

Charakterystyki częstotliwościowe filtrów wyższych harmonicznych współpracujących z napędem prądu stałego

J. Varecki, Z. Hanzelka, J. Tenerowicz

Napędy prądu stałego (DC) stanowią znaczące obciążenia w sieciach zasilających w wielu gałęziach przemysłu. Są nadal powszechnie stosowanym sposobem precyzyjnej regulacji silników w warunkach szerokich zmian prędkości przy dużych momentach elektromagnetycznych.

Praca tych napędów związana jest ze znaczącym poborem mocy biernej, zwłaszcza przy niskich prędkościach silników. Jej kompensacja jest ważnym elementem poprawy techniczno-ekonomicznych charakterystyk całego systemu.

Napędy te są źródłem prądów wyższych harmonicznych. Jest to czynnik, który znacząco utrudnia kompensację mocy biernej. W takich przypadkach powszechnie stosowane baterie kondensatorów stwarzają często warunki powstania rezonansów harmonicznych, co prowadzi w konsekwencji do istotnego wzrostu poziomu odkształcenia napięcia w sieci. Filtry wyższych harmonicznych są skutecznym sposobem rozwiązania tego problemu, lecz ich sumaryczna moc zapotrzebowana jest często duża, a zmiana stanów pracy całego systemu zasilania wymaga niekiedy ich wyłączeń/załączeń.

W artykule na przykładzie praktycznej, istniejącej instalacji przeprowadzono analizę charakterystyk częstotliwościowych systemu kompensacji mocy biernej w sieci zasilającej napędy prądu stałego oraz wskazano na możliwe problemy eksploatacyjne.

Badany układ

Rysunek 1 przedstawia jednofazowy schemat analizowanego układu sieciowego zawierającego dwa duże napędy prądu stałego, będące źródłami wyższych harmonicznych, przyłączone do sekcji A i B. Napędy zasilane są przez 6-pulsowe prostowniki tyrystorowe sterowane fazowo. W efekcie znaczącego odkształcenia prądów napędu odkształceniu podlega napięcie zasilające oraz współczynnik mocy instalacji, który bez układów kompensacji ma małą wartość.

Baterie kondensatorów o mocy $2 \times 1,5$ MVar przyłączone do sekcji 1 i 2 częściowo poprawiają wartość współczynnika mocy, lecz mogą także powodować problemy związane z rezonansowym wzmocnieniem harmonicznych. Cztery filtry, każdy dostrójony do pojedynczej harmonicznej – 5., 7., 11. i 13. – zostały przyłączone do sekcji A i B w celu ograniczenia odkształcenia napięcia i poprawy współczynnika mocy. Dane techniczne filtrów podano w tabeli 1. Sekcje A i B mogą być zasilone z głównych szyn 1 lub 2.

Streszczenie: Celem artykułu jest prezentacja przykładowej sieci przemysłowej zawierającej jednogalęziowe filtry przeznaczone do redukcji zawartości wyższych harmonicznych i kompensacji mocy biernej. Jako podstawę analizy wykorzystano istniejącą instalację, w której wystąpiły problemy eksploatacyjne związane ze wzmocnieniami harmonicznych. Wykonano pomiary i przeprowadzono symulacje w celu szczegółowej analizy problemu.

Słowa kluczowe: wyższe harmoniczne, filtry pasywne, rezonans.

🇬🇧 FILTER CHARACTERISTICS IN DC DRIVE POWER SYSTEM

Abstract: The objective of this paper is to present performance peculiarities of industrial power systems using single-tuned filters for limiting harmonics and improving reactive compensation. An industrial plant with existing harmonic problems was selected to investigation. Measurements were performed to characterize the harmonic generation of the load. Computer software was used for investigation of the filter harmonic problems.

Key words: high harmonics, passive filters, resonance.

Dopuszczalne współczynniki przeciążenia prądowego oraz napięciowego kondensatorów (w relacji do wartości skutecznych znamionowych) wynoszą odpowiednio 130% i 110%.

Zastosowane w układzie dławiki rdzeniowe zajmują mniejszą przestrzeń w porównaniu z ich powietrznymi odpowiednikami o takiej samej wartości indukcyjności. Zastosowanie rdzeni trójfazowych redukuje wymiary, ciężar, straty mocy czynnej i koszty w porównaniu do układu trzech jednofazowych dławików o tej samej mocy sumarycznej. W celu zagwarantowania małej tolerancji częstotliwości dostrojenia filtrów dławiki są produkowane z walcowanych na zimno laminowanych blach transformatorowych ze szczelinami powietrznymi. Ich podstawową wadą jest zjawisko nasycania rdzenia, którego poziom zależy od wartości przewodzonego prądu podstawowej i wyższych harmonicznych. Brak norm określających zasady wymiarowania dławików stosowanych w filtrach pasywnych utrudnia ocenę dławików oferowanych przez różnych producentów. Przykładowo: dla części z nich podstawą projektowania – wyboru przekroju poprzecznego rdzenia – jest wartość skuteczna strumienia, podczas gdy dla innych wartość szczytowa otrzymywana na podstawie arytmetycznego sumowania strumie-

Tabela 1. Dane filtrów
Table 1. Filter specifications

Filtr, rząd częstotliwości dostrojenia	Bateria kondensatorów			Dławiki (trójfazowe, rdzeniowe)		
	Moc			Napięcie znamionowe		
F5 $n_5 = 4,81$	Moc	2 × 500	kVAr	Napięcie znamionowe	7,2	kV
	Napięcie znamionowe	6,6	kV	Prąd znamionowy	120,0	A
	Prąd znamionowy	87,4	A	Prąd zwarcia	14,0	kA
	Pojemność	73,1	μF	Indukcyjność	6,0	mH
	Tolerancja pojemności	-5 ... +10	%	Tolerancja indukcyjności	±5	%
F7 $n_7 = 6,98$	Moc	2 × 400	kVAr	Napięcie znamionowe	7,2	kV
	Napięcie znamionowe	6,6	kV	Prąd znamionowy	100,0	A
	Prąd znamionowy	70,0	A	Prąd zwarcia	14,0	kA
	Pojemność	58,4	μF	Indukcyjność	3,54	mH
	Tolerancja pojemności	-5 ... +10	%	Tolerancja indukcyjności	± 5	%
F11 $n_{11} = 10,94$	Moc	2 × 500	kVAr	Napięcie znamionowe	7,2	kV
	Napięcie znamionowe	6,6	kV	Prąd znamionowy	130,0	A
	Prąd znamionowy	87,4	A	Prąd zwarcia	14,0	kA
	Pojemność	73,1	μF	Indukcyjność	1,16	mH
	Tolerancja pojemności	-5 ... +10	%	Tolerancja indukcyjności	±5	%
F13 $n_{13} = 13,02$	Moc	2 × 500	kVAr	Napięcie znamionowe	7,2	kV
	Napięcie znamionowe	6,6	kV	Prąd znamionowy	130,0	A
	Prąd znamionowy	87,4	A	Prąd zwarcia	14,0	kA
	Pojemność	73,1	μF	Indukcyjność	0,82	mH
	Tolerancja pojemności	-5 ... +10	%	Tolerancja indukcyjności	±5	%

ni poszczególnych harmonicznym prądu. Ma to zasadniczy wpływ na charakterystyki filtrów, w skład których wchodzi dławiki.

Dla celów oceny, jako podstawowe kryteria oceny wykorzystania rdzenia, przyjęto ciężar dławika i przyrost temperatury pracy. Dodatkowym wskaźnikiem może być także zależność dodatkowych strat mocy w uzwojeniu w funkcji częstotliwości.

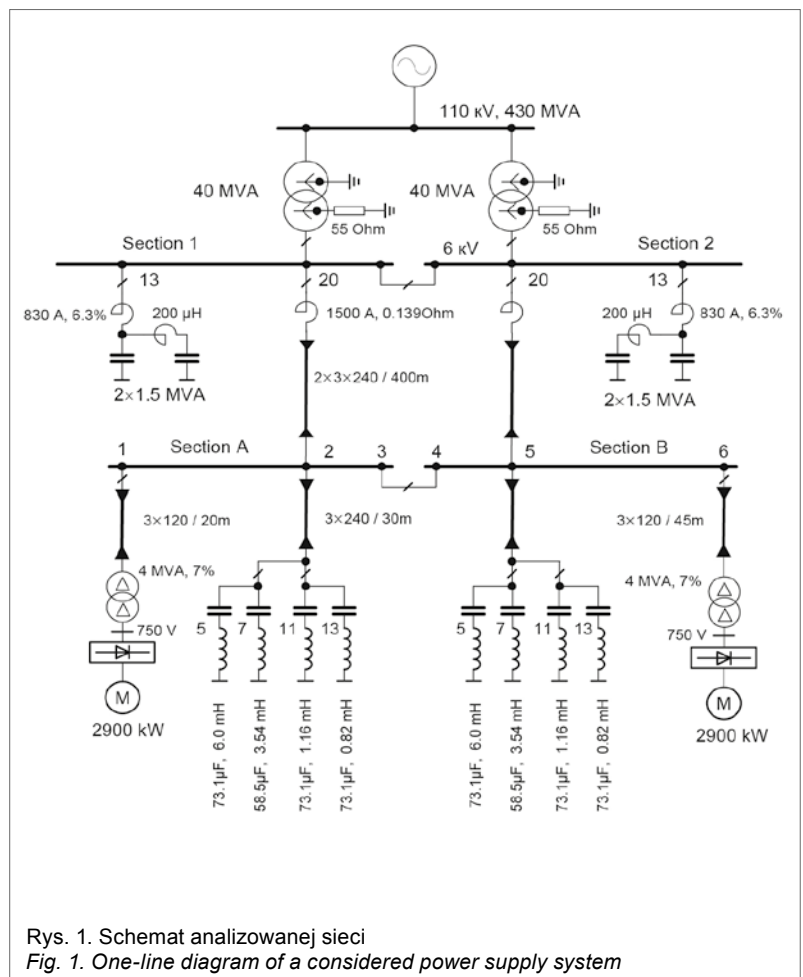
Rząd częstotliwości dostrojenia n_r jednofazowego filtra pasywnego określa zależność:

$$n_r = \frac{1}{2\pi f \sqrt{LC}} \quad (1)$$

gdzie:

- f – częstotliwość system zasilającego;
- L, C – indukcyjność i pojemność elementów filtru. Jakakolwiek zmiana parametrów filtru (L, C) powoduje jego rozstrojenie w relacji do przyjętego w projekcie rzędu częstotliwości dostrojenia n_d (w rozważanym przypadku $d = 5, 7, 11, 13$). Rząd częstotliwości dostrojenia filtru zawarty jest w przedziale określonym zależnością (2):

$$\frac{n_d}{(1 + \Delta f_n) \sqrt{(1 + \Delta L_n)(1 + \Delta C_n)}} \leq n_r \leq \frac{n_d}{(1 - \Delta f_n) \sqrt{(1 - \Delta L_n)(1 - \Delta C_n)}} \quad (2)$$



Rys. 1. Schemat analizowanej sieci
Fig. 1. One-line diagram of a considered power supply system

gdzie:

Δf_* – względna zmiana częstotliwości systemu zasilającego;
 ΔL_* , ΔC_* – względne zmiany indukcyjności i pojemności elementów filtru. Przyjmując $\Delta f_* \approx 0$ oraz na podstawie danych z tabeli 1 tolerancje wartości ΔL_* , ΔC_* , możliwe różnice rzędu rzeczywistej częstotliwości dostrojenia filtrów n_r w relacji do wartości projektowej n_d zawarte są w przedziale:

$$0.93n_d \leq n_r \leq 1.05n_d \quad (3)$$

To oznacza, że w rozważanym przykładzie rzędy częstotliwości rezonansowych filtrów będą zawarte w następujących przedziałach:

$$\begin{aligned} \text{filtr 5. harmoniczej} &- 4,3 \leq n_r \leq 5,1 \\ \text{filtr 7. harmoniczej} &- 6,5 \leq n_r \leq 7,4 \\ \text{filtr 11. harmoniczej} &- 10,2 \leq n_r \leq 11,5 \\ \text{filtr 13. harmoniczej} &- 12,1 \leq n_r \leq 13,7 \end{aligned} \quad (4)$$

Jest oczywiste, że poziom „czułości” filtru na zmiany pojemności i indukcyjności jego elementów składowych, mierzony zmianą częstości rezonansowej, rośnie wraz ze wzrostem rzędu jego częstotliwości dostrojenia, co wynika wprost z zależności (5):

$$\Delta \omega_r \approx \frac{d \omega_r}{d C} \Delta C = -\frac{\omega_r}{2C} \Delta C \quad (5)$$

Analiza charakterystyk częstotliwościowych filtrów

W celu przedstawienia warunków pracy filtrów we wszystkich możliwych konfiguracjach rozważanej sieci przemysłowej przeprowadzono badania w dziedzinie częstotliwości i czasu z wykorzystaniem specjalistycznego środowiska symulacyjnego. Dla uzyskania wiarygodnych danych wejściowych do symulacji przeprowadzono pomiary w rzeczywistym obiekcie. Rysunek 2 przedstawia przykładowe rejestracje prądu fazowego oraz jego widmo dla napędu DC zasilonego z wydzielonej sekcji A, do której przyłączony jest filtr 5. harmoniczej.

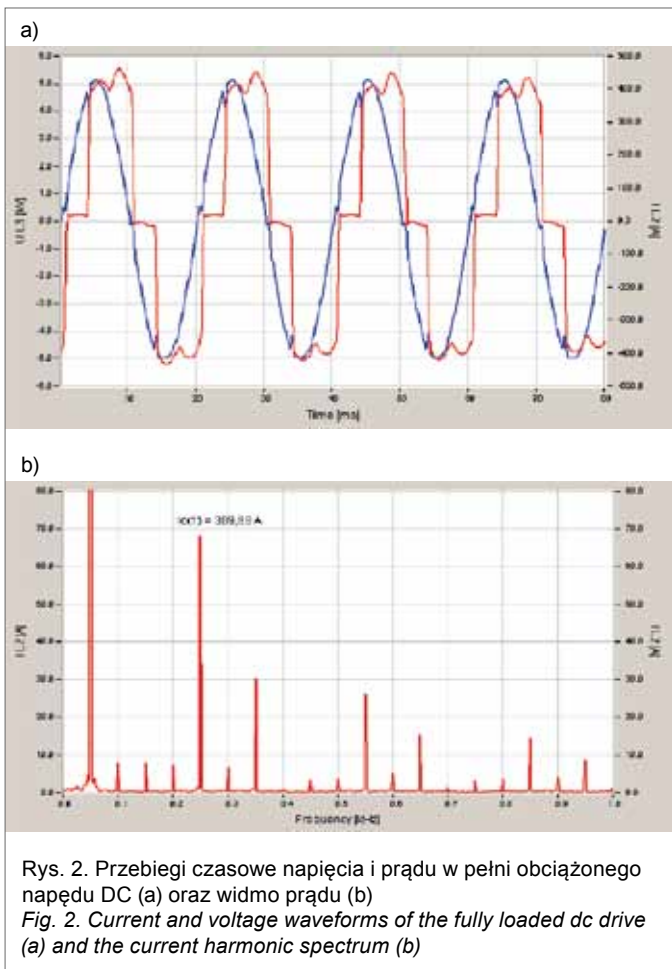
Harmoniczne prądu w poszczególnych elementach systemu przedstawiono w tabeli 2. Z pomiarów wynika kilka ważnych wniosków: (1) w układzie występują harmoniczne niecharakterystyczne, których obecność jest między innymi efektem niejednakowych czasów przewodzenia poszczególnych elementów półprzewodnikowych przekształtników oraz niesymetrii i niesinusoidalności napięć zasilających; (2) w systemie zawierającym filtr 5. harmoniczej występują warunki rezonansowe w pobliżu 4. harmoniczej. Analogiczne pomiary przeprowadzono dla wszystkich możliwych konfiguracji układu filtracyjnego i układu zasilania napędów.

W rozważanym przypadku zasadnicze znaczenie ma analiza charakterystyk częstotliwościowych impedancji zastępczej systemu widzianej z zacisków źródła harmonicznego – w tym przypadku z zacisków przekształtników AC/DC. Charakterystyki te decydują bowiem o warunkach pracy wszystkich elementów systemu.

Dla potrzeb analizy napęd DC został potraktowany jako idealne źródło harmonicznego prądu. Założenie to jest uzasadnione

Tabela 2. Harmoniczne prądu dla systemu zawierającego filtr 5. harmoniczej
 Table 2. Harmonic currents for the system consisting of 5-th harmonic filter

Rząd harmoniczej	Prąd linii zasilającej I_s		Prąd napędu I_D		Prąd filtru 5. harmoniczej I_{F5}	
	A	%	A	%	A	%
1	241,49	100,0	309,68	100,0	157,87	100,0
2	8,49	3,5	8,04	2,6	0,61	0,4
3	9,75	4,0	8,03	2,6	1,77	1,1
4	41,62	17,2	7,51	2,4	39	24,7
5	27,02	11,2	68,09	22,0	42,54	26,9
6	4,31	1,8	6,75	2,2	2,42	1,5
7	25,43	10,5	30,21	9,8	5,28	3,3
8	0,74	0,3	0,85	0,3	0,28	0,2
9	2,81	1,2	3,36	1,1	0,57	0,4
10	2,92	1,2	3,49	1,1	0,57	0,4
11	22,09	9,1	26,36	8,5	4,33	2,7
12	4,16	1,7	5,04	1,6	0,89	0,6
13	12,7	5,3	15,43	5,0	2,77	1,8
14	1,21	0,5	1,49	0,5	0,27	0,2
15	2,79	1,2	3,37	1,1	0,59	0,4
16	2,84	1,2	3,41	1,1	0,59	0,4
17	12,14	5,0	14,57	4,7	2,48	1,6
18	3,52	1,5	4,28	1,4	0,73	0,5
19	7,35	3,0	8,74	2,8	1,38	0,9
20	0,97	0,4	1,14	0,4	0,18	0,1



Rys. 2. Przebiegi czasowe napięcia i prądu w pełni obciążonego napędu DC (a) oraz widmo prądu (b)
 Fig. 2. Current and voltage waveforms of the fully loaded dc drive (a) and the current harmonic spectrum (b)

dużą wartością mocy zwarciowej systemu w miejscu jego przyłączenia i wynikającą stąd słabą zależnością przebiegu czasowego prądu napędu od poziomu odkształcenia napięcia. Założenie to umożliwia analizę impedancyjnych charakterystyk częstotliwościowych systemu niezależnie od charakterystyk napędu DC.

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe charakterystyki częstotliwościowe impedancji widzianej z sekcji A dla różnych

kombinacji filtrów, wykorzystywane do analizy poziomu obciążenia prądowego filtru 5. harmonicznej. Najgorszy przypadek obciążenia występuje, gdy wartości indukcyjności i pojemności filtru 5. harmonicznej osiągają górny poziom tolerancji (zależność (3)). Bliskość częstotliwości rezonansowych 4. i 5. jest przyczyną znaczącego wzmocnienia prądów w filtrze F5 i w linii zasilającej.

Wzmocnienie harmonicznej prądu w obwodzie filtru może być opisane współczynnikiem:

$$\beta_{Fn} = \frac{|I_{Fn}|}{|I_{Dn}|} = \frac{|Z_n|}{|Z_{Fn}|} \quad (6)$$

i podobnie w linii zasilającej:

$$\beta_{Sn} = \frac{|I_{Sn}|}{|I_{Dn}|} = \frac{|Z_n|}{|Z_{Sn}|} \quad (7)$$

gdzie:

- I_{Dn} , I_{Sn} , I_{Fn} – prąd n . harmonicznej odpowiednio źródła harmonicznych, linii zasilającej i filtru;
- Z_n , Z_{Sn} , Z_{Fn} – impedancja dla n . harmonicznej odpowiednio systemu, linii zasilającej i filtru w punkcie wspólnego przyłączenia (PWP).

Współczynnik wzmocnienia harmonicznego pozwala oszacować wartość harmonicznej prądu w linii zasilającej i w filtrze dla wielu różnych konfiguracji rozważanej sieci. Jego wartość mniejsza niż 1,0 oznacza, że tylko część prądu źródła płynie przez dany element.

Wyliczone wartości współczynników wzmocnień dla oceny poziomu obciążenia filtru 5. harmonicznej w różnych konfiguracjach sieci i filtrów przedstawiono w tabeli 3. Kolumna „górny poziom tolerancji” z baterią kondensatorów $2 \times 1,5$ MVA odpowiada charakterystykom na rysunku 3. Można zauważyć znaczące wzmocnienie dla 4. i 5. harmonicznej w filtrze i linii zasilającej w przypadku przyłączenia baterii $2 \times 1,5$ MVA. Może to spowodować przeciążenie filtru i wzrost poziomu odkształcenia napięcia ponad wartość dopuszczalną. Dla dolnego poziomu

mu tolerancji parametrów filtru współczynniki wzmocnienia harmonicznego mają znacząco mniejsze wartości. Odłączenie baterii $2 \times 1,5$ MVar redukuje wzmocnienie 5. harmonicznej do akceptowalnego poziomu, lecz wzmocnieniu podlega 4. harmoniczna ze względu na bliskość częstotliwości rezonansowej.

Wartości współczynników wzmocnienia harmonicznych prądu w obwodach filtrów dla różnej ich konfiguracji przedstawiono w tabeli 4. Z danych wynika, że obciążenie harmoniczne fil-

trów w układzie bez baterii kondensatorów $2 \times 1,5$ MVar zależy od sposobu ich połączenia oraz poziomu odstrojenia. Wiadomo, że impedancja filtru szeregowego LC ma najmniejszą wartość dla częstotliwości rezonansowej. Poniżej tej częstotliwości obwód filtru ma charakter pojemnościowy, a powyżej indukcyjny. Jeżeli filtr jest lekko „niedostrojony” do pożądanej częstotliwości harmonicznej, prąd przez niego płynący ma mniejszą wartość, ponieważ prąd źródła rozważanej harmonicznej rozdziela

Tabela 3. Współczynniki wzmocnienia 5. harmonicznej prądu β
Table 3. 5. harmonic current magnification factors β

Konfiguracja systemu	Górne poziomy tolerancji				Dolne poziomy tolerancji			
	Filtr 5. h		Linia zasilająca		Filtr 5. h		Linia zasilająca	
Z kond. $2 \times 1,5$ MVar	β_{F4}	β_{F5}	β_{S4}	β_{S5}	β_{F4}	β_{F5}	β_{S4}	β_{S5}
F5	4,2	0,8	9,3	1,7	0,5	1,1	2,6	0,4
F5+F7	14,4	1,4	32,2	2,8	0,6	1,0	3,3	0,4
F5+F7+F11	4,8	2,8	10,2	5,5	0,8	0,9	4,5	0,4
F5+F7+F11+F13	2,4	18,6	5,2	36,7	1,4	0,8	7,4	0,3
Bez kond. $2 \times 1,5$ MVar								
F5	0,8	0,3	1,9	0,7	0,2	1,6	1,3	0,6
F5+F7	1,1	0,4	2,4	0,8	0,3	1,5	1,4	0,6
F5+F7+F11	1,5	0,5	3,2	1,0	0,3	1,4	1,6	0,5
F5+F7+F11+F13	2,1	0,6	4,5	1,1	0,3	1,3	1,8	0,5

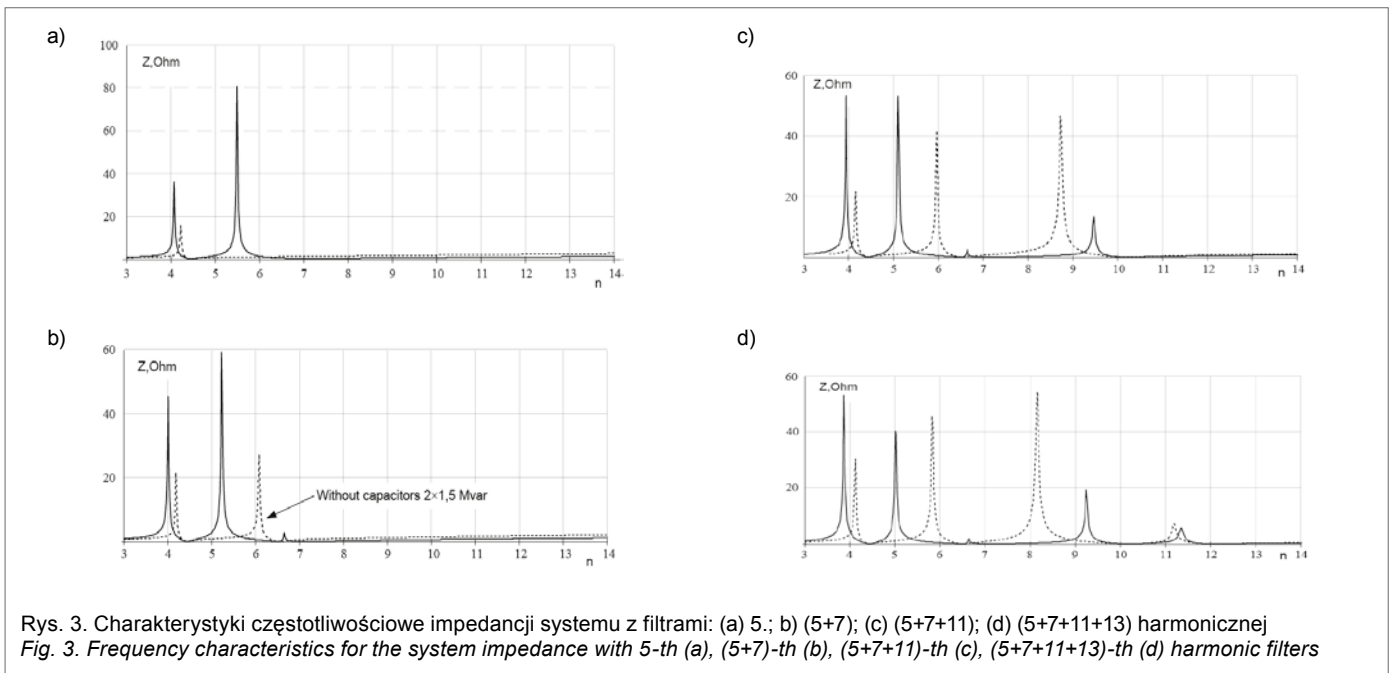
Tabela 4. Współczynniki wzmocnienia harmonicznej prądu β_{Fn} w układzie filtrów
Table 4. Harmonic current magnification factors β_{Fn} in the filter circuits

Konfiguracja systemu	Przedziały zmian							
	Filtr 5. h		Filtr 7. h		Filtr 11. h		Filtr 13. h	
Z kond. $2 \times 1,5$ MVar	Up	Lo	Up	Lo	Up	Lo	Up	Lo
F5	0,8	1,1	–	–	–	–	–	–
F5+F7	1,4	1,0	0,1	0,1	–	–	–	–
F5+F7+F11	2,8	0,9	0,1	0,1	0,6	1,9	–	–
F5+F7+F11+F13	18,6	0,8	0,1	0,1	1,3	1,3	0,6	3,2
Bez kond. $2 \times 1,5$ MVar								
F5	0,3	1,6	–	–	–	–	–	–
F5+F7	0,4	1,5	0,5	3,0	–	–	–	–
F5+F7+F11	0,5	1,4	0,7	1,9	0,7	1,3	–	–
F5+F7+F11+F13	0,6	1,3	0,8	1,5	2,5	1,0	0,7	2,1

Tabela 5. Współczynniki wzmocnienia harmonicznej prądu β_{Fn} w układzie filtrów (praca równoległa)
Table 5. Harmonic current magnification factors β_{Fn} in the filter circuits (parallel operation)

Konfiguracja systemu	Przedziały zmian							
	Filtry 5. h		Filtry 7. h		Filtry 11. h		Filtry 13. h	
Z kond. $2 \times 1,5$ MVar	Up	Lo	Up	Lo	Up	Lo	Up	Lo
$2 \times (F5+F7)^*$	0,55	0,55	0,50	0,50	–	–	–	–
$2 \times (F5+F7)$	0,15	0,91	0,10	0,21	–	–	–	–
$2 \times (F5+F7+F11+F13)$	0,18	1,05	0,10	0,16	0,57	1,42	2,92	4,82
$(F5+F7) + 2 \times (F11+F13)$	18,34	–	0,11	–	0,55	1,44	3,02	5,01
Bez kond. $2 \times 1,5$ MVar								
$2 \times (F5+F7)^*$	0,41	0,41	0,50	0,50	–	–	–	–
$2 \times (F5+F7)$	0,13	0,77	5,40	9,44	–	–	–	–
$2 \times (F5+F7+F11+F13)$	0,15	0,86	1,21	2,11	0,50	1,23	3,12	5,13
$(F5+F7) + 2 \times (F11+F13)$	0,84	–	1,23	–	0,48	1,20	3,11	5,04

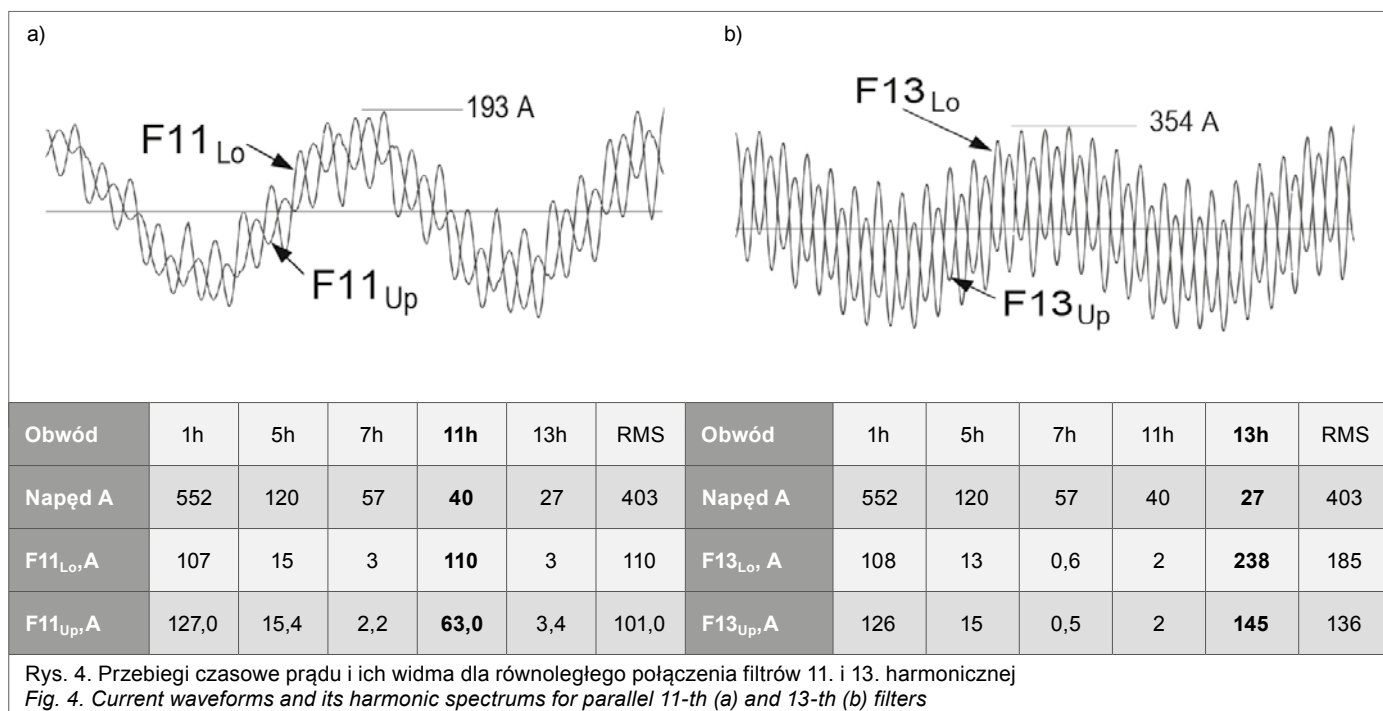
Uwaga: *Obydwa filtry 5. i 7. harmonicznych są dokładnie dostrojone



się pomiędzy połączone równolegle impedancje sieci zasilającej i filtru. Jeżeli filtr jest lekko „przeestrojony”, wówczas stworzony w ten sposób obwód rezonansu równoległego: indukcyjność sieci zasilającej – pojemność filtru może wzmocnić harmoniczną prądu źródła. Na możliwość powstania takiego stanu w ana-

lizowanym przypadku wskazują dane w dolnej części tabeli 4 dotyczące pracy sieci bez baterii $2 \times 1,5$ MVAR.

Przyłączenie baterii $2 \times 1,5$ MVAR do szyn zmienia obciążenie filtrów ze względu na wytworzone wówczas warunki rezonansu równoległego pomiędzy impedancjami kondensatorów i sieci



zasilającej. Częstotliwość rezonansu dla impedancji widzianej z szyn sekcji A, zależna od konfiguracji układu filtracyjnego, decyduje o poziomie obciążenia filtrów.

Rysunek 4 przedstawia uzyskane symulacyjnie przebiegi czasowe prądu i jego widmo podczas równoległej pracy w analizowanej sieci filtrów 11. oraz 13. harmonicznej. W obydwu przypadkach widać wyraźnie harmoniczne przeciążenie filtrów. W tym stanie może wystąpić znaczący wzrost temperatury rdzeni dławików i ich uszkodzenie.

Najbardziej reprezentatywny przypadek rezonansu równoległego (dla zasilania sekcji A i B z szyn 1) są przedstawione w tabeli 4. Dwa filtry przeznaczone do filtracji tej samej harmonicznej są rozstrojone, na skutek tolerancji wykonania ich elementów składowych, w przeciwnych kierunkach, tzn. częstotliwość jednego jest większa, a drugiego mniejsza niż częstotliwość filtrowanej harmonicznej. Widać wyraźnie, że przeciwne rozstrojenie takich równolegle połączonych filtrów może spowodować ich bardzo znaczące przeciążenie. Jak wspomniano wcześniej, filtry przeznaczone do filtracji harmonicznych wyższych rzędów są bardziej czułe (ulegają większemu rozstrojeniu) na zmiany wartości ich elementów składowych. Dodatkowo rozstrojenie filtrów tego samego rzędu w pewnych konfiguracjach systemu może wytworzyć warunki rezonansu równoległego blisko częstotliwości harmonicznych charakterystycznych.

Wnioski

W sieciach przemysłowych zawierających wiele baterii kondensatorów przeznaczonych do kompensacji mocy biernej, pracujących samodzielnie, z dławikami odstrajającymi lub w układzie filtrów wyższych harmonicznych, mogą wystąpić problemy eksploatacyjne spowodowane wzmocnieniami prądów harmonicznych. Układy takie wymagają bardzo starannej analizy częstotliwościowych charakterystyk impedancyjnych systemu.

Z przedstawionych w artykule rozważań wynika kilka wniosków praktycznych:

- złą inżynierską praktyką jest dodawanie do istniejących baterii kondensatorów filtrów wyższych harmonicznych;
- nieuwzględnienie na etapie projektowania tolerancji wykonania elementów składowych filtrów może prowadzić – szczególnie w przypadku zbyt dokładnego ich strojenia – do trudności eksploatacji tych urządzeń, w krańcowym przypadku do ich trwałego uszkodzenia;
- należy unikać równoległej pracy filtrów przeznaczonych do filtracji tej samej harmonicznej.

Literatura

- [1] DUFFEY C.K., STRATFORD R.P.: *Update of harmonic standard IEEE-519: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems*, IEEE Trans. Ind. Applicat., 25/1989, pp. 1025–1034.
- [2] LIN K.P., LIN M.H., LIN T.P.: *An advanced computer cod for single-tuned harmonic filter design*, IEEE Trans. Ind. Applicat., 34/1998, pp. 640–648.
- [3] VARESTSKY Y., HANZELKA Z.: *Filter Characteristics in DC Drive Supplying Power System*, Proc. of 13th IEEE Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power, Wollongong, Australia 2008.
- [4] RAVLYK A., GRETCHYN T.: *Digital complex for modelling transient processes in electric circuits*, Proc. of III Int. Symp. on Mathematical Methods in Power Engineering, Zakopane 1993, pp. 17–20.

J. Varecki, Z. Hanzelka – AGH Kraków
 J. Tenerowicz – Pracownia Projektów Innowacyjnych INNTENER

artykuł recenzowany