

Zasilacz impulsowy o dużej impedancji między obwodem wejściowym i wyjściowym

Switching power supply with high impedance between input and output circuits

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań prototypu zasilacza impulsowego o dużej impedancji między obwodem wejściowym a wyjściowym. Układ charakteryzuje się relatywnie małą masą i gabarytami w porównaniu z układami zawierającymi baterie, akumulatory czy transformatory i cechuje go względnie mała wartość generowanych zaburzeń elektromagnetycznych oraz szumów. Rezystancja DC zmierzona między obwodem wejściowym zasilacza, przy napięciu pomiarowym 500 V jest większa od 10 TΩ, a pojemność między obwodem wejściowym i wyjściowym jest mniejsza od 13 pF i jest o około dwa rzędy niższa od pojemności występującej między obwodem wejściowym i wyjściowym komercyjnego zasilacza impulsowego, przeznaczonego do zastosowań medycznych.

Abstract. The article presents the results of tests of a prototype of a switching power supply with high impedance between the input and output circuits. The system is characterized by relatively small mass and dimensions compared to systems containing batteries, accumulators or transformers and is characterized by relatively low value of generated electromagnetic disturbances and noise. DC resistance measured between the input circuit of the power supply, at a measuring voltage of 500 V is greater than 10 TΩ, and the capacitance between the input and output circuits is less than 13 pF and is about two orders of magnitude lower than the capacitance occurring between the input and output circuits of a commercial switching power supply intended for medical applications.

Słowa kluczowe: zasilacz impulsowy, układy zasilające o małych szumach, przetwornice DC/DC, kompatybilność elektromagnetyczna
Keywords: switching power supply, low noise power supplies, dc to dc converters, electromagnetic compatibility

Wstęp

Zasilacze o dużej impedancji między obwodem wejściowym i wyjściowym stosowane są w układach, w których wymagana jest duża izolacja elektryczna zasilanego urządzenia. Układy zasilające tego rodzaju są stosowane m.in. w precyzyjnej aparaturze pomiarowej, wymagającej dobrej separacji od sieci elektroenergetycznej, aparaturze medycznej oraz w urządzeniach przemysłowych do zasilania podukładów szczególnie wrażliwych na przewodzone zaburzenia wspólne. Alternatywne metody uzyskiwania dużej impedancji między obwodem wejściowym i wyjściowym układu zasilającego obejmują wykorzystanie baterii lub akumulatorów, transformatora separującego lub transformatora z podwójnym lub nawet potrójnym ekranem ochronnym (ang. *guard*) między uzwojeniem pierwotnym i wtórnym. Wymienione rozwiązania mają wady, jakimi są: konieczność wymiany baterii lub ładowania akumulatorów, duża masa i gabaryty przy zastosowaniu transformatorów separujących i toroidalnych. W przypadku transformatorów separujących wadą może być również duża pojemność między uzwojeniem pierwotnym i wtórnym.

Wymagania projektowe stawiane układowi

Zasilacz powinien spełniać następujące wymagania:

- rezystancja przy prądzie stałym między masą obwodu wejściowego a masą obwodu wyjściowego większa od 100 GΩ,
- pojemność między masą obwodu wejściowego, a masą obwodu wyjściowego mniejsza od 15 pF,
- stałe wejściowe napięcie zasilające z przedziału od 11,5 V do 13,5 V,
- bipolarne napięcie wyjściowe ±15 V przy maksymalnym prądzie wyjściowym ±250 mA,
- wymagane dodatkowe napięcie wyjściowe +5 V przy maksymalnym prądzie wyjściowym równym 250 mA,
- maksymalny prąd wejściowy rzędu 2 A,
- moc zasilacza około 12 W przy sprawności rzędu 60%,

h) możliwie mała zawartość harmonicznych i zakłóceń w wytwarzanych napięciach wyjściowych,

i) możliwie mała energia generowanych zaburzeń elektromagnetycznych promieniowanych i przewodzonych.

Charakterystyka układu zasilacza

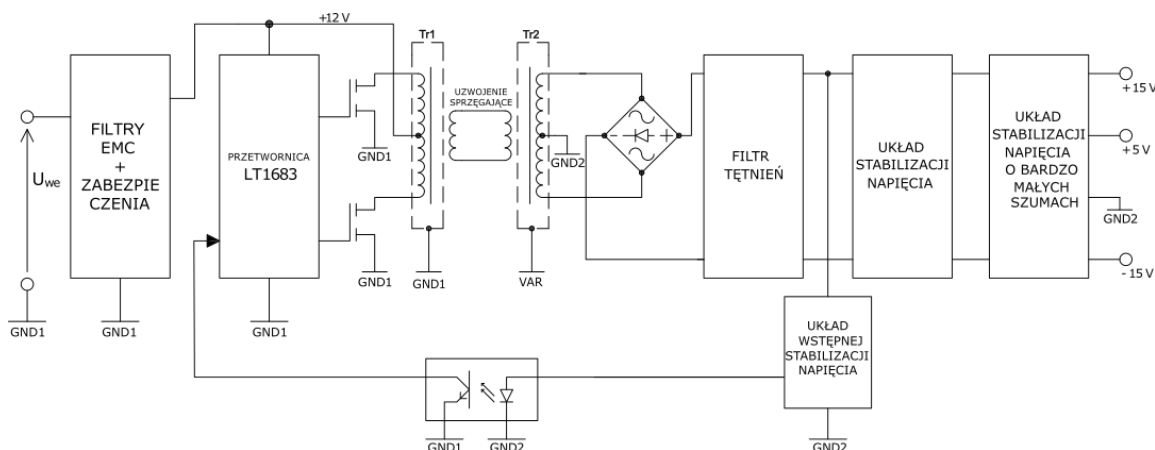
W zasilaczu zastosowano strukturę transformatorową przetwornicy typu Push-Pull o odpowiednio dobranych parametrach statycznych i dynamicznych. Rozwiązanie to wydaje się najbardziej adekwatne w aplikacjach podwyższających napięcie. Układ cechuje się prostotą sterowania tranzystorów kluczujących oraz niskimi stratami energii na tych elementach [4]. Zastosowany w przetwornicy specjalnie zaprojektowany transformator umożliwia sprzężenie indukcyjne obwodów wejściowego i wyjściowego oraz ułatwia spełnienie zakładanego warunku uzyskania dużej rezystancji i małej pojemności między tymi obwodami.

W strukturze zaimplementowano układ scalony LT1683, który jest specjalizowanym sterownikiem przetwornicy o topologii Push-Pull, charakteryzującym się bardzo małą energią zaburzeń przewodzonych i promieniowanych [1]. Układ steruje częstotliwością taktowania oraz współczynnikiem wypełnienia przebiegów sterujących tranzystorami kluczującymi (ang. *Pulse Width Modulation*, PWM). Zmniejszenie energii zaburzeń przewodzonych i promieniowanych przez układ przetwornicy uzyskuje się dzięki optymalnemu sterowaniu czasem narastania zboczy przebiegów sygnału PWM. Dalsze zmniejszenie poziomu zaburzeń uzyskano przez przyjęcie niskiej częstotliwości przełączania tranzystorów kluczujących, rzędu 25 kHz. Układ LT1683 zapewnia także miękki start przetwornicy i zabezpiecza tranzystory kluczujące przed jednoczesnym przewodzeniem przez nie prądu.

Schemat blokowy układu zasilacza przedstawiono na rysunku 1. W układzie zastosowano trójstopniową stabilizację napięć wyjściowych. Układ wstępnej stabilizacji napięcia steruje współczynnikiem wypełnienia sygnałów kluczujących tranzystory przetwornicy. Wartość tego współczynnika jest wypracowywana przez układ LT1683 na

podstawie wartości dodatniego napięcia na wyjściu filtru tętnień, który przedstawiono w uproszczeniu na rysunku 1.

Informacja o tym napięciu jest przekazywana z obwodu wyjściowego do wejściowego za pomocą transoptora.



Rys. 1. Schemat blokowy układu zasilacza

Kolejny stopień stabilizacji obejmuje wzmacniacze operacyjne, wyposażone w dyskretne tranzystorowe stopnie mocy, które stabilizują napięcia wyjściowe z użyciem stałego źródła napięcia odniesienia +2,5 V. W trzecim stopniu stabilizacji zastosowano nowoczesne monolityczne układy stabilizatorów napięcia typu LT3045-1 oraz LT3094 [2], [3]. Charakteryzują się one dużym tłumieniem zmian napięcia zasilania (ang. *Power Supply Rejection Ratio*, PSRR), większym od 70 dB oraz małą wartością skuteczną szumów własnych, rzędu 0,8 μ V. Zalety tych układów, to m.in. możliwość nastawy napięcia i prądu wyjściowego za pomocą pojedynczych rezystorów oraz możliwość równoległego łączenia ich wyjść w celu zwiększenia wydajności prądowej. Celem zwiększenia sprawności układu, napięcia na wyjściach poszczególnych stopni stabilizacji mają minimalne wartości, niezbędne do prawidłowego funkcjonowania układu. Na wyjściu transformatora Tr2 zastosowano układ symetryzujący, minimalizujący wpływ zakłóceń przenikających przez pojemność między obwodem wejściowym, a wyjściowym.

Konstrukcja prototypu zasilacza

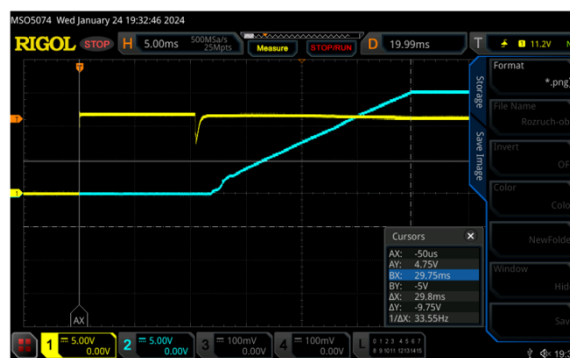
Zbudowano dwa prototypy zasilacza, różniące się rozmiarami obwodów drukowanych wykonanych z laminatu szklano-epoksydowego pokrytego obustronnie miedzią o grubości 35 μ m. Pierwszy z prototypów zmontowany na płycie drukowanej o rozmiarach (120 x 80) mm umieszczono w obudowie aluminiowej Hammond 1457, zapewniającej ekranowanie elektromagnetyczne. Jest to niezależne urządzenie, wyposażone w standardowe wejściowe gniazdo zasilające 2,1 mm oraz ekranowane gniazdo wyjściowe typu Mini-DIN. Drugi z prototypów, wykonany na płycie drukowanej o rozmiarach (120 x 55) mm jest przeznaczony do instalacji wewnątrz aparatury. Tę wersję wyposażono w gniazda wejściowe i wyjściowe w formie złączy szpilkowych Molex KK254. Uzwojenie sprzęgające oba transformatory wykonano w postaci 5 zwojów z posrebrzanej linki miedzianej w izolacji teflonowej. Obwody wejściowy i wyjściowy zostały umieszczone w ekranach miedzianych o grubości 0,5 mm, obejmujących płytkę obustronnie, pełniących także rolę radiatorów, rozpraszających ciepło generowane przez tranzystory kluczujące, transformatory i elementy mocy wyjściowych układów stabilizujących (rysunek 2). Otwór widoczny w górnej pokrywie ekranu obwodu wyjściowego umożliwia łatwy dostęp do potencjometru w układzie symetryzatora.



Rys. 2. Widok prototypu zasilacza z ekranami (bez obudowy)

Badania prototypu zasilacza

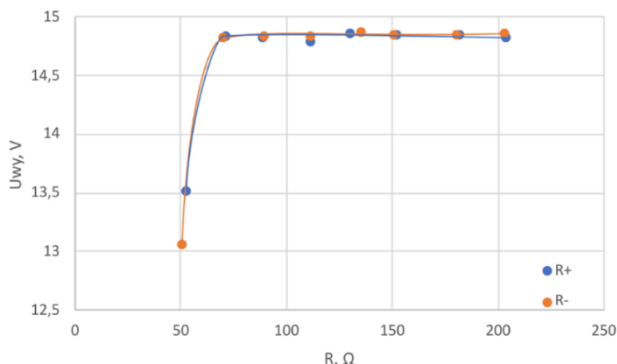
Prototyp zasilacza zbadano celem weryfikacji spełnienia wymagań projektowych. Wykonano także szereg badań dodatkowych, opisujących parametry użytkowe urządzenia. Na rysunku 3 przedstawiono oscylogramy przebiegów napięcia wejściowego (kolor żółty) oraz napięcia wyjściowego przetwornicy dla symetrycznego obciążenia 50 Ω , zarejestrowane podczas rozruchu przetwornicy.



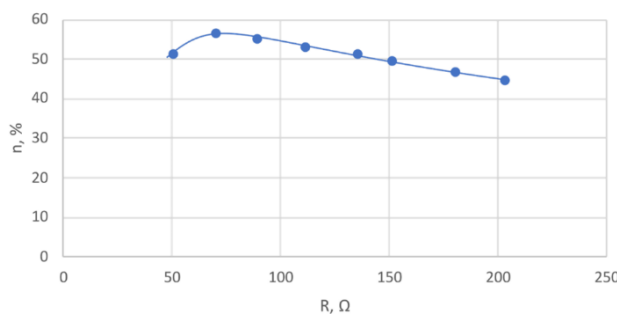
Rys. 3. Oscylogramy napięć w fazie rozruchu układu dla obciążenia 50 Ω po stronie dodatniej i ujemnej

Wzrost obciążenia zasilacza powodował wydłużanie czasu jego rozruchu, jednak czas ten nie przekroczył 30 ms dla maksymalnego prądu wyjściowego. Zjawisko ma związek z funkcją miękkiego startu, realizowanego przez kontroler przetwornicy.

W celu wyznaczenia sprawności układu oraz weryfikacji zabezpieczeń ograniczających prąd, wykonano próby obciążeniowe, których wyniki przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Stwierdzono poprawność działania zabezpieczenia przed przeciążeniem, które ogranicza prąd do poziomów dopuszczalnych, zaś napięcie wyjściowe jest stabilizowane w zakresie pracy nominalnej. Urządzenie osiąga założony poziom sprawności, wynoszący około 57%.

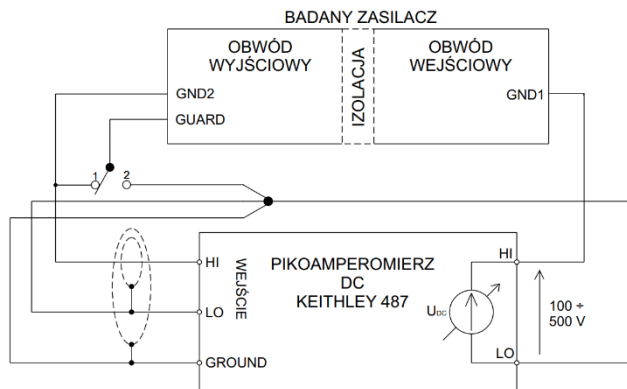


Rys. 4. Napięcie wyjściowe w funkcji rezystancji obciążenia dla kanału +15 V



Rys. 5. Sprawność w funkcji rezystancji obciążenia dla kanału +15 V

Badania składowych impedancji, wydają się być najistotniejsze, co wynika z tytułu pracy. Pomiar rezystancji między obwodem wejściowym i wyjściowym wykonano z użyciem pikoamperomierza prądu stałego Keithley 487, wyposażonego w wewnętrzne źródło napięcia stałego. Schemat układu pomiarowego przedstawia rysunek 6. Pomiar wykonano w temperaturze 23,4°C, przy wilgotności względnej powietrza równej 35,2% RH i przy napięciu pomiarowym DC z zakresu (100 ÷ 500) V. Wyniki zawarto w tabeli 1.



Rys. 6. Schemat układu do pomiaru rezystancji między obwodem wejściowym i wyjściowym zasilacza

Pomiar impedancji między obwodem wejściowym a wyjściowym zasilacza wykonano za pomocą miernika

impedancji Hioki 3532-50 w przedziale częstotliwości od 110 Hz do 1 MHz oraz przy napięciu pomiarowym o wartości skutecznej + 5 V w dwóch konfiguracjach:

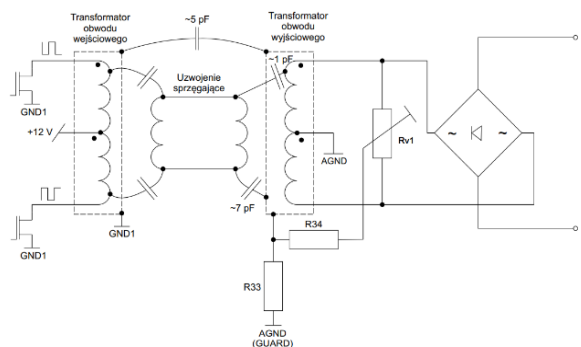
- dla ekranu GUARD połączony z zaciskiem GUARD miernika impedancji,
- dla ekranu GUARD połączony z masą GND2 obwodu wyjściowego zasilacza.

Tabela 1. Wyniki pomiaru rezystancji między obwodem wejściowym i wyjściowym prototypu zasilacza

Napięcie V	Ekran GUARD połączony z masą GND2		Ekran GUARD połączony z zaciskiem GROUND pikoamperomierza	
	I (pA)	R (TΩ)	I (pA)	R (TΩ)
100	<10	>10	<1	>100
200	<5	>40	<1	>200
300	<15	>20	<1	>300
400	<10	>40	<1	>400
500	<15	>33	<0,5	>1000

Wyniki pomiaru impedancji zestawiono w tabeli 2. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można wysunąć wniosek, iż bez wykorzystania możliwości, jakie daje ekran ochronny, pojemność między obwodem wejściowym, a wyjściowym jest równa około 12,5 pF. Połączenie ekranu ochronnego z zaciskiem GUARD miernika RLC, minimalizuje pojemność do około 7,5 pF. Pozostała wartość jest pojemnością między uzwojeniem sprzęgającym, a uzwojeniem wtórnym oraz rdzeniem ferrytowym transformatora Tr2 (rysunek 7).

Energia z obwodu wejściowego do wyjściowego zasilacza powinna być przekazywana wyłącznie polem magnetycznym uzwojenia sprzęgającego. Przetwornica zasilacza pracuje z częstotliwością taktowania równą około 25 kHz. Przez pojemności między Tr1 oraz Tr2 przenika prąd do obwodu wyjściowego o częstotliwości taktowania przetwornicy i jej harmonicznych. Prąd ten jest tzw. „prądem upływu AC” (ang. *self-induced AC leakage current*). Parametr ten różni się od prądów upływu, podawanych przez producentów zasilaczy impulsowych tym, iż uwzględnia on jedynie składowe prądu upływu spowodowane sygnałami taktującymi układ przetwornicy. W celu wyeliminowania innych przyczyn powstawania tego prądu, do zasilania prototypu na czas badań użyto akumulatora o napięciu 12 V, umieszczonego w ekranie ochronnym, który został połączony z masą GND1 obwodu wejściowego zasilacza.



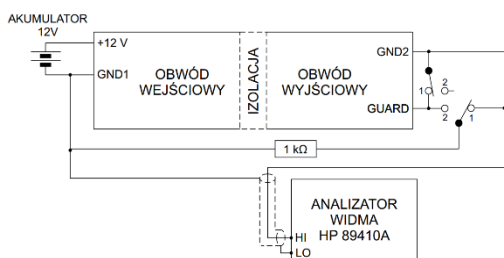
Rys. 7. Uproszczony schemat fragmentu badanej przetwornicy z zaznaczonymi pojemnościami pasozytniczymi

Zmniejszenie efektu przenikania prądu przez pojemności z rysunku 7, umożliwia układ złożony z elementów RV1, R34 i R33.

Tabela 2. Wyniki pomiaru impedancji między obwodem wejściowym i wyjściowym prototypu zasilacza

Częstotliwość kHz	Ekran GUARD zasilacza połączony z zaciskiem GUARD miernika impedancji		Ekran GUARD zasilacza połączony z masą GND2 zasilacza	
	C _p (pF)	R _p (GΩ)	C _p (pF)	R _p (GΩ)
0,110	7,82	7,6	12,7	7,6
0,220	7,76	5,1	12,7	5,4
0,440	7,70	3,3	12,6	3,6
1,01	7,68	2,1	12,6	3,6
2	7,64	1,2	12,6	2,3
5	7,61	0,57	12,5	0,68
10	7,59	0,31	12,5	0,20
20	7,58	0,15	12,5	0,13
50	7,55	0,072	12,4	0,068
100	7,54	0,032	12,4	0,032
200	7,49	0,018	12,4	0,015
500	7,50	0,0046	12,4	0,0041
1000	7,59	0,0015	12,7	0,0015

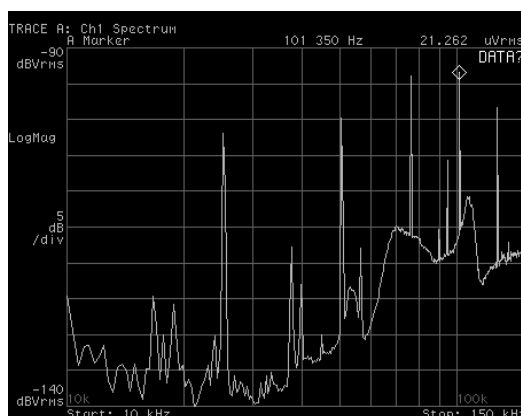
Potencjometrem RV1 doprowadza się sumę napięć z obu połówek uzwojenia wtórnego do rezystancyjnego dzielnika napięcia, złożonego z rezystorów R34 i R33. Napięcie z wyjścia tego dzielnika jest doprowadzone do ekranu między uzwojeniem sprzęgającym a wtórnym transformatora w obwodzie wyjściowym zasilacza, przez co napięcie asymetrii pojawiające się na pasożytniczej pojemności sprzęgającej jest kompensowane napięciem na wyjściu dzielnika. Dobór nastawy potencjometru RV1 umożliwia zmniejszenie prądu upływu AC między obwodem wejściowym a wyjściowym zasilacza do wartości skutecznej mniejszej od 20 nA. Pomiar tak małych wartości prądu przemiennego ułatwia jego uprzednia konwersja na spadek napięcia, a następnie zastosowanie do jego pomiaru analizatora widma. Schemat układu realizującego pomiar pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Schemat układu do pomiaru prądu upływu AC

Układ kompensacji pozwala na prawie dziesięciokrotne zmniejszenie wartości skutecznych składowych harmonicznych prądu upływu AC o częstotliwości taktowania przetwornicy. Rysunek 9 przedstawia pierwsze 5 harmonicznych prądu upływu AC po jego skompensowaniu układem z rysunku 7. Wartości skuteczne składowych harmonicznych i szumów zmierzono na wszystkich wyjściach układu w paśmie 10 kHz ÷ 1 MHz analizatorem

HP 89410A, przy wykorzystaniu modułu pomiarowego, opisanego w rozdziale 4.1 [7].

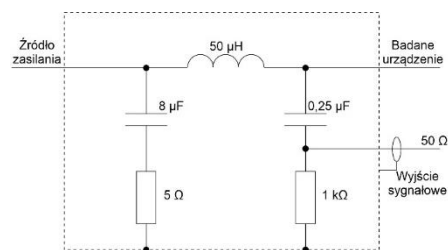


Rys. 9. Pierwsze pięć składowych harmonicznych prądu upływu AC po jego skompensowaniu układem z Rys. 7 (1 μV ∝ 1 nA). Dominuje 4 harmoniczna częstotliwości taktowania przetwornicy

W trakcie pomiarów badany układ prototypowy zasilano z akumulatora 12 V, umieszczonego w aluminiowym ekranie ochronnym. Ekran połączono z ekranem obwodu wejściowego przetwornicy, który jest na płycie drukowanej połączony z masą GND1. Dominującymi składowymi na wyjściach +15 V oraz -15 V zasilacza były drugie harmoniczne częstotliwości taktowania przetwornicy o wartościach skutecznych równych odpowiednio 22 μV oraz 188 μV. Dominującą harmoniczną na wyjściu +5 V stabilizatora była trzecia harmoniczna częstotliwości taktowania przetwornicy o wartości skutecznej równej około 500 μV. Wyniki pomiarów potwierdzone eksperymentalnie, wskazują na możliwość zmniejszenia tych składowych przez modyfikację mozaiki ścieżek obwodu drukowanego.

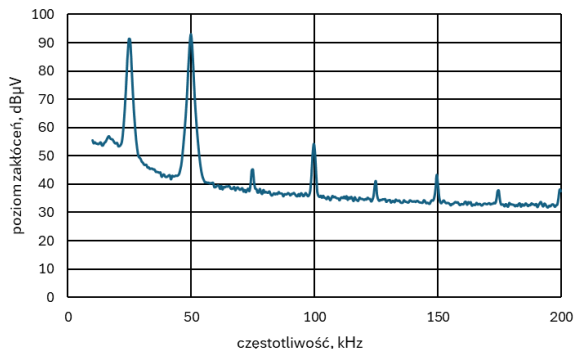
Osobna grupa badań prototypowego urządzenia była związana z analizą kompatybilności elektromagnetycznej (KEM) w zakresie pomiarów poziomów emisji przewodzonej i promieniowanej oraz wybranych testów odporności na zaburzenia. Wersja komercyjna przetwornicy powinna spełniać założenia Dyrektywy Kompatybilności Elektromagnetycznej 2014/30/UE. Badania KEM miały charakter rekonesansowy i nie dotyczyły wydania deklaracji zgodności urządzeniu, a co za tym idzie, stanowiska pomiarowe i wykorzystane procedury mogły odbiegać od wytycznych, stawianych przez normy ogólne i przedmiotowe. Otrzymane wyniki służą m.in. do identyfikacji źródeł zaburzeń i ewentualnego podjęcia prób ich minimalizacji w dalszych modyfikacjach prototypu urządzenia.

Pomiary poziomów emisji przewodzonej wykonano zgodnie z wytycznymi i konfiguracją stanowiska normy [5]. Wykorzystano w nich sztuczną sieć pomiarową z rysunku 10.

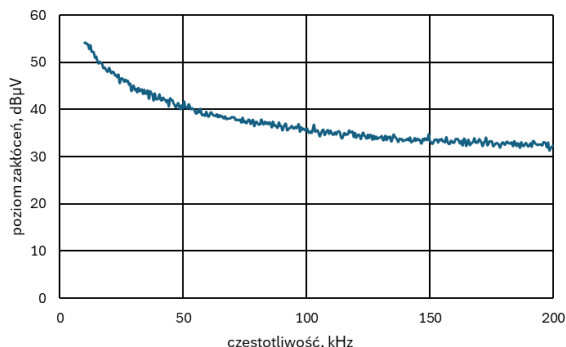


Rys. 10. Schemat sztucznej sieci pomiarowej [5]

Zalecane pasmo częstotliwości analizy wynosiło $10 \text{ kHz} \div 10 \text{ MHz}$. Szczegółowej analizie poddano zakres częstotliwości z przedziału $10 \text{ kHz} \div 200 \text{ kHz}$, pokrywający częstotliwości robocze przetwornicy. Układ zasilono z akumulatora o napięciu 12 V z wyjściami obciążonymi symetrycznie rezystorami mocy $2 \times 50 \Omega$. Pomiar emisji wykonano niezależnie w liniach wyjściowych „+” oraz „-”. Sprawdzone także wpływ uziemienia stanowiska pomiarowego na wyniki pomiarów. Różnice konfiguracyjne nie wykazywały zmian większych niż $5 \text{ dB}(\mu\text{V})$, a układ uziemiony cechował się silniejszym tłumieniem zaburzeń o wyższych częstotliwościach. Przykładowe wyniki pomiarów emisji pokazano na rysunkach 11 i 12, które prezentują widma zakłóceń po stronie ujemnej zasilacza w paśmie $10 \text{ kHz} \div 200 \text{ kHz}$.



Rys. 11. Widmo zakłóceń w linii ujemnej zasilacza zmierzone w paśmie częstotliwości $10 \text{ kHz} - 200 \text{ kHz}$



Rys. 12. Widmo tła elektromagnetycznego (zasilacz wyłączony) w linii ujemnej zmierzone w paśmie częstotliwości $10 \text{ kHz} - 200 \text{ kHz}$

Zbliżone wyniki otrzymano dla pozostałych wyjść zasilacza. Widoczne w widmach wartości dominujące, odpowiadają częstotliwościom parzystych harmonicznych częstotliwości taktowania tranzystorów kluczujących. Zidentyfikowany szum o charakterze widma ciągłego osiąga maksymalnie poziom około $8 \text{ dB}(\mu\text{V})$.

Pomiary poziomów emisji promieniowanej obejmowały analizę oddziaływań w dystansie 1 m między zasilaczem, a anteną dookólną, współpracującą z analizatorem widma Hameg HM5530 oraz z wykorzystaniem aktywnej sondy składowej elektrycznej Hameg HZ551, współpracującej z powyższym analizatorem, za pomocą której wykonano skanowanie pola elektromagnetycznego nad płytką obwodu drukowanego. Pomiar wykonano w paśmie częstotliwości $150 \text{ kHz} \div 1 \text{ GHz}$, nie obserwując znaczących różnic w odniesieniu do tła elektromagnetycznego [6]. W ramach badań KEM wykonano wybrane testy odporności prototypu na zaburzenia. Układ poddano testom na szybkie elektryczne stany przejściowe (EFT/Burst) wprowadzane do linii zasilającej przetwornicę z poziomami $\pm 2 \text{ kV}$ oraz testy na wyładowania elektrostatyczne (ESD) z poziomami $\pm 8 \text{ kV}$ dla wyładowań powietrznych oraz $\pm 4 \text{ kV}$ dla wyładowań kontaktowych do gniazd obudowy i do jej powierzchni. W przypadku obu badań, zaobserwowano zakłócenia w napięciach wyjściowych, jednak po ustaniu zaburzeń układ pracował poprawnie (kryterium oceny B).

Podsumowanie

Opracowany układ zasilacza charakteryzuje się relatywnie małą masą i gabarytami w porównaniu z układami zawierającymi baterie, akumulatory czy transformatory i cechuje go względnie mała wartość generowanych zaburzeń elektromagnetycznych oraz szumów. Rezystancja DC zmierzona między obwodem wejściowym zasilacza, przy napięciu pomiarowym 500 V jest większa od $10 \text{ T}\Omega$. Pojemność między obwodem wejściowym i wyjściowym, mniejsza od 13 pF , jest o około dwa rzędy niższa od pojemności występującej między obwodem wejściowym i wyjściowym komercyjnych zasilaczy impulsowych do zastosowań medycznych. Pojemność tę można zmniejszyć do około 8 pF przez odpowiednie połączenie ekranu ochronnego obwodu wyjściowego zasilacza. Zauważono, że krytycznym elementem, wpływającym na powyższą pojemność może być rodzaj i kształt metalowej obudowy, która wprowadza dodatkowe pojemnościowe sprzężenie między obwodami. Minimalizacja tego efektu będzie jednym z kierunków dalszych badań. Część eksperymentalna pracy obejmowała również pomiary zależności temperatury wybranych parametrów, co ma związek z doбором optymalnej metody chłodzenia w docelowej wersji urządzenia.

Praca została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki (Projekt o nr. 2022/47/B/ST7/00047)

Autorzy: inż. Jakub Malczyk, student Politechniki Śląskiej, Wydział Elektryczny, E-mail: jakubmalczyk2@gmail.com; prof. dr hab. inż. Marian Kampik, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: marian.kampik@polsl.pl, dr inż. Damian Gonszcz, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: damian.gonszcz@polsl.pl.

LITERATURA

- [1] <https://www.analog.com/en/products/lt1683.html>, strona ze specyfikacją układu LT1683: Slew Rate Controlled Ultralow Noise Push-Pull DC/DC Controller, dostęp: 22.01.2025
- [2] <https://www.analog.com/en/products/lt3045-1.html>, strona ze specyfikacją układu LT3045-1: 20V, 500mA, Ultralow Noise, Ultrahigh PSRR Linear Regulator with VI OC Control, dostęp: 22.01.2025
- [3] <https://www.analog.com/en/products/lt3094.html>, strona ze specyfikacją układu LT3094: -20V, 500mA, Ultralow Noise, Ultrahigh PSRR Negative Linear Regulator, dostęp: 22.01.2025
- [4] Ivanovic Z., Knezic M., Modeling Push-Pull Converter for Efficiency Improvement, MDPI, Electronics, Basel, Switzerland, 2022
- [5] Norma MIL-STD-461E, Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment, Department of Defense Interface Standard, USA, 1999
- [6] Morgan D., A handbook for EMC testing and measurement, The Institution of Engineering and Technology, UK, 20
- [7] Malczyk J., Projekt inżynierski: „Zasilacz impulsowy o dużej impedancji między obwodem wejściowym i wyjściowym”, Gliwice, 2025