



PODZESPOŁY I UKŁADY SCALONE MOCY

Ćwiczenie A4

Odmiany seryjne tranzystorów IGBT

Opracowanie ćwiczenia i instrukcji:
Łukasz Starzak

Łódź 2019

Spis treści

B Wprowadzenie do ćwiczenia	5
1. Cel i przebieg ćwiczenia.....	5
C Doświadczenie.....	7
2. Pomiary	7
2.1. Układ laboratoryjny.....	7
2.2. Przygotowanie do pomiarów	9
Konfiguracja układu pomiarowego.....	9
Pomiar próbny	10
2.3. Wykonanie pomiarów.....	13
Pełny cykl przełączania	13
Dokładna obserwacja załączania i wyłączenia.....	13
Stan załączenia	14
Tranzystor serii ultraszybkiej.....	15
Zakończenie pomiarów	15
D Wyniki.....	17
3. Opracowanie i analiza wyników	17
3.1. Serie tranzystorów	17
Uruchomienie programu Scilab	17
Załączanie	17
Wyłączanie	19
Stan przewodzenia.....	20
3.2. Wpływ wartości prądu przewodzenia.....	21
3.3. Podsumowanie wyników	22
3.4. Analiza wyników.....	23
Serie tranzystorów	23
Wpływ prądu przewodzenia na ogon prądowy.....	23
E Informacje	25
4. Literatura	25

Wprowadzenie do ćwiczenia

1. Cel i przebieg ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zbadanie statycznych i dynamicznych właściwości tranzystorów IGBT różnych odmian seryjnych. Za przykładowe obiekty badań posłużą tranzystory dwóch serii skrajnych – standardowej i ultraszybkiej.

Budowa i działanie tranzystora IGBT, jak również definicje i sposób wyznaczania jego parametrów dynamicznych, omówione zostały w literaturze [1] i instrukcji [2].

2. Pomiary

2.1. Układ laboratoryjny

Schemat układu laboratoryjnego przedstawiony jest na rys. 1. Układ umożliwia pomiar prądu kolektora oraz napięć międzykońcówkowych badanego elementu.

Układ umożliwia włączenie:

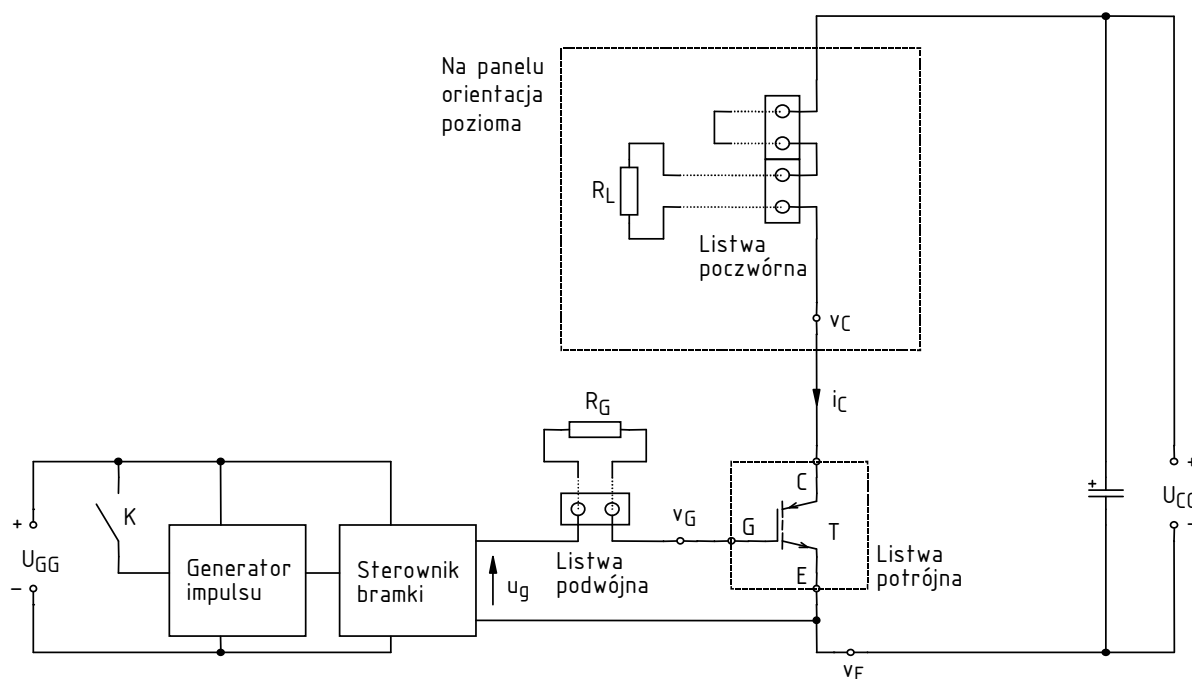
- dowolnego tranzystora badanego T – potrójne złącze na panelu układu połączone w sposób pokazany na schemacie i na płycie,
- dowolnego odbiornika R_L w obwód mocy – poczwórne złącze na panelu układu,
- dowolnego opornika bramkowego R_G – podwójne złącze na panelu układu.

Badaniu poddany zostanie tranzystor IGBT serii standardowej IRG4BC20S oraz tranzystor IGBT serii ultraszybkiej IRG4BC20U.

W celu wyeliminowania wpływu samonagrzewania się badanego tranzystora na jego działanie, jak również umożliwienia przepływu dużego prądu bez obawy o cieplne uszkodzenie tranzystora, pomiary wykonywane są na **pojedynczych impulsach przełączających** (załączających, a po krótkiej chwili wyłączających) tranzystor. Prostokątny impuls napięcia u_g generowany jest przy każdorazowym naciśnięciu przycisku na panelu układu (na rys. 1 – klucz K); **czas trwania impulsu** t_p wynosi kilkanaście mikrosekund, a jego amplituda jest w przybliżeniu równa **napięciu zasilającemu obwód sterujący** U_{GG} .

W związku z powyższym po każdej zmianie nastaw konieczne jest wygenerowanie impulsu przełączającego. Dotyczy to również sytuacji, gdy nastawy zostały zmienione tylko na urządzeniach pomiarowych (oscylloskopie, sondzie prądowej). **Dopiero po wygenerowaniu nowego impulsu oscyloskop zarejestruje przebiegi przy nowych ustawieniach i zmiana ustawień odniesie jakiegokolwiek 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).



Rys. 1. Schemat układu laboratoryjnego do badania tranzystorów IGBT

Pomiaru napięć dokonuje się za pomocą sond napięciowych podłączonych w odpowiedni sposób do wyprowadzeń z gniazd bananowych oznaczonych na rys. 1 jako v_E , v_G i v_C . **Pomiaru prądu** dokonuje się przez zaciśnięcie sondy prądowej wokół wyprowadzonego fragmentu przewodu oznaczonego na rys. 1 jako i_C . Strzałka na korpusie sondy wskazuje kierunek przyjmowany za dodatni; sonda powinna zostać zaciśnięta w taki sposób, aby był on zgodny z rzeczywistością.

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

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.
2. Poprzez odpowiednie złącze włączyć w obwód sterowania opornik bramkowy o wartości ok. 500 Ω .
3. W jedną (dowolną) parę gniazd złącza w obwodzie mocy włączyć opornik mocy o takiej wartości, by prąd kolektora w stanie przewodzenia $I_{C(on)}$ wyniósł ok. 12 A przy napięciu zasilania obwodu mocy $U_{CC} = 60$ V. Opornik przyłączyć jak najkrótszymi przewodami i umieścić tak, aby uniemożliwić zwarcie gniazd bananowych przez jego obudowę. Drugą parę gniazd zewrzeć jak najkrótszym przewodem.

Uwaga!

Ze względu na ryzyko przebicia bramki w wyniku wyładowania elektrostatycznego, elementy badane należy przechowywać w torebce antystatycznej. Przed uchwyceniem przyrządu należy uziemić się np. przez dotknięcie bolca przewodu ochronnego w listwie zasilającej. Przyrządy należy przenosić trzymając je za metalowy radiator wbudowany, połączony elektrycznie z kolektorem, zaś unikać chwytania za nóżki, szczególnie nóżkę bramki.

4. W złączu zamocować tranzystor serii standardowej zwracając uwagę na kolejność wyprowadzeń zgodnie ze schematem, rysunkiem na panelu układu oraz kartą katalogową tranzystora.
5. Do zasilenia układu użyć zasilacza o 2 sekcjach regulowanych. Upřednio upewnić się, że zasilacz jest wyłączony. Wyjścia jednej z sekcji regulowanych zasilacza połączyć odpowiednio z gniazdami U_{GG} na panelu układu, zaś drugiej z sekcji regulowanych – z gniazdami U_{CC} .
6. Zasilacz przestawić w tryb niezależnej pracy sekcji – *Independent* (dwa przyciski pośrodku panelu czołowego). Skręcić wszystkie pokręta zasilacza do zera (skrajne położenie przeciwnie do ruchu wskazówek zegara).
7. Sondy napięciowe z tłumieniem 10:1 przyłączyć do układu w taki sposób, by na kanał wyzwiania zewnętrznego (EXT TRIG) podać napięcie bramka-emiter u_{GE} , a na kanale 2 mierzyć napięcie kolektor-emiter u_{CE} tranzystora. Przełącznikiem na korpusie ustawić tłumienie obu sond na 10:1 (10X).

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 potencjału v_C). 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. 8 i 9 należy je przeczytać w całości wraz z uwagami!

8. Włączyć zasilacz. 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.

9. 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.

10. Zwiększyć prąd graniczny sekcji zasilającej obwód mocy do maksimum (skrajne położenie pokrętki zgodnie z ruchem wskazówek zegara).
11. Za pomocą przycisków 1 i 2 wyświetlić na oscyloskopie przebieg z kanału 2, ukryć z kanału 1.

Pomiar próbny

12. Skonfigurować oscyloskop:

- a) kanał 2 – przycisk 2:

- sprzężenie ze składową stałą – wcisnąć przycisk ekranowy *Coupling*, pokrętkiem *Multipurpose* wybrać *DC* i zatwierdzić wciskając pokrętkę *Multipurpose*,
- sonda napięciowa o tłumieniu 10:1 – *Probe ▶ Type: Voltage, Attenuation: 10X*,
- odwracanie przebiegu nieaktywne – *Invert: Off*,
- wzmocnienie dostosowane do przewidywanej amplitudy napięcia u_{CE} – pokrętkę *Vertical Scale* (nastawa jest wyświetlana pod podziałką obok symbolu kanału 2);

- b) podstawa czasu:

- chwila wyzwolenia mniej więcej na środku ekranu – pokrętkę *Horizontal Position* (nastawa jest wskazywana przez strzałkę nad podziałką),
- nastawa podstawy czasu dostosowana do przewidywanego czasu trwania impulsu sterującego – pokrętkę *Horizontal Scale* (nastawa jest wyświetlana pod podziałką po symbolu M);

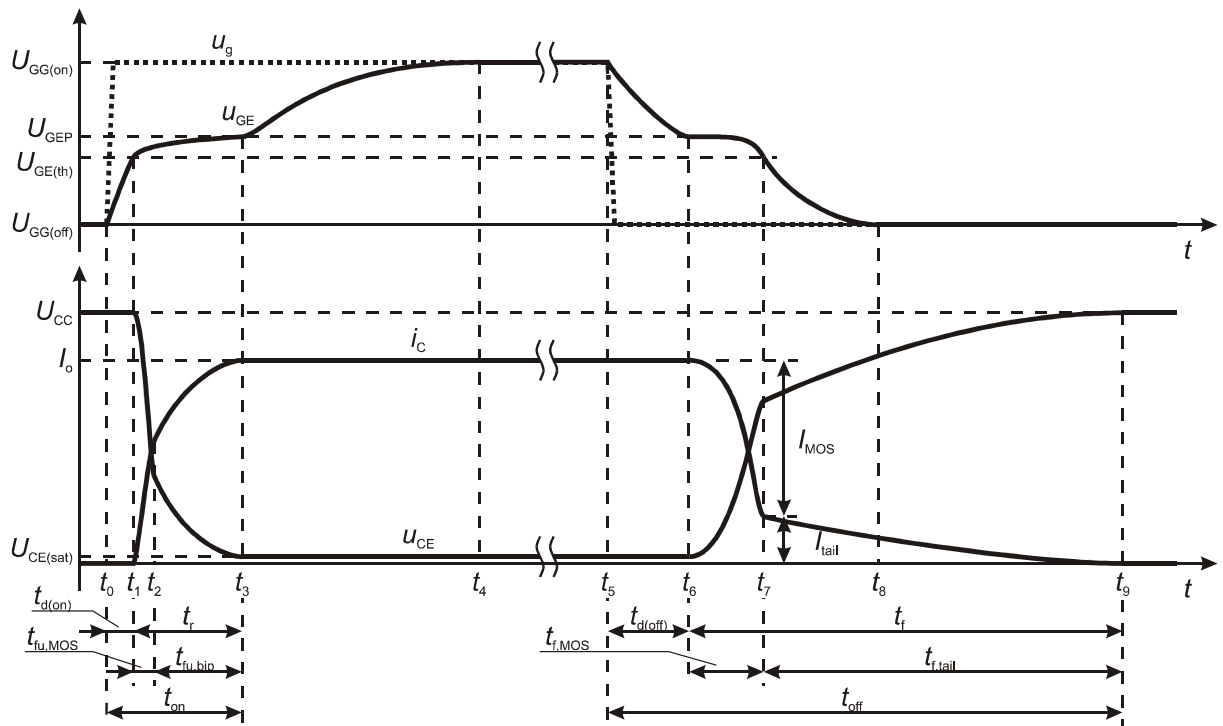
- c) wyzwalanie – przycisk *Trigger Menu*:

- wyzwalanie zboczem – *Type: Edge*,
- zbocze wyzwalające narastające – *Slope: $\uparrow$* ,
- przebieg wyzwalający z wejścia wyzwalania zewnętrznego (u_{GE}), z dzielnikiem 5:1 – *Source: Ext/5*,
- tryb zwykły – *Mode: Normal*,
- sprzężenie ze składową stałą – *Coupling: DC*,
- poziom wyzwalania mniej więcej w połowie przewidywanego przedziału zmienności napięcia u_{GE} – pokrętkę *Trigger Level* (nastawa jest wyświetlana pod podziałką po symbolu zbocza $\uparrow$, przy czym dotyczy ona sygnału po przejściu przez tłumik 5:1, a więc odpowiada 1/5 rzeczywistego poziomu sygnału u_{GE}).

13. Wygenerować impuls przełączający tranzystor wciskając przycisk K na panelu układu. Na oscyloskopie na moment powinien pojawić się komunikat „Trig’d” (Triggered) nad podziałką oraz powinien zostać wyświetlony przebieg napięcia u_{CE} . Z kolei po wcisnięciu przycisku *Trigger Menu* przez co najmniej sekundę i przy cały czas wcisniętym przycisku *Trigger Menu*, ponownym wygenerowaniu impulsu, powinien zostać wyświetlony przebieg napięcia wyzwalającego u_{GE} wraz z linią kreskową wskazującą poziom wyzwalania ustawiony pokrętkiem

Trigger Level. Jeżeli to nie nastąpi, sprawdzić poprawność ustawień oscyloskopu (szczególnie wzmocnienie kanału 2 *Vertical Scale*, podstawę czasu *Horizontal Scale* oraz poziom wyzwalania *Trigger Level*, najlepiej przytrzymując przycisk *Trigger Menu* w celu wyświetlenia przebiegu wyzwalającego). Stwierdzić, czy obserwowane przebiegi u_{CE} i u_{GE} są poprawne (patrz rys. 2). W przypadku niepowodzenia poprosić prowadzącego o sprawdzenie ustawień.

14. Dostosować (generując impuls przełączający po każdej zmianie ustawień) podstawę czasu i położenie chwili wyzwolenia (pokrętła *Horizontal Scale* i *Horizontal Position*) tak, aby impuls napięcia (poziom niski u_{CE}) był widoczny w całości (por. rys. 2) i zajmował w poziomie większość ekranu.



Rys. 2. Przebiegi u_{GE} , u_{CE} i i_C w cyklu przełączania tranzystora IGBT z obciążeniem rezystancyjnym

15. 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 1;
- koniecznie ustawić współczynnik przetwarzania prąd-napięcie na wartość umożliwiającą bezpieczny dla urządzenia pomiar i wyświetlenie na oscyloskopie przebiegu o przewidywanej amplitudzie (patrz informacje o ograniczeniach podane w instrukcji do sondy; amplitudę spodziewaną podano w pkt. 3).

16. Oprócz nastaw podanych w instrukcji do sondy prądowej, ustawić:

- a) na wzmacniaczu sondy: sprzężenie z przenoszeniem składowej stałej – *Coupling*: DC;
- b) na oscyloskopie (przycisk 1):
 - sprzężenie ze składową stałą – *Coupling*: DC,
 - odwracanie przebiegu wyłączone – *Invert*: Off.

17. Zamknąć sondę wokół wyprowadzonego fragmentu przewodu tak, by mierzyć prąd kolektora i_C i aby mierzony kierunek tego prądu był zgodny z rzeczywistym.

18. Generując impuls przełączający, dostosować:

- wzmocnienie w torze pomiarowym prądu – pokrętkiem *Vertical Scale* oscyloskopu, nie na wzmacniaczu sondy,

- chyba że wzmocnienie ustawione na wzmacniaczu nie jest poprawne (co może m.in. objawiać się kształtem prądu wyraźnie odbiegającym od impulsu prostokątnego lub zaświeceniem kontrolki *Overload* na wzmacniaczu sondy) – wówczas należy je zmienić, a następnie zmienić ustawienie na oscyloskopie zgodnie z pkt. 16.b),
- położenie przebiegu – pokrętką *Vertical Position* kanału 1,

tak, aby przebieg prądu był widoczny optymalnie, tj. wypełniał ekran w pionie w maksymalnym stopniu, ale poza niego nie wykraczał. Skontrolować poprawność przebiegu (patrz rys. 2).

2.3. Wykonanie pomiarów

Pełny cykl przełączania

1. Wygenerować impuls przełączający. Upewnić się, że obraz przebiegów jest nadal poprawny. Sprawdzić, czy amplituda impulsu prądu obserwowana na oscyloskopie jest w przybliżeniu równa wartości wskazanej w pkt. 2.2/3.

Pominięcie powyższego punktu może uniemożliwić opracowanie wyników!

Chociaż pobór prądu w obwodzie mocy trwa krótko, znacznie przekracza on wydajność prądową zasilacza. W związku z tym niekiedy może się zdarzyć, że w czasie pomiaru uaktywni się ograniczenie prądowe, które spowoduje ograniczenie prądu i napięcia. W związku z tym po wygenerowaniu impulsu przełączającego należy upewnić się, że wartość prądu i_C w stanie załączenia oraz wartość napięcia u_{CE} w stanie wyłączenia (równa napięciu zasilania U_{CC}) obserwowane na oscyloskopie są prawidłowe. W przeciwnym razie wygenerować impuls ponownie.

2. W razie potrzeby dostosować:

- wzmocnienie kanałów – pokrętkła *Vertical Scale*,
- położenie przebiegów – pokrętkła *Vertical Position*,

tak, aby każdy z przebiegów, 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 wykraczał (nadal zaniedbać ewentualne krótkie szpilki).

3. Zarejestrować oba przebiegi u_{CE} i i_C (razem) w formie graficznej (obrazu):
 - a) w programie OpenChoice Desktop upewnić się, że aktywna jest zakładka *Screen Capture*;
 - b) kliknąć przycisk *Get Screen* – w oknie powinien pojawić się czarno-biały aktualny obraz ekranu oscyloskopu;
 - c) kliknąć *Save As* i zapisać obraz w formacie bezstratnym (np. PNG, nie JPG), zaakceptować myszą (nie klawiszem *Enter*, gdyż w wyniku błędnego działania aplikacji spowoduje to ponowne otwarcie okna *Save As* po zakończeniu zapisu).

Dokładna obserwacja załączania i wyłączania

4. Zarejestrować w formie numerycznej (nie graficznej) przebiegi umożliwiające wyznaczenie wybranych czasowych i energetycznych parametrów dynamicznych dla załączania tranzystora (nie dla jakiegokolwiek innego stanu pracy):
 - a) ustawić podstawę czasu (*Horizontal Scale*), położenie momentu wyzwania (*Horizontal Position*) oraz ewentualnie poziom wyzwania (*Trigger Level*) tak, aby z maksymalną dokładnością obserwować przebieg załączania tranzystora (nie jakiegokolwiek innego stanu pracy) w obwodzie głównym (nie sterowania), tj. na odcinku t_r rozumianym fizycznie (tzn. nie według definicji technicznych, lecz zgodnie z rys. 2);
 - b) upewnić się, że ustawienia kanałów nadal spełniają wymagania podane w pkt. 2, jednak obecnie z uwzględnieniem ewentualnych przebiegów – w razie potrzeby dostosować ustawienia opisane w pkt. 2;
 - c) w programie OpenChoice Desktop przejść do zakładki *Waveform Data Capture*;
 - d) kliknąć przycisk *Select Channels*, zaznaczyć oba kanały CH1 i CH2 i wcisnąć *Get Data* – w oknie programu powinny pojawić się kolorowe przebiegi zgodnie z aktualną zawartością ekranu oscyloskopu;
 - e) wcisnąć *Save As* i zapisać przebiegi jako ciągi liczb odpowiadających kolejnym punktom krzywych w formacie CSV (*Comma Delimited*).

5. Zarejestrować przebiegi umożliwiające wyznaczenie parametrów dynamicznych dla wyłączania tranzystora:
 - a) przełączyć się na wyzwianie zboczem opadającym napięcia u_{GE} – *Trigger Menu, Slope: Falling*;
 - b) powtórzyć pkt 4 z tym że:
 - zamiast załączania należy oczywiście rozważać wyłączanie w obwodzie głównym, tj. na odcinku t_f rozumianym fizycznie (tzn. nie według definicji technicznych, lecz zgodnie z rys. 2);

Powyższy podpunkt nie mówi, że na ekranie ma być widoczny *dowolny fragment* odcinka t_f , tylko *odcinek* t_f , co oznacza cały ten odcinek. Niepoprawne wykonanie tego podpunktu spowoduje, że niemożliwe będzie uzyskanie oczekiwanych wyników i pomiary będą musiały być powtórzone. W razie wątpliwości należy jeszcze raz przestudiować wskazany wyżej rysunek uwzględniając oba przebiegi widoczne na oscyloskopie.

 - zamiast przycisku *Select Channels*, należy użyć bezpośrednio przycisku *Get Data*.
6. Dokonać pomiaru dla wyłączania przy dwukrotnie (około) większym obciążeniu:
 - a) wyłączyć zasilacz (pozostawiając pokrętki w niezmienionym położeniu);
 - b) wymienić odbiornik na opornik o odpowiedniej rezystancji;
 - c) załączyć zasilacz;
 - d) powtórzyć pkt 5 (pomiar tylko dla wyłączania) dla nowych warunków pracy tranzystora.
7. Dokonać pomiaru dla wyłączania przy dwukrotnie (około) mniejszym obciążeniu:
 - a) wyłączyć zasilacz;
 - b) wymienić opornik na pozwalający uzyskać obciążenie około dwukrotnie mniejsze od początkowego (czyli ok. 4-krotnie mniejsze od obecnego);
 - c) załączyć zasilacz;
 - d) powtórzyć pkt 5 (pomiar tylko dla wyłączania) dla nowych warunków pracy tranzystora.

Stan załączenia

8. Przekonfigurować obwód mocy
 - a) wyłączyć zasilacz;
 - b) wymienić odbiornik R_L na opornik o wartości pozwalającej uzyskać pierwotną wartość $I_{C(on)} = 12\text{ A}$ przy zasilaniu U_{CC} rzędu 10 V;
 - c) zakładając idealne zwarcie końcówek głównych tranzystora, oszacować wartość napięcia U_{CC} potrzebną do uzyskania prądu 12 A przy zainstalowanym oporniku;
 - d) załączyć zasilacz;
 - e) przed wygenerowaniem jakiegokolwiek impulsu przełączającego ustawić napięcie U_{CC} oszacowane wyżej.
9. Generując impulsy przełączające, skonfigurować układ pomiarowy tak, aby umożliwić późniejsze dokładne wyznaczenie spadku napięcia w stanie załączenia $U_{CE(on)}$ dla określonego prądu $I_{C(on)}$:
 - a) na oscyloskopie dostosować podstawę czasu i położenie chwili wyzwolenia (*Horizontal Scale* i *Horizontal Position*) tak, aby impuls napięcia (poziom niski u_{CE}) był widoczny w całości (por. rys. 2) i zajmował w poziomie większość ekranu;
 - b) na oscyloskopie dostosować:
 - poziomy zera obu kanałów (*Vertical Position*, wskazywane przez strzałkę na lewo od podziałki) tak, aby poziomy te znajdowały się na ekranie,
 - wzmocnienie kanału 1 (*Vertical Scale*) tak, aby przebieg i_C , od swojego poziomu zera do swojej wartości maksymalnej, zajmował maksymalny obszar całego ekranu w pionie, ale pozań nie wykraczał,

- wzmocnienie kanału 2 (*Vertical Scale*) tak, aby możliwy był późniejszy możliwie dokładny odczyt wartości $U_{CE(on)}$ (poziom $U_{CE(off)}$, a tym bardziej szpilki przy wyłączaniu, w tym pomiarze nie muszą być widoczne na ekranie); nie należy jednak stosować wzmocnienia większego niż 1 V/div (tj. stałej podziałki mniejszej niż 1 V), gdyż może to wprowadzić błąd pomiaru wskutek niedopasowania wzmocnienia do amplitudy międzyszczytowej przebiegu;
 - jeszcze raz upewnić się, że poziomy zera obu kanałów znajdują się na ekranie, w przeciwnym razie wyregulować je ponownie (*Vertical Position*).
10. Obserwując na oscyloskopie wartość prądu $I_{C(on)}$, dokładnie ustawić na zasilaczu wartość U_{CC} tak, by prąd ten wyniósł faktycznie 12 A. Zarejestrować przebiegi – powtórzyć pkt 3 (rejestracja wyników w formie graficznej).

Tranzystor serii ultraszybkiej

11. Wyłączyć zasilacz. Zachowując podane wcześniej zasady bezpieczeństwa, zamienić tranzystor na egzemplarz serii ultraszybkiej. Zwrócić uwagę na kolejność wyprowadzeń zgodnie ze schematem, rysunkiem na panelu układu oraz kartą katalogową tranzystora.

Przed wykonaniem kolejnego punktu poprawność połączeń musi sprawdzić prowadzący!

12. Włączyć zasilacz. Dokonać pomiaru stanu przewodzenia – powtórzyć pkt 10.
13. Dokonać pomiaru stanów dynamicznych przy początkowym obciążeniu:
- a) wyłączyć zasilacz;
 - b) wymienić opornik R_L na początkowy, tj. pozwalający uzyskać wartość $I_{C(on)} = 12$ A przy zasilaniu $U_{CC} = 60$ V;
 - c) załączyć zasilacz i ustawić napięcie zasilania obwodu mocy $U_{CC} = 60$ V;
 - d) powtórzyć pkt. 4–5 (pomiar dla załączania i dla wyłączania) dla nowego tranzystora.

Zakończenie pomiarów

14. Wyłączyć zasilacz.
15. Po zgaśnięciu czerwonej diody na płycie układu, rozłączyć układ.

3. Opracowanie i analiza wyników

3.1. Serie tranzystorów

Uruchomienie programu Scilab

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

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

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

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

Załączanie

4. W programie Scilab odczytać zestaw przebiegów $\{u_{CE}; i_C\}$ dla tranzystora standardowego, dla procesu załączania, dla $I_{C(on)} = 12\text{ A}$ – zarejestrowany w pkt. 2.3/4, wpisując polecenie

```
[naglowek,dane]=wczytaj_oc('nazwa_pliku.csv');
```

Funkcja *wczytaj_oc* wczytuje dane numeryczne odpowiadające kolejnym punktom czasowym do macierzy *dane*, natomiast opis kolumn macierzy – do wektora *naglowek*. Każdemu przebiegowi (kanałowi) odpowiadają dwie kolumny macierzy *dane* – kolumna czasu i kolumna danej wielkości fizycznej.

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

5. Obliczyć i dodać do macierzy *dane* przebieg mocy chwilowej strat w obwodzie kolektora p_C , za pomocą polecenia

```
[naglowek,dane]=dodaj_moc(naglowek,dane,nr_i,nr_u);
```

Funkcja *dodaj_moc* zwraca macierz i wektor nagłówków uzupełnione o dwie dodatkowe kolumny, zawierające czas jak dla przebiegu prądu oraz przebieg mocy chwilowej wyznaczony jako iloczyn prądu chwilowego (tj. przebiegu o numerze kolejnym nr_i) i napięcia chwilowego (przebieg o numerze nr_u). Kolejność kolumn można ustalić wpisując

```
naglowek
```

co spowoduje wyświetlenie ich nagłówków. Parametry nr_i i nr_u są numerami przebiegów, tj. kolejnych par kolumn, a nie numerami kolumn.

6. Wykreślić wszystkie 3 przebiegi poleceniem

```
wykresl_dane(naglowek,dane,[1:3]);
```

Funkcja *wykresl_dane* skaluje wartości przebiegów przez potęgi 10 tak, aby wszystkie były w miarę dobrze widoczne na wykresie, niezależnie od różnic rzeczywistych amplitud. Współczynniki skalujące kolejnych przebiegów wyświetlane są w opisie osi Y.

Zapisać wykres do pliku z menu *File* ► *Export* (dla uzyskania obrazu dobrej jakości zaleca się format PNG lub EMF). Skontrolować, czy wartość prądu kolektora w stanie przewodzenia jest zgodna z wiedzą o parametrach i nastawach układu pomiarowego.

7. Obliczyć energię wydzielaną w obwodzie głównym tranzystora podczas załączania $W_{C(on)}$:
- korzystając z podziałki osi współrzędnych i funkcji powiększenia, odczytać z wykresu czasy $t_{inf(on)}$ i $t_{sup(on)}$ odpowiadające początkowi i końcowi impulsu mocy (rys. 3 – pole $W_{C(on)}$);
 - obliczyć energię $W_{C(on)}$ jako całkę przebiegu p_C za przedział od $t_{inf(on)}$ do $t_{sup(on)}$ [2], wydając polecenie

```
calka_infsup(dane,numer_przebiegu_pc,tinf,tsup,pc0,ki)
```

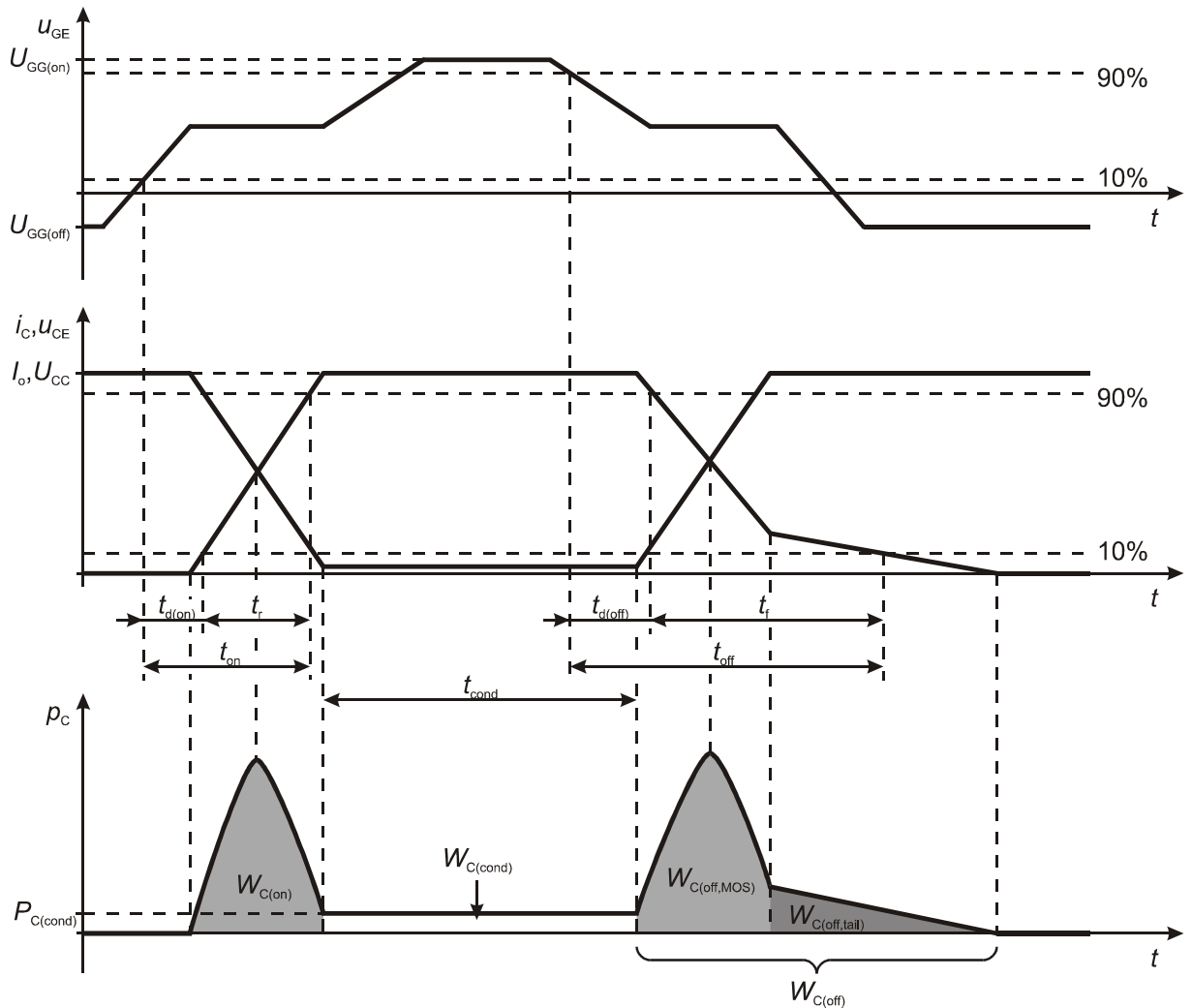
Parametr *numer_przebiegu* to numer kolejny przebiegu p_C w macierzy *dane*. Parametr *pc0* pozwala uwzględnić przesunięcie poziomu zera przebiegu p_C (niezerowa wartość w stanie wyłączenia tranzystora) spowodowane niedokładnością sondy prądowej. Jeżeli przesunięcie to jest znaczące, to należy wpisać nieprawdziwą – niezerową wartość p_C w stanie wyłączenia widoczną na dotychczasowym wykresie. Jeżeli przesunięcie jest niewielkie w porównaniu z amplitudą mocy p_C , należy wpisać 0. Parametr k_i pozwala uwzględnić przelicznik napięcia na prąd zgodnie ze współczynnikiem przetwarzania sondy prądowej. W przypadku oscyloskopu TDS1002B powinien on zostać uwzględniony już na oscyloskopie przez odpowiednie ustawienie w pkt. 2.2/16.b), w związku czym obecnie należy wpisać 1.

Można również wykorzystać alternatywną postać funkcji całkującej, *calka_infdelta()*. Działa ona identycznie jak poprzednia, jedynie zamiast *tsup* należy podać parametr *deltat* = $t_{sup(on)} - t_{inf(on)}$.

- powyższa funkcja zwróci wartość całki w dżulach i kontrolnie wykreśli przebieg p_C przesunięty o p_{C0} i przeskalowany przez k_i oraz zaznaczy obszar, którego polu odpowiada obliczona całka;

na podstawie tego wykresu kontrolnego należy sprawdzić, czy całka została obliczona za właściwy fragment przebiegu mocy (impuls wyraźnie odróżniający się od poprzedzającego go stanu wyłączenia i następującego stanu załączenia, o podstawie na poziomie rzeczywistego zera tj. stałej wartości przebiegu w stanie wyłączenia), a jeżeli nie – wyznaczyć energię ponownie;

- zapisać wykres kontrolny.



Rys. 3. Najważniejsze parametry dynamiczne tranzystora IGBT (rysunek nie przedstawia dokładnego kształtu przebiegów podczas przełączania)

8. Powtórzyć pkt. 4–7 dla tranzystora ultraszybkiego (zestaw przebiegów zarejestrowany w pkt. 2.3/13).

Wyłączanie

9. Powtórzyć pkt. 4–8 dla stanu wyłączania, dla obu tranzystorów (zestawy przebiegów zarejestrowane w pkt. 2.3/5 i 2.3/13), w celu wyznaczenia energii wydzielanej podczas wyłączania $W_{C(off)}$. Przebiegi dla każdego z tranzystorów należy wczytać do innej macierzy (np. *dane* i *dane2*).
10. Uzyskać wykres porównawczy prądu dla obu tranzystorów:
- utworzyć nowy zestaw przebiegów, np. *dane3*, poprzez połączenie przebiegów prądu z macierzy *dane* i *dane2*, wpisując:

```
dane3=[eks_przebieg(dane,nr_i),eks_przebieg(dane2,nr_i)];
```

gdzie *nr_i* jest numerem kolejnym przebiegu prądu;

- wykreślić zestaw dwóch przebiegów prądu, wpisując

```
wykresl_prady(dane3,opis1,opis2);
```

gdzie *opis1* i *opis2* są opisami przebiegów [zgodnie z kolejnością ich połączenia w podpunkcie a)], które pozwolą odróżnić przebieg dla tranzystora standardowego i ultraszybkiego;

- c) zsynchronizować przebiegi w początku ogona prądowego – jeżeli ogon zaczyna się dla każdego tranzystora w innej chwili, przesunąć jeden z przebiegów przez odjęcie lub dodanie odpowiedniej wartości (wyznaczonej metodą prób i błędów) do jego kolumny czasu; np. aby przesunąć drugi z przebiegów o 10 ns w prawo, należy dodać wartości do kolumny 4 wpisując

```
dane3(:,4)=dane3(:,4)+10e-9;
```

- d) zapisać uzyskany wykres.

11. W oparciu o wykres porównawczy, korzystając z podziałki i funkcji powiększenia, odczytać dla każdego z tranzystorów:

- prąd kolektora w stanie przewodzenia $I_{C(on)}$;
- wysokość ogona prądowego I_{tail} (patrz rys. 2);
- efektywny czas życia nośników τ_{eff} , tj. czas, po którym wartość ogona prądowego zmniejsza się e -krotnie (e – podstawa logarytmu naturalnego).

Do wykonania tego podpunktu zamiast podziałki można wykorzystać funkcję

```
t_dla_y(dane,nr_przebiegu,y)
```

która zwraca wartość czasu, dla którego przebieg o numerze *nr_przebiegu* zawarty w macierzy *dane* po raz pierwszy przecina poziom *y* – w tym wypadku $y = I_{tail}$ dla otrzymania współrzędnej początku odcinka τ_{eff} oraz $y = I_{tail}/e$ dla otrzymania końca tego odcinka.

Stan przewodzenia

- Z wykresu uzyskanego dla tranzystora standardowego, dla obciążenia 12 A, przy niskim napięciu zasilania (obraz zapisany w pkt. 2.3/10), korzystając z podziałki i wskazania poziomu zera (strzałka z numerem kanału z lewej strony podziałki), odczytać wartość napięcia kolektor-emitery w stanie załączenia $U_{CE(on)}$.
- Powtórzyć pkt 12 dla tranzystora ultraszybkiego (obraz zapisany w pkt. 2.3/12).

3.2. Wpływ wartości prądu przewodzenia

1. Postępując analogicznie jak w pkt. 3.1/4, odczytać zestaw przebiegów $\{u_{CE}; i_C\}$ dla tranzystora standardowego, dla procesu załączania, dla dwukrotnie większego obciążenia ($I_{C(on)} \approx 24 \text{ A}$) – przebiegi zarejestrowane w pkt. 2.3/6.
2. Wykreślić przebieg prądu kolektora analogicznie jak w pkt. 3.1/6, z tym że obecnie należy podać jeden numer jednego przebiegu (prądu).
3. Z uzyskanego wykresu odczytać parametry prądu kolektora jak w pkt. 3.1/11.
4. Powtórzyć pkt. 1–3 dla dwukrotnie mniejszego obciążenia ($I_{C(on)} \approx 6$) – przebiegi zarejestrowane w pkt. 2.3/7.

3.3. Podsumowanie wyników

1. Wyniki uzyskane w par. 3.1 zebrać w tabeli zawierającej dane dla $I_{C(on)} \approx 12$ A, dla tranzystorów z dwu serii:
 - $I_{C(on)}$ wyznaczoną przy okazji analizy stanu wyłączania,
 - $W_{C(on)}$ dla załączania,
 - $W_{C(off)}$, I_{tail} , τ_{eff} dla wyłączania,
 - $U_{CE(on)}$ dla przewodzenia;
2. Wyniki uzyskane w par. 3.2 zebrać w tabeli zawierającej dane dla tranzystora standardowego, dla 3 wartości obciążenia:
 - $I_{C(on)}$ wyznaczoną przy okazji analizy stanu wyłączania,
 - I_{tail} , τ_{eff} dla wyłączania.
3. Na podstawie wyników z obu tabel, z zależności łączącej amplitudę ogona prądowego I_{tail} z prądem przewodzenia $I_{C(on)}$ i wzmocnieniem prądowym struktury PNP α_{PNP} [1, 2], dla każdego przypadku obliczyć wartość tego wzmocnienia. Wyniki dodać do tabel.
4. Na podstawie tabeli 2, wykreślić efektywny czas życia τ_{eff} i wzmocnienie prądowe α_{PNP} w funkcji prądu przewodzenia $I_{C(on)}$.

3.4. Analiza wyników

Serie tranzystorów

1. Na podstawie wyników zawartych w tabeli 1, dokonać analizy parametrów ogona prądowego:
 - a) porównać amplitudy ogona prądowego I_{tail} dla jednego i drugiego z tranzystorów;
 - b) powiązać obserwacje z ppkt. a) wartościami wzmocnienia prądowego α_{PNP} , odwołując się do wiadomości teoretycznych i wzoru analitycznego [2];
 - c) dodatkowo na podstawie wykresu porównawczego porównać czas trwania ogona prądowego dla jednego i drugiego z tranzystorów;
 - d) powiązać obserwacje z ppkt. b) i c) z efektywnym czasem życia nośników τ_{eff} , odwołując się do wiadomości teoretycznych i wzoru analitycznego [2].
2. Dokonać analizy energii wydzielanej w tranzystorze podczas przełączania:
 - a) porównać wartości energii wydzielanej podczas załączania $W_{\text{C(on)}}$ jednego i drugiego tranzystora – czy różnią się one znacząco?
 - b) porównać wartości energii wydzielanej podczas wyłączania $W_{\text{C(off)}}$ jednego i drugiego tranzystora – czy różnią się one znacząco?
 - c) uzasadnić zaobserwowane znaczące różnice opierając się na analizie z pkt. 1, wykresach kontrolnych z obliczeń energii, jak również na wzorze analitycznym [2].
3. Na podstawie analizy wartości $U_{\text{CE(on)}}$ wykazać, że poprawa właściwości dynamicznych tranzystora odbywa się kosztem pogorszenia jego właściwości statycznych. Z czego wynika ta negatywna zmiana? – odwołać się do wiadomości teoretycznych dotyczących stanu przewodzenia tranzystora IGBT [2] oraz do zaobserwowanych zmian parametrów τ_{eff} i α_{PNP} .

Wpływ prądu przewodzenia na ogon prądowy

4. Na podstawie wyników zawartych w tabeli 2 oraz wykresów uzyskanych w pkt. 3.3/4, stwierdzić:
 - a) czy szybkość zaniku ogona prądowego, którą można scharakteryzować za pomocą stałej czasowej, którą stanowi efektywny czas życia τ_{eff} , zależy w wyraźnym stopniu od prądu przewodzenia $I_{\text{C(on)}}$;
 - b) czy wzmocnienie prądowe zależy w wyraźnym stopniu od prądu przewodzenia $I_{\text{C(on)}}$;
 - c) jaki jest charakter zależności stwierdzonej w podpunkcie b) i czy jest to zgodne z przewidywaniami teoretycznymi [3].
5. Odwołując się do wniosków z pkt. 1–3 stwierdzić, czy wraz ze zwiększaniem prądu kolektora właściwości statyczne i dynamiczne tranzystora IGBT poprawiają się czy pogarszają? (Nie należy jednak z tego wyciągać zbyt daleko idących wniosków. Jak można stwierdzić doświadczalnie [3], w zakresie dużych prądów tranzystory IGBT i tak posiadają lepsze właściwości statyczne i gorsze właściwości dynamiczne niż tranzystory MOSFET.)

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 4P. Tranzystor IGBT*. Łódź: Politechnika Łódzka, 2019.
- [3] Starzak Ł.: *Laboratorium przyrządów i układów mocy. Ćwiczenie 5P. Tranzystory BJT*. Łódź: Politechnika Łódzka, 2019.