

Adam Szeląg, Tadeusz Maciołek

## Analiza efektywności filtrów wygładzających w podstacjach trakcji kolejowej 3 kV dc przy zaburzeniach napięcia zasilającego

**Kryteria jakości energii elektrycznej w odniesieniu do systemu zasilania prądu stałego dotyczą obwodów, od prostowników zainstalowanych w podstacjach trakcyjnych aż do odbieraka prądu pojazdu. Prawo energetyczne i przepisy wykonawcze jednoznacznie stwierdzają, że zelektryfikowany system transportu jako odbiorca energii ma spełniać warunki poboru energii określone w umowie, co narzuca określone wymagania wobec Zakładów Elektroenergetyki Kolejowej.**

Jednocześnie odbiorca ma prawo wymagać od dystrybutora przestrzegania standardów dotyczących parametrów dostarczonej energii elektrycznej. Z drugiej strony wymagania te odnoszą się również np. do elektroenergetyki kolejowej jako operatora na rynku energii. Przy czym należy tu rozróżnić, że występować będą kryteria dla energii zarówno po stronie prądu stałego (w sieci trakcyjnej) – dostarczanej do pojazdów, jak i prądu przemiennego SN i nn – (odbiorcy nietrakcyjne i inni odbiorcy niekolejowi).

### Wyższe harmoniczne w napięciu wyjściowym prostowników podstacji

Nieodłączną cechą pracy prostownika jest tętnienie prądu. Jest ono bezpośrednią przyczyną generowania się składowych wyższych harmonicznych (6, 9, 12, 24) napięcia wyjściowego. Harmoniczne te negatywnie oddziałują na pracę wielu urządzeń: między innymi silników trakcyjnych, mają wpływ na elementy elektroniczne zamontowane na podstacjach trakcyjnych, powodują zakłócenia w łączności radiowej i telefonicznej, sygnalizacji sterowania, mogą zakłócać w pobliżu podstacji odbiór programów radiowideotelewizyjnych. Negatywne skutki występowania harmonicznych przenoszą się również na stronę linii zasilających, tj. na stronę energetyki zawodowej. Powoduje to pogorszenie jakości energii elektrycznej, z której korzysta nie tylko PKP, lecz również inni odbiorcy.

Duża liczba odbiorów o charakterystykach nieliniowych (pobierają prądy odkształcone, które zawierają wyższe harmoniczne, np. sterowane prostowniki tyrystorowe do napędów prądu stałego), odbiorów o dużych i szybkich zmianach obciążeń w czasie pracy (silniki trakcyjne), odbiorów o wielkich mocach jednostkowych (prostowniki diodowe niesterowane) bardzo źle wpływa na jakość napięcia zasilającego. Powstawanie harmonicznych wyższych rzędów może być spowodowane też zmiennością częstotliwości w sieci energetycznej, niewłaściwą pracą zaworów w jednej z gałęzi zespołu prostownikowego, asymetrią prądów fazowych.

Składową zmienną napięcia wyprostowanego można rozłożyć na poszczególne wyższe harmoniczne, których rząd  $n$  zależy od wartości wskaźnika tętnienia  $\rho_1$ :

$$n = c \rho_1 \quad (1)$$

gdzie:

$$c = 1, 2, 3, 4, \dots;$$

$$\rho_1 = 6, 12,$$

Wyższe harmoniczne napięcia generowane przy pracy prostowników mogą powodować zakłócenia w obwodach zabezpieczeń ruchu kolei (zrk), szczególnie w obwodach szynowych, a także w systemach telekomunikacji oraz łączności radiowej i telefonicznej.

Dość dawno (bo już ponad 50 lat temu) wprowadzone wymagania PKP [4, 8, 22] dopuszczają napięcia zakłócające na wyjściu zespołu prostownikowego na poziomie 0,5%  $U_{dn}$ , co odpowiada 16,5 V (dla podstacji kolejowej napięcie znamionowe wynosi 3,3 kV). Według przepisów GOST napięcie zakłócające nie powinno przekraczać 0,15% napięcia znamionowego, a według przepisów niemieckich i włoskich napięcie zakłócające nie może być większe niż 10 V. Zgodnie z przepisami napięciem zakłócającym  $U_{cz}$  nazywa się skuteczną wartość napięcia o częstotliwości 800 Hz, które wywołuje taki sam efekt zakłócający, jak rzeczywiste napięcie w.h.:

$$U_{cz} = \frac{1}{p_{800}} \sqrt{\sum (k_f \rho_f U_f)^2} \quad (2)$$

gdzie:

$p_{800}$  – współczynnik pszfometryczny ważkości częstotliwości 800 Hz, dla  $f = 800$  Hz  $p_f = 1$ ;

$\rho_f$  – współczynnik pszfometryczny ważkości dla częstotliwości  $f$  w porównaniu z częstotliwością odniesienia, a więc  $f = 800$  Hz;

$U_f$  – wartość skuteczna składowej napięcia zakłócającego o częstotliwości  $f$ ;

$k_f$  – współczynnik częstotliwościowy uwzględniający zależność sprzężenia między liniami (energetyczną i trakcyjną) od częstotliwości (dla linii napowietrznych  $k_f = 1$ ).

### Urządzenia wygładzające stosowane w podstacjach trakcyjnych

W celu zmniejszenia składowej zmiennej po stronie napięcia wyprostowanego stosowane są urządzenia wygładzające, których zadaniem jest ograniczenie wprowadzanych do sieci trakcyjnej w.h, za pomocą gałęzi szeregowej oraz poprzez wymuszenie ich prze-

plywu w niskoimpedancyjnej gałęzi równoległej bocznikującej sieć trakcyjną. Jako urządzenia wygładzające stosowane powszechnie są filtry rezonansowe (Polska, Rosja, Czechy, Słowacja, Hiszpania, Słowenia, Chorwacja, Japonia, Rep. Płd. Afryki, Indie, Algieria, Maroko) czy aperiodyczne (Włochy, Słowenia) [8].

Działanie filtra oparte jest na zasadzie rezonansu szeregowego. Filtr składa się z gałęzi LC włączonych między szynę bieguna dodatniego i ujemnego podstacji. Dla każdej częstotliwości harmonicznej potrzebny jest odpowiednio dostrójony obwód filtra. Do tłumienia w.h. stosuje się obwód o dużej pojemności C. W rozwiązaniach stosowanych w podstacjach, każda gałąź filtra składa się z baterii kondensatorów o dużym napięciu pracy i cewek indukcyjnych.

Podstawowymi wadami filtrów rezonansowych są:

- niski poziom tłumienia przy wahanu częstotliwości napięcia zasilającego,
- możliwość wystąpienia zjawiska wzmacniania określonych harmonicznych na skutek wystąpienia zjawisk rezonansowych (zwłaszcza przy zasilaniu pojazdów wyposażonych w układy przekształtnikowe),
- mała stabilność charakterystyk w czasie i konieczność okresowego dostrajania.

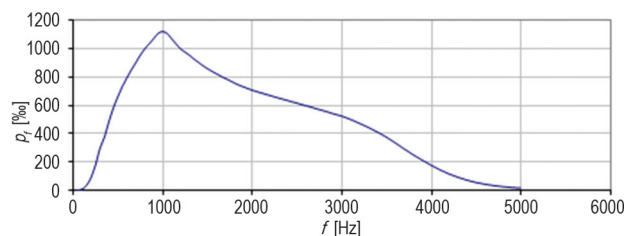
Aby poprawić efektywność filtrów rezonansowych w zakresie wyższych harmonicznych instaluje się dodatkowy kondensator o pojemności  $C_5 = 50\text{--}100\ \mu\text{F}$ , a w celu ograniczenia harmonicznych niecharakterystycznych stosowano (np. w Rosji) zmodyfikowane, bardziej skomplikowane wersje filtrów rezonansowych.

W przypadku wprowadzania do ruchu lokomotyw z napędem czoperowym, falownikami i silnikami asynchronicznymi, zaburzenia od wyższych harmonicznych w sieci trakcyjnej ulegną zwiększeniu, a dodatkowe harmoniczne występujące w sieci trakcyjnej mogą powodować przeciążenie elementów filtra. Ponadto może wystąpić zjawisko przenoszenia przez sieć trakcyjną wyższych harmonicznych w przypadku współpracy podstacji z prostownikami 6- i 12-pulsowymi. Lokomotywy wyposażone w napędy przekształtnikowe mają zwykle wejściowe dolnoprzepustowe filtry typu LC.

Duża pojemność (1–10 mF) filtra dolnoprzepustowego LC zapewnia zasilanie przekształtnika napędu ze źródła charakteryzującego się niską impedancją wejściową tłumiącą przepięcia. Indukcyjność wejściowa filtra tłumi wyższe harmoniczne prądu, jej wartość zwykle zawiera się w przedziale 1–10 mF. W pewnych warunkach, gdy jednogałęziowy filtr okazuje się być nieefektywny stosuje się filtry wejściowe kaskadowe [19, 23].

Alternatywę dla filtrów pasywnych (biernych) złożonych z elementów LC, ze względu na ich duże wymiary, niesterowalność i ograniczoną zdolność tłumienia mogą stanowić filtry aktywne szczególnie tam, gdzie jest brak miejsca, a wymagania co do efektywnego tłumienia zakłóceń są wysokie (np. w pojazdach trakcyjnych). Ideą tego typu rozwiązań jest generowanie prądów lub napięć wyższych harmonicznych o przeciwnych fazach do wyższych harmonicznych występujących na wyjściu przekształtnika w celu ich kompensacji.

Wraz z rozwojem technik sterowania PWM i procesorów sygnałowych DSP zainteresowanie filtrami aktywnymi w ostatnich latach się zwiększyło. Filtry aktywne zwykle konstruowane są jako filtry hybrydowe (tzn. składające się z układów filtrów pasywnych i aktywnych). W odniesieniu do podstacji przekształtnikowych w systemach przesyłowych prądu stałego prototypowy układ filtra



Rys. 1. Zależność współczynnika psofometrycznego ważkości  $p_1$  w funkcji częstotliwości  $f$

aktywnego zastosowano w stacjach AC/DC HVDC w Szwecji i Danii. Prądy w.h. wyływające z przekształtnika P są ograniczane poprzez dławik i filtr pasywny rezonansowy. Ze względu na ograniczoną zdolność tłumienia przez filtr pasywny w linii przesyłowej nadal występuje znaczna zawartość w.h. Zamiast stosować bardziej rozbudowane filtry pasywne zastosowano filtr aktywny, którego zadaniem jest kompensacja prądów w.h., mierzonych układem z separacją światłowodową z przesyłem informacji do procesora sygnałowego w układzie sterowania filtra aktywnego. Elementy mocy filtra aktywnego obejmują transformator i wzmacniacz mocy PWM pracujące jako sterowane źródło harmonicznych napięcia, które wymusza prąd wyższych harmonicznych w sieci prądu stałego o przeciwnej fazie do prądów wyływających z przekształtnika do linii HVDC, co zapewnia ich kompensację.

Wadami filtrów aktywnych są: wysoki koszt, złożoność układu sterowania i zabezpieczeń, konieczność stosowania dodatkowych układów zabezpieczeń, a zaletami: duża efektywność tłumienia, mniejsze gabaryty.

Doświadczenia ze stosowaniem tych filtrów w podstacjach przekształtnikowych AC/DC linii przesyłowych HVDC okazały się zachęcające, jednak w trakcji elektrycznej systemu prądu stałego jak do tej pory próby ich zastosowań występują jedynie w pojazdach trakcyjnych.

### Filtr typu gamma dla podstacji trakcyjnej 3 kV DC zasilanej napięciem 110 kV

Wprowadzenie do eksploatacji w podstacjach trakcyjnych PKP zespołów prostownikowych dużej mocy zasilanych napięciem 110 kV wraz z nową generacją filtrów aperiodycznych wymagało przeprowadzenia analiz i badań pod kątem szeregu nowych zjawisk, nie występujących przy zasilaniu podstacji SN i przy stosowaniu filtrów rezonansowych [8]. Dotyczyło to między innymi wzajemnej współpracy podstacji trakcyjnych z układem zasilania zarówno po stronie prądu przemiennego, jak i po stronie prądu stałego z uwzględnieniem stanów:

- normalnej pracy (w tym współpracy z pojazdami dużej mocy wyposażonymi w napędy z przekształtnikami energoelektrycznymi i sąsiednimi podstacjami z filtrami rezonansowymi),
- skrajnie trudnych warunków eksploatacyjnych i stanów awaryjnych.

Należało tu także określić stopień narażenia poszczególnych elementów na przepięcia i przetężenia.

Przy opracowywaniu koncepcji rozwiązania układowego filtra na podstawie przeprowadzonych analiz i prac wstępnie sformułowano następujące wymagania w odniesieniu do prototypu [8, 11, 13]:

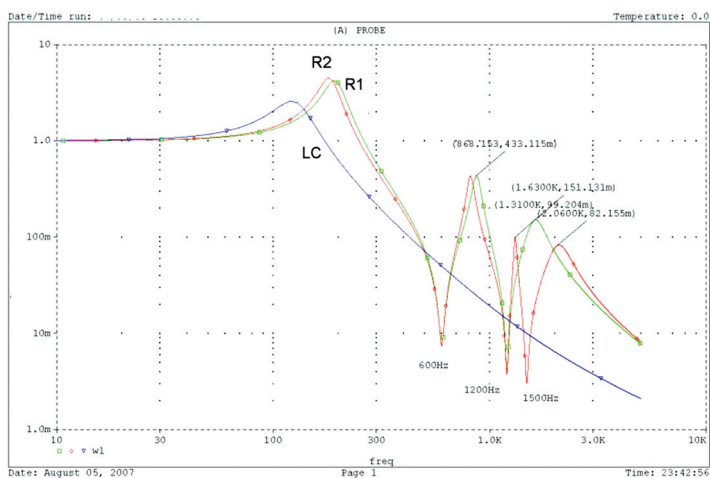
- zapewnienie prawidłowego funkcjonowania w warunkach pracy podstacji trakcyjnej tak, aby nie zostały przekroczone dopuszczalne wartości napięć zakłócających;
- ograniczenie wpływu wyższych harmonicznych niecharakterystycznych, powodowanych asymetrią napięcia zasilającego, na wartość napięcia zakłócającego po stronie prądu stałego;
- ograniczenie wpływu na charakterystyki filtra wahań częstotliwości napięcia zasilającego;
- zapewnienie prawidłowej pracy filtra i ograniczenie jego oddziaływania (sprzęgania się) z filtrami sąsiednich podstacji oraz filtrami wejściowymi lokomotyw z napędem przekształtnikowym;
- ograniczenie generowanych przepięć łączeniowych do wartości mniejszych niż wynosi odporność przepięciowa prostownika i elementów obwodu DC, np. wyłącznika szybkiego.

Korzystne okazało się również wyposażenie filtra w elementy ograniczające wartość przepięcia (skoordynowanie z wytrzymałością przepięciową prostownika) oraz (konieczne) rezystory rozładowcze, służące do rozładowania energii zgromadzonej w pojemności filtra w wyniku przepięcia, jak też rozładowania pojemności po zaniku napięcia (odłączeniu) prostownika.

Na podstawie przeprowadzonych analiz i badań symulacyjnych zaproponowano filtr aperiodyczny typu gamma [13]. Filtr tego typu wykazuje powyższej częstotliwości rezonansowej lepsze własności wy w zakresie tłumienia wyższych harmonicznych niż dotychczas stosowany filtr rezonansowy. Założenia przyjęte w trakcie opracowywania koncepcji prototypowego rozwiązania filtra dla podstacji trakcyjnej z transformacją jednostopniową 110/3 kV wymagały przeprowadzenia szczegółowych i kompleksowych prac studialnych oraz badań laboratoryjnych. Filtry typu gamma według [13] zainstalowano w podstacjach trakcyjnych z transformacją 110/3 kV: Huta Zawadzka i Bartogi po przeprowadzeniu badań laboratoryjnych i uruchomieniowych, a także w podstacjach zasilanych napięciem 110 kV na linii E20 i E30.

## Analiza efektywności różnych układów filtrów do podstacji trakcyjnych 3 kV DC zasilanych napięciem średnim

Obecnie w podstacjach trakcyjnych 3 kV DC na kolejach w Polsce, zasilanych napięciem średnim (15, 20 lub 30 kV), stosowa-



Rys. 2. Porównanie charakterystyk różnych układów filtrów LC, gdzie  $L = 4$  mH,  $C = 400$   $\mu$ F; rezonansowy z dławikiem 1,8 mH i członami rezonansowymi dla 600 i 1200 Hz (R1) oraz rezonansowy, jak R1 z dodatkowym członem rezonansowym dla częstotliwości 1500 Hz (R2)

ne są filtry rezonansowe (człony: dla 300, 600, 900 i 1200 Hz oraz pojemnością 50  $\mu$ F) z dławikiem  $L = 4$  mH (w podstacjach z prostownikami PK17) oraz z członami: dla 600 i 1200 Hz oraz pojemnością 100  $\mu$ F i dławikiem 1,8 mH (w podstacjach z zespołami 12-stopulsowymi). Z prostownikami 12-stopulsowymi stosowane są obecnie na PKP indywidualne lub centralne urządzenia wygładzające. To ostatnie może współpracować z kilkoma dławikami o indukcyjności 1,8 mH (w zależności od liczby zespołów prostownikowych). Zarówno indywidualne, jak i centralne urządzenie wygładzające zostało tak zaprojektowane, że przy założeniu symetrycznego napięcia zasilania, braku odkształceń napięcia zasilającego podstację trakcyjną (występowanie w napięciu tylko harmonicznych charakterystycznych), spełniają one obowiązujące przepisy PKP dotyczące napięcia zakłócającego. Doświadczenia z filtrami w podstacjach 12-stopulsowych wskazują jednak na niską efektywność tego filtra wobec bardzo częstego występowania odkształceń i asymetrii w napięciu zasilania podstacji po stronie SN, szczególnie przy pracy filtra z dwoma i więcej zespołami, o różniących się charakterystykach czy zasilanych różnymi liniami SN. Dlatego w artykule przedstawiono wyniki analiz teoretycznych charakterystyk tłumienia wyższych harmonicznych przez różne układy filtrów, a następnie analizy symulacyjne efektywności zastosowania różnych układów filtrów we współpracy z prostownikami trakcyjnymi.

## Analiza efektywności tłumienia różnych układów filtrów wygładzających na podstawie charakterystyki tłumienia

Do oceny efektywności zastosowania filtrów różnych konfiguracji opracowano charakterystyki tłumienia (stosunek napięcia na wyjściu  $U_{wy}$  do napięcia na wejściu filtra  $U_{we}$ ) różnych układów filtrów. Filtr jest bardziej efektywny, gdy stosunek ten jest mniejszy.

Przedstawione na rysunkach 2–4 charakterystyki różnych układów filtrów wskazują na nieznacznie wzmacnianie harmonicznej 100 Hz, występującej w przypadku asymetrii zasilania. Filtry z członem rezonansowym efektywnie tłumią harmoniczną o częstotliwości członu rezonansowego, ale wzmacniają (lub nie tłumią) pewnych harmonicznych (między częstotliwościami członów rezonansowych) i wymagają okresowego dostrajania. Filtry LC mają charakterystykę dolnoprzepustową i nie wymagają strojenia, ale niezbędna jest dość duża pojemność 400–1000  $\mu$ F w celu efektywnego tłumienia niższych harmonicznych.

## Analiza symulacyjna efektywności filtrów wygładzających w podstacjach zasilanych napięciem odkształconym przy pracy w podstacjach 2-zespołowych prostownikowych

Przeanalizowano efektywność zastosowania filtrów w podstacjach zasilanych napięciem odkształconym i asymetrycznym. Dopuszczalne poziomy odkształceń i asymetrii dla węzłów zasilających SN według [12]:

- THD U – 8%,
- 5 harmonicznej – 6%,
- 7 harmonicznej – 5%,
- 11 harmonicznej – 3,5%,
- 13 harmonicznej – 3%,
- do 2% asymetrii napięć zasilających.

Pomiary potwierdzają występowanie zakłóceń w napięciu zasilającym podstację trakcyjną. Na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiarów prądów filtra w jednej z podstacji trakcyjnych, w której ulegały przepaleniu bezpieczniki filtra. Przyczyną było

występowanie dużej wartości niecharakterystycznej dla zespołu 12-pulsowego harmonicznej 300 Hz (efekt występowania w SN zasilającym PT 5 harmonicznej).

Do analiz przyjęto jako warunki odniesienia następujące wartości zakłóceń w sieci SN, znacznie poniżej wartości dopuszczalnych:

- 1% asymetrii napięcia zasilającego,
- 2% wartości skutecznej 5-harmonicznej napięcia występującej sieci na poziomie 15 kV,
- dodatkowo przyjęto zasilanie z jednego transformatora 110 V/15 dwóch podstacji trakcyjnych, w których pracowały odpowiednio: 2 zespoły PK 17 (podstacja oznaczona jako BZ), 2 zespoły PD12 (podstacja oznaczona jako ZY), przy obciążeniu podstacji prądem 1,5 kA.

### Zastosowanie w podstacjach dotychczas stosowanych filtrów rezonansowych

Przyjęto stosowanie w PT BZ: dławików 4 mH indywidualnie z każdym zespołem i typowego filtra rezonansowego (dla częstotliwości: 300, 600, 900 i 1200 Hz oraz członu aperiodycznego  $C = 50 \mu\text{F}$ ), a w PT ZY: dławików 1,8 mH indywidualnie i wspólnego filtra rezonansowego (dla częstotliwości: 600 i 1200 Hz) oraz członu aperiodycznego  $C = 100 \mu\text{F}$ .

Obliczone napięcie zakłócające psfometryczne na wyjściu zespołów analizowanych podstacji podano w tabeli 1. Jak można zauważyć dopuszczalne napięcie zakłócające na wyjściu podstacji z prostownikami 12-pulsowymi ZY (limit 16,5 V) zostało przekroczone!

Tabela 1

### Napięcie zakłócające

Typ zespołu/podstacja	Napięcie zakłócające	
	przed filtrem	za filtrem
2xPK17/BZ	94,90	10,41
2xPD12/ZY	32,10	17,10

### Zastosowanie w podstacjach filtrów typu LC (gamma)

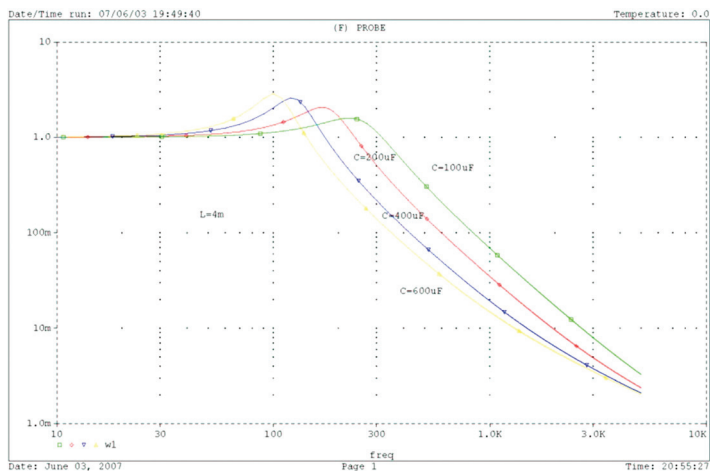
Przyjęto stosowanie w PT BZ oraz PT ZY: dławików 4 mH indywidualnie z każdym zespołem i grupowo na 2 zespoły baterii  $C = 600 \mu\text{F}$ . Na rysunku 10 przedstawiono porównanie charakterystyk tłumienia filtra grupowego LC z dotychczas stosowanym w podstacji 12-stopulsowej grupowym filtrem rezonansowym.

Obliczone napięcie zakłócające (psfometryczne) na wyjściu zespołów przy stosowaniu filtra LC w różnych warunkach zakłóceń napięcia zasilającego podstacji zestawiono w tabelach 2–5. Napięcie zakłócające dla analizowanych warunków z filtrami LC jest znacznie niższe niż dopuszczalna wartość 16,5 V dla podstacji zarówno 6- jak i 12-pulsowej i niższe niż dla podstacji pracujących z filtrami rezonansowymi dotychczas stosowanymi zarówno 6- (o ok. 7%), jak również bardzo znacząco dla 12-pulsowych. Napięcie zakłócające dla filtra LC wynosi 5 V, podczas gdy dla filtra rezonansowego dotychczas stosowanego: 17,1 V (por. tab. 1 i 2). Filtry LC są także efektywne przy wzroście zakłóceń w napięciu zasilającym (tab. 3–5).

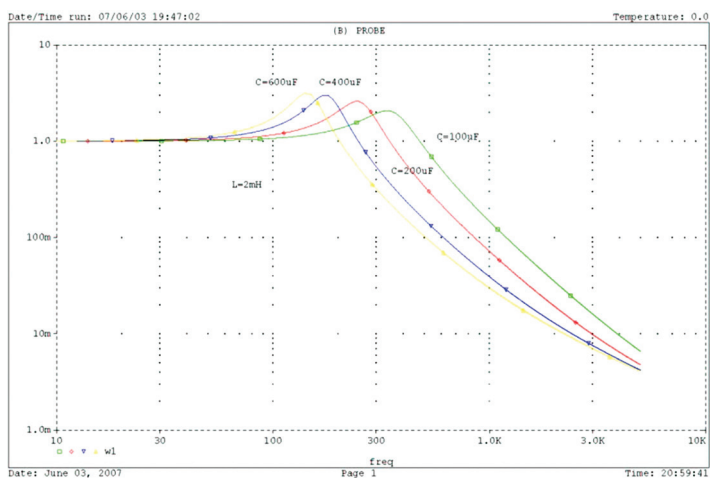
Tablica 2

### Zakłócenia napięcia zasilającego: 1% asymetrii, 2% 5. harmonicznej

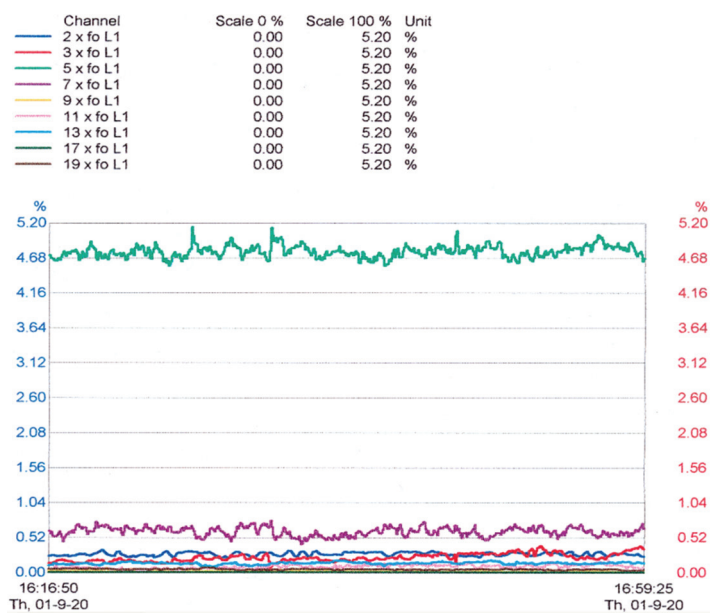
Typ zespołu/podstacja	Napięcie zakłócające	
	przed filtrem	za filtrem
2xPK17/BZ	94,2	9,7
2xPD12/ZY	41,4	5,0



Rys. 3. Charakterystyki tłumienia filtra LC szeregowo indukcyjność  $L = 4 \text{ mH}$ , człon równoległy: kondensator  $C$  o różnych wartościach pojemności od 100 do 600  $\mu\text{F}$



Rys. 4. Charakterystyki tłumienia filtra LC dla dwóch zespołów zastępcza indukcyjność 2 mH, człon równoległy: kondensator  $C = 100\text{--}600 \mu\text{F}$



Rys. 5. Przebieg współczynnika odkształceń nieliniowych THDU na szynach 15 kV w PT przy pracującej PT (na jałowo), widoczna dominująca 5 harmoniczna



Tablica 3

**Zakłócenia napięcia zasilającego: 1% asymetrii, 5% 5. harmonicznej**

Typ zespołu/podstacja	Napięcie zakłócające	
	przed filtrem	za filtrem
2xPK17/BZ	96,8	10,01
2xPD12/ZY	48,63	7,95

Tablica 4

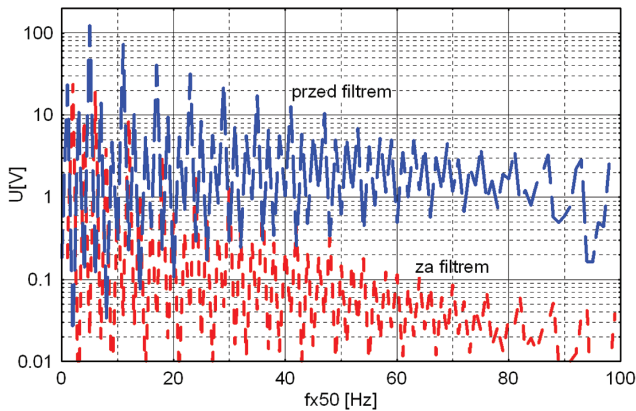
**Zakłócenia napięcia zasilającego: 1% asymetrii, 6% 5. harmonicznej**

Typ zespołu/podstacja	Napięcie zakłócające	
	przed filtrem	za filtrem
2xPK17/BZ	98,89	10,41
2xPD12/ZY	52,36	9,12

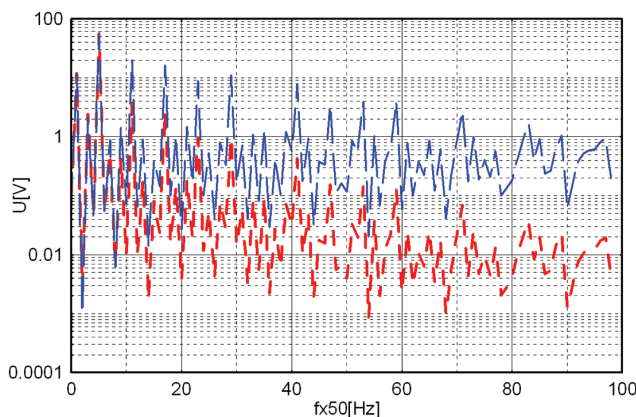
Tablica 5

**Zakłócenia napięcia zasilającego: 1% asymetrii, 6% 5. harmonicznej, 2% 7. harmonicznej**

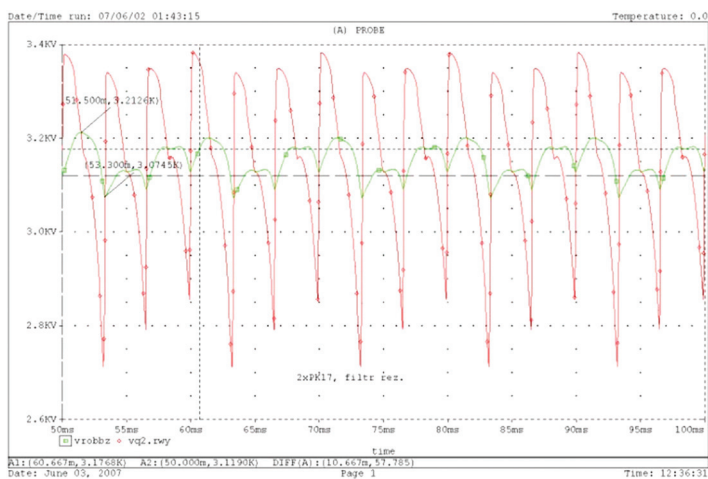
Typ zespołu/podstacja	Napięcie zakłócające	
	przed filtrem	za filtrem
2xPK17/BZ	99,75	10,75
2xPD12/ZY	54,62	9,43



Rys. 6. Harmoniczne napięcia wyjściowego (przed i za filtrem) z PT BZ – 2 zespoły PK17, filtry rezonansowe



Rys. 7. Harmoniczne napięcia wyjściowego (przed i za filtrem) z PT BZ – 2 zespoły PD12, filtry rezonansowe



Rys. 8. Napięcie wyjściowe z PT BZ – 2xPK17 przed i za filtrem, filtr efektywny w warunkach zakłóceń napięcia zasilania podstacji

**Podsumowanie**

Na podstawie wyników przeprowadzonych analiz, wcześniejszych badań i doświadczeń z eksploatacji filtrów można wyprowadzić następujące wnioski w odniesieniu do podstacji trakcyjnych zasilanych napięciem średnim.

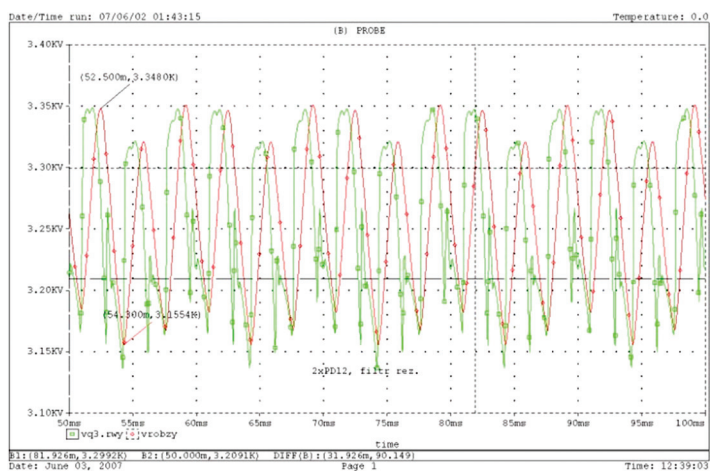
1. Dobór parametrów filtra do podstacji powinien być wykonywany wraz z pomiarem jakości energii dostarczanej z sieci zasilającej w warunkach występowania największych zaburzeń,
2. Sugerowane jest stosowanie w nowych podstacjach trakcyjnych zasilanych napięciem średnim filtrów LC z dławikami o większych wartościach indukcyjności niż dotychczas stosowane wartości 1,8 mH. Filtry LC nie wymagają strojenia i mają wyższą efektywność niż filtry rezonansowe w paśmie częstotliwości powyżej ostatniego członu rezonansowego (1,3–2,4 kHz, pasmo istotne ze względu na prawidłowość pracy obwodów torowych) [3, 19, 23]. Ponadto w pasmach między członami rezonansowymi w filtrach rezonansowych występują wzmocnienia (lub znaczące zmniejszenie tłumienia) pewnych harmonicznych, co jest niekorzystne szczególnie w przypadku zasilania podstacji napięciem odkształconym i asymetrycznym (obecnie są to bardzo częste zjawiska),
3. Celowa wydaje się modernizacja istniejących filtrów w podstacjach z prostownikami 12-stopulowymi, tak aby filtry były efektywne przy zasilaniu napięciem odkształconym i przy pracy kilku zespołów prostowników.

Od kilku lat w PT Mińsk Mazowiecki zasilanej napięciem 15 kV z powodzeniem pracuje prototyp filtra LC wykonany przez firmę Elester PKP Sp. z o.o. na zlecenie PKP Energetyka S.A. Przewidywane jest stosowanie tego typu filtra w modernizowanych i nowych podstacjach trakcyjnych zasilanych napięciem średnim.

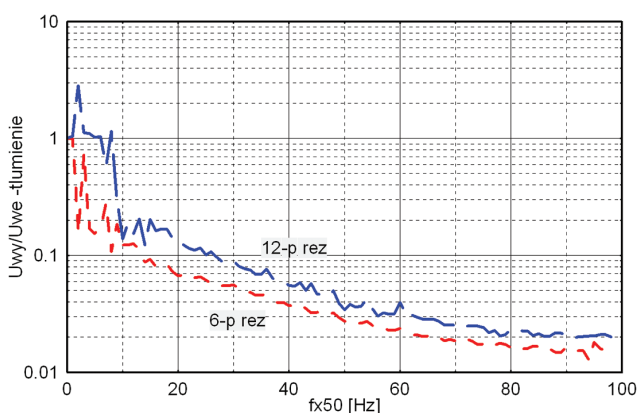
**Literatura**

[1] Altus J., Novak M., Otcenasova A., Pokorny M., Szlag A.: *Quality parameters of electricity supplied to electric railways*. Scientific Letters of the University of Žilina-Communications, No 2-3/2001.  
 [2] Capasso A., Morelli V.: *Elektryfikacja nowych linii kolejowych wysokich prędkości we Włoszech*. Technika Transportu Szynowego 2/1996.  
 [3] Durzyński Z., Łatowski M.: *Wymagania PKP w zakresie zakłóceń elektromagnetycznych na tle innych zarządów kolei*. KN-T Oddziaływanie trakcji elektrycznej na środowisko. Zakopane, 14–16 X 1999.

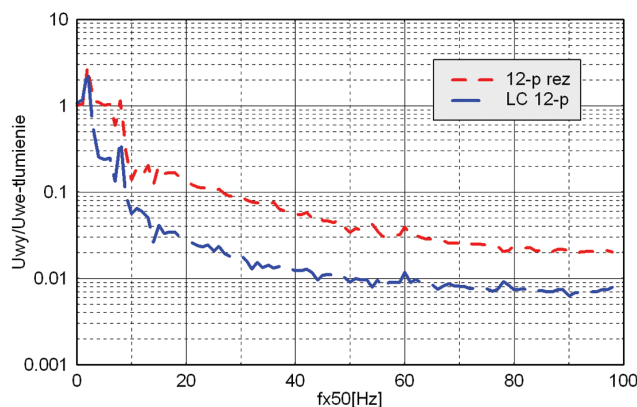
- [4] Figurzyński Z.: *Przekształtniki T1*. 1956.
- [5] *Fourth Vacation School on Electric Traction Systems*. IEE Power Division, 1997.
- [6] Decyzja Komisji UE 2008/284/WE z 6 marca 2008 r. dotycząca specyfikacji technicznej interoperacyjności podsystemu „Energia” trans-europejskiego systemu kolei dużych prędkości C(2008) 807.
- [7] Maciołek T., Mierzejewski L., Szela A.: *Wyłączanie zwarć w systemie trakcji elektrycznej prądu stałego poprzez wyłączniki szybkie i wyłączniki mocy*. Technika Transportu Szynowego 3/2001.
- [8] Mierzejewski L., Szela A.: *Filtry wygładzające w podstacjach kolejowych prądu stałego 3 kV*. Technika Transportu Szynowego 1-2/2000.
- [9] Mierzejewski L., Szela A.: *An analysis of disturbances in power utility systems caused by traction rectifier substation*. COMPRAIL'96 Conference, Berlin, 19–21 VIII 1996.
- [10] Mierzejewski L., Szela A. i inni: *Koncepcja wprowadzenia jednostopniowej transformacji napięcia dla podstacji trakcyjnych linii CMK*. Praca PW na zlecenie DG PKP, 1996–1997.
- [11] Mierzejewski L., Szela A., Maciołek T. i inni: *Badania zespołu prostownikowego PK17+PT12 na podstacji PKP w Cieninie*. Praca na zlecenie ABB-Industry, 1996. Sprawozdanie z pomiarów.
- [12] PN-EN 50160: 2008 *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych*.
- [13] Patent RP 186 399 *Filtr aperiodyczny i sposób wyznaczania parametrów filtra prostowników trakcji elektrycznej oraz patent dodatkowy nr 193037*.
- [14] Rozporządzenia ministra gospodarki z 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego dla podmiotów zaliczanych do grup przyłączeniowych I i II z późniejszymi zmianami z 18 lutego 2008 r. i 21 sierpnia 2008 r.
- [15] *Standardy techniczne. Szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości Vmax 200 km/h (dla taboru konwencjonalnego)/250 km/h (dla taboru z wychylnym pudłem)*. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., 2010 r.
- [16] *Studium układu zasilania linii kolejowej E-20 odcinek: Kunowice – Warszawa*. Projekt PHARE, 1996–1997, Wykonawcy ITALFERR i Politechnika Warszawska.
- [17] Szela A., Mierzejewski L.: *Ground Transportation Systems: Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. Supplement 1, s. 169–194, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [18] Szela A., Mierzejewski L.: *Modelling and verification of simulation results in computer aided analysis of electric traction systems*. VII International Conference „Computer in Railways”, COMPRAIL'2000. 11-13 IX, 2000, Bologna.
- [19] Szela A., Steczek M.: *Analysis of input impedance frequency characteristic of electric vehicles with a.c. motors supplied by 3 kV DC system for reducing disturbances in signalling track circuits caused by the harmonics in the vehicle's current*. s. 29-33, R. 89, Nr 3a/2013.
- [20] Szela A.: *Zakłócenia w systemie elektroenergetycznym powodowane eksploatacją prostownikowej podstacji trakcyjnej*. VI Konferencja Trakcji Elektrycznej SEMTRAK'94.
- [21] Szela A. Mierzejewski L.: *Application of computer techniques in introduction of a new power supply system with 110 kV/3 kV DC rectifiers*. 4th Int. Conference ELEKTRO'2001, University of Žilina, Slovakia, 22–23 May, 2001.
- [22] Wdowiak J., Mierzejewski L., Szela A.: *Projektowanie układów zasilania trakcji elektrycznej systemu prądu stałego – podstacje trakcyjne*. WPW, Warszawa, 1999.
- [23] Zajac W., Szela A.: *Harmonic distortion caused by suburban and underground rolling stock with DC motors*. International Power Electronics Congress CIEP'96, Mexico, October 14-17, 1996



Rys. 9. Napięcie wyjściowe z PT ZY- 2xPD12 przed i za filtrem, widać nieefektywność filtra w warunkach napięcia odkształconego i asymetrii zasilania



Rys. 10. Tłumienie przez filtry odpowiednio z podstacją 6- (6-p rez) i 12-pulsową, zauważalna niska efektywność i wzmacnianie przez filtr zespołów 12-pulsowych niskich harmonicznych



Rys. 11. Porównanie charakterystyki dotychczas stosowanego filtra rezonansowego (12-rez) z zespołem 12-pulsowym i filtra LC (LC 12-p), zauważalne lepsze tłumienie filtra LC przy zasilaniu podstacji napięciem odkształconym i asymetrycznym

Adam Szela, Tadeusz Maciołek  
 Politechnika Warszawska, Instytut Maszyn Elektrycznych  
 Zakład Trakcji Elektrycznej