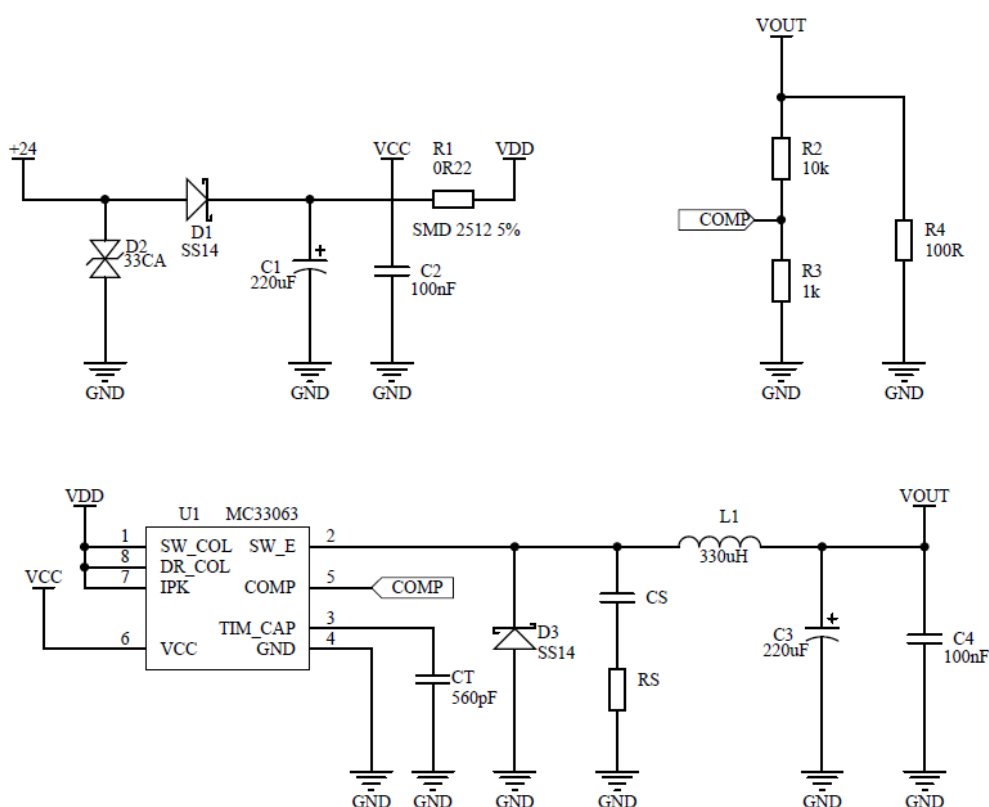


Metody lokalizacji i redukcji zaburzeń elektromagnetycznych w obwodzie przetwornicy step-down z wykorzystaniem skanera EMC oraz oscyloskopu cz. I.

Przy projektowaniu układów elektronicznych jednym z kluczowych aspektów jest odpowiednie dobranie wartości elementów RLC, ich rozmieszczenie oraz poprowadzenie ścieżek w obwodzie drukowanym. Każdy układ elektroniczny w trakcie swojej pracy generuje zakłócenia w postaci fal elektromagnetycznych. Poziom tych zakłóceń zależy od wielu czynników i może mieć negatywny wpływ na działanie innych urządzeń. Związku z tym już na etapie projektowania prototypu powinno się sprawdzić, czy poziom zaburzeń jest zgodny z normami.

Przykładem obwodu, gdzie generowane są zakłócenia elektromagnetyczne jest przetwornica napięcia DC pracująca w konfiguracji step-down. Do zbudowania przetwornicy obniżającej napięcie wykorzystano układ scalony MC33063A. Wyjście przetwornicy zostało obciążone rezystorem 100 Ω .



Rys.1. Schemat przetwornicy MC33063 pracującej w konfiguracji step-down.

Na charakter pracy przetwornicy wpływa przede wszystkim kondensator C_T , rezystory R_2 , R_3 oraz obciążenie. Rezystory R_2 i R_3 tworzą dzielnik napięcia i od niego zależy napięcie wyjściowe przetwornicy (1). Kondensator C_T o pojemności 560 pF, wpływa na częstotliwość pracy przetwornicy (2-5).

$$V_{OUT}=1,25\left(1+\frac{R_2}{R_3}\right) \quad (1)$$

$$C_T=4\times 10^{-5}t_{on} \quad (2)$$

$$t_{on}=\frac{C_T}{4\times 10^{-5}} \quad (3)$$

$$\frac{1}{f}=t_{on}+t_{off} \quad (4)$$

$$f=\frac{1}{t_{on}+t_{off}} \quad (5)$$

W przypadku badanego obwodu napięcie V_{OUT} wynosi:

$$V_{OUT}=1,25\left(1+\frac{10\text{ k}\Omega}{1\text{ k}\Omega}\right)=13,75\text{ V}$$

Natężenie prądu I_{OUT} płynącego przez rezystor R_4 wyznaczono z prawa Ohma (6).

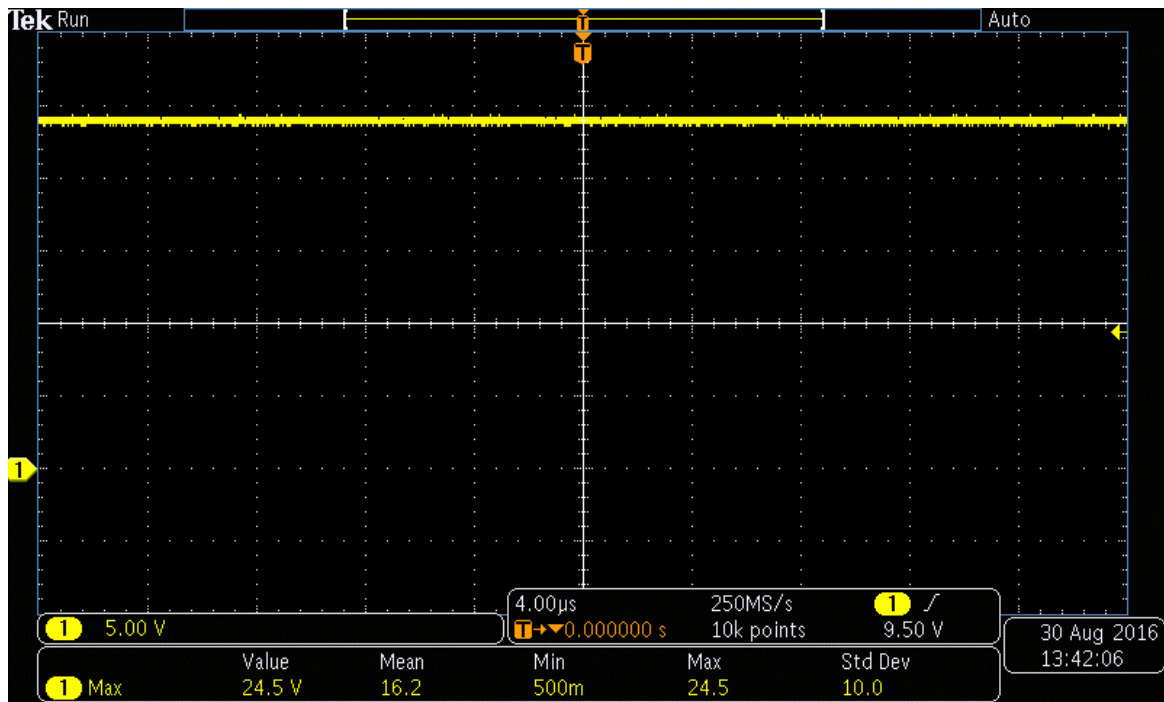
$$I_{OUT}=\frac{V_{OUT}}{R_4} \quad (6)$$

$$I_{OUT}=\frac{13,75\text{ V}}{100\ \Omega}=137,5\text{ mA}$$

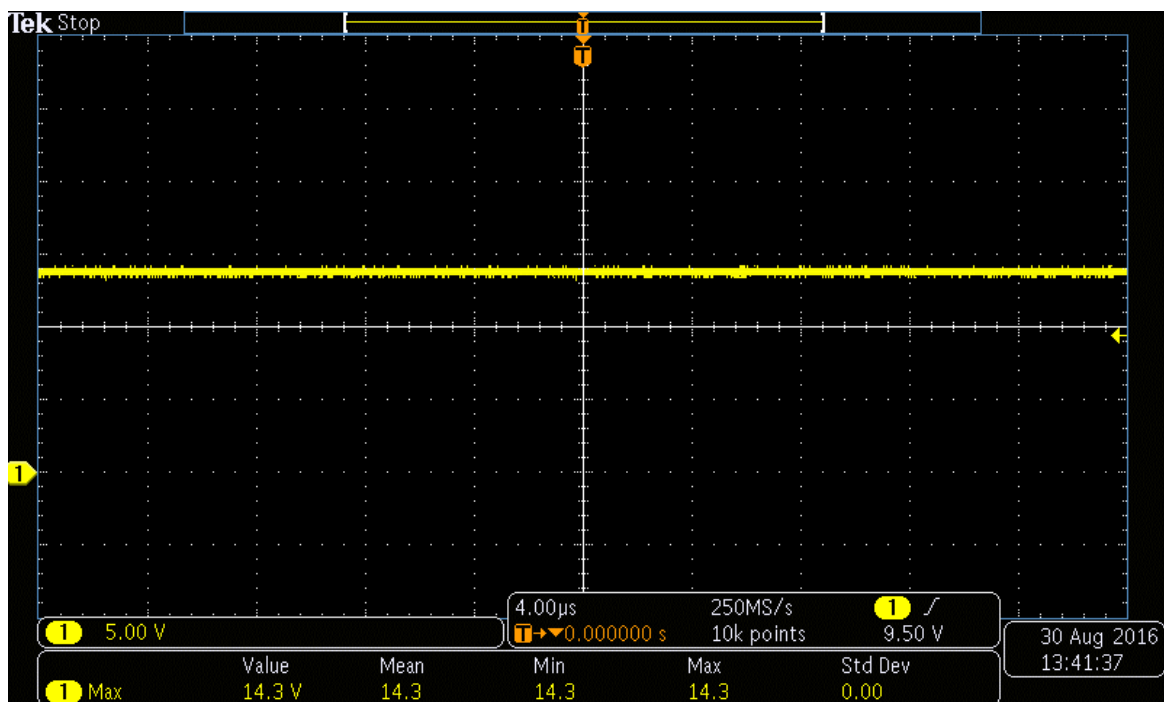
Do lokalizacji oraz określenia poziomu zaburzeń wykorzystano skaner EMC firmy EMSCAN, analizator widma FSL-6 firmy Rohde & Schwarz, sondy pola bliskiego oraz oscyloskop Tektronix MSO3034.

W pierwszej kolejności zmierzono parametry badanego obwodu, czyli

- V_{CC} – napięcie zasilania układu MC33063A (Rys.2)
- V_{OUT} – napięcie wyjściowe konwertera DC (Rys.3)
- przebieg napięcia na kondensatorze C_T (Rys.4)
- przebieg napięcia na 2 pinie układu MC33063A (Rys.5)

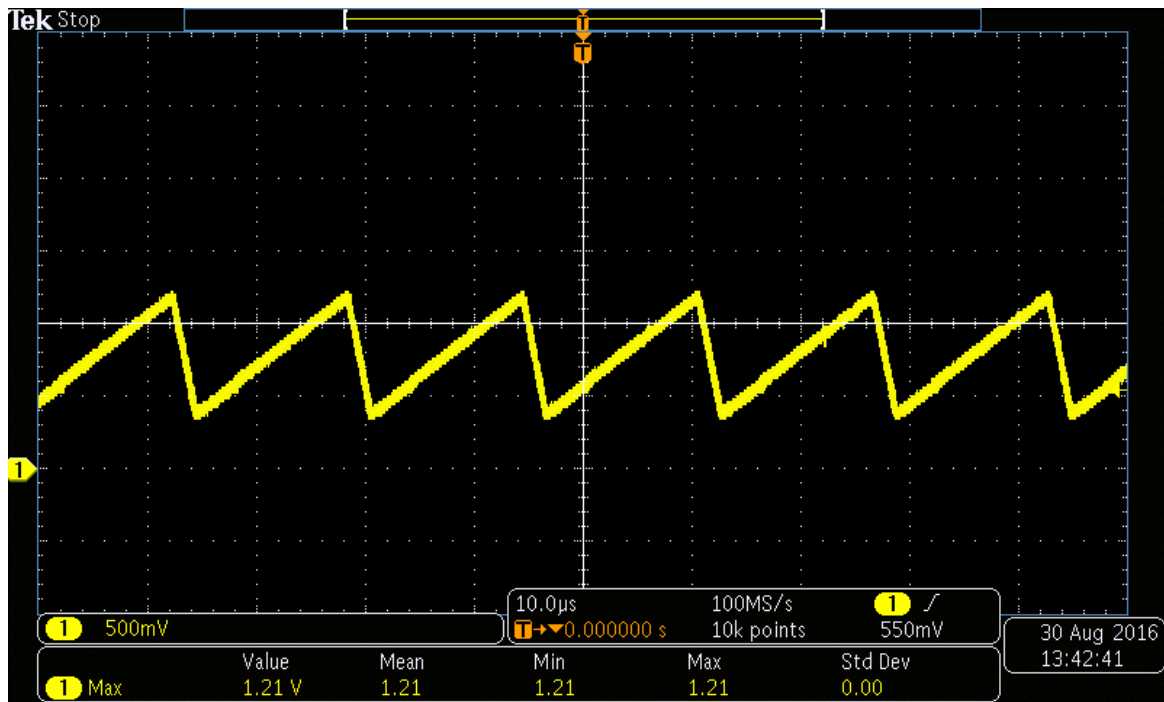


Rys.2. Pomiar napięcia V_{CC} .

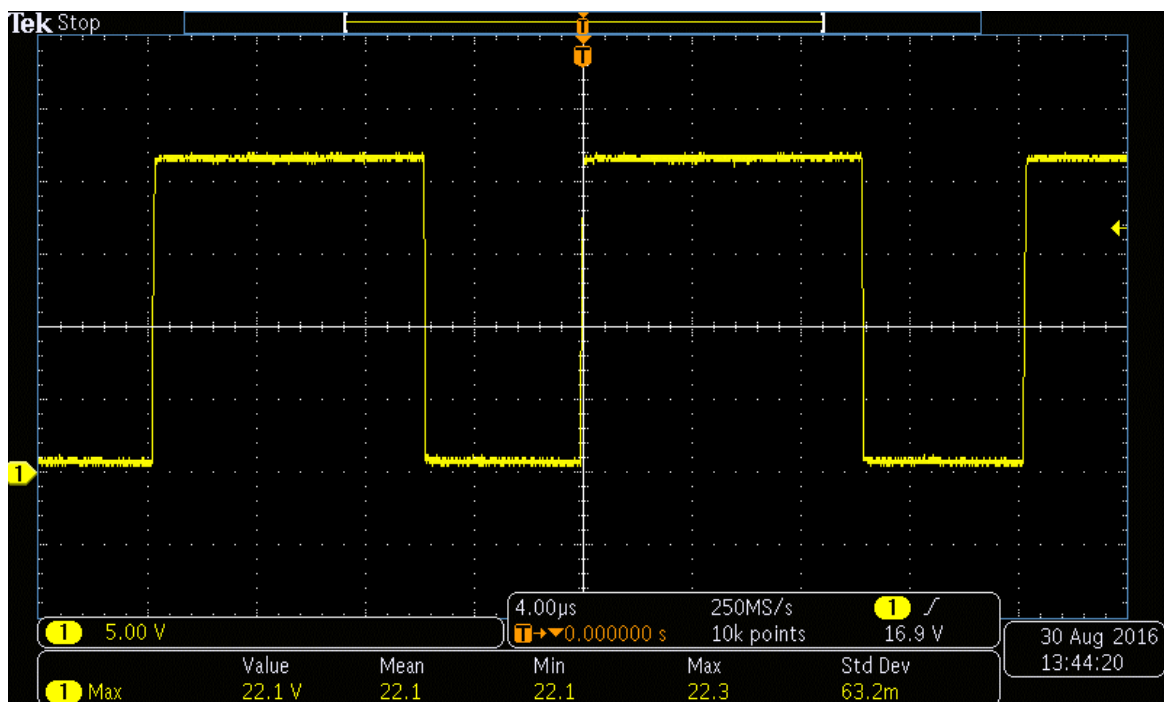


Rys.3. Pomiar napięcia V_{OUT} .

Maksymalne napięcie wyjściowe przetwornicy wynosi ok. 14,3V. Źródłem zniekształceń napięcia wyjściowego jest impulsowe działanie układu MC33063A (Rys.5), a częstotliwość włączenia/wyłączenia zależna jest od pojemności C_T (Rys.4) oraz obciążenia. W przypadku badanego obwodu kondensatory filtrujące napięcie na wyjściu przetwornicy są dobrane prawidłowo, na oscylogramie (Rys.3) nie widać oscylacji o dużej amplitudzie.

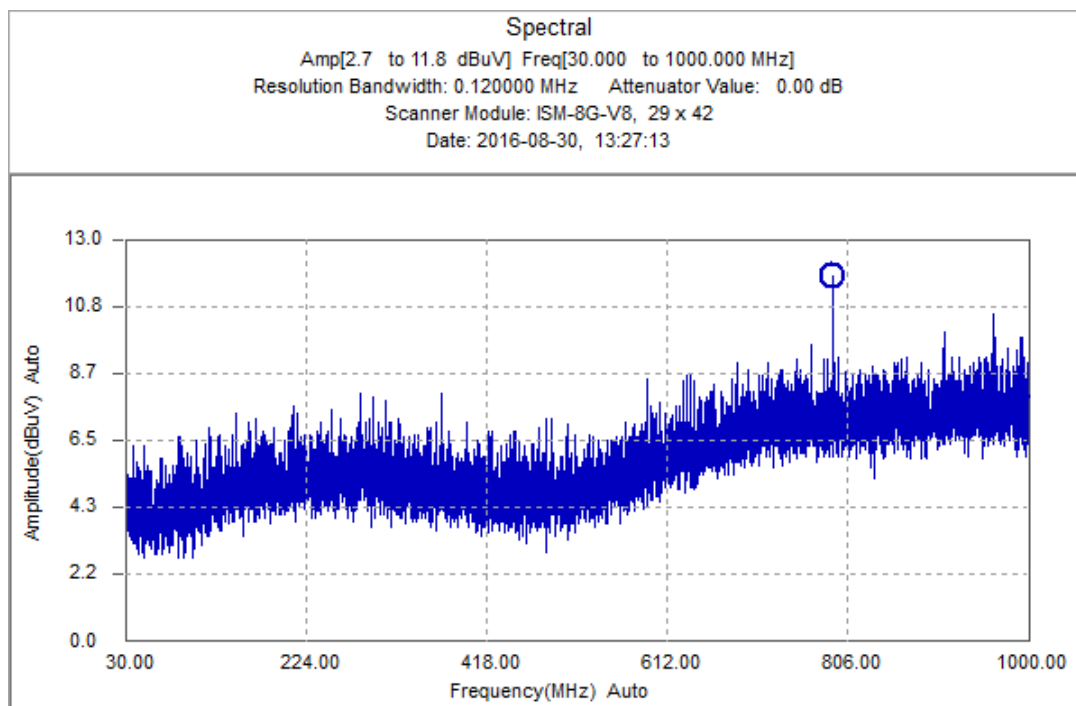


Rys.4. Napięcie na kondensatorze C_T .

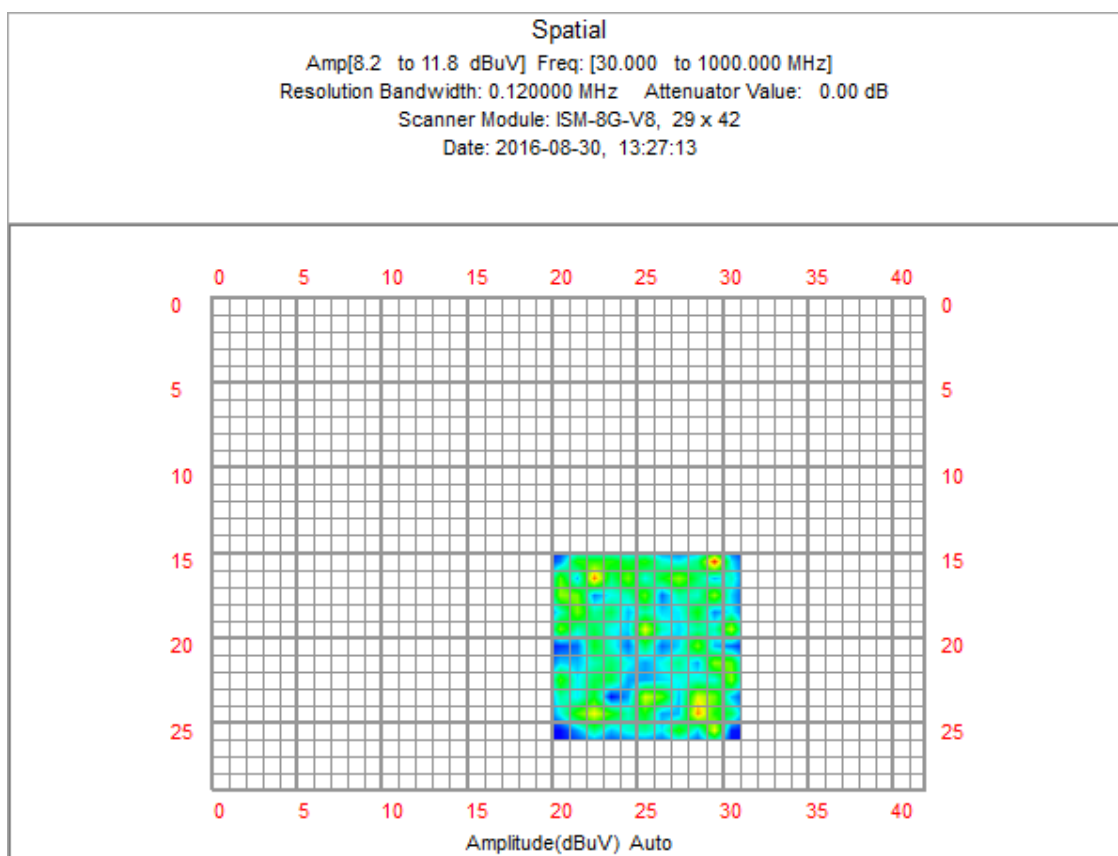


Rys.5. Przebieg napięcia na 2 pinie układu MC33063A.

Po sprawdzeniu podstawowych parametrów badanego obwodu można przejść do lokalizacji zaburzeń elektromagnetycznych za pomocą skanera. Pierwszy pomiar skanerem EMC (Rys.6) przedstawia widmo, gdy obwód przetwornicy nie jest zasilany. Dzięki temu pomiarowi uzyskano poziom zakłóceń w otoczeniu, gdzie wykonywane są badania. Aplikacja umożliwia jednoczesny pomiar widma oraz rozkładu przestrzennego zaburzeń. Rozkład zmierzonych zaburzeń widoczny jest na (Rys.7). Pomiar ten został dokonany w zakresie od 30 MHz do 1000 MHz przy zastosowaniu wbudowanego filtra RBW o częstotliwości 120 kHz. Z widma można odczytać poziom zaburzeń dla danego zakresu pomiarowego, zaś rozkład przestrzenny ułatwi zlokalizowanie źródła emisji zakłóceń.

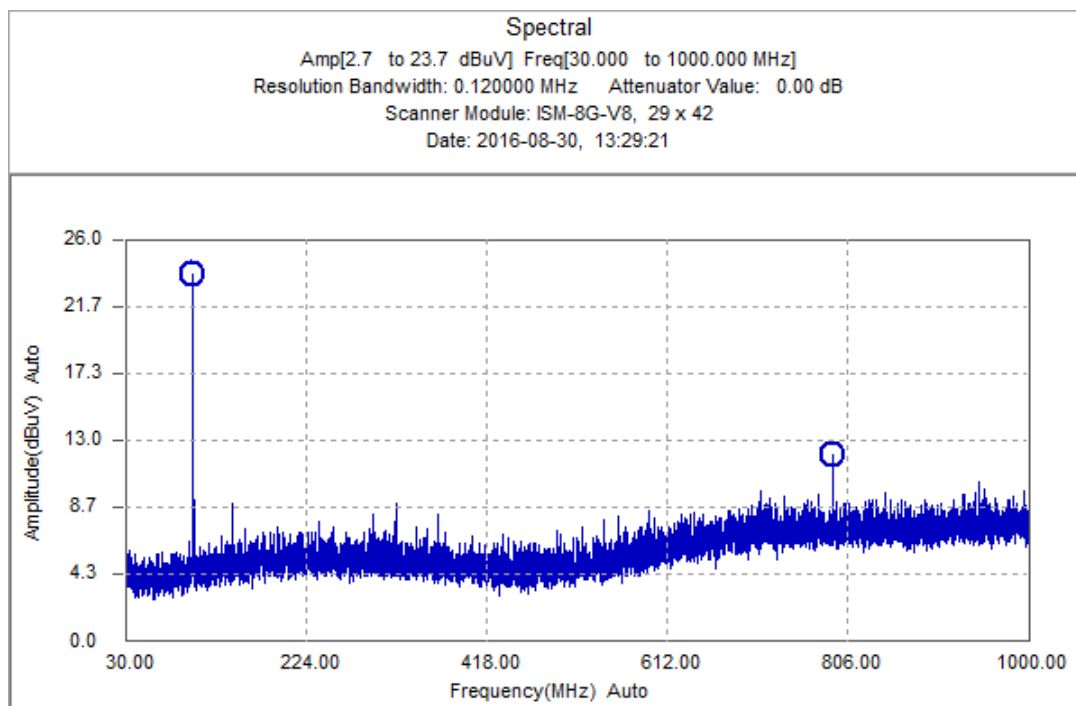


Rys.6. Pomiar zaburzeń elektromagnetycznych przed uruchomieniem obwodu przetwornicy - widmo.

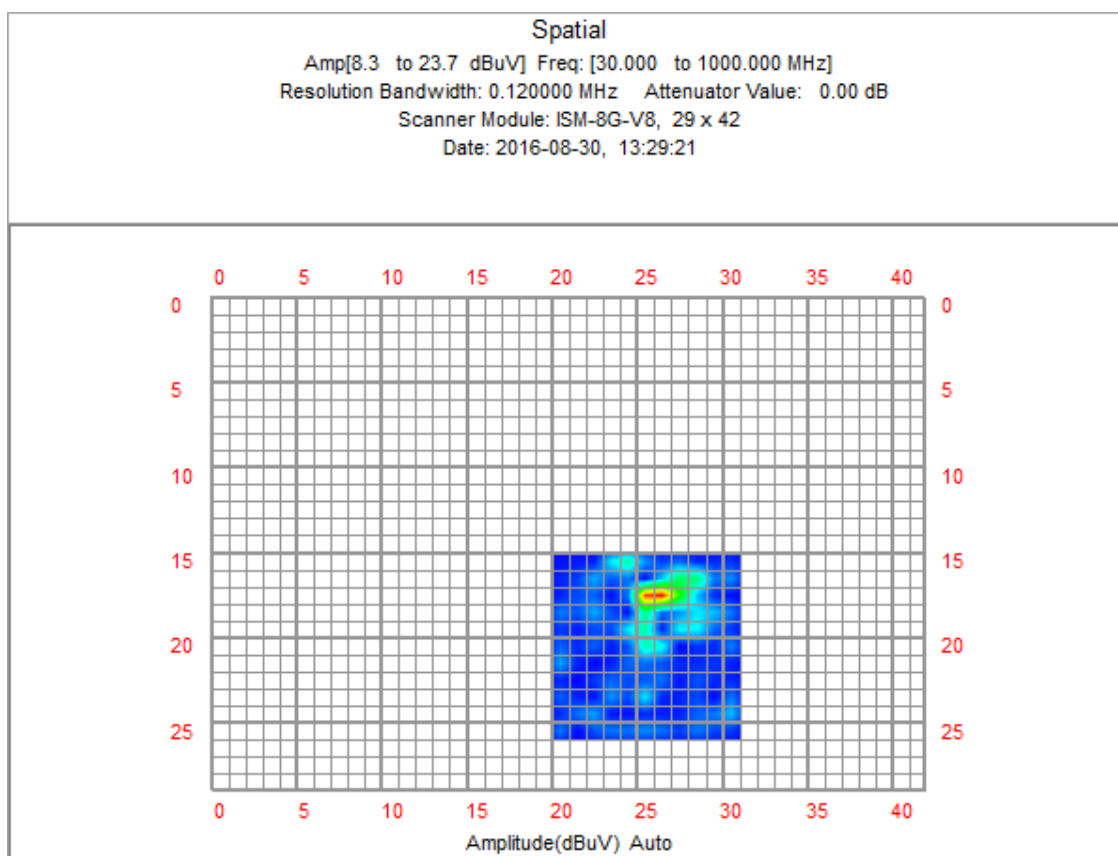


Rys.7. Pomiar zaburzeń elektromagnetycznych przed uruchomieniem obwodu przetwornicy - rozkład przestrzenny.

Po wstępnym pomiarze dokonano pomiaru widma oraz rozkładu po uruchomieniu przetwornicy (Rys.8-9).



Rys.8. Widmo pomiaru zaburzeń elektromagnetycznych emitowanych w obwodzie konwertera DC.



Rys.9. Rozkład przestrzenny zaburzeń wyemitowanych przez układ konwertera DC.

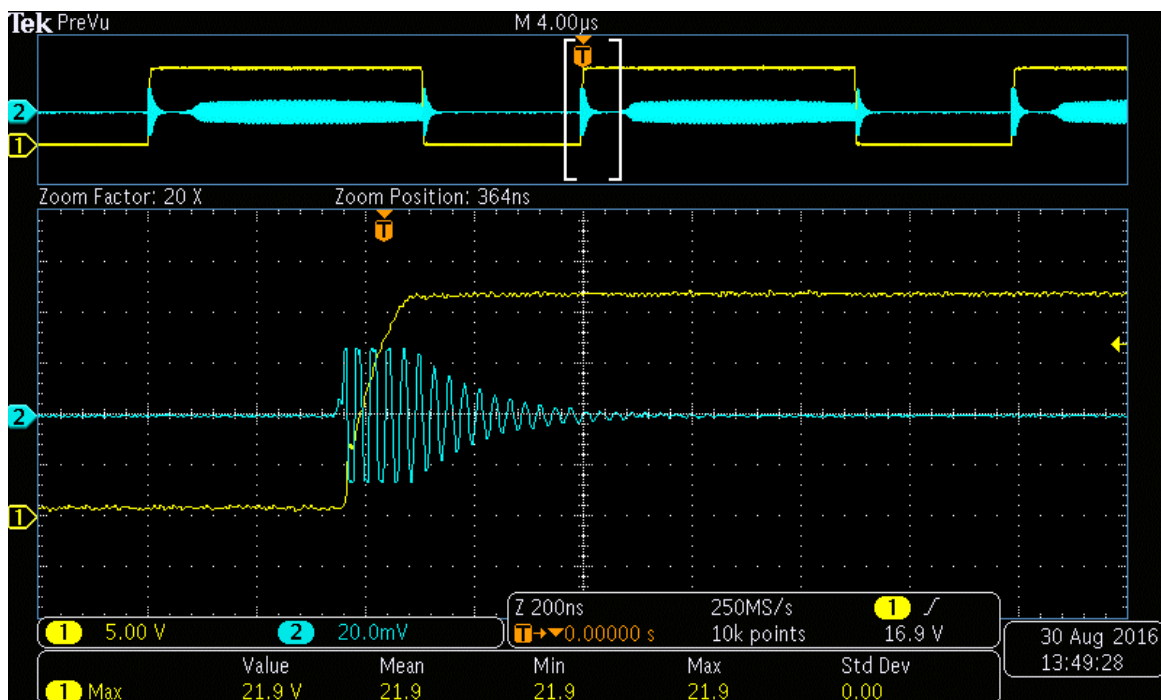
Po porównaniu widm (Rys.6 i Rys.8) widać, że badany obwód generuje znaczne zaburzenia elektromagnetyczne. Przyczyną tych zaburzeń jest między innymi impulsowy charakter pracy układu MC33063A, rozmieszczenie elementów w obwodzie, indukcyjność ścieżek. Ważne jest także

„oblanie” płytki drukowanej masą. W przypadku badanego obwodu do jego zmontowania wykorzystana została gotowa płytka drukowana. Na rozkładzie przestrzennym (Rys.9) barwą czerwoną zaznaczone jest miejsce, gdzie poziom zaburzeń był najwyższy. Jest to miejsce przylutowania w płytce drukowanej układu scalonego MC33063A od strony drugiego wyprowadzenia.

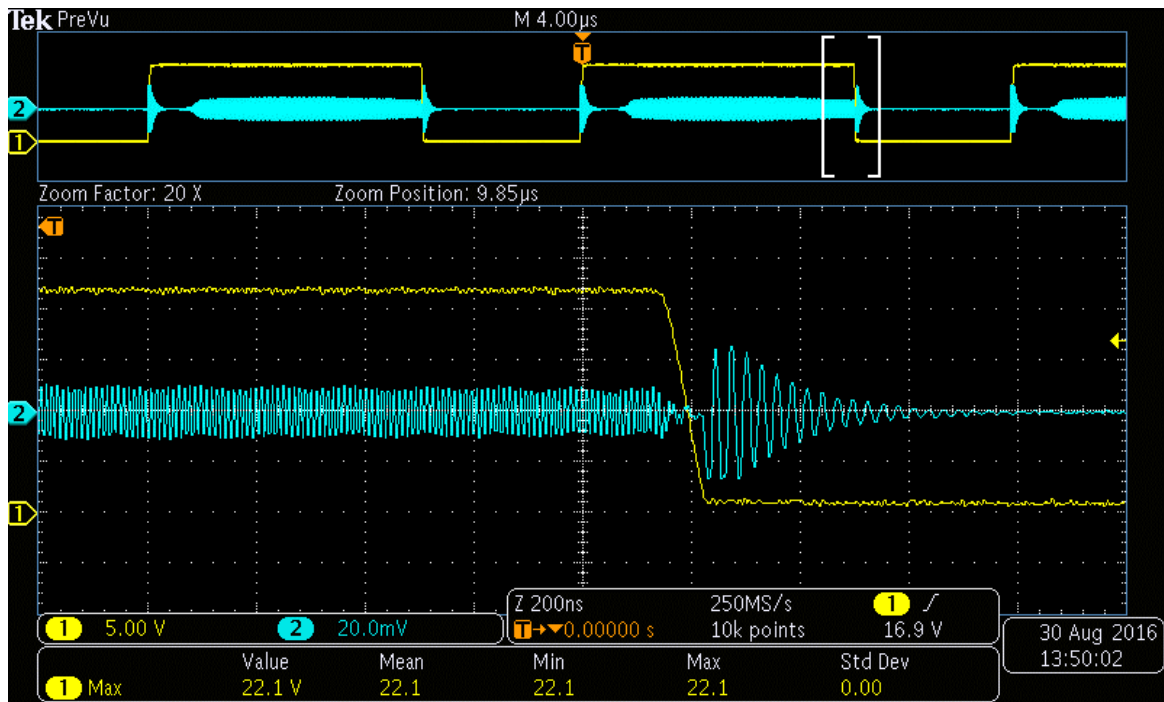
Zazwyczaj w układach, gdzie następuje kluczkowanie, czyli zmiana stanu niskiego na wysoki lub wysokiego na niski występują oscylacje o stałej częstotliwości. Do eliminacji tego typu drgań można wykorzystać układ snubbera, czyli szeregowo połączony kondensator C_s oraz rezystor R_s , widoczne na schemacie (Rys.1). Jednak na oscylogramie (Rys.5) niewidoczne są oscylacje od strony zbrocza narastającego oraz opadającego.

W celu potwierdzenia wyniku uzyskanego za pomocą skanera EMC wykorzystano sondy pola bliskiego firmy Rohde & Schwarz. Sonda typu RS H 50-1 została podłączona do analizatora widma FSL-6 zamiast skanera EMC. Na ekranie analizatora obserwowany był poziom zaburzeń w zakresie częstotliwości od 30 MHz do 150 MHz. Sonda magnetyczna została umieszczona tuż nad płytką drukowaną w miejscu przylutowania przetwornicy MC33063A. Na ekranie analizatora zaobserwowany został znaczny poziom zaburzeń. W innych miejscach obwodu nie zostały zlokalizowane zaburzenia.

Druga sonda typu RS H 2.5-2, czyli sonda pola elektrycznego została podłączona do kanału drugiego oscyloskopu, do kanału pierwszego podłączona została standardowa sonda oscyloskopowa i ponownie dokonano pomiaru na padzie 2 pinu układu MC33063A (Rys. 10-11).

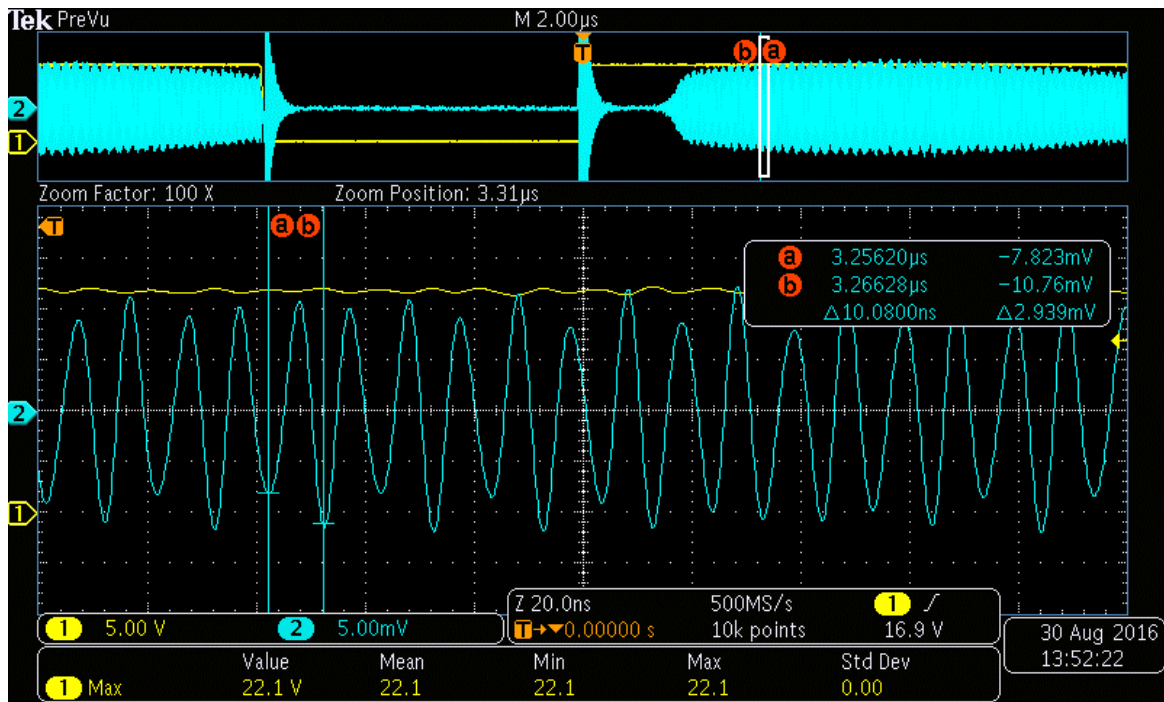


Rys.10. Pomiar zaburzeń na 2 pinie układu MC33063A sondą oscyloskopową oraz sondą pola bliskiego – zbrocze narastające.



Rys.11. Pomiar zaburzeń na 2 pinie układu MC33063A sondą oscyloskopową oraz sondą pola bliskiego – zbcze opadające.

Na oscylogramach (Rys.10-11) kolorem żółtym przedstawiony został wynik pomiaru standardową sondą oscyloskopową, kolorem niebieskim wynik pomiaru sondą pola bliskiego. Oscylogramy te są przedstawione w powiększeniu. Potwierdził się wynik przedstawiony na (Rys.5), na zboczach praktycznie nie widać żadnych oscylacji. Zaburzenia na zboczu narastającym i opadającym wykryła jedna sonda pola elektrycznego. Niestety amplituda tych zaburzeń jest niewielka, w tym pomiarze na działkę przypada 20 mV. Poza tym częstotliwość oscylacji na zboczu narastającym i opadającym wynosi ok. 1MHz. Pomiar zaburzeń skanerem EMC był wykonany w zakresie od 30 MHz do 1000 MHz związku, z czym skaner nie zmierzył oscylacji wykrytych przez sondę RS H 2.5-5. Zaburzenie, które zmierzone zostało skanerem miało częstotliwość ok. 100 MHz. Wykryte zaburzenie wykryła także sonda pola elektrycznego. Zaburzenie to widać na oscylogramach (Rys.10-11), kiedy tranzystor w strukturze przetwornicy jest otwarty. Pojawiają się one krótko po osiągnięciu stanu wysokiego i wygasają tuż przy zboczu opadającym. Na zdjęciu poniższym przedstawiono powiększenie tych drgań (Rys.12). Widać, także że okres tych drgań wynosi ok. 10 ns, ich częstotliwość wynosi ok. 100 MHz.



Rys.12. Zaburzenia zmierzone sondą pola elektrycznego, kiedy przetwornica MC33063A jest w stanie wysokim.

W celu zredukowania zaburzeń elektromagnetycznych, trzeba pozbyć się oscylacji widocznych na oscylogramach (Rys.10-12). Do ich wyeliminowania zastosowany zostanie wyżej wymieniony układ snubbera. Elementów tych dotychczas nie było w obwodzie, w płytce drukowanej znajdowały się pady, do których można przylutować odpowiedni kondensator oraz rezystor. Pojemność C_S można wyznaczyć z równania (7), zaś rezystancję R_S z równania (8).

$$C_S = \frac{1}{2\pi R_S f_{osc0}} \quad (7)$$

$$R_S = \frac{1}{2\zeta} \sqrt{\frac{L_P}{C_P}} \quad (8)$$

Gdzie:

- f_{osc0} – częstotliwość oscylacji (Rys.12)
- ζ – współczynnik tłumienia
- C_P – pojemność pasożytnicza, jej wartość głównie zależy od pojemności klucza, czyli tranzystora znajdującego się w strukturze układu MC33063A
- L_P – indukcyjność pasożytnicza, której wartość zależy od indukcyjności klucza oraz impedancji ścieżek w obwodzie drukowanym

Częstotliwość f_{osc0} można wyznaczyć analitycznie znając wartość L_P i C_P ze zależności (9) lub (10) jeśli znamy okres tych oscylacji T_{osc0} . W przypadku badanego obwodu $T_{osc0} = 10$ ns.

$$f_{osc0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_P C_P}} \quad (9)$$

$$f_{osc0} = \frac{1}{T_{osc0}} \quad (10)$$

$$f_{osc0} = \frac{1}{10 \times 10^{-9}} = 100\,000\,000 \text{ Hz}$$

$$f_{osc0} = 100 \text{ MHz}$$

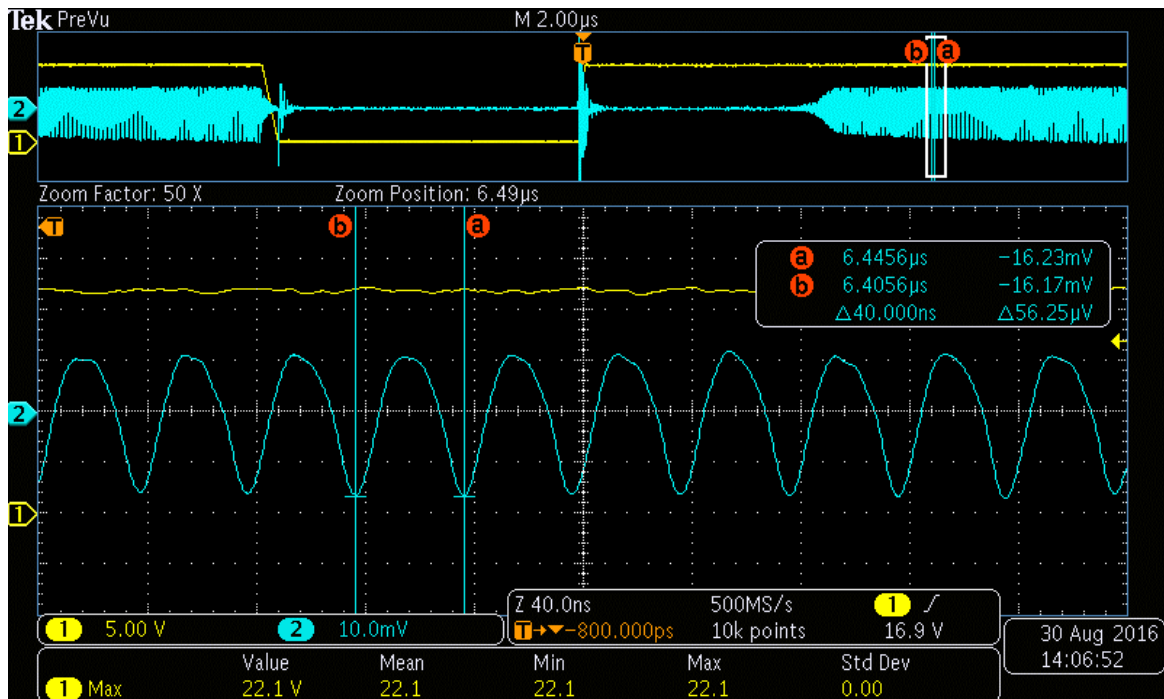
Zmniejszenie częstotliwości f_{osc0} ułatwi wyznaczenie pojemności C_p . Można tego dokonać przylutowując do 1 i 2 wyprowadzenia MC33063A dodatkowy kondensator C_D . Częstotliwość oscylacji po dodaniu kondensatora C_D , f_{osc1} powinna być mniejsza od f_{osc0} zgodnie z zależnością (11). Nową częstotliwość oscylacji można wyznaczyć analitycznie ze wzoru (12) lub (13).

$$f_{osc1} \approx \frac{f_{osc0}}{x} \quad (11)$$

$$f_{osc1} = \frac{1}{T_{osc1}} \quad (12)$$

$$f_{osc1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p(C_p + C_D)}} \quad (13)$$

W badanym obwodzie do wyprowadzeń układu scalonego przylutowany został kondensator o pojemności 3,9 nF. Następnie za pomocą oscyloskopu zmierzono okres oscylacji $T_{osc1}=40$ ns (Rys.13). Kondensatora C_D zabrakło na schemacie (Rys.1), ponieważ po zmierzeniu T_{osc1} jest on niepotrzebny i należy go wymontować.



Rys.13. Pomiar oscylacji po dodaniu kondensatora C_D .

$$f_{osc1} = \frac{1}{40 \times 10^{-9}} = 25\,000\,000 \text{ Hz}$$

$$f_{osc1} = 25 \text{ MHz}$$

Na tym etapie można przejść do wyznaczenia pojemności C_p używając wzoru (11) i (13). Po przekształceniu otrzymano zależność (15), z której wyznaczono wartość pojemności pasożytniczej.

$$\frac{f_{osc0}}{x} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p(C_p+C_D)}} \quad (14)$$

$$C_p = \frac{C_D}{x^2-1} \quad (15)$$

$$C_p = \frac{3,9 \times 10^{-9}}{\left(\frac{100 \times 10^6}{25 \times 10^6}\right)^2 - 1} = 0,26 \text{ nF}$$

$$C_p = 260 \text{ pF}$$

Kolejnym etapem jest wyznaczenie indukcyjności pasożytniczej L_p , stosując wzór (16), który można wyprowadzić z równania (9). Indukcyjność można wyznaczyć także z równania (17), te z kolei wyprowadzone zostało ze wzoru (13). Bez względu czy zastosowany zostanie wzór (16) lub (17) w obydwóch przypadkach wynik powinien być podobny.

$$L_p = \frac{1}{(2\pi f_{osc0})^2 C_p} \quad (16)$$

$$L_p = \frac{1}{(2\pi f_{osc1})^2 (C_p + C_D)} \quad (17)$$

$$L_p = \frac{1}{(2 \times 3,14 \times 100 \times 10^6)^2 \times 260 \times 10^{-12}} = 9,75 \text{ nH}$$

$$L_p = \frac{1}{(2 \times 3,14 \times 657,89 \times 10^3)^2 \times (95 \times 10^{-12} + 94 \times 10^{-12})} = 9,75 \text{ nH}$$

Do wyznaczenia parametrów snubbera, uwzględnione zostało, że indukcyjność L_p wynosi ok. 10 nH, zaś współczynnik tłumienia $\zeta = 1$.

$$R_s = \frac{1}{2 \times 1} \sqrt{\frac{10 \times 10^{-9}}{260 \times 10^{-12}}} = 3,1 \Omega$$

$$C_s = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 3,1 \times 100 \times 10^6} = 0,51 \text{ nF}$$

$$C_s = 510 \text{ pF}$$

Ostatecznie w obwodzie snubbera zamontowany został rezystor o rezystancji 3,3 Ω i kondensator o pojemności 560 pF, częstotliwość tego obwodu opisuje zależność (18).

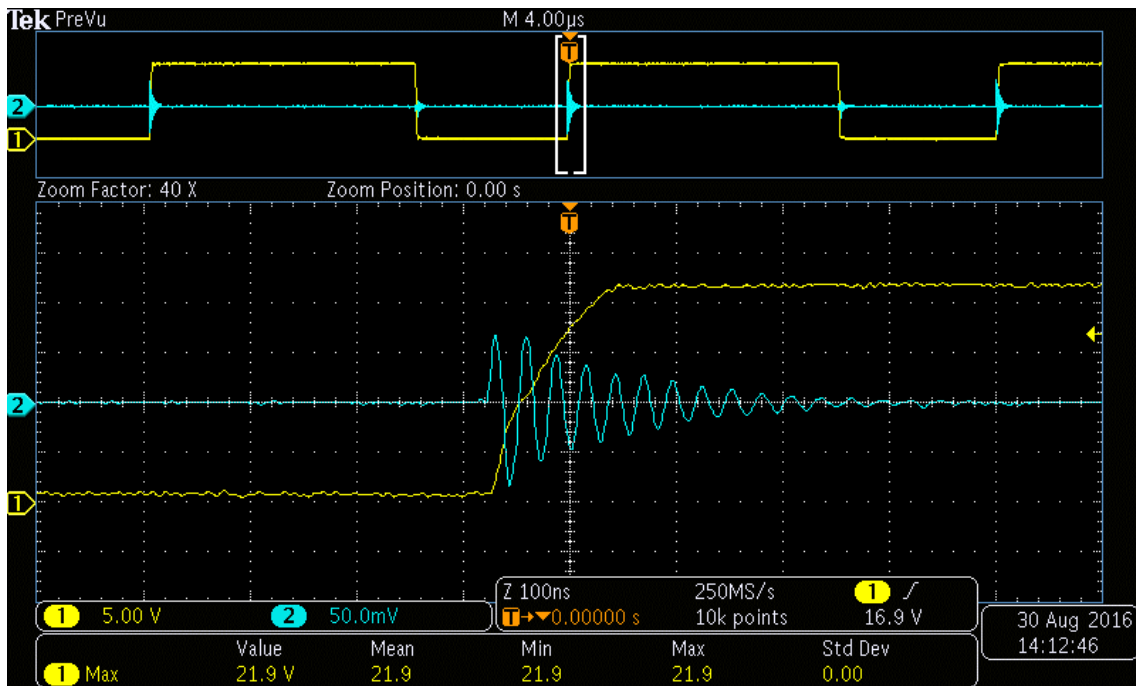
$$f_s = \frac{1}{2\pi \times R_s \times C_s} \quad (18)$$

$$f_s = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 3,3 \times 560 \times 10^{-12}} = 86\,166\,487,44 \text{ Hz}$$

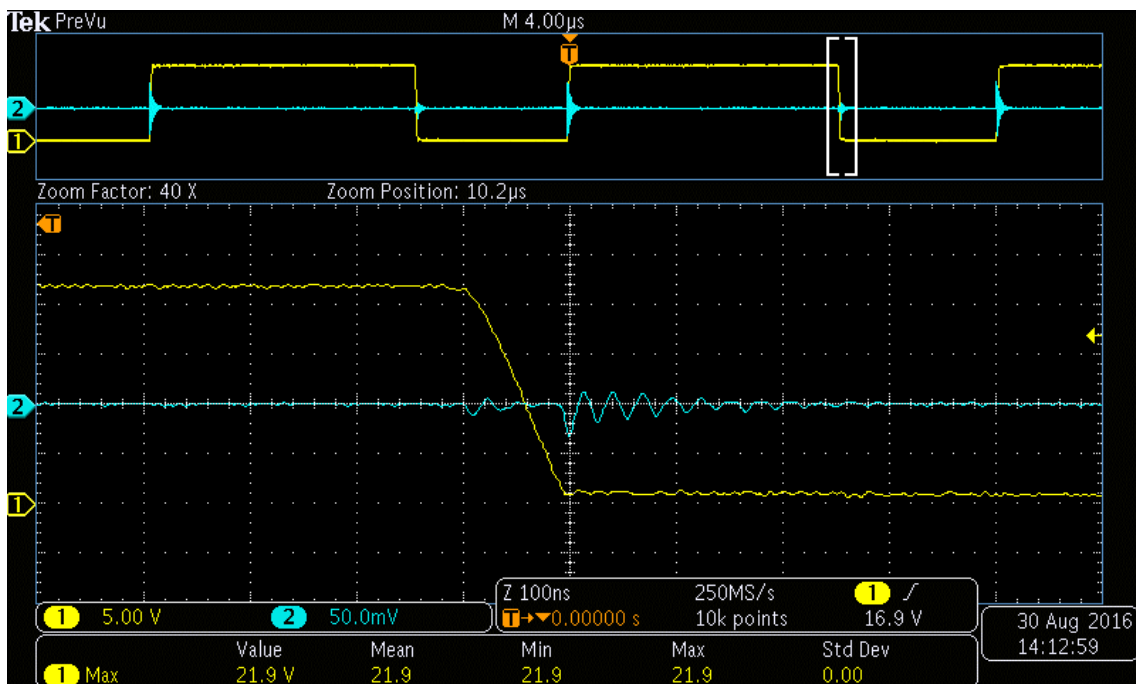
$$f_s \approx 86 \text{ MHz}$$

Gdyby w obwodzie snubbera został zamontowany opornik o rezystancji $3,1 \Omega$ i kondensator o pojemności 510 pF , częstotliwość snubbera wyniosłaby ok. 100 MHz , w przybliżeniu byłaby równa częstotliwości oscylacji, zmierzonych sondą pola bliskiego.

Po zamontowaniu tłumika jeszcze raz dokonano pomiarów podstawowych parametrów przetwornicy obniżającej napięcie, w celu weryfikacji czy obwód snubbera został prawidłowo dobrany. Dodanie obwodu snubbera nie ma wpływu ani na napięcie V_{CC} ani na napięcie V_{OUT} .



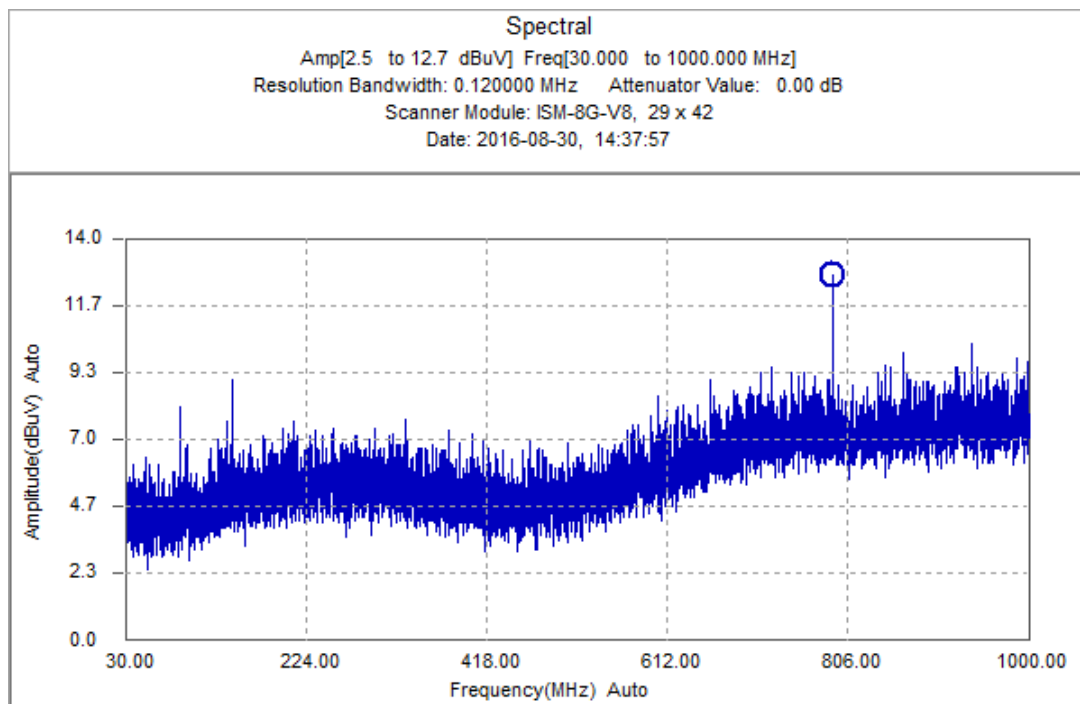
Rys.14. Oscylacje na emiterze układu scalonego MC33063A – zbcze narastające po zainstalowaniu w obwodzie tłumika.



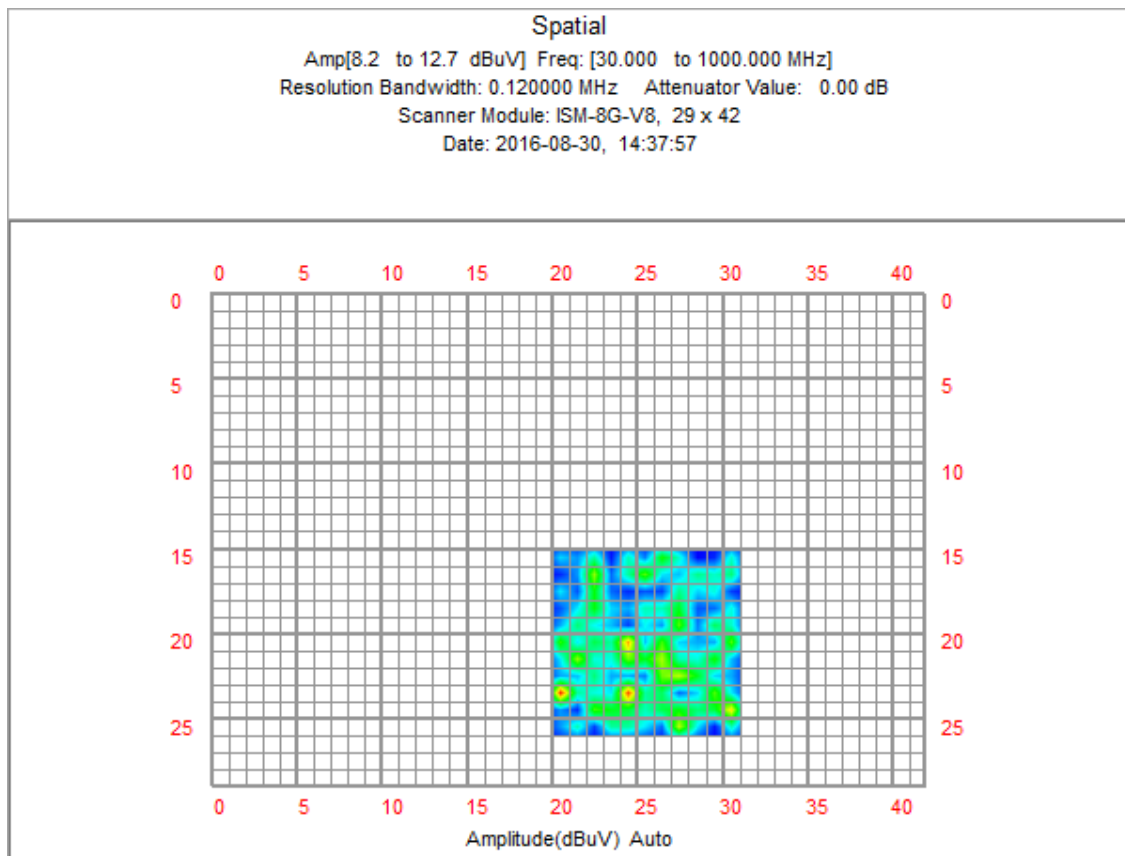
Rys.15. Oscylacje na emiterze układu scalonego MC33063A – zbcze opadające po zainstalowaniu w obwodzie tłumika.

Na podstawie pomiaru napięcia na wyprowadzeniu nr 2 przetwornicy (Rys.10-12 oraz Rys.14-15) można stwierdzić, że wartość rezystancji R_S i pojemności C_S są dobrane prawidłowo. Prawie całkowicie udało się stłumić oscylacje o częstotliwości 100 MHz. Zmniejszyła się także amplituda drgań na zboczu opadającym. Snubber nie ma znacznego wpływu na zaburzenia generowane na zboczu narastającym, ale ich amplituda i częstotliwość jest wystarczająca, aby badany obwód spełniał normy pod względem kompatybilności elektromagnetycznej.

Niestety zastosowanie tłumika ma też swoje wady, główną z nich jest mniejsza wydajność przetwornicy. Po sprawdzeniu podstawowych parametrów pracy przetwornicy dokonano pomiaru zaburzeń elektromagnetycznych, czyli analizę widmową (Rys.16) oraz wygenerowany został rozkład przestrzenny zaburzeń (Rys. 17) z wykorzystaniem skanera EMC. Pomiaru dokonano w takich samych warunkach, czyli w takim samym zakresie częstotliwości, z użyciem wbudowanego filtra RBW o identycznej częstotliwości.



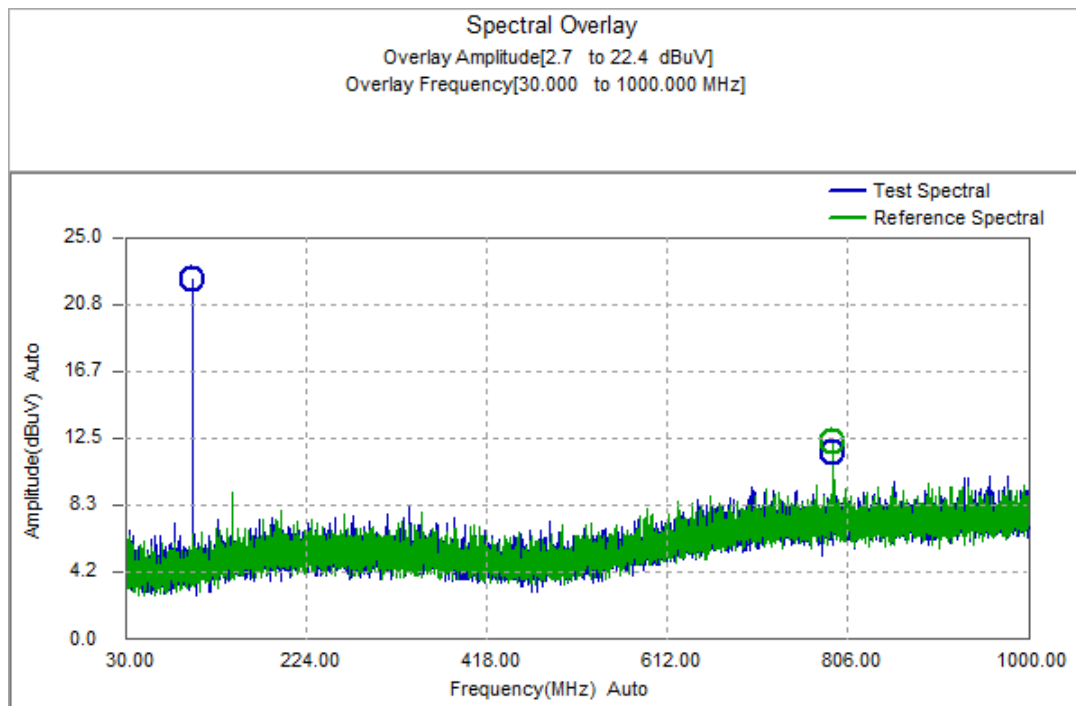
Rys.16. Widmo zakłóceń elektromagnetycznych w obwodzie przetwornicy obniżającej napięcie z dodatkowym obwodem RC.



Rys.17. Rozkład przestrzenny zakłóceń w badanym obwodzie z układem tłumika.

Dobry tłumik wyeliminował wygenerowane zakłócenia, kiedy klucz w strukturze układu scalonego był w stanie wysokim.

Za pomocą aplikacji do obsługi sprzętu pomiarowego wygenerowany został wykres porównawczy (Rys.18) poziomu zaburzeń w obwodzie bez snubbera (Test Spectral) oraz ze snubberem (Reference Spectral). Niestety wykonanie wykresu porównawczego wymaga zrobienia pomiaru samego widma za pomocą skanera. Przy jednoczesnych pomiarach widma i rozkładu nie ma opcji porównania otrzymanych wyników.



Rys.18. Wykres porównawczy widma w obwodzie ze snubberem oraz w obwodzie bez snubbera.

Podsumowanie

Podsumowując przygotowany obwód prototypowy nie jest skomplikowany, pomimo to, widać, jakie trudne zadanie czeka konstruktora podczas doboru elementów i projektowania obwodu drukowanego. Zastosowanie skanera EMC ułatwiło i przyspieszyło pracę w przypadku lokalizacji i określenia poziomu zaburzeń elektromagnetycznych z bardzo dużą dokładnością. Zdarzają się jednak obwody bardziej złożone składające się nawet z kilkudziesięciu lub kilkuset elementów elektronicznych, jedno lub dwuwarstwowe, gdzie fale elektromagnetyczne o niepożądanym amplitudzie pokrywają znaczną część obwodu drukowanego. W rozpatrywanym przypadku tylko niewielki fragment płytki drukowanej, w którym został zamontowany układ MC33063A. Układ ten jest źródłem zakłóceń, co widać na wykresach przedstawiających rozkład zaburzeń (Rys.9 i Rys.17). W przypadku obwodów drukowanych o większych gabarytach, gdzie skaner EMC zlokalizuje większy fragment obwodu, jako źródło zaburzeń elektromagnetycznych można wykorzystać dodatkową aparaturę, która pozwoli dokładniej zlokalizować źródło emisji pola elektromagnetycznego. Są to sondy pola bliskiego. Dostępne sondy można podłączyć bezpośrednio do analizatora widma lub oscyloskopu. Niestety czas badania się wydłuża. Jednak i tak jest to spora korzyść dla projektanta. Po wprowadzeniu zmian w obwodzie prototypowym na bieżąco można śledzić, jakie zmiany zaszły oraz stwierdzić czy parametry badanego obwodu są też lepsze czy gorsze.

Wyznaczenie właściwości snubbera opisaną metodą pozwalają również zaoszczędzić czas, doświadczalne dobieranie parametrów nie jest takie łatwe, zwłaszcza dla początkujących elektroników. Zdarza się jednak, że dobrany tłumik RC metodą prób i błędów, nie tylko wyeliminuje oscylacje powstałe w procesie tzw. „kluczowania” elementów półprzewodnikowych albo stykowych. Redukuje także poziom zaburzeń elektromagnetycznych, które generowane są przez inne źródła.