

Jurij WARECKI*
Michał GAJDZICA**

WPLYW TECHNOLOGICZNYCH ODCHYLEŃ PARAMETRÓW FILTRÓW HARMONICZNYCH NA STANY PRZEJŚCIOWE W SIECIACH PRZEMYSŁOWYCH

Praktyka eksploatacji układów kompensacyjno-filtrujących w różnych topologiach i systemach zasilana pokazała, że strojenie filtrów powinno odbywać się dla częstotliwości nieco niższej, niż wielokrotność częstotliwości podstawowej. W pracy, w oparciu o model zrealizowany w pakiecie Matlab/Simulink zbadano wpływu technologicznych odchyłeń parametrów elementów filtru na występujące stany przejściowe. Poprzez zmianę strojenia jednostki filtrującej, utożsamianą ze zmianą tolerancji indukcyjności dławika oraz pojemności baterii kondensatorów filtru, porównano wartości udarów prądowych i przepięć generowanych na elementach układu filtrującego podczas komutacji łączeniowych.

SŁOWA KLUCZOWE: bateria kondensatorów, dławik filtrujący, filtr wyższych harmonicznych, strojenie projektowe i dokładne, kompensator statyczny SVC, proces przejściowy, komutacje łączeniowe

1. WPROWADZENIE

Poprawną pracę układu filtrującego, pracującego w określonej konfiguracji, determinuje impedancja wypadkowa systemu przemysłowego [1, 2]. Każdorazowa jej zmiana wpływa na efektywność filtracji harmonicznych w sieci zasilającej. Wartość indukcyjności i pojemności dla filtru wybranej harmonicznej sprawia, że projektowany układ filtrujący dla podstawowej oraz harmonicznych niższego rzędu niż rząd harmonicznej filtru stanowi obciążenie pojemnościowe dla sieci zasilającej, z kolei dla wszystkich harmonicznych wyższych rzędów staje się obciążeniem indukcyjnym.

W praktyce dosyć często znajdują zastosowanie układy kompensacyjno-filtrujące konfigurowane z pojedynczych filtrów pasywnych typu LC, a w niektórych wariantach również z dołączanym do nich filtrem tłumionym typu C. Poszczególne filtry w układach kompensacyjno-filtrujących są

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza.

** TAMEH Zakład Wytwarzania Kraków.

przyłączane do sieci poprzez indywidualny lub wspólny wyłącznik mocy [3]. Eksploatacja filtrów w warunkach przemysłowych dowiodła, że wraz z upływem czasu oraz wskutek postępujących zmian parametrów kondensatorów i dławików, występują zmiany właściwości rezonansowych charakterystyk impedancyjno-częstotliwościowych złożonego układu filtrującego [1, 4]. Następstwem takich sytuacji są uszkodzenia dławików filtrujących oraz kondensatorów filtrów wskutek przeciążeń oraz przepięć powstających podczas ustalonych lub przejściowych stanów pracy.

Na przykładzie układu kompensacyjno-filtrującego kompensatora statycznego SVC typu FC-TCR w niniejszym artykule przeprowadzono analizę porównawczą przebiegu stanów przejściowych, zachodzących w poszczególnych filtrach podczas komutacji technologicznych w układzie sieci przemysłowej, w warunkach zmian częstotliwości ich strojenia, wywołanych technologicznymi odchyleniami parametrów stosowanych kondensatorów i dławików. Przebadano także wpływ tłumionego filtra typu C na charakter stanów przejściowych przy zmianach częstotliwości strojenia filtrów.

2. STROJENIE FILTRÓW W SYSTEMACH PRZEMYSŁOWYCH

Dostrajanie filtra polega na wyborze odpowiedniej częstotliwości rezonansu szeregowego f_r dla poszczególnych gałęzi układu filtrującego wynikającej z poziomu odkształcenia napięcia oraz redukcji określonych wyższych harmonicznych w układzie zasilania, konieczności eliminacji rezonansów równoległych w sieci zasilającej.

Praktyka eksploatacji układów FC pracujących w różnych konfiguracjach i systemach zasilania pokazała, że strojenie poszczególnych jednostek filtrujących powinno zostać wykonane dla częstotliwości zbliżonej (odpowiednio niższej) do wielokrotności częstotliwości podstawowej. Strojenie w oparciu o niższą wartość częstotliwości wynika z faktu, iż powyżej częstotliwości własnej reaktancja filtra ma charakter indukcyjny, co jest korzystniejsze z punktu widzenia jego współpracy z systemem zasilania. O stopniu odstrojenia od spodziewanej częstotliwości harmonicznej prądu decyduje przede wszystkim zmienność elementów filtra w czasie. Stąd, w praktyce korzysta się z parametru jakim jest rząd częstotliwości dostrojenia h_r jednogłęziowego filtra pasywnego:

$$h_r = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (1)$$

Jakakolwiek zmiana parametrów filtra skutkuje jego rozstrojeniem w stosunku do wymaganych częstotliwości dostrojenia h_d :

$$\frac{h_d}{(1+\Delta f_*)\sqrt{(1+\Delta L_*)(1+\Delta C_*)}} \leq h_r \leq \frac{h_d}{(1-\Delta f_*)\sqrt{(1-\Delta L_*)(1-\Delta C_*)}} \quad (2)$$

gdzie: Δf_* – odchylenie częstotliwości, j.w.; $\Delta L_*, \Delta C_*$ – odchylenia indukcyjności i pojemności, j.w.; h_d – wymagana częstotliwość strojenia filtru ($h_d = 5, 7, 11, 13, \dots$).

Projektując poszczególne filtry układu kompensatora przyjmuje się tolerancję indukcyjności dławika na poziomie między: -5% a $+5\%$ [5, 6]. Z kolei w przypadku baterii kondensatorów, uwzględnia się tolerancję pojemności na poziomie z zakresu: $-5\% \dots +10\%$ [5]. Wówczas rząd częstotliwości dostrojenia (przyjmując, że $\Delta f = 0$) zawiera się w przedziale:

$$0,93 \cdot h_d \leq h_r \leq 1,05 \cdot h_d \quad (3)$$

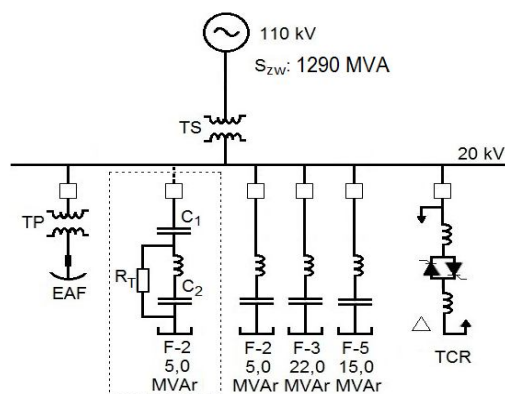
W praktyce inżynierskiej projektowane filtry układu FC nigdy nie są strojone do częstotliwości filtrowanej harmonicznej, gdyż może to prowadzić do przesuwania punktów rezonansowych charakterystyk impedancyjno-częstotliwościowych złożonego układu filtrującego [1, 4].

Podczas projektowania parametrów filtrów wymagane jest określenie dopuszczalnych zmian indukcyjności dławika oraz pojemności baterii kondensatorów, co znacząco ułatwia wyznaczenie wymaganego wstępnego odstrojenia filtru. Znając dopuszczalne odchylenia elementów układu FC można w sposób jednoznaczny podać maksymalną częstotliwość rezonansu. Dopuszczalne współczynniki przeciążenia prądowego i napięciowego kondensatorów filtrów, w odniesieniu do wartości skutecznych znamionowych przyjmują odpowiednio 130% oraz 110% [6]. Impedancje charakterystyki częstotliwościowej dla poszczególnych częstotliwości strojenia filtrów układu determinują jakość filtracji systemu, stąd dowolne rozstrojenie filtrów lub wprowadzenie tłumienia wywołuje pogorszenie poziomu filtracji harmonicznych.

3. CHARAKTERYSTYKA UKŁADU FILTRÓW

Układ przemysłowy przyjęty w badaniach modelowych tworzą piec łukowy prądu przemiennego, zasilany poprzez transformator piecowy TP o mocy znamionowej 50 MVA oraz układ kompensatora bocznikowego, zrealizowany w oparciu o dwa podstawowe człony: TCR (ang. *Thyristor Controlled Reactor*) i FC (ang. *Filter Circuit*) zaprezentowano na rysunku 1.

Elementy systemu średniego napięcia 20 kV zasilane są z sieci 110 kV poprzez transformator systemowy TS o mocy 80 MVA. Podczas badań przeanalizowano dwa możliwe układy FC: układ A – filtry proste typu LC: F-2, F-3 oraz F-5 o mocach odpowiednio: 5, 22 i 15 MVA oraz układ B – jednostka 2-go rzędu typu C współpracująca z układem filtrów LC: F-3 i F-5.



Rys. 1. Topologia badanego systemu zasilania pieca łukowego AC-EAF: układ A – wszystkie filtry typu LC, układ B – filtr F-2 typu C w połączeniu z filtrami F-3 i F-5

W tabelach 1 i 2 podano wartości parametrów układu FC skonfigurowanego wyłącznie w oparciu o filtry LC oraz współpracujący z nimi filtr typu C, uwzględniając dopuszczalne normatywne tolerancje pojemności kondensatorów i indukcyjności dławików filtrujących.

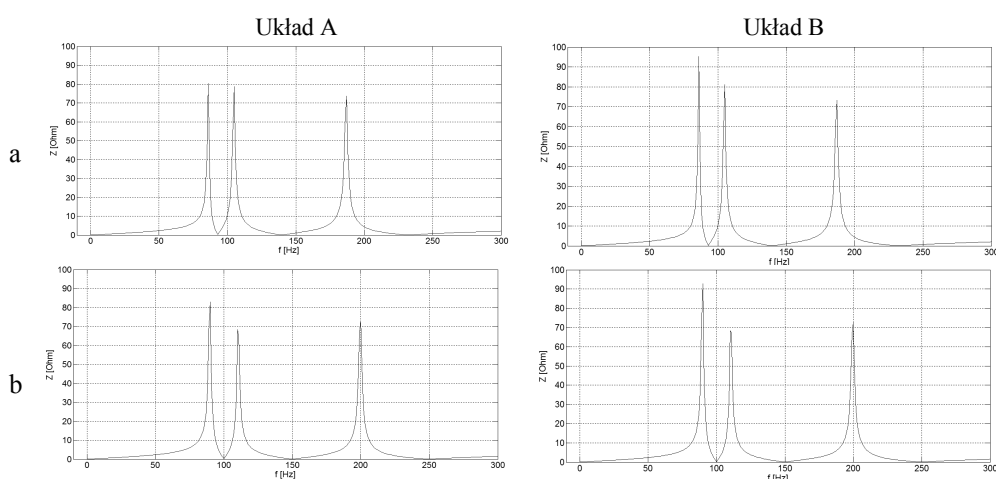
Tabela 1. Parametry elementów filtrów pasywnych typu LC

Parametry projektowe					
Filtr	Punkt strojenia	Pojemność C [μF]	Indukcyjność L [mH]	Rezystancja R [Ω]	I_{nom} [A]
F-2	1,86	28,30	103,59	0,27	144
F-3	2,79	152,01	8,57	0,07	632
F-5	4,65	113,90	4,12	0,04	433
Parametry wyznaczone w oparciu o dokładną wartość częstotliwości rezonansowej					
F-2	2,0	29,86	84,94	0,24	144
F-3	3,0	155,05	7,27	0,06	632
F-5	5,0	114,64	3,54	0,03	433

Na rysunku 2 przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe badanego systemu zasilania dla analizowanych układów A i B oraz porównywanych częstotliwości strojenia filtrów, na których można zaobserwować odpowiednie zmiany wartości impedancji dla poszczególnych harmonicznych występujących w systemie zasilania.

Tabela 2. Parametry elementów filtru F-2 typu C

Parametry projektowe						
Filtr	Punkt strojenia	Pojemność C_1 [μF]	Pojemność C_2 [μF]	Indukcyjność L_2 [mH]	Rezystancja R_T [Ω]	I_{nom} [A]
F-2	1,86	39,79	97,86	103,59	107,53	144
Parametry wyznaczone w oparciu o dokładną wartość częstotliwości rezonansowej						
F-2	2,00	39,79	119,37	84,94	100,00	144



Rys. 2. Charakterystyki częstotliwościowe badanych układów
a) strojenie projektowe, b) strojenie dokładne

4. WPŁYW TECHNOLOGICZNYCH ODCHYLEŃ PARAMETRÓW FILTRÓW NA STANY PRZEJŚCIOWE

Celem badań symulacyjnych było określenie i porównanie wpływu zmiany strojenia jednostki filtrującej, utożsamianą ze zmianą tolerancji indukcyjności dławika oraz pojemności baterii kondensatorów na wartości maksymalnych amplitud napięć i prądów przejściowych w obwodach filtrów, pracujących w określonej topologii połączeń układu FC. Badania wykonano dla typowych komutacji eksploatacyjnych przeprowadzanych w systemie zasilania pieca łukowego: włączanie transformatora piecowego oraz włączanie jednostek kompensacyjno-filtrujących SVC.

Podczas pracy układu kompensacyjnego możliwe są różne jego konfiguracje, stąd wpływ topologii połączeń filtrów wyższych harmoniczych oraz

dokładności strojenia na zmianę amplitud poszczególnych napięć i prądów przejściowych każdego z elementów filtru układu FC, podczas włączania transformatora piecowego oraz filtru lub grupy filtrów, przebadano dla dwóch skrajnych schematów komutacyjnych, zgodnie z tabelą 3.

Tabela 3. Topologia połączeń układu FC

Oznaczenie układu	Konfiguracja układu
<i>Schemat I</i>	Podłączono pojedynczy filtr – F–2, lub F–3, lub F–5
<i>Schemat II</i>	Podłączono wszystkie filtry – F–2 + F–3 + F–5

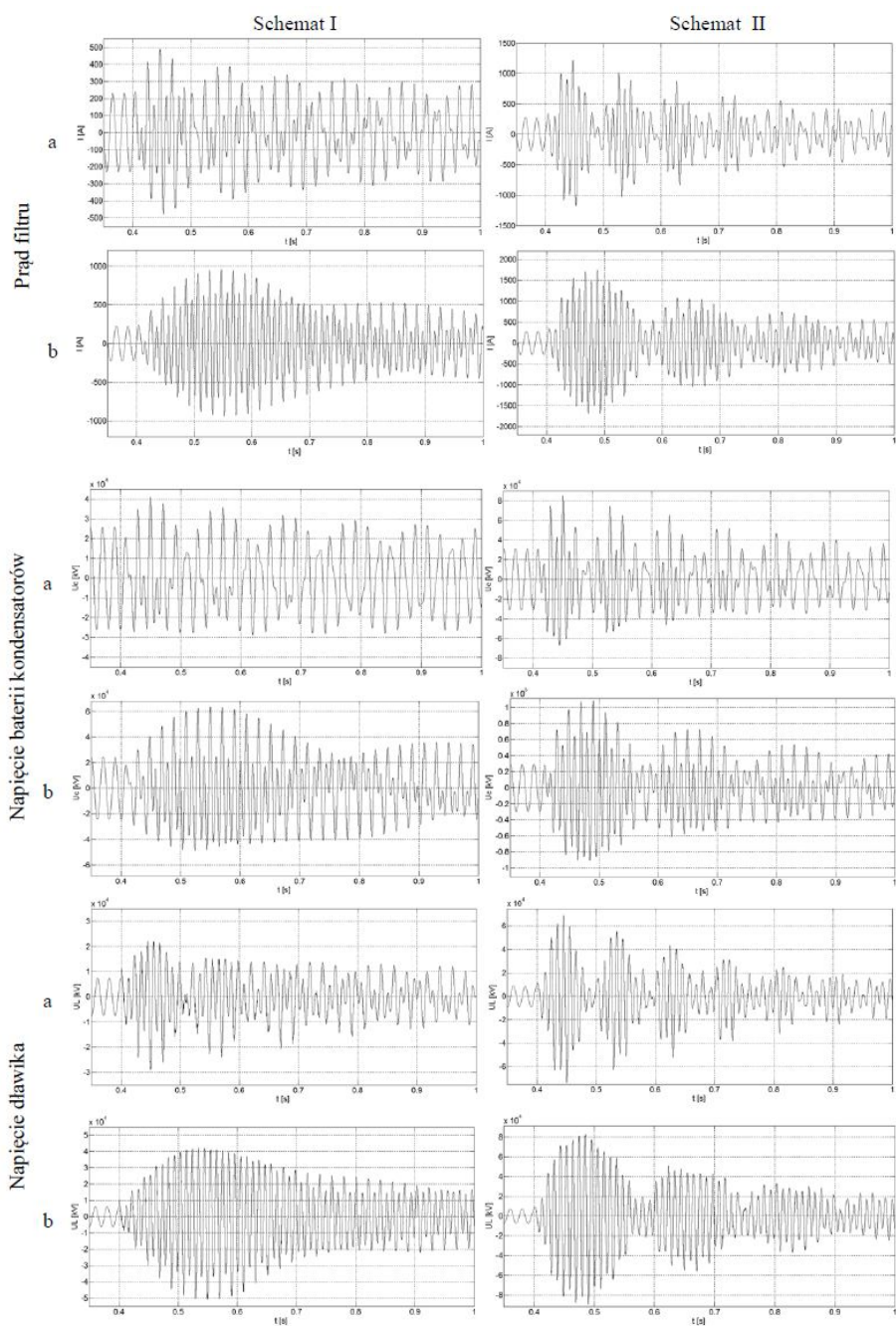
I. Kombinacja filtrów pasywnych typu LC (układ A)

Na rysunku 3 podano przykładowe oscylogramy prądów oraz napięć przejściowych dla najbardziej obciążanej fazy obwodu filtru F–2 typu LC w obu konfiguracjach układu FC, uzyskane dla strojenia projektowego i dokładnego, podczas włączania transformatora piecowego.

Włączenie transformatora powoduje oscylacje drugiej harmonicznej w obwodzie jednostki filtrującej. Jak można zaobserwować z oscylogramów badanego systemu zasilania, odchylenia parametrów filtrów powodują duże zmiany prądów przejściowych w tym również zmianę charakteru i wydłużenie czasu trwania stanu nieustalonego w obwodzie FC. Strojenie wszystkich zainstalowanych jednostek układu kompensacyjnego do częstotliwości rezonansowej skutkuje znaczącym wzrostem wartości amplitud prądów przejściowych obwodu filtrującego. Charakter rejestrowanych przepięć łączeniowych wynika bezpośrednio z przebiegów prądu, jednak podział napięcia między pojemnością a indukcyjnością filtru zależy od wartości oraz częstotliwości strojenia danego obwodu filtrującego.

W tabeli 4 podano maksymalne amplitudy udarów prądowych i napięć przejściowych w układzie kompensacyjno-filtrującym, uzyskane wskutek włączania transformatora przemysłowego. Podobną tendencję zmian obserwujemy podczas włączeń filtrów harmoniczných, analizując wyniki badań z tabeli 5.

Większe amplitudy oraz ich krotności uzyskujemy w przypadku normalnej konfiguracji układu filtrująco-kompensacyjnego, niż w przypadku pojedynczej jednostki filtrującej w systemie przemysłowym. Sytuacja tego typu jest charakterystyczna w obu przypadkach, jednak w chwili strojenia w oparciu o dokładną wartość częstotliwości rezonansowej h_r , uzyskujemy odpowiednio większe wartości amplitud prądów przejściowych niż dla parametrów układu, które wyznaczono dla projektowego punktu strojenia.



Rys. 3. Prądy i napięcia przejściowe filtru F-2 typu LC przy strojeniu: a) projektowym $h_r = 1,86$, b) dokładnym $h_r = 2,00$ podczas włączania transformatora, układ A

Tabela 4. Maksymalne amplitudy prądów i napięć przejściowych układu FC, wyznaczone dla projektowego i dokładnego strojenia podczas włączania transformatora, układ A

Strojenie projektowe					
Filtr	Amplituda prądu filtru		Amplituda napięcia		
				Kondensator	Dławik
F-2	kA	1,22	kV	85,01	73,57
	j.w. ^(*)	5,99	j.w. ^(*)	3,71	11,10
F-3	kA	2,13	kV	31,20	12,04
	j.w. ^(*)	2,38	j.w. ^(*)	1,67	5,01
F-5	kA	1,97	kV	28,15	8,59
	j.w. ^(*)	3,22	j.w. ^(*)	1,65	10,87
Strojenie dokładne					
F-2	kA	1,75	kV	108,57	88,98
	j.w. ^(*)	8,61	j.w. ^(*)	4,73	13,42
F-3	kA	2,39	kV	33,49	14,07
	j.w. ^(*)	2,68	j.w. ^(*)	1,79	5,85
F-5	kA	2,48	kV	31,71	8,70
	j.w. ^(*)	4,06	j.w. ^(*)	1,85	11,01

(*) Wartość bazowa – amplituda prądu znamionowego oraz amplituda napięcia roboczego dławika oraz kondensatorów danego filtru przy napięciu znamionowym na szynie

Tabela 5. Maksymalne amplitudy prądów i napięć przejściowych układu FC, wyznaczone dla projektowego i dokładnego strojenia podczas włączania filtrów, układ A

Strojenie projektowe					
Filtr	Amplituda prądu filtru		Amplituda napięcia		
				Kondensator	Dławik
F-2	kA	1,26	kV	89,59	69,14
	j.w. ^(*)	6,20	j.w. ^(*)	3,91	10,43
F-3	kA	3,39	kV	43,85	16,47
	j.w. ^(*)	3,81	j.w. ^(*)	2,34	6,86
F-5	kA	1,98	kV	40,23	6,70
	j.w. ^(*)	3,24	j.w. ^(*)	2,35	8,48
Strojenie dokładne					
F-2	kA	1,34	kV	82,13	63,04
	j.w. ^(*)	6,59	j.w. ^(*)	3,58	9,51
F-3	kA	3,35	kV	45,29	14,89
	j.w. ^(*)	3,76	j.w. ^(*)	2,42	6,20
F-5	kA	2,06	kV	40,17	6,00
	j.w. ^(*)	3,37	j.w. ^(*)	2,34	7,59

(*) Wartość bazowa – amplituda prądu znamionowego oraz amplituda napięcia roboczego dławika oraz kondensatorów danego filtru przy napięciu znamionowym na szynie

Stwierdza się, iż podczas bezpośredniego włączania układu FC do sieci zasilającej, strojonego zarówno w oparciu o dokładną jak i projektową wartość częstotliwości rezonansowej, możemy obserwować relatywnie większe krotności amplitud prądów przejściowych niż w przypadku włączania transformatora.

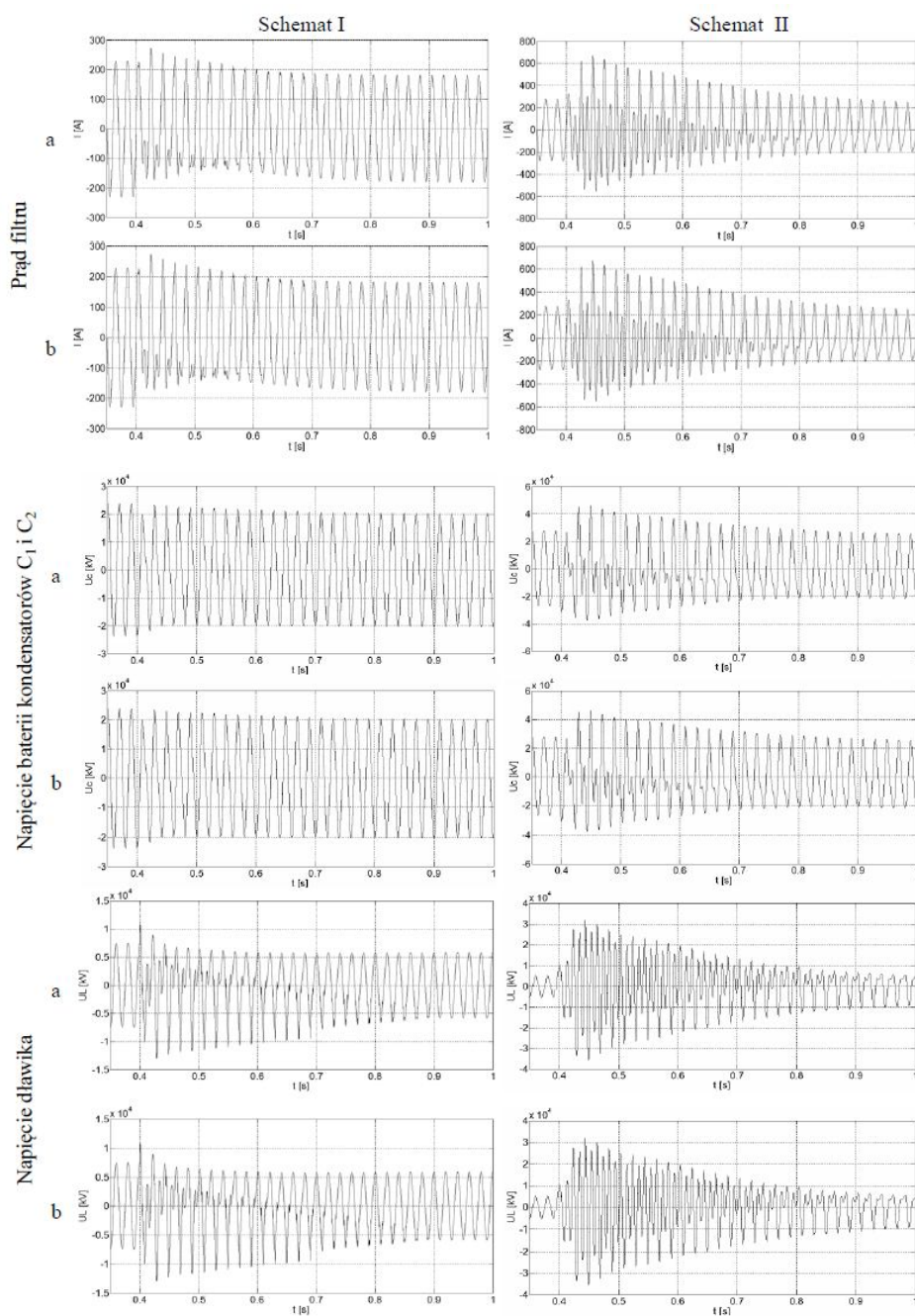
W przypadku amplitud napięć przejściowych na dławikach i kondensatorach filtrów układu FC analiza wykazała duże podobieństwo do przebiegów powstających na elementach podczas komutacji transformatora. Podczas włączania zarówno pojedynczego filtra jak i grupy filtrów układu FC, którego elementy wyznaczono w oparciu o dokładny punkt rezonansowy, uzyskano większe wartości maksymalne przepięć niż w przypadku niedostrojonych filtrów. Proces komutacji filtrów wyższych harmoniczych strojonych precyzyjnie przebiega nieco dłużej, a oscylacje ulegają wolniejszemu tłumieniu.

II. Wpływ filtru tłumionego (układ B)

Na rysunku 4 dla porównania przebiegu stanów przejściowych zaprezentowano oscylogramy prądów oraz napięć najbardziej obciążonej fazy filtru F-2 typu C, strojonego dokładnie do częstotliwości rezonansowej, uzyskane z chwilą włączania transformatora TP dla porównywanych schematów komutacyjnych układu FC.

Instalacja filtru typu C, z chwilą strojenia dokładnego wszystkich zainstalowanych filtrów powoduje obniżenie amplitud prądów i napięć przejściowych jednostek układu FC, w tym również skraca ich czas oscylacji w porównaniu do konfiguracji filtrów z układu A. Poza tym, komutacja filtrów LC w obwodzie z filtrem typu C dzięki rezystancji R_T skraca czas utrzymywania się stanu przejściowego.

Stwierdza się, iż w badanym przypadku strojenie filtrów ma znacząco mniejszy wpływ na amplitudy przepięć i udarów prądowych w porównaniu do układu FC opartego jedynie w jednostki proste. Strojąc filtry w oparciu o dokładną wartość częstotliwości rezonansowej uzyskuje się nieco wyższe krotności maksymalnych prądów oraz napięć na elementach filtrów, niż w przypadku parametrów uzyskanych w wyniku strojenia projektowego, tabela 6 i 7. Zaistniała sytuacja jest charakterystyczna zasadniczo dla pojedynczo zasilanego filtru, jak również dla grupy filtrów. W systemach o innej topologii i konfiguracji układu kompensacyjno-filtrującego SVC można spodziewać się innej relacji wartości przejściowych.



Rys. 4. Prądy i napięcia przejściowe filtra F-2 typu C przy strojeniu: a) projektowym $h_r = 1,86$, b) dokładnym $h_r = 2,00$ podczas włączania transformatora, układ B

Tabela 6. Maksymalne amplitudy prądów i napięć przejściowych układu FC, wyznaczone dla projektowego i dokładnego strojenia podczas włączania transformatora, układ B

Strojenie projektowe					
Filtr	Amplituda prądu filtru		Amplituda napięcia		
	kA		kV	Kondensator	Dławik
F-2	kA	0,67	kV	46,31	35,56
	j.w. ^(*)	3,30	j.w. ^(*)	2,02	5,36
F-3	kA	2,63	kV	35,67	11,69
	j.w. ^(*)	2,95	j.w. ^(*)	1,91	4,86
F-5	kA	1,41	kV	28,42	4,18
	j.w. ^(*)	3,34	j.w. ^(*)	1,67	1,74
Strojenie dokładne					
F-2	kA	0,77	kV	46,37	35,62
	j.w. ^(*)	3,77	j.w. ^(*)	2,02	5,38
F-3	kA	2,27	kV	34,25	12,09
	j.w. ^(*)	2,55	j.w. ^(*)	1,83	5,03
F-5	kA	1,86	kV	26,52	5,46
	j.w. ^(*)	3,04	j.w. ^(*)	1,43	6,91

(*) Wartość bazowa – amplituda prądu znamionowego oraz amplituda napięcia roboczego dławika oraz kondensatorów danego filtru przy napięciu znamionowym na szynie

Tabela 7. Maksymalne amplitudy prądów i napięć przejściowych układu FC, wyznaczone dla projektowego i dokładnego strojenia, podczas włączania filtrów, układ B

Strojenie projektowe					
Filtr	Amplituda prądu filtru		Amplituda napięcia		
	kA		kV	Kondensator	Dławik
F-2	kA	0,89	kV	60,92	39,91
	j.w. ^(*)	4,38	j.w. ^(*)	2,66	6,02
F-3	kA	3,42	kV	45,32	16,44
	j.w. ^(*)	3,84	j.w. ^(*)	2,42	6,84
F-5	kA	2,03	kV	41,15	6,72
	j.w. ^(*)	3,32	j.w. ^(*)	2,40	8,51
Strojenie dokładne					
F-2	kA	0,92	kV	61,45	37,60
	j.w. ^(*)	4,52	j.w. ^(*)	2,68	5,67
F-3	kA	3,38	kV	41,62	14,80
	j.w. ^(*)	3,80	j.w. ^(*)	2,22	6,16
F-5	kA	1,93	kV	41,25	6,03
	j.w. ^(*)	3,16	j.w. ^(*)	2,41	7,63

(*) Wartość bazowa – amplituda prądu znamionowego oraz amplituda napięcia roboczego dławika oraz kondensatorów danego filtru przy napięciu znamionowym na szynie

5. WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych wyników badań symulacyjnych stwierdza się, iż dokładność strojenia filtrów układu kompensacyjno-filtrującego ma znaczący wpływ na amplitudy udarów prądowych oraz przepięć w systemie zasilania. Taka sytuacja stwarza realne niebezpieczeństwo dla dławików oraz kondensatorów układu kompensacyjno-filtrującego. Stąd uwzględnianie podczas projektowania układów kompensacyjno-filtrujących technologicznych odchyłek parametrów kondensatorów i dławików ma podstawowe znaczenie dla ich bezawaryjnej eksploatacji. Z kolei wykorzystywany coraz powszechniej filtr typu C, dzięki zastosowanej rezystancji bocznikowej, zmniejsza niebezpieczeństwo wpływu zmian strojenia filtru na wzrost amplitud prądów i napięć przejściowych w układzie kompensacyjno-filtrującym.

LITERATURA

- [1] Warecki J., Gajdzica M., Załączanie transformatora pieca łukowego w sieci z układem filtrów wyższych harmonicznnych, *Przegląd Elektrotechniczny* nr 4, 2015, s. 64 – 69.
- [2] Simpson Ronald H., Misapplication of power capacitors in distribution systems with nonlinear loads – three case histories, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 1, January/February 2005, pp. 134 – 143.
- [3] <http://www.abb.pl/abblibrary/DownloadCenter>
- [4] Warecki J., Gajdzica M., Transients impact on power filter circuit sizing, *Computer applications in electrical engineering*, vol. 13, Politechnika Poznańska, 2015, pp. 111 – 119.
- [5] S. Grzybowski S., Kordus A., Królikowski C., Seidel S., Zeydler J. – Zborowski, *Kondensatory w energetyce*, Wydawnictwa Naukowo–Techniczne, Warszawa 1969.
- [6] Makram Elam B., Subramaniam E. V., Girgis Adly A., Harmonic filter design using actual recorded data, *Conference Paper, IEEE 1992*, no. 92 B2, pp. B2 – 1 – B2 – 7.

Badania były finansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (Grant AGH Nr 11.11.210.312).

IMPACT OF FILTER CIRCUIT MANUFACTURING TOLERANCES ON INDUSTRIAL SUPPLY SYSTEM TRANSIENTS

The practice of operating multiple, single-tuned FC units in different power supply systems has shown that harmonic filters tuning should be carried out for lower frequencies than multiple of network frequency. To examination of the filter components parameters tolerances impact on switching transients Matlab/Simulink software was chosen. The influence of the filter tuning on switching transients behavior under arc furnace unit and harmonic filters energizing was analyzed. The paper focuses on the comparison of the switching transients due to different tolerances of air-core reactor inductances and capacitor bank capacitances in single and multiple harmonic filters configurations.

(Received: 29. 01. 2017, revised: 15. 02. 2017)