

## Ćwiczenie 5P. Rozmywanie widma zaburzeń. Wpływ dynamiki diod na parametry przekształtników.

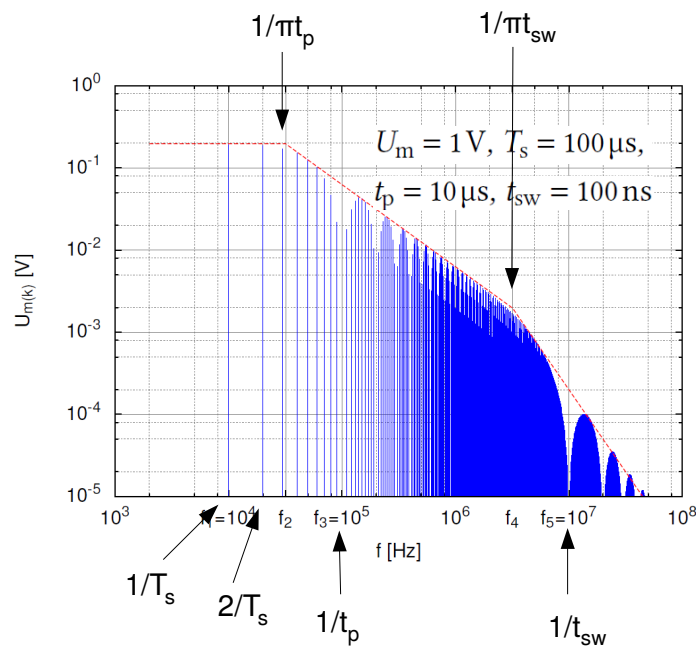
opracowanie: Łukasz Starzak

Katedra Mikroelektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Łódzkiej, 2013, wer. 1.1

### A. Wprowadzenie

#### **Redukcja zaburzeń elektromagnetycznych przez rozmywanie widma**

W przekształtniku o działaniu przełączającym potencjały dużej części węzłów obwodu mają przebieg impulsowy. Jego widmo (rys. 1) zawiera prążek w częstotliwości podstawowej  $f_s = 1/T_s$  oraz szereg prążków dla całkowitych wielokrotności tej częstotliwości (harmonicznych)  $n \cdot f_s$ , o amplitudzie malejącej ze wzrostem częstotliwości. Rozwijając taki przebieg w szereg Fouriera można wykazać, że amplituda obwiedni tych prążków posiada miejsca zerowe w częstotliwościach  $n \cdot 1/t_p$ , a także  $n \cdot 1/t_{sw}$ , gdzie  $t_p$  jest czasem trwania impulsu, zaś  $t_{sw}$  – czasem przełączania (przejścia między stanem wysokim a niskim i odwrotnie). Z kolei maksima tej obwiedni posiadają obwiednię nadrzędną; jest to linia początkowo pozioma, a następnie załamująca się do  $-20$  dB/dec w częstotliwości  $1/(\pi t_p)$  oraz do  $-40$  dB/dec w  $1/(\pi t_{sw})$ .

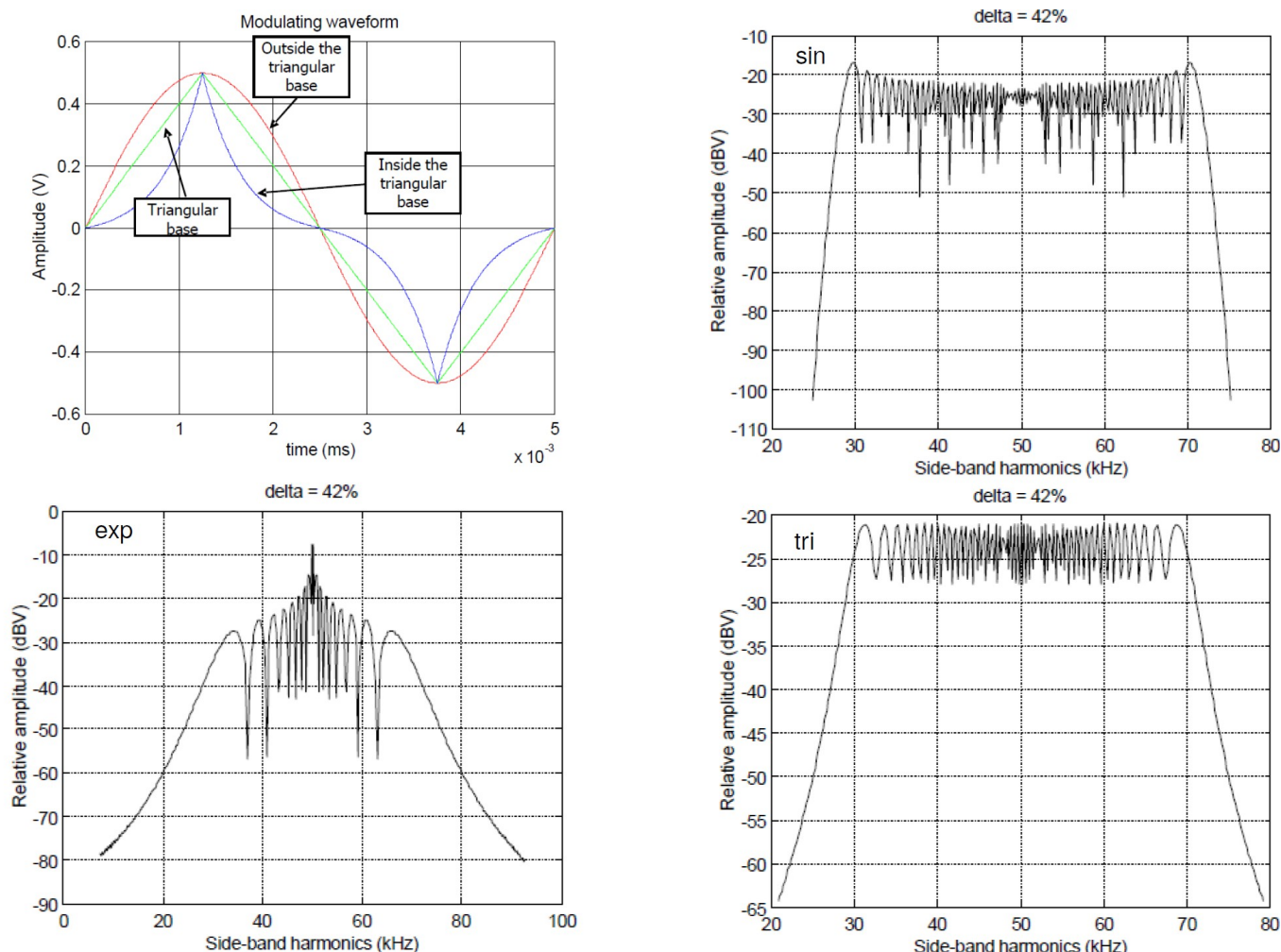


Rys. 1. Widmo częstotliwościowe przebiegu impulsowego.

Każda ze składowych widma może działać zakłócająco na układ i jego otoczenie. Siłę tego oddziaływania rozpatruje się zwykle przez pryzmat mocy czynnej niesionej przez daną składową. Jest więc to analiza uśredniona w czasie. Podejście to leży także u podstaw norm kompatybilności elektromagnetycznej i powiązanej z nimi zasady działania analizatorów widma, która obejmuje obserwację uśrednioną za określony, długi przedział czasu (zwykle 1 s).

Gdyby więc częstotliwość przebiegu impulsowego stała się zmienna w czasie, to zamiast każdego prążka widma analizator zarejestrowałby niezerowe amplitudy w całym przedziale (paśmie) częstotliwości, w granicach którego częstotliwość ta by się zmieniała. Określamy to mianem rozmycia

widma. Można wykazać, że amplituda widma w tym paśmie będzie mniejsza niż poprzednio rejestrowana amplituda pojedynczego prążka. To zaś może pozwolić na zmieszczenie się widma zaburzeń w granicach określonych w normach kompatybilności elektromagnetycznej, a przynajmniej stanowić jeden ze sposobów na zbliżenie się do tych granic. Również zakłócający potencjał przebiegu o zmiennej częstotliwości – o ile rozpatrujemy go w sposób uśredniony, co dla wielu układów jest słuszne – będzie mniejszy.



Rys. 2. Widmo pojedynczej składowej harmonicznej po zmodulowaniu jej częstotliwości, dla trzech różnych kształtów funkcji modulującej.

Jedną z najprostszych metod realizacji zmiennej częstotliwości przełączania jest jej modulacja określoną funkcją (FM – Frequency Modulation lub ściślej PFM – Pulse Frequency Modulation). Aby zapewnić sensowne działanie przekształtnika – jednocześnie zastosowana musi być modulacja szerokości impulsu (PWM – Pulse Width Modulation). Te dwie modulacje są jednak niezależne od siebie, dlatego możliwe jest przeanalizowanie samej tylko modulacji PFM, co najwyżej dla kilku wybranych wartości współczynnika wypełnienia  $D$  (czyli czasu  $t_p$ ), które wynikłyby z jednoczesnego działania modulatora PWM.

Wybór funkcji modulującej ma wpływ na obwiednię widma rozmytego (rys. 2). Natomiast na szerokość pasma rozmytego  $B$  mają wpływ parametry modulacji:

- $f_c$  – częstotliwość nośna, tj. częstotliwość przebiegu niezmodulowanego (impulsowego), a więc środkowa częstotliwość przełączania, wokół której odbywają się zmiany częstotliwości w czasie;
- $f_m$  – częstotliwość funkcji modulującej, a więc częstotliwość, z jaką odbywają się zmiany

częstotliwości przebiegu impulsowego;

- $\Delta f_c$  – szerokość pasma modulacji, tj. pasma, w którym zawiera się (wewnątrz którego zmienia się) częstotliwość przebiegu w wyniku modulacji jego częstotliwości;
- $m_f$  – wskaźnik modulacji, definiowany jako

$$m_f = \frac{\Delta \omega_c}{\omega_m} = \frac{\Delta f_c}{f_m} \quad (1)$$

- $\delta$  – współczynnik modulacji, definiowany jako

$$\delta = \frac{\Delta f_c}{f_c} \quad (2)$$

Używając powyższych parametrów, szerokość pasma dla składowej podstawowej można wyrazić wzorem:

$$B = 2 \cdot f_m \cdot (1 + m_f) = 2 \cdot (\Delta f_c + f_m) \quad (3)$$

zaś ogólnie dla harmonicznej o numerze  $h$ :

$$B_h = B + 2 \cdot \Delta f_c \cdot (h - 1) \quad (4)$$

$$B_h = B + 2 \cdot f_m \cdot m_f \cdot (h - 1)$$

Oznacza to, że szerokość pasma rośnie dla kolejnych prążków widma pierwotnego. Od pewnego rzędu harmonicznej zaczną się więc one nakładać, co prowadzi do anulowania pozytywnego efektu zmniejszenia amplitudy widma. Można obliczyć, że rząd harmonicznej, przy której to nastąpi, wyraża się wzorem:

$$h_{overlap} = \frac{1}{\delta} \cdot \left( \frac{1}{2} - \frac{f_m}{f_c} \right) - \frac{1}{2} \quad (5)$$

### **Moc strat dynamicznych w diodzie i jej wpływ na sprawność układu**

W większości aplikacji (choć nie wszystkich) można przyjąć, że w stratach dynamicznych dominuje energia wydzielana w stanie wyłączenia. W przybliżeniu energia ta jest wprost proporcjonalna do ładunku, jaki odpływa z diody podczas jej wyłączenia. W przypadku diod bipolarnych – PIN jest to praktycznie ładunek związany z nośnikami nadmiarowymi obecnymi w bazie diody w stanie przewodzenia. W przypadku diod unipolarnych – Schottky’ego, w których brak nośników nadmiarowych, jest to ładunek nośników związanych z domieszkami, które należy usunąć z odpowiednio szerokiego obszaru półprzewodnika w celu wytworzenia obszaru ładunku przestrzennego odpowiadającego przyłożonemu napięciu wstecznemu (ta składowa ładunku występuje także w diodach PIN, jednak jest tam stosunkowo nieznaczająca względem dużego ładunku nadmiarowego). Przybliżona zależność energii strat od ładunku, zanedbująca ewentualne przepięcia, ma postać:

$$E_{tr} = 0,5 \cdot Q_{tr} \cdot U_R \quad (6)$$

gdzie  $Q_{tr}$  – ładunek przejściowy przy wyłączeniu,  $U_R$  – napięcie wsteczne po wyłączeniu.

Oczywiście całkowita moc strat w diodzie jest sumą mocy strat dynamicznych i statycznych:

$$P_{tot} = P_{stat} + P_{dyn} = P_{stat} + f_s \cdot E_{tr} \quad (7)$$

Istotne jest spostrzeżenie, że moc strat statycznych nie zależy od częstotliwości, podczas gdy moc strat dynamicznych jest do niej proporcjonalna. Rozpatrując wpływ mocy strat w diodzie na sprawność przekształtnika łatwo zauważyć, że sprawność będzie maleć z częstotliwością, gdyż:

$$\eta = P_o / P_i = P_o / (P_o + P_c) \quad (8)$$

gdzie  $P_c$  jest mocą strat w przekształtniku, w której udział ma moc strat w diodzie.

Zakładając (co jest uprawnione w przypadku badanego układu), że wśród strat mocy zależnych od częstotliwości dominują straty w przyrządach półprzewodnikowych, moc strat w przekształtniku można wyrazić analogicznie do (7):

$$P_c = P_{\text{stat}} + P_{\text{dyn}} = P_{\text{stat}} + f_s \cdot E_{\text{sw}} = P_{\text{stat}} + f_s \cdot (E_{\text{ts}} + E_{\text{rr}}) \quad (9)$$

gdzie  $E_{\text{sw}}$  jest sumaryczną energią wydzielaną podczas przełączania (we wszystkich przyrządach i w obu stanach dynamicznych), zaś  $E_{\text{ts}}$  – energią wydzielaną podczas przełączania tranzystora.

## B. Konfiguracja układu pomiarowego

Do badań posłuży układ przetwornicy podwyższającej napięcie przystosowany do pracy z megahercowymi częstotliwościami przełączania. Wykorzystane zostaną 3 diody podane w tab. 1, z których jedna jest diodą Schottky'ego (a dokładniej – mieszaną) wykonaną z węgla krzemu (SiC).

Tab. 1. Wykorzystywane diody i ich parametry (ładunek  $Q_{rr}$  dotyczy nominalnych, tj. zbliżonych do znamionowych, warunków pracy)

Oznaczenie	Materiał	Rodzaj	$I_{F(av)}$ [A]	$U_{rrm}$ [V]	$Q_{rr(nom)}$ [nC]
C3D06060A	SiC	MPS	6	600	12
MUR860	Si	PIN	8	600	100
BY329-800	Si	PIN	8	800	500

1. Zamontować w niebieskiej listwie diodę C3D06060A (radiator skierowany jak radiator tranzystora; tak samo pozostałe diody).
2. W obwodzie umieścić, poprzez przelutowanie, dodatkowy opornik bramkowy 100  $\Omega$  (na płytce obecny jest już na stałe opornik 10  $\Omega$ ).
3. Jako obciążenie przyłączyć opornik regulowany 25  $\Omega$  początkowo ustawiony na 25  $\Omega$  (sprawdzić omomierzem ze względu na niestandardowe połączenie wewnętrzne). Na wejściu i wyjściu przetwornicy włączyć 2 identyczne multimetry w trybie amperomierza oraz 2 w trybie woltomierza.
4. Zasilanie zrealizować z zasilacza 2-sekcyjnego pracującego w trybie równoległym (PARALLEL). Oba gniazda „+” oraz oba gniazda „-” należy zewrzeć ze sobą krótkimi przewodami. Ograniczenie prądowe w obu sekcjach nastawić na maksimum.
5. Z wyjścia generatora funkcyjnego Output (nie Output TTL) przyłączyć się do przewodów niebieskiego i czerwonego.
6. Na generatorze przy wyłączonym wyjściu (zgaszona kontrolka przycisku On):
  - funkcja: Pulse
  - Run Mode: Continuous
  - Low 0 V
  - High 5 V
  - częstotliwość: 330 kHz (częstotliwość centralna  $f_c$ )
  - Duty: 50%
  - Output Menu  $\rightarrow$  tryb wyjścia: High-Z
7. Oscyloskop: CH1 – napięcie dren-źródło tranzystora (drucik do źródła, odpowiednia końcówka dławika) (nie przyłączać do samego tranzystora z powodu nagrzewania się nóżek).
8. Na sekcji Master zasilacza ustawić napięcie 12 V; prąd wyjściowy powinien wynieść ok. 0,5 A.

9. Uaktywnić wyjście generatora (On). Sprawdzić poprawność przebiegu napięcia  $u_{DS}$ .

10. Opornik obciążający ustawić tak, by prąd wyjściowy  $I_o = 1$  A (obecnie i w kolejnych punktach nie musi to być dokładna wartość).

Dezaktywować wyjście generatora ze względu na dużą moc wydzielaną w tranzystorze przy zamontowanym oporniku bramkowym.

12. Na oscyloskopie z menu Math wybrać Spectral Setup. Zdefiniować Math1 jako amplitudę widma CH1 (SpectralMag). Ustawić:

- Rec Length: 500 000;
- Samp Rate: 500 Ms;
- Duration: 1 ms;
- Resolution: 2 ns;
- Window Type: Rectangular;
- Gate Pos: 0 (może się nadpisać małą wartością ujemną);
- Gate Dur: 1 ms.

Kliknąć Apply. Następnie ustawić:

- Center Freq: 50 MHz;
- Freq Span: 100 MHz.

Uwaga: Przy bieżących ustawieniach obraz będzie odświeżany z niską częstotliwością i z opóźnieniem 1–3 okresów odświeżania; należy to wziąć pod uwagę rejestrując przebiegi po dokonaniu zmian w układzie.

13.

Uaktywnić wyjście generatora i sprawdzić, czy obraz na ekranie przypomina widmo przebiegu prostokątnego.

Kliknąć przycisk Controls w celu umieszczenia kontrolek z prawej strony ekranu.

## C. Pomiary

1.

Na oscyloskopie zapisać obraz widma.

Zanotować wskazania 4 mierników.

Uwaga: Wskazania należy zawsze notować po ustaleniu się wskazań prądów, co może potrwać kilkadziesiąt sekund ze względu na nagrzewanie się elementów stosunkowo dużą mocą strat w badanych warunkach pracy.

2.

Dezaktywować wyjście generatora. Wyłączyć zasilacz.

Poprzez przelutowanie wyłączyć z obwodu dodatkowy opornik bramkowy  $100\ \Omega$  (wykonać zwarcie do bramki tranzystora przez jego dolną nóżkę, zaś górną pozostawić w położeniu uniemożliwiającym przypadkowe zwarcie).

3.

Włączyć zasilacz. Uaktywnić wyjście generatora.

Na oscyloskopie zapisać obraz widma.

Zanotować wskazania 4 mierników.

4.

a) Zapisać obraz widma również dla  $D = 10\%$  i  $5\%$  (zmiana parametru Duty na generatorze).

b) Przywrócić  $D = 50\%$ .

5.

Zmodyfikować ustawienia analizy widmowej (kontrolki po lewej lub – jeżeli znikły – z menu górnego Math wybrać Spectral Setup):

- Samp Rate: 50 Ms;
- Rec Length: 500 000;
- Duration: 10 ms;
- Resolution: 20 ns;
- Window Type: Rectangular;
- Gate Pos: 0 (może się nadpisać małą wartością ujemną);
- Gate Dur: 10 ms;
- Center Freq: 6 MHz;
- Freq Span: 12 MHz (o ile nie wypełni się samo).

6.

Zapisać obraz widma. Kursorem (jeżeli są wyłączone: menu Cursors, zaznaczyć Cursors On) wyznaczyć częstotliwości  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  trzech pierwszych prążków.

7.

Wyłączyć wyjście generatora.

Przełączyć na funkcję Square, tryb na Modulation.

Wybrać:

- Type: FM (modulacja częstotliwości);
- Source: Internal;
- kształt sinusoidalny – Shape: Sine.

Ustawić parametry modulacji (FM Freq, Deviation) takie, by:  $m_f = 10$ ,  $f_m = 1,8$  kHz.

Włączyć wyjście generatora.

Zapisać widmo dla:

- bieżących ustawień (sinusoidalna funkcja modulująca);
- trójkątnego przebiegu modulującego – Shape: Triangle;
- wykładniczego przebiegu modulującego – Shape: Exp (ten przebieg znajduje się na pamięci USB dostępnej na stanowisku).

8.

Wybrać trójkątny przebieg modulujący.

Dla przypadków:

- bieżącego ( $m_f = 10$ ,  $f_m = 1,8$  kHz)
- $m_f = 30$ ,  $f_m = 1,8$  kHz
- $m_f = 10$ ,  $f_m = 5,4$  kHz

wykonać:

- zapisać widmo;
- kursorami wyznaczyć szerokości pasma  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  pierwszych 3 prążków po ich rozmyciu; zapisać numer prążka  $h_{\text{overlap}}$ , dla którego zaczyna się nakładanie pasm od sąsiednich prążków.

9.

Przełączyć tryb generatora na Continuous.

Na oscyloskopie wyłączyć funkcję Math1.

Opornik ustawić tak, by prąd wyjściowy  $I_o = 1$  A (obecnie i w kolejnych punktach musi to być w miarę dokładna wartość,  $\pm 0,05$  A).

10.

Dla kilkunastu różnych częstotliwości z zakresu od 100 kHz do 2 MHz, zanotować wskazania 4 mierników, przy czym:

należy między innymi wykonać pomiar dla 330 kHz, a dla tego przypadku oraz dla 2 MHz zmierzyć również temperaturę obudowy diody (metalowego radiatora wbudowanego). W każdym przypadku należy zaczekać na ustabilizowanie się wartości prądu, a w razie potrzeby zmienić nastawę opornika tak, by utrzymać  $I_o = 1$  A.

11.

Uwaga: Przed wymianą diody dezaktywować wyjście generatora i wyłączyć zasilacz. Utrzymywać obciążenie (prąd wyjściowy) 1 A.

Pomiary wskazań mierników i temperatury powtórzyć tylko dla 330 kHz dla diod:

- MUR860
- BY329-800





## D. Opracowanie wyników

1. Na podstawie wyników pomiarów widma w paśmie 100 MHz (pkt 3 i 4) i w paśmie 12 MHz (pkt 6), opisać postać widma częstotliwościowego przebiegu potencjału  $v_{sw}$  przełączanego węzła obwodu przetwornicy (napięcia  $u_{DS}$  tranzystora), wskazując związki z przebiegiem sterującym tranzystorem zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi (nie wszystkie właściwości widma będą widoczne na każdym oscylogramie).
2. Na podstawie wyników pomiarów widma w paśmie 5 MHz dla modulacji funkcją trójkątną (pkt 8) i bez modulacji (pkt 6):
  - a) opisać skutki modulacji częstotliwości przełączania dla widma  $v_{sw}$  w dziedzinie częstotliwości;
  - b) porównać wyznaczone szerokości pasm  $B_h$  z obliczonymi ze wzoru teoretycznego;
  - c) dla każdego przypadku obliczyć szerokość pasma modulacji  $\Delta f_c$  i współczynnik modulacji  $\delta$ ;
  - d) stwierdzić, od których parametrów modulacji zależy szerokość pasm;
  - e) z oscylogramów odczytać rząd harmonicznej  $h_{overlap}$ , od którego zaczyna się nakładanie pasm i porównać z przewidywaniami teoretycznymi;
  - f) przeanalizować skutki modulacji w dziedzinie amplitudy, w tym w zależności od parametrów modulacji;
  - g) stwierdzić, czy modulacja częstotliwości przebiegu impulsowego jest skuteczną metodą poprawy kompatybilności elektromagnetycznej przekształtników impulsowych z punktu widzenia norm.
3. Na podstawie wyników pomiarów widma w paśmie 5 MHz dla modulacji różnymi funkcjami (pkt 7), scharakteryzować różnice między widmami uzyskiwanymi dla poszczególnych funkcji modulujących. Ocenić, która z funkcji jest najkorzystniejsza z punktu widzenia minimalizacji amplitud składowych widma zaburzeń.
4. Dla każdego z przypadków, w których notowane były wskazania mierników, obliczyć moc wejściową  $P_i$  i wyjściową  $P_o$  przetwornicy, a na tej podstawie całkowitą moc strat  $P_c$  i sprawność  $\eta$ .
5. Na podstawie wyników pomiarów widma oraz parametrów energetycznych (obliczenia z pkt. D4), scharakteryzować skutki wydłużenia czasu przełączania  $t_{sw}$  (poprzez zmianę rezystancji bramkowej  $R_G$  – pkt 1 w porównaniu do pkt. 3).
6. Przeanalizować wpływ zastosowanej diody na parametry energetyczne układu:
  - a) na podstawie wyników pomiarów parametrów energetycznych dla diody C3D06060A dla różnych częstotliwości przełączania (pkt 10, obliczenia z pkt. D4), wykreślić sprawność przetwornicy w funkcji częstotliwości przełączania;
  - b) powiązać przebieg zależności w funkcji częstotliwości z zależnościami teoretycznymi;
  - c) uzasadnić obserwowane w wynikach z pkt. D4 różnice w sprawności układu z użyciem różnych diod, opierając się na parametrach podanych w tab. 1;
  - d) biorąc pod uwagę powyższe wyniki, oraz że węglík krzemu (w odróżnieniu od krzemu) umożliwia produkcję wysokonapięciowych diod Schottky'ego, wykazać, że wykorzystanie tego materiału jest jedną z istotnych innowacji na drodze do układów mocy o megahercowych częstotliwościach przełączania.