



PODZESPOŁY I UKŁADY SCALONE MOCY

Ćwiczenie A1

Parametry dynamiczne diod mocy

Opracowanie ćwiczenia i instrukcji:
Łukasz Starzak

Łódź 2012

Spis treści

B Wprowadzenie do ćwiczenia	5
1. Cel i przebieg ćwiczenia.....	5
2. Parametry dynamiczne diod mocy.....	6
2.1. Wyłączanie.....	6
2.2. Załączanie.....	9
C Doświadczenie	11
3. Pomiary	11
3.1. Układ pomiarowy	11
Budowa i zasada działania	11
Zmiana warunków przełączania	14
Połączenia i pomiary	15
3.2. Przygotowanie układu	16
Badane przyrządy	16
Zasilanie i elementy obwodu	16
Generator funkcyjny	16
Oscyloskop	17
Pomiar próbny	18
3.3. Wykonanie pomiarów.....	19
Stan wyłączania dla różnych diod	19
Stan wyłączania dla różnych warunków zewnętrznych	19
Stan załączania	20
Zakończenie pomiarów	20
D Wyniki	21
4. Opracowanie i analiza wyników	21
4.1. Wyznaczenie parametrów.....	21
Uruchomienie programu Scilab.....	21
Wyłączanie.....	21
Załączanie.....	23
4.2. Analiza wyników.....	24
Wyłączanie.....	24
Załączanie.....	25
Parametry technologiczne i katalogowe	26
E Informacje	27
5. Literatura	27

Wprowadzenie do ćwiczenia

1. Cel i przebieg ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zbadanie dynamicznych właściwości diod mocy oraz zapoznanie się z metodami pomiaru podstawowych parametrów dynamicznych. Najważniejsze parametry zostaną wyznaczone dla kilku diod należących do różnych klas pod względem szybkości przełączania. Dla jednej z nich zbadany zostanie także wpływ warunków pracy. Ćwiczenie zostanie ograniczone wyłącznie do diod bipolarnych – PIN.

Działanie diod mocy PIN podczas przełączania zostało opisane w instrukcji [1], natomiast fizyczne podstawy przewodnictwa bipolarnego zostały przedstawione w instrukcji [2]. W niniejszej instrukcji wiadomości te zostaną uzupełnione o ścisłe definicje parametrów, które pozwalają opisać te procesy liczbowo.

2. Parametry dynamiczne diod mocy

2.1. Wyłączanie

W przypadku diod mocy wyłączanie jest procesem bardziej złożonym i krytycznym niż załączanie. Wiąże się to z charakterem zjawisk fizycznych zachodzących wewnątrz diody. Dotyczą one nadmiarowych nośników ładunku zmagazynowanych w warstwie słabo domieszkowanej w stanie przewodzenia. Oddziaływanie diody z obwodem zewnętrznym prowadzi do zjawisk takich jak przepływ prądu wstecznego, przepięcia i oscylacje. Ich skutki nie ograniczają się tylko do samego czasu trwania stanu wyłączania, ale obejmują również straty mocy w diodzie i sąsiednich elementach (a więc sprawność układu) oraz emisję zaburzeń elektromagnetycznych (a więc niezawodność urządzenia i jego kompatybilność elektromagnetyczną).

Zjawiska fizyczne wewnątrz diody oraz ich wpływ na obserwowane na zewnątrz przebiegi prądu i napięcia opisano w instrukcji [1]. Przebiegi te powtórzono na rys. 1a. Można je uznać za niezależne od topologii układu pracy diody.

Z przytoczonych wyżej powodów istotna jest możliwość liczbowego opisu procesu wyłączania. Należy przy tym spodziewać się, że – ze względu na wspomniane oddziaływanie przyrządu z obwodem zewnętrznym – na wartości parametrów dynamicznych wpływ mają nie tylko właściwości samej diody, ale również układu pracy. Do szczególnie istotnych warunków zewnętrznych należą (patrz rys. 1a):

- 1) prąd przewodzenia I_F ,
- 2) napięcie blokowania U_R ,
- 3) stromość opadania prądu przewodzenia di_F/dt .

Należy zwrócić uwagę, że dwa pierwsze z powyższych parametrów odnoszą się do wszystkich przyrządów półprzewodnikowych mocy, gdyż zawsze są narzucone przez obwód zewnętrzny. Jednakże szybkość wyłączania w przypadku tranzystorów zależy zwykle od parametrów obwodu sterowania, zaś w przypadku diod sytuacja jest inna. Ponieważ są to przyrządy niesterowalne, szybkość wyłączania prądu diody jest najczęściej narzucona przez obwód zewnętrzny. Jest ona wówczas równa szybkości załączania prądu tego przyrządu, który przejmuje prąd od dotychczas przewodzącej diody. Taka sytuacja występuje między innymi w obwodzie pomiarowym wykorzystywanym w niniejszym ćwiczeniu.

Powyższe nie oznacza jednak braku wpływu właściwości diody na parametry wyłączania takie jak np. czas trwania tego procesu. Wpływ ten jest wręcz decydujący od chwili przejścia opadającego prądu diody przez zero.

Definicje parametrów dynamicznych stanu wyłączania diody mocy zaznaczono graficznie na rys. 1a. Są to:

- 1) czas wyłączania t_{rr} (ang. *reverse recovery time*), zwany również czasem odzyskiwania zdolności zaworowej, na w którym wyróżnia się czas

magazynowania t_s (ang. *storage time*) i czas opadania prądu wstecznego t_f (ang. *reverse current fall time*);

- 2) ładunek przejściowy przy wyłączaniu Q_{rr} (ang. *reverse recovery charge*) – wartość ładunku usuwanego w czasie t_{rr} , a więc pole zaznaczone kolorem szarym:

$$Q_{rr} = \left| \int_{t_{rr}} i dt \right| \quad (1)$$

- 3) maksymalny prąd wsteczny $I_{rr(m)}$ (ang. *maximum reverse recovery current*);
4) maksymalne napięcie wsteczne $U_{rr(m)}$ (ang. *maximum reverse recovery voltage*).

Dokładne określenie chwili zaniku prądu nie jest możliwe. Dlatego jego przebieg w ostatniej fazie aproksymuje się prostą, a za koniec procesu przyjmuje się punkt jej przecięcia z osią czasu. Wybór punktów określających sieczną może być inny niż na rys. 1a – zamiast punktów 100% i 25% wartości szczytowej $I_{rr(m)}$ stosuje się również 75% i 50%.

Szczególne znaczenie praktyczne ma ładunek przejściowy Q_{rr} . Ładunek jako całka z prądu względem czasu zawiera w sobie bowiem informację zarówno o wartościach prądu, jak i o czasie jego przepływu. Przyjmując napięcie podczas wyłączania za stałe i równe U_R , uzyskuje się często wykorzystywany przez inżynierów przybliżone wzory na energię i moc czynną strat dynamicznych podczas wyłączania:

$$W_{off} = \int_{t_{rr}} p dt = \int_{t_{rr}} ui dt \approx U_R \int_{t_{rr}} i dt = U_R \cdot Q_{rr} \quad (2)$$

$$P_{off} = \frac{1}{T_s} \int_{t_{rr}} p dt = \frac{W_{off}}{T_s} \approx f_s \cdot U_R \cdot Q_{rr} \quad (3)$$

gdzie T_s i f_s oznaczają okres i częstotliwość przełączania, zaś wartości U_R i Q_{rr} są pozbawione znaku.

Z kolei istotność czasów t_s i t_f wynika z faktu, że za ich pomocą można przybliżyć stromości prądowe (por. rys. 1a):

$$\left| \frac{di_F}{dt} \right| \approx \frac{I_{rr(m)}}{t_s} \quad (4)$$

$$\left| \frac{di_R}{dt} \right| \approx \frac{I_{rr(m)}}{t_f} \quad (5)$$

Zaobserwowano, że im większa stromość zaniku prądu wstecznego, tym większa amplituda generowanego przepięcia. Zależność ta jest w przybliżeniu proporcjonalna:

$$U_{ov} = U_{rr(m)} - U_R \approx k_{cir} \cdot U_R \cdot \left| \frac{di_R}{dt} \right| \quad (6)$$

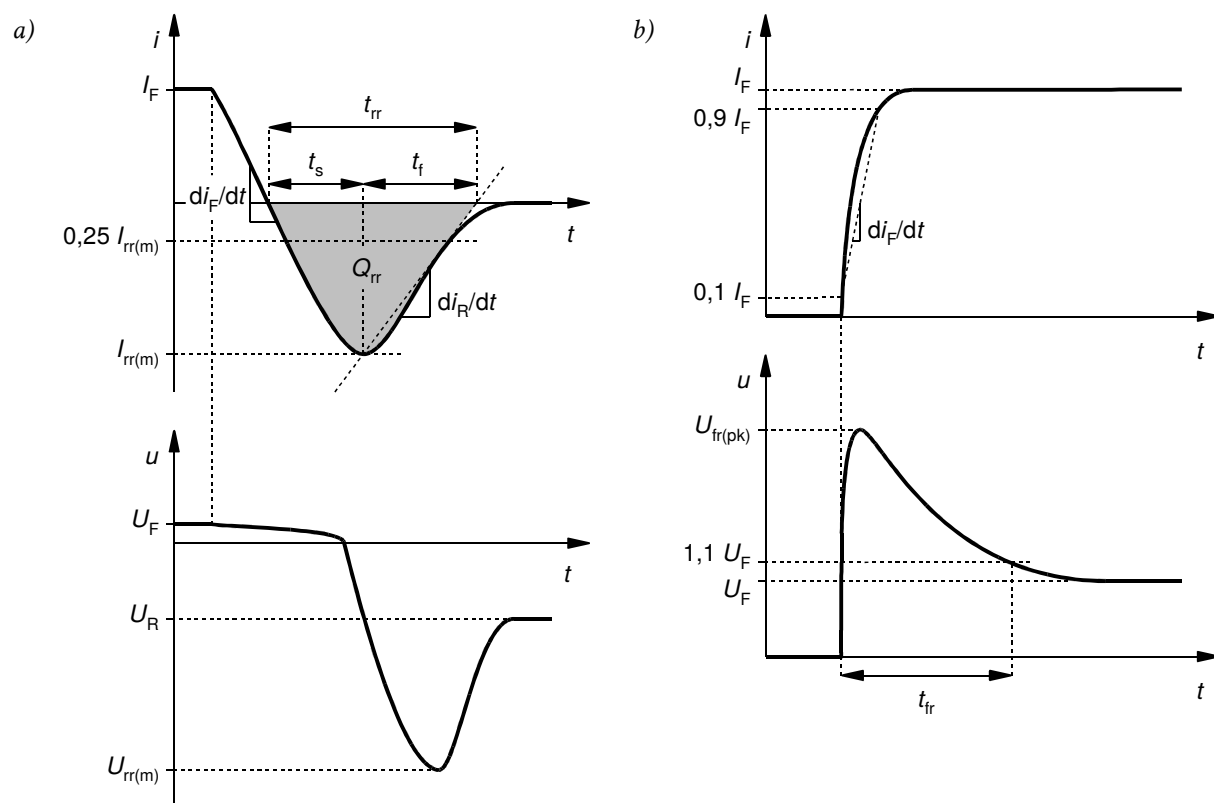
gdzie k jest pewną stałą odzwierciedlającą parametry obwodu – przede wszystkim wypadkową indukcyjność pasożytniczą. Stromość opadania prądu jest parametrem wtórnym, wynikającym z parametrów obwodu i diody; dlatego bardziej praktyczny jest wzór w postaci:

$$U_{ov} = k_{cir} U_R k_{rrs}^{-1} \left| \frac{di_F}{dt} \right| \quad (7)$$

gdzie

$$k_{\text{rrs}} = \left| \frac{di_F/dt}{di_R/dt} \right| \approx \frac{I_{\text{rr(m)}}/t_s}{I_{\text{rr(m)}}/t_f} = \frac{t_f}{t_s} \quad (8)$$

nazywa się współczynnikiem łagodności wyłączenia (ang. *reverse recovery softness factor*). Im większa jego wartość, tym wyłączenie przebiega łagodniej w sensie generowanego napięcia. Wzór (7) łączy własności diody (k_{rrs}) z warunkami jej pracy (U_R , di_F/dt , k_{cir}).



Rys. 1. Przebiegi prądu i napięcia diody wraz z definicjami parametrów dynamicznych: a) wyłączenie; b) załączanie

2.2. Załączanie

Podobnie jak w przypadku wyłączania, szybkość narastania prądu diody podczas jej załączania jest najczęściej równa szybkości opadania prądu przyrządu, który jest wówczas wyłączany, a którego prąd przejmie dioda. Zwykle prąd narasta szybciej niż do warstwy słabo domieszkowanej napływają dodatkowe nośniki z emiterów. Powoduje to powstanie na diodzie znaczącego spadku napięcia, jak to opisano w instrukcji [1]. Spadek ten stopniowo zmniejsza się w czasie, w miarę zwiększania się koncentracji nośników nadmiarowych, co przedstawiono na rys. 1b. Ostatecznie osiąga pewną wartość ustaloną U_F , która wynika z charakterystyki statycznej przyrządu.

Jak widać, proces załączania jest mniej złożony od wyłączania. Opisują go liczbowo dwa parametry, których definicje przedstawiono graficznie na rys. 1b:

- 1) czas załączania t_{fr} (ang. *forward recovery time*), zwany też czasem odzyskiwania zdolności przewodzenia;
- 2) szczytowe napięcie podczas załączania $U_{fr(pk)}$ (ang. *peak forward recovery voltage*).

Zależą one od dwóch parametrów obwodu zewnętrznego:

- 1) prądu przewodzenia I_F ,
- 2) stromości narastania prądu przewodzenia di_F/dt .

W przypadku, gdy dioda wykazuje znaczące napięcie szczytowe $U_{fr(pk)}$, stosowanie definicji czasu t_{fr} przedstawionej na rys. 1b prowadziłoby do objęcia znaczącego odcinka czasu. Wynika to z faktu, że różnica wartości $1,1 \cdot U_F$ i U_F jest bardzo niewielka w porównaniu z różnicą wartości $U_{fr(pk)}$ i U_F . W tym wypadku rozsądniejszym kryterium zakończenia załączania jest spadek napięcia u_D do wartości $U_F + 0,1 \cdot (U_{fr(pk)} - U_F)$, czyli do 10% „przebiecia” liczonego od poziomu U_F . To kryterium zostanie przyjęte w niniejszym ćwiczeniu dla przyrządów, dla których $U_{fr(pk)}$ jest większe od U_F o więcej niż rząd wielkości. W tych przypadkach stosowanie definicji alternatywnej daje podobny „wizualnie” wynik, jak stosowanie definicji podstawowej do przyrządów o małych wartościach $U_{fr(pk)}$.

Praktyczne wzory przybliżone na energię i moc czynną strat podczas załączania można uzyskać po założeniu, że czas narastania prądu jest dużo krótszy od czasu załączania t_{fr} . Odpowiada to przyjęciu, że przez cały czas t_{fr} prąd diody ma wartość I_F . Wówczas

$$W_{on} = \int_{t_{fr}} p \, dt = \int_{t_{fr}} u i \, dt \approx I_F \int_{t_{fr}} u \, dt \quad (9)$$

Całka odpowiada polu powierzchni pod przebiegiem napięcia. Przybliżając je trapezem, otrzymuje się

$$W_{on} \approx \frac{1}{2} I_F (U_F + U_{fr(pk)}) t_{fr} \quad (10)$$

$$P_{on} = \frac{1}{T_s} \int_{t_{fr}} p \, dt = \frac{W_{on}}{T_s} \approx \frac{1}{2} f_s I_F (U_F + U_{fr(pk)}) t_{fr} \quad (11)$$

3. Pomiary

3.1. Układ pomiarowy

Budowa i zasada działania

Do badania diod w niniejszym ćwiczeniu wykorzystywany jest dedykowany układ pomiarowy stanów dynamicznych przedstawiony na rys. 2. Jego idea jest stosunkowo prosta.

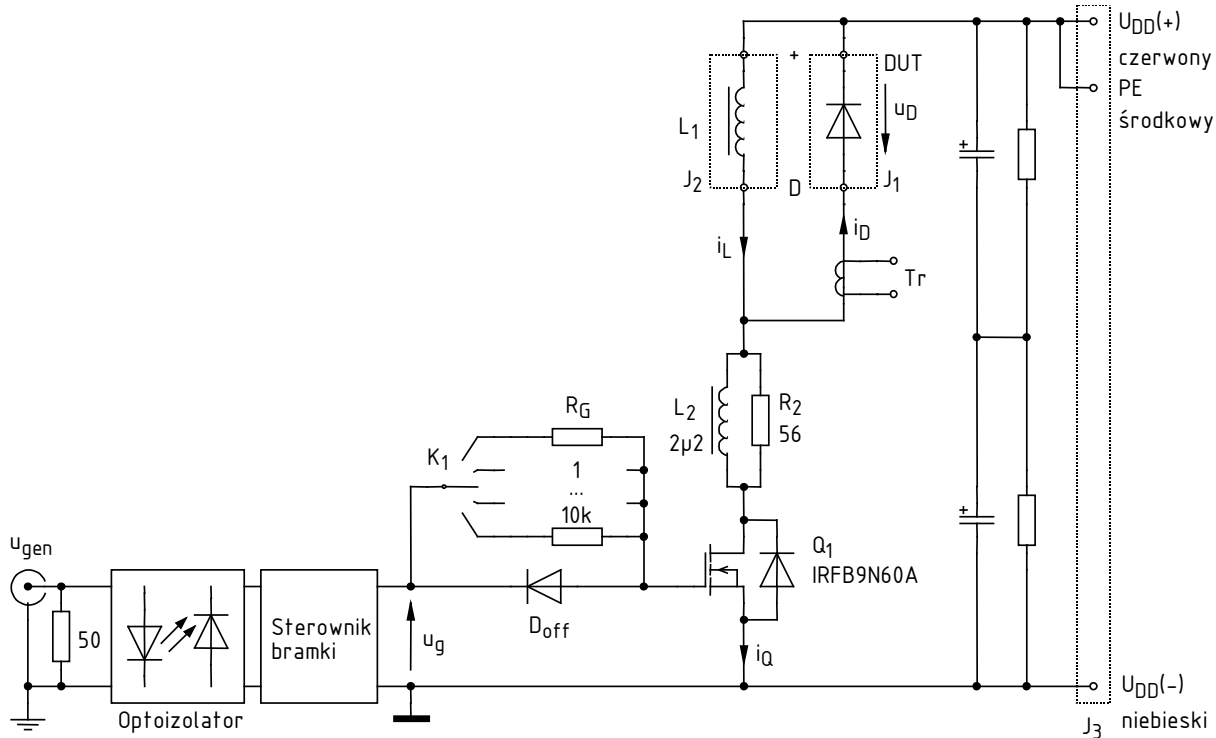
Badana dioda DUT pracuje jako dioda zwrotna obciążenia o charakterze indukcyjnym – dławika L_1 . Dławik ten posiada na tyle dużą indukcyjność, że w krótkim czasie przełączania diody (rzędu 10...100 ns) jego prąd zmienia się w stopniu niezauważalnym. W związku z tym element ten (w tej skali czasu) można traktować jak źródło prądowe. Prąd tego źródła płynie przez tranzystor Q_1 , kiedy przyrząd ten jest załączony. Po jego wyłączeniu zaczyna płynąć przez badaną diodę DUT i wówczas możliwa jest obserwacja procesu załączania diody. Po krótkim czasie tranzystor jest znów załączany, a więc na powrót przejmuję prąd dławika L_1 od diody. Tym samym możliwa jest obserwacja procesu wyłączania diody.

Uproszczone przebiegi prądu tranzystora Q_1 i dławika L_1 oraz prądu i napięcia badanej diody DUT przedstawiono na rys. 3 wraz z przebiegiem napięcia u_g sterującego tranzystorem Q_1 . Kształt tego napięcia narzucony jest przez zewnętrzny generator – napięcie u_{gen} na rys. 2.

Masa generatora jest wewnętrznie stale uziemiona. Natomiast w obwodzie mocy – aby umożliwić pomiar napięcia na diodzie DUT – uziemiona musi zostać, poprzez sondę napięciową oscyloskopu, jej katoda. Z tego powodu konieczne jest zastosowanie izolacji optycznej. Z drugiej strony masa obwodu mocy nie może być uziemiona. Z tego powodu obwód sterowania tranzystora Q_1 posiada zasilanie bateryjne, tak aby uniknąć przyłączania drugiego zasilacza do nieuziemionego, zmiennego i potencjalnie wysokiego potencjału. Zasilanie bateryjne jest włączane i wyłączane za pomocą przełącznika. Należy z niego korzystać we wskazanych chwilach w celu zapobieżenia szybkemu rozładowaniu baterii.

Działanie układu można podzielić na 5 przedziałów czasu (patrz rys. 3):

- 1) $t < t_1$: brak wysterowania tranzystora MOSFET ($u_g = 0$). Jest on wobec tego wyłączony, a w obwodzie nie płynie prąd (i_Q , i_L , i_D). W związku z tym napięcie na dławiku L_1 i równoległej diodzie (u_D) jest zerowe;



Rys. 2. Schemat układu do pomiaru parametrów dynamicznych diod mocy

- 2) $t_1 < t < t_2$: tranzystor zostaje załączony wskutek podania impulsu napięcia u_g . Powoduje to w przybliżeniu liniowe narastanie prądu tranzystora i_Q , gdyż jest on równy prądowi i_L dławika L_1 . Ponieważ impedancja dławika L_1 jest dużo większa niż rezystancja załączonego tranzystora $R_{DS(on)}$ i impedancja cewki L_2 , napięcie na dławiku L_1 jest praktycznie równe napięciu zasilania U_{DD} . W związku z tym szybkość narastania prądu wynosi

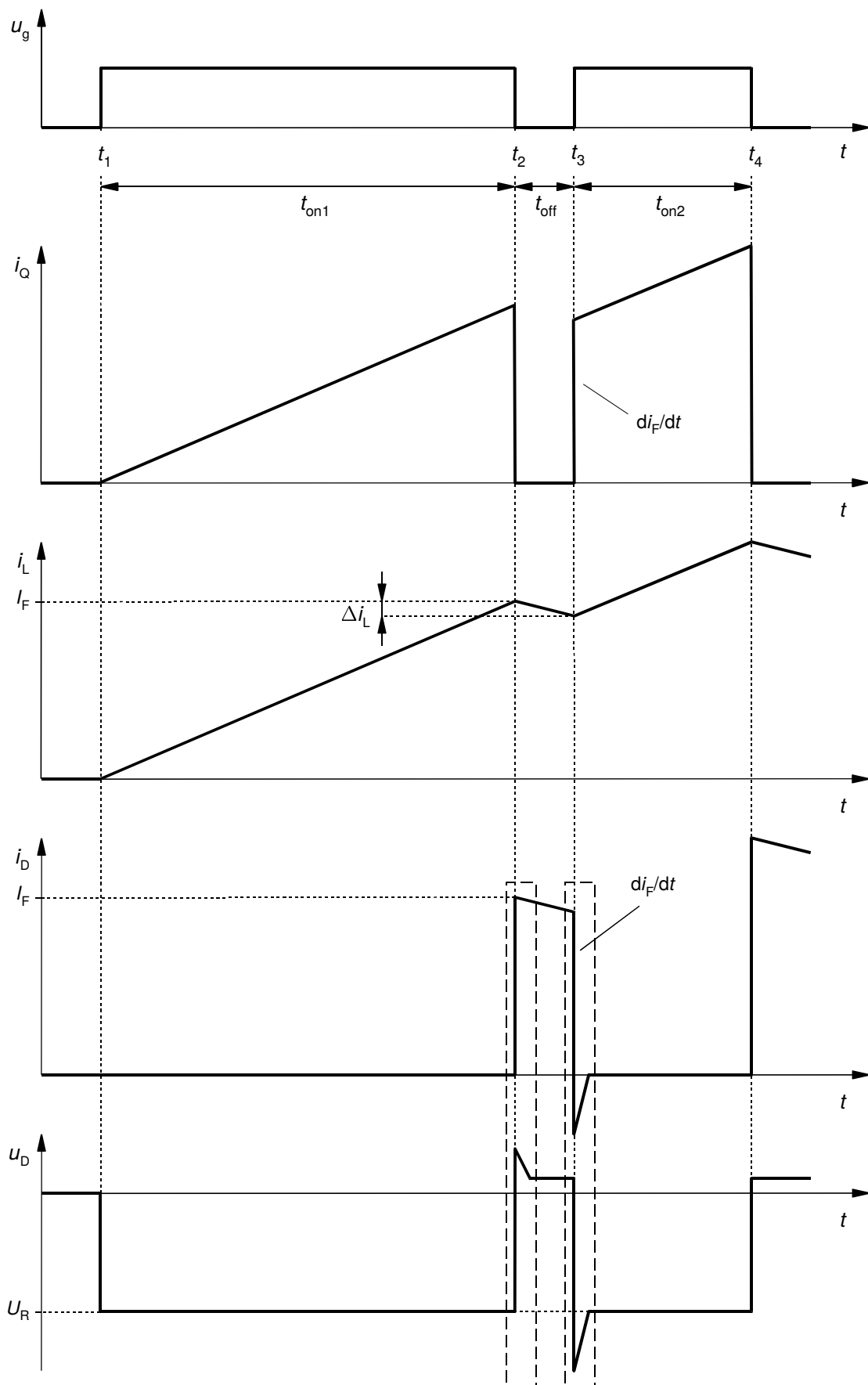
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{|u_D|}{L_1} \approx \frac{U_{DD}}{L_1} \quad (12)$$

Dioda jest nadal wyłączona ($i_D = 0$), gdyż wymuszone na niej wskutek załączenia tranzystora napięcie $u_D \approx -U_{DD}$ jest ujemne;

- 3) $t_2 < t < t_3$: wyłączenie tranzystora powoduje zanik jego prądu i_Q , zatem prąd dławika i_L musi zostać przejęty przez diodę, która ulega załączeniu. W tym przedziale czasu $i_Q = 0$, zaś $i_D = i_L$. W czasie trwania stanu przewodzenia diody, prąd nieznacznie opada wskutek strat energii w diodzie i rezystancji dławika. Parametry przebiegu u_g są jednak tak dobrane, aby $t_{off} \ll t_{on1}$, a w związku z tym spadek Δi_L jest zanedbywalnie mały w stosunku do wartości prądu w chwili załączenia diody I_F (rys. 3 został pod tym względem przejaskrawiony). Na diodzie występuje nieznaczne dodatnie napięcie przewodzenia;
- 4) $t_3 < t < t_4$: ponowne załączenie tranzystora powoduje, że prąd dławika zostaje na powrót przejęty przez ten przyrząd, a więc $i_D = 0$, $i_Q = i_L$. Na diodzie zostaje wymuszone napięcie wsteczne o wartości jak w przedziale $t_1 - t_2$. Z napięciowego prawa Kirchhoffa

$$u_D = -(U_{DD} - u_{DS(on)} - u_{L2}) \quad (13)$$

gdzie $u_{\text{DS(on)}}$ – napięcie dren-źródło załączonego tranzystora Q_1 , zaś u_{L2} – napięcie na równoległym połączeniu L_2 i R_2 . Jak wspomniano wyżej, $u_{\text{DS(on)}} \ll U_{\text{DD}}$. Z kolei w stanie ustalonym, gdy $i_0 \approx \text{const}$, z równania cewki



Rys. 3. Uproszczone przebiegi napięć i prądów w układzie pomiarowym

$$u_{L2} = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} \quad (14)$$

wynika, że $u_{L2} \approx 0$. Cewka L_2 zwiera więc opornik R_2 , który odgrywa rolę wyłącznika w stanie przejściowym wyłączania, kiedy $i_Q \neq \text{const}$ – ma on za zadanie stłumić oscylacje wywołane obecnością indukcyjności pasożytniczych. Wobec tego

$$u_D \approx -U_{DD} \quad (15)$$

- 5) $t > t_4$: tranzystor zostaje ponownie wyłączony, na czas dużo dłuższy niż t_{off} . W wyniku tego prąd znów zamyka się w obwodzie L_1 – DUT. Energia zgromadzona w dławiku zostaje powoli rozproszona w diodzie DUT i w rezystancji pasożytniczej samego dławika. W wyniku tego prąd dławika i_L powoli spada do zera. Po zakończeniu tego procesu na dławiku nie występuje spadek napięcia, gdyż jego prąd jest stale zerowy. Całe napięcie U_{DD} odłożone jest na obwodzie dren-źródło tranzystora, jak w przedziale $t < t_1$.

Podczas pomiaru stanu wyłączania, na ekranie oscyloskopu obserwowany będzie jedynie krótki (w stosunku do czasów t_{on1} , t_{off} i t_{on2}) odcinek czasu w sąsiedztwie chwili t_3 , zaznaczony na rys. 3 ramką. Analogicznie podczas pomiaru stanu załączania obserwowany będzie jedynie zaznaczony na rysunku krótki odcinek czasu w sąsiedztwie chwili t_2 .

Zmiana warunków przełączania

W rozdz. 2 wyszczególniono 3 parametry obwodu zewnętrznego mające wpływ na przebieg procesów dynamicznych w diodzie mocy. Omówiony wyżej układ pomiarowy umożliwia nastawę każdego z nich.

1. Jak widać, czas pierwszego załączenia tranzystora t_{on1} ma zasadniczy wpływ na wartość prądu I_F , który przewodzić będzie dioda w przedziale czasu t_{off} (jak uzasadniono wyżej, można przyjąć, że w tym przedziale czasu wartość $i_L = i_D$ nie ulega zmianie). Im dłuższy czas t_{on1} , tym większą wartość zdąży osiągnąć prąd dławika i_L . Zaniedbując rezystancje pasożytnicze elementów obwodu, z zależności (12) można wyprowadzić wzór pozwalający obliczyć czas t_{on1} niezbędny do uzyskania określonego prądu przewodzenia I_F :

$$t_{\text{on1}} \approx \frac{I_F}{U_{DD}} L_1 \quad (16)$$

2. Jak wynika z dokonanej wyżej analizy działania układu pomiarowego, napięcie blokowania diody U_R wynosi

$$U_R \approx -U_{DD} \quad (17)$$

3. Ponieważ prąd diody DUT jest przejmowany przez tranzystor Q_1 , więc stromość opadania prądu diody di_F/dt jest równa stromości narastania prądu tranzystora. W wykorzystywanym układzie czas narastania prądu tranzystora zmienia się poprzez zmianę wartości opornika bramkowego R_G . Służy do tego przełącznik obrotowy K_1 umieszczony z lewej strony obudowy.

Należy zwrócić uwagę, że powyższe parametry są wzajemnie zależne. Przy danej wartości R_G otrzymujemy różne wartości czasu narastania tranzystora dla różnych warunków pracy U_R i I_F . Z kolei z porównania wzorów (16) i (17) wynika, że zmiana napięcia blokowania U_R pociąga za sobą zmianę prądu przewodzenia I_F . W związku z tym w badaniach naukowych stosuje się zwykle bardziej złożone układy pomiarowe, umożliwiające zmianę parametrów zewnętrznych niezależnie od siebie. Z kolei zaletą wykorzystywanego w ćwiczeniu układu jest jego prostota. Z tego powodu wykorzystują go często producenci diod do wyznaczania parametrów katalogowych.

Wyłączanie tranzystora, a tym samym załączanie diody, następuje z maksymalną możliwą szybkością dzięki zastosowaniu niesymetrycznego obwodu sterowania z diodą D_{off} , przez którą płynie prąd rozładowania bramki. W wyniku tego szybkość narastania prądu diody podczas załączania di_F/dt (rys. 1b) jest znacznie większa od szybkości napływu nośników nadmiarowych do jej bazy. W konsekwencji można uznać, że przebieg załączania jest narzucony wyłącznie przez właściwości samej diody, a niezależny od stromości di_F/dt .

Połączenia i pomiary

Napięcie zasilania obwodu mocy U_{DD} doprowadzane jest za pośrednictwem potrójnej zielonej listwy zaciskowej zaznaczonej na rys. 2 linią przerywaną i oznaczonej J_3 . Biegun dodatni i ujemny należy rozróżnić po kolorze przewodu przyłączonego do listwy od wewnątrz układu. Zgodnie z rys. 2, w listwie tej środkowe gniazdo (PE) jest na stałe zwarte z gniazdem „+”. Gniazdo to służy do uziemienia bieguna „+”, a więc katody diody DUT.

Dławik L_1 dołączany jest za pośrednictwem podwójnej zielonej listwy zaciskowej oznaczonej na rys. 2 jako J_2 , zaś w układzie jako L_1 . Poprzez taką samą listwę, oznaczoną jako J_1 (w układzie – DUT) dołączana jest **badana dioda DUT**. W układzie gniazda o wyższym potencjale – połączone z biegunem „+” napięcia U_{DD} – oznaczone są znakiem „+”; natomiast gniazda o niższym potencjale – od strony drenu tranzystora Q_1 – oznaczone są literą „D”.

Cewka L_2 i opornik R_2 dołączone są na stałe do czwartej, potrójnej listwy zaciskowej (na rys. 2 pominiętej).

Pomiar napięcia u_D na diodzie DUT dokonywany jest przez przyłączenie sondy napięciowej bezpośrednio do wyprowadzeń tej diody. Napięcie to powinno być mierzone zgodnie z ogólnie przyjętym zwrotem, a więc od katody do anody (patrz rys. 2).

Należy przy tym pamiętać, że masa sondy napięciowej jest uziemiona na oscyloskopie. Przyłączenie tej masy do katody diody jest korzystne nie tylko ze względu na właściwy zwrot mierzonego napięcia u_D . Ważne jest również, że uziemiony zostaje w ten sposób stały potencjał „+” napięcia U_{DD} – którego stałość wynika z obecności dużych kondensatorów elektrolitycznych. Potencjał anody diody DUT zmienia się natomiast w trakcie przełączania, co prowadziłoby do przepływu prądów przez pojemności pasożytnicze, zaburzających wynik pomiaru, a nawet niebezpiecznych dla układu pomiarowego.

Konstrukcja układu pomiarowego zakłada, że użytkownik będzie mierzył napięcie u_D w sposób podany wyżej. Z tego założenia wynika dodatkowe uziemienie dodatniego bieguna zasilania U_{DD} , o którym wspomniano wyżej. Zapewnia ono bezpieczeństwo pracy w sytuacji, gdyby sonda napięciowa nie była do niego w ogóle podłączona, a przez to żaden z punktów obwodu mocy nie byłby uziemiony.

Pomiaru prądu diody i_D dokonuje się poprzez miniaturową sondę prądową CT2 zamontowaną w układzie na stałe (transformator prądowy Tr na rys. 2). Do oscyloskopu przyłącza się ją poprzez cienki kabel BNC wyprowadzony z tyłu obudowy. Sonda ta wymaga przyłączenia przez przejściówkę dopasowującą impedancję $50\ \Omega/1\ M\Omega$, taką jak używana ze wzmacniaczami zwykłych sond prądowych. Kierunek instalacji sondy jest zgodny z kierunkiem prądu i_D na rys. 2.

Napięcie u_{gen} z generatora doprowadzane jest poprzez gruby kabel BNC zamocowany w układzie na stałe i wyprowadzony z tyłu obudowy. Przebiegi sterujące o kształcie jak na rys. 3 i odpowiednio dobranych parametrach t_{on1} , t_{off} i t_{on2} , zostały uprzednio zapisane na pamięci Flash USB dostępnej na stanowisku. Przebiegi znajdują się w katalogu *uep-a1* w postaci plików z rozszerzeniem TFW. Nazwa każdego pliku składa się z 3 członów, oznaczających kolejno wartości t_{on1} [ns], t_{off} [μs] i t_{on2} [μs].

3.2. Przygotowanie układu

Badane przyrządy

W ćwiczeniu badaniu poddane zostaną 3 diody o identycznych parametrach znamionowych: średni prąd przewodzenia $I_{F(av)} = 1\text{ A}$, szczytowe powtarzalne napięcie wsteczne $U_{RRM} = 200\text{ V}$. Ich oznaczenia podano w tab. 1.

Tab. 1. Diody mocy badane w ćwiczeniu

Lp.	Oznaczenie	Typ
1	MUR120	ultraszybka wysokiej klasy
2	UF4003	ultraszybka niskiej klasy
3	1N4003	standardowa (częstotliwości sieciowej)

Zasilanie i elementy obwodu

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. Upewnić się, że przełącznik bateryjnego zasilania obwodu sterowania znajduje się w pozycji wyłączonej.
3. Do zasilenia obwodu mocy (napięcie U_{DD}) wykorzystać zasilacz regulowany:
 - a) przełączyć zasilacz w tryb pracy niezależnej (Independent, dwa przyciski pośrodku panelu przedniego);
 - b) połączyć zaciski „+” i „-” zasilacza z listwą J_3 zgodnie z opisem w par. 3.1;
 - c) pokrętko regulacji napięcia skrócić do zera, pokrętko ograniczenia prądowego ustawić na ok. 1/4 zakresu regulacji;
 - d) uziemić biegun dodatni zasilania U_{DD} przez połączenie osobnym przewodem gniazda PE listwy (rys. 2) z gniazdem GND zasilacza.
4. Za pomocą przewodów przyłączyć do listwy J_2 (L_1) dławik L_1 o indukcyjności ok. $300\text{ }\mu\text{H}$ (szeregowe połączenie dwóch dławików $150\text{ }\mu\text{H}$).
5. W listwę J_1 (DUT) włączyć diodę nr 1 z tab. 1. Zwrócić szczególną uwagę na zachowanie odpowiedniej polaryzacji zgodnie z rys. 2 i opisem w par. 3.1 oraz oznaczeniem na obudowie diody (pasek wskazuje katodę).
6. Ustawić maksymalną stromość opadania prądu przewodzenia di_F/dt – przełącznik obrotowy z boku układu skrócić maksymalnie przeciwnie do kierunku ruchu wskazówek zegara.

Generator funkcyjny

7. Włączyć generator funkcyjny (nie podłączony do układu).
8. Po uruchomieniu generatora, w gniazdo USB na jego panelu przednim włączyć dostępną na stanowisku pamięć Flash z zestawem przebiegów sterujących. Zaczekać na zakończenie skanowania pamięci.
9. Na generatorze wybrać tryb przebiegu dowolnego – w grupie przycisków *Function* wcisnąć *Arb*.
10. Wczytać przebieg sterujący u_{gen} z pamięci Flash:
 - przyciskiem obok ekranu wybrać *Arb Waveform Menu*,
 - wybrać *Memory: USB*,
 - wejść w katalog *uep-a1* – pokrętkiem wybrać katalog i wcisnąć *Change Directory*,

- za pomocą pokrętła wybrać plik o najkrótszym czasie t_{on1} (najmniejszy pierwszy człon nazwy) i wcisnąć OK.
11. Na generatorze wprowadzić ustawienia (do menu głównego można w każdej chwili powrócić wciskając przycisk *Top Menu*):
- impedancję wejściową układu sterowanego 50 Ω , bez odwracania przebiegu: *Output Menu* $\triangleright$ *Invert: Off, Load Impedance: 50 Ω* ;
 - długość przebiegu 60 μ s – *Frequency/Period Menu* $\triangleright$ *Period*;
 - powtarzanie pojedynczych impulsów co 1 s – *Run Mode Menu* $\triangleright$ *Burst, 1-Cycle, More, Source: Internal, Slope: Positive, Triggering Interval: 1 s*;
 - poziom niski 0 V, poziom wysoki 5 V – *Amplitude/Level Menu* $\triangleright$ *High Level* i *Low Level*.
12. Połączyć układ pomiarowy z wyjściem *Output 50 Ω* (nie *TTL*) generatora (patrz opis w par. 3.1).

Oscyloskop

13. Zamontowaną w układzie sondę prądową przyłączyć do kanału 1 oscyloskopu poprzez obciążenie dopasowujące (przejściówkę) 50 Ω / 1 M Ω (patrz opis w par. 3.1).
14. Sondę napięciową z tłumieniem 10:1 przyłączyć do kanału 2 oscyloskopu; przełącznikiem na korpusie ustawić tłumienie sondy na 10:1 (10X). Przyłączyć sondę bezpośrednio do wyprowadzeń diody w sposób zapewniający, że nie nastąpi przypadkowe zwarcie.

Masy sond napięciowych (końcówki krokodylkowe) są na oscyloskopie zwarte ze sobą i połączone z przewodem ochronnym (PE) sieci; w związku z tym masa sondy musi być przyłączona do punktu połączonego już z przewodem PE przez zasilacz, tj. do katody diody. Inne połączenie grozi przepływem prądu przez oscyloskop i uszkodzeniem jego obwodów wejściowych!

15. Skonfigurować oscyloskop:
- a) kanał 1 (*CH1 Menu*):
- sprzężenie ze składową stałą – *Coupling: DC*,
 - sonda prądowa o tłumieniu współczynnika 1 V/A – *Probe: Current, 1 V/A*,
 - odwracanie przebiegu wyłączone – *Invert: Off*,
 - wzmacnienie i poziom zera dostosowane do prądu rzędu $\pm 0,5$ A;
- b) kanał 2 (*CH2 Menu*):
- sprzężenie ze składową stałą – *Coupling: DC*,
 - sonda napięciowa o tłumieniu 10:1 – *Probe: Voltage 10X*,
 - odwracanie przebiegu wyłączone – *Invert: Off*,
 - wzmacnienie i poziom zera dostosowane do napięcia rzędu ± 10 V.
- c) oś czasu:
- wyzwalanie (*Trigger Menu*) zboczem opadającym prądu ze sprzężeniem ze składową stałą – *Type: Edge, Source: CH1, Slope: Falling, Mode: Normal, Coupling: DC*;
 - poziom wyzwalania (pokrętło *Trigger Level* – wskazanie w prawym dolnym rogu ekranu) na nieco powyżej zera;
 - podstawa czasu (*Horizontal Sec/Div*) odpowiednia do obserwacji odcinka o długości kilku mikrosekund;
 - położenie chwili wyzwalania (*Horizontal Position*) mniej więcej na środku ekranu.

Przed wykonaniem kolejnych punktów poprawność połączeń i nastaw musi sprawdzić prowadzący.

Pomiar próbny

Przez cały czas wykonywania ćwiczenia, pobór prądu przez układ, wykazywany na amperomierzach zasilacza obwodu mocy, nie powinien być nigdy większego rzędu niż 10 mA. Jeżeli obserwowane jest co innego, należy wyłączyć zasilacz i poprosić prowadzącego o sprawdzenie układu.

16. Włączyć zasilacz obwodu mocy. Pokrętle Voltage ustawić napięcie 10 V.
17. Na generatorze uaktywnić wyjście wciskając *Channel On*. Przełącznikiem z boku układu włączyć zasilanie obwodu sterowania. Na oscyloskopie powinny pojawić się odświeżane co 1 s przebiegi prądu i napięcia diody. W przeciwnym razie należy spróbować zmienić poziom wyzwalań (*Trigger Level*), a w drugiej kolejności wzmocnienie kanału, na którym mierzony jest prąd diody.
18. Na ekranie zidentyfikować odcinek t_{on1} zgodnie z rys. 3. W razie potrzeby dostosować podstawę czasu (*Horizontal Sec/Div*) i położenie chwili wyzwalań (*Horizontal Position*).
19. Dostosować na oscyloskopie:
 - a) podstawę czasu i położenie chwili wyzwalań tak, aby z maksymalną dokładnością obserwować przebieg wyłączania diody (patrz par. 3.1) wraz z fragmentem stanu ustalonego załączenia i fragmentem stanu ustalonego wyłączenia, przy czym fragmenty te powinny być na tyle długie, aby możliwy był odczyt wartości I_F i U_R , ale w sumie nigdy nie dłuższe niż 1/2 ekranu;
 - b) wzmocnienie w torze pomiarowym napięcia i prądu oraz położenie poziomów zera tak, by przebiegi były widoczny optymalnie, tj. wypełniały ekran w pionie w maksymalnym stopniu, ale pozań nie wykraczały (przebiegi będą rejestrowane w formie numerycznej, w związku z tym mogą nakładać się na siebie).

3.3. Wykonanie pomiarów

Stan wyłączania dla różnych diod

1. Na generatorze wczytać przebieg sterujący u_{gen} z $t_{\text{on1}} = 7,4 \mu\text{s}$ (pierwszy człon nazwy pliku 07400; patrz pkt 3.2/10).
2. Na zasilaczu obwodu mocy ustawić napięcie 50 V kontrolując, czy amperomierz zasilacza nie wykazuje poboru prądu.
3. Skontrolować na oscyloskopie, czy uzyskano prąd przewodzenia $I_F \approx 1 \text{ A}$ i napięcie blokowania $U_R \approx -50 \text{ V}$. Sprawdzić, czy ustawienia oscyloskopu są zgodnie ze wszystkimi wymaganiami podanymi w pkt. 3.2/19 – w razie potrzeby dokonać ich modyfikacji.
4. Zarejestrować przebiegi w formie numerycznej (nie graficznej):
 - a) w programie OpenChoice Desktop przejść do zakładki *Waveform Data Capture*;
 - b) 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;
 - c) wcisnąć *Save As* i zapisać przebiegi jako ciągi liczb odpowiadających kolejnym punktom krytycznym w formacie CSV (*Comma Delimited*).
5. Powtórzyć pomiar dla diody nr 3 z tab. 1:
 - a) pokrętlą *Voltage* sekcji *Master* sprowadzić napięcie zasilania obwodu mocy do zera i zaczekać na spadek wskazań woltomierzy zasilacza;
 - b) wyłączyć zasilanie obwodu sterowania;
 - c) odłączyć sondę napięciową od diody;
 - d) wymienić diodę na nr 3 z tab. 1, zwracając uwagę na zachowanie odpowiedniej polaryzacji;
 - e) przyłączyć sondę napięciową do diody, zwracając uwagę na zachowanie odpowiedniej polaryzacji;
 - f) załączyć zasilanie obwodu sterowania;
 - g) powtórzyć pkt. 2–4.
6. Powtórzyć pkt 5 dla diody nr 2 z tab. 1.

Stan wyłączania dla różnych warunków zewnętrznych

7. Nadal dla diody nr 2, powtórzyć pkt. 1 i 3–4 dla dwóch innych wartości prądu przewodzenia I_F :
 - a) 2 A – $t_{\text{on1}} = 17 \mu\text{s}$ (pierwszy człon nazwy pliku 17000);
 - b) $0,5 \text{ A}$ – $t_{\text{on1}} = 3,3 \mu\text{s}$ (pierwszy człon nazwy pliku 03300).
8. Powtórzyć pkt 1 przywracając prąd $I_F \approx 1 \text{ A}$ ($t_{\text{on1}} = 7,4 \mu\text{s}$). Powtórzyć pkt. 3–4 dla dwóch innych stromości opadania prądu przewodzenia di_F/dt (przełącznik obrotowy z boku układu, por. pkt 3.2/6):
 - a) najmniejszej, przy której wartości prądu przewodzenia I_F i napięcia blokowania U_R nie ulegają jeszcze widocznemu (większemu niż 10–20%) zmniejszeniu w stosunku do nastawionych wyżej;
 - b) pośredniej między najmniejszą a pierwotną (pośrednia powinna być stromość di_F/dt , nie położenie gałki przełącznika obrotowego).
9. Przywrócić pierwotną, maksymalną stromość di_F/dt (przełącznik w skrajnym położeniu przeciwnie do kierunku ruchu wskazówek zegara).

Stan załączania

10. Napięcie zasilania obwodu mocy U_{DD} sprowadzić do 10 V. Następnie wczytać przebieg u_{gen} o czasie $t_{on} = 39 \mu s$ (pierwszy człon nazwy pliku 39000).
11. Przełączyć się na wyzwalanie zboczem narastającym prądu (*Trigger Menu* ▷ *Slope: Rising*), utrzymując nadal poziom wyzwalania (*Trigger Level*) powyżej zera.
12. Dostosować na oscyloskopie:
 - a) podstawę czasu i położenie chwili wyzwalania tak, aby z maksymalną dokładnością obserwować przebieg załączania diody (patrz par. 3.1) wraz z fragmentem stanu ustalonego wyłączenia i fragmentem stanu ustalonego załączenia (tj. w którym napięcie u_D ma wartość ustaloną), przy czym fragmenty te powinny być na tyle długie, aby możliwy był odczyt wartości I_F , ale w sumie nigdy nie dłuższe niż 1/2 ekranu;
 - b) wzmocnienie w torze pomiarowym prądu oraz położenie poziomu zera tak, by przebieg był widoczny optymalnie, tj. wypełniał ekran w pionie w maksymalnym stopniu, ale pozań nie wykraczał;
 - c) wzmocnienie w torze pomiarowym napięcia oraz położenie poziomu zera tak, by przebieg był widoczny optymalnie w stanie załączania i przewodzenia, tj.:
 - ujemne napięcie w stanie wyłączenia nie musi być widoczne, a wartość U_R nie musi być znana,
 - natomiast stany załączenia i przewodzenia powinny być widoczne w możliwie dużym powiększeniu,
 - wraz z poziomem zera wskazywanym przez strzałkę z lewej strony podziałki, która to strzałka nie może się znajdować na samym dole podziałki, gdyż świadczy to o tym, że poziom zera znajduje się faktycznie poza ekranem,
 - 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.
13. Zarejestrować wyniki dla diody nr 2 – powtórzyć pkt 4.
14. Powtórzyć pomiar dla diody nr 1 z tab. 1:
 - a) pokrętlą *Voltage* sprowadzić napięcie zasilania obwodu mocy do zera i zaczekać na spadek wskazania woltomierza zasilacza do zera;
 - b) wyłączyć zasilanie obwodu sterowania;
 - c) odłączyć sondę napięciową od diody;
 - d) wymienić diodę na nr 1 z tab. 1, zwracając uwagę na zachowanie odpowiedniej polaryzacji;
 - e) przyłączyć sondę napięciową do diody, zwracając uwagę na zachowanie odpowiedniej polaryzacji;
 - f) załączyć zasilanie obwodu sterowania;
 - g) przywrócić napięcie zasilania obwodu mocy jak w pkt. 2;
 - h) powtórzyć pkt. 12–13.
15. Powtórzyć pkt 14 dla diody nr 3 z tab. 1.

Zakończenie pomiarów

16. Sprowadzić napięcie zasilania obwodu mocy do zera. Wyłączyć zasilacz obwodu mocy.
17. Wyłączyć zasilanie obwodu sterowania. Wyłączyć wyjście generatora przyciskiem *Channel On*.
18. Odłączyć dławik L_1 i wymontować diodę DUT. Rozłączyć układ pomiarowy.

4. Opracowanie i analiza wyników

4.1. Wyznaczenie parametrów

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');  
exec('ścieżka_dostępu_do_skryptu\uep_a1.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');
```

Wyłączanie

4. W programie Scilab odczytać zestaw przebiegów $\{i_D; u_D\}$ dla diody nr 2, dla procesu wyłączania, dla $U_R = -50$ V, $I_F = 1$ A i maksymalnej stromości di_F/dt – zarejestrowany w pkt. 3.3/4, wpisując polecenie

```
[naglowki,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 diodzie p_D , za pomocą polecenia

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

Funkcja ta zwróci macierz danych 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). W razie wątpliwości kolejność przebiegów można sprawdzić wykreślając oba przebiegi poleceniem

```
wykresl_dane(naglowki,dane,[1:2]);
```

Numer przebiegu jest pozycją, na której dany przebieg pojawia się w legendzie wykresu.

6. Wykreślić wszystkie 3 przebiegi poleceniem

```
wykresl_dane(naglowki,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.

Skontrolować, czy wartości prądu przewodzenia I_F i napięcia blokowania U_R są zgodne z wiedzą o nastawach układu pomiarowego (patrz pkt 4). Zapisać wykres do pliku z menu *Plik ► Eksportuj do* (dla uzyskania obrazu dobrej jakości zaleca się format PNG).

7. Obliczyć parametry dynamiczne stanu wyłączania:

W razie błędnego działania funkcji obliczeń automatycznych, należy w pierwszej kolejności podjąć próbę odczytu odpowiednich wartości z wykresu. W razie niepowodzenia należy zwrócić się do prowadzącego wraz z zapisanymi plikami CSV.

- a) wywołać funkcję automatycznie wyznaczającą parametry Q_{rr} , di_R/dt , di_F/dt , t_f , t_s , $U_{rr(m)}$, $I_{rr(m)}$, I_F , U_R , wpisując polecenie

```
[qrr,dirdt,difdt,tf,ts,urrm,irrm,ifwd,ur]=  
analiza_wylaczanie(dane, nr_i,nr_u)
```

- b) zgrubnie sprawdzić, czy wyświetlony wykres kontrolny wskazuje na poprawną detekcję wartości i stromości oraz całkowanie (patrz par. 2.1);
- c) wywołać funkcję automatycznie wyznaczającą energię wydzielaną podczas wyłączania W_{off} , wpisując polecenie

```
woff=energia_przelaczanie(dane,nr_p,prog)
```

gdzie nr_p jest numerem przebiegu mocy chwilowej dodanego w pkt. 5, zaś *prog* jest progiem detekcji (względem wartości szczytowej mocy chwilowej) krańców stanu dynamicznego – wstępnie należy przyjąć 5% (0,05);

- d) zgrubnie sprawdzić, czy wyświetlony wykres kontrolny wskazuje na poprawne całkowanie (patrz par. 2.1); jeżeli przedział czasu objęty całkowaniem jest zbyt długi, należy spróbować zwiększyć próg detekcji;
- e) na podstawie uzyskanych wyników obliczyć (patrz par. 2.1):
 - czas odzyskiwania zdolności zaworowej t_{rr} ,
 - współczynnik łagodności wyłączania k_{rrs} .

8. Powtórzyć pkt. 4–7 dla pozostałych dwóch diod – przebiegi zarejestrowane w pkt. 3.3/5–6. Wyniki, wraz z uzyskanymi dla pierwszej diody (pierwsze wykonanie pkt. 7), zebrać w tabeli 1, przy czym parametry charakteryzujące warunki zewnętrzne pomiaru (patrz par. 2.1) powinny być umieszczone w początkowych kolumnach.
9. Powtórzyć pkt. 4–7 dla diody nr 2, dla pozostałych wartości prądu przewodzenia I_F – przebiegi zarejestrowane w pkt. 3.3/7. Wyniki, wraz z uzyskanymi dla tej diody dla $I_F = 1$ A (i maksymalnej stromości di_F/dt – pierwsze wykonanie pkt. 7), zebrać w tabeli 2.
10. Powtórzyć pkt. 4–7 dla diody nr 2, dla pozostałych wartości stromości opadania prądu przewodzenia di_F/dt – przebiegi zarejestrowane w pkt. 3.3/8. Wyniki, wraz z uzyskanymi dla tej diody dla maksymalnej stromości (i $I_F = 1$ A – pierwsze wykonanie pkt. 7), zebrać w tabeli 3.
11. Zestawić obok siebie zapisane wykresy przebiegów $\{i_D, u_D, p_D\}$.

Załączanie

12. W programie Scilab odczytać zestaw przebiegów $\{i_D; u_D\}$ dla diody nr 2, dla procesu załączania – zarejestrowany w pkt. 3.3/13 (patrz pkt 4). Powtórzyć pkt. 5–6.
13. Obliczyć parametry dynamiczne stanu wyłączania:

W razie błędnego działania funkcji obliczeń automatycznych, należy w pierwszej kolejności podjąć próbę odczytu odpowiednich wartości z wykresu. W razie niepowodzenia należy zwrócić się do prowadzącego wraz z zapisanymi plikami CSV.

- a) wywołać funkcję automatycznie wyznaczającą parametry di_F/dt , t_{fr} , $U_{fr(pk)}$, U_F , I_F , wpisując polecenie

```
[ti01,difdt,tfr,ufrpk,ufwd,ifwd]=
analiza_zalaczanie(dane,nr_i,nr_u)
```

funkcja *analiza_zalaczanie* dodatkowo zwróci wartość $t_{i0,1}$ – współrzędną czasową punktu, w którym prąd przekracza wartość $0,1 \cdot I_F$, a więc chwilę przyjmowaną za początek załączania (patrz rys. 1b); funkcja poinformuje również o zastosowaniu alternatywnej definicji czasu t_{fr} (patrz par. 2.2);

- b) zgrubnie sprawdzić, czy wyświetlony wykres kontrolny wskazuje na poprawną detekcję wartości i stromości oraz całkowanie (patrz par. 2.2);
- c) obliczyć energię wydzielaną podczas przełączania W_{on} , jako całkę z przebiegu mocy chwilowej p_D za odcinek t_{fr} – zaczynający się w chwili $t_{i0,1}$ (patrz rys. 1b):

```
won=calka_infdelta(dane,nr_p,ti01,tfr,0,1)
```

gdzie nr_p jest numerem przebiegu mocy chwilowej dodanego w pkt. 5;

- d) zgrubnie sprawdzić, czy wyświetlony wykres kontrolny wskazuje na poprawne całkowanie (patrz par. 2.2); jeżeli całkowaniem objęty jest zły przedział czasu, należy spróbować wprowadzić wartości $ti01$ i tfr samodzielnie, odczytując je z wykresu.
14. Powtórzyć pkt. 12–13 dla pozostałych dwóch diod – przebiegi zarejestrowane w pkt. 3.3/14–15.
15. Wyniki zebrać w tabeli 4 (pominąć parametr pomocniczy $t_{i0,1}$), przy czym parametry charakteryzujące warunki zewnętrzne pomiaru (patrz par. 2.2) powinny być umieszczone w początkowych kolumnach.
16. Zestawić obok siebie zapisane wykresy przebiegów $\{i_D, u_D, p_D\}$.

4.2. Analiza wyników

Wyłączanie

1. W oparciu o tabelę 1, scharakteryzować przebadane przyrządy pod kątem czasu odzyskiwania zdolności zaworowej t_{tr} , ładunku przejściowego przy wyłączaniu Q_{tr} i energii wydzielanej podczas wyłączania W_{off} . Wskazać i opisać liczbowo (jako ilorazy) różnice między przyrządami ultraszybkimi a standardowym oraz między oboma przyrządami określonymi przez producentów jako „ultraszybkie”.
2. Przeanalizować praktyczne znaczenie parametrów analizowanych w pkt. 1:
 - a) dla każdej z diod (przypadki z tabeli 1) obliczyć energię wydzielaną podczas wyłączania W_{off} ze wzoru (2);
 - b) wyniki z ppkt. a) porównać z otrzymanymi doświadczalnie bezpośrednio; czy na podstawie ładunku przejściowego Q_{tr} można stwierdzić, jaka będzie różnica w mocy strat dynamicznych w porównywanych przyrządach – pod względem jakościowym (kierunku zmiany) i pod względem ilościowym (krotności zmiany)? czy rozbieżność jest większa dla przyrządów szybszych czy wolniejszych?
 - c) na podstawie wyników z tabeli 1 wykreślić zależność $W_{off} = f(Q_{tr})$ w skali logarytmicznej; w oparciu o wykres i tę tabelę ocenić, czy zależność ta jest faktycznie liniowa zgodnie ze wzorem (2);
 - d) w oparciu o tabele 1–3 stwierdzić, czy czas odzyskiwania zdolności zaworowej t_{tr} daje pełny obraz różnic w dynamicznych właściwościach przyrządów; czy na jego podstawie można stwierdzić, jaka będzie różnica w mocy strat dynamicznych w porównywanych przyrządach? czy pod względem prognozowania mocy strat lepszym parametrem jest czas t_{tr} czy ładunek Q_{tr} ?
 - e) w oparciu o tabele 1–3 stwierdzić, czy występuje korelacja między ładunkiem Q_{tr} a czasem t_{tr} , czy też mogą się one zmieniać niezależnie od siebie; czy występuje taka korelacja między t_{tr} a współczynnikiem łagodności wyłączania k_{rrs} ?
 - f) w oparciu o tabele 1–3 stwierdzić, czy szczytowy prąd wsteczny $I_{rr(m)}$ ma związek z parametrami t_{tr} i Q_{tr} ; jaki jest wpływ zewnętrznych warunków wyłączania (I_F , di_F/dt) na jego wartość?
3. Uzupełnić analizę 3 diod o łagodność procesu wyłączania:
 - a) w oparciu o tabelę 1 stwierdzić, czy współczynnik łagodności wyłączania k_{rrs} łączy wyraźną zależność ze stromością zaniku prądu wstecznego di_R/dt (przy stałej stromości di_F/dt);
 - b) czy wyniki potwierdzają zależność między parametrem k_{rrs} a napięciem generowanym w porównywanych przyrządach, w szczególności w przypadku diod ultraszybkich?
 - c) w oparciu o tabele 2–3 stwierdzić, czy współczynnik łagodności wyłączania można uznać za w miarę niezależny od zewnętrznych warunków wyłączania (I_F , di_F/dt);
 - d) w oparciu o tabele 1–3 stwierdzić, czy amplituda napięcia podczas wyłączania zależy tylko od współczynnika łagodności wyłączania; jaki jest wpływ warunków zewnętrznych I_F i di_F/dt ?
 - e) na podstawie tabeli 3:
 - obliczyć średni współczynnik łagodności wyłączania k_{rrs} ;
 - dla dowolnego z przypadków, ze wzoru (7), z użyciem średniej wartości k_{rrs} , obliczyć współczynnik k_{cir} ;
 - dla pozostałych przypadków, ze wzoru (7), z użyciem średniej wartości k_{rrs} , oszacować szczytowe napięcie wsteczne $U_{rr(m),est}$;
 - stwierdzić, czy współczynnik k_{rrs} diody pozwala poprawnie oszacować szczytowe napięcie wsteczne generowane na niej podczas wyłączania.

4. W oparciu o tabelę 1 scharakteryzować przebadane przyrządy pod kątem łagodności wyłączenia – współczynnika łagodności wyłączenia k_{rrs} i szczytowego napięcia wstecznego $U_{\text{rr(m)}}$. Wskazać i opisać liczbowo (jako ilorazy) różnice między przyrządami ultraszybkimi a standardowym oraz między oboma przyrządami określonymi przez producentów jako „ultraszybkie”.
5. Przeanalizować wpływ zewnętrznych warunków wyłączenia na podstawowe parametry tego procesu:
 - a) na podstawie tabeli 3 wykreślić zależności t_{rr} , Q_{rr} , $W_{\text{off}} = f(dI_{\text{F}}/dt)$;
 - b) scharakteryzować obserwowane zależności (rosnąca – malejąca, liniowa – nieliniowa – jak?);
 - c) na podstawie tabeli 2 wykreślić zależności t_{rr} , Q_{rr} , $W_{\text{off}} = f(I_{\text{F}})$;
 - d) scharakteryzować obserwowane zależności (rosnąca – malejąca, liniowa – nieliniowa – jak?); w analizie wziąć pod uwagę nieznaczną współzależność parametrów I_{F} i dI_{F}/dt w użytym układzie pomiarowym (wynikającą z wpływu wartości I_{F} na szybkość załączania tranzystora MOSFET, który to wpływ dla uproszczenia pomiarów nie był kompensowany) – wykorzystać wyniki z ppkt. b).

Załączanie

6. W oparciu o tabelę 4 scharakteryzować przebadane przyrządy pod kątem czasu załączania t_{fr} i energii wydzielanej podczas załączania W_{on} . Wskazać i opisać liczbowo (jako ilorazy) różnice między przyrządami ultraszybkimi a standardowym oraz między oboma przyrządami określonymi przez producentów jako „ultraszybkie”.
7. W oparciu o wyniki zawarte w tabelach 4 i 1, zestawić czasy załączania t_{fr} i wyłączania t_{rr} dla każdej z diod (tzn. zestawić ze sobą t_{fr} i t_{rr} dla diody 1, następnie t_{fr} i t_{rr} dla diody 2 itd., a nie porównywać ze sobą t_{fr} dla diody 1 z t_{fr} dla diody 2 itd.):
 - czy są one tego samego czy różnych rzędów
 - czy widoczna jest między nimi korelacja?
 - czy obserwacje świadczą o podobnym wpływie zachowania nośników nadmiarowych na załączanie i na wyłączanie diody PIN?
8. W oparciu o tabele 4 i 1 stwierdzić, jak ma się energia wydzielana podczas załączania W_{on} do energii wydzielanej podczas wyłączania W_{off} każdej z diod (wyrazić wyniki procentowo). Czy pod względem strat mocy stan załączania ma większe znaczenie dla diod szybszych czy wolniejszych?
9. W oparciu o tabelę 4 przeanalizować związki między parametrami stanu załączania:
 - a) jak ma się szczytowe napięcie podczas załączania $U_{\text{fr(pk)}}$ do wartości ustalonej w stanie załączenia U_{F} dla każdej z diod?
 - b) czy występuje korelacja między szybkością załączania diody (czas t_{fr}) a napięciem szczytowym $U_{\text{fr(pk)}}$?
 - c) wykreślić energię wydzielaną w czasie załączania W_{on} w funkcji napięcia szczytowego $U_{\text{fr(pk)}}$ i scharakteryzować uzyskaną zależność;
 - d) dla każdej z diod obliczyć energię wydzielaną podczas załączania W_{on} ze wzoru (10);
 - e) wyniki z ppkt. d) porównać z otrzymanymi doświadczalnie bezpośrednio; czy na podstawie wzoru (10) można stwierdzić, jaka będzie różnica w mocy strat dynamicznych w porównywanych przyrządach – pod względem jakościowym (kierunku zmiany) i pod względem ilościowym (krotności zmiany)? czy wyniki z ppkt. c) potwierdzają słuszność tego wzoru?

Parametry technologiczne i katalogowe

10. Dokonać wstecznej prognozy i analizy technologicznych parametrów zbadanych 3 diod:
 - a) opierając się na wiadomościach o stanach dynamicznych w przyrządach bipolarnych [2], co można powiedzieć o czasie życia nośników τ w bazie każdej z diod biorąc pod uwagę wartości t_{tr} i Q_{tr} ?
 - b) biorąc pod uwagę, że:
 - na początku procesu załączania w bazie diody brak jeszcze nośników nadmiarowych, a więc zachowuje się ona jak przyrząd unipolarny,
 - spadek napięcia w początkowej fazie załączania osiąga wartość $U_{fr(pk)}$ (tabela 4),
 - prosta zależność na spadek napięcia na warstwie unipolarnej jest dobrze znana [1][2],
 które diody – ultraszybkie czy standardowe – są diodami o dużej szerokości bazy W (a więc bez przebiccia skrośnego – NPT)?
 - c) jaki jest wpływ szerokości bazy W na spadek napięcia na tej warstwie w przyrządzie bipolarnym w stanie przewodzenia [1]? na podstawie tego samego wzoru, za pomocą jakiego innego parametru technologicznego można skompensować ten wpływ [1]?
 - d) czy wnioski z ppkt. a)–c) są spójne ze sobą?
 - e) jakie zyski z wykonania diody o krótkiej bazie [1] uzyskano w przypadku badanych diod?
 - f) jaki jest wpływ czasu życia nośników τ na różnicę napięć $U_{fr,pk} - U_F$?
 - g) czy zwiększenie czasu życia nośników jest ogólnie (biorąc pod uwagę oba stany dynamiczne) korzystne czy niekorzystne dla czasowych i energetycznych parametrów dynamicznych diody?
11. Na podstawie rynkowych cen zbadanych diod (u tego samego dostawcy):
 - a) przeanalizować koszt wytworzenia każdej z nich (zakładając jednakową marżę);
 - b) powiązać obserwacje z ppkt. a) z wiadomościami o technologiach wykonywania diod o dużej i małej szerokości bazy (NPT i PT) [1];
 - c) co można powiedzieć o kosztach poprawy dynamicznych parametrów diod PIN?
12. Porównać wyniki pomiaru parametrów t_{tr} , Q_{tr} , t_{fr} , U_F z wartościami podanymi w kartach katalogowych badanych przyrządów. Zwrócić uwagę na warunki pomiaru; w razie potrzeby skorzystać z wniosków z pkt. 5. Które z parametrów i dla których diod nie zostały podane, a więc zostały uznane przez producenta za mało istotne w typowych zastosowaniach danego przyrządu?

5. Literatura

- [1] Starzak Ł.: *Laboratorium przyrządów i układów mocy. Ćwiczenie 1. Diody*. Łódź: Politechnika Łódzka, 2011.
- [2] Starzak Ł.: *Laboratorium przyrządów i układów mocy. Instrukcja 0. Wprowadzenie do elektroniki mocy*. Łódź: Politechnika Łódzka, 2011.