

GENERACJA I PROPAGACJA ZABURZEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH W NIEIZOLOWANYCH PRZETWORNICACH AC/DC MAŁEJ MOCY

Wiesław SABAT¹, Kazimierz KURYŁO², Dariusz KLEPACKI³, Kazimierz KAMUDA⁴

Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki

1. tel.: 17 865-12-39, e-mail: wsabat@prz.edu.pl,
2. e-mail: kkurylo@prz.edu.pl
3. e-mail: dklepa@prz.edu.pl
4. e-mail: kazik @prz.edu.pl

Streszczenie: W opracowaniu zostały zaprezentowane wyniki prac doświadczalnych jakie zostały przeprowadzone dla modelowej nieizolowanej przetwornicy AC/DC małej mocy. W ramach prac doświadczalnych zbadano jakie czynniki mają wpływ na poziom i charakter generowanych zaburzeń przewodzonych. Na przykładzie modelowej przetwornicy pokazano jak generowane są zaburzenia, jak są propagowane w jej układzie oraz jak stopień i charakter jej obciążenia wpływa na poziom generowanych zaburzeń. Docelowo układ zasilacza ze sterownikiem VIPer16L został wykorzystany w układzie regulatora obrotów silnika w aplikacji AGD.

Słowa kluczowe: Nieizolowane przetwornice AC/DC, kompatybilność elektromagnetyczna, zaburzenia przewodzone

1. WPROWADZENIE

Wśród szerokiej gamy urządzeń elektrycznych i elektronicznych zasilanych z sieci elektroenergetycznej jest pewna grupa, która jest zasilana przy wykorzystaniu tzw. zasilaczy beztransformatorowych. Są one używane do zasilania podzespołów elektroinstalacyjnych, regulatorów, układów automatyki budynkowej, czujników światła, dymu, systemów zdalnego sterowania, programatorów czasowych, sprzętu powszechnego użytku AGD, jak i elementów techniki oświetleniowej, itp. Do niedawna w takich aplikacjach wykorzystywane były zasilacze beztransformatorowe pasywne, w których jako element ograniczający prąd stosowano kondensator, a w uzasadnionych przypadkach także rezystory. Wraz ze wzrostem wymagań w zakresie sprawności energetycznej układów zasilających (amerykańska dyrektywa Energy Star i europejska regulacja EuP Lot 6 tier 2 w zakresie ekoproduktów), a także potrzebą większej ich miniaturyzacji, pasywne zasilacze beztransformatorowe okazały się mniej efektywne. Kondensator, rezystor na którym obniżane jest napięcie sieci jest duży, a sam układ nie daje możliwości rozbudowy funkcjonalności w aspekcie np. dodania zabezpieczeń zwarciovych, przepięciowych, funkcji miękkiego rozruchu czy blokady działania w czasie uśpienia aplikacji. Stabilizacja napięcia wyjściowego w układzie pasywnego zasilacza beztransformatorowego, jest trudna do realizacji, bo w praktyce wymaga dodania

stabilizatora liniowego. Element ten pogarsza sprawność układu i zwiększa gabaryty finalnego urządzenia.

Wychodząc naprzeciw tym wyzwaniom czołowi producenci podzespołów elektronicznych dedykowanych do budowy zasilaczy impulsowych (ST Microelectronics, Power Integration, NPX, Linear Technologies, Texas Instruments itp.) wprowadzili do swej oferty klasę sterowników impulsowych dedykowanych do budowy aplikacji zasilaczy beztransformatorowych. W ofercie firmy ST Microelectronics można znaleźć sterowniki z rodziny VIPerPlus. Sterowniki VIPerPlus to druga generacja układów zasilających, które wykonane są w opracowanej przez ST Microelectronics technologii BCD (Bipolar-CMOS-DMOS). Pozwala ona na jednej strukturze scalonej zintegrować sterownik PWM, obwody logiczne i zabezpieczające z wysokonapięciowym tranzystorem MOSFET. Układy te charakteryzują się bardzo małym poborem mocy w stanie czuwania (< 4 mW). Osiągnięto to za pomocą elastycznego schematu modulacji, w którym sterownik automatycznie przełącza się z modulacji PWM (szerokości impulsu) na modulację częstotliwości impulsu przy małym obciążeniu. Przy całkowitym braku obciążenia, modulator przełącza się w tryb gubienia impulsów, aby ograniczyć pobór mocy ze źródła. W ramach rodziny układów dostępnych jest kilka serii (VIPerPlus 01, 06, 16, 26) o różnych parametrach funkcjonalnych. Wszystkie są zasilane z napięcia sieci 230 VAC.

Niestety procesowi konwersji energii w obwodach zasilacza impulsowego towarzyszy zjawisko generacji zaburzeń elektromagnetycznych. Jest to proces nieunikniony i jest on powiązany z procesem komutacji energii. Konieczność dostosowania poziomu generowanych zaburzeń do wymagań określonych w standardach, związana jest z potrzebą określenia czynników, które są przyczyną tych zjawisk. O randze i znaczeniu tego problemu świadczy tematyka wielu publikacji i opracowań naukowych [1, 2].

2. KOMPATYBILNOŚCI ELEKTROMAGNETYCZNA PRZETWORNIC AC/DC

Współczesny trend w projektowaniu przetwornic zarówno AC/DC, jak i DC/DC to osiągnięcie dużej wartości

współczynnika gęstości komutowanej energii na jednostkę powierzchni układu [4, 5], uzyskanie dużej sprawności komutacji energii, minimalizacja generacji zaburzeń elektromagnetycznych, bezpieczeństwo użytkownika urządzeń, w których wbudowane są przetwornice. Zwiększenie współczynnika gęstości komutowanej energii jest możliwe poprzez zwiększenie częstotliwości komutacji energii. Niewątpliwie ten zabieg pozwala na zmniejszenie gabarytów i wagi przetwornic ale w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej, problemy z generacją zaburzeń elektromagnetycznych stają coraz bardziej krytyczne.

Proces generacji zaburzeń elektromagnetycznych przez przetwornice impulsową jest uwarunkowany ich budową i zasadą działania. Impulsowy charakter poboru energii z sieci, konieczność szybkiego komutowania tranzystorem mocy w celu ograniczenia w nim strat cieplnych, obecność elementów pasożytniczych w rzeczywistej strukturze układu sprawia, że w stanie pracy przetwornicy generowane są zaburzenia, których poziom jest zależny od wymienionych czynników. Wprowadzając urządzenie elektryczne, elektroniczne do obrotu zgodnie z wymaganiami obowiązującej dyrektywy EMC 2014/30/WE muszą one charakteryzować się poziomem emisji i odporności na znormalizowane rodzaje zaburzeń elektromagnetycznych określonym w przedmiotowych normach.

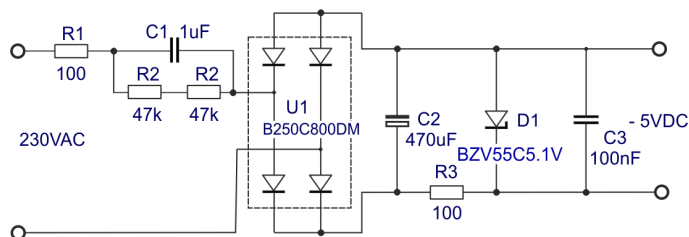
W przypadku impulsowych przetwornic AC/DC i DC/DC nie ma możliwości aby całkowicie wyeliminować proces generacji zaburzeń elektromagnetycznych. Dlatego stosownie do środowiska pracy urządzenia w standardach ogólnych i produktowych w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej definiowane są dopuszczalne poziomy emisji zaburzeń przewodzonych, jak i promieniowanych. Dobrą praktyką inżynierską jest aby projektowane urządzenie posiadało poziom emisji o $8 \div 10$ dB niższy od wartości określonych w normach. Aby zapewnić zgodną koegzystencję urządzeń w środowisku mieszkaniowym i przemysłowym obecnie analiza emisji zaburzeń elektromagnetycznych jest prowadzona od podstawowej harmonicznej napięcia zasilającego do 6 GHz. W paśmie do 2.5 kHz analizowane są harmoniczne prądu i napięcia. Zakres zaburzeń radiowych od 9 kHz do 6 GHz jest dzielony na dwa podzakresy - stosownie do mechanizmów propagacji zaburzeń. W paśmie częstotliwości od 9 kHz do 30 MHz określone są zaburzenia przewodzone, natomiast od 30 MHz do 6 GHz zaburzenia promieniowane.

2. NIEIZOLOWANA PRZETWORNICA AC/DC

Wieloletnia współpraca autorów z producentami sprzętu powszechnego użytku w zakresie rozwiązywania problemów kompatybilności elektromagnetycznej pozwoliła zauważyć, że w rozwiązaniach układowych prostych sterowników do urządzeń, tj. odkurzacze, miksery, melaksery, roboty itp. odchodzi się od pasywnych nieizolowanych przetwornic AC/DC na korzyść przetwornic impulsowych. Niewątpliwie szereg dodatkowych funkcji takich jak zabezpieczenie termiczne, funkcja miękkiego startu, automatycznego restartu po przeciążeniu oraz zabezpieczenia przed przeciążeniem i zwarciami przemawiają za ich wykorzystaniem, pomimo większych problemów w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej.

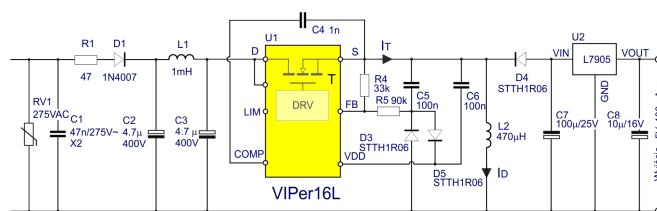
Zaprezentowana na rysunku 1 aplikacja zasilacza pasywnego jest bardzo korzystna z punktu widzenia kompatybilności elektromagnetycznej. Układ taki nie

generuje zaburzeń radiowych poza harmonicznymi uwarunkowanymi pracą prostownika U_1 . Przetwornice takie najczęściej wykorzystywane są do zasilania mikrokontrolerów, układów kondycjonujących czy wykonawczych, szczególnie w aplikacjach, w których procesor steruje bezpośrednio bez optoizolacji pracą triaka lub tyrystora.



Rys.1. Przykładowa aplikacja układu zasilacza, np. mikroprocesorowego sterownika silnika uniwersalnego do sprzętu powszechnego użytku

Jedną z alternatyw dla takiego układu może być aplikacja z uniwersalnym sterownikiem VIPer16L lub H firmy ST Microelectronics [3]. Układ ten został wykorzystany do zbudowania modelowego zasilacza. W docelowej aplikacji zasilacz został wykorzystany do zasilania mikrokontrolera z rodziny STM8 sterującego pracą triaka w układzie zasilania silnika uniwersalnego. Układ docelowo będzie wykorzystywany pracował w środowisku mieszkaniowym. Dla aplikacji tej przeprowadzono badania, które pozwoliły na poznanie mechanizmu generacji zaburzeń przez modelowy układ zasilacza.



Rys.2. Modelowa aplikacja beztransformatorowego zasilacza impulsowego ze sterownikiem VIPer16L

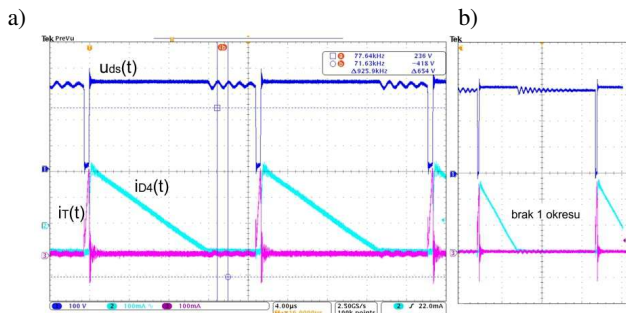
W przestawionej na rysunku 2 aplikacji zasilacz od strony wejścia zawiera człon zabezpieczający układ przed zaburzeniami impulsowymi złożony z warystora RV_1 i kondensatora C_1 . Dioda D_1 pełni rolę prostownika napięcia sieciowego. Elementy L_1 , C_2 i C_3 pełnią rolę filtra EMI ograniczającego poziom zaburzeń przewodzonych generowanych przez układ. Dławik L_2 , dioda D_4 i kondensator C_7 stanowią podstawowe elementy przetwornicy odpowiedzialne za proces konwersji energii.

W fazie włączenia tranzystora T sterownika, energia gromadzona jest w polu magnetycznym dławika L_2 . Prąd w indukcyjności narasta liniowo (Rys. 3.). Po wyłączeniu tranzystora przełączającego zanika on również liniowo.

Stan ten powoduje indukowanie się na zaciskach dławika napięcia o przeciwnej biegunowości. Skutkuje to ładowaniem się wyjściowego kondensatora gromadzącego C_7 poprzez przewodzącą diodę D_4 . Omawiany układ zaliczany jest do klasy przetwornic zaporowych, gdyż energia jest przekazywana do obciążenia przy wyłączonym tranzystorze. Napięcie na wyjściu może być utrzymywane na stałym poziomie poprzez odpowiednią zmianę współczynnika wypełnienia impulsu sterującego

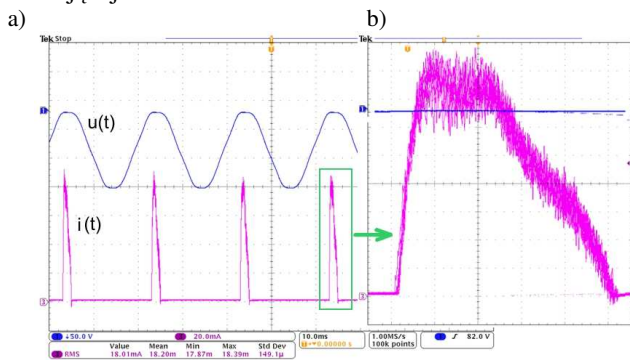
tranzystorem. W stanie zmniejszenia obciążenia sterownik przechodzi w tryb gubienia impulsów (Rys.3b). Przy stałej wartości współczynnika wypełnienia w zależności od stopnia obciążenia w wybranych chwilach wynikających z częstotliwości pracy przetwornicy, tranzystor kluczujący nie jest załączany [4, 5].

Na rysunku 3b przedstawiono przypadek, w którym przetwornica była obciążona mocą o wartości $0.5 \cdot P_n$. W tym stanie układ pracuje w sekwencji 3:2.



Rys.3. Przebieg napięcia $u_{DS}(t)$ na zaciskach tranzystora sterownika i prądu $i_T(t)$ oraz prądu $i_{D4}(t)$ w stanie obciążenia a) znamionowego $P = P_n$, b) $P = 0.5 \cdot P_n$

Na trzy okresy pracy, przez dwa jest załączany. Impulsowy charakter przebiegów napięcia i prądu, równoważne mu widmo harmonicznych ma swe odzwierciedlenie w generowanych zaburzeniach do sieci zasilającej.



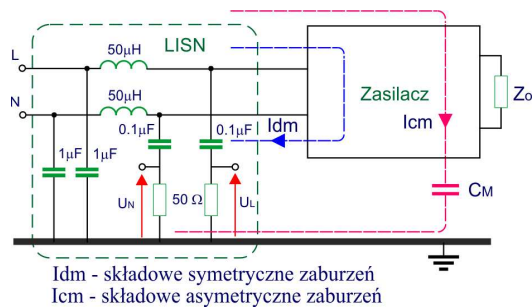
Rys.4. a) Przebieg napięcia i prądu w obwodzie prostownika przetwornicy, b) powiększenie przebiegu prądu

Tranzystor kluczujący, który jest pomostem pomiędzy źródłem zasilania i obciążeniem ma istotny udział w propagacji zaburzeń w stronę źródła zasilania. Efekt ten można bezpośrednio zaobserwować na przebiegach prądu po stronie zasilania. Sam przebieg prądu ma charakter impulsowy o częstotliwości 50 Hz. Jego wartość i przebieg jest uzależniony od pojemności kondensatorów C_2 , C_3 , indukcyjności dławika L_2 oraz parametrów wejściowych i stanu obciążenia przetwornicy. W powiększeniu (Rys.4b), na zboczu przebiegu prądu można zaobserwować składowe w.c.z., które są konsekwencją impulsowej pracy przetwornicy. Ich wartość ma bezpośrednie przełożenie na poziom generowanych zaburzeń przewodzonych i promieniowanych przez przetwornicę.

3. ANALIZA ZABURZEŃ GENEROWANYCH PRZEZ MODELOWĄ PRZETWORNICĘ

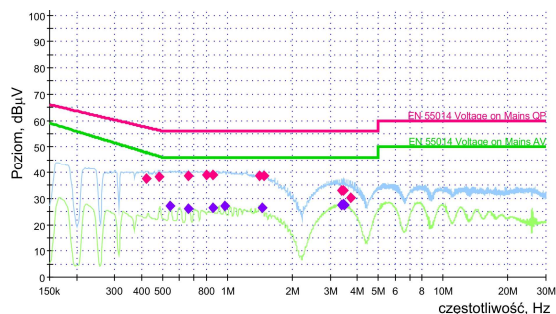
Ocena zgodności każdego urządzenia elektrycznego i elektronicznego z wymaganiami dyrektywy EMC wymaga

określenia jego poziomu emisji i odporności na znormalizowane rodzaje zaburzeń elektromagnetycznych. W zakresie emisji przewodzonej jej pomiar jest realizowany przy wykorzystaniu stabilizatora impedancji LISN typu V (ang. Line Impedance Stabilization Network) i odbiornika wyposażonego w detektory wartości szczytowej, quasi wyszycowej i średniej. Przy wykorzystaniu sieci typu V mierzone są asymetryczne składowe przebiegów zaburzeń (Rys.5.). Zmierzone poziomy emisji względem tzw. ziemi odniesienia dla badanego urządzenia są odnoszone do wartości dopuszczalnych określonych w przedmiotowych normach.



Rys.5. Schemat elektryczny układu do pomiaru napięcia zaburzeń z wykorzystaniem sztucznej sieci typu V

Uzyskane wyniki badań dla modelowej przetwornicy zostały odniesione do wartości określonych w standardzie PN-EN 55014-1 [6]. Postępując zgodnie z procedurą opisaną w standardzie przeprowadzono pomiary dla modelowej przetwornicy. Konfiguracja stanowiska pomiarowego i aparatury pomiarowej została wykonana zgodnie z zapisami zawartymi w normie. Pomiary zostały przeprowadzone w zakresie częstotliwości od 150 kHz do 30 MHz. Analiza została przeprowadzona dla reprezentatywnych stanów obciążenia badanej przetwornicy.



Rys.6. Wyniki pomiaru emisji zaburzeń przewodzonych dla modelowej przetwornicy dla pełnego jej obciążenia $P=P_n$ (6 W), $I_o=100$ mA

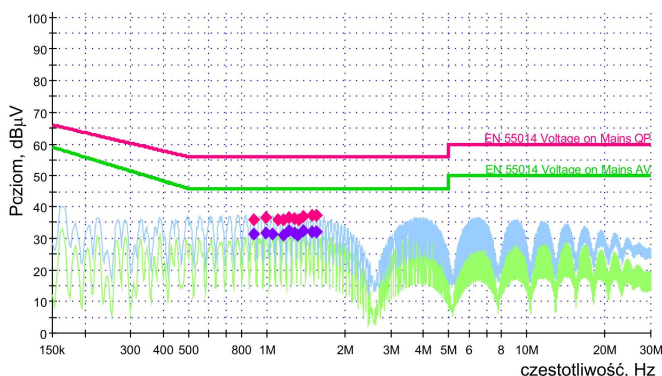
Analizując uzyskane wyniki emisji zaburzeń przewodzonych można stwierdzić, że modelowa przetwornica spełnia wymagania określone w standardzie. Przy obciążeniu prądem znamionowym (100 mA), odbiornikiem o charakterze rezystancyjnym uzyskano min. 15 dB zapasu względem wartości dopuszczalnych (Rys.6). Poszczególne harmoniczne widoczne w początkowej części widma dla częstotliwości 175 kHz, 230 kHz, 285 kHz itd. to odpowiednio trzecia, czwarta piąta itd. harmoniczna przebiegu prądu w obwodzie mocy sterownika. Przetwornica w wersji L, zgodnie z danymi katalogowymi pracuje z

częstotliwością 60 kHz i dewiącją częstotliwości 12 kHz. Ze względu na zaimplementowany w sterowniku proces

jitteringu, harmoniczne obserwowane w widmie posiadają charakterystyczne rozmycie. Dla częstotliwości ok. 2,2 MHz i jej krotności w widmie są obserwowane charakterystyczne minima.

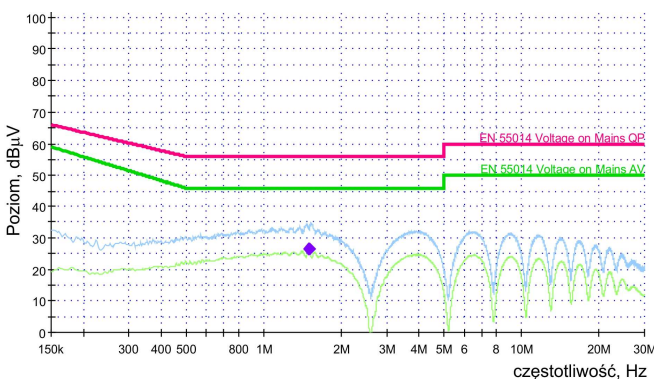
Ich wartość jest skorelowana z czasem włączenia tranzystora przetwornicy. Dla obciążenia mocą znamionową, czas ten wynosi 470ns. To, że obserwowane widmo ma w przeważającej części charakter ciągły jest efektem zaimplementowanej techniki PWM i modulacji sygnału zegara sterownika.

Zmniejszając obciążenie przetwornicy, wchodzi ona w tryb gubienia impulsów. Stąd też dla obciążenia jej połową mocy dopuszczalnej w całym widmie widoczne są wyraźne harmoniczne. Fizycznie w wyniku wypadania impulsów zmniejsza się wartość wypadkowej częstotliwości pracy przetwornicy.



Rys.7. Wyniki pomiaru emisji zaburzeń przewodzonych dla modelowej przetwornicy dla pełnego jej obciążenia $P = 0.5 P_n$ (3 W), $I_o=50$ mA

Jak prezentują to wyniki zamieszczone na rysunku 7, zmniejszenie mocy o połowę pozwala wynikowo na zwiększenie marginesu zaburzeń o kolejne 5 dB. Zmniejszając zapotrzebowanie na energię na wyjściu zasilacza, sterownik zmniejsza czas wysterowania tranzystora. Dla $P=0,5 P_n$ czas zmniejsza się do ok. 400ns. W wyniku tego przesunięcia w widmie uległ punkt pierwszego minimum na ok. 2,5 MHz.



Rys.8. Wyniki pomiaru emisji zaburzeń przewodzonych dla modelowej przetwornicy obciążonej mikrokontrolerem STM8 i jego układami peryferyjnymi

W ostatnim etapie badań modelowa przetwornica została obciążona mikrokontrolerem ośmiobitowym STM8S103F2P6 z zaimplementowanym programem sterowania fazowego pracą triaka, kontroli klawiatury, wskaźnika poziomu mocy i wprowadzonymi stosownymi elementami przeciwzakłóceniovymi. Wybrany do budowy sterownika mikrokontroler i wskaźnik wysterowania, pobierając z przetwornicy moc ok. $0.1 \cdot P_n$ nie posiada istotnego wpływu na pracę modelowej przetwornicy. Jak prezentują to wyniki pomiarów przedstawione na rysunku 8 przebieg zaburzeń generowany do sieci jest uwarunkowany pracą samej przetwornicy.

4. WNIOSKI

Przeprowadzona analiza dla modelowej przetwornicy pozwoliła wykazać, że proces generacji przez nią zaburzeń elektromagnetycznych jest uwarunkowany jej stanami pracy i charakterem obciążenia.

W kolejnych publikacjach autorzy zamierzają przedstawić ten problem od strony teoretycznej. Na modelu symulacyjnym zostaną pokazane aspekty generacji i propagacji zaburzeń elektromagnetycznych przez modelową przetwornicę.

5. BIBLIOGRAFIA

1. R. Redl, "Power electronics and electromagnetic compatibility," IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC), pp. 15-21, 1996.
2. D. Gonzalez, J. Balcells, A. Santolaria, J. C.L. Bunetel, J. Gago, D. Magnon and S. Brehaut, "Conducted EMI reduction in power converters by means of periodic switching frequency modulation", IEEE Trans on Power Elect., vol. 22, no. 6, pp. 2271-2281, Nov. 2007.
3. Nota katalogowa VIPER16, Fixed frequency VIPerTM plus family, STMicroelectronics 2011.
4. Billings K., Morey T.: Switchmode power supply, The McGraw-Hill Companies 2011
5. Ferenczi O.: Zasilanie układów elektronicznych – Zasilacze impulsowe, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1989
6. Polska Norma PN-EN 55014-1:2017-06, Kompatybilność elektromagnetyczna - Wymagania dotyczące przyrządów powszechnego użytku, narzędzi elektrycznych i podobnych urządzeń - Część 1: Emisja;

W pracach badawczych wykorzystano aparaturę zakupioną w wyniku realizacji projektów: a) „Rozbudowa infrastruktury naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej”, nr POPW.01.03.00-18-012/09, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej 2007-2013, Priorytet I, Nowoczesna Gospodarka, Działanie 1.3, Wspieranie Innowacji; „Budowa, rozbudowa i modernizacja bazy naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej”, nr UDA-RPPK.01.03.00-18-003/10-00, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego na lata 2007-2013.

GENERATION AND PROPAGATION OF ELECTROMAGNETIC DISTURBANCES IN NON-INSULATED AC / DC LOW POWER CONVERTERS

The paper presents the results of the experimental work that was carried out for the model non-insulated AC / DC low power converters. They are used to supply the components of the electrical installation, controls, automation systems in building (sensors of lights, smoke, etc.), remote control systems, time programmers, consumer appliances and lighting components etc. The manufacturers offer now the integrated drivers for the construction of non-isolated converters with power up to several watts.

As part of the experimental work the factors which have an influence on the level and nature of conducted disturbances propagation were examined. The example of a model converter shows how the disturbances are generated and propagated in circuit of non-isolated power supply and how the degree and nature of its load affects the level of generated conducted disturbances. It shows how the load condition of the power supply influenced on the level of generated conducted disturbances. Finally, the VIPer16L power supply application has been used in the application of the engine speed regulator for household appliances.

Keywords: nonisolated AC/DC power converter, electromagnetic compatibility, conducted disturbances

