

## Aktywny korektor współczynnika mocy PFC w układach jednofazowych z prostownikiem dwupołówkowym

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono zasadę działania aktywnych korektorów współczynnika mocy PFC (skrót od ang. Power Factor Correction) w rozwiązaniu typu Boost-Converter i typu Buck-Converter dla prostowników jednofazowych mostkowych. Na zaprojektowanym i wykonanym w Laboratorium Badawczym Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej prototypie korektora typu Boost-Converter przeprowadzone zostały pomiary: skuteczności eliminacji harmonicznych w prądzie zasilania prostownika (kształt prądu sieciowego) oraz wartość napięcia na wyjściu układu prostownika. Wyniki uzyskane na zbudowanym prototypie w pełni potwierdziły funkcjonalność jego działania oraz możliwość adaptacji tego rozwiązania dla przemysłowych układów falownikowych zasilanych z sieci jednofazowej o mocach do 3 [kW] przy zmianach napięcia zasilania od 110 do 230 [V].

**Abstract.** The paper presents the principle of active power factor correctors PFC (from Power Factor Correction) to solve the type-Boost Converter and Buck-Converter for single-phase rectifier bridge. At designed and built in the Research Laboratory of Electrical Engineering Technological University of Czestochowa prototype PFC type Boost-Converter measurements were carried out: the effectiveness of the elimination of harmonic current rectifier (shape of the mains current) and voltage at the output of the rectifier. Results obtained built a prototype fully confirmed the functionality of its operation and the possibility of adapting the solution for industrial systems inverter mains single-phase with power to 3 kilowatts with changes in voltage from 110 to 230 volts. (**Active power factor correction PFC with full-wave rectifier in single-phase network**).

**Słowa kluczowe:** obwód jednofazowy, eliminacja harmonicznych, prostownik dwupołówkowy, korektor współczynnika mocy PFC.  
**Keywords:** single-phase network, harmonic elimination, full-wave rectifier, power factor corrector PFC.

### Wstęp

Jakość energii elektrycznej uzależniona jest od kształtu przebiegu napięcia i prądu w sieci elektroenergetycznej i jest zagadnieniem bardzo obszernym obejmującym wiele szczegółowych problemów technicznych. W idealizowanym przypadku, zakłada się, że napięcia i prądy występujące w sieciach elektroenergetycznych są sinusoidalnie zmienne (nie zawierają harmonicznych). Wówczas moc przesyłana do odbiorców składa się z mocy czynnej (przekazywanej od źródła linią zasilającą do odbiornika) oraz mocy bierniej oscylującej w układzie w sposób polegającym na pulsacyjnej wymianie (w układzie źródło – linia zasilająca – odbiornik). Konieczność dostarczania mocy bierniej związana jest z charakterem reaktancyjnym odbiorników, co w sieci elektroenergetycznej obniża współczynnik mocy dla odbiorcy i prowadzi do niekorzystnej pracy linii przesyłowej oraz źródeł energii (zwiększony przepływ prądu przy tej samej mocy czynnej i pobór mocy bierniej). Występuje wówczas pogorszenie efektywności przesyłu energii na skutek:

- ♦ zmniejszenia przepływu mocy czynnej kosztem przekazywania (wymiany) mocy bierniej,
- ♦ zwiększenia strat mocy przesyłu i wzrost spadków napięć w linii,
- ♦ konieczności przewymiarowania przekrojów przewodów zasilającej linii elektroenergetycznej na etapie projektowania (uwzględnienie przekazywania mocy czynnej i bierniej).

Przez ograniczenie mocy bierniej, możliwa jest poprawa efektywności przesyłu energii oraz ograniczenie wymagań dotyczących przewymiarowania elementów sieci elektroenergetycznych (np. zmniejszenie przekroju przewodów).

Nieliniowe odbiorniki zawierające: rdzenie ferromagnetyczne, układy energoelektroniczne i energooszczędne źródła światła powodują odkształcenie przebiegu prądów w sieci zasilającej, generując dodatkowo wyższe harmoniczne prądów. Wyższe harmoniczne prądu generowanego w odbiorniku nieliniowym wywołują dodatkowe spadki napięcia na impedancjach: źródeł i linii zasilających, prowadząc do odkształcenia sinusoidalnego przebiegu napięcia w sieci zasilającej oraz generując

wyższe harmoniczne napięcia. Ponadto podstawowa harmoniczna w prądach odbiorników zasilanych przez przekształtniki jest przesunięta w fazie względem podstawowej (pierwszej) harmonicznej napięcia. Źródła energii elektrycznej prądu przemiennego, oprócz energii związanej z mocą czynną pobieraną przez odbiorniki muszą skompensować dodatkową energię związaną z występowaniem w nich mocy pochodzącej od wyższych harmonicznych (mocy odkształcenia).

### Współczynnik mocy układu z odbiornikiem nieliniowym

Współczynnik mocy  $PF$  (ang. *Power Factor*) definiowany jest jako iloraz mocy czynnej do mocy maksymalnej występującej w układzie zasilania:

$$(1) \quad PF = \frac{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t)i(t)dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u^2(t)dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i^2(t)dt}}$$

Przy założeniu, że w obwodzie elektrycznym, napięcie  $u(t) = U_m \sin(\omega t)$  na jego zaciskach wymusza przebieg prądu  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ , gdzie:  $\omega = 2\pi f$  jest to pulsacja a  $f$  [Hz] jest częstotliwością. Indeks  $m$  określono wartości maksymalne,  $\varphi$  jest to kąt przesunięcia fazowego. Napięcie  $u(t)$  i prąd  $i(t)$  są okresowo zmienne w czasie, dla przebiegów sinusoidalnych tych wielkości otrzymuje się:

$$(2) \quad PF = \cos \varphi$$

Jeżeli wartość współczynnika mocy  $PF$  jest mniejsza od jedności wskazuje to na występowanie strat energii w układzie zasilania. Spowodowane jest to przepływem mocy bierniej między siecią i odbiornikami zawierającymi elementy reaktancyjne (pojemnościowe i indukcyjne). Moc ta jest magazynowana w postaci energii pola elektrycznego (kondensatory) lub pola magnetycznego (cewki). Kiedy pole elektromagnetyczne zanika, jest ona zwracana do sieci. Współczynnik mocy  $PF$  mniejszy od jedności jest również informacją, że moc czynna pobierana z sieci jest mniejsza od mocy pozornej.

Straty przesyłu w elektroenergetycznej sieci zasilającej zależą od kwadratu prądu i są proporcjonalne do mocy pozornej występującej w odbiorniku. W przypadku teoretycznym, taka moc czynna jest całkowicie przekazywana do urządzenia a wtedy moc bierna jest równa zero. Dla rzeczywistego odbiornika moce: czynna i bierna są całkowicie przez niego pobierane i wtedy  $PF < 1$ . Oprócz strat mocy czynnej wystąpią dodatkowo straty mocy biernej co spowoduje przesunięcie fazowe pomiędzy prądem a napięciem zasilającym odbiornik energii. Jeśli przykładowo współczynnik  $PF$  będzie wynosił 0,5 przy stałych parametrach zasilania, to urządzenie musi pobrać dwa razy większy prąd, co spowoduje czterokrotny wzrost strat mocy przesyłu. Stawiane urządzeniu warunki optymalnej pracy wymagają minimalizacji zużycia energii elektrycznej przez odbiornik. Nieliniowe elementy będące częścią urządzenia, generują prądy harmoniczne, które wpływają na odkształcenie prądu całkowitego od przebiegu sinusoidalnego. Prąd ten może wpływać na pracę innych urządzeń przyłączonych do sieci. Na przykład transformator zasilający, którego obszar pracy znajduje w części nieliniowej charakterystyki magnesowania rdzenia, przy pełnym obciążeniu spowoduje powstawanie wyższych harmonicznych prądu przenoszonych na sieć zasilającą jak również może spowodować niepotrzebne zadziałanie zabezpieczeń. Zastosowanie kompensacji współczynnika mocy  $DP$  minimalizuje na wejściu odbiornika odkształcenia od prądu sinusoidalnego i minimalizuje kąt fazowy pomiędzy przebiegami napięć i prądów sieciowych w punkcie przyłączenia do sieci elektroenergetycznej. Ten proces jest nazywany korekcją współczynnika mocy lub poprawą (kompensacją) współczynnika mocy i jest oznaczany literami PFC (ang. *Power Factor Correction*) [1].

W wielu urządzeniach, ze względu na obsługiwany proces technologiczny, przebiegi napięć i prądów mają kąt fazowy  $\varphi=0$ , to znaczy wartości maksymalne przebiegu prądu i przebiegu napięcia występują w tym samym momencie a współczynnik mocy  $PF$  jest zbliżony do jedności. Jeżeli w urządzeniu występują układy prostownicze dwupołkownikowe, wówczas przebieg prądu nie jest przebiegiem ciągłym, lecz ma charakter impulsowy. Wtedy celem kompensacji PFC jest redukcja wyższych harmonicznych prądu sieciowego. Współczynnik mocy  $PF$  może być aproksymowany równaniem [2]:

$$(3) \quad PF \approx k_z = \frac{I_1}{I_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THDi^2}} \quad \text{dla } THDi = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=2}^{\infty} (I_{mk}^2)}}{\frac{I_{m1}}{\sqrt{2}}}$$

gdzie:  $I_1$  jest wartością skuteczną pierwszej (podstawowej) harmonicznej prądu,  $I_{rms}$  to wartość skuteczna prądu,  $I_{mk}$  jest wartością maksymalną prądu  $k$ -tej harmonicznej, współczynnik  $THD$  (ang. *Total Harmonic Distortion*) jest to wypadkowy współczynnik odkształcenia a litera  $i$  oznacza, że współczynnik ten jest określony dla prądu.

Przy użyciu kompensacji PFC pożądane byłoby aby w końcowym przypadku współczynnik  $THDi$  był równy zero.

Dla napięcia, wypadkowy współczynnik odkształcenia  $THDu$  określony jest wzorem:

$$(4) \quad THDu = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=2}^{\infty} (U_{mk}^2)}}{\frac{U_{m1}}{\sqrt{2}}}$$

gdzie:  $U_{m1}, U_{m2}, U_{m3}, \dots, U_{mk}$  są wartościami maksymalnymi kolejnych harmonicznych napięcia.

Wyższe harmoniczne ( $k > 1$ ) napięć i prądów, w obwodach, nie powinny mieć wartości maksymalnych większych od pierwszej (podstawowej) harmonicznej,

dlatego wartości  $THDi$  i  $THDu$  zmieniają się zwykle w granicach od 0 do 1.

W układzie w którym napięcia i prądy są odkształcone od sinusoidy to wówczas wypadkowy współczynnik mocy wyznacza się z równania:

$$(5) \quad PF = \frac{P_1 + \sum_{k=2}^{\infty} P_k}{|U_1 I_1| \sqrt{1 + (THDu_u)^2} \sqrt{1 + (THDi)^2}}$$

gdzie:  $U_1$  jest wartością skuteczną napięcia podstawowej harmonicznej,  $P_1$  jest mocą czynną podstawowej harmonicznej,  $P_k$  to moc czynna  $k$ -tej harmonicznej.

Zwykle, w rzeczywistych układach, moc robocza jest znacznie większa od mocy odbitej generowanej przez odkształcone sieciowe napięcie zasilające, czyli zachodzi związek:

$$(6) \quad P_1 + \sum_{k=2}^{\infty} P_k \approx P_1$$

dotąd, wartość współczynnika  $THDu$  jest zwykle mniejsza od 0,1 zatem  $U \approx U_1$ . Po uwzględnieniu powyższych warunków otrzymuje się równanie na przybliżony wypadkowy współczynnik mocy  $PF$  w postaci:

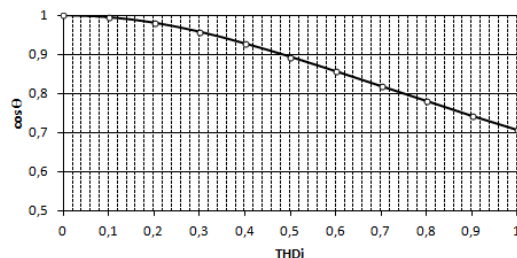
$$(7) \quad PF = \frac{P_1}{|U_1 I_1| \sqrt{1 + (THDi)^2}} = \cos \varphi \frac{1}{\sqrt{1 + (THDi)^2}}$$

Czasami przybliżony wypadkowy współczynnik mocy podaje się za pomocą zależności:

$$(8) \quad PF = \cos \varphi \cdot \cos \theta$$

gdzie  $\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + (THDi)^2}}$

W tym przypadku zawsze spełniony jest warunek  $PF \leq \cos \theta$ . Przebieg zmian  $\cos \theta$  w funkcji  $THDi$  pokazano na rysunku 1.



Rys.1 Wykres wartości  $\cos \theta$  w funkcji współczynnika  $THDi$  (zmieniającego się od 0 do 1)

### Proces korekcji współczynnika mocy

Ogólna zasada aktywnych układów kompensacji współczynnika mocy urządzeń elektrycznych polega na zmagazynowaniu w kompensowanym układzie elektrycznym pewnego nadmiaru energii, która służy następnie do uzupełnienia chwilowych różnic pomiędzy mocą na wejściu i wyjściu urządzenia, w ten sposób, otrzymuje się na wyjściu układu stały poziom napięcia oraz na wejściu układu przepływ prądu odpowiadający zmianom czasowym napięcia zasilającego. Kompensacja współczynnika mocy polega na takim ukształtowaniu przebiegu pobieranego prądu przez urządzenie, aby był on w fazie z napięciem wejściowym, a dodatkowo współczynnik mocy niewiele odbiegał od jedności. Uzyskuje się to przez nadanie pobieranemu z sieci prądowi kształtu zbliżonego do sinusoidy.

Proces nazywany korekcją współczynnika mocy lub poprawą współczynnika PFC jest coraz powszechniej stosowany [1, 3]. Jeżeli w urządzeniu występują układy prostownicze dwupołkownikowe, wówczas prąd nie jest ciągły, lecz ma charakter impulsowy i może zostać opisany w postaci szeregu Fouriera. Głównym celem kompensacji PFC jest eliminacja poprzez redukcję wyższych

harmonicznego prądu sieciowego. Związany z tą kompensacją współczynnik mocy  $PF$  może być aproksymowany zależnością (3) jako stosunek wartości skutecznej prądu podstawowej harmonicznej do wartości skutecznej prądu odkształconego [4, 5].

Są dwa podstawowe cele stosowania aktywnych układów kompensacji współczynnika mocy  $PF$ :

- ♦ utrzymywanie, w przybliżeniu stałej wartości napięcia, na obciążeniu układu,
- ♦ utrzymywanie w każdym okresie czasu, (bo podczas pracy może nastąpić zmiana obciążenia urządzenia a tym samym zmiana prądu), średniej wartości prądu wejściowego (wzorcowego)  $i_w(\omega t) = I_{m_w} \sin(\omega t)$  w przybliżeniu proporcjonalnego do przebiegu napięcia wejściowego w taki sposób aby nie występowało przesunięcie fazowe pomiędzy prądem i napięciem na wejściu prostownika.

W celu kompensacji mocy współczynnik  $THDi$  prądu zasilającego nieliniowy prostownik powinien być zmniejszany do wartości bliskiej zeru, dlatego układ korektora współczynnika mocy musi generować przebieg chwilowy prądu dodawczego  $i_k(t)$  spełniającego równanie  $i_k(t) = i_w(t) - i_0(t)$  gdzie:  $i_0(t)$  jest to chwilowy przebieg prądu odbiornika.

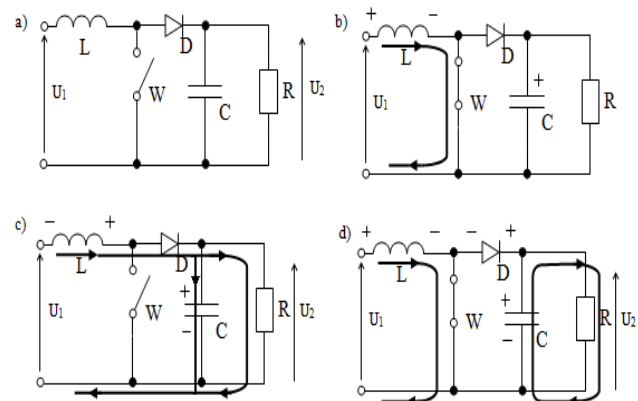
### Działanie prostownika z korektorem współczynnika mocy PFC

Opracowano wiele metod eliminacji i ograniczenia wielkości harmonicznych w prądzie wejściowym dla urządzeń elektrycznych. Począwszy od prostych dławików szeregowych aż po skomplikowane układy aktywne, każda z technik eliminowania harmonicznych niesie za sobą różne dodatkowe straty mocy i różną skuteczność filtrowania harmonicznych. Obecnie do urządzeń, które charakteryzują się bardzo dużą efektywnością tłumienia harmonicznych oraz bardzo dużą sprawnością zaliczyć można dwa typy (rozwiązania) techniczne korektora współczynnika mocy: **Boost-Converter** i **Buck-Converter**. Działania tych dwóch typów układów zostało podane poniżej [3, 4, 5].

W każdym typie układu, odbiornikiem energii jest rezystor  $R$  połączony równolegle z kondensatorem  $C$ . Na rysunkach 2 i 3 nie zaznaczono mostka prostowniczego zbudowanego z diod  $D_1 - D_4$  połączonych na wyjściu z gromadzącą energię baterią kondensatorów  $C_1$ , dającego na wyjściu napięcie wyprostowane dwupołkowo o wartości  $U_1$ .

#### Aktywny układ PFC typu Boost-Converter.

Zasada pracy dwupołkowego prostownika z aktywnym korektorem współczynnika mocy PFC typu **Boost-Converter** jest następująca [4, 5]:



Rys.2 Zasada pracy korektora współczynnika mocy PFC typu **Boost-Converter**

♦ Biorąc pod uwagę układ pokazany na rys. 2 a, pomiędzy mostek prostowniczy dający napięcie  $U_1$  a rezystor obciążenia  $R$  na którym występuje spadek napięcia  $U_2$  włączono układ korekcyjny zbudowany z cewki indukcyjnej (dławika)  $L$ , wyłącznika (klucza)  $W$ , diody  $D$  oraz połączonych wzajemnie równolegle pojemności  $C$  i rezystancji obciążenia  $R$ .

♦ Po włączeniu układu na napięcie sieciowe, niepokazany na rysunkach 2 mostek prostowniczy zaczyna pracować. Przy zwartym wyłączniku  $W$  prąd cewki przepływa przez prostownik, cewkę indukcyjną  $L$  oraz wyłącznik  $W$ , a droga przepływu prądu jest pokazana na rys. 2 b.

♦ Kiedy zostaje otwarty wyłącznik  $W$  to prąd wydawany przez cewkę przepływa wówczas przez mostek prostowniczy, cewkę indukcyjną  $L$ , diodę  $D$  oraz rezystancję  $R$  a także ładuje kondensator  $C$  połączony równolegle z tą rezystancją. Dioda  $D$  przewodzi tylko wówczas kiedy wyłącznik  $W$  jest otwarty. Sytuację taką pokazuje rys. 2 c.

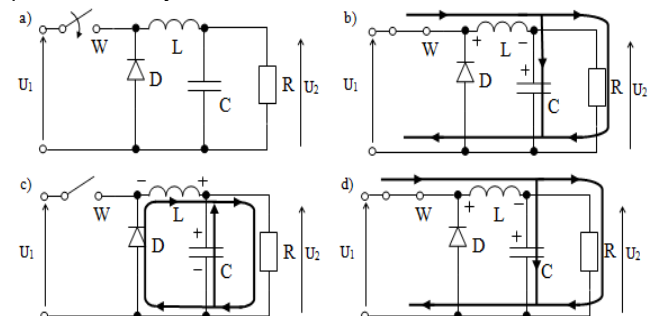
♦ Po ponownym zamknięciu wyłącznika  $W$ , z jednej strony prąd przepływa przez układ prostujący, cewkę indukcyjną  $L$  oraz wyłącznik  $W$ , z drugiej strony naładowany kondensator  $C$  rozładowuje się przez rezystor  $R$  (jego rozładowanie w kierunku cewki indukcyjnej  $L$  blokuje ustawiona zaporowo Dioda  $D$ ) podtrzymując prąd przepływający przez ten rezystor. Sytuacja taka jest pokazana na rys. 2 d. Dalej cykl pracy powtarza się powracając do sytuacji pokazanej na rys.2 c.

#### Aktywny układ PFC typu Buck-Converter

Zasada pracy dwupołkowego prostownika z aktywnym korektorem współczynnika mocy PFC typu **Buck-Converter** jest następująca [4, 5]:

♦ Biorąc pod uwagę układ pokazany na rys. 3 a, pomiędzy mostek prostowniczy dający napięcie  $U_1$  a rezystor obciążenia  $R$  na którym występuje spadek napięcia  $U_2$  włączono układ korekcyjny zbudowany z cewki indukcyjnej  $L$ , wyłącznika  $W$ , diody  $D$  oraz połączonych równolegle pojemności  $C$  i rezystancji obciążenia  $R$ .

♦ Po włączeniu układu na napięcie  $U_1$  oraz zwarcia wyłącznika  $W$ , prąd zaczyna przepływać przez cewkę indukcyjną  $L$  (gromadząc w niej energię pola magnetycznego) i dąży do jej zwarcia, równocześnie prąd zaczyna przepływać przez kondensator  $C$ , który początkowo stanowi zwarcie a ładując się dąży do przerwy w obwodzie. W czasie ładowania kondensatora  $C$  prąd zaczyna również narastać na rezystancji  $R$ , co powoduje powstawanie napięcia  $U_2$ . Droga przepływu prądu jest pokazana na rys. 3 b.



Rys.3. Zasada pracy korektora współczynnika mocy PFC typu **Buck-Converter**

♦ Kiedy zostaje ponownie otwarty wyłącznik  $W$  to prąd płynący przez rezystor  $R$  powstaje z nałożenia się przepływu dwóch prądów, jednego z rozładowującej się cewki oraz drugiego prądu powstającego podczas rozładowania się kondensatora. Rozładowanie energii

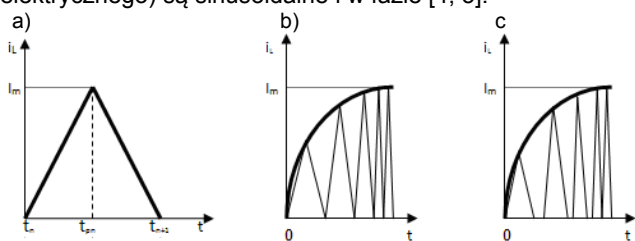
zgrupowanej w cewce następuje przez opornik R i diodę D. Sytuację taką pokazuje rys. 3 c.

♦ Po ponownym zamknięciu wyłącznika W, prąd przepływa przez cewkę indukcyjną L gromadząc w niej energię, w tym samym czasie ładuje się kondensator C podtrzymując jednocześnie przepływ prądu przez rezystor obciążenia R. Sytuacja taka jest pokazana na rys. 3 d. Po otwarciu wyłącznika W, cykl pracy powtarza się powracając do sytuacji pokazanej na rys.3 c.

Należy dodać, że wartość napięcia na obciążeniu w czasie pracy układu korektora zawsze jest większa od zera.

### Tryby pracy urządzenia elektrycznego z korektorem współczynnika mocy PFC

Każdy cykl (włączenia i wyłączenia klucza W) obrazowany jest przez impuls prądowy, który rozłożony w czasie ma kształt trójkąta (rys 4 a). Cykle te następują po sobie ze stosunkowo dużą częstotliwością (rzędu stu i więcej kiloherców) a prąd wejściowy prostownika składany jest z tysięcy bardzo krótkich impulsów prądu w cewce indukcyjnej L (każdy w kształcie trójkąta), których obwiednia ma kształt sinusoidy a sterowanie wyłącznika W połówkami sinusoidy napięcia wyprostowanego powoduje, że przebiegi prądu i napięcia zasilania (na wejściu układu elektrycznego) są sinusoidalne i w fazie [4, 5].



Rys. 4 a) Trójkątny impuls prądu. b) Praca ciągła korektora współczynnika mocy PFC. c) Praca przerywana korektora współczynnika mocy PFC

Wielkość prądu i ładowania i rozładowania cewki określona jest przez parametry obwodu i własności przełączające układu sterowania wyłącznikiem W. Jeśli wyłącznik W jest przełączany na tyle szybko że energia zgromadzona w cewce indukcyjnej L nie zdąży się całkowicie rozładować, to wówczas mówi się, że prostownik pracuje w trybie ciągłym (rys. 4 b), a prąd płynący przez odbiornik nie spada do zera. Jeżeli czas włączenia i wyłączenia wyłącznika W jest tak dobrany, że energia zgmagazynowana w cewce indukcyjnej L zostanie całkowicie rozładowana, wówczas występuje przerwa w ciągłości prądu na odbiorniku i mówimy wówczas o pracy przerywanej prostownika (rys 4 c).

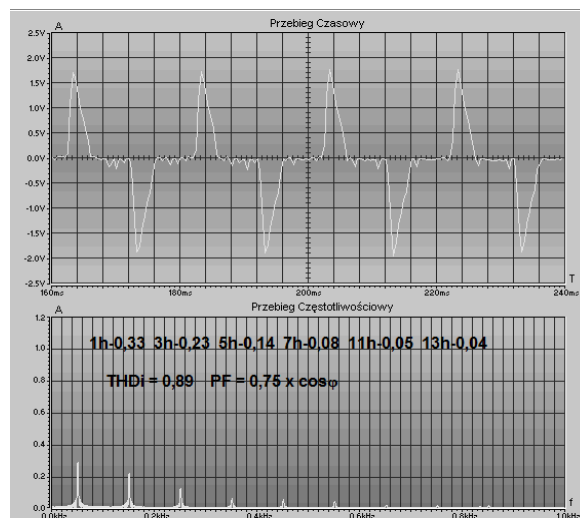
### Badania laboratoryjne zbudowanego prototypu korektora PFC oraz wnioski

Do badań, ze względu na lepsze parametry zbudowano prototyp prostego **korektora współczynnika mocy PFC** typu *Boost-Converter*.



Rys.5 Widok zrealizowanego prototypu korektora współczynnika mocy PFC typu *Boost-Converter*

Zbudowany korektor współczynnika mocy PFC (rys. 5) do poprawy jakości energii elektrycznej umożliwił kompensację harmonicznych w prądzie pobieranym na wejściu prostownika z sieci zasilającej. Wybrane wyniki pomiarów w prototypowym układzie bez korektora przedstawiono na rysunku 6.



Rys.6 Przebieg prądu zasilania oraz wielkość harmonicznych w układzie z jednofazowym mostkiem prostowniczym bez korektora współczynnika mocy PFC. (Napięciu 1 [V] na wykresie odpowiada prąd równy 10 [A])

W tradycyjnym układzie zasilania o napięciu sieciowym 230 [V], napięcie stałe na wyjściu mostka prostowniczego, czyli na kondensatorze C połączonym równolegle z rezystancją obciążenia R jest rzędu 270 [V]. Natomiast przy pracy z korektorem współczynnika mocy PFC, napięcie wyjściowe na rezystancji R wynosi około 370 [V], co przekłada się również na zwiększenie mocy wyjściowej. W efekcie pracy korektora współczynnika mocy *PF*, napięcie i prąd zasilania prostownika są sinusoidalne i praktycznie są z sobą w fazie ( $PF=0,98$ ).

**Autorzy:** dr inż. Aleksander Gałowski, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej, Zakład Podstaw Elektrotechniki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: [alekg@el.pcz.czest.pl](mailto:alekg@el.pcz.czest.pl); dr inż. Zdzisław Posytek, Instytut Telekomunikacji i Kompatybilności Elektromagnetycznej, Zakład Kompatybilności i Teleinformatyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: [zdzychu@el.pcz.czest.pl](mailto:zdzychu@el.pcz.czest.pl); dr inż. Marek Wróbel, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki, ul. Balicka 120, 30-149 Kraków, E-mail: [Marek.Wrobel@ur.krakow.pl](mailto:Marek.Wrobel@ur.krakow.pl)

### LITERATURA

- [1] Strzelecki R., Supronowicz H., Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa (2000), 452 (ISBN 83-7207-106-3)
- [2] Firlit A., Teoria mocy w obwodach prądu przemiennego, Elektroinfo, (2009), n.12, 26-32 (ISSN 1642-8722)
- [3] Dmowski A., Energoelektroniczne układy zasilania prądem stałym w telekomunikacji i energetyce, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa (1998), 215 (ISBN 83-204-2224-8)
- [4] Ferenczi Ö., Zasilanie układów elektronicznych (Zasilacze ze stabilizatorami do pracy ciągłej, Przetwornice DC-DC), Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa (1988), 252 (ISBN 8320409624)
- [5] Kazimierczuk M. K., Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Ltd., New York (2015), 960, (ISBN 978-1-119-00954-2)