

Oscyloskopowe pomiary mocy strat w przetwornicach impulsowych

W układach zasilających powszechnie są stosowane przetwornice impulsowe. Ich podstawową zaletą jest większa w porównaniu ze stabilizatorami liniowymi sprawność, a wysokie częstotliwości pracy pozwalają dodatkowo znacznie zmniejszyć wymiary urządzenia. Ze względu na zasadę działania zasilacza impulsowego pomiar występujących w nim strat jest znacznie trudniejszy niż w stabilizatorze liniowym. W artykule przedstawiono metodę pomiaru tego parametru przy zastosowaniu oscyloskopów Tektroniksa.

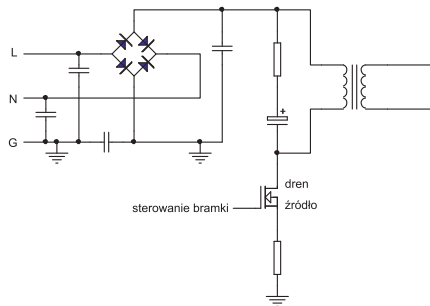
Zasada działania przetwornic impulsowych, bez względu na konfigurację układową, jest oparta na kluczowaniu prądu. Jako element wykonawczy zwykle wykorzystywany jest tranzystor MOSFET lub IGBT (rysunek 1). W stanie włączenia rezystancja dren-źródło powinna być jak najmniejsza, gdyż wydzielająca się na niej moc jest tracona bezużytecznie. Należy zauważyć, że moc ta jest proporcjonalna do kwadratu prądu płynącego przez tranzystor, rośnie więc dość szybko wraz ze wzrostem obciążenia przetwornicy. Musimy pamiętać, że w praktyce mamy do czynienia z elementami znacznie odbiegającymi od idealnych. Mimo, że czasy włączenia i wyłączenia tranzystora są wielokrotnie dłuższe od czasów jego przełączania, to nie można pomijać zjawisk występujących w fazie przełączania. Są one na tyle istotne, że mogą znacząco zwiększać całkowitą moc strat.

Konstruktor optymalizujący zaprojektowaną przez siebie przetwornicę powinien umieć odpowiedzieć na pytanie co jest źródłem

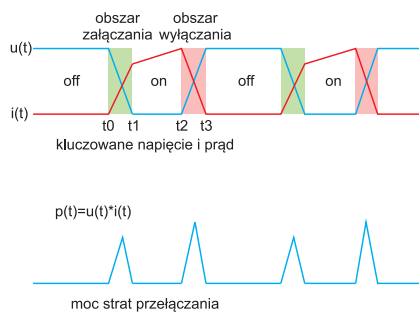
strat występujących w przetwornicy. Nie da się jednak odpowiedzieć na to pytanie dokonując jedynie pomiaru całkowitej mocy strat. Konieczny jest również pomiar strat przełączania. Pomiar taki nie jest jednak łatwy, mamy bowiem do czynienia z bardzo dynamicznymi zjawiskami zachodzącymi w krótkich przedziałach czasu.

Przyczyny strat przełączania

Moc jest zdefiniowana jako iloczyn napięcia i prądu. Do obliczenia mocy wydzielanej na tranzystorze kluczującym w fazie przełączania konieczny jest więc pomiar prądu drenu oraz napięcia dren-źródło. W układzie rzeczywistym zarówno napięcie, jak i prąd będą zmieniać się po wysterowaniu tranzystora w pewnym niezerowym czasie (rysunek 2). Będzie tak w każdym cyklu pracy przetwornicy, przy czym na ogół moc tracona podczas wyłączenia tranzystora (przejście ze stanu „on” do stanu „off”) jest znacząco większa od mocy



Rysunek 1. Typowy schemat przetwornicy impulsowej z tranzystorem MOSFET



Rysunek 2. Straty w tranzystorze przełączającym przetwornicy impulsowej

traconej podczas jego włączania (przejście ze stanu „off” do stanu „on”). Dzieje się tak na skutek występowania pasożytniczych pojemności i rezystancji w układzie rzeczywistym. Schematycznie przedstawiono je na **rysunku 3**. Pojemności niekorzystnie wydłużają czasy przełączania, gdyż w fazie tej konieczne jest przepompowanie zgromadzonego w nich ładunku. Rezystancje natomiast powodują niepożądane wydzielanie się na nich mocy podczas przepływu prądu.

Modelowanie strat mocy przełączania

Można przyjąć, że stany włączenia i wyłączenia tranzystora są stanami statycznymi. Moc rozpraszana jest więc zależna od rezystancji włączonego tranzystora oraz od płynącego przez niego prądu.

Dla tranzystora MOSFET opisuje ją zależność:

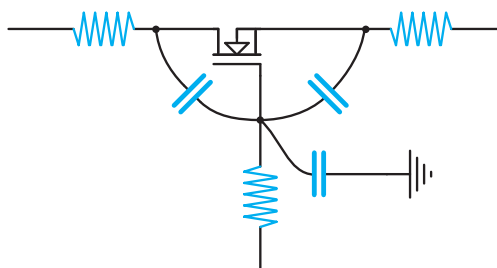
$$P_s = I_D^2 * R_{DSon} = I_D * U_{DS} \quad (1)$$

gdzie: I_D – prąd drenu,
 R_{DSon} – rezystancja dynamiczna występująca między drenem a źródłem, w praktyce jest ona zwykle mniejsza niż 1 Ω ,
 U_{DS} – napięcie nasycenia włączonego tranzystora występujące między drenem i źródłem, w praktyce jest ono zwykle mniejsza niż 1 V.

Dla tranzystorów IGBT i BJT moc strat jest opisywana zależnością:

$$P_s = I_C * U_{CEsat} \quad (2)$$

gdzie: I_C – prąd kolektora,
 U_{CEsat} – napięcie nasycenia włączonego tranzystora występujące między kolektorem i emiterem, w praktyce jest ono zwykle mniejsza niż 1 V.

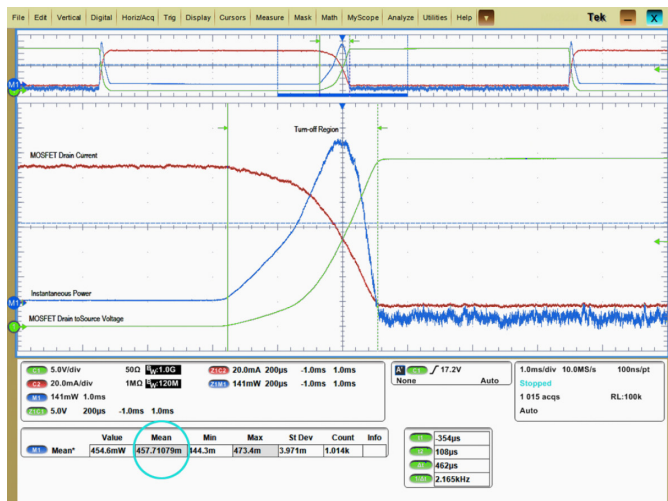


Rysunek 3. Elementy pasożytnicze tranzystora kluczującego

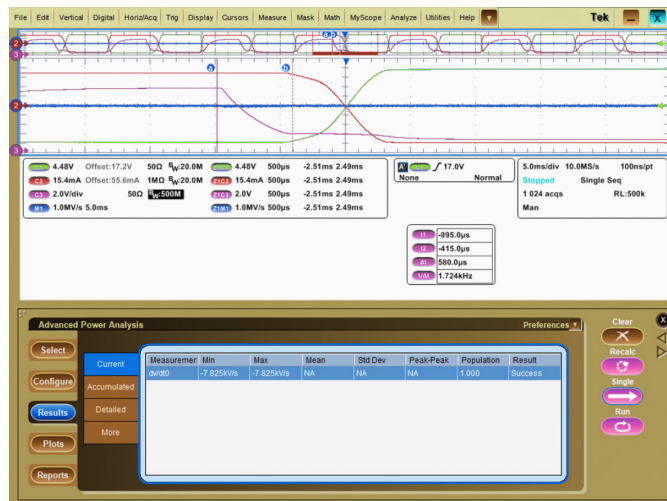
Oscyloskopowy pomiar mocy strat przełączania

Posiadacze oscyloskopów Tektronix mogą korzystać z zaimplementowanych w oprogramowaniu firmowym funkcji pomiaru strat mocy przełączania. Dostępne są dwa tryby pomiaru. W pierwszym użytkownik ustawia ręcznie wszystkie parametry pomiaru, w drugim są one dobierane automatycznie. Pomiar automatyczny jest bardzo wygodny, ponieważ pozwala na szybki i na ogół optymalny dobór parametrów gwarantujący uzyskanie powtarzalnych wyników. W każdym przypadku należy zadbać o spełnienie sześciu podstawowych warunków decydujących o dokładności i powtarzalności pomiarów. Są to:

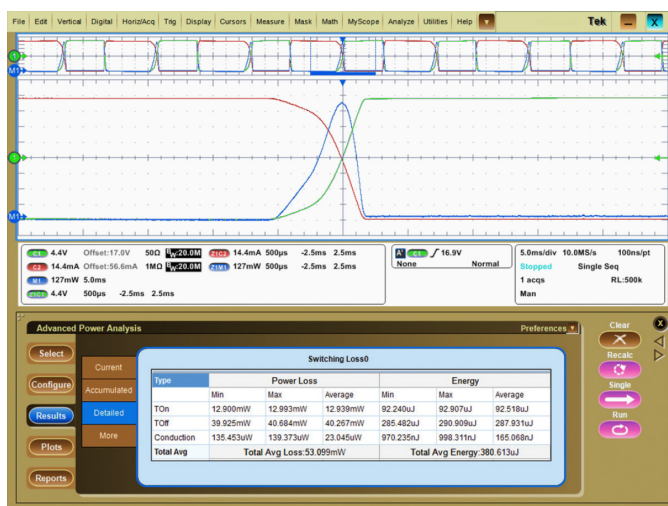
1. **Minimalizacja offsetu napięciowego.** Pamiętajmy, że do obliczenia mocy konieczny jest pomiar natężenia prądu. Wykorzystywane są do tego różnicowe sondy prądowe przetwarzające natężenie prądu na napięcie, które jest następnie mierzone poprzez standardowe (napięciowe) wejście oscyloskopu. W sondach takich występuje zwykle pewien offset napięciowy, który jest jednak minimalizowany za pomocą potencjometru dostępnego dla użytkownika. Przed pomiarem należy więc zewrzeć końcówki sondy lub w przypadku sondy cęgowej zapewnić, aby nie mierzyla żadnego prądu, a następnie pokręć potencjometru offsetu ustawić w pozycji odpowiadającej zerowemu napięciu wyjściowemu.
2. **Minimalizacja offsetu prądowego.** W sondach prądowych może występować efekt szcążkowego, lecz trwałego magnesowania końcówek. Będzie on również powodował powstawanie wstępnego offsetu napięcia wyjściowego. Kompensację tego parametru przeprowadza się przy zwartych cęgach sondy i zapewnieniu zerowego przepływu prądu, podobnie jak to opisano w punkcie 1.
3. **Kalibracja czasowa torów pomiarowych oscyloskopu.** Czynność ta jest istotna ze względu na fakt, że moc jest obliczana na podstawie pomiarów uzyskiwanych w dwóch kanałach oscyloskopu. Pamiętając, że czasy przełączania tranzystorów są bardzo krótkie, nawet niewielkie różnice opóźnień wnoszonych przez każdy z kanałów pomiarowych oscyloskopu mogą skutkować znacznym błędem pomiaru mocy. Regulacja opóźnień jest dostępna w menu parametrów każdego kanału. Do kalibracji należy wykorzystywać przebieg prostokątny o wysokim Slew Rate (dużej szybkości narastania i opadania napięcia). Należy dążyć do uzyskania jednakowych opóźnień w używanych kanałach pomiarowych.
4. **Optymalizacja stosunku sygnału do szumu.** Podczas pomiarów strat mocy należy zadbać o takie ustawienie tłumienia kanałów pomiarowych, aby uzyskać możliwie najczystsze przebiegi na ekranie, oczywiście bez ucinania wykresów. Często popełnianym błędem jest dzielenie ekranu na pół i wyświetlanie napięcia np. w górnej części ekranu i prądu w dolnej części. Powoduje to jednak zmniejszenie dynamiki pomiaru, a zatem zwiększenie błędu obliczenia mocy.
5. **Zadbanie o jakość sygnału.** W pomiarach korzystne może być włączenie ograniczenia pasma pomiarowego minimalizujące niekorzystny wpływ szumów na wynik pomiaru. Należy jednak zwracać uwagę na to, by ogranicznik nie ucinął pasma roboczego. Środkiem minimalizującym nieskorelowany szum i zakłócenia przypadkowe jest także pomiar z uśrednianiem. W opisywanych pomiarach korzystne może być ponadto włączenie trybu akwizycji HiRes zwiększające rozdzielczość pionową. Efekt działania tego trybu jest widoczny nawet dla pojedynczych akwizycji.
6. **Dokładność i bezpieczeństwo.** Dla osiągnięcia maksymalnej dokładności należy prowadzić pomiary w nominalnym zakresie pracy urządzenia, z zachowaniem bezpiecznego marginesu w odniesieniu do wielkości maksymalnych. Przed przystąpieniem do pomiarów nie należy zapominać o zapoznaniu się z instrukcją obsługi przyrządu i postępować zgodnie z nią. Ten wymóg jest niestety bardzo często ignorowany przez użytkowników.



Rysunek 4. Bramkowany automatyczny pomiar mocy strat w fazie wyłączenia tranzystora kluczującego



Rysunek 6. Automatyczny pomiar parametru Slew Rate bramki tranzystora MOSFET



Rysunek 5. Pomiar mocy strat z automatycznym doborem parametrów

Pomiary strat przełączania – metoda z ręcznym ustawianiem parametrów

Jedną z metod pomiaru strat przełączania jest oparta na tzw. bramkowaniu pomiarów. Opiszemy ją na przykładzie pomiaru mocy strat w fazie wyłączenia tranzystora MOSFET. Napięcie U_{DS} jest mierzone sondą różnicową. Na oscylogramach przedstawionych na **rysunku 4** napięcie to zaznaczono kolorem zielonym. Prąd drenu zaznaczony na oscylogramie kolorem czerwonym jest mierzony sondą prądową AC/DC. Czułości obu kanałów dobrano tak, aby oscylogramy zajmowały więcej niż połowę wysokości ekranu, ale jednocześnie, aby nie były ucinane. Ważne jest uzyskanie stabilnego oscylogramu na ekranie oscyloskopu. Stało się to możliwe po zastosowaniu wyzwalania zbroczem przebiegu napięciowego, przy ustawieniu progu wyzwalania na poziomie odpowiadającym 50% zakresu zmian. Kolejnym ważnym parametrem jest odpowiednie ustawienie rozdzielczości czasowej. W tym przypadku szybkość próbkowania jest równa 10 MS/s, co zapewniło uzyskanie kilku próbek dla każdego zbocza przebiegu napięciowego i prądowego w fazie przełączania. W pomiarze skorzystano także z trybu HiRes. Uzyskano dzięki temu ograniczenie pasma roboczego do 4,4 megaherców i zwiększenie rozdzielczości pionowej do 12 bitów. Moc jest obliczana funkcją matematyczną jako iloczyn prądu i napięcia. Wartości chwilowe tego parametru przedstawiono na oscylogramie kolorem niebieskim. W pomiarze chodzi jednak o moc wydzielaną tylko w fazie przełączania.

Dla przebiegu mocy zastosowano pomiar automatyczny wartości średniej. Zakres, dla którego jest obliczana wartość średnia wyznaczono poprzez odpowiednie ustawienie kursorów (bramkowanie). Kolejnym zabiegiem jest włączenie uśredniania. Nie można jednak mylić uśredniania z obliczaniem wartości średniej za okres. Uśrednianie ma na celu obliczenie pewnego hipotetycznego przebiegu, który jest tworzony przez uśrednienie odpowiadających sobie punktów pochodzących z wielu akwizycji. Zabieg ten zwiększa rozdzielczość pomiaru i poprawia jego powtarzalność, a także znacznie redukuje wpływ szumu losowego. Liczbowe wyniki pomiaru są wyświetlane w tabeli widocznej w lewym dolnym rogu ekranu.

W opisywanym pomiarze parametry były ustawiane ręcznie przez użytkownika. Można z dużym prawdopodobieństwem przypuszczać, że ten sam użytkownik, w innej chwili ustawiłby inaczej kursory, co oczywiście spowodowałoby uzyskanie nieco odmiennych wyników. Taka sytuacja będzie tym bardziej możliwa, jeśli pomiary przeprowadzi inna osoba. Można temu zapobiec przez korzystanie z automatycznego dobierania parametrów.

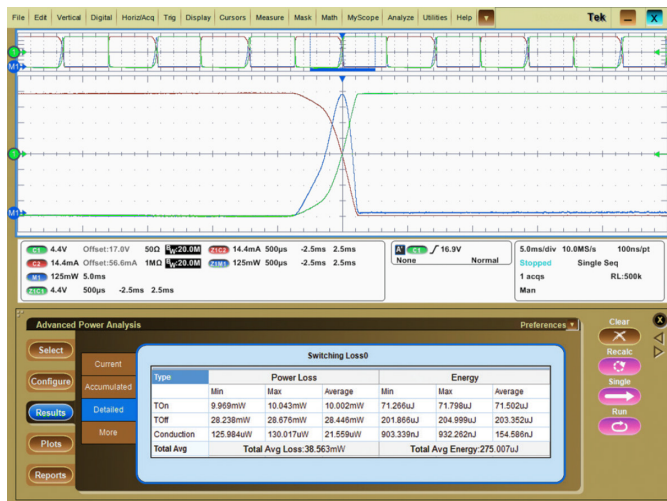
Pomiary strat przełączania – automatyczny dobór parametrów

Jedną z metod eliminacji błędów wynikających z niedokładności nastaw są pomiary z automatycznym doborem parametrów. Wykorzystywane jest do tego specjalne oprogramowanie DPOWPR Advanced Power Analysis dostarczane przez producenta. Cały pomiar mocy strat przebiega automatycznie. Po naciśnięciu jednego przycisku wszystkie parametry oscyloskopu są dobierane automatycznie, po czym oscyloskop przechodzi do pomiaru zasadniczego. Wyniki są zbierane w tabelce wyświetlanej w dolnej części ekranu (**rysunek 5**).

Slew Rate a moc strat

Zgodnie z oczekiwaniami dominującym czynnikiem łącznej mocy strat jest faza wyłączenia tranzystora. Potwierdzają to pomiary przedstawione na **rysunku 5**. Można sądzić, że decyduje o tym układ sterowania tranzystora przełączającego. Jeśli czas przejścia sygnału sterującego powodujący wyłączenie tranzystora jest zbyt długi (lub zbyt mała jest szybkość zmian tego napięcia), tranzystor pozostaje dłużej w stanie pośrednim pomiędzy wyłączeniem a włączeniem. Powoduje to nieuchronny wzrost mocy strat.

Pomiar szybkości narastania lub opadania sygnału (ogólnie *Slew Rate*) polega na określeniu czasu odpowiadającego przejściu tego napięcia pomiędzy poziomami odpowiadającymi 10% i 90% całego zakresu zmian. Parametr ten jest wyrażany w voltach



Rysunek 7. Pomiar parametru Slew Rate bramki tranzystora MOSFET po optymalizacji układu sterowania

na sekundę. W celu eliminacji wpływu szumów i przypadkowych zakłóceń w pomiarach parametru Slew Rate zalecane jest włączanie uśredniania.

Parametr Slew Rate może być mierzony ręcznie przy użyciu kursorów. Użytkownik umieszcza je w punktach oscylogramu odpowiadających 10 i 90 procentom zakresu zmian. Punkty te muszą być wyznaczone ręcznie. Następnie należy obliczyć Slew Rate jako stosunek $(U_{90\%} - U_{10\%}) / (t_{90\%} - t_{10\%})$. W oscyloskopach często jest implementowana odpowiednia funkcja umożliwiająca automatyczne wykonanie pomiaru. Wszystkie opisane czynności (określenie poziomów 10% i 90%, obliczenie czasu i obliczenie współczynnika Slew Rate)

są w tym przypadku wykonywane bez udziału użytkownika. Kursor mogą być jednak przydatne w przypadku pomiarów złożonego sygnału, dla którego konieczne jest wskazanie mierzonego zbrocza. Przykład bramkowanego kursorami pomiaru parametru Slew Rate napięcia bramki tranzystora MOSFET przedstawiono na **rysunku 6** (przebieg fioletowy). Porównując wynik pomiaru ze specyfikacją katalogową tranzystora można zauważyć, że sygnał przełączający jest dużo wolniejszy niż należałoby się spodziewać. Jest to spowodowane dużo większą pojemnością w obwodzie bramki niż przyjęto w dokumentacji technicznej.

Wykładniczy charakter zmian napięcia bramki przedstawiony na rysunku 6 kolorem fioletowym wynika z właściwości obwodu sterującego, a przede wszystkim z istniejących w tym obwodzie pojemności pasozytniczych. Są to m.in. pojemność samej bramki tranzystora, a także pojemności montażowe. Po zoptymalizowaniu obwodu sterującego polegającej na zmniejszeniu jego impedancji wyjściowej i zredukowaniu pojemności montażowych możliwe było zwiększenie szybkości przełączania i zmniejszenie mocy strat o prawie 30%. Potwierdzają to wyniki przedstawione na **rysunku 7**.

Optymalizacja przetwornic

Pomiary mocy strat stanowią zasadniczy etap optymalizacji przetwornic. Wbrew pozorom, jeśli dysponuje się odpowiednimi przyrządami pomiarowymi, nie są to pomiary bardzo skomplikowane. Większość czynności może być usprawniona przez stosowanie pomiarów automatycznych, a dodatkową ich zaletą jest duża powtarzalność wyników.

Jarosław Doliński, EP

Źródła:

<http://goo.gl/EgCjCG>

REKLAMA



ElektronikaB2B
Portal branżowy dla elektroników



AutomatykaB2B
Portal branżowy dla automatyków

**ELEKTRONIKA
PRAKTYCZNA**



ponad
500 000
odślon miesięcznie

ponad
140 000
użytkowników miesięcznie



ponad
11 000
subskrybentów codziennego newslettera

