

Wpływ zakłóceń komutacyjnych na analizę harmoniczną w prądzie trakcyjnym

Juliusz FURMAN¹, Andrzej BIAŁOŃ²

Streszczenie

Zjawiska komutacyjne, związane z procesami zmiany wielkości mocy pobieranej lub oddawanej przez pojazd, mają wpływ na widmo częstotliwości zawartych w prądzie trakcyjnym. W kontekście metody oceny zaburzeń generowanych do sieci trakcyjnej z zastosowaniem analizy FFT, niniejszy artykuł przedstawia wpływ wybranych zjawisk fizycznych na wyniki tej analizy. W artykule przedstawiono również opis stanowisk do pomiaru zakłóceń generowanych do sieci trakcyjnej. Pokazano rezultaty pomiarów i obliczeń charakterystyki częstotliwościowej symulowanych sygnałów oraz sygnałów zmierzonych w warunkach rzeczywistych w czasie badań pojazdu trakcyjnego, przydatnych do oceny wpływu zakłóceń komutacyjnych na analizę zawartości harmoniczną w prądzie trakcyjnym.

Słowa kluczowe: zakłócenia, EMC, trakcja, interoperacyjność

1. Wprowadzenie

Zagadnienia dotyczące zaburzeń elektromagnetycznych, wprowadzanych przez urządzenia energoelektroniczne stosowane w kolejnictwie, są przedmiotem licznych krajowych i międzynarodowych publikacji. Problematyka w tym zakresie jest rozległa ze względu na różnorodność zjawisk fizycznych, które należy uwzględnić przy tworzeniu rozwiązań technicznych (zjawiska rezonansowe, zaburzenia powodowane nieliniowością charakterystyk użytych podzespołów, propagacja zaburzeń w sieci zasilającej, traktowanej jako linia długa itp.) [6, 15], ze względu na różnorodność rozwiązań układów zasilania trakcyjnego stosowanych w stałej infrastrukturze oraz ze względu na różnorodność systemów sterowania mocą w pojazdach trakcyjnych [12, 14].

Większość badań i publikacji krajowych odnosi się do tej samej problematyki co publikacje światowe, przy czym najczęściej są podejmowane zagadnienia dotyczące stosowanej w Polsce trakcji prądu stałego 3 kV DC. Ze względu na relatywnie niskie dopuszczalne wartości graniczne zaburzeń dla urządzeń sterowania ruchem kolejowym w Polsce [2], częstym tematem publikacji są analizy i badania dotyczące zawartości harmoniczną w prądzie trakcyjnym [7, 17], zagadnienia redukcji zaburzeń za pomocą pasywnych [16, 17] i aktywnych fil-

trów [17], analizy i badania dotyczące struktury układu zasilania i metod sterowania mocą w pojeździe trakcyjnym [12, 13], analizy i badania wielkości pól magnetycznych generowanych przez pojazd w aspekcie ich oddziaływania na urządzenia kontroli niezajętości toru z czujnikami koła [1, 2].

Harmoniczne napięcia i prądy obecne w sieci trakcyjnej oddziałują bezpośrednio na urządzenia infrastruktury kolejowej, w szczególności na urządzenia sterowania ruchem kolejowym. Wyższe harmoniczne w prądzie trakcyjnym wpływają negatywnie na podzespoły podstacji trakcyjnych, a przez transformatory trakcyjne na elementy publicznej sieci elektroenergetycznej, powodując degradację ich parametrów [5, 7]. Ponadto, mogą one wprowadzać zaburzenia do urządzeń włączonych do publicznych i kolejowych sieci energetycznych.

Kolejowe regulacje prawne, których celem jest wdrożenie interoperacyjności systemu kolei w Europie, wymagają potwierdzenia kompatybilności między wprowadzanym do eksploatacji taboru kolejowym i urządzeniami infrastruktury przytorowej. Zróżnicowanie istniejących rozwiązań technicznych i przepisów kolejowych w różnych krajach Europy, uniemożliwia zdefiniowanie w niektórych obszarach jednolitych wymagań. W tym zakresie rozwiązaniem jest wprowadzenie aspektów technicznych w posta-

¹ Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Zakład Sterowania Ruchem i Teleinformatyki; e-mail: jfurman@ikolej.pl.

² Dr inż.; Instytut Kolejnictwa, Zakład Sterowania Ruchem i Teleinformatyki; e-mail: abialon@ikolej.pl.

ci „punktów otwartych”, które zgodnie z art. 5 ust. 6 dyrektywy 2008/57/WE podlegają przepisom krajowym, obowiązującym w poszczególnych państwach członkowskich. Prowadzone przez Instytut Kolejnic-twa badania poziomu zaburzeń generowanych przez pojazdy trakcyjne do sieci trakcyjnej, dostarczyły wiele doświadczeń i umożliwiły interpretację wpływu niektórych zdarzeń eksploatacyjnych na rejestrowane poziomy zaburzeń elektromagnetycznych.

Jednym z istotnych zdarzeń są zjawiska komutacyjne związane z procesami zmiany wielkości pobieranej lub oddawanej przez pojazd mocy. W kontekście metody oceny zakłóceń generowanych do sieci trakcyjnej z zastosowaniem analizy FFT, niniejszy artykuł przedstawia wpływ zakłóceń komutacyjnych na wyniki tej analizy.

2. Podstawa prawna badań zakłóceń elektrycznych w Polsce

2.1. Prawodawstwo Unii Europejskiej

Kolejowe regulacje prawne wynikają z uzgodnień Traktatu ustanawiającego Unię Europejską. Celem tych regulacji jest umożliwienie mieszkańcom Unii Europejskiej, podmiotom gospodarczym i samorządowym, pełnego uczestnictwa w korzyściach wynikających z ustanowienia obszaru bez granic wewnętrznych przez poprawienie wzajemnych powiązań oraz interoperacyjności krajowych sieci kolejowych, jak również dostępu do nich. W zakresie dotyczącym sieci transeuropejskich, artykuł 155 Traktatu Wspólnota:

- ustanawia zbiór wytycznych obejmujących cele, priorytety i ogólne kierunki działań przewidzianych w dziedzinie sieci transeuropejskich (wytyczne te wskazują projekty będące przedmiotem wspólnego zainteresowania);
- urzeczywistnia każdy środek, który może okazać się niezbędny do zapewnienia współdziałania między sieciami, w szczególności w dziedzinie normalizacji technicznej.

Realizacją wytycznych zajmuje się Parlament Europejski. Jednocześnie, wytyczne i projekty będące przedmiotem wspólnego zainteresowania, które dotyczą terytorium jakiegoś Państwa Członkowskiego, wymagają zgody tego Państwa.

Dyrektywa 2008/57/WE w sprawie interoperacyjności systemu kolei we Wspólnocie definiuje Techniczne Specyfikacje Interoperacyjności przeznaczone dla różnych podsystemów kolejowych.

Wdrożeniem dyrektyw na terenie UE zajmuje się Komisja Europejska, która przez rozporządzenia, a także decyzje wprowadza Techniczne Specyfikacje

Interoperacyjności (TSI) i zleca ich opracowanie do Europejskiej Agencji Kolejowej ERA. TSI wdrażają normalizację techniczną oraz umożliwiają osiągnięcie interoperacyjności systemu kolei w Europie.

Zgodnie z art. 17 ust. 2 dyrektywy 2008/57/WE weryfikacja interoperacyjności, zgodnie z zasadniczymi wymaganiami, podsystemu strukturalnego tworzącego system kolei, jest dokonywana przez odniesienie do TSI. Przepisy krajowe zawierające warunki, które muszą być spełnione w celu weryfikacji interoperacyjności oraz procedury oceny i weryfikacji zgodności, niezbędne do stosowania przepisów krajowych, są przekazywane innym państwom członkowskim i Komisji Europejskiej.

2.2. Prawodawstwo krajowe

W Polsce, przepisy krajowe w zakresie kolei wynikają z następujących aktów prawnych:

- Ustawy z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym (z późniejszymi zmianami) [18];
- Rozporządzenia 720 Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 13 maja 2014 r. w sprawie dopuszczania do eksploatacji określonych rodzajów budowli, urządzeń i pojazdów kolejowych [11];
- Listy Prezesa Urzędu Transportu Kolejowego w sprawie właściwych krajowych specyfikacji technicznych i dokumentów normalizacyjnych, których zastosowanie umożliwia spełnienie zasadniczych wymagań dotyczących interoperacyjności systemu kole [8].

Ustawa o transporcie kolejowym [18] dokonuje wdrożenia dyrektyw Wspólnot Europejskich. Ustawa zobowiązuje ministra właściwego ds. transportu do wydania rozporządzenia dotyczącego opracowania wykazu, właściwych krajowych specyfikacji technicznych i dokumentów normalizacyjnych, których zastosowanie umożliwia spełnienie zasadniczych wymagań dotyczących interoperacyjności systemu kolei.

W rozporządzeniu 720 [11] w sprawie dopuszczania do eksploatacji określonych rodzajów budowli, urządzeń i pojazdów kolejowych, minister właściwy do spraw transportu, określił zakres badań technicznych, koniecznych do wydania świadectwa dopuszczenia do eksploatacji typu oraz stwierdzenia zgodności z typem, a w § 14 1., dotyczącym zakresu badań technicznych dla wszystkich typów pojazdów kolejowych, w punkcie 8 rozporządzenia, wymienił konieczność przeprowadzenia badania pojazdu kolejowego w zakresie emitowanych zakłóceń elektrycznych, elektromagnetycznych i radioelektrycznych.

W Polsce, punkty otwarte dotyczące weryfikacji w zakresie krajowym są zawarte w Liście prezesa UTK. W zakresie krajowych wymagań EMC, punktem otwartym są między innymi zagadnienia wspól-

pracy pojazdu ze stosowanymi w Polsce systemami sterowania ruchem kolejowym w aspekcie funkcji wykrywania pociągów przez obwody torowe.

2.3. Specyfikacje techniczne obowiązujące w zakresie badań kompatybilności pojazdów z systemami kontroli niezajętości toru

Lista prezesa UT [8] zawiera krajowe wymagania, specyfikacje techniczne i dokumenty normalizacyjne, których spełnienie umożliwia realizację zasadniczych wymagań dotyczących interoperacyjności systemu kolei.

W zagadnieniach, dotyczących badania i oceny zakłóceń elektromagnetycznych generowanych przez pojazd do sieci trakcyjnej oraz zagadnień kompatybilności z systemami wykrywania pociągów za pomocą obwodów torowych, Lista Prezesa UTK zaleca stosowanie specyfikacji

- z normy PN-EN 50238:2003: Zastosowania kolejowe – Kompatybilność pomiędzy taborem a urządzeniami wykrywania pociągów [9];
- z CLC/TS 50238-2:2015: Kompatybilność pomiędzy taborem a urządzeniami wykrywania pociągów. Część 2: Kompatybilność z obwodami torowymi [4];
- z normy PN-EN 50617-1: Zastosowania kolejowe, Techniczne parametry systemów wykrywania pociągów dotyczące interoperacyjności transeuropejskiego systemu kolejowego, Część 1: Obwody torowe [10]. Specyficzne krajowe wymagania parametryczne w tym zakresie zawarte są w załączniku S-02 do Listy Prezesa UTK [8], jako dopuszczalne parametry zakłóceń dla urządzeń sterowania ruchem kolejowym.

Specyfikacja według normy PN-EN 50238:2003 [9] obejmuje wszystkie istotne wymagania zasadnicze podane w załączniku III do dyrektywy 2008/57/WE. Wykazanie zgodności z tą normą zapewnia jeden ze sposobów potwierdzenia zgodności z określonymi wymaganiami zasadniczymi tej dyrektywy. Wspomniane wykazanie zgodności wymaga stosowania również innych wymagań i innych dyrektyw WE.

2.4. Dopuszczalne parametry zakłóceń dla urządzeń sterowania ruchem kolejowym

Załącznik S-02 do Listy Prezesa UTK przedstawia w formie tablic oraz wykresów wymagania, dotyczące wartości dopuszczalnych prądów lub dopuszczalnych napięć zakłócających, w zakresie częstotliwości roboczych stosowanych w Polsce obwodów kontroli niezajętości toru. Wymagania wartości dopuszczalnych

prądów dotyczą klasycznych obwodów torowych (50 Hz), bezzłączowych obwodów torowych typu SOT i czujników przejazdu pociągu EOC, a wymagania wartości dopuszczalnych napięć dotyczą elektronicznych obwodów nakładanych EON-3 i czujników przejazdu pociągu EON-6.

Uwzględniając zakładaną w Polsce liczbę i strukturę pojazdów kolejowych, które mogą oddziaływać na wartość prądu zakłócającego oraz na geometryczny sposób sumowania się zakłóceń, stworzono odpowiednio do zakresów częstotliwości roboczych obwodów torowych czujników EOC, wymagania na wartości dopuszczalne prądów i napięć zakłócających od lokomotyw i elektrycznych zespołów trakcyjnych oraz od statycznych przetwornic wagonowych [2]. Wymagania zawarte w Liście Prezesa UTK dotyczą zakłóceń o czasie trwania dłuższym niż 200 ms.

3. Metodyka prowadzenia badania zakłóceń generowanych do sieci trakcyjnej

Badania zakłóceń generowanych do sieci trakcyjnej, przez pojazd trakcyjny dla prędkości do 160 km/h, są prowadzone na Okręgu Doświadczalnym w Żmigrodzie, zgodnie ze specjalną procedurą badawczą oraz z zaleceniami zawartymi w normie PN-EN 50238 [9], Technicznej specyfikacji CLC/TS 50238-2 [4], normie PN-EN 50617-1 [10] i załączniku S-02 do Listy Prezesa [8].

Na poligonie badawczym, 12-pulsowa podstacja trakcyjna z napięciem sieci typu 3 kV DC z dwoma zespołami prostowniczymi, jest wyposażona w system filtrów wygładzających, których zadaniem jest tłumienie podstawowych harmoniczných prądów trakcyjnego. W badaniach uwzględnia się różne konfiguracje układu zasilania podstacji trakcyjnej oraz różne stany eksploatacyjne pojazdu takie, jak: praca na postoju oraz w czasie jazdy, stan normalny bez symulowanych usterek, symulowane uszkodzenia, rozruchy, hamowanie rekuperacyjne, jazdy z różnymi prędkościami.

Badania są prowadzone na podstawie przyjętego harmonogramu. Przykład harmonogramu dla pojazdu trakcyjnego, wyposażonego w 6 silników trakcyjnych, badanego do prędkości maksymalnej 120 km/h, przedstawiono w tablicy 1.

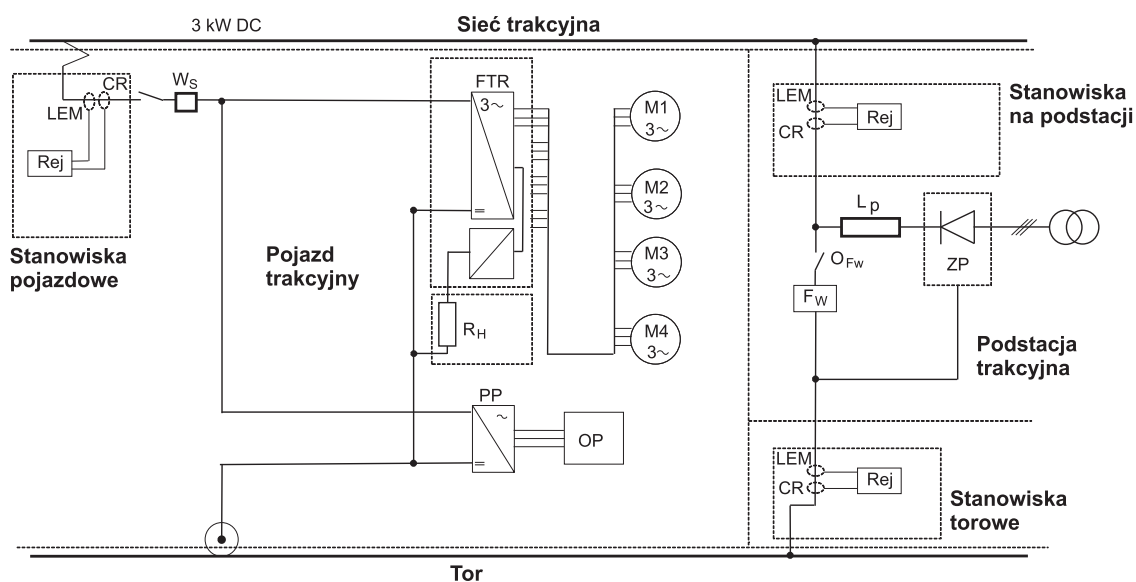
W zależności od potrzeb, pomiary mogą być prowadzone na stanowisku ruchomym na pojeździe trakcyjnym, na stanowisku stacjonarnym na przewodzie powrotnym do podstacji trakcyjnej lub na podstacji trakcyjnej, albo jednocześnie w kilku miejscach. Przykłady stanowisk pomiarowych do pomiaru harmoniczných w prądzie trakcyjnym pokazano na rysunku 1.

Tablica 1

Harmonogram badań zakłóceń generowanych przez pojazd trakcyjny

Lokomotywa w stanie normalnym					
Stan pojazdu / stan podstacji	Rozruch do V_{MAX}	$V_{const} = 40 \text{ km/h}$	$V_{const} = 80 \text{ km/h}$	$V_{const} = 120 \text{ km/h}$	Hamowanie Rekuperacyjne
Filtry wyłączone	+	+	+	+	+
Filtry załączone	+	+	+	+	+
Wyłączanie (symulacja awarii) silników trakcyjnych Rozruch lokomotywy					
Stan pojazdu / stan podstacji	1 silnik wyłączony	2 silniki wyłączone	3 silniki wyłączone	4 silniki wyłączone	5 silników wyłączonych
Filtry wyłączone	+	+	+	+	+
Filtry załączone	+	+	+	+	+
Na postoju					
Stan pojazdu / stan podstacji	Wszystkie urządzenia pokładowe załączone (pełne obciążenie)	Urządzenia pokładowe wyłączone, minimalne obciążenie			Tło
Filtry wyłączone	+	+			+
Filtry załączone	+	+			+

[Opracowanie własne].



Rys. 1. Przykłady stanowisk pomiarowych do pomiaru harmonicznych w prądzie trakcyjnym [rys. autorów]

Oznaczenia na rysunku:

Pojazd trakcyjny

- W_s – wyłącznik szybki
- Odb – odbierak prądu
- FTR – falownik trakcyjny
- R_H – grupa rezystorów hamowania
- M1, ..., M4 – silniki trakcyjne
- PP – przekształtnik dla obwodów pomocniczych
- OP – obwody pomocnicze

Podstacja trakcyjna

- ZP – zespół prostowniczy
- L_p – indukcyjność podstacji trakcyjnej
- O_{Fw} – odłącznik filtra wygładzającego
- F_w – filtr wygładzający
- TR – transformator sieciowy

Stanowiska pomiarowe

- LEM – przetwornik do pomiaru składowej stałej prądu trakcyjnego
- CR – przetwornik do pomiaru składowej zmiennej prądu trakcyjnego
- Rej – urządzenie rejestrujące

Wybór miejsca pomiaru prądu zakłócającego na stanowisku ruchomym zależy od rodzaju taboru:

1. W przypadku lokomotyw elektrycznych i elektrycznych zespołów trakcyjnych pomiary są wykonywane jak najbliżej odbieraka prądu. Wyjątkowo pomiar może być wykonany w innym miejscu przewodu głównego, pod warunkiem, że teoretycznie lub praktycznie można wykazać, że nie będzie znaczącej różnicy w wynikach.
2. W przypadku lokomotyw spalinowych, pomiary wykonuje się na pomocniczym przewodzie wysokiego napięcia.
3. W przypadku wyposażenia wagonu (na przykład przetwornicy statycznej lub urządzenia ładującego akumulatory) wykonywane są również pomiary na pomocniczym przewodzie wysokiego napięcia, w przypadku różnych elementów połączonych równolegle lub na przewodzie zasilającym urządzenie, jeśli zaangażowany jest pojedynczy element.

Przetwornikami do pomiaru prądu jest przetwornik LEM do pomiaru składowej stałej oraz cewka Rogowskiego do pomiaru składowej zmiennej w zakresie częstotliwości obwodów torowych eksploatowanych w Polsce. Przetwornik LEM mierzy sygnały w paśmie od 0 Hz do 10 kHz, natomiast cewka Rogowskiego mierzy sygnały w paśmie od 25 Hz do 1 MHz.

Na podstawie zarejestrowanych pomiarów wykonuje się analizę harmoniczną sygnału generowanego do sieci trakcyjnej przez pojazd trakcyjny dla czterech zakresów częstotliwości: 0 – 1 kHz, 1 – 3 kHz, 3 – 20 kHz i 20 – 40 kHz przy załączonych i wyłączonych filtrach na podstacji trakcyjnej. Wartości dopuszczalnych zakłóceń są zawarte w załączniku S-02 do Listy Prezesa UTK. Analiza harmoniczną wykonywana jest w oknie czasowym 200 ms. Nakładanie się sąsiednich próbek poddanych analizie harmoniczną wynosi 80%.

4. Wpływ zakłóceń o charakterze komutacyjnym na wyniki analizy harmoniczną zawartych w prądzie trakcyjnym

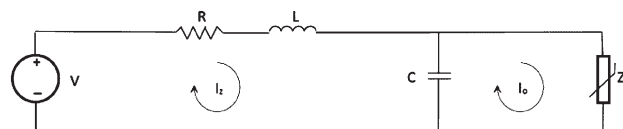
W pojeździe trakcyjnym energia trakcyjna jest przetwarzana na cele trakcyjne i pomocnicze za pomocą przekształtników trakcyjnych oraz przetwornic pomocniczych. Współczesne konstrukcje pojazdów trakcyjnych są indywidualnymi projektami producentów i z tego powodu spotyka się różnorodne rozwiązania techniczne do sterowania silnikami trakcyjnymi. Istotnym elementem konstrukcji układu na wejściu zasilania do pojazdu jest stosowanie elementów

indukcyjnych lub filtrów LC, spowalniających szybkość narastania prądu wejściowego. Kolejną wspólną cechą jest stosowanie przekształtników trakcyjnych, których zadaniem jest dostosowanie mocy zadawanej lub oddawanej przez silniki trakcyjne.

Ze względu na nieliniowy charakter obwodów, przekształtniki instalowane na pojazdach trakcyjnych powodują odkształcenia prądu w sieci trakcyjnej. Układ elektryczny w pojeździe trakcyjnym prądu stałego można traktować jako układ szeregowo-równoległy, w którym są:

- szeregowo połączone źródło zasilania (podstacja trakcyjna lub pojazd trakcyjny w trybie oddawania energii) o określonej impedancji, przez rezystancję i indukcyjność sieci zasilającej rezystancję i indukcyjność wejściową pojazdu,
- układ równolegle połączonych pojemności filtra pojazdowego i układu odbiorczego o zmiennej impedancji.

Silniki pojazdu trakcyjnego w trybie pracy prądnicowej, w czasie hamowania elektromagnetycznego, wytwarzają energię, która jest odbierana przez inne pojazdy lub jest wytracana na własnych rezystorach w postaci ciepła. Na rysunku 2 przedstawiono uproszczony schemat obwodu zasilania trakcyjnego pojazdu wyposażonego w filtr wejściowy LC, w którym może być generowane zaburzenie komutacyjne.



Rys. 2. Uproszczony schemat obwodu elektrycznego, w którym jest generowane zaburzenie komutacyjne [rys. autorów]

Oznaczenia na rysunku:

R, L, C – parametry filtra pojazdu,

V – napięcie sieci trakcyjnej (napięcie podstacji trakcyjnej albo napięcie pomiędzy odbierakiem prądu i kołami pojazdu znajdującego się w trybie oddawania energii, o określonej własnej impedancji, szeregowo połączone z rezystancją i indukcyjnością sieci zasilającej),

Z_0 – impedancja odbiornika,

I_0 – prąd odbiornika,

I_z – prąd zasilania.

Równanie napięć w obwodzie elektrycznym, którego schemat przedstawiono na rysunku 2 można opisać układem dwóch równań różniczkowych:

$$L \frac{dI_z}{dt} R I_z + \frac{1}{C} \int_0^t (I_z - I_0) dt = V \quad (1)$$

$$\frac{1}{C} \int_0^t (I_z - I_0) dt = Z_0 I_0 \quad (2)$$

Z układu równań (1) i (2) wynika, że zmiana prądu odbiornika I_0 wymusza zmianę napięcia na kondensatorze filtra pojazdu, a tym samym zmianę wartości prądu w obwodzie zasilania pojazdu. Elementy filtra pojazdowego L i C wraz z szeregowo połączoną indukcyjnością obwodu zasilania określają częstotliwość oscylacji odpowiedzi filtra na zaburzenia komutacyjne. Ich rolą jest również ograniczenie intensywności zmian prądu i napięcia w obwodach elektrycznych oraz zmniejszenie udziału harmoniczných, generowanych w prądzie trakcyjnym. Pośrednio przyczyniają się one do zmniejszenia zakłóceń oraz awarii elementów pojazdu i infrastruktury przytorowej.

Zaburzenie komutacyjne ma charakter skoku jednostkowego, które w teorii sygnałów jest opisywane sygnałami o oscylacjach gasnących. W wyniku skokowej zmiany wartości prądu obciążenia w układzie zasilania pojazdu, należy spodziewać się szerokiego widma sygnału z malejącym udziałem harmoniczných powyżej częstotliwości rezonansowej filtra pojazdowego [3].

W warunkach laboratoryjnych, w układzie pomiarowym do rejestracji zakłóceń, zarejestrowano cztery przebiegi elektryczne symulowanego skoku jednostkowego o amplitudzie 1 A: jeden z bardzo krótkim czasem narastania 9 ns (rys. 3a) oraz trzy z czasami wydłużonymi odpowiednio do 48 ms (rys. 3b), 140 ms (rys. 3c), 200 ms (rys. 3d). Analizy harmoniczných odpowiadające tym przebiegom przedstawiono na rysunku 4. Czas narastania definiowany jest jako czas, który upływa pomiędzy zmianą wartości sygnału od 0,1 do 0,9 wartości maksymalnej.

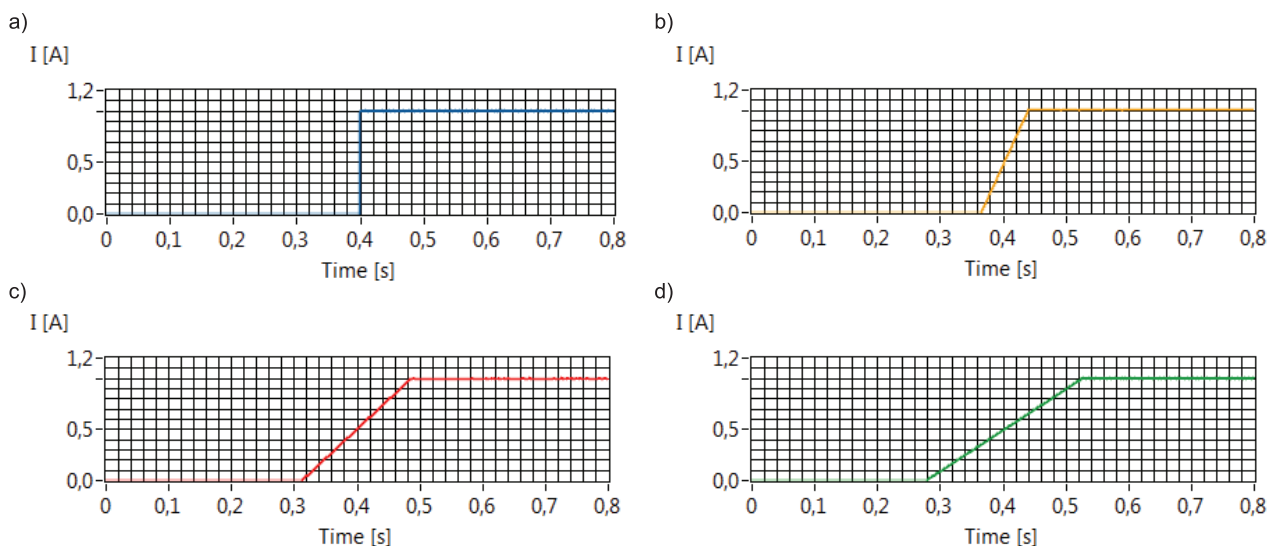
W celu dokonania oceny zmian zawartości harmoniczných w zależności od czasu narastania, anali-

zę wykonano w zwiększonym do 800 ms oknie czasowym. W prądzie o skoku jednostkowym, wartości harmoniczných maleją wraz ze wzrostem czasu narastania sygnału, jednocześnie w sygnale zmienia się rozkład zawarty w nim częstotliwości w sposób skorelowany z czasem narastania sygnału.

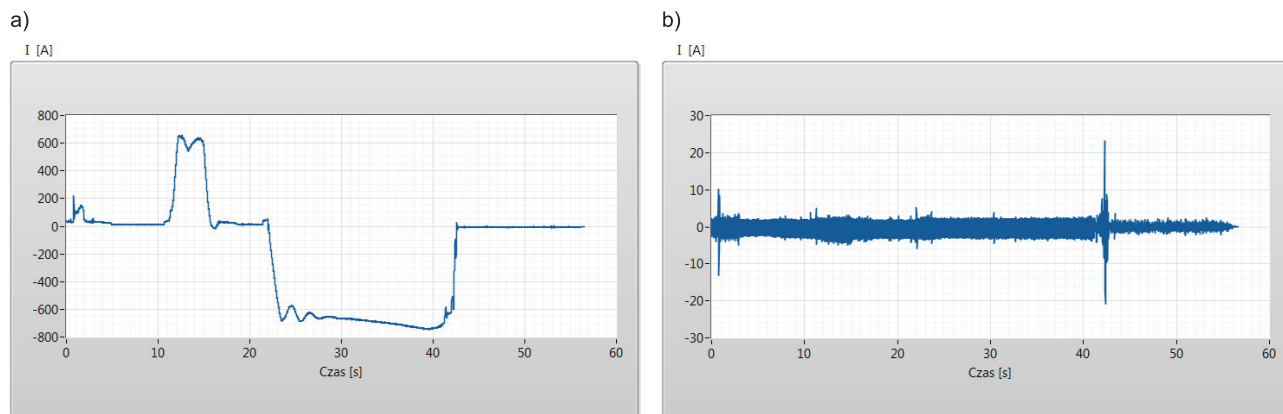
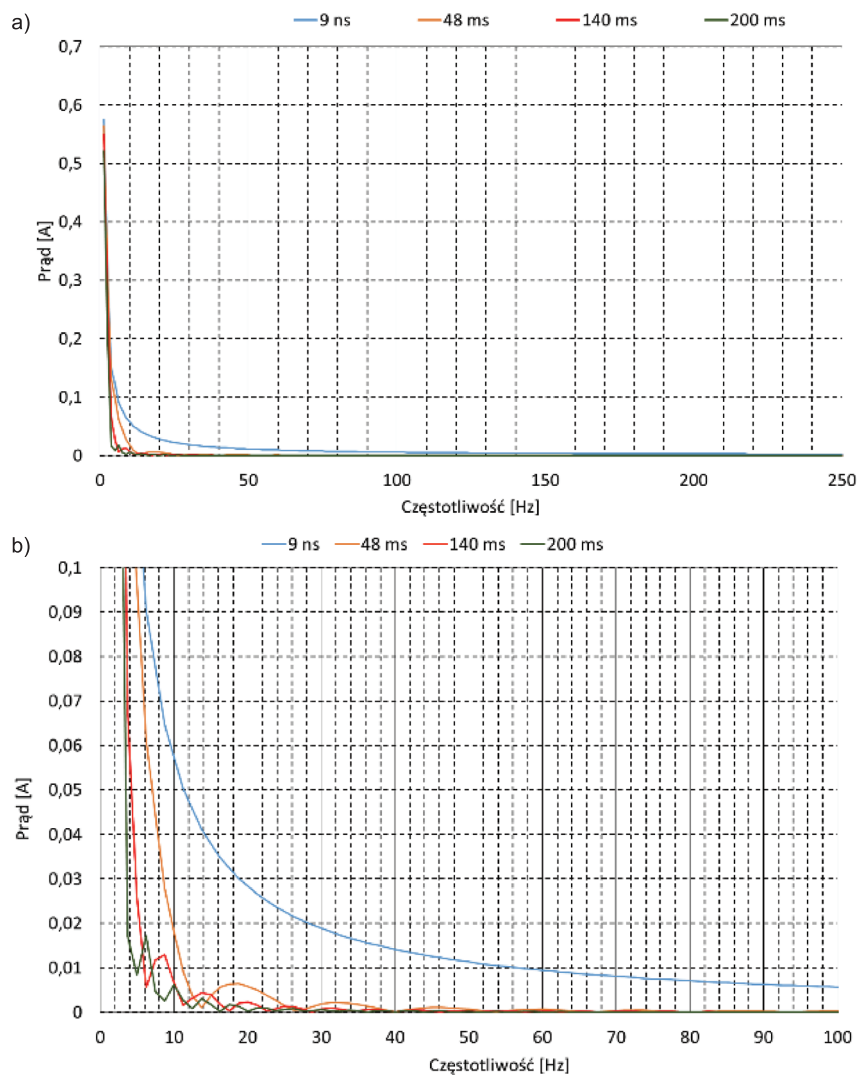
5. Wpływ zdarzeń komutacyjnych na wyniki analizy harmoniczných zawartych w prądzie trakcyjnym na przykładzie przeprowadzonych badań

W niniejszym rozdziale opisano problematykę wpływu zdarzeń komutacyjnych na wyniki analizy harmoniczných, zawartych w prądzie trakcyjnym, na przykładzie próby zarejestrowanej w czasie badań jednego z pojazdów trakcyjnych.

Na rysunku 5a przedstawiono przebieg składowej stałej prądu, a na rysunku 5b składowej zmiennej, zarejestrowanej na poligonie badawczym w próbie hamowania rekuperacyjnego, związanej z zadawaniem mocy na silniki trakcyjne pojazdu (wartości dodatnie prądu na rysunku 5a) oraz odbiorem przez inny pojazd trakcyjny mocy z silników trakcyjnych (wartości ujemne prądu na rysunku 5a). W momencie końca generowania, przez pojazd trakcyjny, prądu rekuperacyjnego do sieci trakcyjnej (około 42,5 sekund, rys. 5a), w zarejestrowanych sygnałach zidentyfikowano krótkotrwały wzrost poziomu składowej zmiennej (rys. 5b).

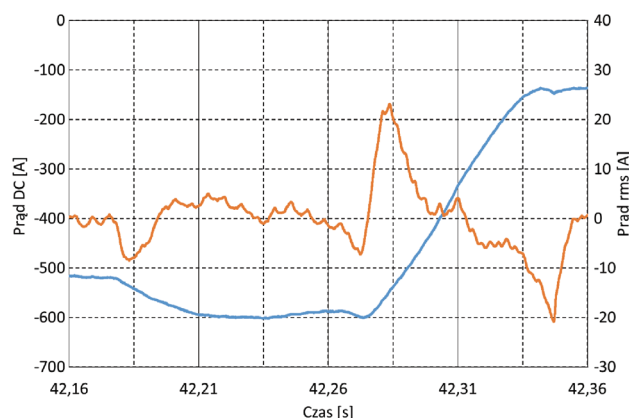


Rys. 3. Przebiegi czasowe sygnału skoku jednostkowego z czasem narastania 9 ns (a), 48 ms (b), 140 ms (c), 200 ms (d) [zrzuty ekranowe z badań własnych]



Rys. 5. Przebieg składowej stałej (a) oraz zmiennej (b) prądu trakcyjnego w próbie, w której zidentyfikowano zjawisko zakłócenia komutacyjnego [zrzut ekranowy z badań własnych]

Zaburzenie komutacyjne, dla którego przebiegi elektryczne składowych stałej i zmiennej prądu przedstawiono na rysunku 6, jest krótkotrwałe. Czas trwania od 0,1 do 0,9 wartości zmiany sygnału wynosi około 47 ms, a całkowity czas trwania stanu nieustalonego wynosi około 75 ms) i ma dynamikę dochodzącą do około 7,5 kA/s.



Rys. 6. Dynamika zmian wartości składowej stałej (krzywa niebieska) i zmiennej (krzywa pomarańczowa) w chwili wystąpienia zaburzenia komutacyjnego – długość próbki 200 ms [opracowano na podstawie danych pomiarowych z badań własnych]

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki analizy harmoniczných w zarejestrowanych na pojeździe sygnałach składowych stałej i zmiennej prądu trakcyjnego, w paśmie częstotliwości od 0 do 1 kHz. Analizę przeprowadzono osobno dla odcinków czasu od początku próby do momentu wystąpienia zdarzenia komutacyjnego (rys. 7a), dla zdarzenia komutacyjnego (rys. 7b) oraz od zdarzenia komutacyjnego do końca próby (rys. 7c). Analizę wykonano w oknie czasowym 200 ms. We fragmencie próby ze zdarzeniem komutacyjnym, wyniki potwierdziły przekroczenie wartości dopuszczalnej 1,2 A dla częstotliwości 50 Hz. Obliczone rzeczywiste wartości dla sygnału RMS wynosiły – ok. 1,36 A dla sygnału DC – 1,33 A. W pozostałych częściach próby, zarejestrowane poziomy zakłóceń w paśmie częstotliwości od 0 do 1 kHz, były mniejsze od dopuszczalnych wartości granicznych.

Obliczone harmoniczne wyższych częstotliwości przedstawiono na rysunku 8.

Przekroczenia w paśmie 1–3 kHz są efektem działania zespołu prostowniczego 12-pulsowej podstacji trakcyjnej zasilającej tor prób na poligonie badawczym i w ocenie poziomu zakłóceń generowanych przez pojazd trakcyjny nie są brane pod uwagę. Zakłócenie komutacyjne nie spowodowało zauważalnego wzrostu poziomu zakłóceń w paśmie częstotliwości powyżej 1 kHz.

Ze względu na krótkotrwały charakter zaburzenia, mniejszy niż wynosi czas reakcji obwodów torowych 50 Hz – 200 ms, uwzględniając niewielkie przekrocze-

nie wartości dopuszczalnej 1,2 A, można ten fragment sygnału wyłączyć z analizy harmoniczných.

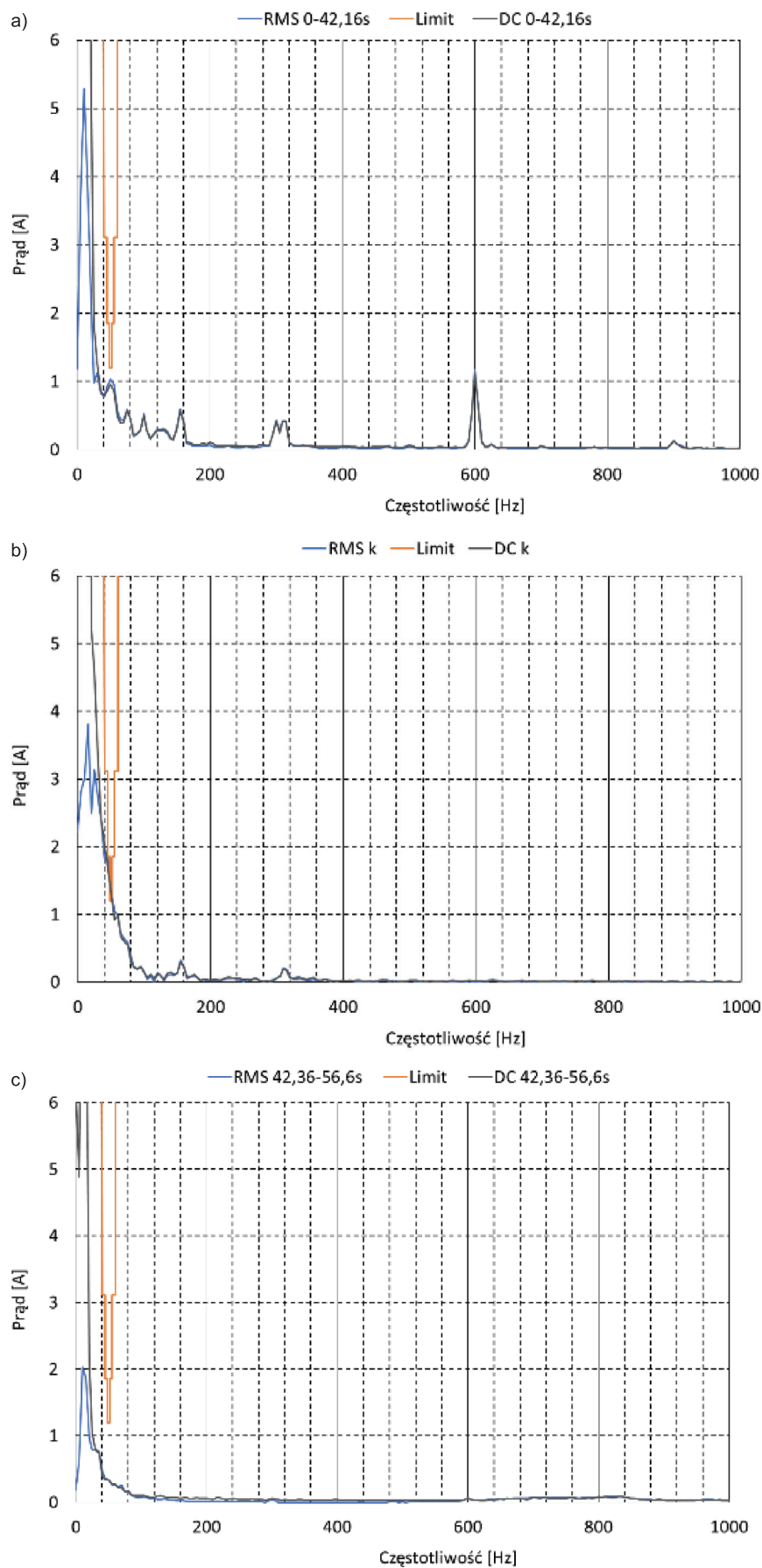
6. Wnioski

Analiza wyników pomiarów zmierzonych w warunkach symulowanych i rzeczywistych, umożliwia wyciągnięcie następujących wniosków:

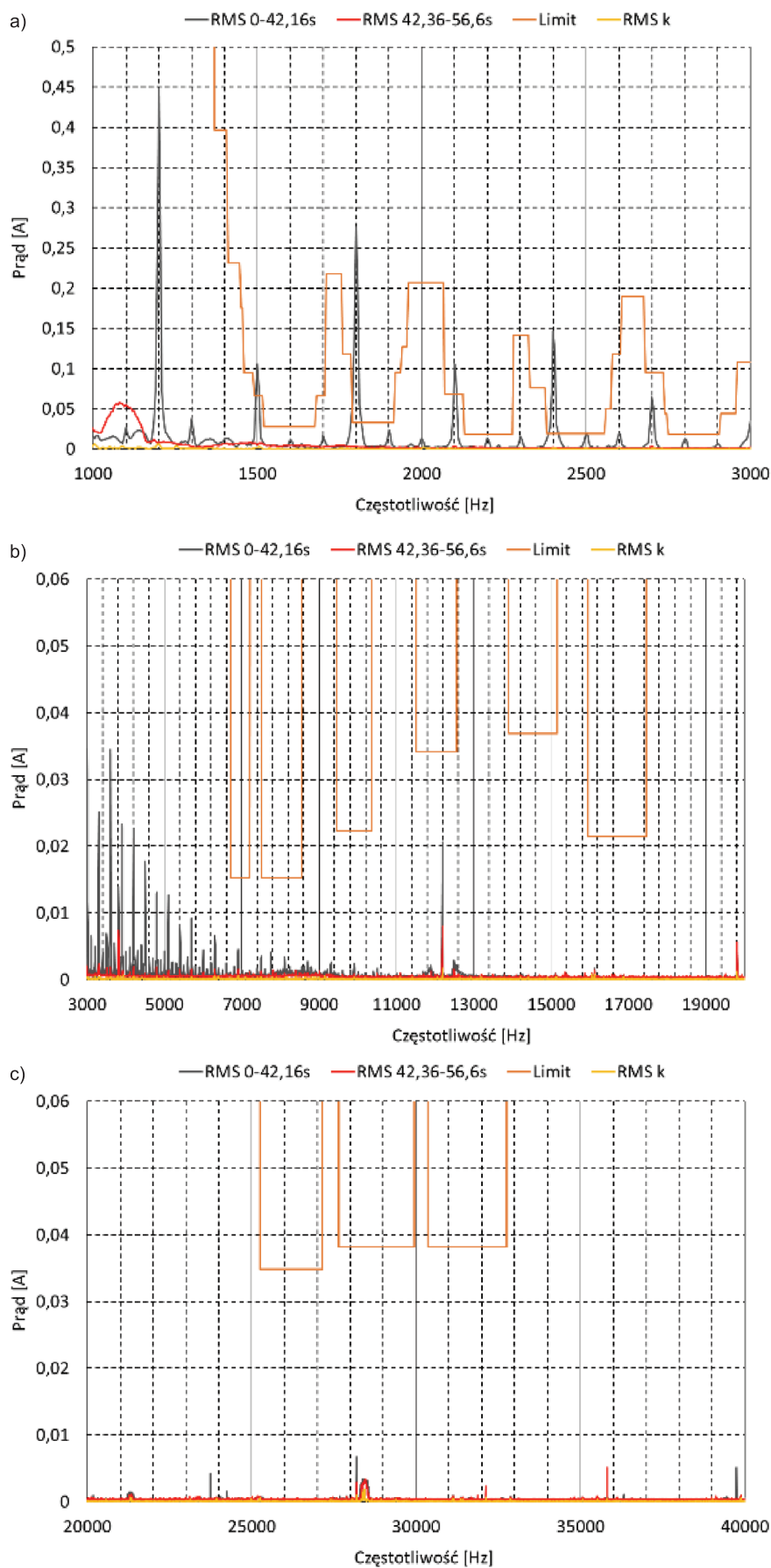
- 1) krótkotrwałe zjawiska komutacyjne zwiększają poziomy harmoniczných w prądzie trakcyjnym,
- 2) algorytmy sterowania mocą przekształtników trakcyjnych, powinny eliminować skutki krótkotrwałych zjawisk komutacyjnych w celu ograniczenia generowania harmoniczných i podharmoniczných 50 Hz,
- 3) w przypadkach incydentalnego i krótkotrwałego (< 200 ms) przekroczenia wartości dopuszczalnych można, na podstawie analizy przebiegów składowej stałej prądu trakcyjnego w dziedzinie czasu, wyłączyć z analizy FFT fragmenty rejestracji zdarzenia o charakterze komutacyjnym,
- 4) w przypadkach wątpliwych należy przeprowadzić szczegółowe badania wpływu zakłóceń generowanych przez pojazd na urządzenia srk w paśmie roboczym obwodów, dla których zidentyfikowano takie przekroczenie.

Literatura

1. Adamski D. et.al.: *Magnetic fields generated by vehicles In alternating current traction system*, Wydawnictwo PiT Kraków, 2016.
2. Białoń A. et.al.: *Określenie dopuszczalnych poziomów i parametrów zakłóceń dla urządzeń sterowania ruchem kolejowym*, Instytut Kolejnictwa, temat nr 4430/10, Warszawa, 2011.
3. Charakterystyki częstotliwościowe podstawowych członów liniowych układów automatyki, WWW http://rg1.polsl.pl/kaula/Charakterystyki_czestotliwosciowe [dostęp 15.05.2019].
4. CLC/TS 50238-2:2015: Kompatybilność pomiędzy taborem a urządzeniami wykrywania pociągów. Część 2: Kompatybilność z obwodami torowymi.
5. Hanzelka Z.: *Jakość Energii Elektrycznej*, cz. 4: *Wyższe Harmoniczne Napięć i Prądów*, WWW twelve.com.pl/pdf/Hanzelka/cz_4_pelna.pdf [dostęp 15.05.2019].
6. Hu H. et.al.: *Overview of Harmonic and Resonance in Railway Electrification Systems*, Volume 54, Issue 5, September – October, 2018, WWW <https://ieeexplore.ieee.org/document/> [dostęp 15.05.2019].
7. Kowalak R. et.al.: *Harmonics produced by traction substations – computer modelling and experimental verification*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 93 nr 6/2017, <http://pe.org.pl/articles/2017/6/4> [dostęp 15.05.2019].



Rys. 7. Harmoniczne w paśmie od 0 do 1kHz – okno czasowe 200 ms:
a) przed zdarzeniem komutacyjnym,
b) zdarzenie komutacyjne, c) po zdarzeniu komutacyjnym [opracowano na podstawie danych pomiarowych z badań własnych]



Rys. 8. Harmoniczne w pasmach: a) od 1 kHz do 3 kHz, b) od 3 kHz do 20 kHz, c) od 20 kHz do 40 kHz – okno czasowe 200 ms [opracowano na podstawie danych pomiarowych z badań własnych]

8. Lista Prezesa Urzędu Transportu Kolejowego w sprawie właściwych krajowych specyfikacji technicznych i dokumentów normalizacyjnych, których zastosowanie umożliwia spełnienie zasadniczych wymagań dotyczących interoperacyjności systemu kolei, Warszawa, 19 stycznia 2017 r.
9. PN-EN 50238:2003 Zastosowania kolejowe – Kompatybilność pomiędzy taborem a urządzeniami wykrywania pociągów.
10. PN-EN 50617-1: Zastosowania kolejowe – Techniczne parametry systemów wykrywania pociągu dotyczące interoperacyjności transeuropejskiego systemu kolejowego, Część 1: Obwody torowe.
11. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 13 maja 2014 r. w sprawie dopuszczania do eksploatacji określonych rodzajów budowli, urządzeń i pojazdów kolejowych, Dz.U. 2014, poz. 720.
12. Steczek M., Szela A., Chatterjee D.: *Analysis of disturbing effect of 3 kV DC supplied traction vehicles equipped with two-level and three-level VSI on railway signalling track circuits*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, Vol. 65, No. 5, 2017, pp. 663–674.
13. Steczek M., Szela A.: *Metoda identyfikacji on-line harmonicznego prądu i wyznaczania impedancji wejściowej pojazdu trakcyjnego*, Logistyka 6/2014 s. 9972–9982.
14. Stobiecki A., Dudek R.: *Układy napędowe wielosystemowych pojazdów trakcyjnych*, Maszyny Elektryczne, Zeszyty Problemowe Nr 2/2018 s. 7–13.
15. Syczenko W., Białoń A.: *Электромагнитная совместимость тягового электроснабжения постоянного тока при скоростном движении*, М. Днепро, 2016.
16. Szela A., Maciołek T.: *Analiza efektywności filtrów wygładzających w podstacjach trakcji kolejowej 3 kV dc przy zaburzeniach napięcia zasilającego*, TTS Technika Transportu Szynowego, 5/2013 s. 34–39.
17. Szubert K.: *Harmoniczne prądu i napięcia w sieciach dystrybucyjnych*, WWW yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.../ZN_WEiA_PG_50-17, [dostęp 15.05.2019].
18. Ustawa z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym. Tekst jednolity, Dz.U. 2019, poz. 710, z późniejszymi zmianami.