

Piotr Grugel

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

WPŁYW TOLERANCJI PARAMETRÓW ELEKTRYCZNYCH DŁAWIKA SPRZĘGAJĄCEGO NA CZUŁOŚĆ RÓWNOLEGŁEGO FILTRA AKTYWNEGO

W artykule przedstawiono wpływ rezystancji i indukcyjności dławika sprzęgającego równoległy filtr aktywny z siecią zasilającą na czułość filtra oraz dokładność kompensacji harmonicznych. Badania dotyczyły dwóch różnych mocy zwarciovych sieci. Eksperymenty symulacyjne przeprowadzono dla typowego układu filtra trójfazowego, sterowanego z zastosowaniem predykcyjnego algorytmu wektorowego, dołączonego do sieci nn (400 V, 50 Hz).

Słowa kluczowe: czułość, wrażliwość, równoległy energetyczny filtr aktywny, kondycjonowanie energii, poprawa jakości energii elektrycznej, aktywna poprawa współczynnika mocy, sterowanie predykcyjne, wyższe harmoniczne.

WSTĘP

Rosnąca liczba nieliniowych odbiorników energii elektrycznej oraz liczne procesy łączeniowe powodują w liniach zasilających różne zaburzenia, istotne dla elektroenergetyki. Do najważniejszych zaburzeń zalicza się między innymi: wyższe harmoniczne oraz subharmoniczne i interharmoniczne prądów, a także składowe prądów o charakterze biernym [7, 13]. Prądy te powodują powstawanie dodatkowych spadków napięć na impedancji sieci zasilającej, co z kolei skutkuje odkształceniem przebiegów napięć w węzłach tej sieci. Dla odbiorcy końcowego oznacza to pogorszenie jakości energii elektrycznej. Nie bez znaczenia, w aspekcie wyższych harmonicznych napięć w sieciach 400 V, jest przy tym rozwój generacji rozproszonej w elektroenergetycznych sieciach dystrybucyjnych średniego napięcia [4, 5].

Problemy naukowo-praktyczne związane z poprawą jakości energii elektrycznej już od wielu lat stanowią centrum zainteresowań wielu ośrodków naukowych i przemysłowych [2, 6, 8, 12, 13]. Początkowo kompensowano tylko moc bierną, stosując baterie kondensatorów lub przewzbudzone silniki synchroniczne. Rzadziej już filtrowano wyższe harmoniczne za pomocą obwodów biernych LC, co wiązało się, między innymi, z ryzykiem wystąpienia zjawisk rezonansowych w linii, problemami z dostrojeniem filtra do zadanych częstotliwości, tolerancją wykonania, starzeniem elementów, a także zmianą parametrów elektrycznych tychże elementów pod wpływem oddziaływania czynników środowiskowych. Należy przy tym odnotować znaną zależność stwierdzającą, że jeśli w układzie znajduje się

N elementów wykonanych z pewną tolerancją T parametrów elektrycznych (rozumianą jako różnica wartości znamionowej i rzeczywistej, odniesioną do wartości znamionowej), to w ogólnym przypadku [16] tolerancja całego układu T_{tot} wynosi:

$$T_{\text{tot}} = \sqrt{\sum_{n=1}^N T_n^2} \quad (1)$$

Obecnie do kompensacji/filtracji niepożądanych składowych prądów w liniach zasilających coraz częściej stosuje się równoległe energetyczne filtry aktywne (S-APF – *Shunt Active Power Filter*). Te układy, umożliwiające kompensację zarówno wyższych harmonicznym prądu, jak i mocy biernej oraz niesymetrii, nie wykazują wad filtrów biernych. S-APF są całkowicie odporne na zjawiska rezonansowe, a także mają możliwość samoczynnego adaptowania się do bieżących przebiegów prądów odkształconych [1].

Układy S-APF są najczęściej sprzęgane z siecią elektroenergetyczną za pośrednictwem dławików L . Parametry dławika (indukcyjność, rezystancja) stanowią przy tym ważny element modelu matematycznego algorytmu sterowania, toteż dokładność ich odwzorowania może mieć znaczący wpływ na skuteczność procesu filtracji. W artykule przedstawiono wpływ odchylenia wartości rezystancji i indukcyjności dławika sprzęgającego od wartości zaimplementowanej w algorytmie sterującym na zawartość harmonicznym prądu sieci. Dodatkowo przeanalizowano wrażliwość układu S-APF na te odchylenia. Badania przeprowadzono dla dwóch przypadków mocy zwarciovych sieci zasilającej 500 kVA i 20 MVA, obciążonej 6-pulsowym prostownikiem diodowym 10 kVA.

1. FILTRACJA AKTYWNA I ALGORYTM STEROWANIA FILTREM

Równoległy energetyczny filtr aktywny (S-APF), stanowiący dodatkowe źródło prądu kompensującego, realizowany w postaci falownika napięcia z kondensatorem w obwodzie DC, łączy się z siecią elektroenergetyczną za pośrednictwem dławika L (rys. 1). Zadanie falownika sprowadza się do wytworzenia takiej wartości napięcia u^* , aby w jego gałęzi popłynął prąd i^* , równy sumie niepożądanych składowych prądu odbiornika i_0 . Wówczas, w idealnym przypadku, prąd sieci i_{net} jest sinusoidalny i zgodny w fazie z podstawową harmoniczną napięcia e_{net} . Napięcie na dławiku sprzęgającym (oznaczono je u_{RL}) jest różnicą napięcia wygenerowanego przez falownik u^* i napięcia sieci e w punkcie przyłączenia. To napięcie jest też zależne od prądu i^* płynącego w tym dławiku. Można zatem opisać te zależności następująco:

$$\begin{cases} u_{\text{RL}}(t) = u^*(t) - e(t) \\ u_{\text{RL}}(t) = R \cdot i^*(t) + L \frac{di^*(t)}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

Po podstawieniu i uporządkowaniu otrzymuje się zależność na napięcie wyjściowe falownika:

$$u^*(t) = e(t) + R \cdot i^*(t) + L \frac{di^*(t)}{dt} \quad (3)$$

W praktyce ta zależność jest obliczana w układzie cyfrowym. Dla tego przypadku, po zastosowaniu najprostszej, niejawnej metody Eulera, równanie (3) przyjmuje postać:

$$u^*[n] = e[n] + R \cdot i^*[n] + L \frac{i^*[n] - i^*[n-1]}{\Delta T} \quad (4)$$

gdzie:

ΔT – okres próbkowania,

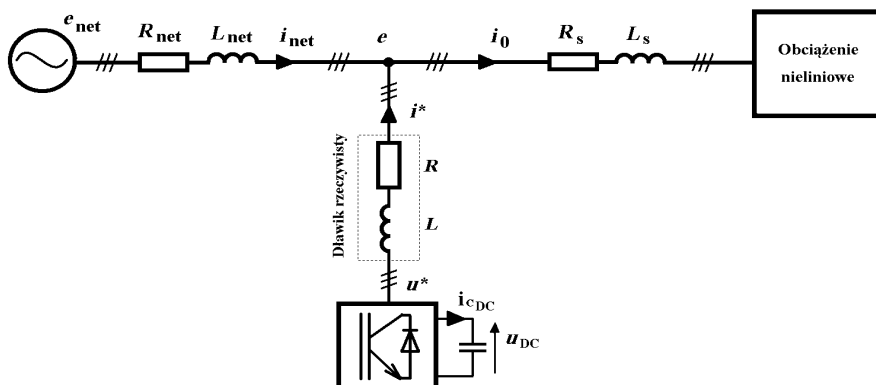
indeks n – bieżąca chwila próbkowania $n\Delta T$,

indeks $n-1$ – poprzednia chwila próbkowania $(n-1)\Delta T$.

Ze względu na opóźnienia wprowadzane przez przetworniki A/D, jeśli sterownik w celu dokonania niezbędnych pomiarów prądów i napięć wyśle w chwili n sygnał rozpoczęcia konwersji, to wyniki tych pomiarów będą osiągalne dopiero w kolejnym cyklu, oznaczonym analogicznie $n+1$. Dodatkowe opóźnienie wprowadza ciąg obliczeniowy i modulacja PWM, albowiem wyznaczenie napięcia trwa również jeden impuls taktowy falownika równy ΔT (modulator PWM jest zsynchronizowany z układem sterowania). W związku z tym, aby możliwie dokładnie odtworzyć przebieg prądu wzorcowego, należy zadawać napięcie falownika dla chwili $(n+2)\Delta T$, zgodnie z zależnością:

$$u^*[n+2] = e[n+2] + R \cdot i^*[n+2] + L \frac{i^*[n+2] - i^*[n+1]}{\Delta T} \quad (5)$$

Wiąże się to z koniecznością prognozowania wartości niektórych wielkości i zastosowania algorytmów predykcyjnych [1, 14, 15].



Rys. 1. Przyłączenie układu S-APF do sieci zasilającej za pośrednictwem dławika sprzęgającego

Fig. 1. Connecting S-APF to power network via coupling inductor

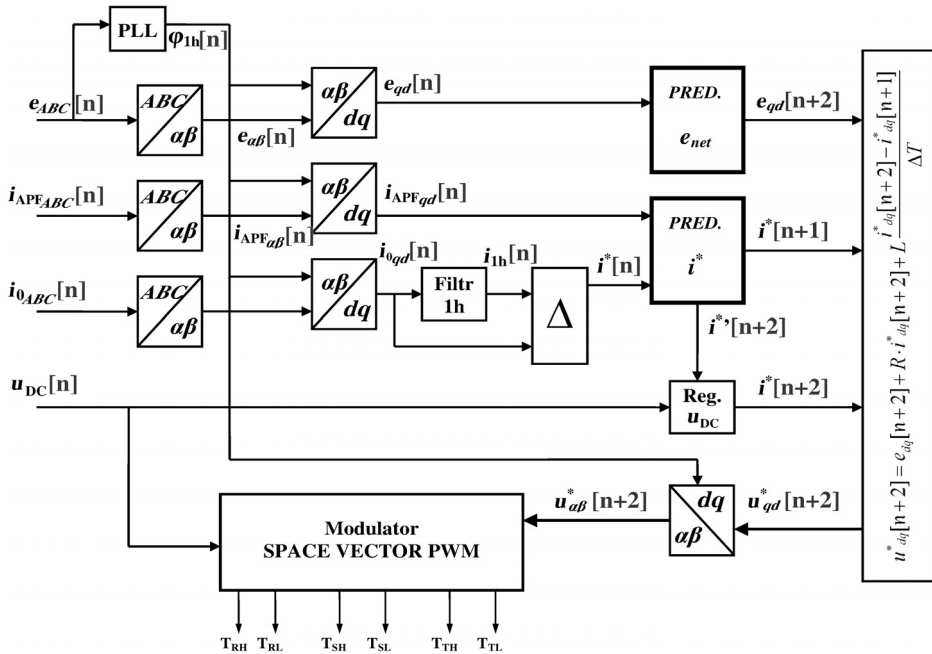
Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy algorytmu sterowania układu S-APF, zaimplementowany przez autora na podstawie wyników opublikowanych w pracach [14, 15]. W tym algorytmie wzorcowe napięcie falownika jest obliczane następująco:

$$u^*[n+2] = e[n+2] + \left(R + \frac{L}{\Delta T} \right) (i_0[n+2] - i_{1h}[n] + i_{DC}[n]) + \frac{L}{R \cdot \Delta T + L} \left(u^*[n+1] - e[n+1] + \frac{L}{\Delta T} i^*[n] \right) \quad (6)$$

gdzie:

- i_{DC} – prąd ładowania kondensatora w odwodzie DC (wartość wyznaczana przez odrębny regulator stabilizujący napięcie w obwodzie DC),
- i_{1h} – wartość chwilowa pierwszej harmonicznej prądu obciążenia (pożądany prąd sieci).

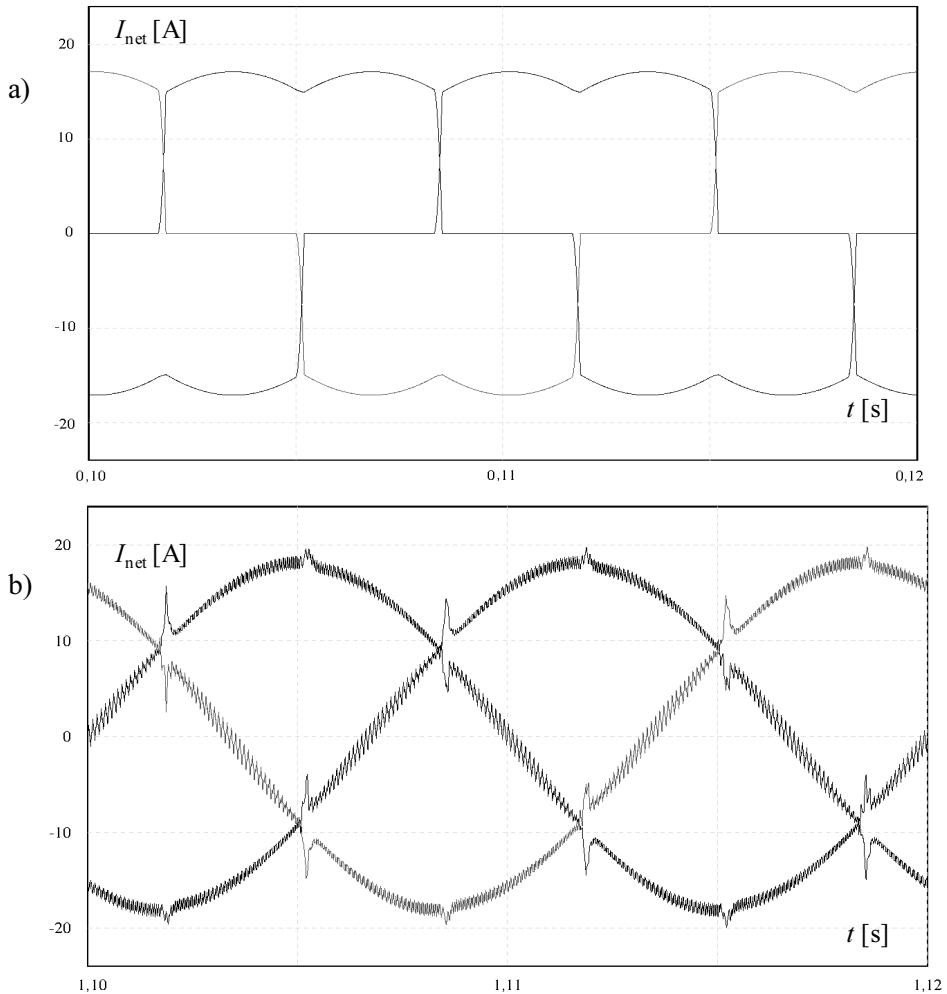
Wielkość i_{1h} jest wyznaczana zgodnie z rysunkiem 2 w wirującym układzie współrzędnych dq (synchronizowanym z wektorem podstawowej harmonicznej napięcia sieci e) i jest wartością zespoloną. Wyzerowanie składowej urojonej powoduje aktywną kompensację mocy biernej.



Rys. 2. Algorytm sterowania równoległym filtrem aktywnym

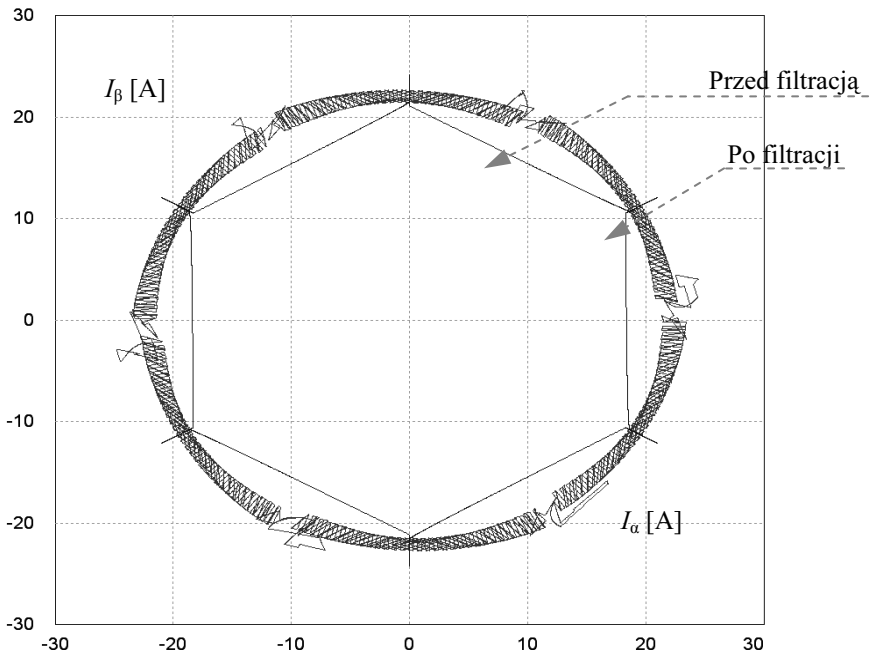
Fig. 2. Shunt active power filter's control algorithm

Na rysunku 3 przedstawiono przebiegi fazowe, a na rysunku 4 – hodograf prądów sieci przed i po załączeniu układu S-APF. Każdy punkt hodografu na płaszczyźnie $\alpha\beta$ można traktować jak wartość zespoloną. Takie podejście umożliwia bezpośrednią identyfikację składowych zgodnych i przeciwnych prądu sieci oraz pozwala dokładniej określić wpływ falownika z modulacją PWM na dodatkowe składowe na poziomie częstotliwości kluczowania oraz zjawiska związane ze skończoną dynamiką filtra.



Rys. 3. Przebieg prądu sieci: a) przed filtracją, b) po filtracji

Fig. 3. Current network's waveforms: a) before filtration, b) after filtration



Rys. 4. Hodograf wektora wodzącego prądu sieci przed i po filtracji

Fig. 4. Hodograph of the current network's position vector before and after filtration

W ogólnym przypadku zawartość harmonicznych prądu definiuje się jako wartość skuteczną całego przebiegu I_{RMS} z wyłączeniem wartości skutecznej pierwszej harmonicznej I_{1h} , odniesioną do wartości skutecznej pierwszej harmonicznej:

$$THD_F = \frac{\sqrt{I_{RMS}^2 - I_{1h}^2}}{I_{1h}} \cdot 100\% \quad (7)$$

Dla sieci niskiego napięcia współczynnik zawartości harmonicznych oblicza się dla składowych prądu i napięcia do czterdziestej harmonicznej włącznie [11]:

$$THD_{40h} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_{nh}^2}}{I_{1h}} \cdot 100\% \quad (8)$$

Dla analizy widmowej zmiennej zespolonej wzór ten przybiera postać:

$$THD_{40h} = \frac{\sqrt{\sum_{n=-40}^0 I_{nh}^2 + \sum_{n=2}^{40} I_{nh}^2}}{I_{1h}} \cdot 100\% \quad (9)$$

a po uporządkowaniu argumentu pod operatorem sumowania otrzymuje się:

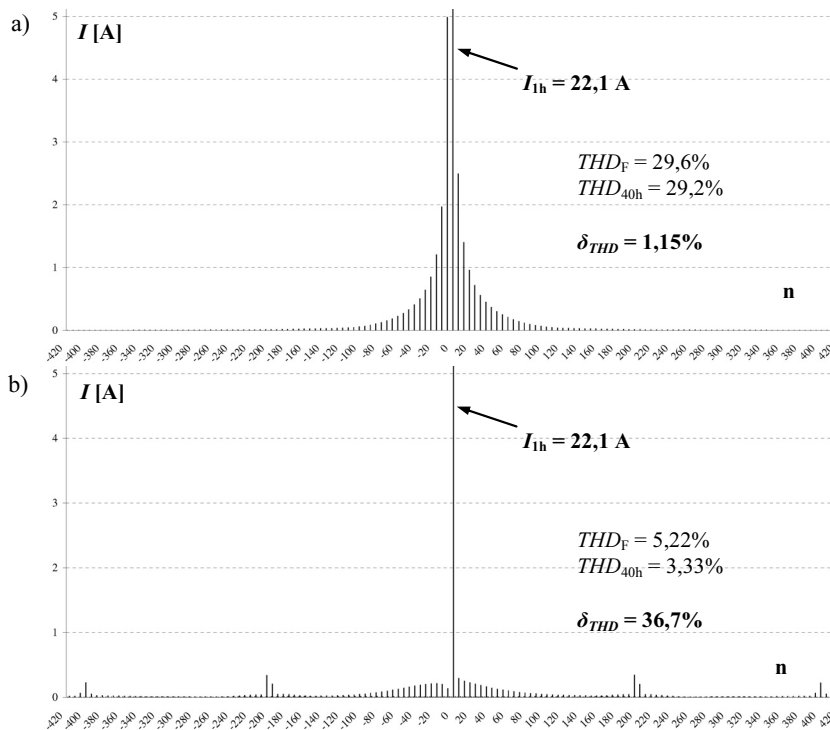
$$THD_{40h} = \frac{\sqrt{\sum_{n \in \langle -40 \div 40 \rangle \setminus \{1\}} I_{nh}^2}}{I_{1h}} \cdot 100\% \quad (10)$$

Rząd 40 harmoniczných jest umowy, albowiem uznano, że harmoniczne wyższego rzędu mają znikomy wpływ na współczynnik THD (kwestie harmoniczných wyższego rzędu regulują normy dotyczące kompatybilności elektromagnetycznej).

Na rysunku 5a) przedstawiono przykładowe widmo harmoniczných odkształconego prądu sieci pobieranego przez prostownik diodowy. Współczynnik zawartości harmoniczných obliczony według zależności (7) wynosi dla danego przypadku 29,6%, a obliczony zgodnie z zależnością (10) wynosi 29,2%. Względna odchyłka δ_{THD} tych współczynników zdefiniowana jako

$$\delta_{THD} = \frac{THD_F - THD_{40h}}{THD_F} \cdot 100\% \quad (11)$$

wynosi w tym przypadku 1,35%, co stanowi pomijalnie małą wartość.



Rys. 5. Widmo częstotliwościowe prądu sieci: a) przed filtracją, b) po filtracji

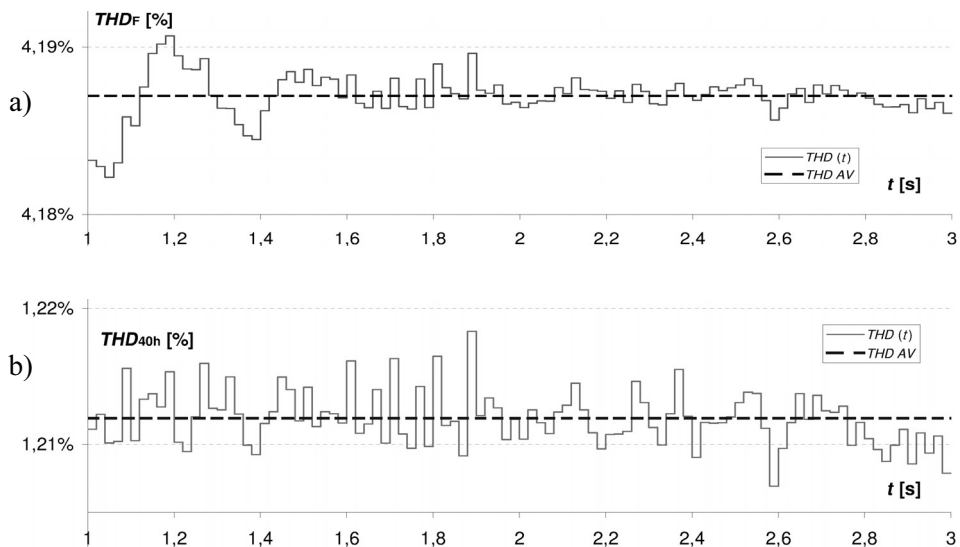
Fig. 5. Current network's spectrum: a) before filtration, b) after filtration

Po załączeniu filtra aktywnego zachodzi skompensowanie harmonicznych do około setnego rzędu (rys. 5b). Widoczne prążki o znacznej wartości w okolicy harmonicznych rzędu 200 (10 kHz) i 400 (20 kHz) spowodowane są modulacją PWM [3, 9]. Te dodatkowe prążki znajdują się daleko poza granicą przewidywaną przez normę [11]. Współczynnik THD liczony według zależności (7) wynosi 5,22%, natomiast liczony według zależności (10) – 3,33% (ponad ośmiokrotnie niższa zawartość harmonicznych). W tym przypadku względna odchyłka (11) wynosi 36,7% i nie może być już pominięta, dlatego wyniki eksperymentu przedstawiono dla obu sposobów obliczania współczynnika THD .

2. EKSPERYMENT SYMULACYJNY

Badania symulacyjne przeprowadzono dla typowego odbiornika nieliniowego, jakim jest 6-pulsowy prostownik diodowy z obciążeniem RL o mocy 10 kVA (przyjęto $R = 33 \Omega$, $L = 5,1 \text{ mH}$). Prostownik przyłączono do sieci za pośrednictwem dławików komutacyjnych o indukcyjności dobranej na wartość 120 μH . Znamionowe wartości indukcyjności i rezystancji dławika sprzęgającego falownik układu S-APF z siecią wynosiły odpowiednio 3 mH i 600 m Ω . Te wartości zostały wprowadzone do modelu matematycznego (6) zaimplementowanego w algorytmie filtracji. Następnie do wartości rezystancji i indukcyjności dławików sprzęgających filtr z siecią celowo wprowadzono odchylenia w zakresie $\pm 20\%$ ich wartości (z krokiem 1/10 zakresu), po czym przebadano skuteczność filtracji. Badań dokonano przy dwóch mocach zwarciovych sieci, 500 kVA ($R_{\text{net}} = 318 \text{ m}\Omega$, $L_{\text{net}} = 113 \mu\text{H}$) i 20 MVA ($R_{\text{net}} = 7,95 \text{ m}\Omega$, $L_{\text{net}} = 2,82 \mu\text{H}$).

Ze względu na ciągłe dostosowywanie się filtra do panujących warunków (wartości wyjściowe regulatora napięcia u_{DC} oraz członów predykcyjnych są zmienne w czasie), a także ze względu na możliwość występowania interharmonicznych, każdy okres przebiegu prądu może charakteryzować się nieco inną wartością współczynnika THD (zarówno THD_{F} , jak i $THD_{40\text{h}}$). Są to niewielkie różnice, jednak na tle badanych rozrzutów mogłyby okazać się znaczące. Z tego powodu pomiary przeprowadzono dla każdego wariantu w następujący sposób: po ustabilizowaniu się pracy filtra (założono, że po jednej sekundzie pracy) rozpoczęto akwizycję danych i dokonano analizy widmowej stu kolejnych przebiegów w oknie o szerokości odpowiadającej okresowi podstawowej harmonicznej (20 ms). Z każdego uzyskanego widma obliczono THD zarówno według (7), jak i według (10). Następnie obliczono średnią arytmetyczną otrzymanych współczynników, która w dalszych rozważaniach posłużyła jako wartość wyjściowa dla danego wariantu. Zilustrowano to na rysunku 6.



Rys. 6. Przykładowe zmiany wartości współczynnika THD prądu sieci podczas pracy filtra aktywnego

Fig. 6. The examples of changes of current network's THD factor during power filter's work

3. REZULTATY PRZEPROWADZONEGO EKSPERYMENTU

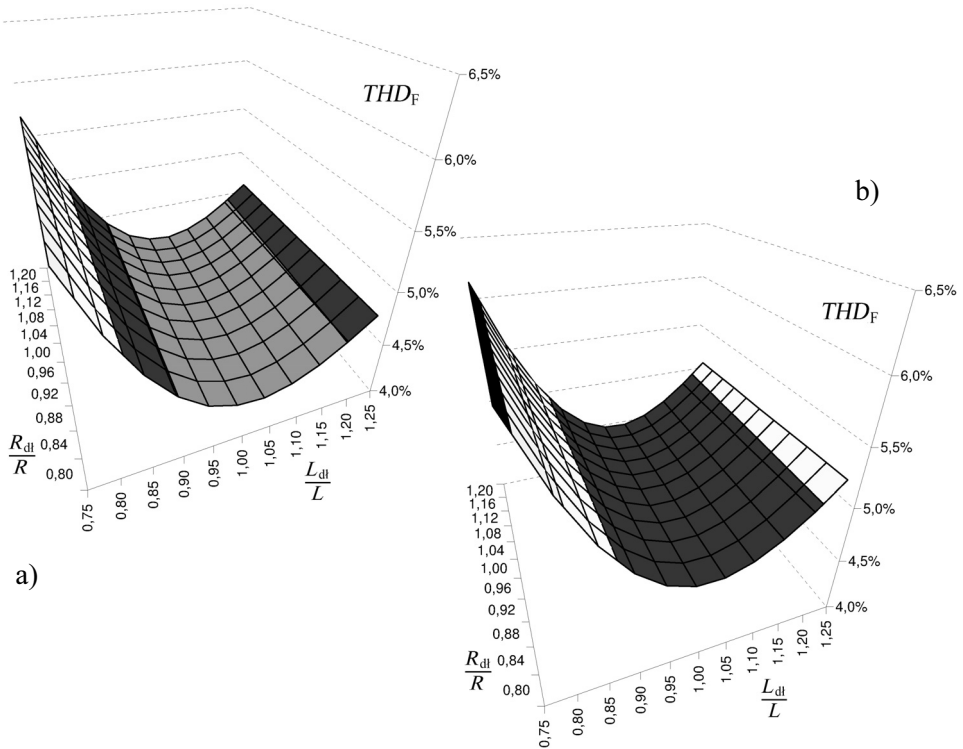
Wyniki badań zostały przedstawione jako zbiór wartości współczynnika zawartości harmonicznych prądu sieci w funkcji dwóch zmiennych: względnej wartości indukcyjności i rezystancji dławika sprzęgającego.

Wykresy na rysunku 7 obrazują wartości współczynnika THD obliczone dla wartości skutecznej całego przebiegu, zgodnie z zależnością (7), dla dwóch mocy zwarciovych: 500 kVA i 20 MVA.

W badanym zakresie odchylenie rezystancji ma znikomy wpływ na wartość THD w porównaniu z odchyleniem indukcyjności (maksymalna bezwzględna odchyłka współczynnika THD , spowodowana odchyleniem rezystancji przy stałej indukcyjności wynosi 0,05%).

Dla rezystancji i indukcyjności dławika równych wartościom zaimplementowanym w modelu ($R^{dt}/R = 1$; $L^{dt}/L = 1$), wartości współczynnika THD są bliskie minimum przy obu wartościach mocy zwarciowej sieci i wynoszą kolejno 4,19 i 4,55%. Minimum THD znajduje się w pobliżu tego punktu (dla $L^{dt}/L = 1,05$ przy obu mocach zwarciovych sieci) i wynosi kolejno 4,16 i 4,53%. Zwiększanie odchylenia indukcyjności w którąkolwiek stronę skutkuje wzrostem współczynnika THD . Wynika to z faktu, że napięcie u^* , generowane zgodnie z zależnością (6), opatrzone jest błędem niedokładnych wartości R i L . Z tych samych powodów można zaobserwować większe wartości THD prądu sieci dla większych mocy

zwarciovych (czyli dla mniejszej impedancji sieci), toteż przy zaniżonych indukcyjnościach THD rośnie gwałtowniej (rys. 7 a i b).

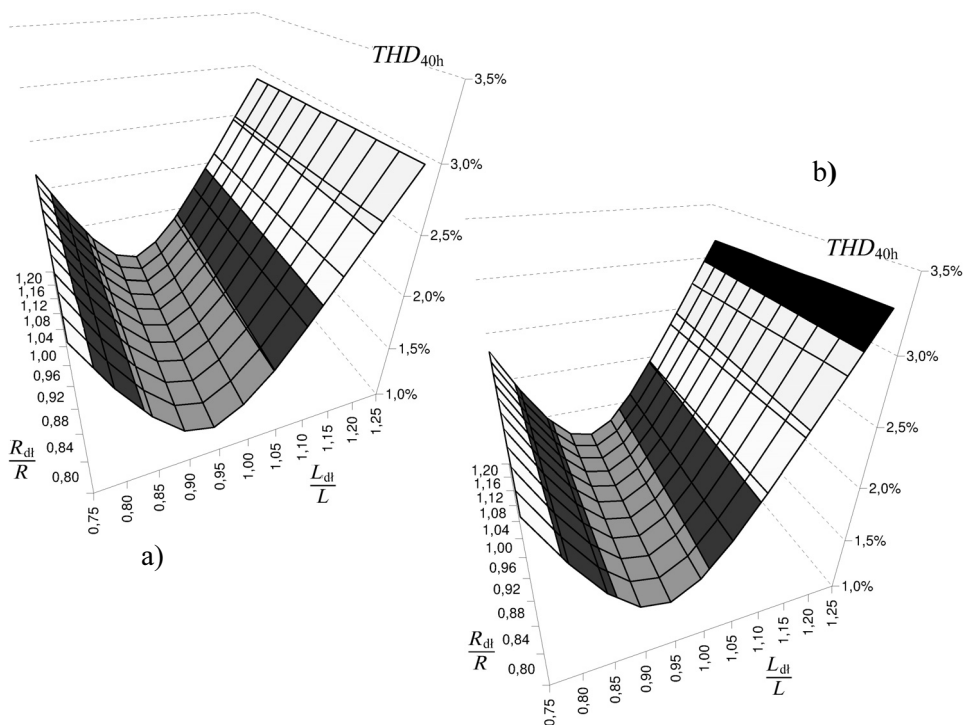


Rys. 7. Wartości współczynnika THD_F prądu sieci w funkcji względnej indukcyjności i rezystancji dławika sprzęgającego:
a) dla mocy zwarciowej sieci 500 kVA,
b) dla mocy zwarciowej sieci 20 MVA

Fig. 7. THD_F factor of the current network as a function of the coupled inductor's relative inductance and resistance:
a) for network's short circuit power equal 500 kVA,
b) for network's short circuit power equal 20 MVA

Obliczając współczynnik zawartości harmonicznych THD zgodnie z zależnością (10), czyli do czterdziestej harmonicznej, otrzymuje się zależności zilustrowane na rysunku 8. Ponieważ te wyniki nie uwzględniają składowych harmonicznych prądu, powstałych wskutek przełączania tranzystorów falownika z wysoką częstotliwością, obie płaszczyzny wykresów leżą dużo „niżej”, niż na rysunku 7. Jednak podobnie jak w poprzednim przypadku, dla wartości indukcyjności i rezystancji dławika równych wartościom R i L zaimplementowanym w modelu, współczynnik THD osiąga wartości bliskie minimum (1,21 i 1,39%). Minimum, podobnie jak powyżej, również leży w pobliżu punktu odpowiadającego wartościom parametrów dławika zaimplementowanych w modelu (dla $L_{dl}/L = 0,95$ przy każdej z dwóch mocy zwarciovych sieci), wynosząc kolejno 1,05% i 1,25%. Odchylenie

rezystancji w badanym zakresie ma również znikomy wpływ na wartość współczynnika THD , powodując maksymalną bezwzględną odchyłkę 0,07%.



Rys. 8. Wartości współczynnika THD_{40h} prądu sieci w funkcji względnej indukcyjności i rezystancji dławika sprzęgającego:
a) dla mocy zwarciowej sieci 500 kVA,
b) dla mocy zwarciowej sieci 20 MVA

Fig. 8. THD_{40h} factor of the current network as a function of the coupled inductor's relative inductance and resistance:
a) for short circuit power equal 500 kVA,
b) for short circuit power equal 20 MVA

4. WRAŻLIWOŚĆ FILTRA AKTYWNEGO W FUNKCJI ZMIAN PARAMETRÓW ELEKTRYCZNYCH DŁAWIKA SPRZĘGAJĄCEGO

Wrażliwość (czułość) jest zależnością określającą zmiany wartości pewnej wielkości Y pod wpływem zmian innej wielkości X . Można ją ogólnie opisać następująco:

$$S(Y) = \left| \frac{dY}{dX} \right| \quad (12)$$

W przypadku, gdy rozpatrywana wielkość jest funkcją wielu zmiennych, to całkowita wrażliwość jest równa geometrycznej sumie wrażliwości względem każdej zmiennej z osobna [16]:

$$S(Y) = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial X_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_N}\right)^2} \quad (13)$$

lub inaczej

$$S(Y) = \sqrt{\sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial Y}{\partial X_n}\right)^2} \quad (14)$$

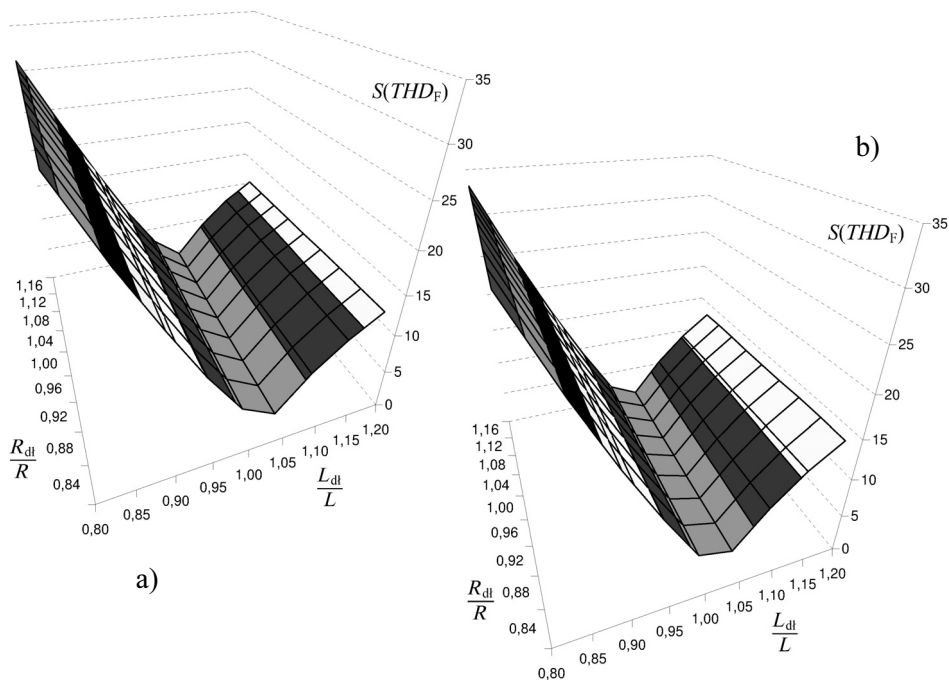
Odnosząc powyższe do współczynnika THD jako funkcji względnych wartości indukcyjności i rezystancji dławika, otrzymuje się zależność:

$$S(THD) = \sqrt{\left(\frac{\partial THD}{\partial \left(\frac{L_{dl}}{L}\right)}\right)^2 + \left(\frac{\partial THD}{\partial \left(\frac{R_{dl}}{R}\right)}\right)^2} \quad (15)$$

W niniejszym artykule wrażliwość filtra aktywnego jest oceniana przez wrażliwość współczynników THD_F oraz THD_{40h} prądu sieci.

Rysunek 9 przedstawia wykres wrażliwości współczynnika THD_F dla obu rozważanych mocy zwarciovych. Ponieważ wpływ odchylenia rezystancji dławika sprzęgającego na współczynnik zawartości harmonicznych jest znikomy, to wrażliwość S-APF również praktycznie nie zależy od tej rezystancji (w rozpatrywanym zakresie jej zmian). Znacznie większy jest wpływ indukcyjności dławika i jej odchylenie od wartości zaimplementowanej w modelu. Badany S-APF w rozpatrywanych warunkach wykazywał najmniejszą wrażliwość dla względnej wartości indukcyjności $L_{dl}/L = 1,05$. Wynosiła ona 1,11 i 2,13 (przy mocy zwarciowej sieci kolejno 500 kVA i 20 MVA). Oddalanie się od tego punktu skutkowało wzrostem wrażliwości filtra.

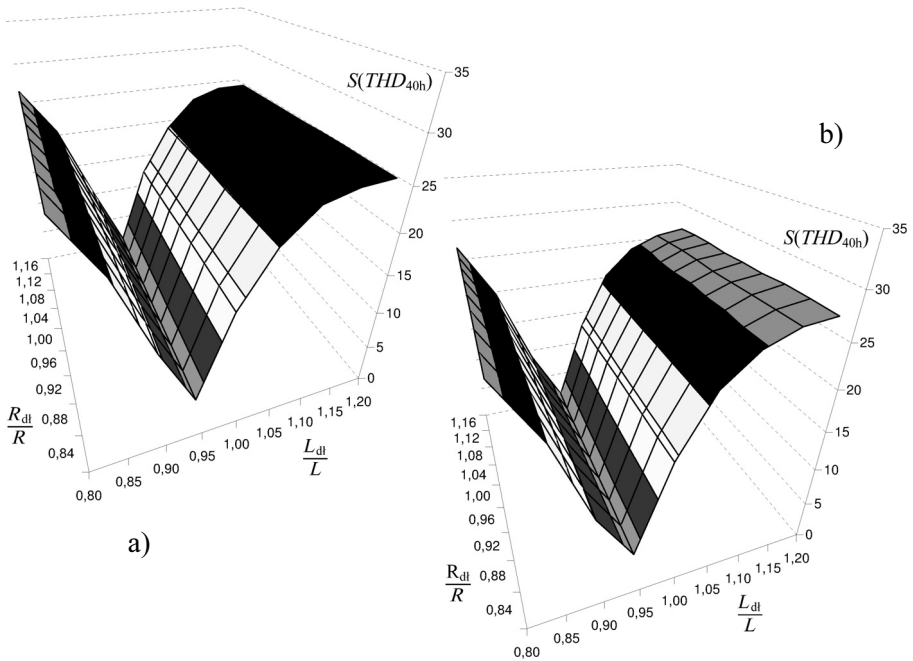
Wrażliwość wyznaczono również dla współczynnika THD_{40h} (rys. 10), dzięki czemu uniezależniono tę wielkość od częstotliwości łączy. Tak wyznaczona funkcja czułości wykazuje podobne cechy jak w poprzednim przypadku; wpływ rezystancji jest znikomy, a jej minimum również leży w pobliżu wartości R i L zaimplementowanych w modelu (dla $L_{dl}/L = 0,95$ wrażliwość wyniosła kolejno 2,40 i 2,71 dla mocy zwarciowej kolejno 500 kVA i 20 MVA). Daje się jednak zauważyć dużo większą stromość charakterystyk czułości wokół tego punktu niż w poprzednio rozważanym przypadku. Pozwala to wyciągnąć wniosek, że wskutek niedokładnego odwzorowania rzeczywistych wartości rezystancji R i indukcyjności L dławika sprzęgającego w równaniu (6) pogarsza się jakość kompensacji, w czym większy udział mają harmoniczne niższego rzędu (poniżej czterdziestej).



Rys. 9. Wrażliwość współczynnika THD_F prądu sieci:
 a) dla mocy zwarciowej sieci 500 kVA,
 b) dla mocy zwarciowej sieci 20 MVA

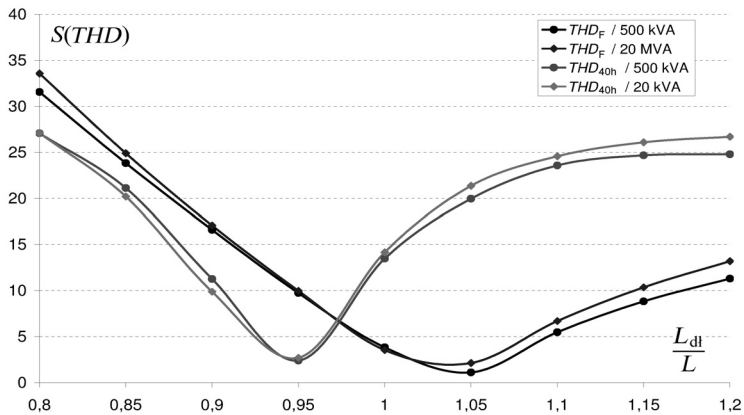
Fig. 9. Sensitivity of the current network's THD_F factor:
 a) for short circuit power equal 500 kVA,
 b) for short circuit power equal 20 MVA

Przecinając wykresy wrażliwości z rysunków 9 i 10 płaszczyzną $R_{dl}/R = 1$, otrzymuje się charakterystyki czułości współczynników THD_F i THD_{40h} w funkcji zmian indukcyjności dławika L_{dl}/L dla stałej rezystancji. Zestawienie tak otrzymanych charakterystyk, przedstawione na rysunku 11, ilustruje wpływ impedancji sieci na wrażliwość filtra aktywnego. Ten rysunek pozwala również ocenić wpływ pierwszych czterdziestu harmoniczných na funkcję wrażliwości.



Rys. 10. Wrażliwość współczynnika THD_{40h} prądu sieci:
 a) dla mocy zwarciowej sieci 500 kVA,
 b) dla mocy zwarciowej sieci 20 MVA

Fig. 10. Sensitivity of the current network's THD_{40h} factor:
 a) for short circuit power equal 500 kVA,
 b) for short circuit power equal 20 MVA



Rys. 11. Wrażliwość współczynników THD_F i THD_{40h} prądu sieci w funkcji względnych wartości indukcyjności dławika sprzęgającego L_{dl}/L , dla stałej wartości $R_{dl}/R = 1$ i różnych mocy zwarciowych sieci zasilającej

Fig. 11. Sensitivity of the current network's THD_F and THD_{40h} factors as a function of the coupled inductor's relative inductance L_{dl}/L for constant relative resistance $R_{dl}/R = 1$ and various network's short circuit power values

PODSUMOWANIE

Badany układ S-APF wykazał wyraźną wrażliwość na odchylenie wartości indukcyjności dławika sprzęgającego (w rozpatrywanym zakresie) od wartości zaimplementowanej w algorytmie sterującym. Z kolei wrażliwość na odchylenie rezystancji dławika w tym samym zakresie (0,8–1,2) okazała się znikoma, pomimo zawyżenia wartości rezystancji w stosunku do wartości występujących w rzeczywistości (dobroć dławika dla podstawowej harmonicznej wynosiła zaledwie 1,57).

Ponieważ wzrost odchylenia indukcyjności w dowolną stronę jednoznacznie powoduje pogorszenie się jakości filtracji (wzrost współczynnika zawartości harmonicznych prądu sieci), opracowywana jest implementacja w algorytmie sterowania funkcji „*autotuning on-line*” wartości R i L występujących w równaniu (5). Takie rozwiązanie umożliwi samoczynne zminimalizowanie problemów związanych ze zmianą parametrów dławika sprzęgającego, oraz uprości dostrajanie układu sterowania.

Zestawiając wyniki badań pozyskane z zastosowaniem analizy tylko pierwszych czterdziestu harmonicznych z wynikami otrzymanymi z analizy pełnego widma prądu sieci, da się dostrzec pewien wpływ składowych powstałych wskutek przełączania kluczy falownika PWM nie tylko na zawartość harmonicznych prądu sieci, ale i na czułość filtra aktywnego. Jednak harmoniczne rzędu do czterdziestu wykazują zdecydowanie większy wpływ na wrażliwość filtra. W praktyce wyższe harmoniczne generowane modulacją PWM odfiltrowuje się pasywnym filtrem LC zestrojonym na częstotliwość przełączania tranzystorów falownika.

Stosowany predykcyjny algorytm sterowania układem S-APF został opracowany przez autora na podstawie materiałów zawartych w cytowanych publikacjach. Program realizujący algorytm został napisany w języku C++ i przystosowany do implementacji praktycznej w sterowniku DSP. Aktualnie, w celu poprawy właściwości algorytmu trwają także autorskie prace nad implementacją metody wyznaczania wzorcowego napięcia falownika układu S-APF, o zwiększonej dokładności i zmniejszonej wrażliwości.

Badania zrealizowano w ramach projektu NCN Nr N N510216038.

LITERATURA

1. Adrianowski T., Buła D., Dębowski K., Maciążek M., Pasko M., *Analiza wybranych właściwości energetycznych filtrów aktywnych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
2. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M., *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*, IEEE Press Series on Power Engineering, 2007.
3. Chen T-P., Lai Y-S. Liu Ch-H., *A new space vector modulation technique for inverter control*, IEEE, 1999.

4. Cieślík S., *Przylączenie jednostek wytwórczych do elektroenergetycznej linii średniego napięcia jako zagadnienie optymalizacyjne*, Rynek Energii, 2011, nr 1(92) s. 15–21.
5. Cieślík S., *Przylączenie farmy wiatrowej o mocy znamionowej 8 MW do szyn rozdzielni SN w stacji elektroenergetycznej WN/SN zasilającej elektroenergetyczną sieć dystrybucyjną*, Przegląd Elektrotechniczny, 86, 2010, nr 6, s. 104–109.
6. Czarnecki L.S., *Moce w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
7. Hanzelka Z., Bień A., *Interharmonics. Power quality application guide*, Leonardo Power Quality Initiative, www.lpqi.org.
8. Moreno-Muñoz A., *Power Quality: Mitigation Technologies in a Distributed Environment*, Springer-Verlag, London 2007.
9. Moynihan J.F., Egan M.G., Murphy J.M.D., *Theoretical spectra of space-vector-modulated waveforms*, IEEE, 1998.
10. Piróg S., *Energoelektronika. Układy o komutacji sieciowej i o komutacji twardej*, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2006.
11. *PN-EN 50160: Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych*, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 1998.
12. *Poradnik inżyniera elektryka*, tom 2, wyd. 2, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
13. Strzelecki R., Supronowicz H., *Filtracja harmonicznych w sieciach zasilających prądu przemiennego*, Wydawnictwo Adam Marszałek, Toruń 1999.
14. Strzelecki R., Wojciechowski D., *Układ sterowania równoległym filtrem aktywnym (APF)*, Przegląd Elektrotechniczny, 2008, nr 11, Warszawa 2008.
15. Wojciechowski D., Strzelecki R., Bałkowski B., *Równoległy filtr aktywny sterowany predykcji- nie*, Prace Instytutu Elektrotechniki 2007, Instytut Elektrotechniki Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007.
16. *Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik*, Główny Urząd Miar i Wag, Warszawa 1999.

THE INFLUENCE OF TOLERANCE OF THE COUPLING CHOKE'S ELECTRIC PARAMETERS ON SHUNT ACTIVE POWER FILTER'S

Summary

The article shows the influence of resistance and inductance of a choke connecting a shunt active power filter with a network on the filter's sensitivity and accuracy of harmonics' compensations. The research has been conducted for two different network's short-circuit powers. The simulation experiments have been done for a typical three-phase filter connected to the low-voltage network (400 V, 50 Hz), controlled with the use of predictive, vector algorithm.

Keywords: *sensitivity, shunt active power filters, power conditioning, power quality improvement, active power factor correction, predictive control, harmonics.*