



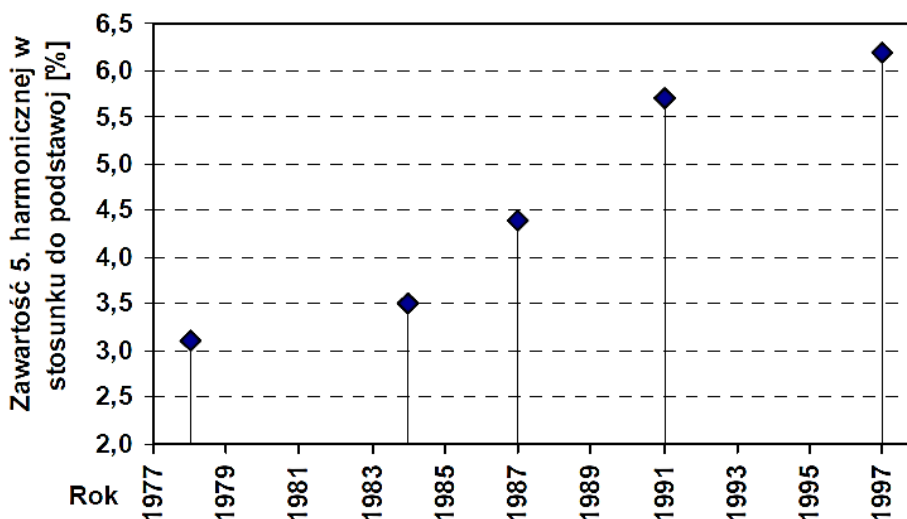
---

**Jakość energii**  
**Seminarium nt. *Jakość energii elektrycznej – Obowiązki dostawcy i odbiorcy energii elektrycznej***  
**Pasywne i aktywne sposoby eliminacji  
odkształcenia napięcia**

Mgr inż. Andrzej Firlit  
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

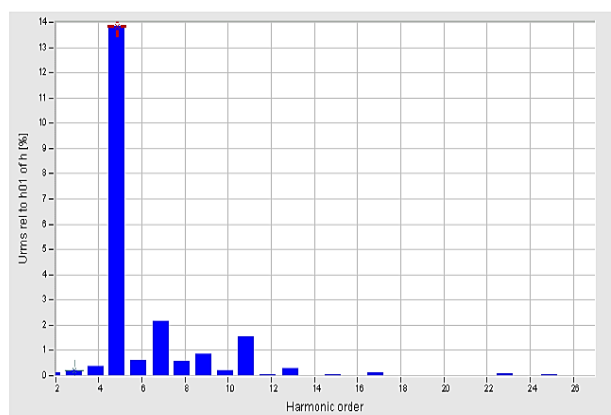
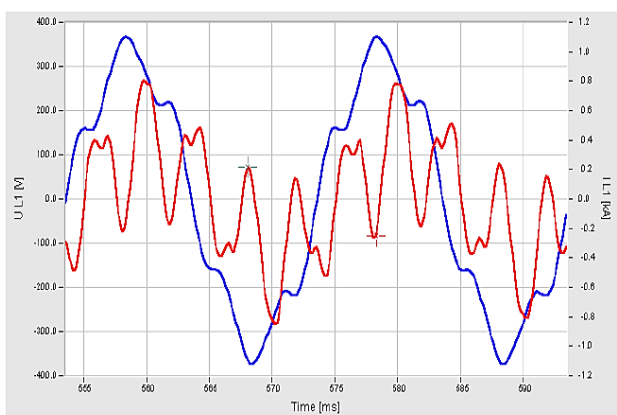
# Wprowadzenie

Przyczyną odkształcenia napięć i prądów w danym punkcie systemu elektroenergetycznego jest powszechne stosowanie układów energoelektronicznych oraz dużych odbiorników asymetrycznych (np. piece łukowe, indukcyjne), które są nieliniowe i niestacjonarne. W krajach wysoko rozwiniętych, z nowoczesną technologią przemysłu około 70% produkowanej energii elektrycznej przekształca się przy użyciu układów energoelektronicznych. Szacuje się, że w USA w 1992r. 15%-20% energii elektrycznej zużywały odbiorniki nieliniowe, natomiast w 2001r. było to już 60%-80% [3][8]. Wzrost liczby odbiorników energoelektronicznych (odbiorników nieliniowych) przyczynił się do znacznego zwiększenia poziomu zawartości wyższych harmonicznych (wh) oraz uwidocznili ich negatywny wpływ na sieć zasilającą. Dla przykładu, na rysunku Rys.1 [1][4] pokazano dynamikę wzrostu zawartości piątej harmonicznej w napięciu sieci zasilającej niskiego napięcia na przestrzeni 20 lat w Niemczech.



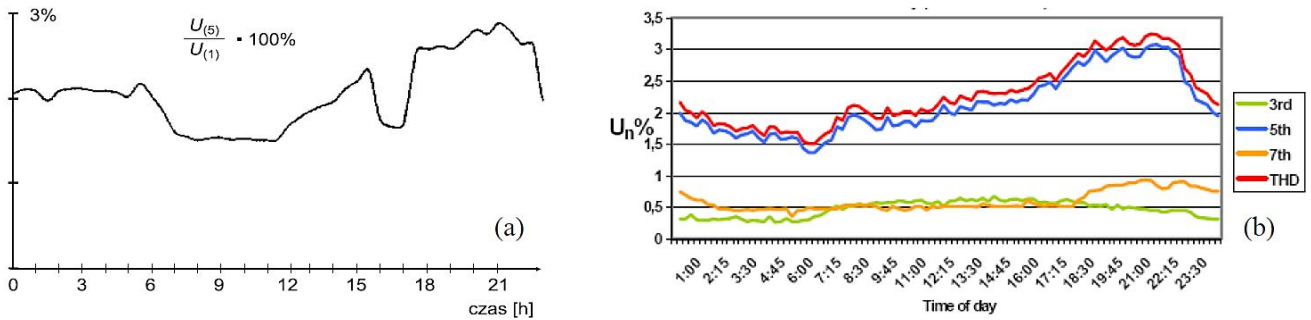
Rysunek 1. Zawartość 5. harmonicznej w sieci zasilającej nn w Niemczech.

Natomiast, na rysunku Rys.2 przedstawiono przykładowe przebiegi napięcia i prądu oraz widmo przebiegu napięcia zarejestrowane w jednym z krakowskich zakładów przemysłowych, w którym pracuje duża liczba napędów przekształtnikowych. Zmierzone wartości współczynników odkształcenia napięcia i prądu wynosiły:  $THD_u = 14,5\%$ ,  $THD_i = 120\%$ .



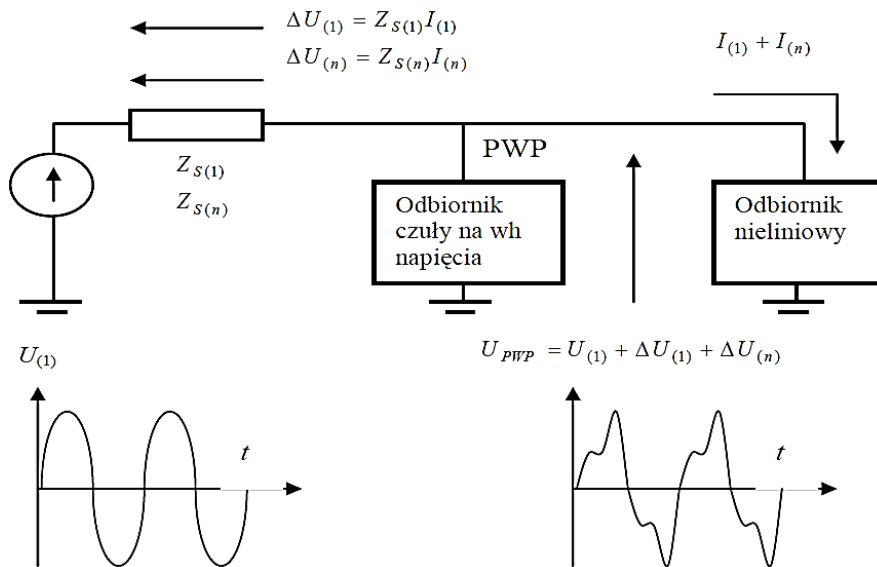
Rysunek 2. Przebiegi napięcia i prądu zarejestrowane w środowisku przemysłowym oraz widmo napięcia.

Nową jakością w dziedzinie wyższych harmonicznych jest fakt, że w coraz większym stopniu rolę dominujących źródeł wh pełnią nie odbiorniki przemysłowe, lecz rozproszone odbiorniki komunalne o małych mocach jednostkowych, lecz występujące w bardzo dużej liczbie. Ich łączne negatywne oddziaływanie na sieć zasilającą uwidacznia się szczególnie w porze wieczornego szczytu obciążeniowego (Rys.3).



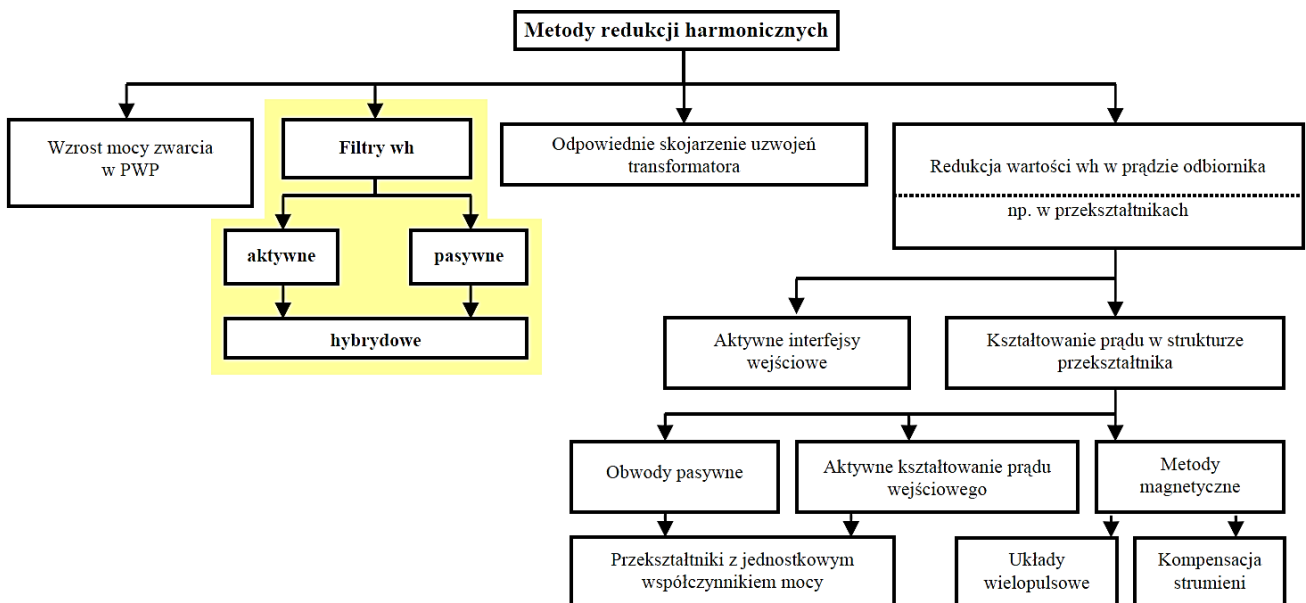
Rysunek 3. Przykładowa dobowa wartość 5. harmonicznej w napięciu sieci 110kV (a) oraz dobowe wartości 3., 5., 7. harmonicznej i THD w sieci nn w środowisku komunalno-przemysłowym (b).

Na rysunku Rys.4 przedstawiono uproszczony schemat systemu elektroenergetycznego. Składowa prądu zasilającego odbiornik nieliniowy –  $I_{(n)}$  wywołuje na impedancji zastępczej sieci zasilającej  $Z_{s(n)}$  spadek napięcia  $\Delta U_{(n)} = Z_{s(n)} I_{(n)}$ . Spadek ten powoduje odkształcenie napięcia w punkcie wspólnego przyłączenia (PWP).



Rysunek 4. Odkształcenia napięcia w PWP będące rezultatem spadku napięcia  $\Delta U_{(n)}$ .

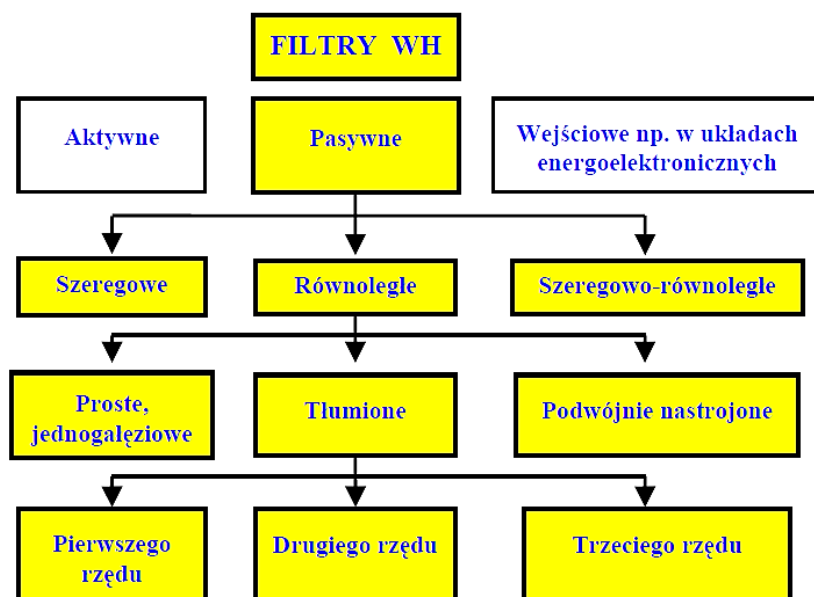
## Sposoby eliminacji wyższych harmonicznych



Rysunek 5. Metody redukcji skutków obecności wyższych harmonicznych.

Redukcja wartości wh napięcia, tym samym redukcja skutków ich obecności, to zespół technicznych działań dotyczących każdego z trzech elementów środowiska elektromagnetycznego: źródła zaburzenia, odbiornika oraz układu sprzęgającego odbiornik ze źródłem harmonicznych. Błędem jest obarczanie odpowiedzialnością za złą jakość energii elektrycznej wyłącznie końcowych jej odbiorców i zmuszanie wyłącznie ich do ograniczenia wartości generowanych harmonicznych. Również dostawca energii powinien wśród wielu różnych działań prowadzić ciągłą kontrolę poziomu odkształcenia napięcia, aby wykluczyć niebezpieczeństwo jego rezonansowego wzrostu. Rozwiązania techniczne podejmowane w celu redukcji wartości generowanych harmonicznych zależą od rodzaju odbiornika. Dotyczą, bowiem zmian w jego strukturze lub zmian technologicznych. Przykładowo w przypadku pieca łukowego jest to cały zespół działań zmierzających do „uspokojenia” pracy pieca. Na rysunku Rys.5 przedstawiono schematycznie zestawienie różnych przedsięwzięć technicznych, celem, których jest zmniejszenie szkodliwego harmonicznego oddziaływania układów nieliniowych na sieć zasilającą. Szczegółowe omówienie każdego z nich przekracza ramy tego opracowania. Zainteresowani czytelnicy mogą zapoznać się z nimi w licznych pozycjach książkowych z dziedziny energoelektroniki. W dalszej części opracowania została omówiona tylko technika filtracji pasywnej i aktywnej.

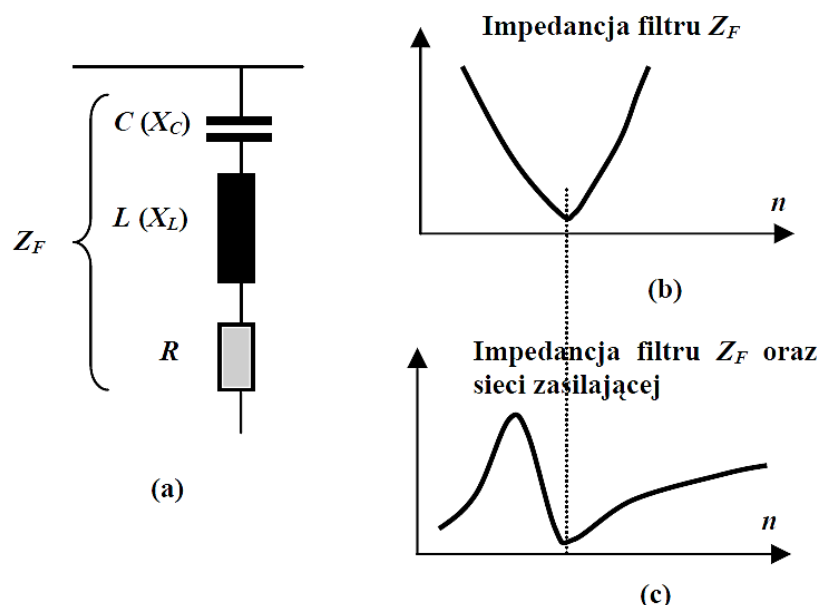
## Filtracja pasywna



Rysunek 6. Przykładowy schemat klasyfikujący różne rodzaje filtrów wh.

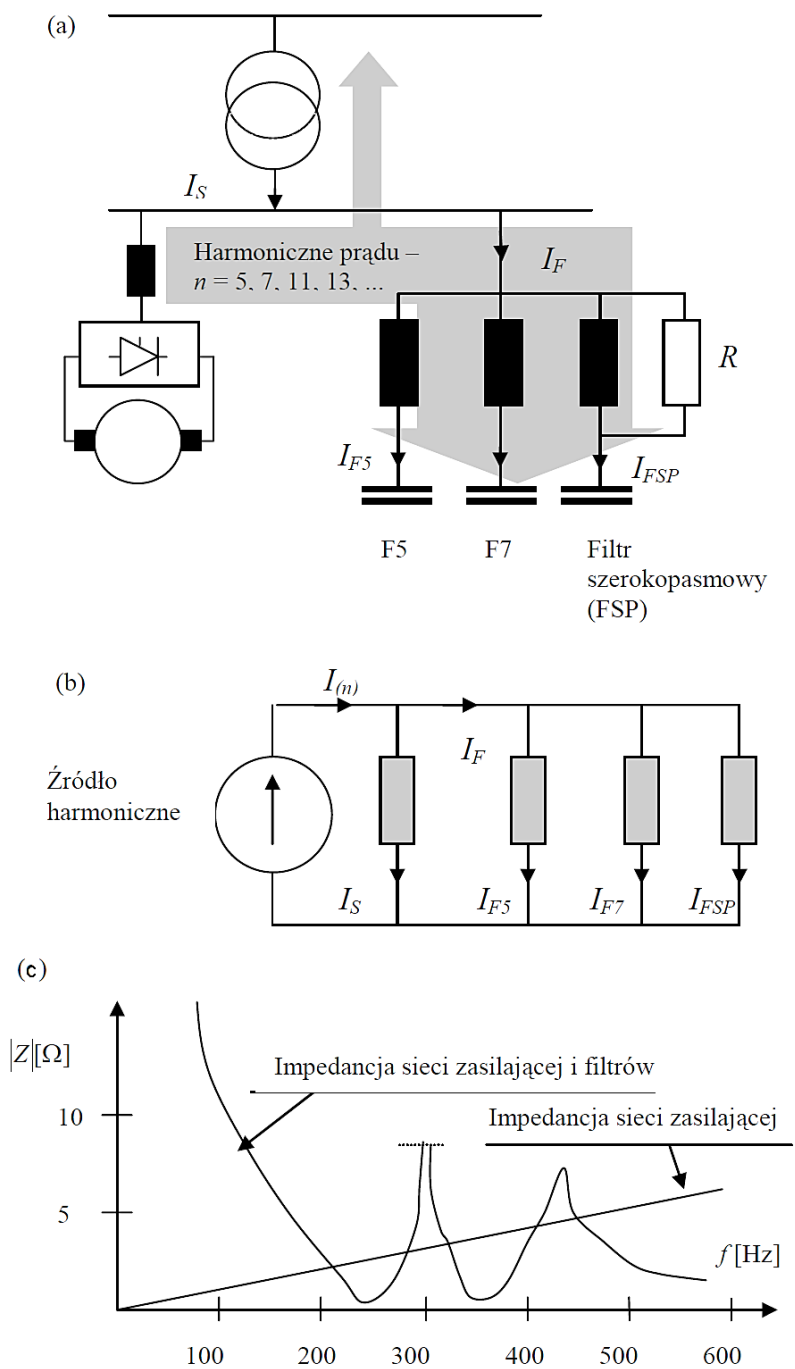
## Równoległe pasywne filtry wyższych harmonicznych

W przypadku, gdy współczynnik odkształcenia napięcia przekracza (dla instalacji istniejących) lub przekroczyłby (dla nowo projektowanych instalacji) dopuszczalną wartość, powstaje potrzeba przyłączenia do szyn zasilających filtrów wh. Są to obecnie prawie wyłącznie filtry równoległe, które w efekcie odpowiedniego doboru wartości elementów biernych LC stanowią gałąź o małej impedancji bocznikującą impedancję sieci zasilającej. Spełniają podwójną rolę. Odciażają system zasilający od wh prądu oraz są źródłem potrzebnej do kompensacji mocy biernej podstawowej harmonicznej. Wszystkie konfiguracje filtrów dla tej harmonicznej mają charakter pojemnościowy. Układ filtrów jest projektowany każdorazowo dla konkretnego punktu zasilania systemu tak, aby uzyskać pożądaną przebieg częstotliwościowej charakterystyki impedancyjnej. Rys.6 przedstawia schemat klasyfikujący różne rodzaje filtrów wh. Filtry rezonansowe proste i podwójnie nastrojone gwarantują małą impedancję dla wybranych częstotliwości rezonansu szeregowego gałęzi, podczas gdy filtry tłumione mają małą impedancję w szerokim przedziale wartości częstotliwości. Stąd ich inna nazwa – filtry szerokopasmowe. Najczęściej stosuje się filtry rezonansowe dla pojedynczych harmonicznych oraz filtr szerokopasmowy. Nie wyklucza to oczywiście możliwości stosowania innych rozwiązań – korzystnych technicznie i ekonomicznie - w konkretnych przypadkach zastosowań.



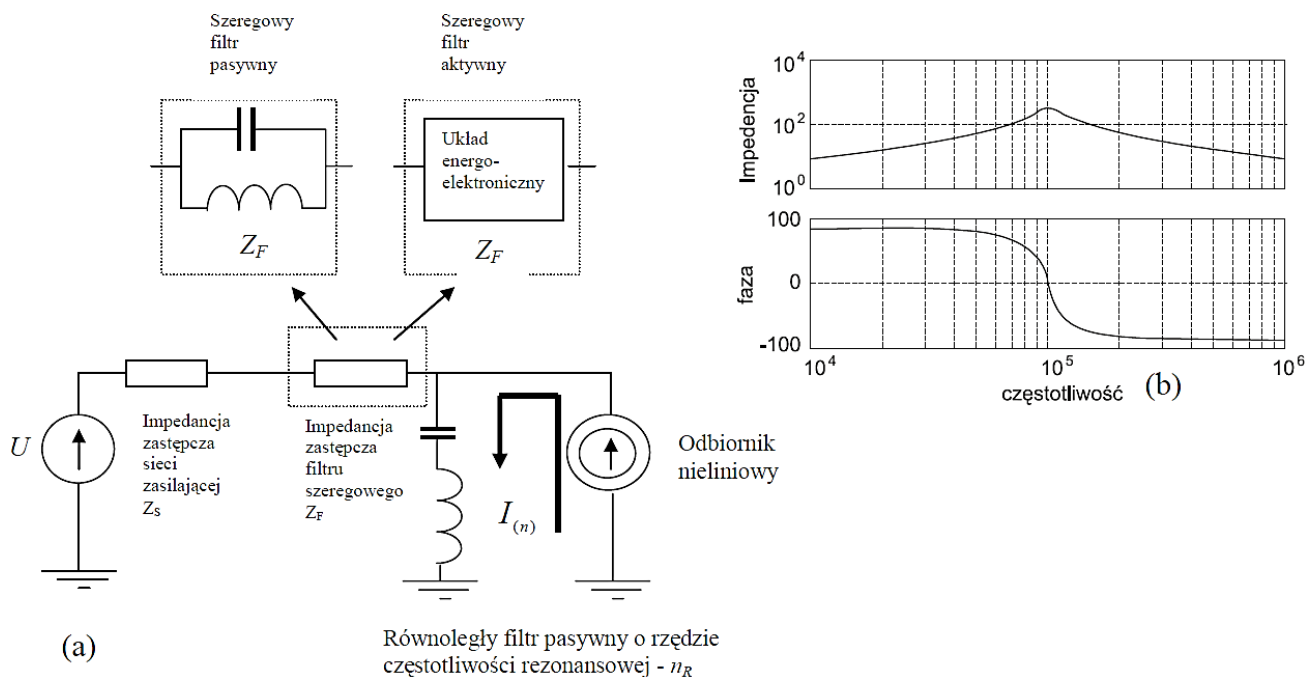
Rysunek 7. Schemat zastępczy filtru prostego (a) oraz jego typowe charakterystyki impedancyjne: filtru (b); filtru wraz z siecią zasilającą (c).

Schemat zastępczy oraz typowe charakterystyki impedancyjne filtru prostego oraz układu filtr prosty - sieć zasilająca przedstawia rysunek Rys.7. Rezystancja  $R$  jest głównie rezystancją dławika, bowiem jej wartość dla kondensatorów jest praktycznie pomijalna. Gałąź filtru przyłączona do zacisków odbiornika nieliniowego dostrojona do generowanej przez niego harmonicznnej  $n$ -tego rzędu powoduje, że w idealnych warunkach płynie ona tylko w jego obwodzie, a nie jest obecna w sieci zasilającej. Filtry są w zasadzie projektowane tak, aby każda z filtrowanych częstotliwości miała swój własny obwód filtracyjny dostrojony – poprzez odpowiedni dobór wartości indukcyjności i pojemności – do rezonansu szeregowego dla wybranej częstotliwości filtrowanej harmonicznnej. Znając wartości  $wh$  prądu występujących w miejscu przewidywanego zainstalowania filtrów, zakłada się ich eliminację zaczynając od najmniejszej występującej harmonicznnej sprawdzając następnie kolejno współczynnik odkształcenia napięcia, aż do uzyskania pożądanego ograniczenia jego wartości. Rysunek Rys.8 przedstawia przykładową instalację filtrów dla napędu przekształtnikowego prądu stałego wraz ze schematem zastępczym oraz charakterystyką impedancyjną w PWP. Do współpracy z układem przekształtnikowym 6-pulsowym stosuje się najczęściej filtry 5. harmonicznnej, rzadziej, głównie przy dużych mocach układów tyrystorowych – filtry 5. i 7. harmonicznnej. W tym ostatnim przypadku istotny jest optymalny – z punktu widzenia przyjętego kryterium np. minimum strat, kosztów lub gabarytów itp. – rozdział mocy biernej dla harmonicznnej podstawowej pomiędzy poszczególne filtry.



Rysunek 8. Przykładowa instalacja filtrów dla napędu przekształtnikowego prądu stałego (a) wraz z: schematem zastępczym (b) oraz charakterystyką impedancyjną w PWP (c).

## Szeregowe pasywne filtry wyższych harmonicznych



Rysunek 9. Filtr szeregowy do redukcji wh w sieci zasilającej (a) oraz charakterystyki częstotliwościowe szeregowego filtru pasywnego (b).

Do grupy rozwiązań technicznych kształtujących impedancję sieci zasilającej należy zaliczyć również filtry szeregowe. W tym przypadku celem działania nie jest redukcja impedancji zastępczej źródła zasilania lecz wręcz przeciwnie jej wzrost dla wybranej/wybranych wh (Rys.9b). Dzięki temu zasadniczej poprawie podlega skuteczność działania równoległych filtrów pasywnych przyłączanych do zacisków nieliniowego odbiornika reprezentowanego na rysunku Rys.9 przez źródło prądu  $I_{(n)}$ .

Impedancja zastępcza filtru szeregowego  $Z_F$  powinna mieć wartość:

- bliską zero dla podstawowej harmonicznej (aby nie wpływała na wymianę energii pomiędzy źródłem zasilania i odbiornikiem w dziedzinie tej harmonicznej),
- bardzo dużą dla harmonicznej filtrowanej przez pasywny filtr równoległy (o rzędzie  $n_R$ ). Spowoduje to, że prąd tej harmonicznej będzie płynął prawie wyłącznie w obwodzie tego filtru, nie będzie obecny w sieci zasilającej.

Pasywny filtr szeregowy może być zrealizowany, w najprostszej postaci, jako dwójnik równoległy LC połączony szeregowo pomiędzy źródło zasilania i odbiorniki, w którym występuje rezonans równoległy dla harmonicznej o rzędzie  $n_R$ . Dla tej harmonicznej impedancja filtru ma bardzo dużą wartość, tym samym blokowany jest jej przepływ w sieci zasilającej.

## Wady filtrów pasywnych

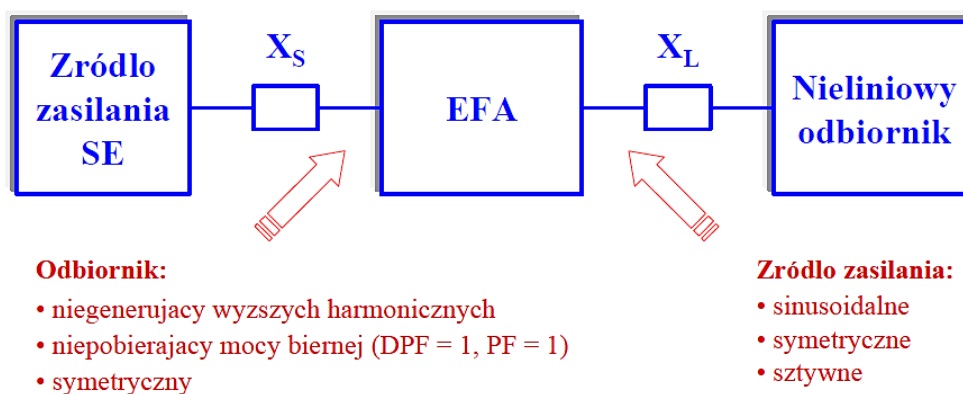
1. System elektroenergetyczny wraz z filtrami pasywnymi stanowi słabo tłumiony układ RLC wymagający na etapie projektowania uważnej analizy charakterystyk częstotliwościowych w celu wykluczenia zjawisk rezonansowych. Już dla częstotliwości bliskiej częstotliwości rezonansowej następuje silne wzmocnienie tej harmonicznej w napięciu zasilających (pod warunkiem, że występuje pobudzenie harmoniczne w układzie).
2. Skuteczność działania filtru zależy bardzo silnie od impedancji systemu zasilającego w punkcie jego przyłączenia. Zwykle jej wartość nie jest dokładnie znana i zmienia się wraz ze zmianą konfiguracji sieci.
3. Filtry ulegają rozstrojeniu na skutek zmian częstotliwości zasilania oraz zmian wartości elementów składowych LC (np. w efekcie procesu starzenia kondensatorów). Negatywny tego skutek można zredukować między innymi poprzez odpowiednie dostrojenie filtru lub zmniejszenie jego dobroci. Ten

ostatni sposób daje jednakże wzrost strat mocy czynnej oraz wzrost nie filtrowanej harmonicznej w napięciu. Idealna filtracja przy pomocy filtrów pasywnych nie jest więc możliwa szczególnie w przypadku niestacjonarnych wh.

4. W prądzie filtru zawarte są również wh płynące pod wpływem harmonicznych napięcia źródła zasilania. Możliwy jest przypadek rezonansu szeregowego filtru z impedancją systemu.
5. Filtrowaniu podlegają tylko wybrane wh o dominujących wartościach. Nie są filtrowane harmoniczne uznane za niecharakterystyczne dla odbiornika, które mogą jednakże wystąpić w jego prądzie zasilającym.
6. Filtry pasywne stanowią duży i kosztowny element systemów kompensacji. W przypadku filtrów pojedynczych harmonicznych ich liczba odpowiada ilości filtrowanych wh. Stosowanie w ich miejsce filtrów wyższych rzędów w praktyce obniża skuteczność filtracji, wymaga elementów składowych o dużych mocach oraz obniża sprawność instalacji.
7. Filtry powodują zakłócenia teletransmisyjne.

## Filtracja aktywna

W obliczu intensywnego wzrostu harmonicznych zanieczyszczeń w sieciach zasilających oraz wad tradycyjnych metod redukcji ich negatywnych skutków, zaistniała potrzeba opracowania elastycznego, dynamicznego oraz „samodostrajającego się” urządzenia umożliwiającego eliminację zaburzeń i zakłóceń oraz poprawę parametrów pracy sieci elektroenergetycznych. Urządzenie to znane jest jako energetyczny filtr aktywny EFA.



Rysunek 10. Idea energetycznego filtra aktywnego.

Zadaniem EFA Rys.10, w przypadku idealnym, jest zapewnienie takiego stanu w danym punkcie systemu elektroenergetycznego, aby ze strony odbiornika „widoczne” było sinusoidalne, symetryczne i sztywne zasilanie. Natomiast ze strony systemu elektroenergetycznego „widoczny” był niegenerujący wh, niepobierający mocy biernej oraz symetryczny odbiornik. Przy czym sam EFA nie powinien stanowić obciążenia dla systemu energetycznego. Technika aktywnej filtracji jest już dojrzałą, dziedziną energoelektroniki umożliwiającą w chwili obecnej:

- filtrację wyższych harmonicznych prądu,
- kompensację mocy biernej,
- filtrację wyższych harmonicznych napięcia,
- symetryzację zasilania i obciążenia,
- stabilizację napięcia,
- eliminację wahań napięcia – zjawisko migotania światła (flicker efekt),
- bezprzerwowe zasilanie – niektóre systemy EFA łączą aktywną filtrację z funkcją bezprzerwowego zasilania.

Szeroki zakres zadań może zostać osiągnięty indywidualnie lub w kombinacji, w zależności od konfiguracji oraz strategii sterowania EFA, które powinny zostać odpowiednio określone w oparciu o zapotrzebowanie.



Warto zwrócić również uwagę na takie zalety EFA, jak: zabezpiecza przed zmianami częstotliwości, np. podczas pracy generatora awaryjnego, nie występuje ryzyko rezonansu przy żadnej częstotliwości harmonicznej, możliwość programowania przez użytkownika tak, aby w razie potrzeby eliminował wybrane częstotliwości harmoniczne. EFA jest rozwiązaniem stosunkowo łatwym do zastosowania nawet przy złożonych problemach. Dzięki swojej elastyczności, co do możliwości zastosowania, może być dalej wykorzystywany nawet po zmianach w konfiguracji w danej sieci elektroenergetycznej.

Problematyka poprawy jakości energii elektrycznej staje się w coraz większym stopniu, jednym z pierwszoplanowych zagadnień współczesnej elektrotechniki. Stąd ilość publikacji dotyczących aktywnej filtracji jest bardzo duża i ciągle rośnie. Dziedzina ta stanowi obecnie jedną z intensywniej rozwijających się gałęzi współczesnej energoelektroniki. Wynika to przede wszystkim z:

- wzrostu wymagań dotyczących jakości energii elektrycznej zarówno ze strony producenta, dystrybutora, jak i odbiorcy;
- względów ekonomicznych: efektywna gospodarka energią elektryczną, unikanie strat spowodowanych awariami, unikanie kosztów wynikających z ewentualnych kar finansowych, dbałość o jakość produktu itp.;
- współczesna technika półprzewodnikowa pozwala konstruować przekształtniki o dużej mocy i dużej sprawności – opracowano elementy energoelektroniczne o krótkich czasach wyłączenia, tj. bipolarne tranzystory BJT (bipolar junction transistors), tranzystory typu MOSFET, tyrystory SIT (static induction thyristors), tyrystory GTO (gate–turn–off thyristor) oraz tranzystory mocy IGBT (insulated gate bipolar transistors);
- możliwe jest przetwarzanie sygnałów w krótkim czasie, odpowiednim do śledzenia szybkich zmian stanu energetycznego niespokojnych i nieliniowych odbiorników, dzięki rozwojowi technologii czujników pomiarowych, wzmacniaczy izolacyjnych i separatorów oraz mikroelektroniki ze szczególnym uwzględnieniem procesorów sygnałowych DSP;
- nie bez znaczenia jest również ciągły rozwój istniejących oraz poszukiwanie nowych metod umożliwiających opracowanie układu (algorytmu) sterowania EFA.

## Klasyfikacja EFA

EFA można podzielić ze względu na typ przekształtnika, topologię i układ zasilania.

A. Typ zastosowanego przekształtnika:

- typu źródło napięcia VSI – dominujący,
- typu źródło prądu CSI.

B. Topologia układu:

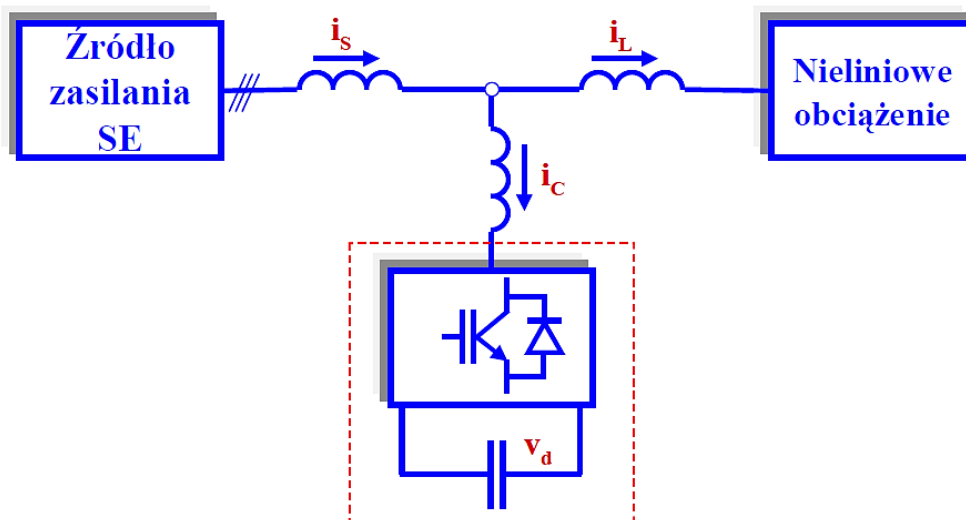
- równoległa,
- szeregową,
- kombinacja szeregowego i równoległego EFA – uniwersalny EFA,
- hybrydowa – kombinacja szeregowego EFA i równoległego FP.

C. Układ zasilania:

- jednofazowy – dwuprzewodowy,
- trójfazowy:
  - trójprzewodowy,
  - czteroprzewodowy

## Klasyfikacja EFA ze względu na typ przekształtnika

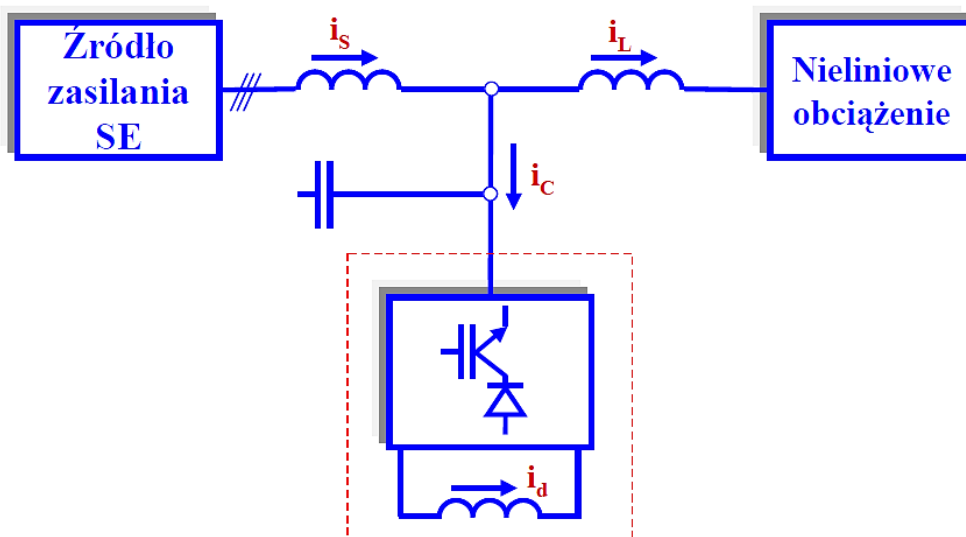
### Przekształtnik typu źródło napięcia VSI



Rysunek 11. EFA na bazie falownika napięcia VSI.

Na Rys.11 przedstawiono schemat równoległego EFA do realizacji, którego wykorzystano falownik napięcia PWM na bazie tranzystorów IGBT, gdzie elementem gromadzącym energię jest kondensator. Ten typ przekształtnika jest dominujący w zastosowaniu do EFA. Do jego zalet należy możliwość tworzenia układów wielopoziomowych i wielostopniowych w celu uzyskania lepszych parametrów pracy oraz zmniejszenia częstotliwości łączeń.

### Przekształtnik typu źródło prądu CSI



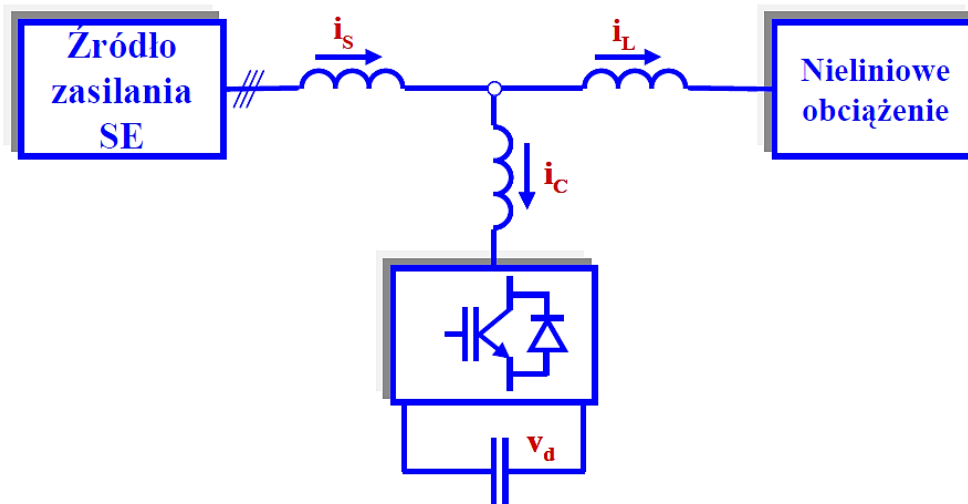
Rysunek 12. EFA na bazie falownika prądu CSI.

Rys.12 przedstawia schemat równoległego EFA do realizacji, którego wykorzystano falownik prądu PWM na bazie tranzystorów IGBT z dławikiem, jako elementem gromadzącym energię. Zachowuje się on jak niesinusoidalne źródło prądu. Układy o topologii CSI są stosowane rzadziej niż VSI, między innymi ze względu na gabaryty dławików stałoprądowych spełniających funkcję magazynu energii (analogiczną jak kondensator w układach VSI). Ich główną zaletą jest wyższa odporność na zwarcia w porównaniu do układów typu VSI.

## Klasyfikacja ze względu na topologię układu

Rozróżnia się dwa podstawowe sposoby przyłączania układów EFA do linii zasilającej: równoległe i szeregowe. W zależności od tego mówi się o równoległych EFA i szeregowych EFA oraz filtracji (kompensacji) równoległej – prądowej i szeregowej – napięciowej. Ponadto, jako oddzielne wyróżnia się jeszcze dwie grupy: szeregowo-równoległe EFA nazywane uniwersalnymi EFA, będące kombinacją szeregowego i równoległego EFA oraz hybrydowe EFA powstałe w wyniku kombinacji najczęściej szeregowego EFA i równoległego FP.

### Topologia równoległa



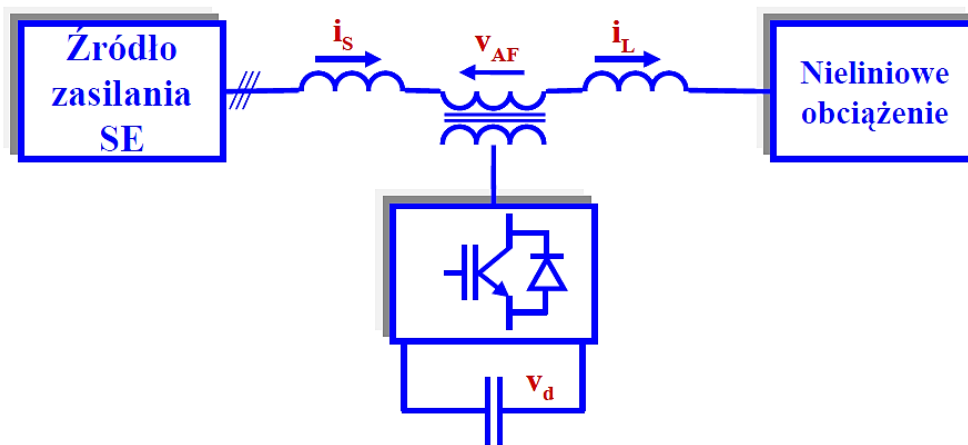
Rysunek 13. Równoległy EFA.

Równoległy EFA Rys.13 jest najczęściej stosowanym układem filtracji aktywnej. Stanowi sterowane źródło prądu dodatkowego  $i_c$  przyłączone równoległe do odbiornika. Suma prądu  $i_c$  oraz  $i_s$  pobieranego z linii zasilającej daje prąd  $i_L$  pobierany przez odbiornik. W rezultacie (w przypadku idealnym i przy odpowiednim sterowaniu) można doprowadzić do tego, że wszystkie składowe prądu  $i_L$  niepożądane w prądzie sieci  $i_s$  przepływają wyłącznie w obwodzie odbiornik – EFA i nie obciążają źródła napięcia. Równoległy EFA wprowadza do układu prąd kompensujący będący w przeciwfazie do niepożądanego składowego prądu  $i_L$ , aby wyeliminować wyższe harmoniczne i/lub składową bierną prądu w punkcie wspólnego podłączenia. W ten sposób równoległe EFA umożliwiają:

- filtrację wyższych harmonicznych prądu, praktycznie niezależną od impedancji sieci i na poziomie nieosiągalnym dla filtrów biernych LC,
- kompensację mocy biernej (składową bierną prądu odbiornika o częstotliwości podstawowej),
- symetryzację obciążenia,
- redukcję wahań napięcia (zjawisko migotania światła).

Stosowany jest najczęściej na wejściu nieliniowego odbiornika końcowego. Układy te, poza większymi możliwościami funkcjonalnymi, charakteryzują się również znacznie lepszymi właściwościami dynamicznymi niż kompensatory tradycyjne np. FC/TCR.

### Topologia szeregową

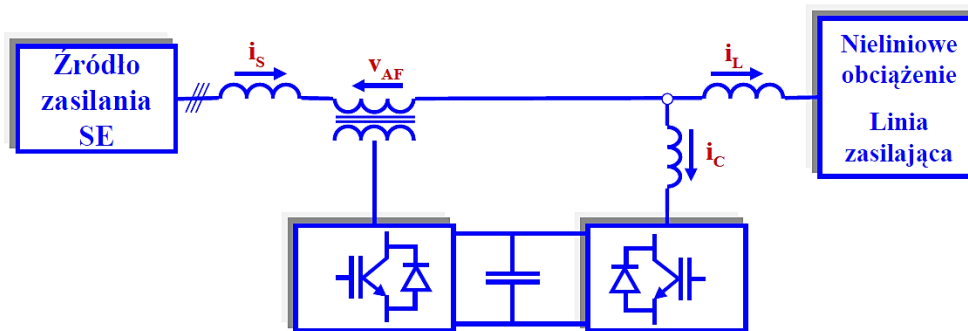


Rysunek 14. Szeregowy EFA.

Szeregowy EFA Rys.14 dołączony jest do sieci elektroenergetycznej za pomocą transformatora dopasowującego. Wprowadza w ten sposób w szereg ze źródłem napięcia  $V_{SE}$  dodatkowe sterowanie źródło napięcia dodatkowego  $V_{AF}$ . Suma napięć źródła  $V_{SE}$  i  $V_{AF}$  układu szeregowego EFA pomniejszona o spadki napięcia na impedancji linii zasilającej jest napięciem odbiornika. Szeregowy EFA można wykorzystać np. do:

- eliminacji wyższych harmonicznych napięcia wprowadzanych przez źródło zasilania oraz odbiornik,
- symetryzacji oraz regulacji (stabilizacji i redukcji załamań) napięcia na zaciskach odbiornika lub danego punktu sieci elektroenergetycznej (umożliwiają zabezpieczenie się przed negatywnymi skutkami zapadów napięcia),
- niektóre konfiguracje umożliwiają eliminację wyższych harmonicznych prądu odbiornika, kompensację mocy biernej oraz redukcję wahań napięcia (zjawisko migotania światła).

### Topologia szeregowo-równoległa – uniwersalny EFA



Rysunek 15. Uniwersalny EFA.

Bardzo korzystne ze względu na połączenie cech użytkowych są systemy składające się z szeregowego i równoległego EFA Rys.15. Systemy takie, mogące również współpracować z filtrami pasywnymi LC w połączeniu hybrydowym, nazywane są zintegrowanymi sterownikami przepływu mocy (układami UPFC) lub uniwersalnymi EFA (UEFA). W układach UEFA ważną rolę odgrywa obwód pośredniczący dc z elementem magazynującym energię, który uczestniczy w wymianie mocy czynnej między szeregowym i równoległym EFA. Bez niego cechy użytkowe UEFA byłyby tylko prostą sumą cech stosowanych układów EFA. Dla układu z Rys.15 funkcję elementu magazynującego energię spełnia bateria kondensatorów. Jeśli UEFA jest budowany na bazie układów EFA o topologii CSI, to wspólnym magazynem energii jest dławik, nadający obwodowi dc uczestniczącemu w wymianie mocy charakter prądowy. Możliwy jest też łączony charakter obwodu dc, prądowo-napięciowy lub napięciowo-prądowy, w zależności od połączenia układów EFA (CSI-VSI lub VSI-CSI). Wymiana energii przez element źródłowy umożliwia stosowanie UEFA wtedy, gdy jeden z układów EFA (zazwyczaj szeregowy) jest stale źródłem/odbiorcą energii. W szczególności taka sytuacja występuje wówczas, gdy regulowane jest napięcie odbiornika. W przypadku zastosowania w tym celu tylko

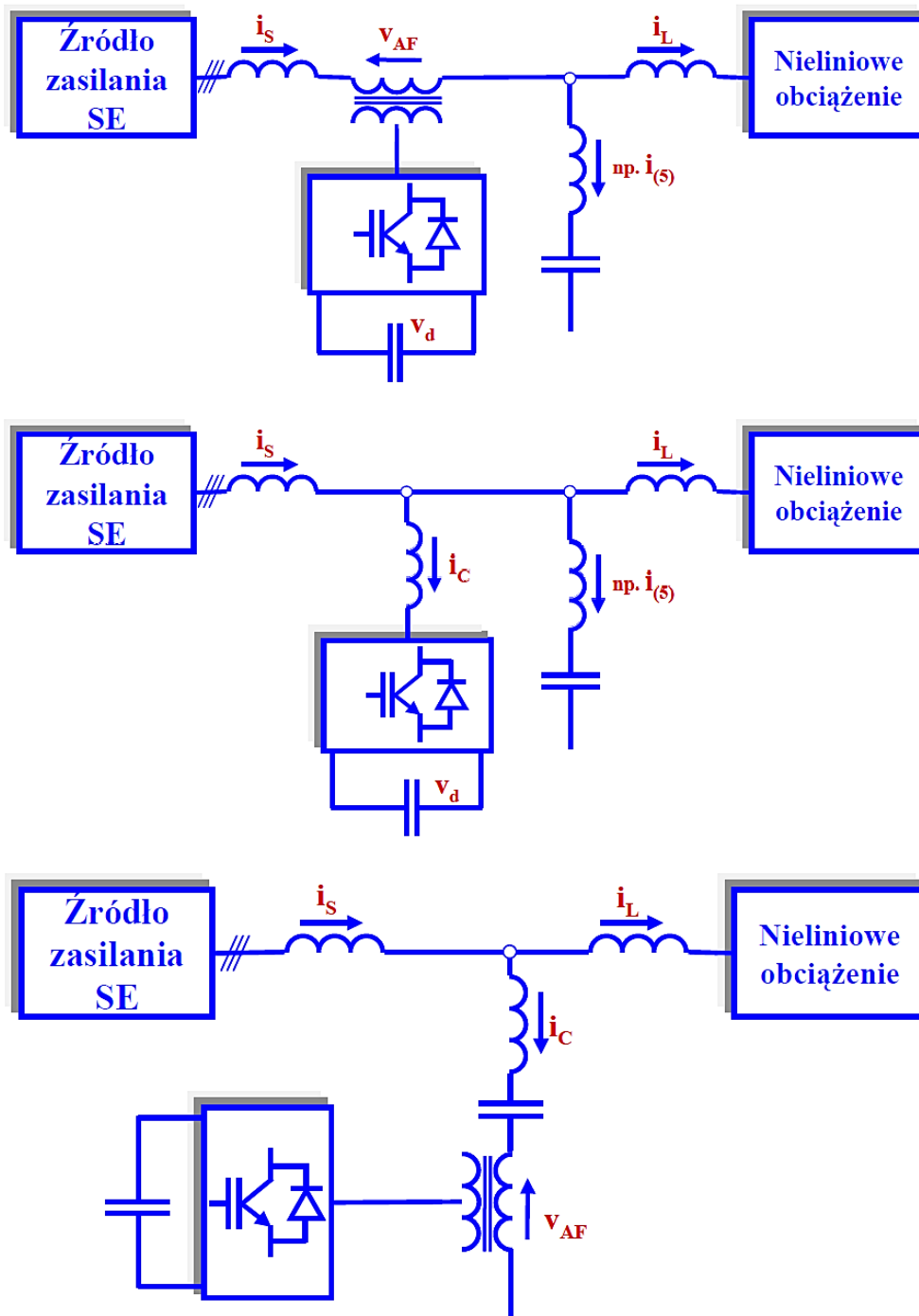
szeregowego EFA musi być zapewniona możliwość dodatkowego dostarczania i odbioru energii z elementów źródłowych. W układzie UEFA, przedstawionym na Rys.15, w celu podtrzymania wartości energii zgromadzonej w kondensatorze, drugi EFA np. równoległy pobiera/oddaje moc czynną o wartości takiej samej jak pierwszy szeregowy EFA (powiększoną lub pomniejszoną o moc strat). Poza regulacją (stabilizacją) napięcia odbiornika, obszar zastosowań układów UEFA w zakresie poprawy jakości energii elektrycznej obejmuje również:

- nadażną kompensację mocy biernej i szybkozmiennych wahań mocy czynnej,
- symetryzację obciążenia,
- symetryzację i regulację napięcia w stacjach rozdzielczych,
- eliminację wyższych harmonicznym prądów i napięć.

W układach UEFA ze względów praktycznych istotna jest kolejność dołączenia szeregowego i równoległego EFA do linii zasilającej. Na przykład łącząc EFA w innej kolejności niż pokazana na Rys.15 w przypadku filtracji harmonicznym prądu odbiornika oraz napięcia zasilania, przez obydwa układy EFA przepływają odkształcone prądy, a na ich zaciskach występują odkształcone napięcia. W takim przypadku będzie zachodziła wymiana mocy czynnej związanej z harmonicznymi prądami i napięciami. Jeden EFA będzie niepotrzebnie pobierał z sieci, a drugi oddawał pewną średnią moc czynną. Taka cyrkulacja mocy czynnej nie wystąpi w układzie EFA o kolejności połączeń układów EFA jak na Rys.15. W tym przypadku prąd płynący przez szeregowy EFA i napięcie na zaciskach równoległego EFA są sinusoidalne i występują tylko wysokoczęstotliwościowe pulsacje chwilowej mocy czynnej. Warto zaznaczyć, że podobne zagadnienie występuje przy jednoczesnej symetryzacji prądu odbiornika i napięcia zasilania. UEFA umożliwia dostarczenie tzw. czystej energii do krytycznym odbiornikom takim, jak specjalistyczny sprzęt informatyczny, czy sprzęt medyczny itp.

Filtrami hybrydowymi nazywa się ogólnie połączenia energetycznych filtrów pasywnych LC z układami EFA. Główną częścią filtru hybrydowego jest filtr pasywny eliminujący wyższe harmoniczne niższego rzędu. Układy EFA, w zależności od topologii filtru hybrydowego, pracują, albo jako sterowanie źródła napięcia, albo jako źródła prądu dodatkowego. Ich zadaniem jest przede wszystkim poprawa właściwości kompensacyjno-filtrujących FP. Z kolei dołączenie filtru pasywnego do układu EFA pozwala poprawić jego właściwości energetyczne, ponieważ pracując bez układów biernych mają dużą moc pozorną, porównywalną z mocą kompensowanych składowych, co jest ich zasadniczą wadą. W wyniku tego otrzymujemy zmniejszenie napięcia występującego na zaciskach lub prądu wyjściowego EFA, a przez to również ustalonej jego mocy, co pozwala na zmniejszenie rozmiaru i kosztów. Duża popularność tego rozwiązania wynika, również z faktu pracujących już w systemie elektroenergetycznym filtrów pasywnych. Istnieje wiele konfiguracji filtrów hybrydowych, przykładowe pokazano na Rys.16.

## Topologia hybrydowa – kombinacja EFA i równoległego filtra pasywnego FP



Rysunek 16. Hybrydowe EFA.

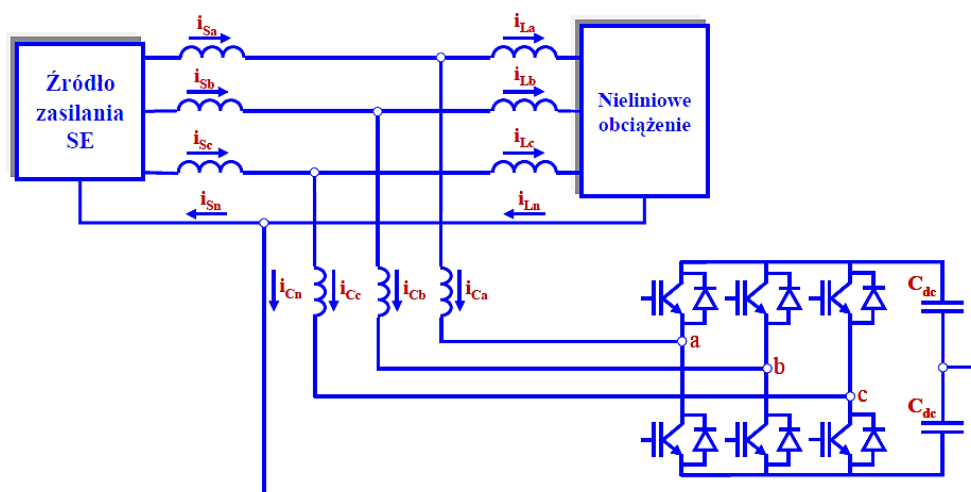
## Klasyfikacja ze względu na układ zasilania (liczbę faz)

- **JEDNOFAZOWE** – dwuprzewodowe  
 Jednofazowe EFA są stosowane w trzech konfiguracjach, jako: szeregowo, równoległe i uniwersalne (kombinacja szeregowego i równoległego) z obydwoma typami falowników PWM: napięcia VSI i prądu CSI. Szeregowo EFA zasadniczo stosuje się do eliminacji zaburzeń o charakterze napięciowym oraz filtracji wyższych harmonicznych napięcia. Natomiast równoległy EFA jest używany do filtracji wyższych harmonicznych prądu i kompensacji mocy biernej.
- **TRÓJFAZOWE** – trójprzewodowe  
 Wszystkie konfiguracje EFA przedstawione na rysunkach Rys.11–Rys.16 są stosowane w układach trójfazowych trójprzewodowych. Równoległe EFA projektowane są również na bazie trzech

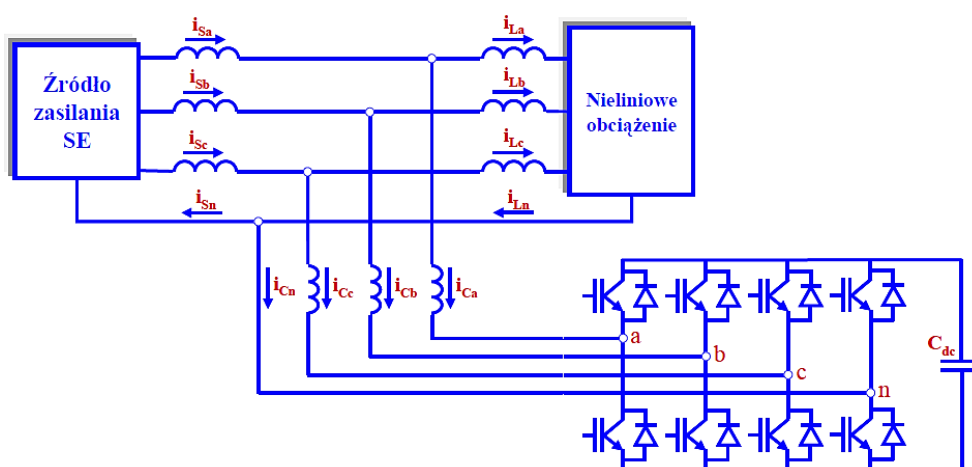
jednofazowych EFA z oddzielnymi transformatorami izolacyjnymi, w celu odpowiedniego dopasowania napięcia oraz niezależnej kompensacji każdej fazy.

- TRÓJFAZOWE – czteroprzewodowe

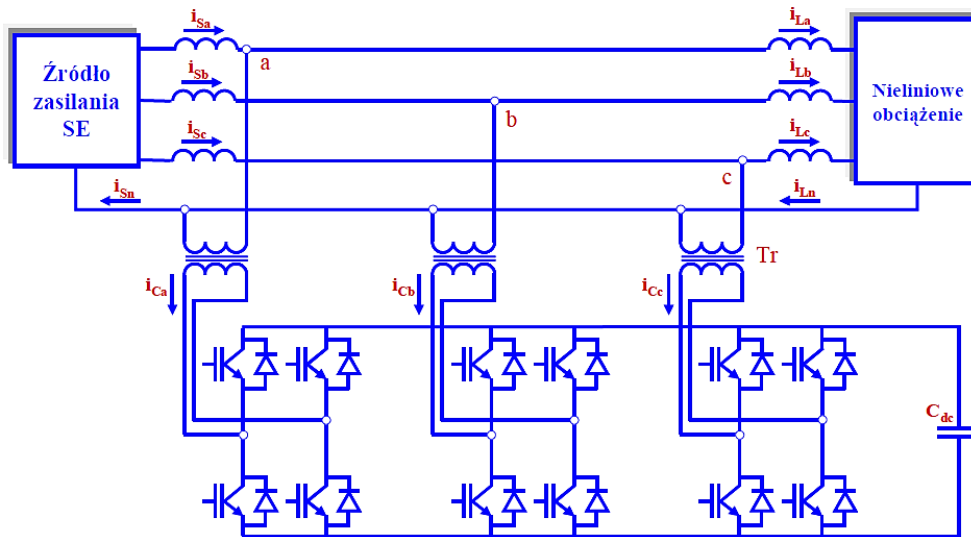
Do sieci trójfazowej czteroprzewodowej oprócz odbiorników trójfazowych mogą być dołączone odbiorniki jednofazowe. W przypadku ich dużej liczby oraz nierównomiernego obciążenia poszczególnych faz przyczynia się to do nadmiernej wartości prądu w przewodzie neutralnym oraz niesymetrii obok poboru mocy biernej i obecności wyższych harmonicznych. W celu eliminacji tych problemów opracowano trójfazowe, czteroprzewodowe EFA, których najczęściej stosowane równoległe struktury przedstawiono na rysunkach Rys.17 – Rys.19. Oprócz równoległych EFA stosowane są również szeregowy, hybrydowe i uniwersalne EFA, z falownikami PWM zarówno napięcia VSI, jak i prądu CSI. W konfiguracji przedstawionej na Rys.17 zastosowano dzieloną pojemność. Układ ten znalazł zastosowanie w zakresie mniejszych wartości nominalnych, gdyż cały prąd przewodu neutralnego przepływa przez kondensator  $C_{dc}$ . Konfigurację z falownikiem czterogałęziowym przedstawia Rys.18. Dodatkowa gałąź falownika jest wykorzystywana do stabilizacji prądu przewodu neutralnego EFA. Trzecia konfiguracja EFA Rys.19, złożona z trzech jednofazowych przekształtników dołączonych do obwodu głównego za pomocą transformatorów, umożliwi odpowiednio dopasowanie napięcia dla elementów energoelektronicznych oraz podniesienie niezawodności systemu.



Rysunek 17. Czteroprzewodowy równoległy EFA z dzieloną pojemnością.



Rysunek 18. Czteroprzewodowy równoległy EFA z czterogałęziowym przekształtnikiem.

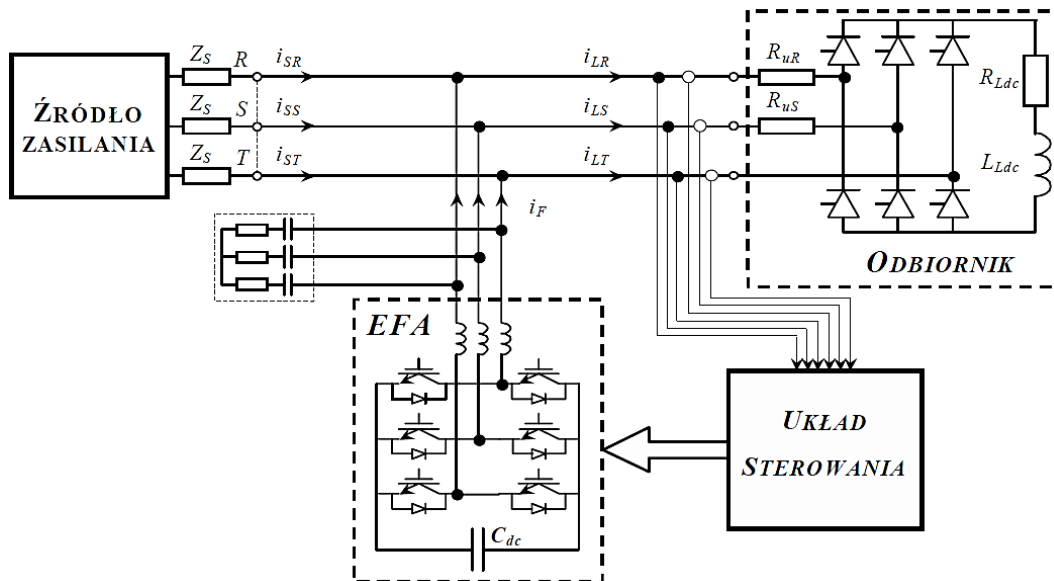


Rysunek 19. Czteroprzewodowy równoległy EFA złożony z trzech przekształtników jednofazowych.

## Przykładowe przebiegi oraz widma napięć i prądów przed i po zastosowaniu EFA

### Równoległy EFA

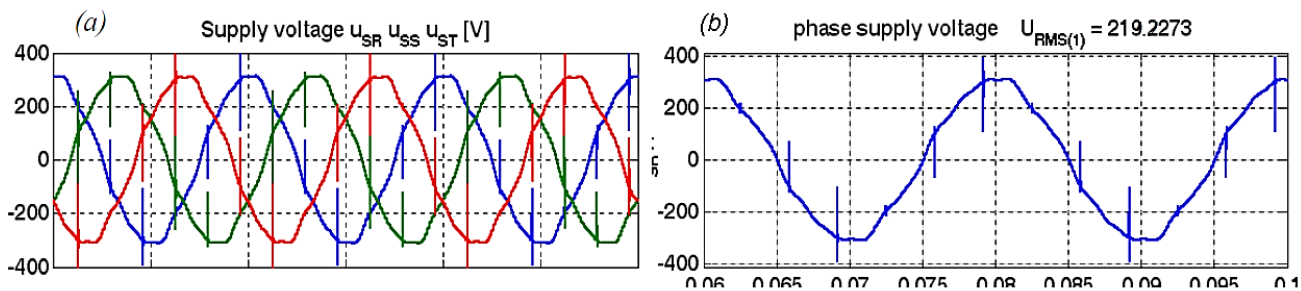
Schemat blokowy badanego układu trójfazowego, równoległego EFA przedstawiono na rysunku Rys.20.



Rysunek 20. Schemat równoległego EFA.

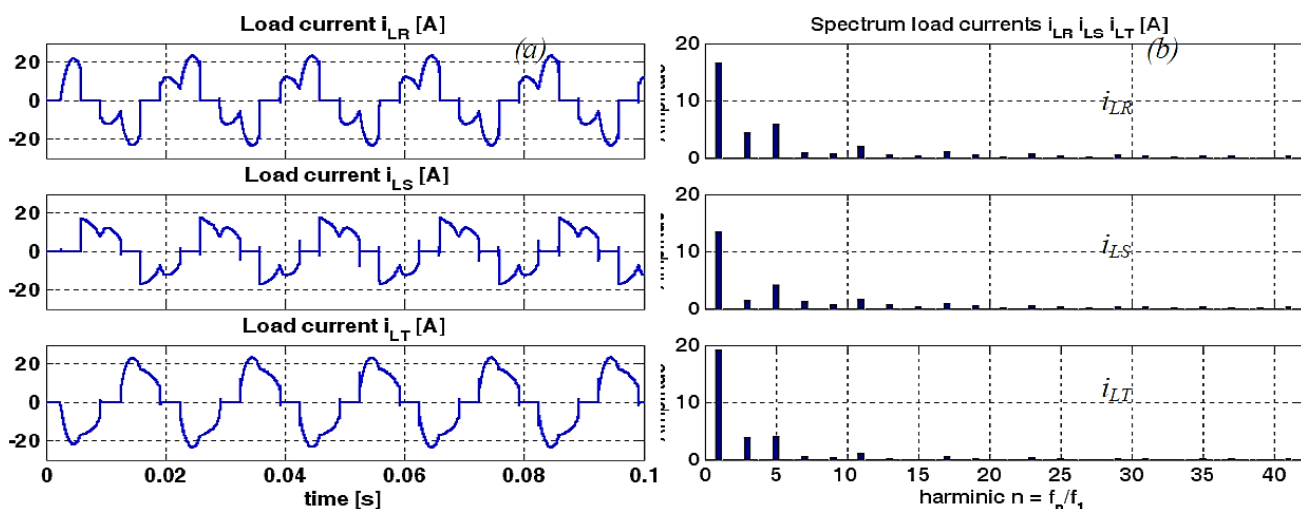
Rozważano pracę układu w warunkach odkształconego napięcia zasilania oraz niezerowej impedancji wewnętrznej źródła zasilania. Celem EFA jest uzyskanie po stronie źródła współczynnika mocy  $PF = 1$  oraz sinusoidalnego prądu  $i_s$ , odpowiadającego podstawowej harmonicznej prądu odbiornika  $i_L$ . Jako nieliniowy odbiornik, którego oddziaływanie na sieć podlega kompensacji, zastosowano 6-pulsowy sterowany przekształtnik tyrystorowy z filtrem  $RL$  po stronie dc oraz dwójniki rezystancyjne w fazach  $R, S$  w celu wytworzenia stanu asymetrii prądowej. Odształcenie napięcia zasilającego  $u_s(t)$ , o impedancji wewnętrznej  $Z_s$ , w punkcie podłączenia odbiornika było na poziomie  $THD_{U_s} \approx 4,5\%$ , będące w głównej mierze skutkiem oddziaływania innych odbiorników podłączonych do tego punktu. Przebieg napięcia zasilającego  $u_s(t)$ , oraz jego widmo dla fazy  $R$  przedstawia rysunek Rys.21.





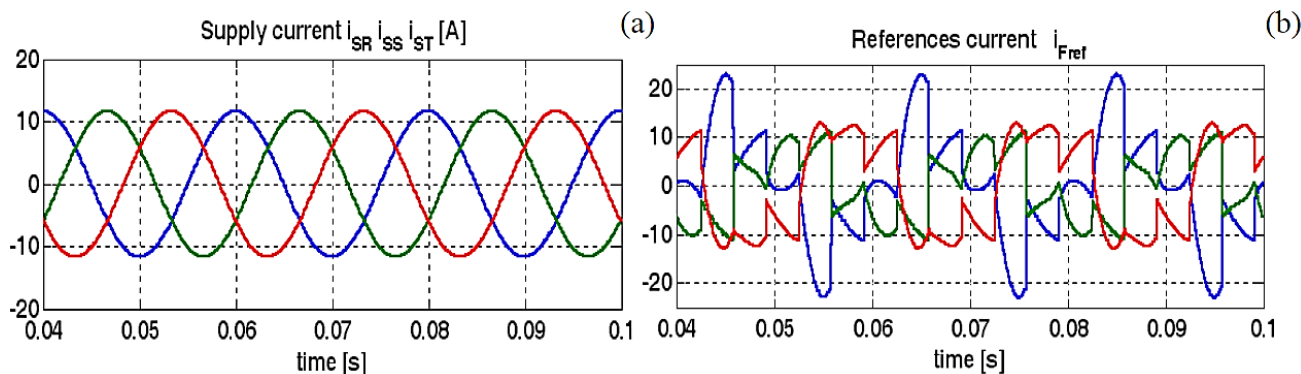
Rysunek 21. Przebieg napięcia zasilającego  $u_{SR}(t)$ ,  $u_{SS}(t)$ ,  $u_{ST}(t)$  (a) oraz jego widmo dla fazy R (b).

6-pulsowy przekształtnik tyrystorowy wraz z dwójnikami rezystancyjnymi w fazach R i S stanowi nieliniowe oraz niesymetryczne obciążenie. Przebiegi prądów fazowych odbiornika  $i_{LR}(t)$ ,  $i_{LS}(t)$ ,  $i_{LT}(t)$  oraz ich widma przedstawia rysunek Rys.22 (kąt wysterowania przekształtnika  $\alpha = 45^\circ$ ). W widmie prądów fazowych odbiornika oprócz harmonicznych charakterystycznych pojawiły się harmoniczne potrójne ze względu na asymetrię odbiornika.



Rysunek 22. Przebiegi prądów odbiornika  $i_{LR}(t)$ ,  $i_{LS}(t)$ ,  $i_{LT}(t)$  (a) oraz ich widma (b).

Otrzymane przebiegi referencyjnych sygnałów kompensacyjnych prądu  $i_{Fref}$  wypracowanych przez algorytmy sterowania przedstawia Rys.23b. W wyniku eliminacji prądu  $i_F \approx i_{Fref}$  otrzymano sinusoidalne przebiegi prądów w poszczególnych fazach po stronie źródła oraz współfazowość przebiegów napięć i prądów.



Rysunek 23. Przebiegi prądów po stronie źródła  $i_{SR}(t)$ ,  $i_{SS}(t)$ ,  $i_{ST}(t)$  (a) oraz przebiegi kompensacyjnych sygnałów referencyjnych prądu  $i_{Fref}(t)$  (b).

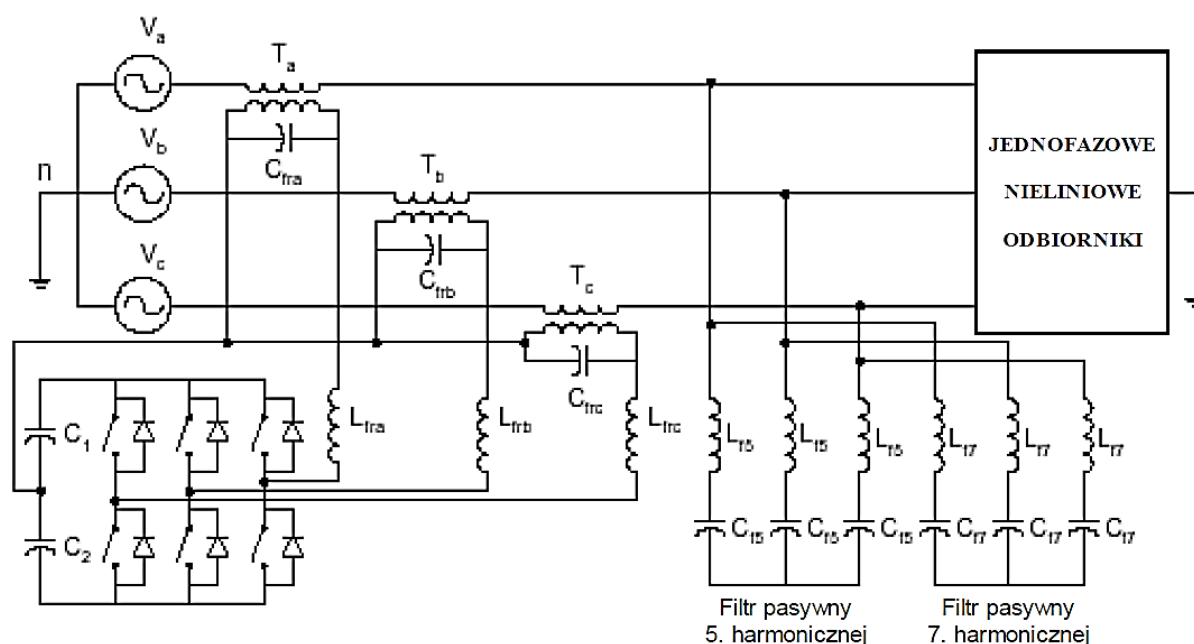
W tabeli *Tabela 1* zestawiono wartości parametrów, po zastosowaniu równoległego EFA, po stronie źródła oraz odbiornika.

*Tabela 1. Zestawienie wartości parametrów układu po zastosowaniu EFA.*

		po stronie odbiornika	po stronie źródła zasilania
<i>współczynnik mocy PF</i>		0,65	1,0
<i>współczynnik THD<sub>IR</sub> [%]</i>	<i>R</i>	48,3	0,01
	<i>S</i>	39,1	0,02
	<i>T</i>	29,83	0,02
<i>wartość skuteczna prądu I<sub>RMS</sub> [A]</i>	<i>R</i>	11,7	8,26
	<i>S</i>	9,61	8,25
	<i>T</i>	13,55	8,25
<i>współczynnik niesymetrii prądu UF<sub>I</sub> [%]</i>		20,0	0,0

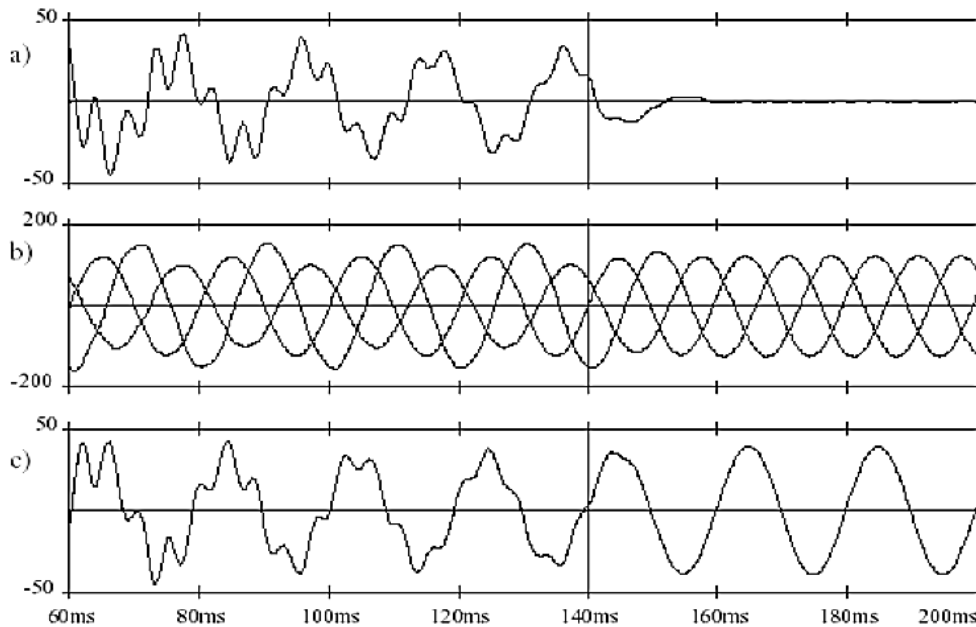
## Filtr hybrydowy – szeregowy EFA współpracujący z równoległym FP

Schemat blokowy rozważanego układu trójfazowego, szeregowego EFA współpracującego z równoległym FP przedstawiono na rysunku Rys.24.



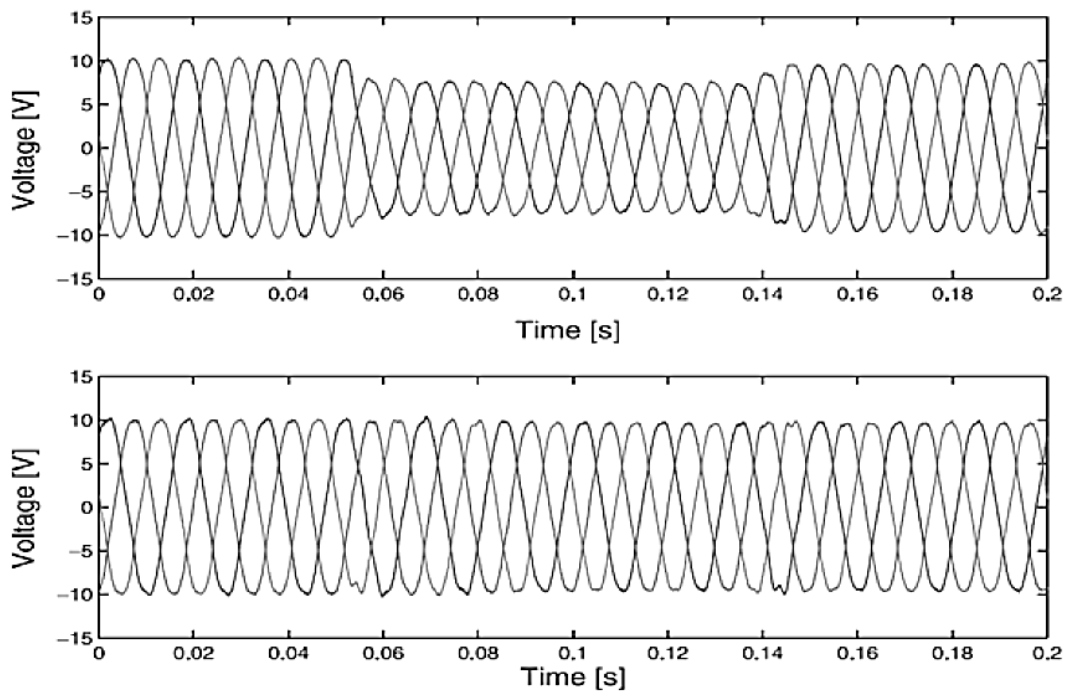
*Rysunek 24. Schemat szeregowego EFA z równoległym FP dla 5. i 7. Harmonicznej.*

Uzyskane przebiegi: prądu w przewodzie neutralnym, napięć i prądów fazowych po stronie źródła zasilania przy włączonym i wyłączonym układzie EFA-FP pokazano na Rys.25. Włączenie układu EFA-FP następuje w 140ms. W wyniku działania EFA-FP otrzymujemy symetryzację napięć zasilających, filtrację wyższych harmonicznych prądu odbiornika, eliminację przesunięcia fazowego między napięciem i prądem po stronie zasilania (kompensacja mocy biernej) oraz redukcję wartości prądu w przewodzie neutralnym niemalże do zera.



Rysunek 25. Przebiegi: a) prąd w przewodzie neutralnym, b) napięcia fazowe, c) prąd fazowy.

Korzystny efekt działania szeregowego EFA ujawnia się również w przypadku pojawienia się zapadu napięcia od strony zasilania. Utrzymuje on prawie niezmienną wartość napięcia na zaciskach odbiornika podczas zapadu Rys.26, chroniąc odbiornik przed ewentualnym wyłączeniem, np. przez automatykę zabezpieczającą.



Rysunek 26. Działanie szeregowego EFA w przypadku zapadu napięcia.

## Literatura

- [1] *"Power Quality in European Electricity Supply Networks – 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> edition"*, The Union of the Electricity Industry EURELECTRIC, 2002, 2003
- [2] Akagi H.: *"Trends in Active Power Line Conditioners"*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 9, No. 3, May 1994
- [3] Baranecki A., Niewiadomski M., Płatek T.: *"Odbiorniki nieliniowe – problemy i zagrożenia"*, Wiadomości Elektrotechniczne nr 3, 2004, str. 24-26
- [4] Gawlik W. H. M.: *"Time Domain Modelling of Active Filters for Harmonic Compensation"*, 2003 IEEE Bologna PowerTech, June 23<sup>th</sup>-26<sup>th</sup>, Bologna, Italy
- [5] Hanzelka Z.: *"Jakość energii elektrycznej"*, [www.twelvee.com.pl](http://www.twelvee.com.pl)
- [6] Hanzelka Z.: *"Wyższe harmoniczne napięć i prądów"*, Materiały Sympozjum Ciągłość i Jakość Zasilania, 25.11.2003, Tarnów, str. 98-111
- [7] Morán A. L., Dixon W. J., Espinoza R. J., Wallace R. R.: *"Using active power filters to improve power quality"*, 5<sup>th</sup> Brazilian Power Electronics Conference, COBEP'99
- [8] Pasko M., Maciążek M.: *"Wkład elektrotechniki teoretycznej w poprawę jakości energii elektrycznej"*, Wiadomości Elektrotechniczne nr 7-8, 2004, str. 37-46.
- [9] Pinheiro R. F., Jacobina C. B., Lima A. M. N, Cabral da Silva E. R.: *"A Revision Of The State Of The Art In Active Filters"*, Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, Foz do Iguaçu. Anais do 5o Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, 1999, p. 857-862
- [10] Piróg S.: *"Energoelektronika – negatywne oddziaływania układów energoelektronicznych na źródła energii i wybrane sposoby ich ograniczenia"*, AGH, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne Kraków 1998
- [11] Rudnick H., Dixon J., Morán L.: *"Delivering Clean and Pure Power"*, IEEE Power & Energy Magazine, 09/10 2003
- [12] Singh B., Al-Haddad K., Chandra A.: *"A review of active filters for power quality improvement"*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 46, No. 5, October 1999
- [13] Strzelecki R., Supronowicz H.: *"Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy"*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000
- [14] [www.lpqi.org](http://www.lpqi.org)