

# Efektywność środków ograniczających oddziaływanie napędów przekształtnikowych na sieć zasilającą

*W artykule omówiono główne przyczyny występowania w przemysłowych sieciach elektroenergetycznych odkształconych od sinusoidalnych przebiegów napięcia i prądu oraz przyczyny występowania przesunięcia fazowego między nimi. Przeanalizowano efekty obecności w takich sieciach baterii kondensatorów i pasywnych filtrów wyższych harmonicznych. Przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych przebiegów napięcia i prądu w sieciach wyposażonych w aktywne filtry mocy. Sformułowano wnioski dotyczące efektywności stosowania poszczególnych urządzeń.*

## 1. WSTĘP

---

Prosta konstrukcja silników asynchronicznych klatkowych i związane z nią stosunkowo niskie koszty ich wytwarzania oraz eksploatacji były czynnikiem sprzyjającym szerokiemu ich rozpowszechnieniu w przemyśle i gospodarce komunalnej. W parze z prostotą konstrukcji tych silników nie szły jednak możliwości regulacji prędkości obrotowej wymaganej w większości procesów technologicznych.

Opracowanie i upowszechnienie energoelektronicznych przekształtników mocy pozwoliło na szerokie wykorzystanie tych silników w układach napędowych o regulowanej prędkości obrotowej (regulowanej wydajności). Obecnie istnieje bardzo duża różnorodność konstrukcji przekształtników mocy i stosownie do niej charakteryzują się one szeroką paletą parametrów. Wspólną cechą tych konstrukcji pozostaje istnienie wejściowego obwodu prostownikowego, pośredniego obwodu sprzęgającego i wyjściowego obwodu falownikowego generującego sygnał wyjściowy o zmiennej częstotliwości.

W charakterze prostowników w układach o mniejszych mocach, do około 300-400 kVA, wykorzystywane są prostowniki diodowe niesterowalne. W układach o większych mocach stosowane są pro-

stowniki sterowane, tyrystorowe. W krajach o nowoczesnych technologiach szacuje się, że ok. 70-80% wytwarzanej energii elektrycznej przekształca się w procesie użytkowania za pomocą układów energoelektronicznych. Dynamiczny rozwój zastosowań układów przekształtnikowych stwarza poważne problemy związane z oddziaływaniem tych odbiorników na sieć zasilającą [4].

O ile w przypadku silników asynchronicznych pobierany jest prąd przesunięty w stosunku do napięcia zasilającego, co w tzw. klasycznej teorii mocy prowadziło do jego rozkładu na składową czynną (aktywną), będącą w fazie z napięciem zasilającym, oraz na składową bierną (reaktywną), przesuniętą (opóźnioną) względem napięcia o kąt  $90^\circ$  [2], to w przypadku układów przekształtnikowych zasilających te silniki mamy do czynienia z odbiorami nieliniowymi.

Pobierany przez przekształtnik mocy prąd z sieci zasilającej jest silnie odkształcony od przebiegu sinusoidalnego, a w przypadku prostowników sterowanych – dodatkowo przesunięty względem napięcia zasilającego [2].

Tak odkształcone prądy, przepływając torami prądowymi układów wytwórczych, przesyłowych, dystrybucyjnych i odbiorczych, wywołują na impedancjach zastępczych tych torów odkształcone spadki napięcia.

Efektom tego jest występowanie napięć odkształconych w punktach wspólnego przyłączenia (PWP), którymi są rozdzielnie pośrednie, zasilające również inne wrażliwe na kształt napięcia odbiory.

Do analizy sygnałów odkształconych od sinusoidalnych powszechnie posługujemy się ich rozkładem na harmoniczne wg Fouriera [1]. Prąd odkształcony można zapisać w postaci szeregu Fouriera:

$$i = I_{h1} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \sum_{n>1}^{\infty} I_{hn} \cdot \sin(n\omega_1 t + \varphi_n) \quad (1)$$

gdzie:

$I_{hn}$  – amplituda kolejnej harmonicznej,  
 $n$  – numer harmonicznej,

$\omega_1$  – pulsacja,

$\varphi_n$  – faza początkowa  $n$ -tej harmonicznej.

W zależności od rozwiązania prostownika w pobieranym z sieci prądzie występują charakterystyczne wyższe harmoniczne, np. dla prostowników 6-pulsowych występują harmoniczne o numerach:

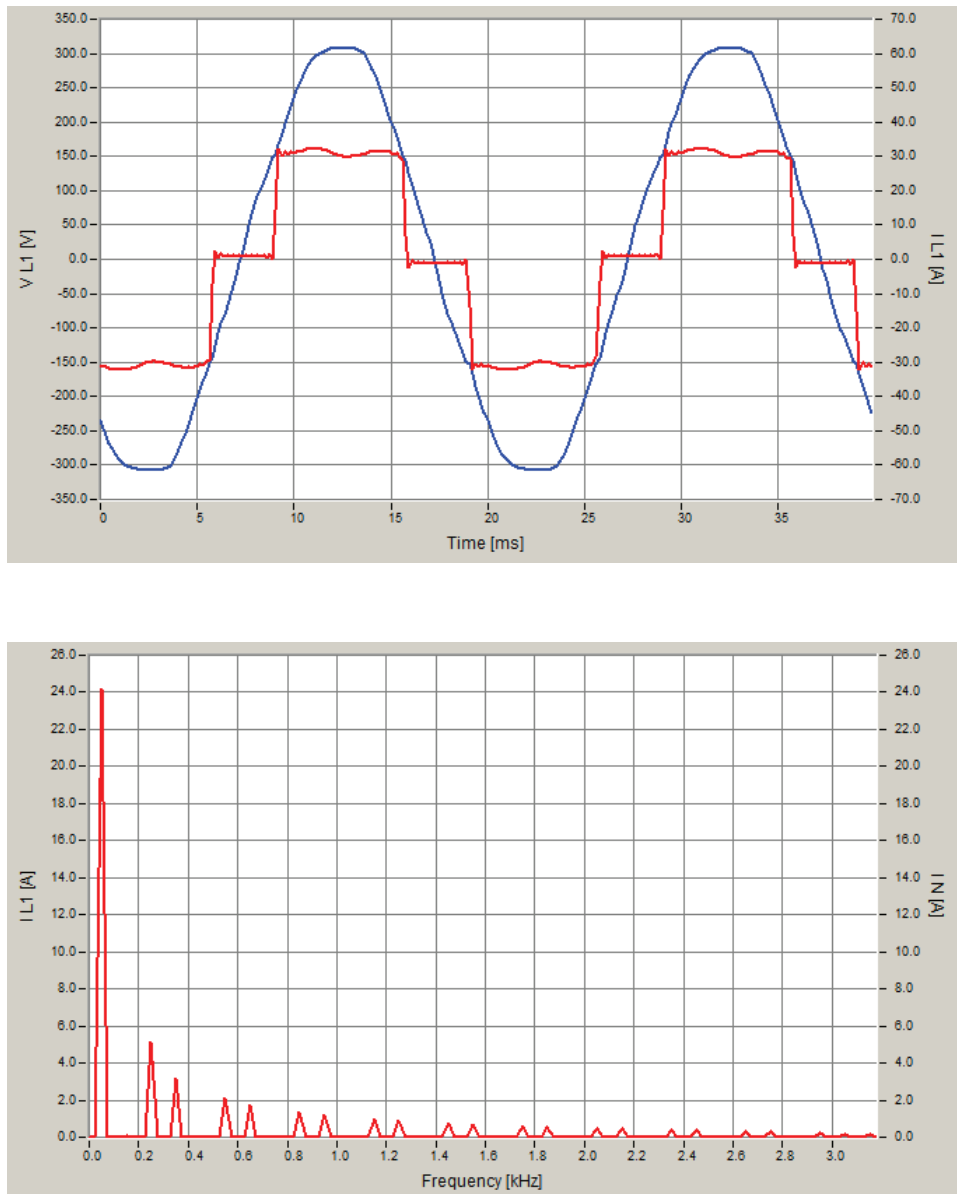
$$n = 6k \pm 1 \quad \text{tj. } 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25 \dots$$

gdzie:

$n$  – numer harmonicznej,

$k = 1, 2, 3, \dots$

Przykładowy przebieg prądu pobieranego z sieci przez prostownik 6-cio pulsowy niesterowany wraz z jego widmem harmonicznym przedstawiono na rys. 1. [5].



Rys. 1. Przebieg napięcia sieci i prądu pobieranego przez prostownik 6-cio pulsowy niesterowany wraz z widmem harmonicznym [5]

Zgodnie z rozkładem Fouriera amplituda harmonicznych powinna maleć wraz z numerem harmonicznej. W układach rzeczywistych ta zależność nie zawsze jest słuszna, szczególnie dla harmonicznych o wyższych numerach.

Współcześnie do opisu zjawisk, a w niektórych przypadkach również do ich interpretacji, stosowane są teorie mocy:

- teoria mocy chwilowej wraz z jej licznymi odmiannami [3],
- teoria składowych fizycznych prądu, która kładzie duży nacisk na interpretację fizyczną zjawisk [4].

Pierwsza z tych teorii zajmuje się analizą zjawisk w dziedzinie czasu, a druga – w dziedzinie częstotliwości [3, 4].

## 2. SPOSOBY ZMNIEJSZANIA ODDZIAŁYWANIA ODBIORÓW NIELINIOWYCH NA SIĘĆ ZASILAJĄCĄ

Zasadniczymi problemami związanymi z ograniczeniem negatywnego oddziaływania odbiorów nieliniowych na sieć zasilającą są:

- ograniczenie (wyeliminowanie) przepływu prądu przesunięcia fazowego,
- ograniczenie (wyeliminowanie) przepływu prądów wyższych harmonicznych.

Obie składowe prądu powodują wzrost skutecznej wartości prądu w stosunku do wartości prądu koniecznej do przeniesienia ze źródła do odbioru zadanej (pożądaney) mocy czynnej.

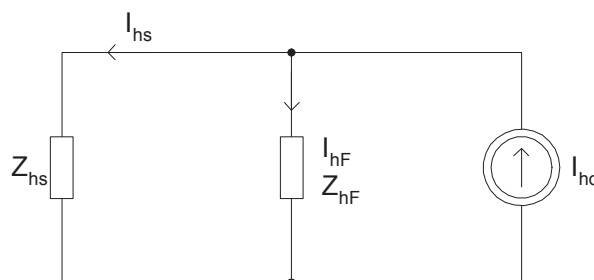
Do poprawy współczynnika mocy (ograniczenia przepływu prądu przesunięcia fazowego) powszechnie stosowane są kondensatory statyczne. Kondensatory te stanowią małą impedancję dla wyższych harmonicznych napięcia, co wywołuje przepływ prądów o znacznych wartościach, nawet przy niewielkiej wartości wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym i w wyniku mechanizmu termicznego prowadzi do ich przyspieszonego starzenia oraz uszkodzeń.

Baterie kondensatorów statycznych wraz z impedancjami zastępczymi sieci zasilającej mogą także stanowić układy rezonansów szeregowych i równoległych, prowadząc do uszkodzeń o charakterze przepięciowym lub przetężeniowym.

Dla słabych systemów zasilających, tj. o małej mocy zwarciowej, przepływ harmonicznych generowanych przez odbiór nieliniowy nawet o niewielkich amplitudach może prowadzić do wywołania znacznych spadków napięć, co w efekcie prowadzi do wystąpienia odkształconego napięcia zasilania w punktach przyłączenia odbiorów (rozdzielniach pośrednich).

W przypadku odbiorów nieliniowych o znacznych mocach charakteryzujących się poborem prądów odkształconych, tj. zawierających wyższe harmoniczne, stosowane są pasywne filtry wyższych harmonicznych LC [4]. Filtr taki o częstotliwości rezonansowej  $f_{rez}$  dobranej do numeru harmonicznej stanowi bardzo małą (teoretycznie zerową) impedancję zastępczą dla prądu danej harmonicznej wpływającej z odbiornika.

Dla idealnie zestrojonego filtru dla  $n$ -tej harmonicznej prąd wyższej harmonicznej, generowany przez odbiór nieliniowy, przepływa przez filtr wyższej harmonicznej, nie wpływając do sieci zasilającej (rys. 2).



Rys. 2. Schemat zastępczy obwodu z odbiorem nieliniowym i filtrem wyższych harmonicznych dla rozplywu wyższych harmonicznych [5]:

- $I_{ho}$  – prąd  $n$ -tej harmonicznej odbiornika,
- $I_{hF}$  – prąd  $n$ -tej harmonicznej filtru,
- $I_{hs}$  – prąd  $n$ -tej harmonicznej źródła zasilania,
- $Z_{hF}$  – impedancja filtru dla  $n$ -tej harmonicznej,
- $Z_{hs}$  – impedancja źródła dla  $n$ -tej harmonicznej

Wadą takiego rozwiązania jest to, że nie może ono pracować w przypadku występowania odkształconego napięcia zasilającego, tj. zawierającego wyższą harmoniczną napięcia o częstotliwości rezonansowej filtru. W tym przypadku pasywny filtr LC stanowi obwód zamknięty dla prądów wyższej harmonicznej wywołanych odkształceniem napięcia zasilającego. Efektem tego jest przepływ prądów wyższej harmonicznej o znacznych amplitudach z sieci i przeciążenie filtru LC.

W praktyce stosuje się celowe rozstrojenie filtru pasywnego LC od częstotliwości rezonansowej. Filtr zestrojony jest na niższą częstotliwość od częstotliwości rezonansowej – posiada więc dla częstotliwości rezonansowej impedancję indukcyjną, której wartość wzrasta dla wyższych harmonicznych, stanowiąc ochronę przed przeciążeniem. Z drugiej strony przy rozstrojeniu filtru pasywnego LC od częstotliwości rezonansowej występuje rozplyw prądu wyższej harmonicznej generowanego przez odbiór nieliniowy pomiędzy sieć zasilającą i filtr pasywny. Przy zmie-

niającej się impedancji sieci zasilającej wskutek zmiany konfiguracji sieci bądź zmiany mocy zwarciowej systemu generującego efektywność działania filtru LC jest zmienna.

Rozpływ prądów wyższych harmonicznym generowanych przez odbiór nieliniowy pomiędzy filtr wyższej harmonicznym i sieć zasilającą określają zależności (2, 3).

$$I_{hF} = I_{ho} \cdot \frac{Z_{hs}}{Z_{hs} + Z_{hF}} \quad (2)$$

$$I_{hS} = I_{ho} \cdot \frac{Z_{hF}}{Z_{hs} + Z_{hF}} \quad (3)$$

Problemem pozostaje budowa złożonych układów filtrów pasywnych kompensujących cały zakres widma prądów wyższych harmonicznym generowanych przez odbiór nieliniowy. W każdym przypadku przed podjęciem decyzji o zainstalowaniu urządzeń kompensacyjnych należy zidentyfikować źródło wyższych harmonicznym prądu – odbiór nieliniowy czy odkształcenie napięcia zasilającego.

W praktyce oprócz oddzielnych filtrów rezonansowych LC budowanych dla poszczególnych głównych harmonicznym spotykane są również filtry kombinowane wykorzystujące te same elementy L i C w różnych konfiguracjach rezonansowych. Przy zmieniających się impedancjach zastępczych systemu może dojść do rezonansów szeregowych bądź równoległych w układzie.

Filtr pasywny LC dla częstotliwości mniejszej od częstotliwości rezonansowej posiada dla podstawo-

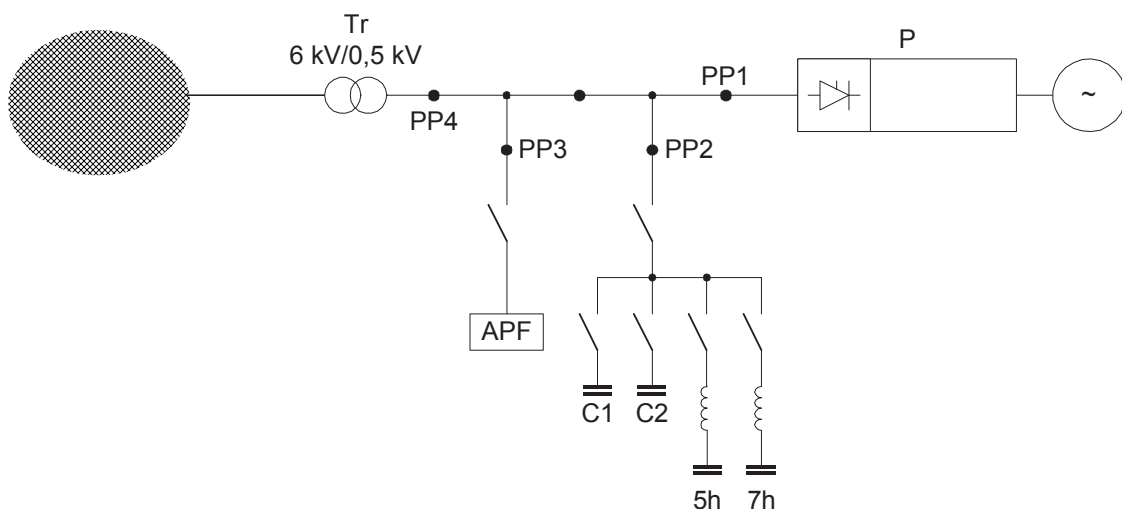
wej harmonicznym susceptancję pojemnościową – może więc skutecznie kompensować prąd przesunięcia fazowego harmonicznym podstawowej.

Od około 30 lat stosowane są do kompensacji oddziaływania odbiorów nieliniowych na sieć zasilającą aktywne filtry mocy, pracujące w układach równoległych lub szeregowych [3]. Rozwój energoelektroniki spowodował szybki rozwój tych środków technicznych. Teoretyczną podstawę ich działania stanowią mogą liczne odmiany teorii mocy chwilowej (IPT) lub teoria składowych fizycznych prądu (CPC). Oba kierunki prac teoretycznych rozwinęły się dopiero po 1983 roku.

Z technicznego punktu widzenia korzystniejsze jest zastosowanie równoległego aktywnego filtru mocy. Opracowane na podstawie tych teorii algorytmy sterowania aktywnymi filtrami mocy pozwalają na wygenerowanie przez te filtry takiego prądu dodatkowego, który eliminuje z prądu pobieranego z sieci przez odbiór nieliniowy składową bierną prądu i wyższe harmonicznym prądu oraz umożliwia symetryzację obciążenia sieci w przypadku odbiorów niesymetrycznych, nie posiadając przy tym wad charakterystycznych dla filtrów pasywnych i baterii kondensatorów.

### 3. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH

Praktyczną weryfikację pracy układów ograniczających negatywne oddziaływanie odbiorów nieliniowych na sieć zasilającą przeprowadzono w układzie laboratoryjnym przedstawionym na rys. 3. [5].



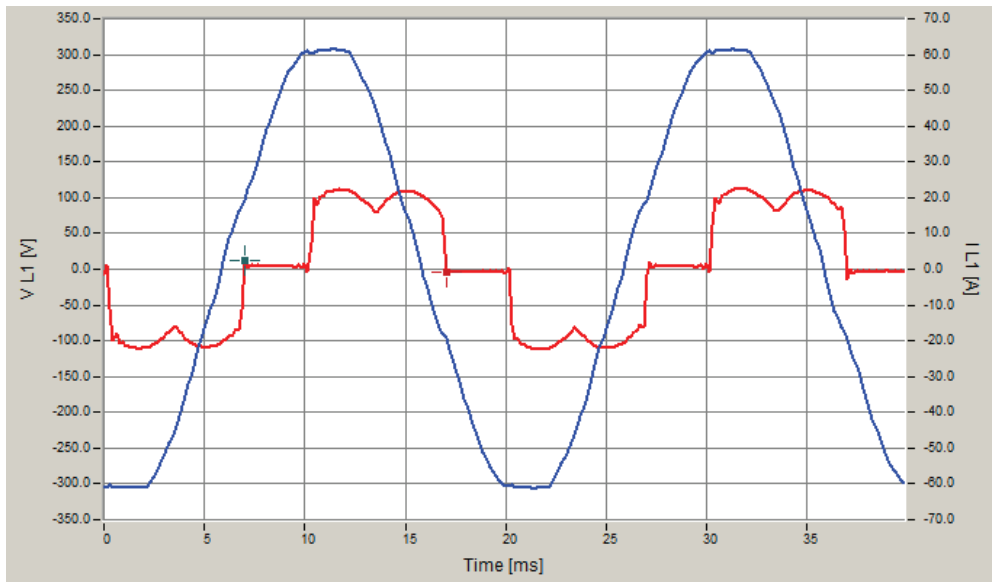
Rys. 3. Schemat laboratoryjnego układu pomiarowego do badań nad ograniczeniem oddziaływania odbiorów nieliniowych na sieć [5]:

P – przełącznik mocy, APF – aktywny filtr mocy, 5h, 7h – filtry pasywne 5. i 7. harmonicznym, C1, C2 – baterie kondensatorów, PP1-PP4 – punkty pomiarowe

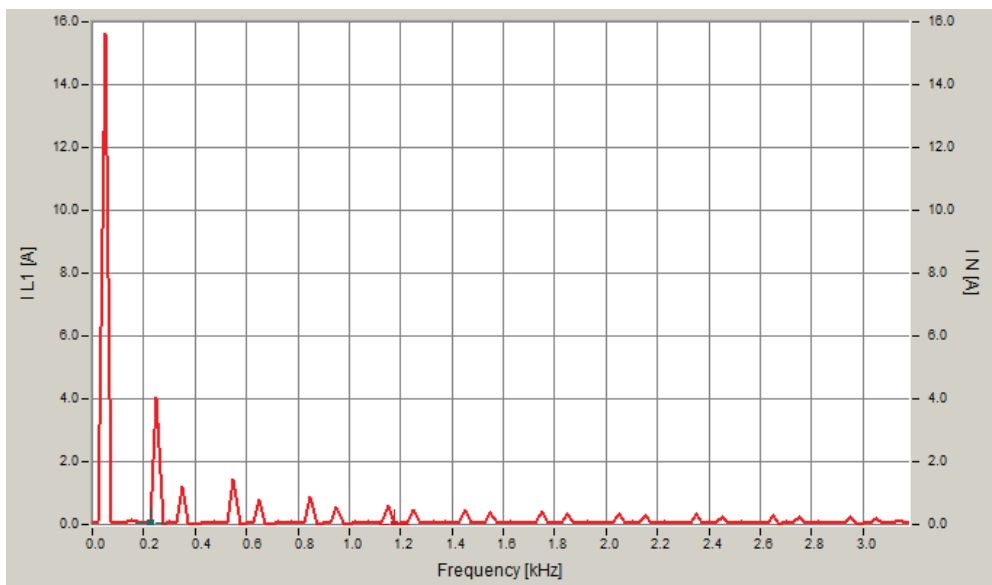
Wyniki badań w postaci przebiegów czasowych napięć i prądów oraz ich widm harmonicznych dla

układów pracujących w różnych konfiguracjach przedstawiono na rys. 4-8.

a)

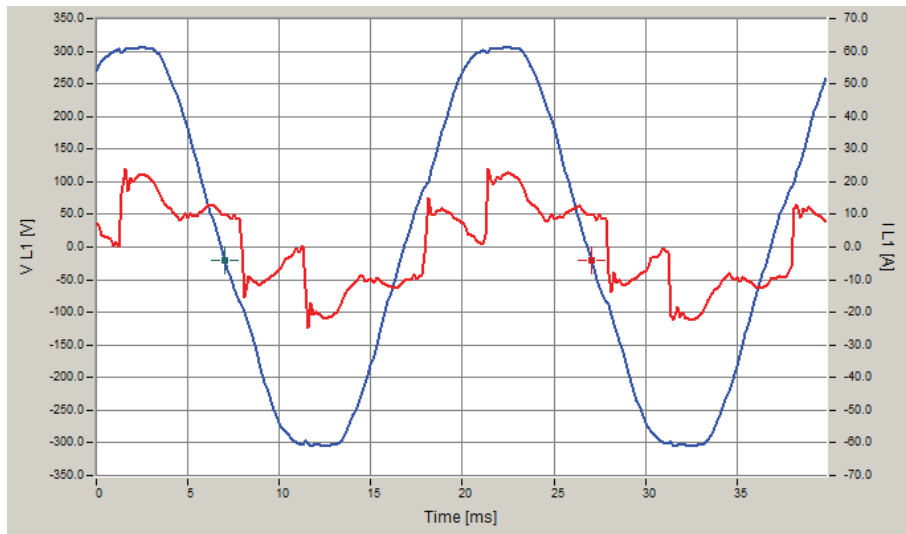


b)

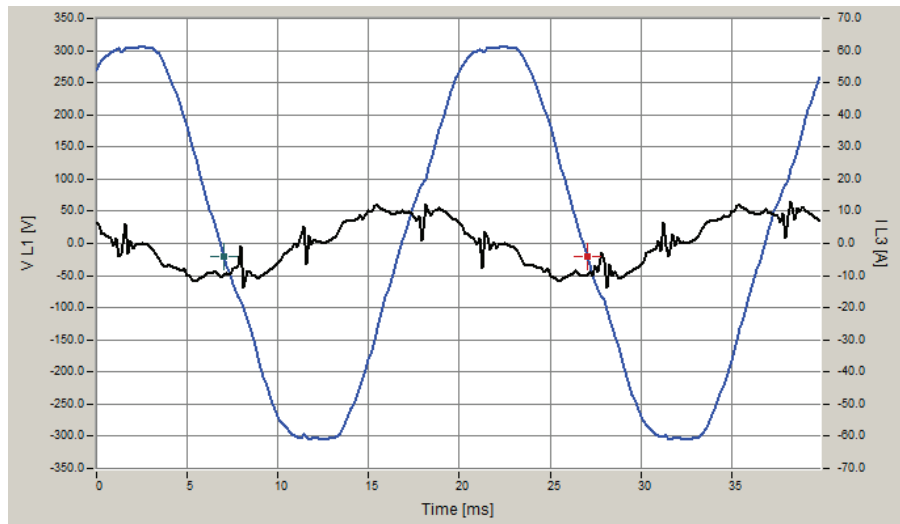


Rys. 4. Przebieg napięcia sieci (PP4) i prądu [5]:  
a) pobieranego przez prostownik sterowany (PP1), b) wraz z widmem harmonicznych prądu

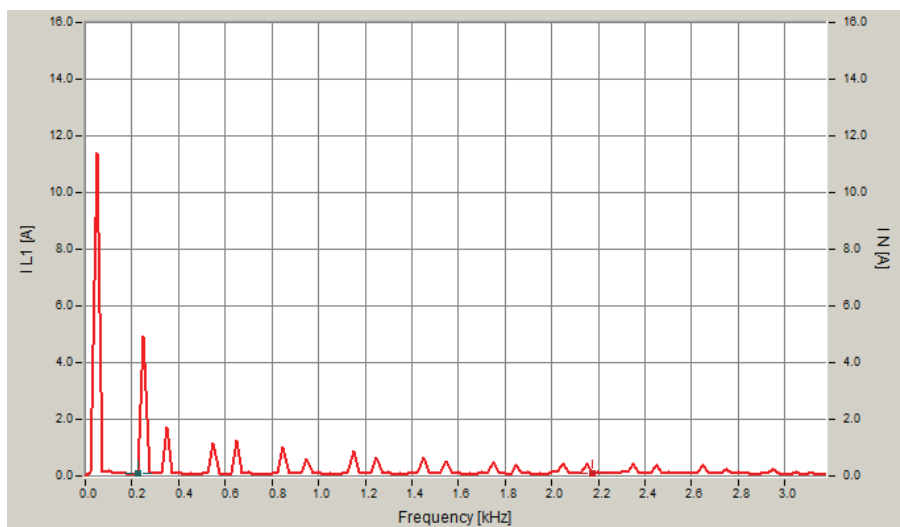
a)



b)

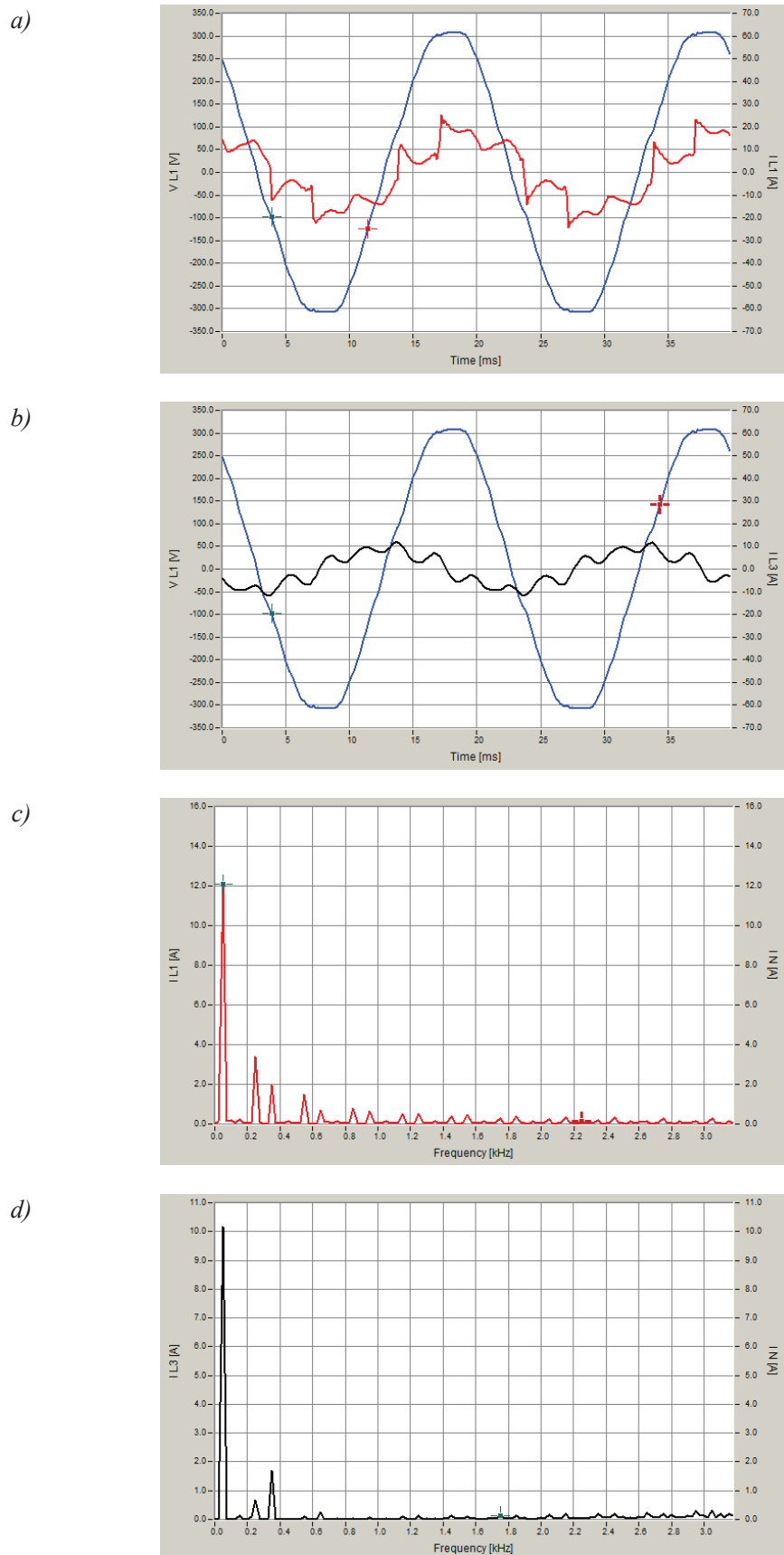


c)



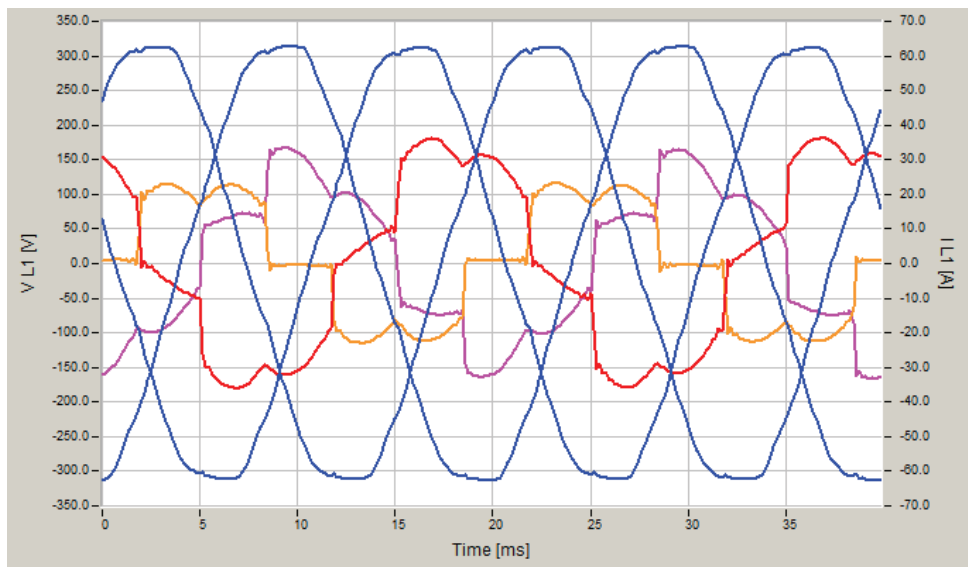
Rys. 5. Przebieg napięcia sieci (PP4) i prądu w układzie zawierającym prostownik sterowany ( $\alpha = 50^\circ$ ) i baterie kondensatorów [5]:

- a) pobieranego przez prostownik sterowany (PP1), b) wraz z prądem baterii kondensatorów (PP2),  
c) wraz z widmem harmonicznych prądu sieci

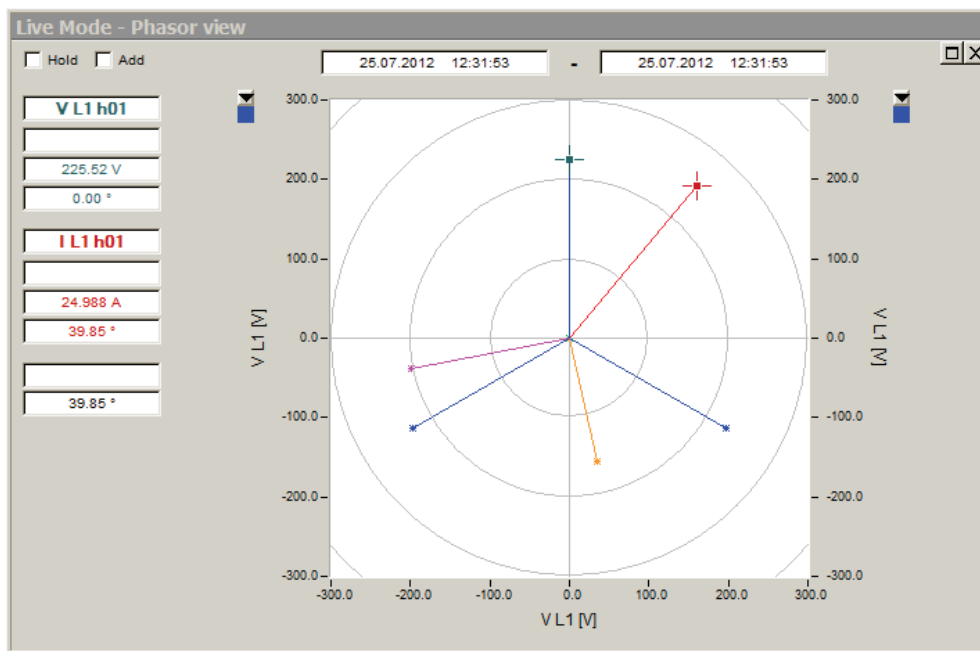


Rys. 6. Przebieg napięcia sieci (PP4) i prądu w układzie zawierającym prostownik sterowany  $\alpha = 50^\circ$  i filtry  $5h + 7h$  [5]:  
 a) pobieranego przez prostownik sterowany (PP1), b) wraz z prądem filtrów  $5h + 7h$  (PP2),  
 c) wraz z widmem prądów filtrów, d) wraz z widmem harmoniczných prądów sieci

a)



b)

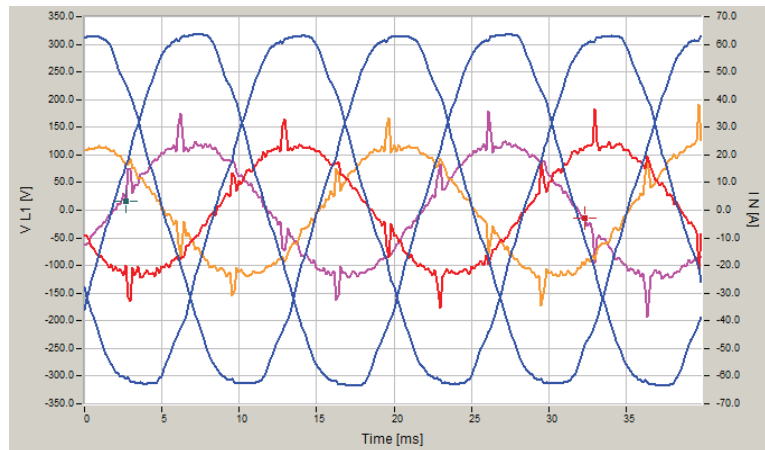


Rys. 7. Przebieg napięcia sieci (PP4) i prądu w układzie zawierającym prostownik sterowany ( $\alpha = 50^\circ$ ) i obciążenie asymetryczne włączone między fazy L1 i L3 [5]:

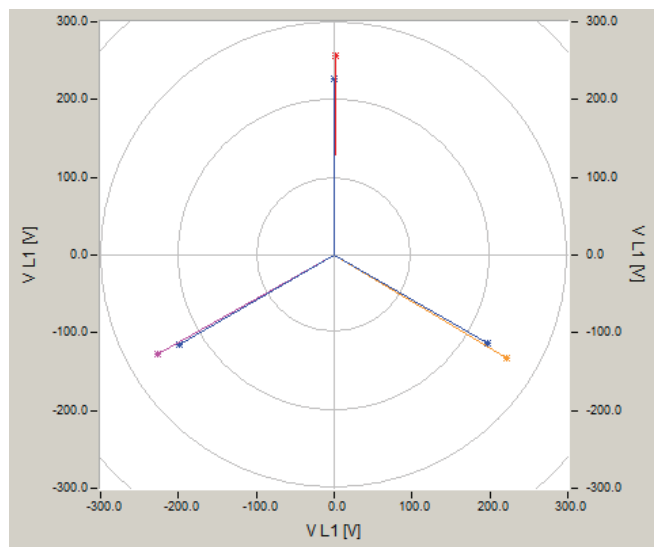
- a) pobieranego przez prostownik sterowany i odbiór asymetryczny (R włączony między fazy L1 i L3),
- b) w układzie gwiazda napięć i prądów



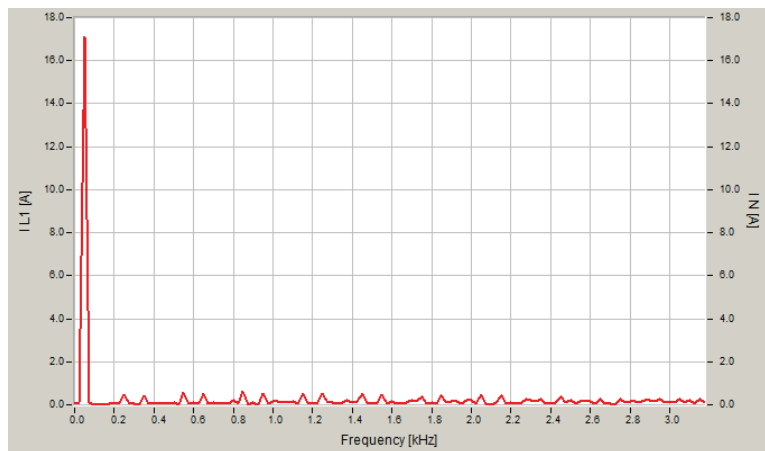
a)



b)



c)

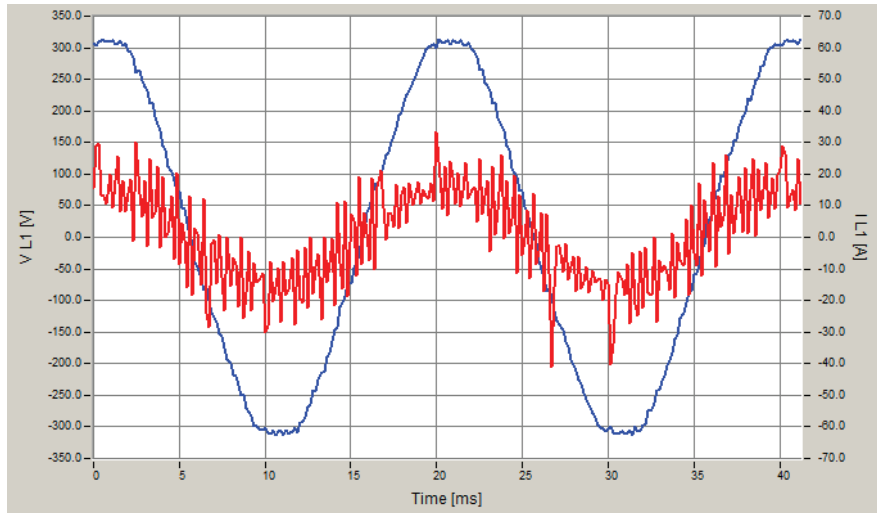


Rys. 8. Przebieg napięcia sieci (PP4) i prądu w układzie zawierającym prostownik sterowany ( $\alpha = 50^\circ$ ) i obciążenie asymetryczne włączone między fazy L1-L3 i filtr aktywny REFA [5]:  
 a) pobieranego przez układ złożony z prostownika sterowanego, odbioru asymetrycznego (R włączony między fazy L1 i L3) i filtra REFA, b) gwiazda napięć i prądów,  
 c) wraz z widmem harmonicznych prądu w fazie L2

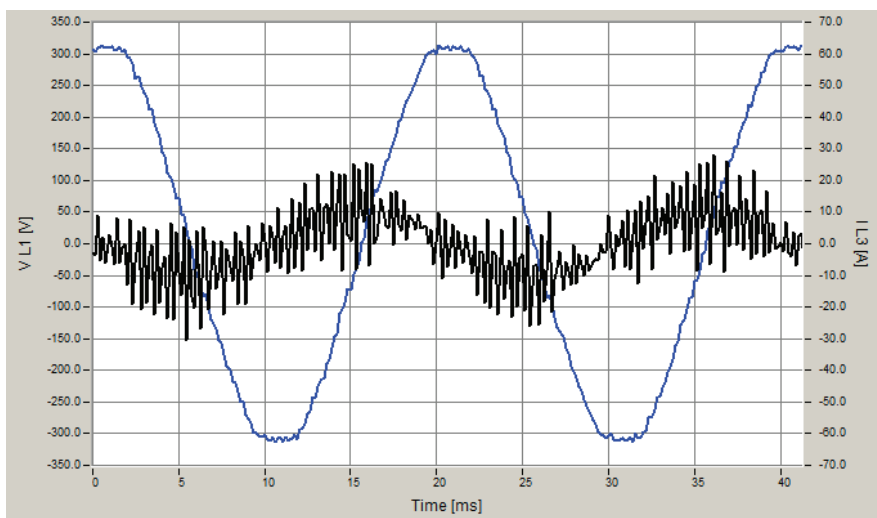
W przypadku współpracy baterii kondensatorów z równoległym aktywnym filtrem mocy istnieje niebezpieczeństwo wzbudzenia drgań rezonansowych. Sytuację taką ilustrują przebiegi napięć

i prądów przedstawione na rys. 9. Konieczne jest wówczas rozstrojenie układu rezonansowego przez zastosowanie dławika ochronnego baterii kondensatorów.

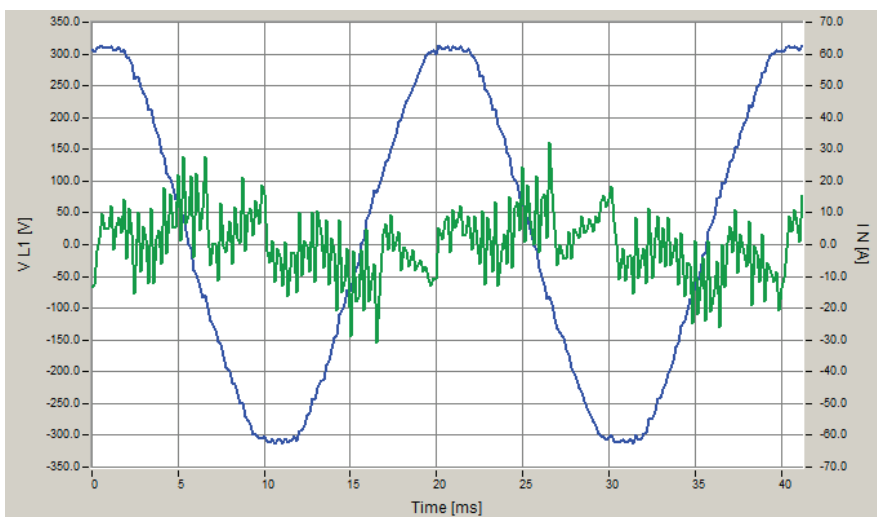
a)



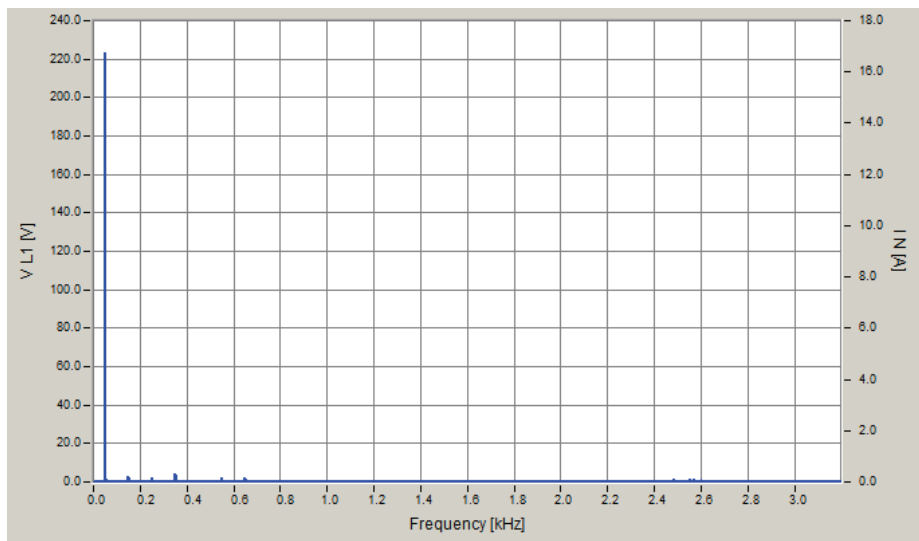
b)



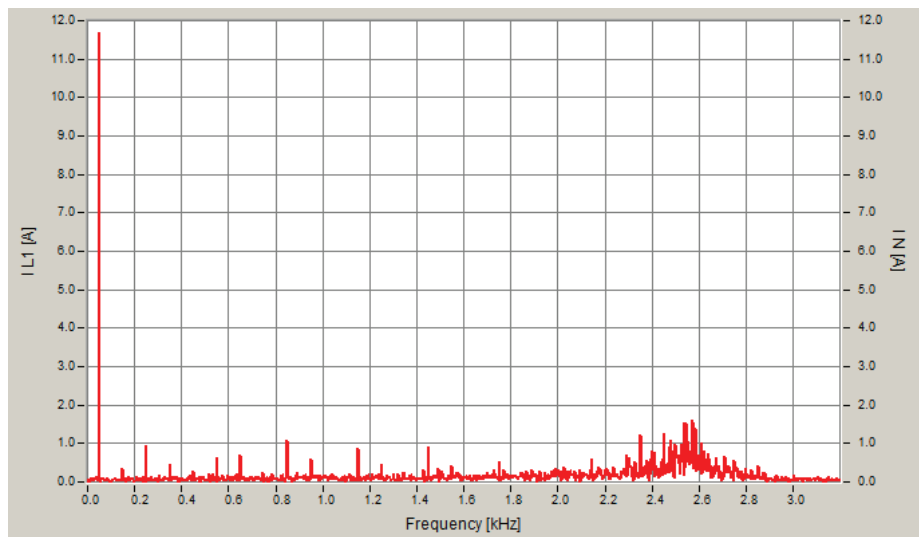
c)



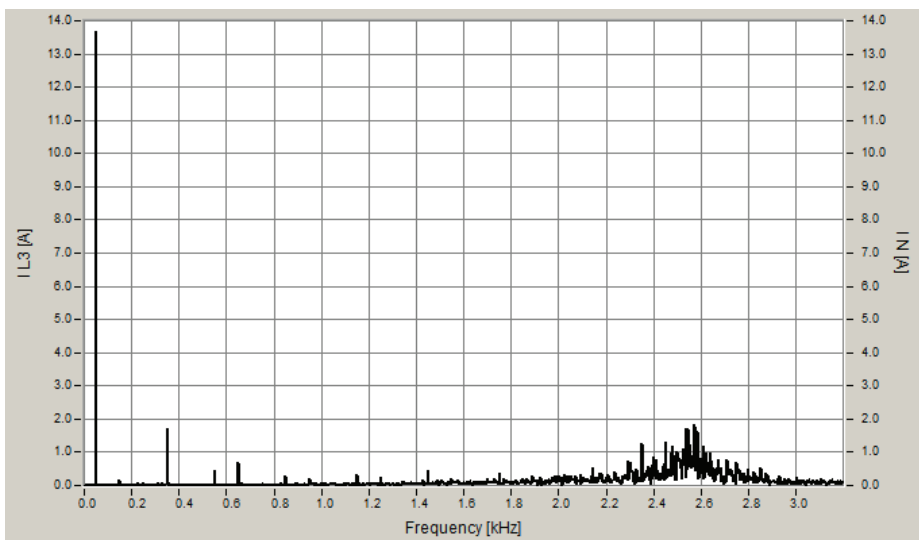
d)



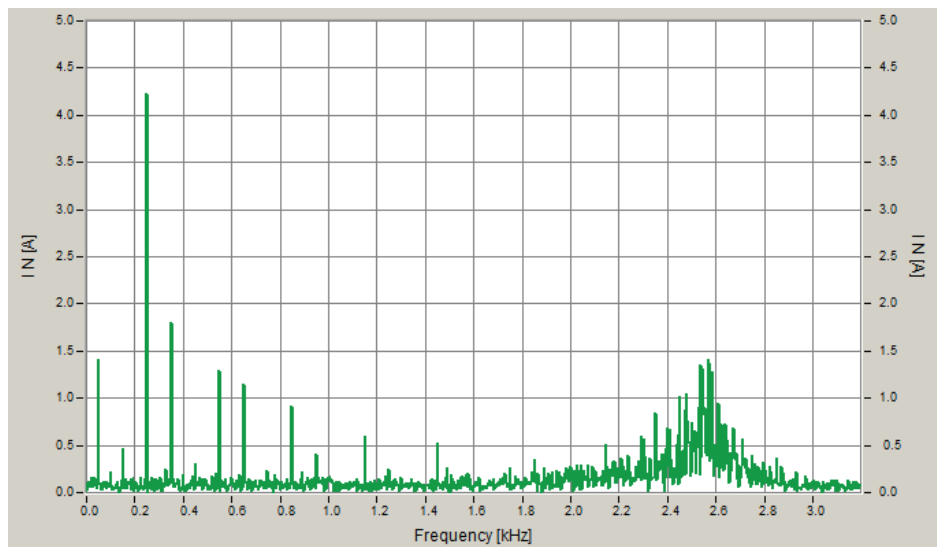
e)



f)



g)



Rys. 9. Przebieg napięć i prądów w układzie kompensacyjnym złożonym z baterii kondensatorów i równoległego aktywnego filtra mocy [5]:  
 a) przebieg napięcia i prądu sieci, b) przebieg napięcia i prądu baterii kondensatorów,  
 c) przebieg napięcia i prądu filtra aktywnego, d) widmo harmonicznych napięcia sieci,  
 e) widmo harmonicznych prądu sieci, f) widmo harmonicznych prądu baterii kondensatorów,  
 g) widmo harmonicznych prądu równoległego aktywnego filtra mocy

#### 4. PODSUMOWANIE

Wykorzystanie baterii kondensatorów statycznych do kompensacji mocy bierniej odbiorów nieliniowych pozwala na skompensowanie podstawowej harmonicznej prądu biernego. Wypadkowy kształt prądu pobranego z sieci ulega zmianie, a zawartość wyższych harmonicznych ulega nieznacznemu ograniczeniu.

Wykorzystanie filtrów pasywnych wyższej harmonicznej pozwala na skompensowanie podstawowej harmonicznej prądu biernego pobieranego z sieci oraz na znaczne ograniczenia amplitud prądów harmonicznych charakterystycznych dla filtrów pasywnych.

Zainstalowanie aktywnych filtrów mocy pozwala na pełne wyeliminowanie wyższych harmonicznych w prądzie obciążenia sieci oraz pełną kompensację prądu biernego.

Współpraca aktywnego filtra mocy z baterią kondensatorów w układach zawierających odbiory nieliniowe może prowadzić do wzbudzenia drgań oscylacyjnych prądów sieci i baterii kondensatorów oraz towarzyszących im przepięć.

Z analizy przebiegów prądów i napięć w różnych układach kompensacyjnych wynika, że jedynym w pełni skutecznym środkiem ograniczającym (praktycznie eliminującym) wpływ odbiorów nieliniowych na sieć zasilającą są aktywne filtry mocy.

#### Literatura

1. Adrikowski T., Buła D., Dębowski K., Maciążek M., Pasko M.: *Analiza wybranych właściwości energetycznych filtrów aktywnych*, Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2011.
2. Bolkowski S.: *Teoria obwodów elektrycznych*, WNT, Warszawa 1995.
3. Czarnecki L. S.: *Moce w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć*, Oficyna Wydawnicza Pol. Warszawskiej, 2005.
4. Strzelecki R., Supronowicz H.: *Filtracja harmonicznych w sieciach zasilających prądu przemiennego*, PAN, Komitet Elektrotechniki, Wyd. A. Marszałek, 1998.
5. Wośik J., Kalus M., Firlit A., Hanzelka Z.: *Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego pt. „Badania nad hybrydowym układem kompensacji mocy nieaktywnych – NCN”*, Instytut Techniki Innowacyjnych EMAG, Katowice 2012.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.