 1, obrazujący szeregowo połączenie opornika i dławika).

Przed wykonaniem kolejnego punktu poprawność połączeń musi sprawdzić prowadzący!

9. Włączyć zasilacz obwodu mocy i powtórzyć pkt. 5–6, z tym że zamiast tworzyć nowy arkusz i przeciągać przebiegi, należy tylko odświeżyć go. Poza tym należy bezwzględnie zastosować się do wszystkich wskazówek podanych w powyższych punktach.

Zmiana wartości obciążenia

10. Wyłączyć zasilacz obwodu mocy. Uzyskać obciążenie rezystancyjne o dwukrotnie większej wartości (prądu przewodzenia) poprzez:
- usunięcie z obwodu mocy dławika i diody,
 - pozostawienie opornika o obecnej wartości, jednak obecnie należy włączyć go jak najbliżej zacisków drenu i zasilania (patrz element R_L na rys. 1).
11. Włączyć zasilacz obwodu mocy i powtórzyć pkt. 5–6, z tym że zamiast tworzyć nowy arkusz i przeciągać przebiegi, należy tylko odświeżyć go. Poza tym należy bezwzględnie zastosować się do wszystkich wskazówek podanych w powyższych punktach.

12. Wyłączyć zasilacz obwodu mocy. Uzyskać obciążenie rezystancyjne o początkowej wartości prądu przewodzenia (tj. jak przed pkt. 10) i dwukrotnie większej wartości napięcia blokowania:
- wymienić opornik obciążający na posiadający 4-krotnie większą rezystancję niż obecny, włączając go nadal jak najbliżej zacisków drenu i zasilania (patrz element R_L na rys. 1);
 - zasilacz przestawić w tryb pracy szeregowej (*Series*) oraz za pomocą krótkiego przewodu połączyć ze sobą zacisk „+” sekcji lewej regulowanej i zacisk „-” sekcji prawej regulowanej;

Przed wykonaniem kolejnego podpunktu poprawność połączeń musi sprawdzić prowadzący!

- skręcić do zera pokrętła *Voltage* obu sekcji regulowanych zasilacza obwodu mocy, a pokrętła *Current* przekręcić do maksimum;
 - włączyć zasilacz;
 - pokrętłem *Voltage* sekcji *Master* stopniowo ustawić napięcie 60 V, obserwując wskazanie amperomierza sekcji *Master*, które nie powinno być różne od obserwowanego poprzednio (rzędu 0,01 A). Jednocześnie takie samo napięcie powinno ustawić się na sekcji *Slave*; w trybie szeregowym w tej sekcji może zapalić się kontrolka ograniczenia prądowego – nie świadczy to o przekroczeniu ograniczenia.
13. Powtórzyć pkt 5–6, z tym że zamiast tworzyć nowy arkusz i przeciągać przebiegi, należy tylko odświeżyć go. Poza tym należy bezwzględnie zastosować się do wszystkich wskazówek podanych w powyższych punktach.

Zakończenie pomiarów

- Sprowadzić do zera napięcie zasilacza obwodu mocy. Zaczekać na zgaśnięcie czerwonej diody sygnalizacyjnej na płycie układu.
- Przestawić zasilacz obwodu mocy w tryb pracy niezależnej (*Independent*).
- Sprowadzić nastawę pokrętła *Output DC Level* na wzmacniaczu sondy prądowej do wartości 0,0 (jest ona wyświetlana w polu *Current/Division* na panelu przednim wzmacniacza podczas pokręcania pokrętłem).
- Sprowadzić do zera napięcie sekcji zasilacza zasilającej obwód sterowania. Wyłączyć zasilacz i rozłączyć układ.

3. Opracowanie wyników

3.1. Sprawdzenie poprawności przeliczania prądu

1. Uruchomić program WaveStar.
2. Otworzyć zestaw przebiegów $\{u_{GS}; u_{DS}; i_D\}$ dla pełnego impulsu napięcia sterującego – zarejestrowany w pkt. 2.3/3.
3. Na podstawie zanotowanej nastawy współczynnika przetwarzania prąd-napięcie wzmacniacza sondy prądowej, wyznaczyć mnożnik k_i w amperach na wolt – przez który należy przemnożyć wykazywaną w programie WaveStar wartość w woltach, aby uzyskać rzeczywistą wartość prądu w amperach.

Wartości wykazywane w programie WaveStar dla przebiegów prądu są *de facto* zarejestrowanymi przez oscyloskop wartościami napięcia pochodzącego ze wzmacniacza sondy prądowej. Będziemy je oznaczać gwiazdką. Napięcie to jest proporcjonalne do prądu zgodnie z zanotowanym współczynnikiem przetwarzania wzmacniacza sondy prądowej. Mnożnik, wynikający bezpośrednio z tego współczynnika, ale ze względów praktycznych wyrażony w jednostkach pierwotnych SI, tj. A/V, pozwoli otrzymać rzeczywiste wartości w amperach. Rzeczywista wartość prądu w amperach $i [A] = k_i [A/V] \cdot i^* [V]$. (Zgodnie z instrukcją do sondy ze wzmacniaczem A6302/A6312+AM503B, wartość podawana na wyświetlaczu miała jednostkę A/10 mV lub mA/10 mV.) Przykładowo, jeżeli współczynnik wzmocnienia sondy wynosił 5 A / 10 mV, to $k_i = 5 \text{ A} / 10 \text{ mV} = 500 \text{ A/V}$.

4. Na podstawie oscylogramu, sprawdzić poprawność przeliczania wartości prądu:
 - a) za pomocą kursora poziomego odczytać wartość prądu drenu w stanie załączenia $I_{D(on)}^*$ (w woltach, por. rys. 2);

Jeżeli poziom prądu w stanie wyłączenia wyraźnie odbiega od zera, wskazywanego przez strzałkę z numerem przebiegu na lewo od podziałki (wynika to z niedoskonałości sondy prądowej), to nie należy odczytywać wartości Y, ale skorzystać z różnicy dY między kursorem ustawionym na wartości szczytowej a kursorem ustawionym na wartości w stanie wyłączenia. Pokazano to na rys. 4 na przykładzie powiększonego stanu załączania (w niniejszym punkcie powiększenie nie jest potrzebne). Uwaga ta ma zastosowanie również do wszystkich następnych odczytów.

Przykłady odczytu wartości podane na rysunkach w tym podrozdziale pokazują jedynie sposób postępowania. Nie sugerują one poprawnych wartości ani wyglądu przebiegów w arkuszu. W celu zwiększenia czytelności, przykładowe oscylogramy zawierają wyłącznie przebiegi niezbędne do wykonania konkretnego podpunktu.

Łagodne przerzuty, które mogą być widoczne na przebiegu prądu (w górę po załączeniu, w dół po wyłączeniu), wynikają wyłącznie z ograniczonego pasma przenoszenia sondy prądowej. Należy je w związku z tym pominąć w analizie. Jeżeli przerzut ma znaczną amplitudę, należy przyjąć, że poziom wysoki impulsu prądu jest w rzeczywistości linią poziomą o takiej wartości, jaką przebieg przyjmuje po początkowym wyraźnie szybszym wzroście.

- b) wykorzystując mnożnik k_i wyznaczony w punkcie 3, obliczyć rzeczywistą (w amperach) wartość prądu drenu $I_{D(on)}$;
- c) sprawdzić, czy wartość $I_{D(on)}$ zgadza się z danymi układu pomiarowego (patrz pkt 2.2/7 i 11) – jeżeli nie, należy zidentyfikować źródło rozbieżności (np. błędne ustawienie wzmocnienia na kanale 4 oscyloskopu różne od 10 mV/dz w przypadku sondy i wzmacniacza A6302/A6312+AM503B, błędnie zanotowana wartość ze wzmacniacza sondy, błędna konfiguracja oporników obciążających), gdyż przelicznik k_i będzie bardzo istotny w dalszych obliczeniach.

Uwagi dotyczące korzystania z kursorów w programie WaveStar:

1. Aby włączyć kursory, należy wybrać z menu *View ▶ Properties ▶ Cursor* i wybrać typ kursora odpowiedni dla wykonywanego pomiaru (poziomy, pionowy, krzyżowy, punktowy). W aktywnym arkuszu *YT Sheet* pojawią się wartości odpowiadające aktywnemu przebiegowi, w zależności od rodzaju kursora:

- X, Y – współrzędne aktywnego (linia ciągła) kursora;
- X1, Y1 i X2, Y2 – współrzędne pierwszego i drugiego kursora;
- dX, dY – różnica współrzędnych kursorów.

2. Aktywny przebieg wybierany jest przez kliknięcie na jego numerze z lewej strony podziałki. Numer aktywnego przebiegu jest stale podświetlony.

3. Po przełączeniu na inny przebieg, kursor poziomy pozostaje na tej samej wysokości w woltach (nie działkach). Oznacza to, że przy dużej różnicy wzmocnień (V/dz) kursor może znaleźć się poza ekranem. Należy wówczas chwilowo zwiększyć przelicznik V/dz, sprowadzić kursor na poziom bliski zera i wówczas przywrócić poprzedni przelicznik.

4. W rozróżnieniu poszczególnych przebiegów może pomóc włączenie kolorów w legendzie: menu *View ▶ Properties ▶ Plot*, zaznaczyć *Waveform notes color match waveform color*.

3.2. Parametry dla załączania i wyłączania

Uruchomienie programu Scilab

1. Uruchomić pakiet do obliczeń numerycznych Scilab.
2. Wczytać skrypty zawierające funkcje potrzebne do obliczenia energii wydzielanej w tranzystorze, wpisując polecenie

```
exec('ścieżka_dostępu_do_skryptu\wavestar_calka.sce');
exec('ścieżka_dostępu_do_skryptu\uep_a13.sce');
```

3. Aby w dalszym ciągu pracy nie wpisywać za każdym razem pełnej ścieżki dostępu do plików z danymi pomiarowymi (pliki programu WaveStar), można zmienić katalog roboczy na katalog zawierający te pliki, wpisując polecenie

```
cd('ścieżka_dostępu_do_pomiarów');
```

Parametry dynamiczne

4. W programie WaveStar otworzyć zestaw przebiegów $\{u_{DS}; i_D\}$ dla procesu załączania, dla obciążenia rezystancyjnego, dla $R_L = 47 \Omega$ – zarejestrowany w pkt. 2.3/5.
5. Na podstawie oscylogramu, wyznaczyć czas narastania t_r zgodnie z definicją techniczną [2]:
 - a) za pomocą kursora poziomego odczytać wartość ustaloną napięcia dren-źródło w stanie blokowania $U_{DS(off)}$;
 - b) obliczyć wartości progów występujących w definicji technicznej czasu narastania t_r ;
 - c) za pomocą kursorów krzyżowych, odczytać wartość czasu narastania t_r zgodnie z definicją techniczną, w oparciu o obliczone progi (por. rys. 3).
6. Za pomocą kursora poziomego odczytać wartość prądu drenu w stanie załączenia w woltach $I_{D(on)}^*$ (por. rys. 4). Na podstawie zanotowanej nastawy współczynnika przetwarzania wzmacniacza sondy prądowej, wyznaczyć mnożnik k_i . Obliczyć wartość prądu $I_{D(on)}$ w amperach i zweryfikować wynik w oparciu o parametry obwodu mocy (napięcie zasilania, charakter i rezystancja odbiornika).
7. Wyeksportować dane do pliku tekstowego typu CSV (*comma-separated values*) przez menu *File ▶ Export Datasheet ▶ CSV*.
8. W programie Scilab skorygować przebieg prądu:
 - a) odczytać wyeksportowane dane poleceniem

```
[naglowki,dane]=wczytaj_ws('nazwa_pliku.csv');
```

Przy obliczeniach dla kolejnych przypadków można przywołać wcześniej wpisane polecenie wciskając na klawiaturze strzałkę w górę.

- b) przeskalować i skorygować przebieg prądu usuwając skutki ewentualnego przesunięcia poziomu zera oraz opóźnienia wprowadzanego przez wzmacniacz sondy prądowej, wpisując polecenie

```
[naglowki2,dane2]=koryguj_prad(naglowki,dane,
nr_przebiegu_i,ki,delayi);
```

gdzie: k_i – mnożnik prądu wyznaczony i zweryfikowany w pkt. 6; $delay_i$ – opóźnienie wzmacniacza sondy (typowo 30 ns dla AM503B); $nr_przebiegu_i$ – numer kolejny przebiegu i_D zgodnie z rosnącą numeracją w arkuszu YT programu WaveStar (nie numer kanału oscyloskopu).

Jeżeli w arkuszu numeracja zaczyna się od 1 i nie ma „dziur”, to numery są identyczne jak w arkuszu; w przeciwnym razie należy numerację zacząć od 1 i pomijać „dziury”. Kolejność przebiegów można też sprawdzić wpisując

```
wykresl_dane(naglowki,dane,[1:np]);
```

gdzie np jest liczbą przebiegów widocznych w arkuszu YT; numer przebiegu jest pozycją, na której dany przebieg pojawia się w legendzie wykresu.

- c) zweryfikować wynik automatycznej korekcji, wpisując

```
wykresl_dane(naglowki2,dane2,[numery_przebiegow]);
```

(gdzie $numery_przebiegow$ są numerami przebiegów napięcia u_{DS} i prądu i_D rozdzielonymi przecinkami lub spacjami i zgrupowanymi w nawiasie kwadratowym) i sprawdzając, czy:

- w stanie wyłączenia wykazywany jest zerowy prąd,
- wartość prądu w stanie załączenia zgadza się z obliczoną w pkt. 6,

Ze względu na konieczność wpasowania wszystkich przebiegów w jedną skalę osi Y, niektóre z nich mogą być przeskalowane. Wskazują to wówczas mnożniki przy numerach przebiegów w opisie osi Y.

- w stanie wyłączenia wykazywana jest zerowa moc chwilowa;

- d) jeżeli wynik weryfikacji jest negatywny (co może wynikać z bardzo nietypowych nastaw oscyloskopu podczas rejestracji), przebiegi trzeba skorygować ręcznie:

- w programie WaveStar kursorem poziomym odczytać wartość prądu w stanie wyłączenia i_0^* (w woltach),
- przesunąć i przeskalować prąd, wpisując

```
dane2=przesun_skaluj_y(dane,nr_przebiegu_i,i0,ki);
```

- zweryfikować prąd jak w podpunkcie c),
- przesunąć przebieg prądu o opóźnienie wzmacniacza sondy, wpisując

```
dane2=przesun_t(dane2,nr_przebiegu_i,delayi);
```

9. W programie Scilab wyznaczyć przebieg mocy i uzyskać wykresy 3 przebiegów w funkcji czasu:

- a) obliczyć moc chwilową strat w obwodzie drenu p_D wpisując

```
[naglowki2,dane2]=dodaj_moc(naglowki2,dane2,
nr_przebiegu_i,nr_przebiegu_u);
```

gdzie $nr_przebiegu_i$, $nr_przebiegu_u$ – numery kolejne przebiegów i_D i u_{DS} w programie WaveStar.

- b) wykreślić komplet 3 przebiegów w funkcji czasu wpisując

```
wykresl_dane(naglowki2,dane2,[numery_przebiegow]);
```

gdzie $numery_przebiegow$ są numerami przebiegów napięcia u_{DS} , prądu i_D i mocy p_D analogicznie do pkt. 8.c);

- c) zapisać wykres poleceniem *File ► Export* (zaleca się format PNG).

10. Uzyskać graficzny obraz trajektorii punktu pracy tranzystora:

- a) wykreślić trajektorię punktu pracy tranzystora na płaszczyźnie charakterystyk wyjściowych $i_D = f(u_{DS})$ wpisując

```
wykresl_dane_xy(naglowki2,dane2,
nr_przebiegu_u,nr_przebiegu_i);
```

- b) zapisać wykres poleceniem *File ► Export* (zaleca się format PNG);
- c) wykreślić zmiany mocy chwilowej p_D wraz z trajektorią punktu pracy tranzystora, tj. w postaci $p_D = f(u_{DS})$, wpisując

```
wykresl_dane_xy(naglowki2,dane2,
nr_przebiegu_u,nr_przebiegu_p);
```

- d) zapisać wykres poleceniem *File ► Export* (zaleca się format PNG).
11. W każdym z 3 wykresów zapisanych w pkt. 9–10, zidentyfikować i zaznaczyć te same dwa skrajne punkty pracy odpowiadające stanowi wyłączenia i załączenia (w arkuszu YT – położenie na osi czasu; w arkuszu XY – punkt na płaszczyźnie); podpisać je odpowiednio jako W i Z. Następnie zidentyfikować punkt, w którym moc chwilowa jest największa i podpisać go (na każdym z wykresów) jako M. Zaznaczyć jeszcze 2 inne punkty w trakcie procesu załączania, w miarę równo rozłożone między punktami W, M i Z, podpisując je (na każdym z wykresów) jako 1 i 2.
 12. W programie Scilab wyznaczyć parametry impulsu mocy generowanej w tranzystorze podczas załączania:
 - a) za pomocą podziałki odczytać wartość szczytową chwilowej mocy strat $P_{D(ON)pk}$ – jeżeli w pkt 8 stwierdzono poprawność wartości prądu, to jest ona podawana w watach, z zastrzeżeniem co do skalowania podanym w pkt. 8.c);
 - b) obliczyć energię wydzielaną podczas załączania $W_{D(ON)}$ jako całkę przebiegu p_D za przedział od $t_{inf(on)}$ do $t_{sup(on)}$ [2], wpisując

```
energia_przelaczanie(dane2,nr_przebiegu_p,prog)
```

gdzie *prog* jest procentowym progiem, który zastosowany do przebiegu mocy pozwoli automatycznie wyznaczyć początek i koniec impulsu – wstępnie należy przyjąć próg 5% (tj. wpisać wartość 0,05);

- c) powyższa funkcja automatycznie wyznaczy czasy $t_{inf(on)}$ i $t_{sup(on)}$, zwróci wartość całki w dżulach i kontrolnie wykreśli przebieg mocy p_D z zaznaczeniem obszaru, którego polu odpowiada obliczona całka;

na podstawie tego wykresu kontrolnego sprawdzić, czy całka została obliczona za właściwy fragment przebiegu mocy – impuls wyraźnie odróżniający się od poprzedzającego go stanu wyłączenia i następującego stanu załączenia; jeżeli nie – należy spróbować eksperymentalnie dobrać lepszy próg detekcji impulsu (parametr *prog*): zmniejszyć w razie pominięcia znaczącej części pola impulsu mocy lub zwiększyć w razie zaliczenia zbyt długiego odcinka czasu;

w przypadku stałego niepowodzenia – energię trzeba wyznaczyć ręcznie, odczytując z podziałki wartości $t_{inf(on)}$ i $t_{sup(on)}$ i wpisując

```
calka_infsup(dane2,numer_przebiegu_p,tinf,tsup,0,1)
```

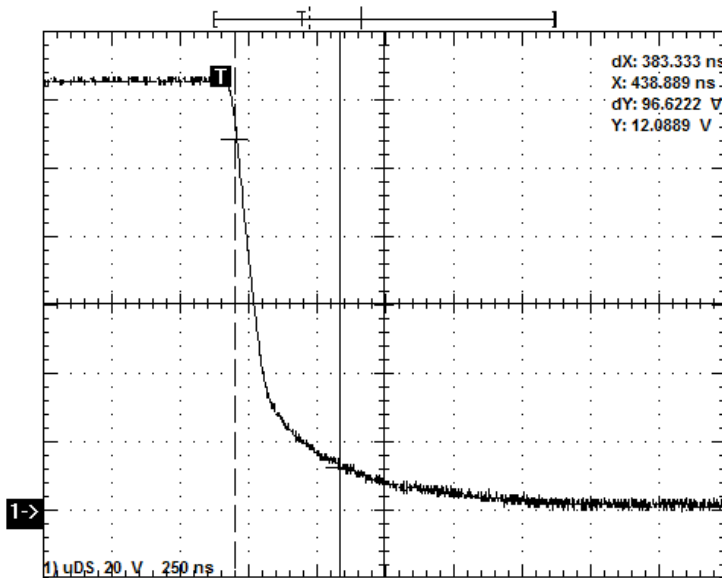
- d) zapisać wykres kontrolny poleceniem *File ► Export* (zaleca się format PNG).

Dalsze przypadki

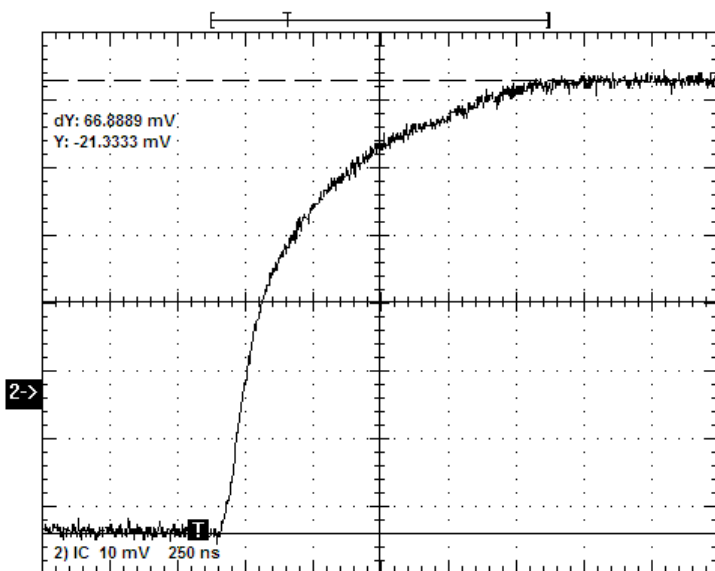
13. Powtórzyć powyższe czynności (poczynając od pkt. 4) dla pozostałych 3 przypadków obciążenia:
 - a) rezystancyjnego z dwukrotnie większym prądem ($U_{DD} = 60 \text{ V}$, $R_L = 22 \Omega$, zestaw przebiegów zarejestrowany w pkt. 2.3/11) – wyznaczyć prąd, czas, moc i energię (tj. pominąć pkt. 10–11);
 - b) rezystancyjnego z dwukrotnie większym napięciem ($U_{DD} = 120 \text{ V}$, $R_L = 100 \Omega$, zestaw przebiegów zarejestrowany w pkt. 2.3/13) – wyznaczyć prąd, czas, moc i energię (tj. pominąć pkt. 10–11);
 - c) indukcyjnego w tych samych warunkach obciążenia ($U_{DD} = 60 \text{ V}$, $R_L = 22 \Omega$, dławik, zestaw przebiegów zarejestrowany w pkt. 2.3/9) – wyznaczyć prąd, moc i energię oraz zlokalizować

punkty pracy (tj. pominąć pkt 5, natomiast przyjąć, że ponieważ zasilanie obwodu nie uległo zmianie, to wartość $U_{DS(off)}$ jest taka sama, jak dla obciążenia rezystancyjnego).

14. Powtórzyć powyższe czynności dla stanu wyłączania, dla wszystkich 4 przypadków obciążenia, w celu wyznaczenia odpowiednio czasu opadania t_f oraz parametrów energetycznych $P_{D(off)pk}$ i $W_{D(off)}$. Dla obciążenia rezystancyjnego przy $U_{DD} = 60 \text{ V}$ i $R_L = 47 \Omega$ powtórzyć wszystkie punkty 4–12, dla pozostałych przypadków – tylko punkty wskazane w pkt. 13.



Rys. 3. Przykład odczytu czasu $t_r = 383 \text{ ns}$ (wskazanie dX). Wartość Y pokazuje, że prawy kursor został ustawiony zaraz za punktem przejścia przebiegu u_{DS} przez poziom 10% $U_{DS(off)}$, który w tym przypadku wynosił 12,6 V



Rys. 4. Przykład odczytu wartości prądu w stanie załączenia $I_{D(on)}^* = 66,9 \text{ mV}$. Jeżeli przykładowo $k_i = 100 \text{ A/V}$, to ostatecznie $I_{D(on)pk} = 6,69 \text{ A}$. W tym przypadku należało uwzględnić, że rzeczywisty poziom zera (obserwowany w stanie wyłączenia tranzystora) wykazywany jest błędnie jako ujemny względem zera oscyloskopu wskazywanego przez „2->”. Jak wynika ze wskazania Y dla dolnego kursora, przesunięcie zera wynosi $-21,3 \text{ mV}$

3.3. Podsumowanie wyników

1. Uzyskane w par. 3.2 wyniki zebrać w tabeli (ewentualnie w 2 tabelach – osobno dla załączania i wyłączania) zawierającej dla wszystkich przypadków obciążenia następujące parametry:
 - charakter obciążenia;
 - parametry obciążenia $U_{DS(off)}$ i $I_{D(on)}$;
 - t_r , $P_{D(on)pk}$, $W_{D(on)}$ dla załączania;
 - t_f , $P_{D(off)pk}$, $W_{D(off)}$ dla wyłączania.
2. W dodatkowym wierszu wyliczyć krotność zmiany (ile razy zmieniają się – nie o jaką wartość zmieniają się) wartości wszystkich powyższych parametrów wraz ze zmianą obciążenia, przy czym za przypadek odniesienia przyjąć początkowy z nich, tj. $U_{DD} = 60\text{ V}$, $R_L = 47\ \Omega$.

3.4. Analiza wyników

1. Przeanalizować zawarte w tabeli wyniki dla 3 obciążeń rezystancyjnych:
 - a) stwierdzić, jaki jest wpływ wartości napięcia blokowania $U_{DS(off)}$ i prądu przewodzenia $I_{D(on)}$ na parametry czasowe tranzystora (w tym przypadku ograniczone do t_r i t_f) – rozważyć zarówno kierunek zmian czasu wraz z napięciem lub prądem (rosnący, malejący), jak i ich charakter (liniowy, wyraźnie słabszy, wyraźnie silniejszy, zaniedbywalny, ...);
 - b) stwierdzić, jaki jest wpływ wartości napięcia blokowania $U_{DS(off)}$ i prądu przewodzenia $I_{D(on)}$ na szczytowe wartości mocy chwilowej $P_{D(on)pk}$ i $P_{D(off)pk}$ – rozważania przeprowadzić jak w ppkt. a);
 - c) stwierdzić, jaki jest wpływ wartości napięcia blokowania $U_{DS(off)}$ i prądu przewodzenia $I_{D(on)}$ na energię wydzielaną w przyrządzie $W_{D(on)}$ i $W_{D(off)}$ – rozważania przeprowadzić jak w ppkt. a);
 - d) wyjaśnić wpływ zaobserwowany w podpunkcie c) w oparciu o relację łączącą moc chwilową i energię [2] oraz wyniki z podpunktów a)–b);
 - e) czy obserwacje zgadzają się z przewidywaniami teoretycznymi [2]?
2. Przeanalizować trajektorię punktu pracy przy obciążeniach o różnym charakterze:
 - a) zestawić obok siebie wykresy przebiegów w funkcji czasu oraz trajektorii punktu pracy na płaszczyźnie charakterystyk wyjściowych [wyłącznie prąd i_D – pkt 3.2/10.a)], zarejestrowane dla obciążenia rezystancyjnego i indukcyjnego o zbliżonych parametrach $U_{DS(off)}$ i $I_{D(on)}$, dla załączania i dla wyłączania;
 - b) czy trajektorie punktu pracy dla obciążenia rezystancyjnego zgadzają się z teoretyczną przeanalizowaną w [2]? – z wykresu wyznaczyć nachylenie prostej pracy i współrzędne punktów odcinanych przez nią na osi napięcia i na osi prądu; porównać z przewidywaniami teoretycznymi – sporządzić i zamieścić wykres trajektorii punktu pracy z idealnym obciążeniem rezystancyjnym (z uwzględnieniem wartości liczbowych);
 - c) czym różni się przełączanie z obciążeniem indukcyjnym od przełączania z obciążeniem rezystancyjnym? powiązać przebiegi czasowe z trajektorią punktu pracy oraz sporządzić i zamieścić wykres trajektorii punktu pracy z idealnym obciążeniem indukcyjnym (z uwzględnieniem wartości liczbowych; np. na podstawie uproszczonych przebiegów w funkcji czasu przedstawionych w [3] lub w [1] dla ataku prądowego).
3. Przeanalizować wyniki dla obciążenia rezystancyjnego i indukcyjnego o zbliżonych parametrach $U_{DS(off)}$ i $I_{D(on)}$ pod kątem wydzielanej mocy:
 - a) jaki jest (w którym kierunku) wpływ charakteru obciążenia na wartości mocy zawarte w tabeli (szczytowe $P_{D(on)pk}$ i $P_{D(off)pk}$) oraz widoczne na wykresach w funkcji czasu?
 - b) powiązać obserwację z podpunktu a) z trajektorią punktu pracy – skorzystać z zależności łączącej moc chwilową p_D z prądem i_D i napięciem u_{DS} oraz z wykresów mocy p_D w funkcji zmiennego punktu pracy u_{DS} [pkt 3.2/10.d)];
 - c) jaki jest jakościowo wpływ obciążenia na energię traconą w przyrządzie $W_{D(on)}$ i $W_{D(off)}$?
 - d) powiązać obserwację z podpunktu c) z przebiegiem mocy chwilowej p_D , korzystając z wniosków z podpunktów a)–b) oraz 1.d).
4. Dla obciążenia rezystancyjnego i indukcyjnego o zbliżonych parametrach $U_{DS(off)}$ i $I_{D(on)}$, ocenić dokładność oszacowania wydzielanej energii w oparciu o wzory wprowadzone w [2]:
 - a) sprawdzić, w jakim stopniu szacunki dokonane na podstawie powyższych wzorów są zgodne z wynikami doświadczenia pod względem:
 - wartości jako takich,
 - wzajemnych relacji załączanie / wyłączanie oraz obciążenie rezystancyjne / indukcyjne;
 - b) jakiego rodzaju błąd projektowy popełnilibyśmy opierając się na tych szacunkach:
 - przewymiarowanie tranzystora zwiększające koszt i wymiary?

- czy też niedoszacowanie mocy strat i w konsekwencji ryzyko przegrzania tranzystora?

4. Literatura

- [1] Napieralski A., Napieralska M.: *Polowe półprzewodnikowe przyrządy dużej mocy*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1995.
- [2] Starzak Ł.: *Laboratorium przyrządów i układów mocy. Ćwiczenie 3^A. Tranzystor MOSFET*. Łódź: Politechnika Łódzka, 2011.
- [3] Starzak Ł.: *Laboratorium przyrządów i układów mocy. Ćwiczenie 3^B. Tranzystor MOSFET*. Łódź: Politechnika Łódzka, 2011.