

**dr inż. Krzysztof Matyjasek**

**ELMA energia, Olsztyn**

## **FILTRY PASYWNE**

### **1. Wstęp**

Przy obecnej tendencji wprowadzania dużych urządzeń tyrystorowych i innych odbiorników nieliniowych występuje często konieczność ograniczania ich wpływu na pracę sieci i niektórych jej elementów. Kształt krzywej napięcia w różnych pkt. sieci i instalacjach elektrycznych może się różnić od przebiegu sinusoidalnego, głównie w wskutek istnienia odbiorników o nieliniowych charakterystykach-napięciowo prądowych, takich jak prostowniki i sterowniki z elementami energoelektronicznymi, spawarki, zgrzewarki, odbiorniki zawierające rdzenie ferromagnetyczne pracujące w stanach nasycenia i in. Może to powodować niepoprawną pracę niektórych urządzeń elektrycznych, przede wszystkim elektronicznych.

Deformacja krzywej napięcia może być określona współczynnikiem odkształcenia  $THD_U$  (ang. total harmonic distorsion)

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1}$$

W której  $U_1$ ,  $U_i$  – wartość skuteczna napięcia odpowiednio pierwszej i  $i$ -tej harmonicznej.

Przyjmuje się zazwyczaj, że wartość  $THD_U$  nie powinna przekraczać 5%. W przypadku występowania większych wartości tego współczynnika lub instalowania odbiorników szczególnie wrażliwych na obecność wyższych harmonicznych może okazać się konieczne stosowanie specjalnych filtrów. Fakt ten sprawia, że pasywne filtry wyższych harmonicznych są nadal powszechnie stosowanym sposobem redukcji odkształcenia napięcia w punkcie ich przyłączenia. Opracowano wiele struktur filtrów pasywnych LC, o różnych charakterystykach eksploatacyjnych i różnym przeznaczeniu. Nadal jednak struktura prostego filtru jednogąźniowego jest dominująca w zastosowaniach.

## 2. Filtr prosty, jednogalęziowy

Podstawowymi danymi do projektowania filtra są:

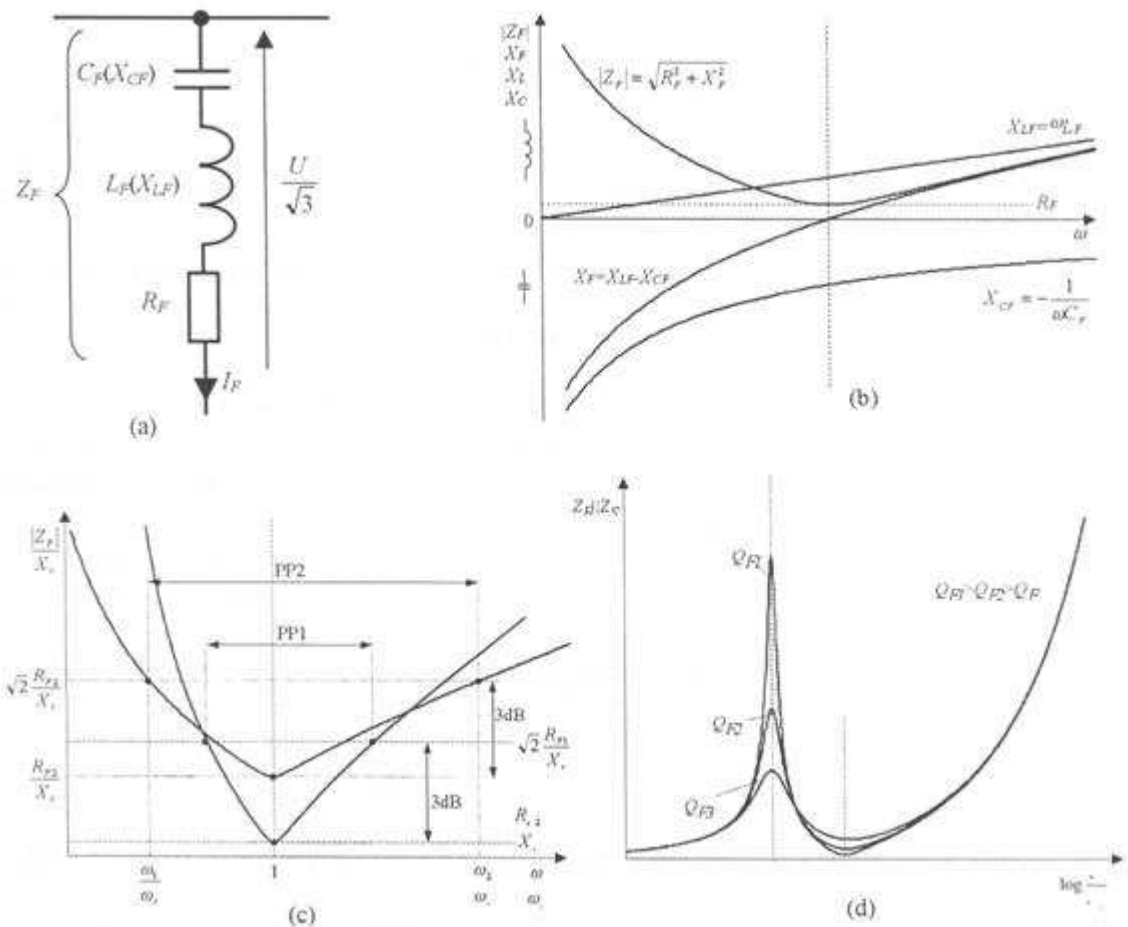
- dane dotyczące źródła wh tj. widmo amplitudowo-częstotliwościowe nieliniowe odbiornika uzyskane na drodze pomiarowej bądź z opisu technicznego filtrowanego urządzenia, wartość wymaganej ze względów kompensacyjnych mocy biernych harmonicznej podstawowej itp.
- dane dotyczące sieci zasilającej tj. charakterystyka częstotliwościowa impedancji układu elektroenergetycznego w punkcie przyłączenia filtra (PWP) – w przypadku jej braku ewentualnie moc zwarcia wraz ze schematem i danymi technicznymi najbliższego otoczenia punktu przyłączenia filtra, pierwotne widmo odkształcenia napięcia w rozważanym punkcie, dopuszczony warunkami zasilania współczynnik odkształcenia napięcia THD oraz współczynnik udziału poszczególnych harmonicznych itp.
- dane dotyczące filtra tj. miejsce jego instalacji, wybrana struktura, parametry techniczne planowanych do wykorzystania elementów biernych itp.

Wszelkie rozważania przeprowadzone są przy uwzględnieniu następujących założeń upraszczających:

- źródło wh jest idealnym źródłem prądowym,
- rezystancja  $R_F$ , indukcyjność  $L_F$  i pojemności  $C_F$  filtra są skupione i mają stałą wartość w rozważanym przedziale częstotliwości
- filtr obciążony jest tylko podstawową harmoniczną oraz harmoniczną, do której dostrojony

Schemat zastępczy oraz przykładowe charakterystyki częstotliwościowe również układu filtr-sieć zasilająca przedstawia rysunek.

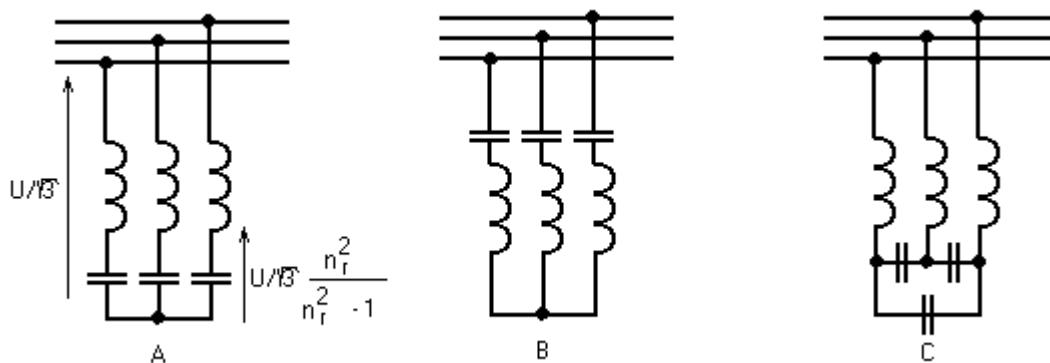
Rezystancję  $R_F$  stanowi głównie rezystancja dławika, bowiem wartość oporności zastępczej baterii kondensatorów jest w praktyce mała i może być w wielu przypadkach pominięta w praktycznych rozważaniach.



Rys. Schemat zastępczy filtru jedno gałęziowego (a) oraz jego przykładowe charakterystyki impedancyjne (b, c), (d) typowa charakterystyka dla równoległego połączenia impedancji sieci zasilającej ( $Z_s$ ) i filtru prostego ( $Z_F$ ) dla różnych dobroci filtru  $Q_F$ .

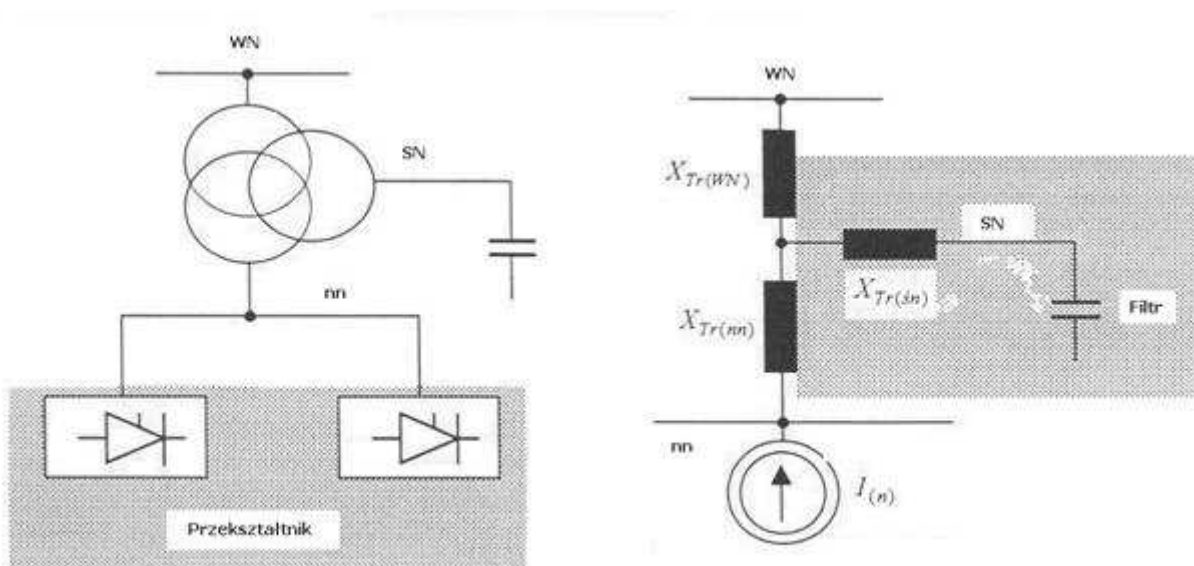
### 3. Podstawowe struktury filtru

Kondensatory i dławiki w filtrze mogą być łączone w układy jak na rysunku. Rozwiązanie „a” jest niekorzystne, bowiem izolacja zacisków kondensatorów i dławików znajduje się względem potencjału punktu gwiazdowego, pod napięciem większym niż napięcie fazowe sieci zasilającej. Znacznie korzystniejszym, z punktu widzenia trwałości izolacji elementów filtru jest układ na rysunku „b”. Konfiguracja jak na rysunku „c” jest powszechnie stosowana w sieciach nn. Trzeba jednakże uwzględnić fakt, że połączenie kondensatorów w trójkąt uniemożliwia filtrację składowych „potrójnych” tworzących układ symetryczny kolejności zerowej. Dotyczy to głównie 3-ciej harmonicznej. Do filtracji niezbędne jest połączenie kondensatorów w gwiazdę z uziemionym punktem zerowym.



Rys. możliwe konfiguracje filtru prostego.

W niektórych szczególnych przypadkach rolę reaktancji indukcyjnej filtru może w całości (lub częściowo) pełnić reaktancja zastępcza transformatora. Poniższy rysunek przedstawia przykładowy schemat instalacji filtru, w którym dzięki zastosowaniu trójzwojowego transformatora uzyskano dopasowanie napięciowe baterii kondensatorów i wykorzystano reaktancję rozproszenia transformatora jako element składowy filtru.



#### 4. Zagadnienia strojenia filtrów

Dostrajanie filtru polega na wyborze częstotliwości rezonansu szeregowego dla poszczególnych gałęzi filtru oraz wykonaniu konkretnych czynności strojenia filtru. Wybór częstotliwości strojenia filtru zależy od:

- Częstotliwości filtrowanej harmoniczej

- Konieczności eliminacji rezonansów równoległych w układzie sieć-filtr
- Rozbieżność między obliczonymi a rzeczywistymi parametrami elementów filtru
- Zmienność elementów filtru i ich parametrów w czasie.

Filtry rezonansowe stroi się na częstotliwości zbliżone (odpowiednio niższe) do wielokrotności częstotliwości podstawowej. Niższa częstotliwość strojenia wynika stąd, że powyżej częstotliwości własnej reaktancja filtru ma charakter indukcyjny, co jest korzystniejsze z punktu widzenia jego współpracy z siecią. O stopniu odstrojenia od spodziewanej częstotliwości wyższej harmonicznej prądu decyduje przede wszystkim zmienność elementów filtru w czasie. Częstotliwość rezonansowa filtru szeregowego zależy od indukcyjności dławika oraz pojemności kondensatorów wg. wzoru:

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{L,C}}$$

Ponieważ bardziej niekorzystny jest wzrost częstotliwości rezonansu szeregowego, należy, zatem przeanalizować możliwość zmniejszenia się zarówno indukcyjności dławika, jak i pojemności kondensatorów w czasie eksploatacji.

Znacznego zmniejszenia indukcyjności filtru można się spodziewać w przypadku zwarcia międzyuzwojeniowego w dławiku. Stan taki powinien być traktowany jako awaryjny, gdyż prowadzi on w krótkim czasie do zniszczenia uzwojenia. Podobna sytuacja wystąpi w przypadku zwarcia blach rdzenia. Czynniki atmosferyczne, a szczególnie wilgoć, mogą powodować pęcznienie przekładek międzyzwojowych i dystansowych, przez co indukcyjność dławika zmniejsza się.

Tak, więc mogą wystąpić dwa przypadki:

- gwałtowne, awaryjne zmniejszenie się indukcyjności związane z uszkodzeniem filtru.
- niewielkie, rzędu kilku procent zmniejszenie się indukcyjności dławika.

Zagadnienie zmian pojemności baterii kondensatorów w filtrze jest bardziej złożone. Pojemność baterii oraz jej zmiany zależą w ogólnym przypadku od:

- a. konfiguracji układu;



Przyrost ten w filtrze rezonansowym nastrojonym na 5-tą harmoniczną będzie wynosił ok. 10Hz, a w filtrze 11-tej harmoniczej ok. 23Hz. Z tych względów stosuje się wstępne odstrajanie filtru, polegające na obniżeniu częstotliwości rezonansowej filtru w stosunku do teoretycznej.

W praktyce filtr nigdy nie jest dostrojony do częstotliwości filtrowanej harmoniczej. Większość filtrów w obwodach niskiego i średniego napięcia stroi się na około (0,95-0,97) częstotliwości rezonansowej. Zmienia to w pewnym stopniu właściwości filtru. Jednakże jak widać z przebiegu charakterystyk impedancyjnych jak na rysunku, występuje znaczny wzrost wartości impedancji układu: sieć zasilająca-filtr dla częstotliwości mniejszych od częstotliwości dostrojenia (ze względu na bliski stan rezonansu równoległego). Impedancja ta wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości powyżej częstotliwości dostrojenia, lecz wzrost ten nie jest tak znaczący jak w pierwszym przypadku. Wartość indukcyjności dławika i pojemności kondensatorów ulegają zmianie, dotyczy to w szczególności kondensatorów. Korzystnym jest, aby w efekcie tych procesów, powodujących najczęściej wzrost częstotliwości rezonansowej, filtr dostrajał się samoczynnie do filtrowanej harmoniczej.

Kolejne wskaźniki opisujące właściwości filtru to:

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega_r L}{\omega_1 - \omega_2} = \frac{\omega_r}{PP} \text{ - dobroć filtrów (rys.)}$$

$$X_L = \omega_r L = \frac{1}{\omega_r C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

- wartość reaktancji indukcyjnej lub

pojemnościowej filtru

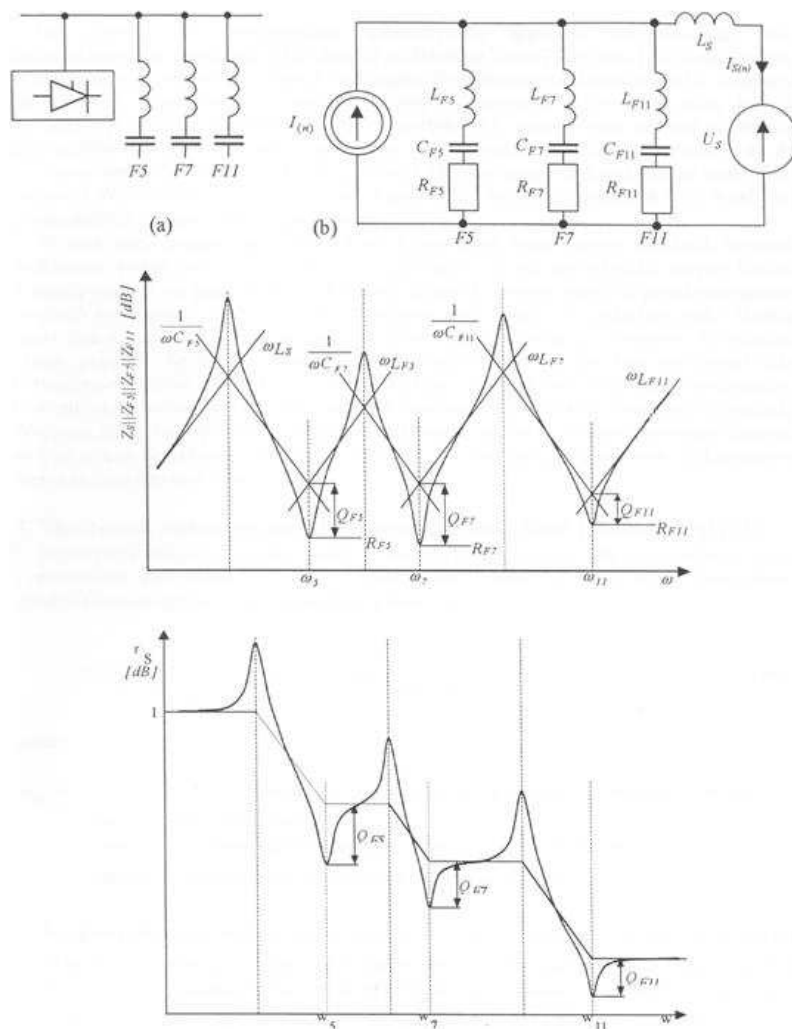
dla częstotliwości rezonansowej

Dobroć jest miarą strat w filtrze i dokładności dostrojenia. Im większa jest jej wartość, tym mniejsza jest impedancja filtru dla częstotliwości rezonansowej oraz tym większe jest pasmo przepustowe PP (rys). Dobroć filtru determinowana jest głównie dobrocią dławika  $Q_L = X_L/R_L$  gdzie  $R_L$  jest rezystancją dławika. Typowe wartości dobroci filtrów z dławikami rdzeniowymi (głównie sieci nn) zawarte są w przedziale 40-60, a dla filtrów z dławikami powietrznymi (SN i WN) wynoszą odpowiednio 60-150. Im większa jest wartość wypadkowej rezystancji filtru (niekorzystne ze względu na straty mocy i

koszty eksploatacyjne) tym mniejsza jest wartość współczynnika dobroci tym większe i tym większe jest tłumienie zjawisk rezonansowych występujących w układzie. Wartość rezystancji filtra może być niekiedy celowo kształtowana np. w celu jego „znieczulenia na rozstrojenie” (rozszerzenie pasma przepustowego) ceną jest wzrost strat mocy czynnej. Rysunek przedstawia przykładowo, typowe charakterystyki impedancyjne układu: filtr prosty sieć zasilająca w zależności od wartości współczynnika dobroci

## 5. Równoległa praca filtrów

W przypadku  $k$  równoległych filtrów prostych do eliminacji większej liczby harmonicznnych w układzie występuje  $k$  rezonansów napięć (rezonansów szeregowych) i  $k$  rezonansów prądów (rezonansów równoległych). Ich częstotliwości wzajemnie się przeplatają, przy czym jako pierwszy występuje zawsze rezonans prądów (równoległy). Innymi słowy każda gałąź filtra wytwarza swoją częstotliwość rezonansu równoległego. Schemat ideowy przykładowego filtra dla dużej instalacji przemysłowej przedstawia





Filtry dostrojone są do kolejnych wyższych harmonicznych uznanych za jego harmoniczne charakterystyczne. Filtry należy instalować dla każdej z generowanych przez odbiornik składowych od najniższej, nie pomijając żadnej z nich. Przykładowo zainstalowanie filtrów F5 i F11 z pominięciem filtra 7-mej harmonicznej dla sześciopulsowego przekształtnika stwarza niebezpieczeństwo, że pomiędzy dwoma częstotliwościami rezonansu szeregowego dla 5 i 11 harmonicznej wystąpi rezonans równoległy, który może być zbieżny lub bliski z 7-mą harmoniczną. Wytworzenie takich warunków jest technicznym błędem. Z tych samych powodów w przypadku uszkodzenia jednej gałęzi filtra wielogałęziowego trzeba odłączyć wszystkie filtry dostrojone do częstotliwości większych od tej, do której dostrojona jest uszkodzona gałąź. Z tego powodu również określona jest kolejność włączania (od najniższej harmonicznej) i wyłączania (od najwyższej harmonicznej) poszczególnych filtrów. Np. dla filtrów F5 i F7 filtr F5 musi być załączany przed filtrem F7 a wyłączany po F7.

Lokalizacja pierwszego równoległego rezonansu jest zdeterminowana indukcyjnością systemu zasilającego  $L_s$ , częstotliwością rezonansu szeregowego filtrowanej harmonicznej o najmniejszym rzędzie i całkowitą pojemnością wszystkich kondensatorów filtra. Wartość tej pojemności jest zwykle wybierana na podstawie wymagań kompensacyjnych mocy biernej. Zwykle będzie ona proponowana jak najmniejsza w celu ograniczenia głównie kosztów instalacji, lecz powinna być wystarczająco duża, aby odbiorca nie ponosił opłat za niedotrzymanie zadanego współczynnika mocy i aby zabezpieczyć kondensatory przed przeciążeniem prądowym. Jeżeli pojemność kondensatorów jest zbyt duża, przy małym obciążeniu może na skutek przekompensowania, nadmiernie wzrosnąć napięcie na filtrowanych szynach i może wówczas zaistnieć, w przypadku pewnej kategorii odbiorów potrzeba nadążnego kompensatora o charakterze indukcyjnym.

Jeżeli układ znajdzie się zbyt blisko rezonansu równoległego można również rozważyć dodanie rezystora tłumiącego lub zmianę całkowitej pojemności (sumarycznej mocy biernej). Zmian proporcji między pojemnościami w poszczególnych gałęziach filtra, przy zachowaniu niezmięnionej pojemności całkowitej ma mały wpływ na częstotliwość pierwszego rezonansu.

W niektórych przypadkach, dla zadanej sumarycznej mocy biernej instalacji, istotnym problemem jest projektowym jest podział mocy pomiędzy poszczególne równoległe pracujące gałęzie filtrów. Z reguły podział ten jest arbitralny. Wstępnie założone wartości punkt początkowy obliczeń iteracyjnych zmierzających do finalnego rozwiązania. To podejście prób i błędów może stać założone, gdy większa liczba filtrów jest instalowana w systemie. W ostatnim czasie pojawiły się nowe prace, w których

projektowanie filtrów traktowane jako rozwiązanie zadania optymalizacyjnego. Funkcją celu jest minimalizacja funkcjonałów, którymi są np. współczynnik odkształcenia napięcia THD lub koszt instalacji filtracyjnej. Więzami może być np. zadany współczynnik mocy natomiast widmo pierwotne napięcia, widmo prądu obciążenia, impedancja sieci itp. są zmiennymi wejściowymi traktowanymi jako zmienne losowe.

## **6. Wnioski**

Mimo prowadzonych zaawansowanych prac dotyczących aktywnych układów redukcji odkształcenia prądów i napięć, pasywne filtry wyższych harmonicznych są nadal atrakcyjnym rozwiązaniem stosowanym powszechnie w przemyśle do poprawy jakości energii elektrycznej. Do ich niewątpliwych zalet zaliczyć należy stosunkowo niską cenę oraz prostotę koncepcyjną. Opracowano wiele różnych konfiguracji filtrów jednakże u podstaw każdej z nich znajduje się najprostsza jednogąździowa struktura.

## **7. Literatura**

- *S. Grzybowski, A. Kordus, C. Królikowski: „Kondensatory w energoelektryce”; WNT, W-wa 1964,*
- *J. Strojny: „Kondensatory w sieci zakładu przemysłowego”; WNT, W-wa 1976,*
- *Materiały seminaryjne „Jakość i użytkowanie energii elektrycznej”; Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2000r.*