

## Zasilacz UPS z funkcją aktywnej kompensacji mocy biernej i mocy odkształcenia

**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano rozwiązanie jednofazowego zasilacza UPS, który oprócz funkcjonalności typowej dla tego typu urządzeń odznacza się dodatkowo możliwością aktywnej kompensacji przesunięcia fazowego i wyższych harmonicznych generowanych przez inne odbiorniki dołączone do tego samego węzła sieci elektroenergetycznej. W artykule zaprezentowano model opracowanej przez autorów części sterującej oraz silnopiędowej zasilacza UPS o strukturze typu VFI. W celu weryfikacji skuteczności działania proponowanego rozwiązania przedstawiono wybrane wyniki badań modelu symulacyjnego układu dla różnych warunków pracy.

**Abstract.** The article presents the solution of the single phase Uninterruptible Power Supply (UPS), which except for a typical functionality for this kind of equipment, is distinguished by active compensation of a shift phase and higher harmonics, which are generated by other receivers, being connected to the same power network. The elaborated power circuit and also the control system of the presented UPS with VFI structure were described. In order to verify the effectiveness of the proposed solution, the chosen results of the simulation research is also shown. (Uninterruptible power supply UPS with active compensation of reactive and distortion power)

**Słowa kluczowe:** przesunięcie fazowe, wyższe harmoniczne, struktura VFI, zasilacz UPS.

**Keywords:** shift phase, higher harmonics, VFI topology, UPS.

### Wstęp

W artykule zaprezentowano strukturę części silnopiędowej oraz układ sterowania rozwiązania zasilacza UPS typu VFI [1], który dodatkowo odznacza się możliwością kompensacji przesunięcia fazowego między podstawowymi harmonicznymi napięcia i prądu sieci oraz redukcji wyższych harmonicznych generowanych przez inne odbiorniki energii dołączone do wspólnego węzła sieci elektroenergetycznej.

Ogólna idea kompensacji przesunięcia fazowego przez opisywany zasilacz UPS polega na poborze prądu o przeciwnym kącie fazowym w stosunku do wypadkowego prądu pobieranego przez inne odbiorniki [2,3]. W konsekwencji kąt fazowy podstawowej harmonicznej prądu wejściowego zasilacza UPS zwykle jest różny od zera. W tym przypadku jest to jednak efekt pożądany – przesunięcie fazowe między podstawową harmoniczną napięcia i wypadkowego prądu sieci (będącego sumą prądu zasilacza UPS oraz pozostałych odbiorników) ma wartość zerową. Funkcja kompensacji wyższych harmonicznych wymusza odkształcenie prądu wejściowego przekształtnika UPS w taki sposób, aby jego suma z prądami współpracujących odbiorników dawała sygnał wynikowy, który cechuje się możliwie niską zawartością niepożądanych harmonicznych w rozpatrywanym paśmie częstotliwości [4,5].

Prezentowane w artykule rozwiązanie zasilacza UPS bazuje na strukturze typu VFI (Voltage Frequency Independent) [6,7], odznaczającej się separacją energetycznego toru wejściowego od wyjściowego. W konsekwencji możliwa jest niezależna regulacja zarówno częstotliwości, jak i wartości skutecznej napięcia wyjściowego (z założenia odznaczającego się niską zawartością harmonicznych). Jako wejściowy przekształtnik sieciowy przetwarzający energię prądu przemiennego na energię prądu stałego zastosowano w pełni sterowany prostownik tranzystorowy bazujący na mostku H – w artykule rozpatrywany jest układ w wersji jednofazowej – z szeregowym filtrem dolnoprzepustowym w postaci dławika.

W ramach opracowanej struktury zasilacza UPS zaproponowano również sposób realizacji sprzężenia szyny DC z baterią akumulatorów. W celu dostarczenia do odbiornika zasilanego przez UPS napięcia zasilającego o wysokiej jakości, przy realizacji modułu wyjściowego również zastosowano tranzystorowy mostek H z

dolnoprzepustowym filtrem LC na wyjściu, pracujący w tym przypadku jako niezależny falownik napięcia.

W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań modelu symulacyjnego systemu z uwzględnieniem różnych typów odbiorników zasilanych z tego samego węzła sieci. W rozważaniach założono sinusoidalne napięcie sieci (o pomijalnie małej zawartości niepożądanych harmonicznych).

### Zasada działania zasilacza UPS

Ogólny schemat blokowy systemu odzwierciedlający sposób połączeń (i wzajemnego oddziaływania) poszczególnych elementów opisywanego systemu zaprezentowano na rysunku 1.



Rys.1. Uproszczony schemat blokowy systemu elektrycznego z zasilaczem UPS, współpracującym z innymi odbiornikami energii elektrycznej

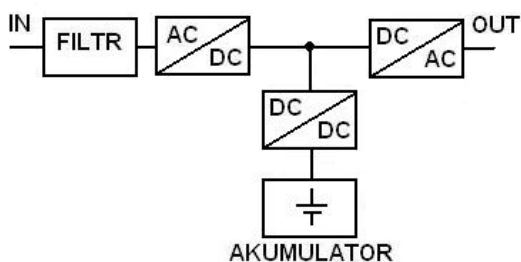
Urządzenie UPS zasilane jest z sieci energetycznej wspólnie z innymi odbiornikami. Dodatkowo, zastosowano analizator wypadkowego prądu sieci (umożliwiającego m.in. wyznaczenie zawartości harmonicznych sygnału oraz przesunięcia fazowego). W tym rozwiązaniu odbiorniki, które wymagają gwarantowanego i o wysokiej jakości zasilania dołączone są do zasilacza UPS, a odbiorniki, dla których nie ma konieczności zapewnienia zasilania bezprzerwowego dołączone są do sieci równolegle z zasilaczem UPS.

Na rysunku kolejnym pokazano schemat blokowy zasilacza UPS o strukturze VFI.

Na schemacie blokowym można wyróżnić następujące moduły:

- filtr wejściowy,
- sprzęg AC/DC/AC zbudowany z następujących przekształtników energoelektronicznych:

- przetwornika AC/DC (sieciowego) podwyższającego napięcie zbudowanego na bazie w pełni sterowalnego mostka tranzystorowego H (łącznie z filtrem indukcyjnym stanowi on prostownik umożliwiający kształtowanie odpowiedniego prądu sieci zależnego od sygnałów wejściowych pozostałych odbiorników zasilanych z tego samego węzła),
- wyjściowego (odbiornikowego) falownika napięcia zbudowanego na bazie mostka H i filtru LC,
- przetwornik DC/DC (baterijny) zasilany z szyny prądu stałego – odpowiedzialny za optymalne ładowanie zespołu akumulatorów, w celu zwiększenia ich żywotności,
- baterie akumulatorów.



Rys.2. Schemat blokowy zasilacza UPS o strukturze VFI

Zadaniem przetwornika wejściowego jest nie tylko zapewnienie wymaganej wartości napięcia stałego, możliwie bliskiego wartości nominalnej, ale także umożliwienie aktywnej kompensacji przesunięcia fazowego i wyższych harmonicznych prądu sieci. Wiąże się to z przepływem prądu o większej wartości skutecznej w porównaniu z klasycznym sterowaniem, gdzie wymagane jest zapewnienie prądu możliwie dobrze zbliżonego do przebiegu sinusoidalnego o zerowym kącie przesunięcia fazowego. Konsekwencją tego faktu jest konieczność przewymiarowania elementów przetwornika sieciowego, co stanowi pewną wadę proponowanego rozwiązania. Nie jest jednak wymagane użycie dodatkowych modułów w postaci filtrów pasywnych, bądź też aktywnych celem poprawy jakości wypadkowego prądu sieci (sumy prądów wejściowych zasilacza UPS oraz pozostałych odbiorników, w tym nieliniowych, zasilanych z tego samego węzła) [8].

Zaprojektowany przetwornik impulsowy DC/DC, umożliwiający ładowanie zespołu baterii akumulatorowej bazuje na klasycznej strukturze przetwornicy DC/DC typu BUCK. W pracy zaprezentowano tylko przykładowy algorytm ładowania klasycznych akumulatorów kwasowych (żelowych), które m.in. nie wymagają stosowania dedykowanych układów równoważących napięcia na poszczególnych celach baterii oraz złożonych układów zabezpieczeń (BMS - jak, np. w przypadku baterii bazujących na technologii LiION). Należy zaznaczyć, że rozpatrywanie optymalnych algorytmów ładowania oraz systemu kontroli i zabezpieczeń nie jest przedmiotem niniejszego artykułu i zagadnienia te będą omawiane w kolejnych pracach.

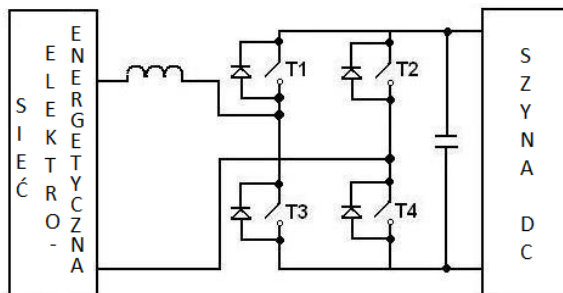
Moduł wyjściowy pracuje, jako układ regulacji zamkniętej (z regulatorem napięcia na zaciskach filtru wyjściowego LC), stanowiąc tym samym energoelektroniczne sterowane źródło napięcia. W konsekwencji możliwe jest zapewnienie wysokiej jakości napięcia dla odbiorników zasilanych z zasilacza rezerwowego. W niniejszej pracy – podobnie, jak dla przetwornika sieciowego – rozpatrywana jest wersja jednofazowa falownika wyjściowego.

### Struktura części wejściowej zasilacza

Obwód wejściowy (sieciowy) zasilacza UPS zaprojektowany został na bazie w pełni sterowalnego

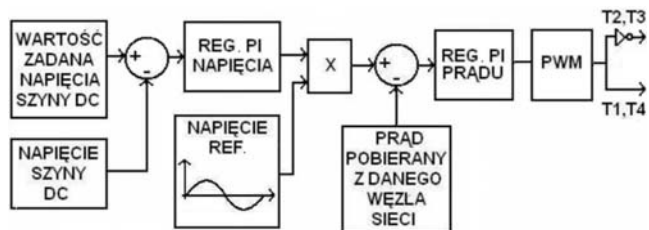
mostka tranzystorowego z filtrem indukcyjnym na wejściu. Schemat układu pokazano na rysunku 3.

Zastosowana struktura umożliwia pobór prądu sieci o dowolnym kształcie i kącie przesunięcia fazowego podstawowej harmonicznej pod warunkiem zapewnienia wartości napięcia na szynie DC wyższej od amplitudy napięcia sieciowego. Od strony wejściowej przetwornik ten można w analizowanym przypadku rozpatrywać, jako energoelektroniczne sterowane źródło prądu. Zastosowanie dławika (sposób doboru dławika nie jest przedmiotem rozważań w niniejszym artykule) konieczne jest w celu zapewnienia możliwości kształtowania prądu przy jednoczesnym ograniczeniu w widmie sygnału składowych związanych z częstotliwością impulsowania kluczy [7].



Rys.3. Schemat ideowy części silnoprądowej przetwornika sieciowego zasilacza UPS

Zadaniem przetwornika sieciowego zasilacza UPS w opisywanym rozwiązaniu jest nie tylko stabilizacja napięcia wyjściowego na szynie DC (związana z dostarczeniem wymaganej ilości użytecznej energii dla zasilanych odbiorników na wyjściu zasilacza oraz ładowania akumulatorów), ale również aktywna kompensacja przesunięcia fazowego oraz wyższych harmonicznych prądu sieci wynikających z oddziaływania odbiorników zasilanych z tego samego węzła sieci energetycznej, co UPS. Takie rozwiązanie wymaga pomiaru wypadkowego prądu sieci w wybranym węźle, z którego zasilane są odbiorniki oraz UPS, a nie jak w przypadku klasycznych zasilaczy UPS o sinusoidalnym prądzie sieci w obwodzie wejściowym samego zasilacza rezerwowego. W konsekwencji prąd wejściowy zasilacza nie jest najczęściej sinusoidalny (w przypadku współpracy z odbiornikami nieliniowymi) oraz nie charakteryzuje się zerowym kątem fazowym. Kontrolowanie przepływu energii czynnej jest możliwe poprzez stabilizację napięcia w obwodzie szyny DC.



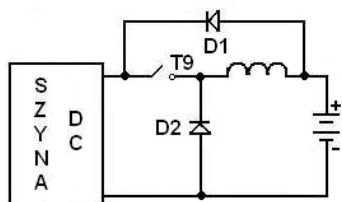
Rys.4. Schemat blokowy układu sterowania przetwornikiem sieciowym zasilacza UPS

Schemat blokowy układu sterowania częścią wejściową zasilacza UPS zaprezentowano na rysunku 4. Zastosowano tam nadrzędny regulator napięcia na szynie DC, który jest odpowiedzialny za wyznaczenie amplitudy prądu w rozpatrywanym węźle sieci (zależnej od zapotrzebowania na moc czynną zasilacza UPS). Sygnał wyjściowy z niniejszego regulatora jest mnożony przez sinusoidalny sygnał o stałej amplitudzie i fazie zgodnej z fazą podstawowej harmonicznej napięcia sieciowego. Wynikiem mnożenia jest sygnał referencyjny dla podrzędnego regulatora prądu odpowiedzialnego za kształtowanie prądu sieci w rozpa-

trywanym węzle. W konsekwencji uzyskuje się sygnał wejściowy dla modulatora PWM, sterującego pracą poszczególnych tranzystorów przekształtnika sieciowego [10].

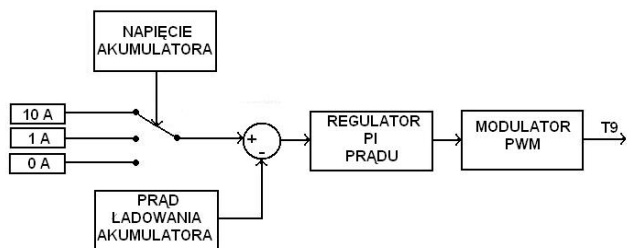
### Struktura przekształtnika ładowania baterii akumulatorów

W celu zapewnienia możliwości ładowania baterii akumulatorowej, w rozpatrywanym przypadku zaimplementowano przekształtnik impulsowy DC/DC typu BUCK z indukcyjnym filtrem wyjściowym (rysunek 5) [11]. Zastosowanie dodatkowej diody (D1) ma na celu umożliwienie poboru (zwrotu) energii z akumulatorów w trybie pracy rezerwowej. Przy zasilaniu sieciowym układu dioda ta pozostaje wyłączona.



Rys.5. Schemat ideowy części silnoprądowej zasilacza związanej z ładowaniem baterii akumulatorów

Na rysunku 6 przedstawiono schemat blokowy układu sterowania przekształtnikiem DC/DC. W zależności od stopnia naładowania baterii akumulatorów (szacowanego m.in. na podstawie napięcia na zaciskach) zadawana jest wartość prądu ładowającego. W następnej kolejności zaimplementowany regulator prądu na podstawie uchybu wyznacza sygnał modulujący dla modulatora PWM [12].



Rys.6. Schemat blokowy układu sterowania przekształtnikiem typu BUCK

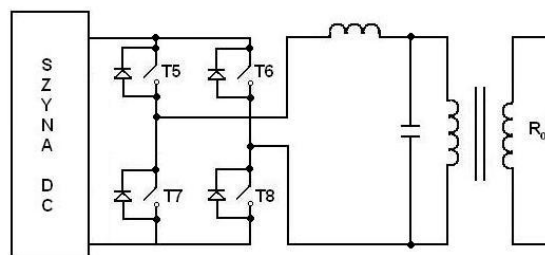
Należy zaznaczyć, że możliwa jest dalsza optymalizacja procesu ładowania akumulatorów, np. poprzez zastosowanie regulacji kaskadowej, gdzie regulatorem nadrzędnym jest regulator napięcia, a podrzędnym regulator prądu. W początkowej fazie ładowania sygnał wyjściowy regulatora nadrzędnego jest w tym przypadku w ograniczeniu, zadając tym samym stały prąd ładowania. W końcowej fazie procesu ładowania sygnał wyjściowy regulatora ulega zmniejszeniu – przejście do trybu podtrzymania. W artykule przedstawiono wersję uproszczoną, która jednak w przypadku klasycznych akumulatorów kwasowych (żelowych) okazuje się wystarczająco efektywna.

### Struktura części wyjściowej zasilacza

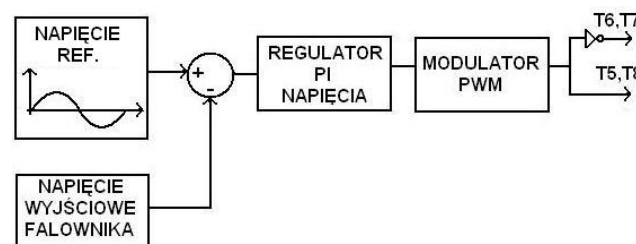
Część silnoprądową – wyjściową – zasilacza UPS zaprezentowano na rysunku 7. W niniejszym rozwiązaniu zastosowano transformator, zapewniający separację galwaniczną zasilacza od odbiornika – wymaganą w niektórych zastosowaniach przemysłowych zasilacza UPS [13].

Zastosowanie wyjściowego filtra dolnoprzepustowego LC jest konieczne w celu zapewnienia odpowiedniej jakości napięcia, które powinno charakteryzować się zarówno możliwie małymi zniekształceniami, jak i stałą w czasie

wartością skuteczną oraz częstotliwością harmoniczną podstawowej. Część sterująca przekształtnikiem została przedstawiona na rysunku 8.



Rys.7. Schemat ideowy części silnoprądowej – wyjściowej – zasilacza UPS



Rys.8. Schemat blokowy układu sterowania falownikiem wyjściowym zasilacza rezerwowego

Zastosowano w tym przypadku klasyczny układ zamknięty z regulatorem typu PI, przetwarzającym sygnał błędny, będący różnicą napięć wyjściowego i zadanego na zaciskach wyjściowych falownika. Sygnał wyjściowy regulatora jest jednocześnie wejściowym dla modulatora PWM. Zatem przekształtnik ten od strony zacisków wyjściowych może być rozpatrywany, jako energoelektroniczne sterowane źródło napięcia.

### Badania modelu symulacyjnego

Badania modelu symulacyjnego zasilacza UPS zostały przeprowadzone w środowisku Matlab. Przyjęto następujące założenia wyjściowe:

- częstotliwość pracy kluczy części wejściowej: 20kHz,
- częstotliwość pracy kluczy przetwornicy BUCK: 50kHz,
- częstotliwość pracy kluczy przekształtnika sieciowego: 10kHz,
- parametry sieci zasilającej: 220+240 V / 50 Hz,
- parametry napięcia wyjściowego: 230 V / 50 Hz,
- wartość znamionowa napięcia na szynie DC: 450V,
- wartość znamionowa napięcia baterii akumulatorów [14]: 96V.

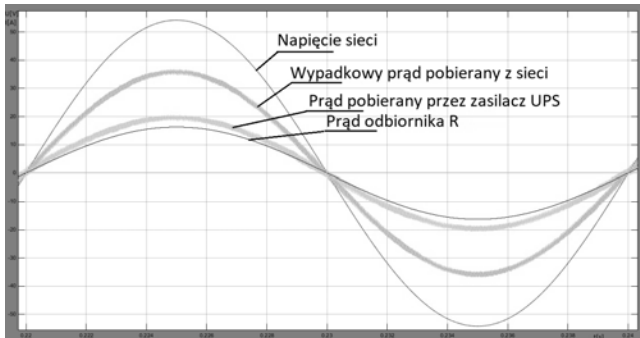
W bieżącym rozdziale zaprezentowano wybrane wyniki badań symulacyjnych zasilacza UPS obciążonego odbiornikiem rezystancyjnym przy jednoczesnym zasilaniu z tego samego węzła sieci następujących odbiorników:

- rezystancyjnego,
- rezystancyjno-indukcyjnego,
- tyrystorowego regulatora napięcia przemiennego, obciążonego rezystancyjnie.

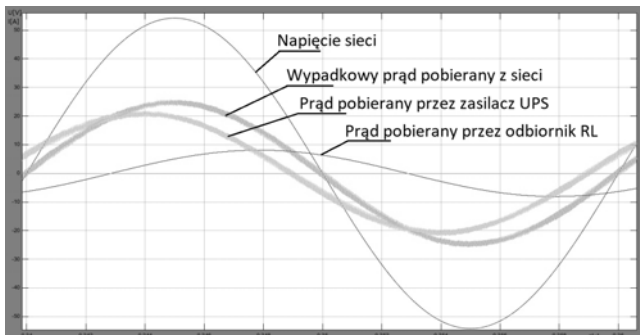
Ponadto, przeprowadzono badania dla przypadku tyrystorowego regulatora napięcia przemiennego obciążonego rezystancyjnie oraz zasilacza UPS pracującego w stanie jałowym (bez obciążenia). Zestawienie otrzymanych rezultatów badań zaprezentowano na rysunkach 9-12.

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów dla poszczególnych warunków pracy systemu można potwierdzić skuteczność kompensacji wypadkowego przesunięcia fazowego (kąta fazowy podstawowej harmonicznnej prądu sieci jest bliski zeru) oraz wyższych harmonicznnych przez

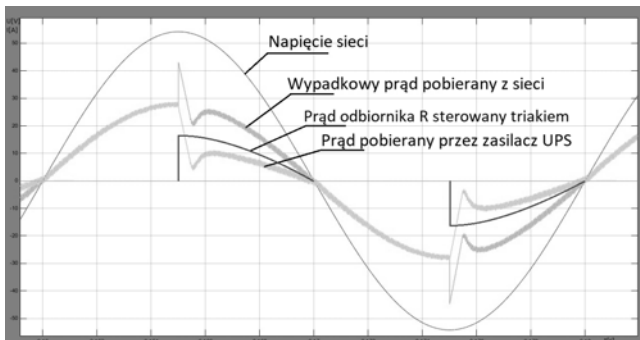
zasilacz UPS. Na rysunkach 11 i 12 widoczne jest jednak wyraźne odkształcenie wypadkowego prądu sieci rozpatrywanego węzła wynikające z ograniczonego pasma (dynamiki) przekształtnika sieciowego zasilacza. Fakt ten spowodowany jest m.in. ograniczoną częstotliwością impulsowania kluczy, opóźnieniem wnoszonym w tor sterowania, ale przede wszystkim koniecznością zastosowania indukcyjnego filtra dolnoprzepustowego.



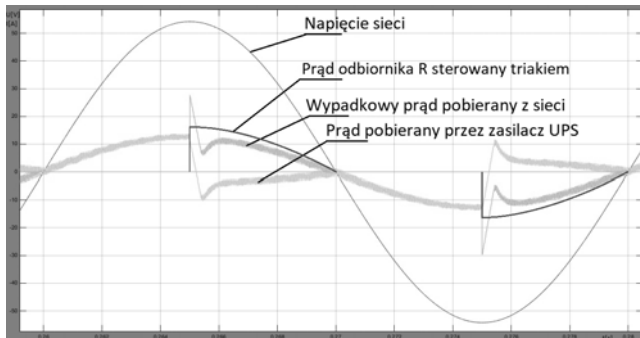
Rys.9. Przebiegi prądów i napięcia sieci dla dodatkowego odbiornika rezystancyjnego (UPS obciążony)



Rys.10. Przebiegi prądów i napięcia sieci dla dodatkowego odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego (UPS obciążony)



Rys.11. Przebiegi prądów i napięcia sieci dla dodatkowego odbiornika w postaci regulatora napięcia przemiennego zasilającego odbiornik rezystancyjny (UPS obciążony)



Rys.12. Przebiegi prądów i napięcia sieci dla dodatkowego odbiornika w postaci regulatora napięcia przemiennego zasilającego odbiornik rezystancyjny (UPS nieobciążony)

## Podsumowanie

W pracy zaprezentowano część silnoprądową oraz sterującą zasilacza rezerwowego UPS umożliwiającą dodatkową aktywną kompensację przesunięcia fazowego między podstawowymi harmonicznymi napięciami i prądami sieci oraz redukcję wyższych harmonicznymi. Zastosowanie takiego rozwiązania umożliwia ograniczenie kosztów inwestycyjnych związanych z instalacją klasycznych filtrów pasywnych, bądź też aktywnych kompensatorów równoległych. Uzyskane wyniki badań modelu symulacyjnego systemu potwierdzają poprawność realizacji założonych funkcji przez zasilacz UPS.

W ramach dalszych etapów prac planowana jest realizacja układu fizycznego. Równolegle trwają prace badawcze umożliwiające zwiększenie pasma przenoszenia części wejściowej zasilacza UPS (poprzez m. in. zastosowanie przyrządów mocy o lepszych właściwościach dynamicznych) [15], co winno umożliwić dalszą poprawę jakości napięcia w węzle sieci.

**Autorzy:** dr inż. Michał Krystkowiak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: [Michal.Krystkowiak@put.poznan.pl](mailto:Michal.Krystkowiak@put.poznan.pl); mgr inż. Łukasz Ciepliński, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: [Lukasz.Cieplinski@put.poznan.pl](mailto:Lukasz.Cieplinski@put.poznan.pl); dr hab. inż. Michał Gwóźdź, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: [Michal.Gwozdz@put.poznan.pl](mailto:Michal.Gwozdz@put.poznan.pl).

## LITERATURA

- [1] Wiatr J., Miegoń M., Zasilacze UPS oraz baterie akumulatorów w układach zasilania gwarantowanego, seria Zeszyty dla elektryków - nr 4, DW MEDIUM, Warszawa 2008.
- [2] Piróg S., Energoelektronika. Negatywne oddziaływanie układów energoelektronicznych na źródła energii i wybrane sposoby ich ograniczenia, Wydawnictwo AGH, Kraków, (1998)
- [3] Fryze S., Moc rzeczywista, urojona i pozorna w obwodach elektrycznych o przebiegach odkształconych prądu i napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 7/8, (1931)
- [4] Barlik R., Nowak M., Jakość energii elektrycznej – stan obecny i perspektywy, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 07/08, 2005, s. 1-12.
- [5] Bielecki S., Jakość energii elektrycznej na rynku energii, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 07/08, 2007, s. 68-72.
- [6] PN-EN 62040-3:2005/A11:2009 Systemy bezprzerwowego zasilania (UPS)
- [7] <http://ever.eu/uploads/article/111/b4bfd68267b58731d503b5d77d53f88a07fd8aea.pdf>. Dostęp: czerwiec 2017
- [8] Pasko M., Lange A., Kompensacja mocy bierniej i filtracja wyższych harmonicznymi za pomocą filtrów biernych LC, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 4, 2010, s. 126-129.
- [9] Dmowski A., Energoelektroniczne układy zasilania prądem stałym, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, (1998)
- [10] Rosseto L., Spiazzi G., Tenti P., Control techniques for power factor correction converters, Proceedings of PEMC'94, Warszawa, (1994)
- [11] Ferenczi Ó., Zasilanie układów elektronicznych. Zasilacze impulsowe, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, (1989)
- [12] Jędrzykiewicz Z., Teoria sterowania układów jednowymiarowych, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Kraków, (2004)
- [13] Nowak M., Barlik R., Poradnik inżyniera energoelektronika, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, (1998)
- [14] <http://ever.eu/uploads/article/40/zasobniki-energii-w-systemach-elektrycznych-czesc-1-charakterystyka-problemu.pdf>. Dostęp: czerwiec 2017
- [15] Krystkowiak M., Zmodyfikowany model szerokopasmowego energoelektronicznego sterowanego źródła prądowego z modulacją prądu wyjściowego, *Elektronika: Konstrukcje, Technologie, Zastosowania*, (2016)