

Tomasz SZCZYGIEŁ  
Politechnika Śląska

## STEROWANIE FILTRACJĄ HARMONICZNYCH W UJĘCIU PROGRAMOWANIA W LOGICE Z OGRANICZENIAMI

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono problem sterowania aktywną filtracją wyższych harmoniczných w systemach elektroenergetycznych. Na wstępie wyjaśniono mechanizm powstawania wyższych harmoniczných w sieciach elektroenergetycznych oraz omówiono ideę działania tradycyjnych filtrów LC. Następnie przedstawiono podział filtrów aktywnych oraz omówiono podstawowe właściwości filtrów aktywnych. Dalej zaproponowano realizację sterownika filtra aktywnego za pomocą programowania w logice z ograniczeniami. Na koniec zamieszczono symulację działania układów filtrów aktywnych dla danych pomiarowych rzeczywistego obiektu, gdzie sterownik filtra aktywnego zrealizowano w języku typu CLP - ECL<sup>i</sup>PS<sup>e</sup>.

## CONTROL OF HARMONICS FILTRATION IN CONSTRAINT LOGIC PROGRAMMING

**Summary.** The following paper a Constraint Logic Programming to control of harmonics filtration presented. The paper starts with problem discussion. The type of active power filters are discussed next. Finally the charts obtained during the simulation and experimental test are presented. All experiments are implemented in ECL<sup>i</sup>PS<sup>e</sup>.

### 1. Wstęp

W ostatnich latach coraz częściej mówi się o jakości energii elektrycznej. Definicja *jakości energii* zaczerpnięta z [2] mówi, że jest to zbiór parametrów opisujących właściwości procesu dostarczenia energii do użytkownika w normalnych warunkach pracy, określających ciągłość zasilania oraz charakteryzujących napięcie zasilające (wartość, asymetrię, częstotliwość, kształt przebiegu czasowego).

Za ciągłość zasilania odpowiedzialne są układy automatyki sterowania systemem elektroenergetycznym. Realizacja wybranych problemów sterowania systemem elektroenergetycznym za pomocą programowania w logice z ograniczeniami CLP (*Constraint Logic Programming*) została omówiona w [4], [5] i [6].

Osobnym zagadnieniem mającym wpływ nie tylko na jakość energii elektrycznej, ale również istotnie wpływającym na straty w systemie elektroenergetycznym jest kompensacja mocy biernej. Sterowanie kompensacją mocy biernej za pomocą regulatora zrealizowanego w CLP zostało przedstawione w [7].

Kolejnym problemem jakości energii elektrycznej jest kształt przebiegu czasowego, a właściwie odkształcenia przebiegów czasowych napięć i prądów. Jak powszechnie wiadomo, napięcia i prądy zasilania mają przebieg sinusoidalny. Miarą odkształceń są wartości harmoniczných napięć i prądów.

Eksplloatowane odbiorniki energii o nieliniowych charakterystykach wprowadzają do sieci wyższe harmoniczne (harmoniczna definiowana jest jako składowa przebiegu o częstotliwości będącej całkowitą wielokrotnością częstotliwości podstawowej). Filtracja wyższych harmoniczných jest konieczna nie tylko z uwagi na odkształcenia przebiegów czasowych napięć i prądów zasilających, ale również możliwość kompensacji mocy biernej. Zmniejszanie reaktancji kondensatorów ze wzrostem częstotliwości powoduje kilkakrotny wzrost prądu, który niszczy kondensator.

Filtracja wyższych harmoniczných możliwa jest za pomocą:

- tradycyjnych filtrów LC;
- filtrów aktywnych APF (*Active Power Filter*).

Pojedynczy tradycyjny rezonansowy filtr LC, dołączony równolegle do sieci zasilającej lub zacisków odbiornika, redukuje tylko jedną wyższą harmoniczną, np.: 5. harmoniczną. Chcąc zredukować inne wyższe harmoniczne, należy odpowiednio zwiększyć liczbę filtrów LC. Wartości pojemności i indukcyjności w każdej gałęzi filtru LC dobiera się na podstawie warunku rezonansu napięć [3]. Ze względu na pojemność występującą w każdej gałęzi filtru LC znajdują one również zastosowanie do kompensacji mocy biernej harmoniczných podstawowej.

Analizowane w artykule układy są układami sieci 1-fazowej, ponieważ rozszerzenie tych układów na sieć 3-fazową jest tylko powieleniem układu sieci 1-fazowej. Dodatkowo nie rozważa się sieci 3-fazowej niesymetrycznej, ponieważ symetryzacja sieci jest osobnym zagadnieniem nie analizowanym w tym artykule.

## 2. Teza

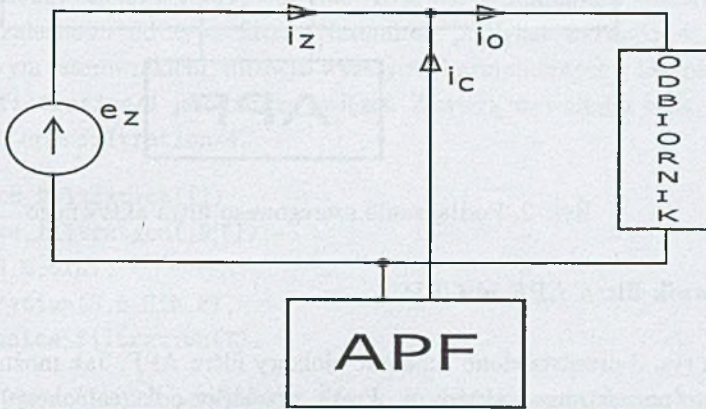
*Istnieje alternatywna realizacja algorytmu sterowania sterownika filtru APF bazująca na programowaniu w logice z ograniczeniami CLP, umożliwiającą większą elastyczność realizacji algorytmu.*

## 3. Filtry aktywne APF

W zależności od sposobu przyłączenia układów energetycznych filtrów aktywnych APF rozróżniamy [3]:

- filtry aktywne równoległe - prądowe;
- filtry aktywne szeregowe - napięciowe.

Przy aktywnej równoległej filtracji - układ APF jest sterowanym źródłem prądu kompensacji  $i_c$  przyłączonym równoległe do odbiornika. Na rys. 1 widać, że prąd odbiornika  $i_o$  jest sumą prądu  $i_c$  oraz  $i_z$  pobieranego z linii zasilającej.



Rys. 1. Podłączenie równoległego filtra aktywnego

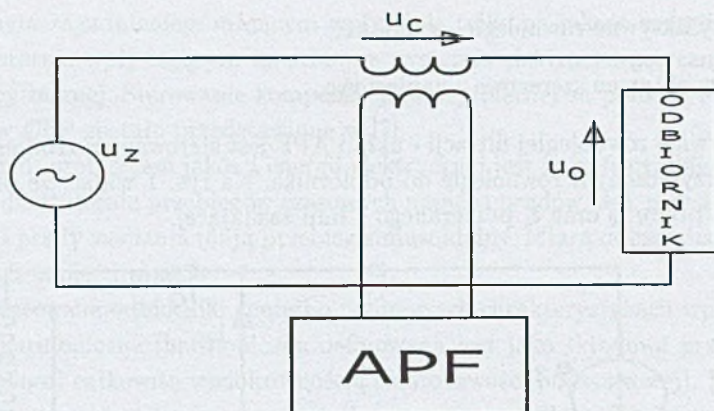
Układ aktywnego filtra równoległego przedstawiony na rys. 1 charakteryzuje się [3]:

- filtracją wyższych harmoniczných prądu niezależną od impedancji sieci;
- filtracją wyższych harmoniczných na poziomie nieosiągalnym przez filtry bierne LC;
- kompensacją składowej biernej prądu odbiornika o częstotliwości podstawowej;
- lepszymi właściwościami dynamicznymi niż tradycyjne kompensatory mocy biernej - tzn. baterie kondensatorów z łącznikami tyrystorowymi.

W przypadku aktywnej szeregowej filtracji - układ APF jest sterowanym źródłem napięcia kompensacji przyłączonym szeregowo do odbiornika. Na rys. 2 widać, że napięcie odbiornika  $u_o$  jest superpozycją napięcia zasilania  $u_z$  i napięcia  $u_c$  nadążającego za wzorcowym przebiegiem kompensującym z APF. W praktyce, obydwa wyżej przedstawione układy filtrów aktywných są bardziej skomplikowane, niż przedstawiają to rys. 1 i rys. 2. Jednak w obydwu układach APF można wyróżnić:

- moduł z układem energetycznym;
- moduł z algorytmem modulacji przebiegu kompensacji;
- moduł sterownika filtru APF.

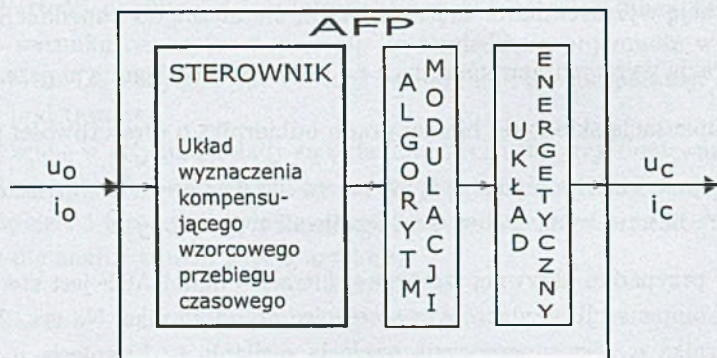
W niniejszym artykule skupiono uwagę na module sterownika filtru APF.



Rys. 2. Podłączenie szeregowego filtra aktywnego

#### 4. Sterownik filtra APF w CLP

Na rys. 3 przedstawiono schemat blokowy filtra APF. Jak można zauważyć, dane pomiarowe (pozyskiwane w każdym okresie przebiegu odkształconego) pojawiają się na wejściu modułu sterownika filtra APF. Sterownik wyznacza wzorcowy przebieg czasowy sygnału kompensacji i przekazuje te dane do algorytmu modulacji przebiegu kompensacji. Moduł modulacji bezpośrednio steruje już układem energetycznym realizującym kompensację.



Rys. 3. Schemat blokowy filtra APF

Algorytm sterownika filtra APF może być stosunkowo prosto zrealizowany, np.: w sterowniku swobodnie programowalnym. Jednak takie rozwiązanie - choć bardzo popularne - jest mało elastyczne pod względem zmian w kodzie. Jeżeli omawiane rozwiązanie ma mieć możliwość automatycznego dostosowywania się do długości wektora danych, kod programu pokaźnie się rozrasta. Alternatywą dla tradycyjnych realizacji sterownika układu APF jest realizacja tego sterownika w CLP. Idea rozwiązania bazuje na deklaracyjnym opisie działania sterownika filtra aktywnego w dziedzinie klauzul Horna. Zwięzłość i czytelność kodu czyni to rozwiązanie bardzo elastycznym.

Deklaratywny opis sterownika - zgodny z modelem z rys. 3 - jest jednocześnie głównym predykatem programu. Opis ten przedstawiony jest poniżej:

run: -

```
measurements(Data),
harmonics_filtration(Data).
```

Predykat `measurements/1` tworzy "on-line" listę list z pomiarami wielkości fizycznych: `u` lub `i` w zależności od typu filtru. Natomiast predykat `harmonics_filtration/1` jest właściwym sterownikiem filtracji wyższych harmoniczných. Definicja predykatu `harmonics_filtration/1` jest bardzo zwięzła. Zawiera wywołania tylko dwóch predykatów: `fft/3` oraz `filtration/4`.

```
harmonics_filtration([]).
harmonics_filtration([H|T]):-
    fft(H,B,Sin),
    filtration(H,B,Sin,F),
    harmonics_filtration(T).
```

Pierwszy z wymienionych predykatów `fft/3` wyznacza harmoniczną podstawową odkształconego przebiegu okresowego za pomocą szybkiej transformaty Fouriera. Predykat posiada parametr wejściowy:  $H$  - lista pomiarów odkształconego napięcia lub prądu odbiornika oraz następujące parametry wyjściowe:  $B$  - amplituda harmoniczných podstawowej i  $Sin$  - wartości funkcji sinus dla harmoniczných podstawowej. Omawiany predykat `fft/3` zawiera z kolei wywołanie prywatnego predykatu `calc_multi_sin/4`, który oblicza wartości funkcji sinus w kolejnych chwilach próbkowania. Kod źródłowy tego predykatu przedstawiony jest poniżej:

```
fft(H,B,Sin):-
    length(H,N),
    calc_multi_sin(H,HS,0,Sin),
    ( foreach(X,HS), fromto(0,In,Out,Sum) do Out is In+X ),
    B is (2*Sum)/N.
```

Drugi z wymienionych predykatów `filtration/4` odfiltrowuje składową podstawową z odkształconego przebiegu, i tym samym wyznacza przebieg filtrujący. Kolejno parametrami wejściowymi predykatu są: lista pomiarów odkształconego napięcia lub prądu odbiornika, amplituda harmoniczných podstawowej i lista wartości funkcji sinus harmoniczných podstawowej. Parametrem wyjściowym jest lista wartości przebiegu filtrującego. Definicja jest następująca:

```
filtration([],_,[],F).
filtration([H|T],B,[HSin|TSin],[FH|FT]):-
    FH is H-(B*HSin),
    filtration(T,B,TSin,FT).
```

Jak widać, w pełni funkcjonalny sterownik filtra aktywnego zawiera się w kilkunastu liniach kodu. Uniwersalność tego kodu pozwala na zastosowanie go zarówno w filtrach równoległych (prądowych), jak również szeregowych (napięciowych). Predykat `fft/3` automatycznie dostosowuje się do długości wektora wejściowych danych pomiarowych.

W przypadku selektywnej filtracji harmonicznycch lub filtracji wyższych harmonicznycch o zadanym poziomie THD (*Total Harmonic Distortion*) wykorzystujemy naturalną cechę CLP - ograniczenia. Dla selektywnej filtracji korzystamy z (1), natomiast dla filtracji o zadanym poziomie THD z (2).

$$w_k = \frac{A_k}{A_1} \quad (1)$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} A_k^2}}{A_1} \times 100\% \quad (2)$$

gdzie:  $A_k$  - współczynniki szeregu Fouriera filtrowanego przebiegu.

Z uwagi na fakt, że dyskutowane przypadki są podobne z punktu widzenia realizacji sterownika filtra aktywnego APF, różnią się jedynie wzorami (1) i (2) w artykule zostanie przedstawiony przypadek drugi. I tak dla przypadku z zadanym poziomem THD wystarczy wprowadzić ograniczenie do predykatu `harmonics_filtration/1`.

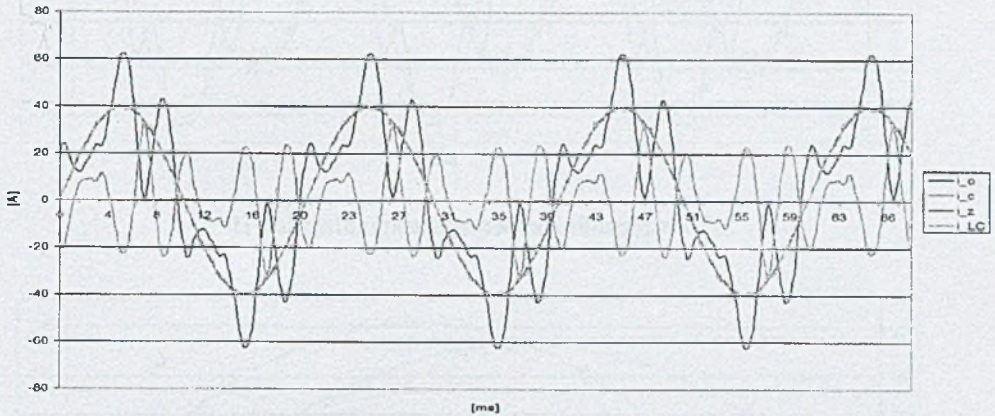
```
harmonics_filtration([]).
harmonics_filtration([H|T]):-
    ...,
    THD $=< 8.0,
    THD_s is ((X2*B2+ ... + X12*B12/B1)*100),
    sqrt(THD_s,THD),
    min_max(labeling(X),THD),
    ...
    harmonics_filtration(T).
```

Wprowadzone zmiany do predykatu polegają na: ograniczeniu współczynnika THD na poziomie równym lub mniejszym 8%, wprowadzeniu dodatkowej listy zmiennych binarnych  $X$  - decydujących o uwzględnieniu danej wyższej harmonicznycch w procesie filtracji. Standardowy predykat `min_max/2` optymalizuje funkcję celu, która w tym przypadku jest współczynnikiem THD.

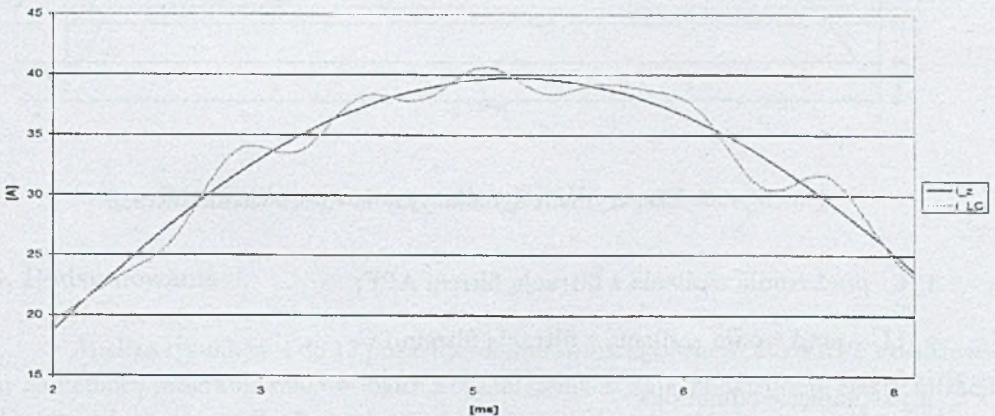
## 5. Eksperyment symulacyjny

Dla danych pochodzących z rzeczywistego obiektu o dużym stopniu skomplikowania - huty stali, gdzie pracują piece lukowe - przeprowadzono eksperymenty symulacyjne. Eksperymenty obejmowały zarówno sterowanie filtracją wyższych harmonicznycch w układzie równoległym, jak i układzie szeregowym. Wyniki symulacji - filtracji wyższych harmonicznycch - przedstawiają rys. 4 do rys. 13. Rysunki 4 i 6 pokazują filtrację wyższych harmonicznycch prądu. Pierwszy z wykresów przedstawia prąd odbiornika zawierający wyższe harmoniczne prądu z przesunięciem fazowym względem fazy harmonicznycch

podstawowej. Drugi z wykresów przedstawia prąd odbiornika zawierający wyższe harmoniczne bez przesunięcia fazowego. Rysunek 8 przedstawia prąd odbiornika wstępnie wyfiltrowany za pomocą dławika zabudowanego na kablu zasilającym odbiornika. Kolejne dwa wykresy przedstawiają filtrację wyższych harmonicznych napięcia. Rysunek 10 przedstawia filtrację napięcia zawierającego wyższe harmoniczne z przesunięciem fazowym względem harmonicznej podstawowej. Natomiast rys. 12 przedstawia napięcie odbiornika wstępnie wyfiltrowane za pomocą tradycyjnej metody filtracji.



Rys. 4. Eksperyment symulacyjny I

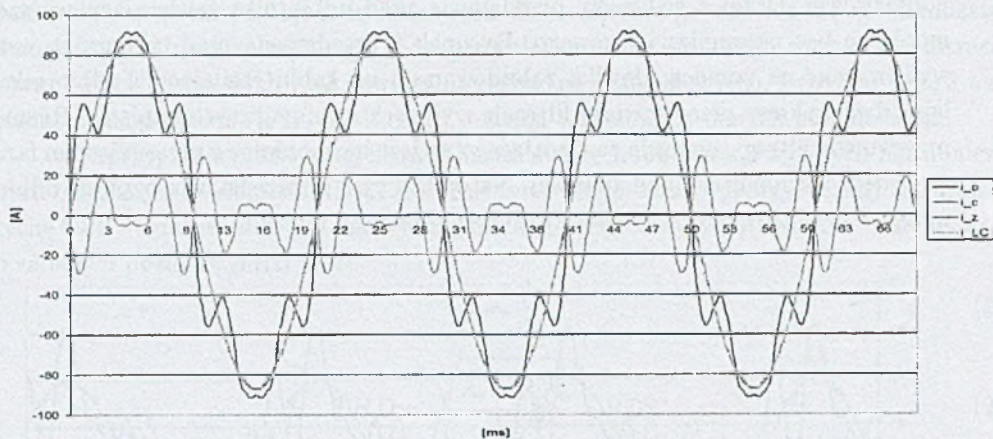


Rys. 5. Eksperyment symulacyjny I - porównanie filtracji

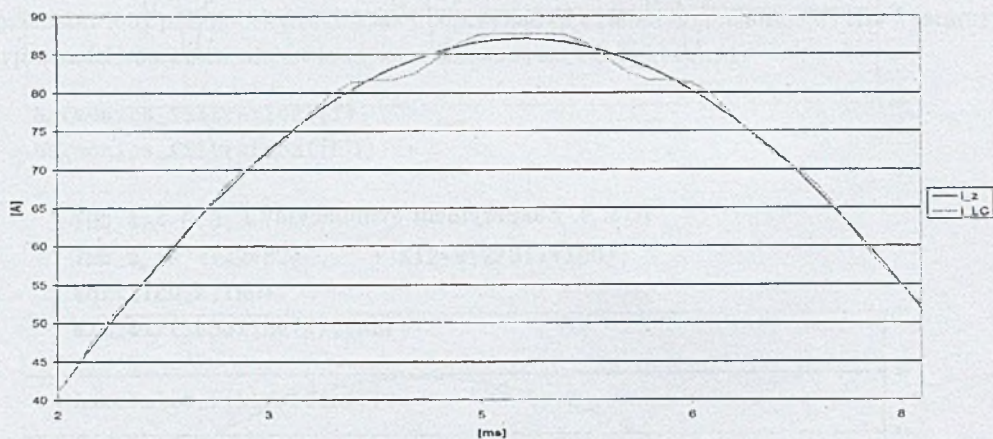
Oznaczenia na rysunkach są następujące:

$i_o$  - prąd odbiornika;

$i_c$  - prąd kompensacji aktywnego filtru APF;



Rys. 6. Eksperyment symulacyjny II



Rys. 7. Eksperyment symulacyjny II - porównanie filtracji

$i_z$  - prąd źródła zasilania z filtracją filtrem APF;

$i_{LC}$  - prąd źródła zasilania z filtracją filtrem LC;

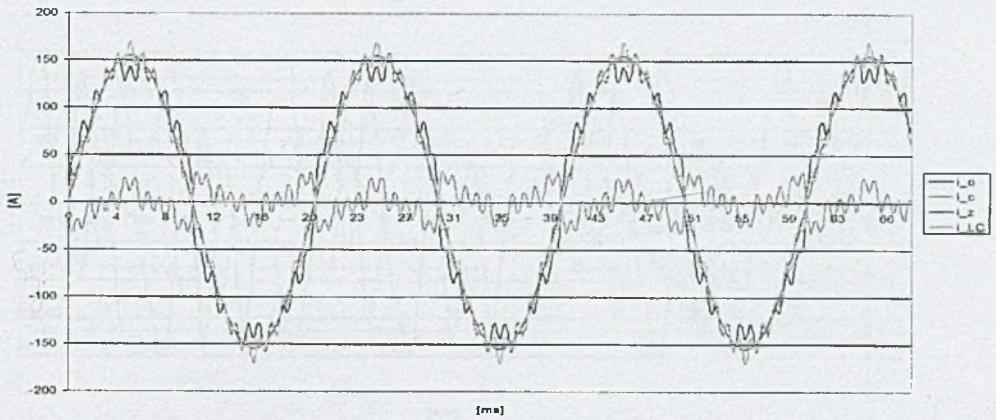
$u_o$  - napięcie odbiornika;

$u_c$  - napięcie kompensacji aktywnego filtru APF;

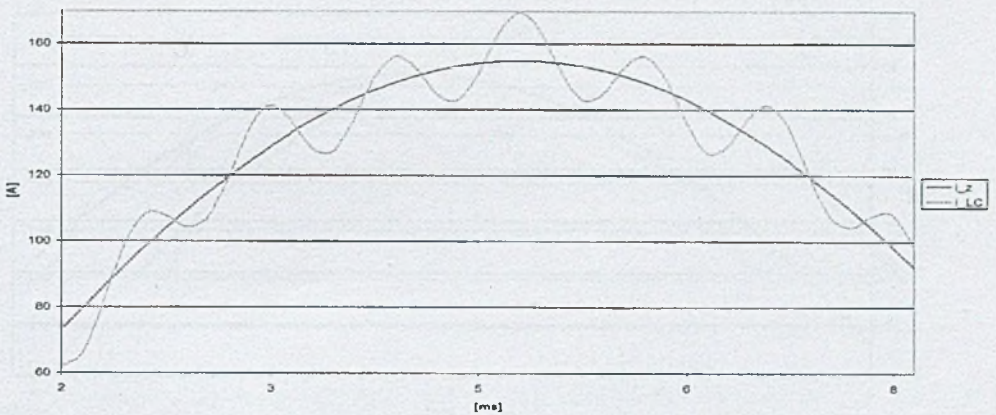
$u_z$  - napięcie źródła zasilania z filtracją filtrem APF;

$u_{LC}$  - napięcie źródła zasilania z filtracją filtrem LC.





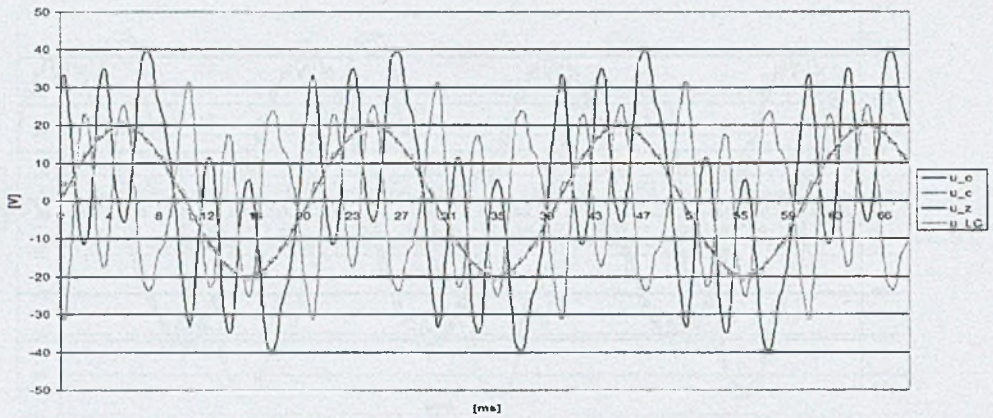
Rys. 8. Eksperyment symulacyjny III



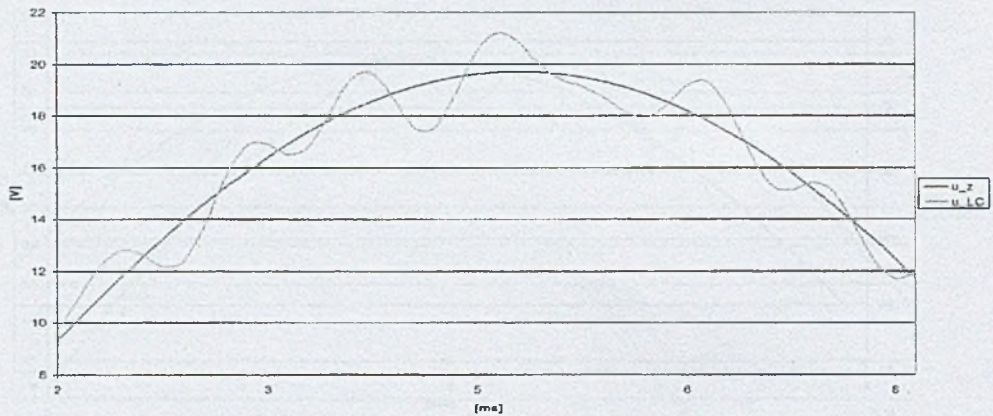
Rys. 9. Eksperyment symulacyjny III - porównanie filtracji

## 6. Podsumowanie

Analiza rysunków 4 do 13 pokazuje, że sterownik aktywnego filtra APF zrealizowany za pomocą programowania w logice z ograniczeniami daje bardzo dobre efekty filtracji. We wszystkich przypadkach przebiegiem odniesienia jest przebieg czasowy harmonicznej podstawowej, który to pokrywa się z przebiegiem czy to napięcia czy to prądu zasilania w przypadku filtracji filtrami APF. Na Rys. 5, Rys. 7, Rys. 9, Rys. 11 i Rys. 13 które są powiększeniem poszczególnych eksperymentów symulacyjnych można zauważyć, że we wszystkich przypadkach lepsze efekty daje filtracja aktywna ze sterownikiem filtra APF w CLP. Realizacja ta jest uniwersalna i niezależna od układu filtracji. Prostota realizacji tego sterownika w CLP pozwala na szybką implementację. Wprowadzenie odmian filtracji polegającej na selektywnym filtrowaniu wyższych harmonicznych lub o zadanym poziomie



Rys. 10. Eksperyment symulacyjny IV

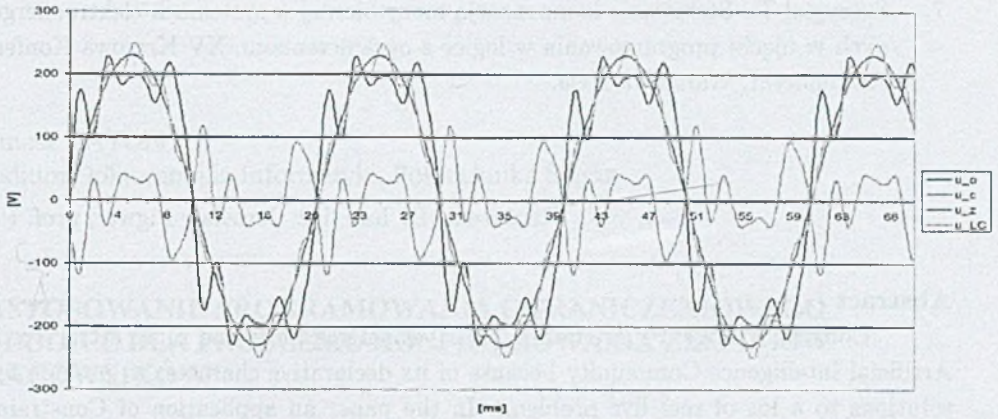


Rys. 11. Eksperyment symulacyjny IV - porównanie filtracji

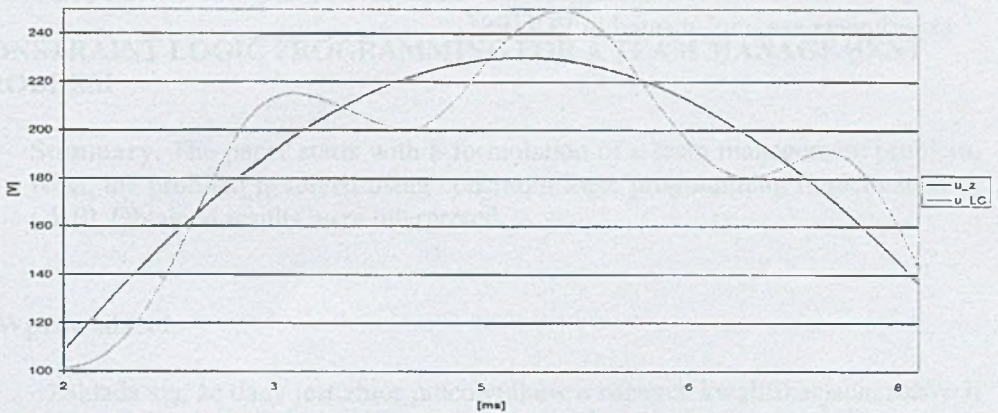
THD wiąże się jedynie z wprowadzeniem ograniczeń w definicji predykatu sterownika aktywnego filtra APF. Wadą tego rozwiązania jest konieczność stosowania - w chwili obecnej - ciągle jeszcze drogiego sprzętu umożliwiającego implementację sterownika aktywnego filtra APF w CLP.

## LITERATURA

1. IC-PARC: ECL<sup>4</sup>PS<sup>6</sup> User Manual. Londyn 2003.
2. Strojny J.: Vademekum elektryka, Wydawnictwo COSiW SEP, Warszawa 2004.



Rys. 12. Eksperyment symulacyjny V



Rys. 13. Eksperyment symulacyjny V - porównanie filtracji

3. Strzelecki R., Supronowicz H.: Filtracja harmonicznych w sieciach zasilających prądu przemiennego. Wydawnictwo "Adam Marszałek", Toruń 1998.
4. Szczygieł T.: Wybrane zagadnienia automatyki sterowania w systemach elektroenergetycznych w ujęciu programowania w logice z ograniczeniami., XIV Krajowa Konferencja Automatyki, Zielona Góra 2002.
5. Szczygieł T.: Algorytmy automatyki odciążania. XIV Krajowa Konferencja Automatyki Procesów Dyskretnych, Zakopane 2004.
6. Szczygieł T.: Constraint Logic Programming Approach to Power Guard System. CPDC'2004 Workshop on Constraint Programming for Decision and Control, Gliwice 2004.

7. Szczygiel T.: Sterowanie kompensacją mocy biernej w systemach elektroenergetycznych w ujęciu programowania w logice z ograniczeniami. XV Krajowa Konferencja Automatyki, Warszawa 2005.

Recenzent: Dr hab. inż. Jarosław Figwer, prof. Pol. Śl.

### Abstract

Constraint Logic Programming (CLP) is getting more and more attractive in the Artificial Intelligence Community because of its declarative character to provide feasible solutions to a lot of real live problems. In the paper an application of Constraint Logic Programming to control of harmonics filtration is presented. The paper starts with problem discussion. First the quality of energy are discussed. Next the sources of high order harmonics are discussed. Next the type of active power filters are presented. Finally the charts obtained during the simulation and experimental test are presented. All experiments are implemented in ECL<sup>i</sup>PS<sup>e</sup>.