

POZIOMY ZABURZEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH W SIECI POKŁADOWEJ NISKIEGO NAPIĘCIA POJAZDÓW TRAKCYJNYCH I WAGONÓW PASAŻERSKICH

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie
2. Obowiązujące normy i przepisy
3. Przyczyny występowania zaburzeń elektromagnetycznych o dużej energii w obwodach zasilania niskiego napięcia elektrycznych pojazdów trakcyjnych
4. Metodyka pomiaru zaburzeń elektromagnetycznych w obwodach niskiego napięcia pojazdów trakcyjnych i wagonów
5. Wyniki pomiarów zaburzeń elektromagnetycznych w niskonapięciowych obwodach zasilania elektrycznych pojazdów trakcyjnych i wagonów pasażerskich
6. Wyniki pomiarów amplitudy impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych o dużej energii w obwodzie zasilania niskiego napięcia pojazdów trakcyjnych
7. Wyniki pomiarów zaburzeń radioelektrycznych oraz impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych w niskonapięciowych obwodach zasilania wagonów pasażerskich
8. Podsumowanie wyników pomiarów
9. Wnioski

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono problematykę dotyczącą zaburzeń radioelektrycznych i impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych, które występują w niskonapięciowej pokładowej sieci zasilania elektrycznych i spalinowo-elektrycznych pojazdów trakcyjnych oraz wagonów pasażerskich. Omówiono metody przeprowadzania pomiarów i podano przykładowe wyniki pomiarów, w formie charakterystyk poziomu zaburzeń radioelektrycznych w funkcji częstotliwości dla wytypowanych obiektów, oraz oscylogramy zarejestrowanych przepięć na wyjściu poszczególnych źródeł. Scharakteryzowano ciekawsze rezultaty z przeprowadzonych badań.

¹ Współautor był długoletnim pracownikiem Centrum Naukowo-Technicznego Kolejnictwa.

1. WPROWADZENIE

Kolejowe obiekty ruchome — takie jak lokomotywy elektryczne, elektryczne zespoły trakcyjne i wagony pasażerskie — stanowią specyficzne i złożone środowisko elektromagnetyczne. Pracujące w tym środowisku urządzenia nie powinny wpływać wzajemnie na siebie, a zwłaszcza urządzenia elektryczne, zasilane napięciem 3 kV, nie powinny wprowadzać nadmiernych zaburzeń elektromagnetycznych do obwodów pokładowej sieci zasilania niskiego napięcia i obwodów przesyłania sygnałów w pokładowych urządzeniach elektronicznych. Spełnienie wymienionego warunku jest szczególnie istotne, ponieważ obecnie jest rozważana możliwość instalowania sieci komputerowej, która zapewniałaby ciągły przepływ informacji wzdłuż całego pociągu. Informacje byłyby przesyłane między urządzeniami elektronicznymi zainstalowanymi w różnych wagonach, jak również między lokomotywą a składem pociągu. Planowane jest również stosowanie elektronicznych tachografów i liczników energii elektrycznej w lokomotywach, gdyż mogą one spełniać o wiele więcej funkcji, w zależności od oprogramowania, niż dotychczas stosowane urządzenia.

Nasycanie w coraz większym stopniu taboru urządzeniami elektronicznymi wymusza konieczność współistnienia tych urządzeń w środowisku elektromagnetycznym. Urządzenia elektroniczne nie tylko nie mogą powodować zaburzeń elektromagnetycznych o poziomach wyższych niż dopuszczalne, określone w normach, ale również muszą mieć określoną odporność na różnorodne, postronne zaburzenia elektromagnetyczne. Cecha ta jest nazwana *k o m p a t y b i l n o ś c i ą e l e k t r o m a g n e t y c z n ą*.

Podstawowym wymaganiam dla środowiska elektromagnetycznego w ruchomych obiektach kolejowych jest, aby w pokładowej sieci zasilania niskiego napięcia poziom zaburzeń elektromagnetycznych nie wpływał negatywnie na pracę urządzeń zasilanych z tej sieci. Przez zaburzenia elektromagnetyczne rozumiemy wszelkie niepożądane sygnały elektryczne, występujące w całym widmie częstotliwości; natomiast zaburzenia określone w niniejszej pracy mianem radioelektrycznych są zaburzeniami elektromagnetycznymi przewodzonymi, występującymi w paśmie częstotliwości od 0,15 MHz do 30 MHz.

Spośród wszystkich rodzajów zaburzeń elektromagnetycznych, na jakie mogą być narażone urządzenia elektroniczne, największe niebezpieczeństwo stwarzają impulsowe zaburzenia elektromagnetyczne o dużej energii, zwane również przepięciami [9]. Należy także brać pod uwagę zaburzenia radioelektryczne, występujące w pokładowej sieci zasilania niskiego napięcia. Mimo że amplitudy tych zaburzeń są niewspółmiernie niższe od przepięć, jednak ze względu na ich szerokie pasmo częstotliwości mogą one również mieć negatywny wpływ na pracę urządzeń elektronicznych. Oba rodzaje zaburzeń stwarzają niebezpieczeństwo wadliwego funkcjonowania urządzeń.

Publikacja niniejsza jest pierwszą próbą przedstawienia stanu środowiska elektromagnetycznego w pokładowej sieci zasilania pojazdów trakcyjnych i wagonów pasażerskich, wyposażonych w przetwornice statyczne DC-DC. Materiałem źródłowym dla tej publikacji są wyniki z badań przeprowadzonych w Centrum Naukowo-Technicznym Kolejnictwa w drugiej połowie lat dziewięćdziesiątych [2]. Pomimo znacznego upływu czasu, zdaniem autorów, wyniki tych badań nie straciły swojej aktualności, ponieważ wytypowane i przebadane obiekty znajdują się nadal w eksploatacji. W latach następnych nie prowadzono już tak obszernych badań i na tak wielką skalę. Pewne wycinkowe badania, prowadzone w CNTK, dotyczyły wytypowanych, nowych obiektów i były prowadzone pod kątem ich ewentualnego dopuszczenia do eksploatacji. Należy podkre-

ślić, że problematyka ta obejmuje bardzo szeroki zakres zagadnień i ze względu praktycznych ograniczono się jedynie do badań zaburzeń elektromagnetycznych, występujących w sieciach zasilania niskiego napięcia obiektów ruchomych, a pominięto badania natężeń niepożądanych pól elektromagnetycznych.

2. OBOWIĄZUJĄCE NORMY I PRZEPISY

Zaburzenia radioelektryczne oraz impulsowe zaburzenia elektromagnetyczne, które występują w pokładowej sieci zasilania elektrycznych pojazdów trakcyjnych i wagonów pasażerskich, mogą pochodzić od własnych pokładowych urządzeń elektrycznych i elektronicznych oraz mogą przedostawać się do pokładowej sieci zasilania w wyniku sprzężeń z obwodem głównym pojazdu trakcyjnego, zasilanego napięciem 3 kV.

Do oceny emisyjności zaburzeń elektromagnetycznych, występujących w sieci zasilania, pomiary wykonuje się wyłącznie po stronie niskiego napięcia (w pokładowej sieci niskiego napięcia pojazdów trakcyjnych i wagonów), a zatem nie wykonuje się pomiarów napięcia zaburzeń w sieci trakcyjnej, zgodnie z zaleceniami norm [3, 4].

Norma ogólna — zawierająca przepisy ogólne, dotyczące wyposażenia elektronicznego pojazdów szynowych, będąca tłumaczeniem publikacji IEC 771 z 1977 r. — określa dopuszczalne udary przepięciowe dla urządzeń elektronicznych zasilanych z pokładowej sieci energetycznej niskiego napięcia [6].

W odniesieniu do stacjonarnych urządzeń trakcji elektrycznej polska norma nie zawiera wymagań dotyczących dopuszczalnego poziomu emisji zaburzeń elektromagnetycznych w energetycznej sieci zasilającej, w tym również zasilającej sieć trakcyjną. Nie przewidują tego również normy europejskie. Podstacje trakcyjne są zasilane bowiem z sieci energetycznej średniego napięcia. Sieć trakcyjna sama w sobie nie jest źródłem zaburzeń elektromagnetycznych, lecz jest linią transmitującą zaburzenia wytwarzane przez podstacje trakcyjne i pojazdy znajdujące się na szlaku. Ocenę emisyjności zaburzeń radioelektrycznych, występujących w sieci trakcyjnej, wykonuje się tak samo jak dla podstacji trakcyjnych, to znaczy mierzy się natężenie pola elektromagnetycznego, emitowanego przez sieć trakcyjną jako antenę.

W obowiązującej obecnie normie dla urządzeń kolejowych zdefiniowano dopuszczalne poziomy emisji zaburzeń w zakresie od 9 kHz do 1 GHz dla różnych rodzajów układów zasilających, obowiązujących w danym kraju Unii Europejskiej [8]. W zakresie częstotliwości 9 kHz÷150 kHz, dla szerokości pasma odbiornika pomiarowego 200 Hz oraz układu zasilania obowiązującego w Polsce (oznaczenie B: 15 kV ac, 3 kV dc), dopuszczalne poziomy emisji mieszczą się w zakresie 60 dB÷35 dB.

Dla zakresu częstotliwości 150 kHz÷30 MHz (szerokość pasma odbiornika pomiarowego 9 kHz), dopuszczalne poziomy emisji mieszczą się w zakresie 70 dB÷20 dB.

Dla pasma 30 MHz÷1 GHz (szerokości pasma odbiornika pomiarowego 120 kHz), dopuszczalne poziomy emisji mieszczą się w zakresie 95 dB÷70 dB. Metody pomiaru zaburzeń radioelektrycznych zawarte są w normie [7]. Wymieniona norma dotyczy zaburzeń radioelektrycznych, promieniowanych przez pojazd trakcyjny.

Niektóre źródła wewnętrzne, jak na przykład wszelkie urządzenia wykorzystujące układy tyrystorowe, mają tendencję do generowania zaburzeń radioelektrycznych o znaczących poziomach. Mogą one wydostawać się na zewnątrz pojazdu przez obwód główny i oddziaływać na urządzenia zainstalowane w pobliżu toru.

Poziomy dopuszczalne zaburzeń radioelektrycznych, występujących w niskonapięciowej sieci pokładowej, są określone w normie europejskiej [5]. Wymagania zawarte w wymienionej normie są znacznie łagodniejsze w porównaniu z normą krajową, dotychczas obowiązującą, która została wycofana po wprowadzeniu normy europejskiej.

Odporność taboru na impulsowe zaburzenia elektromagnetyczne jest oceniana jako odporność poszczególnych urządzeń elektronicznych, zainstalowanych wewnątrz pojazdów oraz na terenie podstacji trakcyjnej. Należy zaznaczyć, że odporność taboru i podstacji na wyładowania atmosferyczne nie jest tu rozważana, ponieważ w tym zakresie obowiązują odrębne przepisy dotyczące ochrony ogromowej obiektów.

3. PRZYCZYNY WYSTĘPOWANIA ZABURZEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH O DUŻEJ ENERGII W OBWODACH ZASILANIA NISKIEGO NAPIĘCIA ELEKTRYCZNYCH POJAZDÓW TRAKCYJNYCH

Elektryczny pojazd trakcyjny jest bardzo skomplikowanym zespołem różnorodnych urządzeń elektrycznych, umieszczonych w metalowym korpusie i zasilanych z sieci trakcyjnej prądem stałym o napięciu 3 kV. Obwody wysokiego napięcia zasilające silniki trakcyjne są wprowadzane do wnętrza lokomotywy przewodami wysokonapięciowymi, nieekranowanymi.

Ze względu na stosunkowo małą przestrzeń wewnątrz lokomotywy aparatura wysokonapięciowa i jej obwody znajdują się w bliskim sąsiedztwie urządzeń niskonapięciowych, zasilanych z własnego źródła, którym jest prądnica prądu stałego o napięciu 110 V i bateria akumulatorów. Istnieją zatem możliwości różnorodnych sprzężeń typu pojemnościowego, indukcyjnego, bądź mieszanego między obwodami wysokiego i niskiego napięcia dla przebiegów wielkiej częstotliwości.

W obwodach wysokiego napięcia występują następujące, potencjalne źródła zaburzeń elektromagnetycznych: silniki trakcyjne, silnik wentylatora napędzający prądnicę prądu stałego, styki styczników liniowych i grupowych, styk odbieraka prądu z przewodem jezdynym.

W obwodach niskiego napięcia znajdują się następujące, istotne źródła zaburzeń radioelektrycznych i impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych: prądnica prądu stałego o napięciu 110 V, styki styczników niskonapięciowych, silniki napędów pomocniczych.

W obwodach wymienionych urządzeń są komutowane lub przerywane prądy o znacznych natężeniach. Są one źródłem przebiegów elektrycznych wielkiej częstotliwości. Ze względu na występowanie sprzężeń między obwodami wysokiego i niskiego napięcia, do obwodów niskiego napięcia mogą przenikać zaburzenia o znacznych amplitudach, generowane w obwodzie wysokiego napięcia. Z powodu występowania znacznych indukcyjności w obwodach wysokiego i niskiego napięcia w trakcie przełączania tych obwodów lub ich fragmentów są generowane przebiegi oscylacyjne tłumione, które mają charakter przepięć. Istotne znaczenie mają przepięcia generowane w obwodach wysokiego napięcia, które w wyniku istnienia sprzężeń mogą przedostawać się do obwodów niskiego napięcia. Jak wykazały wcześniej przeprowadzone badania w elektrycznych zespołach trakcyjnych EN97, przepięcia generowane w obwodzie wysokiego napięcia i przedostające się drogą sprzężeń do obwodów niskiego napięcia przekraczały dopuszczalne tolerancje określone dla sieci pokładowej [1]. W toku badań stwierdzono rów-

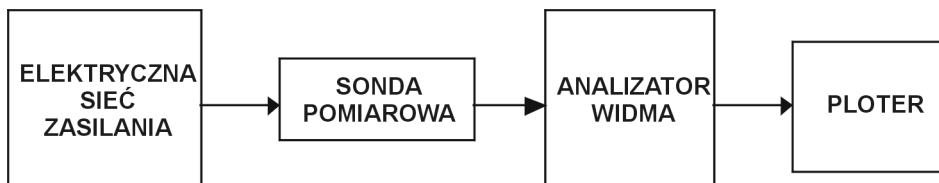
niez, że pojemność akumulatorów nie powoduje zwarcia dla przebiegów wysokiej częstotliwości, ponieważ dla tego zakresu częstotliwości impedancja akumulatora ma charakter indukcyjny. Uznano więc za celowe wykonanie pomiarów zaburzeń radioelektrycznych i poziomów przepięć w obwodach niskiego napięcia pojazdów trakcyjnych, ponieważ zobrazują one stan środowiska elektromagnetycznego wewnątrz pojazdu.

W obwodach niskiego napięcia występują zaburzenia radioelektryczne, które są generowane przez urządzenia elektryczne dołączone do tych obwodów, oraz występują zaburzenia przenikające drogą sprzężeń z obwodów wysokiego napięcia. Wobec tego pomiary prowadzono — w miarę możliwości — przy włączonych wszystkich urządzeniach elektrycznych, zarówno w obwodach nisko- jak i wysokonapięciowych.

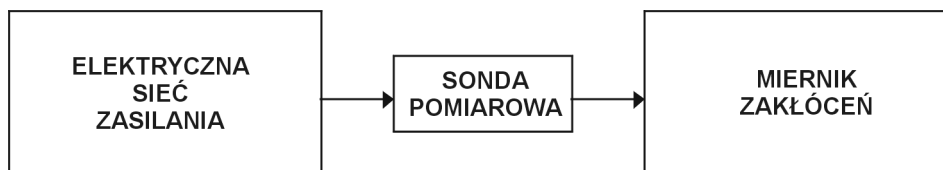
4. METODYKA POMIARU ZABURZEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH W OBWODACH NISKIEGO NAPIĘCIA POJAZDÓW TRAKCYJNYCH I WAGONÓW

4.1. Pomiar poziomu zaburzeń radioelektrycznych w obwodzie zasilania niskiego napięcia pojazdu trakcyjnego i wagonu pasażerskiego

Pomiary składowej niesymetrycznej napięcia zaburzeń radioelektrycznych, występujących w pokładowej sieci zasilania niskiego napięcia, wykonano za pomocą sondy pomiarowej, typ SLMZ-150, będącej wyposażeniem kompletu pomocniczego do pomiaru zaburzeń radioelektrycznych, oraz analizatora widma, którego parametry spełniają wymagania CISPR. Pomiary były wykonywane zgodnie z zaleceniem normy [7], według załącznika E punkt E4 w zakresie częstotliwości od 0,15 MHz do 30 MHz. Schemat blokowy układu pomiarowego pokazano na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego do pomiaru poziomu zaburzeń radioelektrycznych



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego do pomiaru poziomu zaburzeń radioelektrycznych metodą bezpośrednią

Zawsze na początku cyklu pomiarowego rejestrowano charakterystykę widma zaburzeń w całym paśmie pomiarowym (0÷30 MHz), przy włączonym detektorze wartości szczytowej. Umożliwiało to szybkie poznanie przebiegu charakterystyki zaburzeń radioelektrycznych w funkcji częstotliwości, ponieważ czas pomiaru w tym przypadku wynosi tylko 10 s. Zgodnie z zaleceniami normy [7] pomiary zaburzeń radioelektrycznych należy wykonywać przy włączonym detektorze quasi-szczytowym oraz przy ściśle określonej szerokości pasma częstotliwości pośredniej dla danego zakresu pomiarowego. Powoduje to jednak znaczne wydłużenie czasu wykonywania pomiaru (np. dla podzakresu 150 kHz÷3 MHz czas pomiaru wynosi 1000 s). Z przebiegu wstępnie zdjętej charakterystyki można zorientować się, w jakim paśmie należy wykonać pomiar używając detektora quasi-szczytowego.

Na rysunkach wykreślonych przez ploter naniesiono skalę, w której uwzględniono tłumienie wnoszone przez następujące elementy:

- tłumik zewnętrzny, włączany doraźnie w razie potrzeby (np. 20 dB),
- sondę pomiarową (wartość współczynnika tłumienia sondy wynosi 21 dB w całym paśmie pomiarowym od 150 kHz do 30 MHz).

Całkowite tłumienie wymienionych składników wynosiło najczęściej 47 dB. W takim przypadku, odczytując z charakterystyki wartość poziomu znacznika MKR (skrót od MARKER) np. 11 dB, należy dodać wartość 47 dB, co w wyniku daje 58 dB; jest to właściwa wartość, która może być odczytana bezpośrednio ze skali opisanej na osi y. Skala ta powstała w wyniku dodania tej samej wartości 47 dB do poziomu odniesienia RL (skrót od *Reference Level*); np. dla RL = 33 dB górny kres skali wynosi 80 dB.

Wartość zmierzonego napięcia U w voltach można obliczyć przyjmując, że poziom 0 dB odpowiada wartości $1\mu\text{V}$.

4.2. Pomiar amplitudy i częstotliwości występowania zaburzeń elektromagnetycznych o dużej energii w obwodach zasilania niskiego napięcia elektrycznych pojazdów trakcyjnych i wagonów pasażerskich

Pomiary amplitudy i częstotliwości występowania zaburzeń elektromagnetycznych, objawiających się w formie przepięć, wymagają zastosowania specjalistycznej aparatury. Oscylograficzne metody pomiaru przebiegu wartości chwilowych przepięć są bardzo trudne do przeprowadzenia i kosztowne, a jednocześnie — pod względem zakresu, czasu obserwacji i liczebności — ograniczone. Nie dają możliwości określenia rozkładu prawdopodobieństwa występowania wartości szczytowych przepięć. Są one bardzo przydatne w specyficznych warunkach, tam gdzie potrzebna jest pełna informacja o przyczynach wywołujących przepięcia, np. w trakcie manewrowania nastawnikiem jazdy w lokomotywie bądź w chwili włączania i wyłączania poszczególnych obwodów.

Informacje o rozkładzie amplitud przepięć i częstotliwości występowania można uzyskać stosując analogowe rejestratory z wbudowanym przetwornikiem przepięć, który zamienia szybkozmienny przebieg napięcia na wejściu, na sygnały wartości proporcjonalnej do wartości szczytowej napięcia wejściowego. Czas trwania przetworzonego impulsu musi być na tyle długi, aby był zarejestrowany przez kompensacyjny rejestrator napięcia stałego.

Do rejestracji przepięć występujących w trójfazowej sieci zasilania 3×400 V/50 Hz, jednofazowej sieci zasilania 230 V/50 Hz oraz w obwodach prądu stałego służy trójka-

nałowy rejestrator przepięć. Umożliwia on zarejestrowanie przepięć o czasie trwania 1,2/50 μ s na taśmie papierowej, bez możliwości wyróżniania biegunowości przepięć w trójfazowej sieci zasilania między każdym przewodem fazowym a przewodem neutralnym oraz w obwodach prądu stałego, w układzie niesymetrycznym. Przetwornik umożliwia rejestrację przepięć osobno w każdej fazie.

Przepięcia rejestrowano za pomocą licznika przepięć, który umożliwiał zliczanie impulsów o biegunowości dodatniej i ujemnej. Biegunowość impulsów była za każdym razem ustalana specjalnym przyciskiem. Przyrząd wyposażony jest w dwa zakresy pomiarowe, umożliwiające pomiar amplitudy przepięć 4 kV.

Do badań zastosowano również oscyloskop cyfrowy LS-140 firmy *Le Croy*. Jest to czterokanałowy oscyloskop, umożliwiający rejestrację przebiegów w paśmie częstotliwości do 100 MHz. Najmniejsza podstawa czasu wynosi 500 ps/dz. Urządzenie ma wewnętrzny dysk twardy 170 MB oraz stację dysków 3,5". Dzięki temu jest możliwość rejestrowania przebiegów w pamięci w celu późniejszego odtworzenia ich na ekranie monitora dowolnego komputera. Oscyloskop umożliwia dokładne obejrzenie części zarejestrowanego przebiegu z zastosowaniem funkcji „zoom”.

5. WYNIKI POMIARÓW ZABURZEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH W NISKONAPIĘCIOWYCH OBWODACH ZASILANIA ELEKTRYCZNYCH POJAZDÓW TRAKCYJNYCH I WAGONÓW PASAŻERSKICH

5.1. Wytypowanie obiektów do badań

Do badań wytypowano następujące obiekty: lokomotywy elektryczne, lokomotywy spalinowo-elektryczne oraz wagony pasażerskie, wyposażone w przetwornice statyczne. Spośród obecnie eksploatowanych lokomotyw elektrycznych do najpopularniejszych typów należą: EU07, ET22, EP09. Spośród wszystkich eksploatowanych lokomotyw spalinowo-elektrycznych wytypowano następujące typy: SU45, SM42, ST44.

Do badań wytypowano również wagony pasażerskie, które są obecnie eksploatowane w składach pociągów, głównie ekspresowych. Wagony te są wyposażone w przetwornice statyczne, służące do zasilania obwodów niskiego napięcia 24 V. Postanowiono przebadać przetwornice zainstalowane w następujących typach wagonów: 144A, 136A, 111AR, XB.

5.2. Wyniki pomiarów poziomu zaburzeń radioelektrycznych w niskonapięciowych obwodach zasilania elektrycznych pojazdów trakcyjnych

5.2.1. Lokomotywy spalinowo-elektryczne SU45, SM42, ST44

Badanie lokomotyw prowadzono w czasie jazd manewrowych na terenie Zakładu Taboru w Szczecinku. Pomiary zaburzeń radioelektrycznych w pokładowej sieci zasilania niskiego napięcia wykonywano dla kilku egzemplarzy wybranych typów lokomotyw.

Przykładowe wyniki pomiarów są przedstawione w tablicach 1, 2, 3. W celu uzyskania większej liczby informacji o wpływie niektórych urządzeń elektrycznych, pomiary przeprowadzono z włączanym doraźnie wentylatorem (w) i przetwornicą (p).

Tablica 1

Wyniki pomiarów zaburzeń radioelektrycznych w paśmie 0,15÷30 MHz dla lokomotywy typu SU45 nr 105

f [MHz]		0,15	0,25	0,5	1	1,5	3	4	6	10	15
U_z [dB]	w., p.	90	99	82,5	62	63	41	39	42	26	24
U_z [dB]	s.	88	89	82	68	67	74	42	26	17	16
U_z [dB]	s., w., p.	80	88	74	75	74	43	32	42	27	23

Tablica 2

Wyniki pomiarów zaburzeń radioelektrycznych w paśmie 0,15÷30 MHz dla lokomotywy typu SM42 nr 882

f [MHz]		0,15	0,25	0,5	1	1,5	3	6
U_z [dB]	p.,w.	75,8	81,8	84,8	62,8	52,8	39,8	37,8

Tablica 3

Wyniki pomiarów zaburzeń radioelektrycznych w paśmie 0,15÷30 MHz dla lokomotywy typu ST44 nr 614

f [MHz]		0,15	0,25	0,5	1	1,5	3	6
U_z [dB]	p.,w.	94,8	94	91,8	74,3	68,8	48,8	35,3

5.2.2. Lokomotywy elektryczne ET22, EU07, EP09

Badania dla lokomotyw EU07 i EP09 zostały przeprowadzone w czasie jazdy pociągu, natomiast dla lokomotyw ET22 — w czasie jazd manewrowych na terenie Zakładu Taboru w Szczecinku. Pomiary zaburzeń radioelektrycznych w pokładowej sieci zasilania niskiego napięcia wykonywano — zgodnie z obowiązującą metodą — na kilku egzemplarzach lokomotyw, przy włączonej przetwornicy. Wyniki z pomiarów zawiera tablica 4.

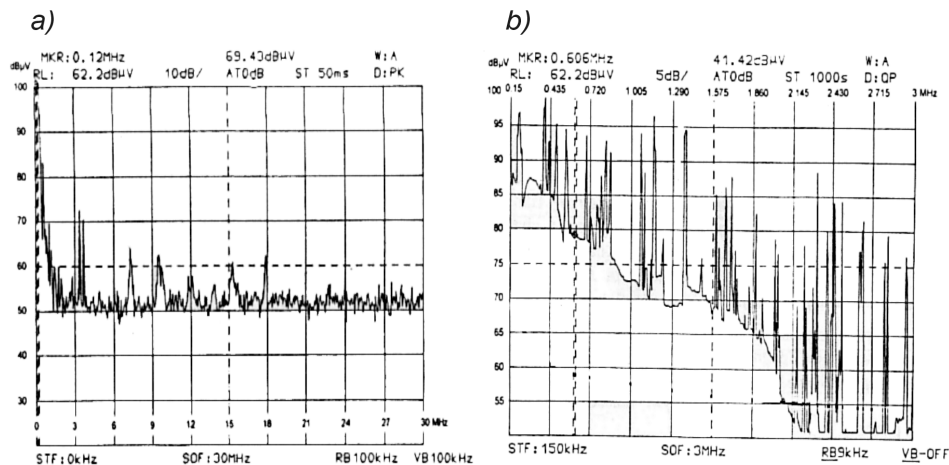
Tablica 4

Wyniki pomiarów zaburzeń radioelektrycznych w paśmie 0,15÷30 MHz dla lokomotywy typu ET22 nr 589

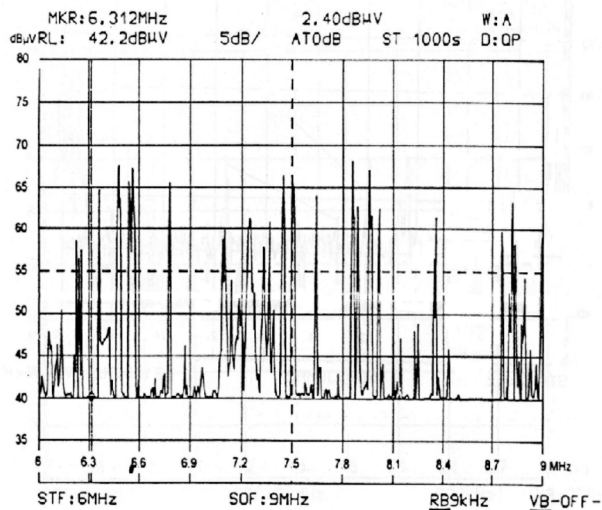
f [MHz]		0,15	0,25	0,5	1	1,5	3	6	10
U_z [dB]	kab. A	92,8	96,8	77,8	60,8	48,8	52,8	33,8	29,8
U_z [dB]	kab. B	93,8	96,8	79,8	68,8	70,8	63,8	30,8	—

Pomiary dla lokomotyw EU07 wykonano w czasie jazdy tej lokomotywy w składzie pociągu pospiesznego, przy prędkości pociągu od 60 do 100 km/h. Badany był poziom zaburzeń radioelektrycznych w obwodzie napięcia w sieci pokładowej czterech wyty-

powanych lokomotyw. Kablem koncentrycznym był doprowadzony sygnał pomiarowy z lokomotywy do analizatora widma umieszczonego w wagonie pomiarowym. Pomiar wykonano za pomocą analizatora widma, z uwzględnieniem sumarycznego tłumienia obwodu pomiarowego, wynoszącego 37,8 dB. Przykładowe rezultaty z pomiarów zamieszczono na rysunkach 3, 4 i 5.

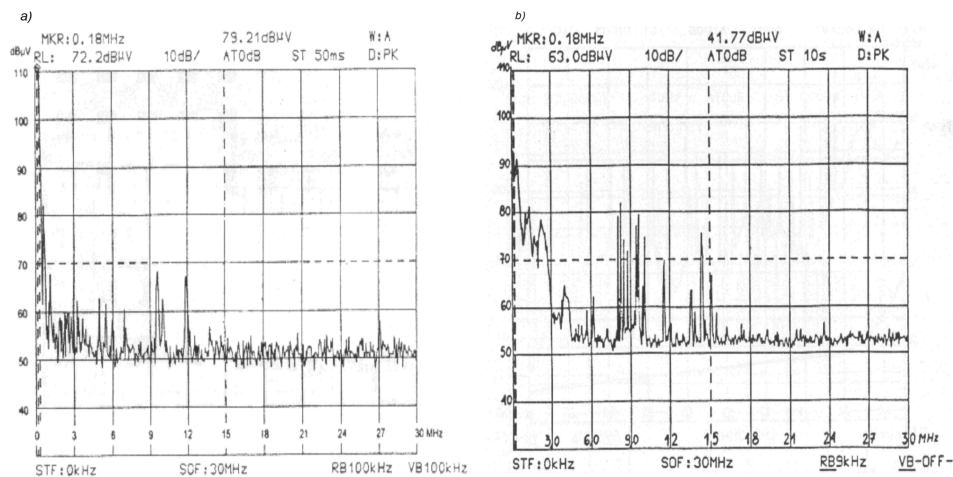


Rys. 3. Charakterystyka widma zaburzeń radioelektrycznych w pokładowej sieci zasilania (lokomotywa EU07, nr 450)
a) w paśmie 0÷30 MHz, przy włączonym detektorze wartości szczytowej,
b) w paśmie 0,15÷3 MHz, przy włączonym detektorze wartości quasi-szczytowej

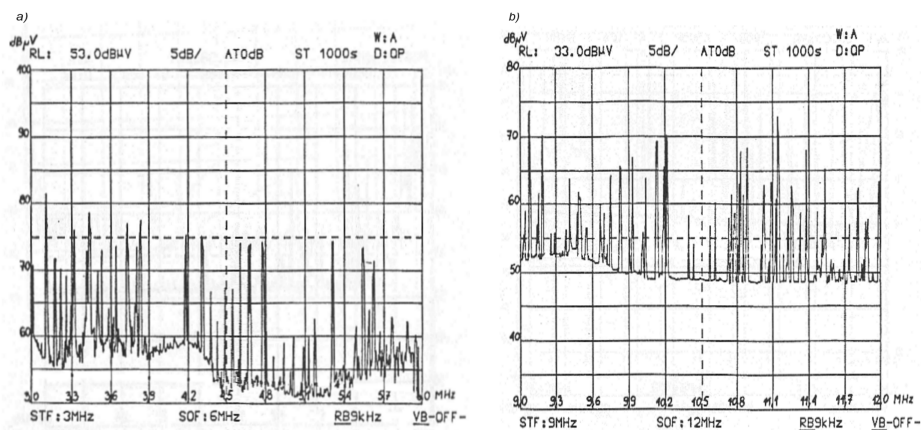


Rys. 4. Charakterystyka widma zaburzeń radioelektrycznych w paśmie 6÷9 MHz w pokładowej sieci zasilania lokomotywy EU07, nr 450 (włączony detektor wartości quasi-szczytowej)

Pomiary napięcia zaburzeń radioelektrycznych w obwodzie niskiego napięcia lokomotywy EP09 wykonano metodą analogiczną do poprzedniej, w czasie jazdy za lokomotywą w składzie pociągu. Sumaryczne tłumienie obwodu pomiarowego wynosiło 47 dB. Wyniki z pomiarów są przedstawione na rysunkach 5 i 6.



Rys. 5. Charakterystyka widma zaburzeń radioelektrycznych w pokładowej sieci zasilania (lokomotywa EP09, nr 004), w paśmie 0÷30, MHz przy włączonym detektorze wartości szczytowej
a) podczas postoju, *b)* w czasie jazdy



Rys. 6. Charakterystyka widma zaburzeń radioelektrycznych w pokładowej sieci zasilania (lokomotywa EU07, nr 004)
a) w paśmie 3÷6 MHz przy włączonym detektorze wartości quasi-szczytowej,
b) w paśmie 9÷12 MHz, przy włączonym detektorze wartości quasi-szczytowej

6. WYNIKI POMIARÓW AMPLITUDY IMPULSOWYCH ZABURZEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH O DUŻEJ ENERGII W OBWODZIE ZASILANIA NISKIEGO NAPIĘCIA POJAZDÓW TRAKCYJNYCH

6.1. Uwagi wstępne

Do badań impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych na lokomotywach spalinowo-elektrycznych zastosowano wyłącznie oscyloskopową metodę analizy. Do tego celu został użyty oscyloskop cyfrowy *Le Croy LS 140*. Wyniki obserwacji były rejestrowane na dyskietce i później odtwarzane na ekranie monitora komputera. Aby uzyskać jak najwięcej informacji zarejestrowano wiele przebiegów, z których w niniejszym opracowaniu umieszczono jedynie kilka przykładowych.

Badania zostały przeprowadzone na tych samych egzemplarzach lokomotyw, na których badano zaburzenia radioelektryczne. Pomiary wykonywano w obwodzie zasilania niskiego napięcia w sieci pokładowej oraz w obwodzie zasilania radiotelefonu pokładowego, po wstępnym filtrze.

6.2. Lokomotywy spalinowo-elektryczne SU45, SM42, ST44

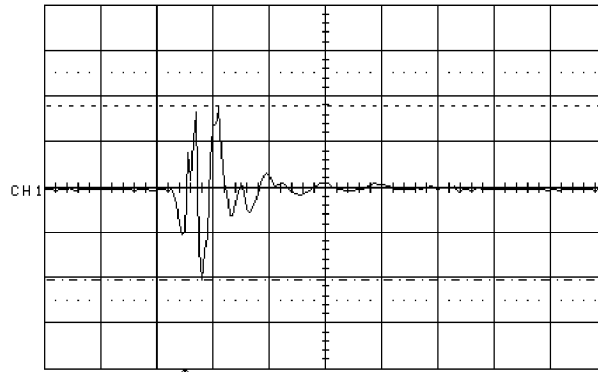
Przykładowe wyniki pomiarów są pokazane na rysunkach 7 i 8.

a)

04-Jul-95
06:14:56

STOPPED LeCroy
Auto LS140

CH1→
50V
10us



CH1 04 Jul,06:13:58
AC, BNL:Full
V@Center 2V
t@Center 25.0us

CURSORS on CH1

TRIGGER on CH1
0V AC



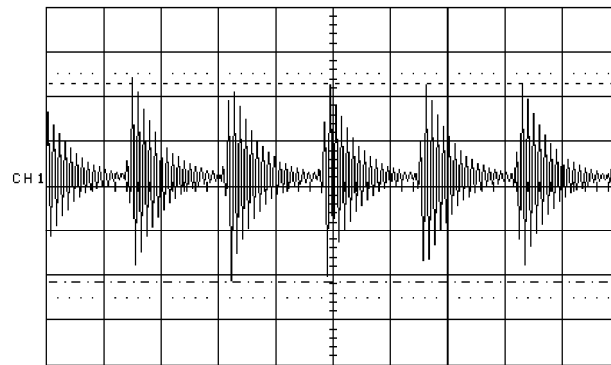
--- -100.725V
--- 91.275V
 ΔV 192.000V

b)

04-Jul-95
13:13:02

STOPPED LeCroy
Auto LS140

CH1
5V
1s



CH1 04 Jul,13:12:33
AC, BNL:Full
V@Center -80V
t@Center 1.28s

CURSORS on CH1

TRIGGER on CH1
-38V AC

--- -11.4700 V
--- 10.7700 V
 ΔV 22.2400 V

Rys. 7. Lokomotywa SU45, nr 105; przepięcia na zaciskach 110 V

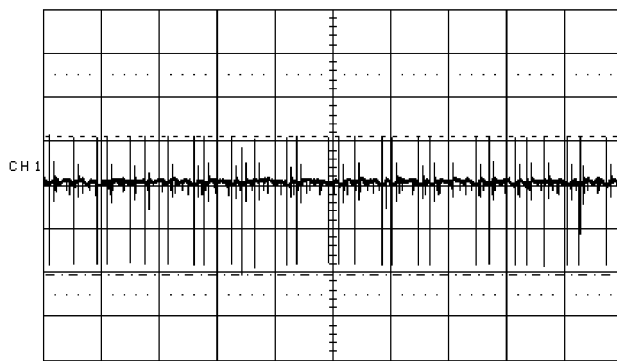
- a) przykładowy impuls zaburzeń elektromagnetycznych przy rozruchu,
- b) po filtrze radiotelefonu, podczas biegu jałowego silnika i przy włączonych wentylatorach i prądnicy grzewczej

a)

29-May-96
08:57:55

STOPPED LeCroy
Auto LS140

CH1
10V
100ms



CH1 29 May,08:55:38
AC, BUL:Full
V@Center 0V
t@Center 282ms

Cursors on CH1

TRIGGER on CH1
0V AC

CH1 MEASUREMENTS

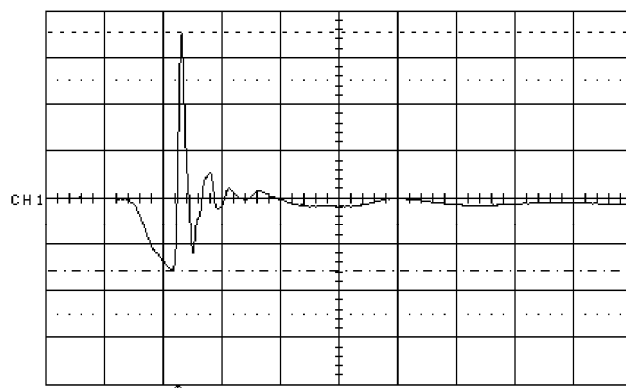
-- -20,330 V
-- - 11,350 V
 ΔV 31,680 V

b)

29-May-96
11:19:22

STOPPED LeCroy
Auto LS140

CH1
10V
5 μ s



CH1 29 May,11:17:06
AC, BUL:Full
V@Center 64V
t@Center 13.8 μ s

Cursors on CH1

TRIGGER on CH1
0V AC

CH1 MEASUREMENTS

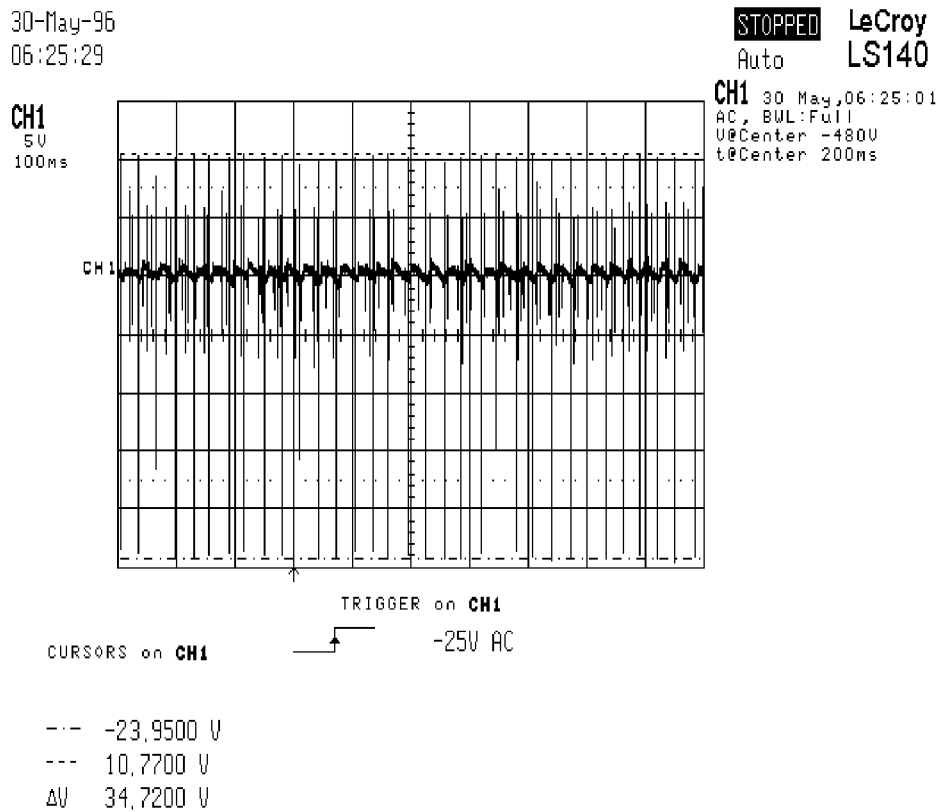
-- -14,930 V
-- - 36,270 V
 ΔV 51,200 V

Rys. 8. Impulsowe zaburzenia elektromagnetyczne w lokomotywach spalinowo-elektrycznych

- a) lokomotywa SM42, nr 882 podczas biegu jałowego, przy włączonym wentylatorze,
- b) lokomotywa ST44 — przepięcia po filtrze radiotelefonu, podczas biegu jałowego

6.3. Lokomotywy elektryczne ET22, EU07, EP09

Przykłady impulsowych zaburzeń oraz przebiegów podano na rysunkach 9 i 10.



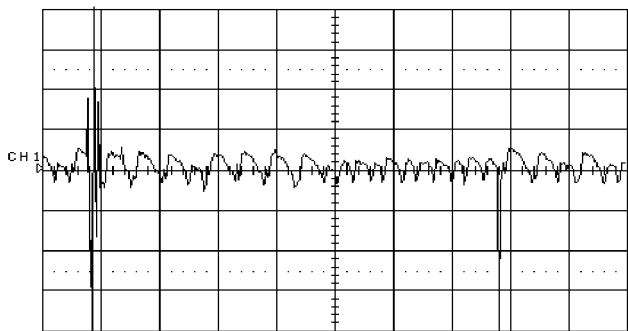
Rys. 9. Lokomotywa typu ET22, nr 589; charakterystyka impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych po filtrze, przy pracującej przetwornicy

a)

03-Jun-96
12:12:43

STOPPED LeCroy
Auto LS140

CH1
.1kV
50ms



CH1 03 Jun, 12:11:26
AC, BUL: Full
U@Center -6U
t@Center 2ms

TRIGGER on CH1

CURSORS on CH1

--- -407.50V
--- 392.50V
 ΔU 800.00V

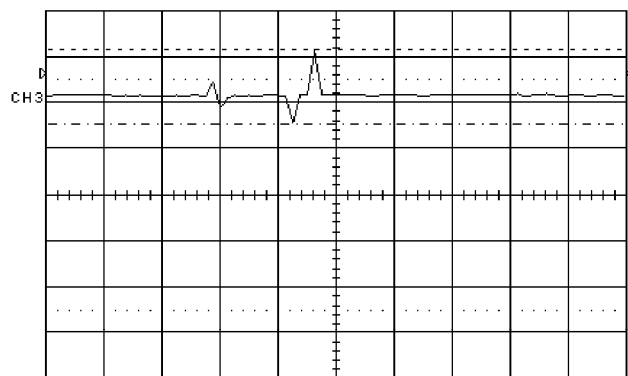
Pass when CH1
pkpk 0 816V

b)

23-Sep-96
13:32:50

STOPPED LeCroy
Normal LS140

CH3
50V
200us



CH3 23 Sep, 13:27:52
DC, BUL: Full
U@Center 0U
t@Center 550us

TRIGGER on CH3

CURSORS on CH3

--- 76.800V
--- 158.400V
 ΔU 81.600V

132V DC



Rys. 10. Przepięcia w pokładowej sieci zasilania lokomotyw elektrycznych
a) lokomotywa EU07 — przepięcia zarejestrowane w czasie jazdy,
b) lokomotywa EP09 — przepięcia zarejestrowane w czasie postoju

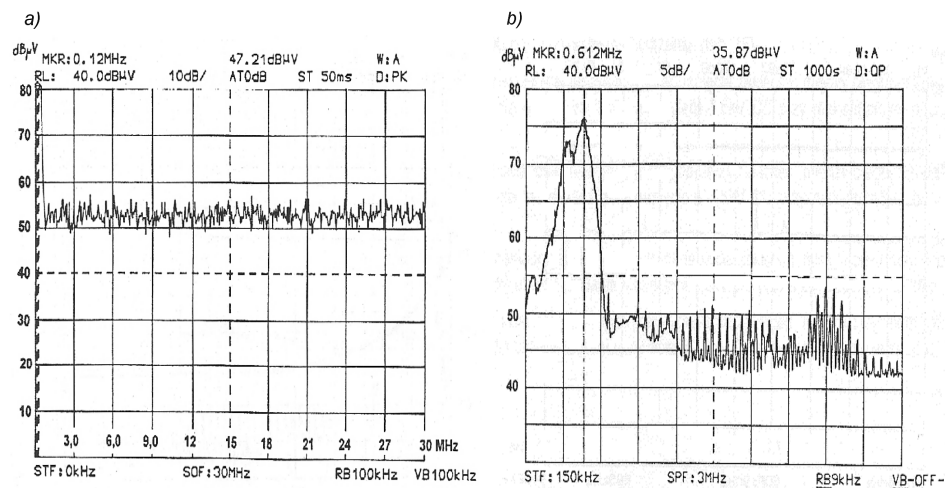
7. WYNIKI POMIARÓW ZABURZEŃ RADIOELEKTRYCZNYCH ORAZ IMPULSOWYCH ZABURZEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH W NISKONAPIĘCIOWYCH OBWODACH ZASILANIA WAGONÓW PASAŻERSKICH

7.1. Wyniki pomiarów poziomu zaburzeń radioelektrycznych na wyjściu przetwornicy wagonowej

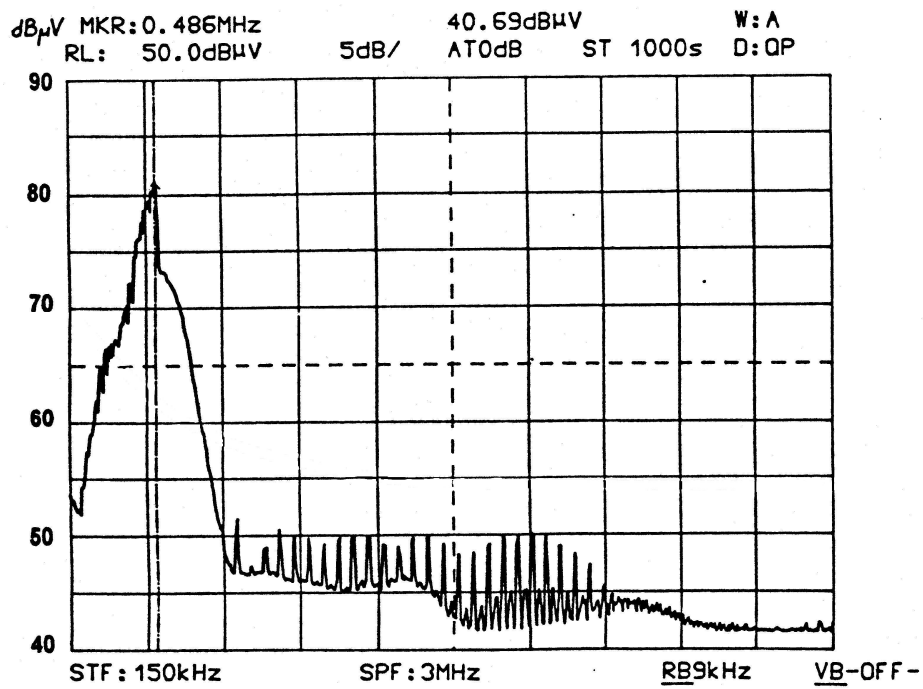
Pomiary dotyczą zaburzeń radioelektrycznych wytwarzanych przez przetwornice statyczne i wprowadzanych do pokładowej sieci zasilania niskiego napięcia.

Do badań wytypowano następujące typy przetwornic statycznych, które są zamontowane w wagonach pasażerskich, przeznaczonych do pociągów międzynarodowych i ekspresowych:

- 1) przetwornica typu SAB WAPCO-DC-AC-DC (3 kV/3×380 V/24 V) o mocy 47 kW, produkcji włoskiej, instalowana na wagonie typu 144A; wyniki z pomiarów są przedstawione na rysunkach 11 i 14;
- 2) przetwornica typu SAB WAPCO-DC-DC o mocy 5,5 kW, produkcji włoskiej, instalowana na wagonie typu 136A; wyniki z pomiarów są przedstawione na rysunku 12;
- 3) przetwornica typu U/WA-3000/28/6,5 DC-DC o mocy 6,5 kW, produkcji ABB *Trans* w Łodzi, instalowana na wagonie typu 111AR, produkcji PAFAWAG; wyniki z pomiarów są przedstawione na rysunku 13.



Rys. 11. Charakterystyka widma zaburzeń radioelektrycznych na wyjściu przetwornicy SAB WAPCO-DC-DC
a) w paśmie 0÷30 MHz przy włączonym detektorze wartości szczytowej,
b) w paśmie 0,15÷3 MHz, przy obciążeniu przetwornicy obwodem oświetlenia i wentylacji



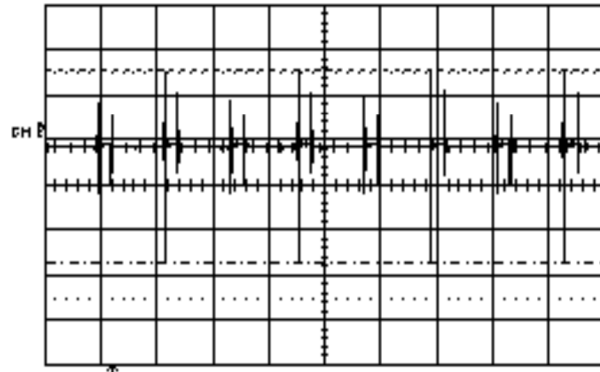
Rys. 12. Charakterystyka poziomu zaburzeń radioelektrycznych na wyjściu przetwornicy SAB WAPCO-DC-DC w paśmie 0,15÷3 MHz; przetwornica na biegu jałowym (bez obciążenia)

a)

07-Jul-95
12:59:23

LeCroy
Normal LS141

CH1
10V
100ns



CH1 07 Jul 12:59:23
DC, BWL:Full
UNCenter 19.8V
LSCenter 980.0ns

CURSOR on CH1
32.8V DC

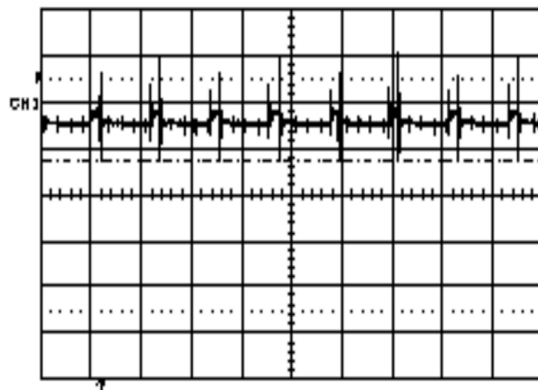
-- 3.041V
-- 45.599V
 ΔV 42.558V

b)

07-Jul-95
12:52:53

LeCroy
Normal LS140

CH1
5V
100ns



CH1 07 Jul 12:52:53
DC, BWL:Full
UNCenter 20.0V
LSCenter 980.0ns

CURSOR on CH1
32.8V DC

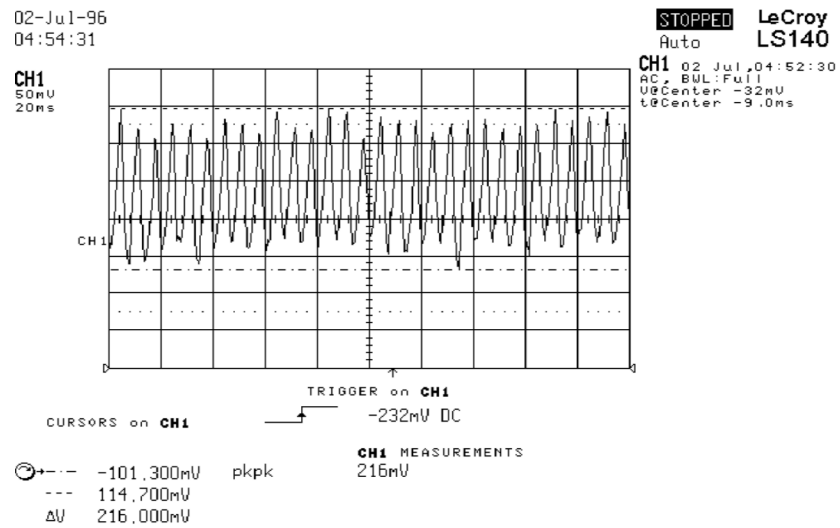
-- 23.840V
-- 35.200V
 ΔV 11.360V

Rys. 13. Oscylogram napięcia zaburzeń radioelektrycznych na wyjściu przetwornicy UWA 3000/28/6,5 dla układu zasilania napięciem 3 kV DC
a) maksymalne obciążenie, b) minimalne obciążenie

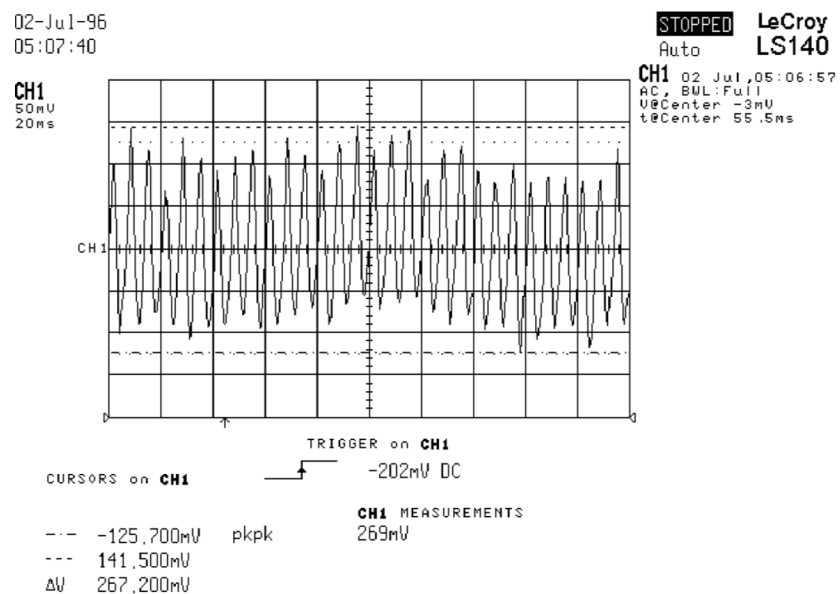
7.2. Wybrane wyniki z pomiarów impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych na wyjściu przetwornic

Wyniki pomiarów impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych przedstawiają rysunki 13 i 14.

a)



b)



Rys. 14. Oscylogram napięcia wyjściowego w sieci pokładowej niskiego napięcia wagonu typu 144A dla przetwornicy SAB WAPCO-DC-AC-DC (3 kV/3×380 V/24 V), o mocy 47 kW
a) przy pracy na biegu jałowym, b) przy pracy z pełnym obciążeniem

8. PODSUMOWANIE WYNIKÓW POMIARÓW

8.1. Wyniki pomiarów poziomu zaburzeń radioelektrycznych

W energetycznych sieciach zasilania elektrycznych pojazdów szynowych występują zaburzenia elektromagnetyczne spowodowane różnymi czynnikami, w następstwie których powstają również zaburzenia radioelektryczne o określonym widmie częstotliwości. Szerokość widma częstotliwości jest uzależniona od czasów propagacji impulsów. Poziom zaburzeń radioelektrycznych zależy od mocy źródła, tłumienności linii przesyłowej oraz od odległości od linii przesyłowej (dla zaburzeń indukowanych).

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że wysoki poziom zaburzeń radioelektrycznych zanotowano dla lokomotywy SU45 dla częstotliwości 0,25 MHz. Występowało to we wszystkich przypadkach pomiarów, tj. zarówno przy pracującej przetwornicy, jak i pracujących silnikach. Analizując charakter przebiegu charakterystyki poziomu zaburzeń radioelektrycznych w funkcji częstotliwości można stwierdzić, że są to typowe przebiegi w przypadku zaburzeń radioelektrycznych, generowanych przez komutatorowe maszyny elektryczne. Zauważone różnice w przebiegach charakterystyk zmierzonych dla innych egzemplarzy lokomotyw wynikają prawdopodobnie z różnego stanu technicznego komutatorów i szczotek w maszynach elektrycznych.

Podobne rezultaty uzyskano podczas pomiarów w lokomotywach ET22. Przyczyną podwyższonych poziomów zaburzeń w niektórych zakresach widma była przetwornica wirująca. Również zanotowano przekroczenie poziomu dopuszczalnego dla częstotliwości 0,25 MHz dla dwóch egzemplarzy lokomotyw (wartości średnie z pomiarów wynosiły 101,8 dB oraz 103,8 dB), co oznacza przekroczenie poziomu dopuszczalnego o 2,8 dB i 3,8 dB.

W przebadanych pięciu egzemplarzach lokomotyw EU07 stwierdzono przekroczenie poziomu dopuszczalnego. Przekroczenia te nie odnosiły się tylko do jednej częstotliwości, jak to wystąpiło w lokomotywie ET22, lecz obejmowały przeważnie pasmo 0,15 MHz±1,5 MHz. Czyniono próby wyjaśnienia tego zjawiska. W czasie jazdy obserwowano, czy wykonywane manewry urządzeniami pokładowymi przez maszynistę (nastawnik jazdy, włączanie/wyłączanie ogrzewania) mają wpływ na przebieg charakterystyki zaburzeń radioelektrycznych w funkcji częstotliwości. Nie zaobserwowano jednak bezpośredniego związku między wykonywanymi manewrami a przebiegiem charakterystyki zaburzeń radioelektrycznych w funkcji częstotliwości. Można przypuszczać, że przyczyną była wadliwa współpraca odbieraka prądu z siecią trakcyjną i przenikanie zaburzeń radioelektrycznych z obwodu głównego wskutek sprzężeń.

Wyniki pomiarów poziomu zaburzeń radioelektrycznych w sieci zasilania niskiego napięcia lokomotyw EP09 nie różnią się w sposób istotny od wyników dla lokomotyw EU07. Zauważono natomiast większy wpływ jakości współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną na poziom zaburzeń radioelektrycznych w pokładowej sieci zasilania niskiego napięcia lokomotyw typu EP09. Na rysunku 5 są pokazane charakterystyki poziomu zaburzeń radioelektrycznych w sieci pokładowej niskiego napięcia w paśmie od 0÷15 MHz do 30 MHz dla lokomotywy EP05, uzyskane w czasie postoju i czasie jazdy. Wynika z nich zdecydowany wpływ obwodu głównego na obwód zasilania niskiego napięcia.

Przetwornice instalowane w wagonach pasażerskich typu: U/WA-3000/28/6,5 DC-DC o mocy 6,5 kW i U/WA-3000/28/6,5 DC-DC o mocy 6,5 kW oraz SAB WAPCO o mocy 47 kW nie generują w obwodzie wyjściowym zaburzeń radioelektrycznych, przekraczających poziom dopuszczalny, określony w normie europejskiej [5].

8.2. Wyniki pomiarów amplitud przepięć

W przebadanych lokomotywach spalinowo-elektrycznych najwyższy poziom impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych zarejestrowano dla lokomotywy SU45. Źródłem tych impulsów są pokładowe urządzenia sterujące (np. nastawnik jazdy powodujący załączanie styczników). Znacznie niższe poziomy przepięć (rzędu kilkudziesięciu woltów) zanotowano w sieci pokładowej niskiego napięcia lokomotyw SM42. Najwyższe amplitudy przepięć powoduje praca wentylatorów i prądnicy.

Podobne wyniki uzyskano podczas pomiarów w lokomotywach ET22. Najwyższe poziomy zanotowano w czasie rozruchu lokomotywy. Pomiary wykonywano w warunkach postoju lokomotyw ET22 (włączano i wyłączało poszczególne obwody po stronie wysokiego napięcia).

Amplitudy zaburzeń o tym poziomie można uznać za mało groźne dla urządzeń typu radiotelefon pokładowy, ponieważ jego zasilacz jest wyposażony w filtr o wejściu indukcyjnym.

Pomiary przepięć w pokładowej sieci zasilania lokomotyw EU07 i EP09 wykonano w warunkach dynamicznych, z zastosowaniem rejestratora i oscyloskopu. Najwięcej zaburzeń impulsowych zanotowano podczas pomiarów w lokomotywie EP09. Były to jednak impulsy o małej amplitudzie — około 60 V. Natomiast podczas pomiarów w lokomotywach EU07 zanotowano mniejszą liczbę impulsów przepięć, ale o zdecydowanie wyższej amplitudzie (powyżej 390 V). Podczas obserwacji prowadzonych za pomocą oscyloskopu zanotowano osiem przepięć o amplitudzie powyżej 800 V. Jest to zjawisko niepokojące, ponieważ pojedynczy impuls o dużej amplitudzie może spowodować negatywne skutki w obwodzie zasilania wrażliwego urządzenia elektronicznego.

W trakcie prowadzonych obserwacji nie zanotowano związku między amplitudami przepięć a określonymi czynnościami wykonywanymi przez maszynistę. Zarejestrowane impulsy były prawdopodobnie wynikiem chwilowego pogorszenia współpracy odbieraka z siecią trakcyjną i powstania znacznych przepięć w obwodzie głównym lokomotywy i następnie przedostania się przepięć w wyniku istniejących sprzężeń obwodu głównego z obwodem zasilania niskiego napięcia.

Badania amplitud przepięć na wyjściu niskonapięciowym przetwornic statycznych wykonywano za pomocą oscyloskopu cyfrowego, dla różnych warunków pracy przetwornicy. W przypadku przetwornicy UWA-3000/28/6,5 stwierdzono, że impulsy przepięć mają amplitudę przekraczającą niemal dwukrotnie poziom napięcia stałego, występującego na wyjściu przetwornicy. Częstotliwość występowania impulsów przepięć wynika z podstawowej częstotliwości pracy przetwornicy.

Bateria akumulatorów, współpracująca z przetwornicą buforowo, nie stanowi filtru w tym zakresie częstotliwości, ponieważ impedancja akumulatora ma w tym zakresie częstotliwości charakter indukcyjny.

Na przykład, przetwornica SAB WAPCO miała na wyjściu poziom przepięć rzędu 270 mV, a więc zdecydowanie mniejszy niż inne przetwornice.

Przetwornice wagonowe służą obecnie do zasilania przede wszystkim urządzeń oświetleniowych w wagonach pasażerskich.

9. WNIOSKI

1. Wyniki z badań — przedstawione w opracowaniu — potwierdzają potrzebę i zasadność wykonywania pomiarów w dziedzinie kompatybilności elektromagnetycznej w procedurze nadawania świadectw kwalifikacji dla urządzeń elektrycznych i elektronicznych, instalowanych w pojazdach trakcyjnych i wagonach pasażerskich.
2. Stan techniczny urządzeń elektrycznych, a szczególnie przetwornic wirujących, decyduje o poziomie zaburzeń radioelektrycznych w pokładowej sieci energetycznej niskiego napięcia lokomotyw i wagonów pasażerskich.
3. Podczas prowadzenia prac projektowych nad nowymi pojazdami i pojazdami modernizowanymi należy zwrócić uwagę na konieczność separacji elektrycznej obwodów wysokiego i niskiego napięcia w celu zmniejszenia pasożytniczych sprzężeń pojemnościowych i indukcyjnych.
4. Przedstawione wyniki pomiarów nie mogą stanowić oceny „badań typu”; należy je traktować tylko jako rozpoznanie wagi problemu występujących zaburzeń elektromagnetycznych w sieci pokładowej lokomotywy i wagonu pasażerskiego.

BIBLIOGRAFIA

1. *Laskowski M., Kulawiak A.*: Pomiary zakłóceń impulsowych na elektrycznych zespołach trakcyjnych EN94 linii WKD oraz opracowanie sposobu zabezpieczenia urządzeń przewoźnych ZFM 90. Praca CNTK, temat nr 1001/24 1994.
2. *Laskowski M., Malesa R., Wróbel Z.*: Określenie istniejących poziomów zakłóceń elektromagnetycznych w ruchomych i stacjonarnych obiektach kolejowych. Praca CNTK, temat nr 1049/24, 1997.
3. EN 50121-1 Railway applications — Electromagnetic compatibility. Part 1: General.
4. EN 50121-4 Railway applications — Electromagnetic compatibility. Part 3-1: Rolling stock — Train and complete vehicle.
5. EN 50121-4 Railway applications — Electromagnetic compatibility. Part 3-2: Rolling stock — Apparatus.
6. PN -06122 Pojazdy trakcyjne. Wyposażenie elektroniczne. Przepisy ogólne.
7. PN-93/T-06450 Przemysłowe zakłócenia radioelektryczne. Urządzenia i metody pomiarów zakłóceń radioelektrycznych.
8. PN-EN 50121-2: 2004 Zastosowania kolejowe — Kompatybilność elektromagnetyczna, Część 2: Oddziaływanie systemu kolejowego na otoczenie.
9. *Sowa A.*: Ochrona odgromowa i przeciwprzepięciowa. Poradnik. Wyd. VESALIUS, Kraków 2000.