

Metody analizy i oceny promieniowania elektromagnetycznego w badaniach kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) pojazdów samochodowych zwłaszcza elektrycznych

Sławomir Łukjanow¹, Robert Burlński²

Automotive Industry Institute (PIMOT), QUASAR Electronics

Część II

Analiza promieniowania elektromagnetycznego
Wybranych pojazdów elektrycznych - EV

Streszczenie

W artykule zostały omówione wymagania kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) dla pojazdów i urządzeń samochodowych oraz metody badań promieniowania elektromagnetycznego (PEM) w oparciu o dokumenty normatywne stanowiące podstawę dopuszczenia do produkcji i ruchu (homologacja) danego pojazdu. Dokumentami tymi są Regulamin nr 10 EKG ONZ oraz Dyrektywa 72/245/EWG. Dla oceny PEM pojazdów zostały zaproponowane i opisane trzy grupy metod: liniowe, polowe i estymacji parametrów. Na podstawie przeprowadzonych w PIMOT badań kilku samochodów elektrycznych w zakresie PEM przeprowadzono analizę i ocenę wg wybranych metod. Do analizy i obliczeń wykorzystano następujące pojazdy: OPEL Ampera, RENAULT Fluence, CITROEN C-Zero i MEGA e-City. Przeprowadzona analiza i obliczenia wykazały dużą zbieżność przydatności zaproponowanych metod oceny PEM pojazdów samochodowych. Zapewnienie wysokich jakościowo parametrów wpływających na ocenę, w tym przede wszystkim promieniowania elektromagnetycznego (PEM) ma wpływ nie tylko na poprawne działanie pojazdu, szczególnie EV, ale też na zdrowie przebywających wewnątrz: kierowcy i pasażerów. Wyniki pracy mogą być wykorzystane i rozpowszechniane szczególnie przez konstruktorów i badaczy pojazdów samochodowych, zwłaszcza EV, w których występują duże ilości systemów i modułów elektronicznych.

Słowa kluczowe: badania pojazdów elektrycznych (EV), EMC pojazdów samochodowych, analiza badań EMC, promieniowanie elektromagnetyczne pojazdów

¹ Automotive Industry Institute (PIMOT), ul. Jagiellońska 55, 01-301 Warszawa, Poland

² QUASAR Electronics, ul. Cieślowskich 25k, 03-017 Warszawa, Poland

1. Analiza i ocena PEM wybranych samochodów elektrycznych (EV)

W celu oceny przydatności do praktycznego zastosowania proponowanych w pkt. 4 (cz. I artykułu) metod analizy i oceny PEM pojazdów samochodowych wykonano w Laboratorium Elektroniki i Akustyki PIMOT badania czterech samochodów elektrycznych a następnie wykonano niezbędne obliczenia, których wyniki przedstawiono poniżej. Obiektami badań i oceny były produkowane seryjnie pojazdy EV:

- OPEL Ampera.
- RENAULT Fluence,
- CITROEN C-Zero,
- MEGA e-City,

Wybór pojazdów wynikał z dostępności na rynku.

Dane techniczne badanych pojazdów EV przedstawia tabela 1. Widok ogólny badanych pojazdów przedstawiają fotografie na rys. 6, 7, 8 i 9.

Analizę i ocenę PEM przeprowadzono w oparciu o następujące metody z spośród grupy wymienionej w pkt. 4 (cz. I artykułu):

- metoda dwuliniowa plus (ML2+),
- metoda połowa dwuliniowa (MP2),
- metoda estymacji parametrów (MEP).

Tab. 1. Ważniejsze dane techniczne badanych pojazdów EV (dane katalogowe producentów).

Parametr	OPEL Ampera	RENAULT Fluence	CITROEN C-Zero	MEGA e-City
Rodzaj nadwozia:	sedan	sedan	hatchback	towos
- liczba drzwi	5	4	5	3
- liczba miejsc	4	5	4	2
Masa własna [kg]	1715	1605	1110	750
Masa całkowita [kg]	2080	2035	1450	1055
Pojemność bagażnika [l]	300	315	256	900
Silnik elektryczny	AC	AC	AC	DC
- moc ciągła [kW]	111	70	49	8
- napięcie znamionowe [V]	950	400	330	48
Baterie akumulatorów:				
- energia [kWh]	16	22	16	ok.10
- rodzaj	Li-Ion	Li-Ion	Li-Ion	Li-Ion
Prędkość maksymalna [km/h]	161	135	130	64

Parametr	OPEL Ampera	RENAULT Fluence	CITROEN C-Zero	MEGA e-City
Przyśpieszenie 0 – 100 km/h [s]	9	13	15,9	nd
Zasięg [km]	56 ^x	185	150	65
Wymiary nadwozia:				
- długość [cm]	441	462	348	296
- szerokość [cm]	180	181	148	143
- wysokość [cm]	143	148	161	147

^x – z dodatkowym napędem (HEV) ok. 500 km



Rys. 6. OPEL AMPERA



Rys. 7. RENAULT FLUENCE



Rys. 8. CITROEN C-ZERO



Rys. 9. MEGA E-CITY

2. Ocena PEM metodą dwuliniową plus (ML2+)

Pomiary emisji elektromagnetycznej pojazdów przeprowadzono w warunkach przestrzeni otwartej na podstawie wymagań Regulaminu EKG ONZ 10.04 oraz normy CISPR 12. Dla każdego z badanych pojazdów pomiary przeprowadzono dwukrotnie: pierwszy pomiar dla pojazdu wraz z tłem i drugi pomiar emisji tła. W wyniku pomiarów uzyskano dane liczbowe stanowiące materiał wejściowy do dalszej analizy. W ramach badań przeprowadzono również próbę eliminacji poziomu tła poprzez matematyczne operacje na danych pomiarowych emisji pojazdów wraz z tłem oraz emisji samego tła.

Na rysunkach 10 ÷ 17 przedstawiono wyniki pomiarów emisji elektromagnetycznej uzyskane dla poszczególnych pojazdów. Wyniki podane są w dwu podzakresach częstotliwości (30 ... 300) MHz i (300 ... 1000) MHz.

W celu eliminacji emisji elektromagnetycznej tła drogą obliczeniowego odjęcia sygnału tła od sygnału samochodu wraz tłem, dokonano przekształceń matematycznych korzystając z poniższych zależności:

$$X \left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right] = 10^{\frac{X \left[\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}} \right] - 170}{20}} \quad (1)$$

$$P \left[\frac{W}{m^2} \right] = \frac{\left(X \left[\frac{V}{m} \right] \right)^2}{377} \quad (2)$$

$$X \left[\frac{V}{m} \right] = \sqrt{P \left[\frac{W}{m^2} \right] \cdot 377} \quad (3)$$

$$X \left[\frac{dB_{\mu V}}{m} \right] = 20 \cdot \log X \left[\frac{V}{m} \right] + 120 \quad (4)$$

Przyjmując:

$X_2 \left[\frac{dB_{\mu V}}{m} \right]$ jako poziom emisji elektromagnetycznej pojazdu wraz z tłem,

$X_1 \left[\frac{dB_{\mu V}}{m} \right]$ jako poziom emisji elektromagnetycznej tła,

korzystając z zależności 1 ... 4 uzyskujemy następujący wzór:

$$\begin{cases} \Delta X \left[\frac{dB_{\mu V}}{m} \right] = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{X_2}{10}} - 10^{\frac{X_1}{10}} \right) & \text{dla } X_2 > X_1 \\ 0 & \text{dla } X_2 \leq X_1 \end{cases} \quad (5)$$

gdzie ΔX jest poszukiwanym poziomem emisji pojazdu z wyeliminowaną emisją tła.

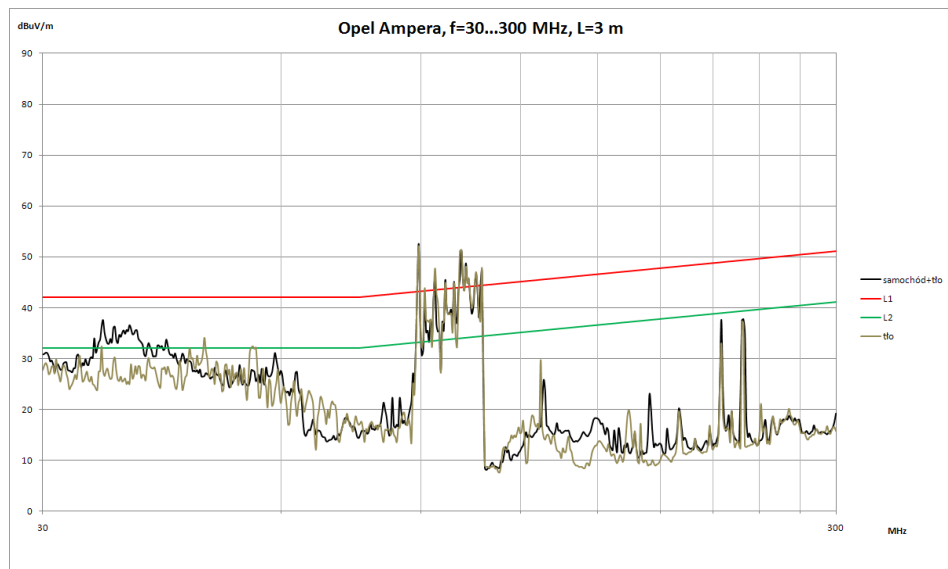
Rozważenie przypadku $X_2 \leq X_1$ okazało się konieczne ze względu na niestacjonarność sygnału emisji elektromagnetycznej tła oraz z uwagi na fakt, iż oba pomiary emisji tła nie były wykonywane jednocześnie. Z tego też powodu konieczne okazało się zweryfikowanie uzyskanego wyniku i „ręczne” usunięcie resztkowych wartości emisji elektromagnetycznej tła, które nie zostały wyeliminowane w wyniku obliczeń matematycznych.

W dalszej części pracy, przy użyciu dedykowanego programu komputerowego, dokonano obliczeń szerokości pasma przekroczeń Δf poziomu odniesienia L2 (L2A). Jako poziom odniesienia przyjęto:

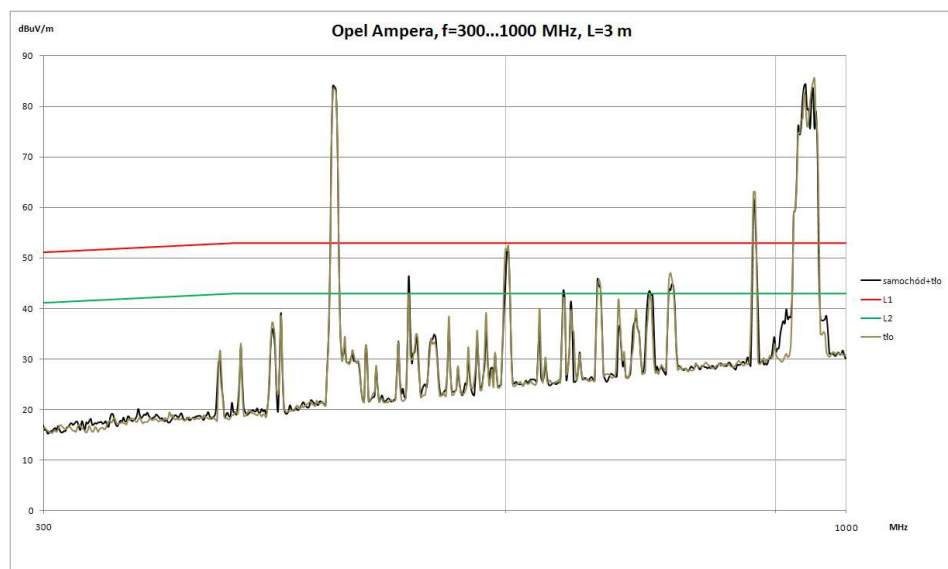
- 1) L – 10 dB dla pomiarów wykonywanych z odległości 3 m (poziom L2),
- 2) L – 8 dB dla pomiarów wykonywanych z odległości 10 m (poziom L2A),

gdzie L jest poziomem granicznym zdefiniowanym w Regulaminie EKG ONZ 10.04.

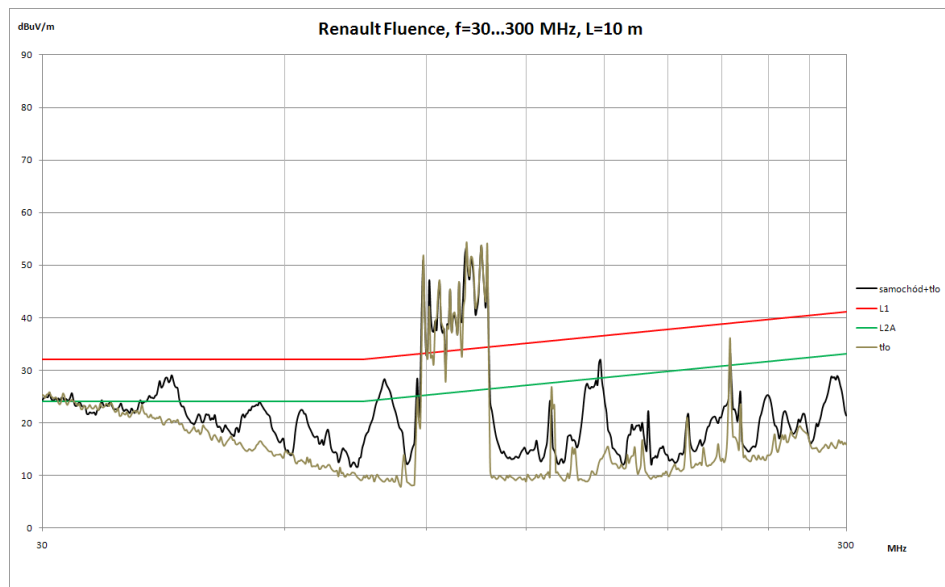
W tabelach 2-5 przedstawiono wyniki obliczeń dla poszczególnych pojazdów.



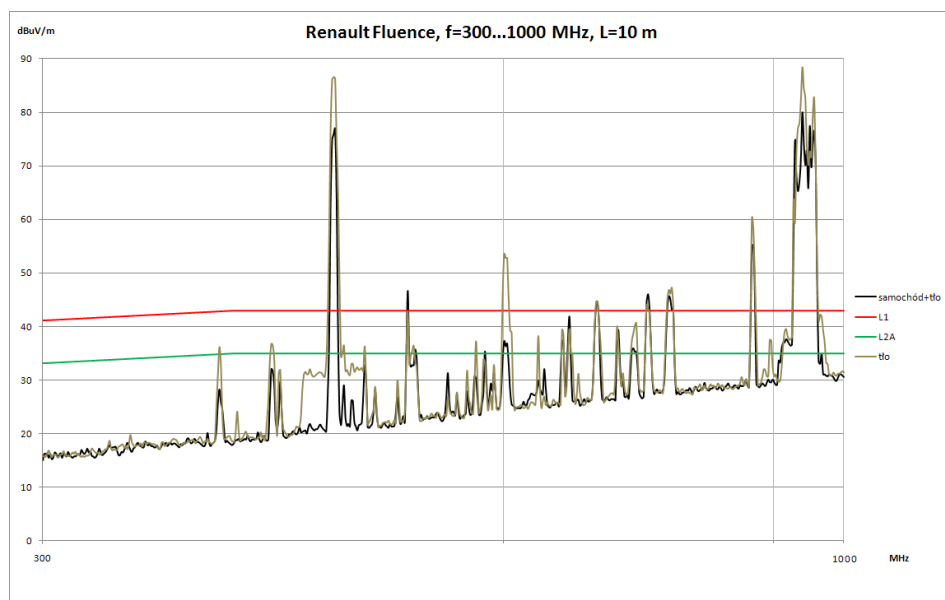
Rys. 10. Emisja elektromagnetyczna pojazdu i tła: OPEL Ampera, $f = 30..300$ MHz
 Oś x – częstotliwość [MHz]
 Oś y – promieniowania elektromagnetycznego (PEM) [dB μ V/m]



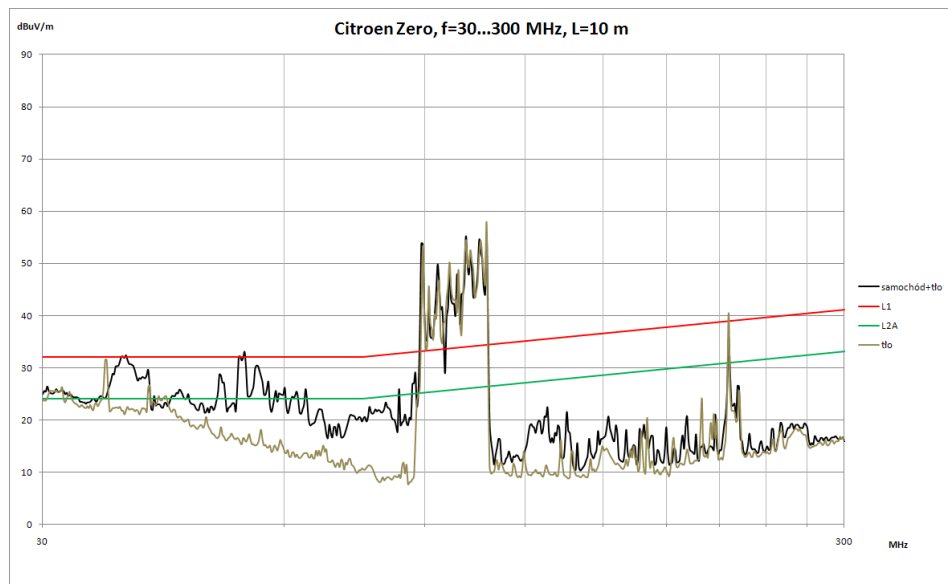
Rys. 11. Emisja elektromagnetyczna pojazdu i tła: OPEL Ampera, $f = 300..1000$ MHz
 Oś x – częstotliwość [MHz]
 Oś y – promieniowania elektromagnetycznego (PEM) [dB μ V/m]



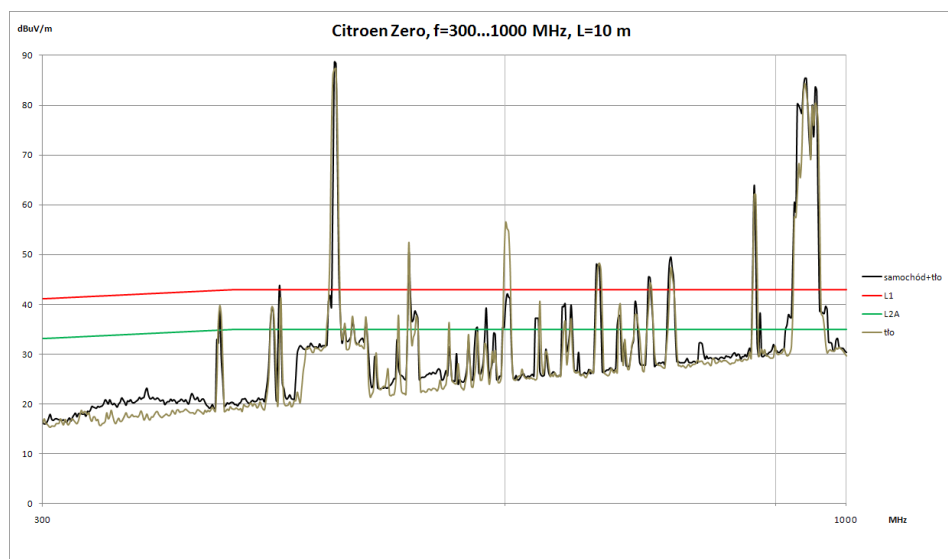
Rys. 12. Emisja elektromagnetyczna pojazdu i tła: RENAULT Fluence,
 $f = 30..300$ MHz
 Oś x – częstotliwość [MHz]
 Oś y – promieniowania elektromagnetycznego (PEM) [dBμV/m]



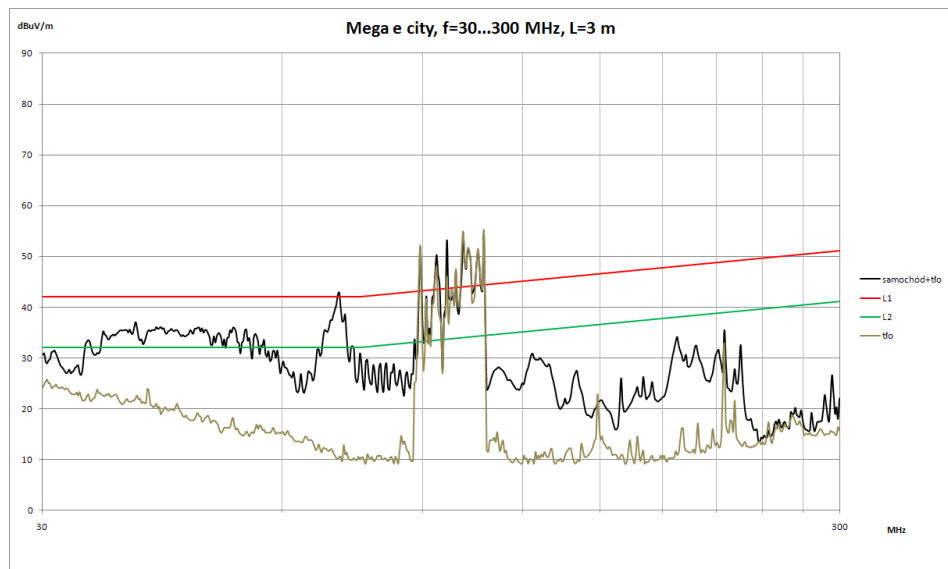
Rys. 13. Emisja elektromagnetyczna pojazdu i tła: RENAULT Fluence,
 $f = 300..1000$ MHz
 Oś x – częstotliwość [MHz]
 Oś y – promieniowania elektromagnetycznego (PEM) [dBμV/m]



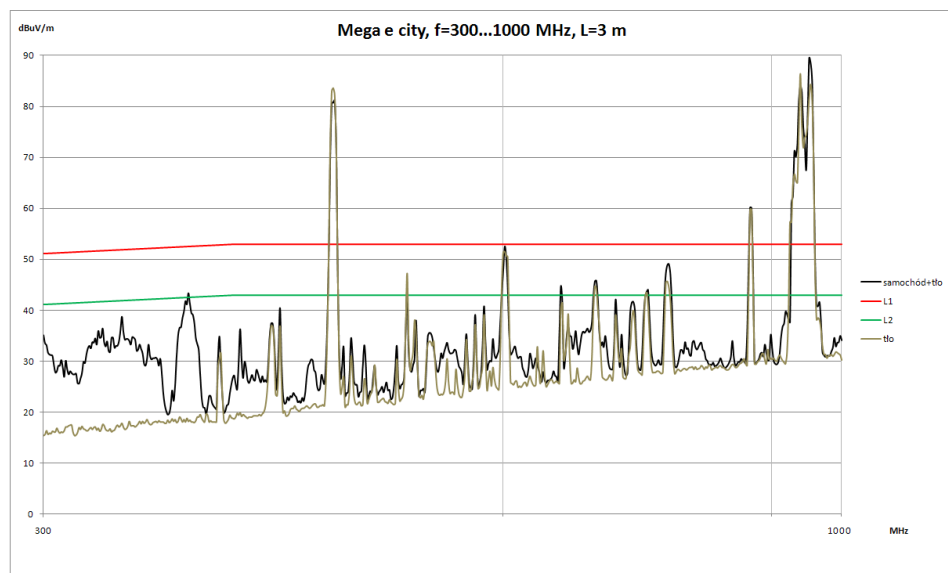
Rys. 14. Emisja elektromagnetyczna pojazdu i tła: CITROEN Zero, $f = 30..300$ MHz
 Oś x – częstotliwość [MHz]
 Oś y – promieniowania elektromagnetycznego (PEM) [dBμV/m]



Rys. 15. Emisja elektromagnetyczna pojazdu i tła: CITROEN Zero, $f = 300..1000$ MHz
 Oś x – częstotliwość [MHz]
 Oś y – promieniowania elektromagnetycznego (PEM) [dBμV/m]



Rys. 16. Emisja elektromagnetyczna pojazdu i tła: MEGA e city, $f = 30..300$ MHz
 Oś x – częstotliwość [MHz]
 Oś y – promieniowania elektromagnetycznego (PEM) [$\text{dB}\mu\text{V/m}$]



Rys. 17. Emisja elektromagnetyczna pojazdu i tła: MEGA e city, $f = 300..1000$ MHz
 Oś x – częstotliwość [MHz]
 Oś y – promieniowania elektromagnetycznego (PEM) [$\text{dB}\mu\text{V/m}$]

Tab. 2. Szerokość pasma przekroczeń wartości linii odniesienia L2: Opel Ampera

OPEL Ampera, L = 3 m f = 30...300 MHz Limit line L2 exceedings:				
f start [MHz]	f stop [MHz]	Δf [MHz]	f(Pmax) [MHz]	ΔP_{max} [dBμV/m]
34.8286	34.8286	0.0000	34.8286	1.3908
35.4277	36.0372	0.6095	35.7312	5.0628
36.5011	39.5814	3.0803	38.5816	4.2284
39.9204	39.9204	0.0000	39.9204	0.1698
42.9217	42.9217	0.0000	42.9217	0.6611
f = 300...1000 MHz Limit line L2 exceedings:				
f start [MHz]	f stop [MHz]	Δf [MHz]	f(Pmax) [MHz]	ΔP_{max} [dBμV/m]
-	-	-	-	-

Tab. 3. Szerokość pasma przekroczeń wartości linii odniesienia L2A: Renault Fluence

RENAULT Fluence, L = 10 m f = 30...300 MHz Limit line L2 exceedings:				
f start [MHz]	f stop [MHz]	Δf [MHz]	f(Pmax) [MHz]	ΔP_{max} [dBμV/m]
41.8375	44.2221	2.3846	43.4743	4.5005
78.6393	81.3682	2.7289	79.9921	3.8663
147.8134	148.4450	0.6316	148.4450	3.4448
f = 300...1000 MHz Limit line L2 exceedings:				
f start [MHz]	f stop [MHz]	Δf [MHz]	f(Pmax) [MHz]	ΔP_{max} [dBμV/m]
-	-	-	-	-

Tab. 4. Szerokość pasma przekroczeń wartości linii odniesienia L2A: Citroen Zero

CITROEN Zero, L = 10 m				
f = 30...300 MHz				
Limit line L2 exceedings:				
f start [MHz]	f stop [MHz]	Δf [MHz]	f(Pmax) [MHz]	ΔP_{max} [dB μ V/m]
36.3458	40.6072	4.2614	38.0912	8.0497
44.4111	44.4111	0.0000	44.4111	0.2827
49.6181	50.4716	0.8535	49.8301	4.4715
52.4462	53.8053	1.3591	53.5763	8.9586
54.4980	57.3592	2.8612	55.4355	6.3572
58.5952	58.5952	0.0000	58.5952	1.2411
59.0970	60.1137	1.0167	60.1137	1.9667
61.4090	61.4090	0.0000	61.4090	0.1322
61.9350	62.1996	0.2646	62.1996	1.2120
63.8115	63.8115	0.0000	63.8115	1.7154
83.4768	83.4768	0.0000	83.4768	1.1734
86.7426	87.1133	0.3707	87.1133	2.0192
f = 300...1000 MHz				
Limit line L2 exceedings:				
f start [MHz]	f stop [MHz]	Δf [MHz]	f(Pmax) [MHz]	ΔP_{max} [dB μ V/m]
878.6966	878.6966	0.0000	878.6966	2.5892

Tab. 5. Szerokość pasma przekroczeń wartości linii odniesienia L2: Mega e-City

MEGA e-City, L = 3 m				
f = 30...300 MHz				
Limit line L2 exceedings:				
f start [MHz]	f stop [MHz]	Δf [MHz]	f(Pmax) [MHz]	ΔPmax [dBμV/m]
33.9488	34.3859	0.4371	34.2396	1.1815
35.5791	50.6873	15.1082	39.2453	4.9537
51.1214	52.8954	1.7740	52.0008	3.9266
53.3484	54.4980	1.1496	54.0352	3.5921
55.1996	55.9103	0.7107	55.4355	2.7252
56.3891	56.8721	0.4830	56.8721	1.4921
67.4486	72.2109	4.7623	70.6876	10.9299
73.1406	73.4531	0.3125	73.4531	0.3262
f = 300...1000 MHz				
Limit line L2 exceedings:				
f start [MHz]	f stop [MHz]	Δf [MHz]	f(Pmax) [MHz]	ΔPmax [dBμV/m]
373.2622	373.2622	0.0000	373.2622	0.8607

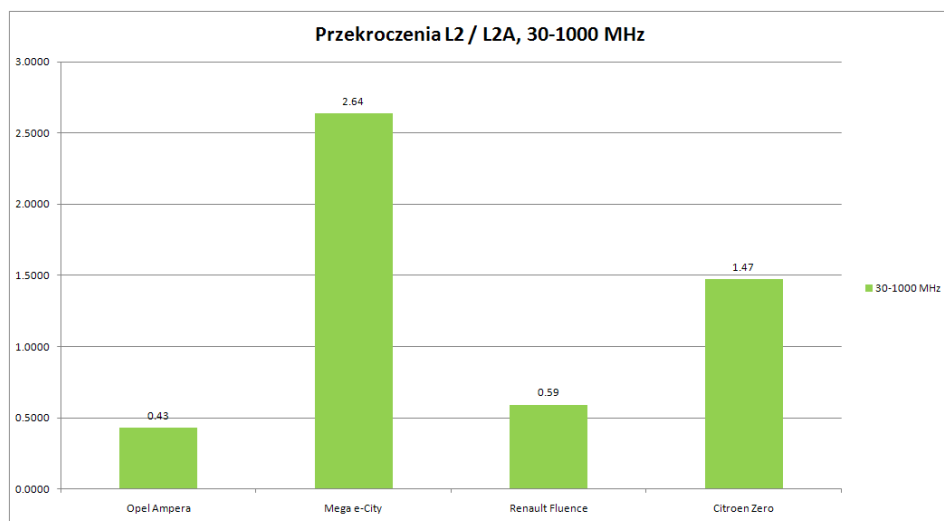
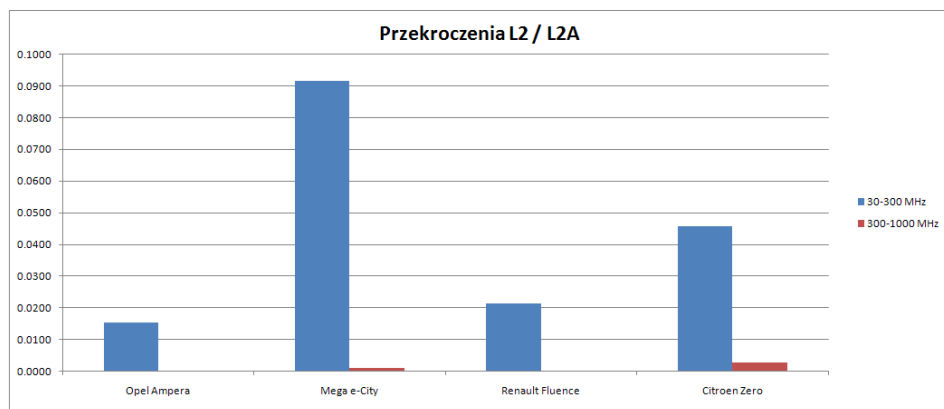
Ostatnim etapem pracy było wyznaczenie współczynnika przekroczenia wartości linii odniesienia L2 (L2A) na podstawie danych o zakresach częstotliwości, dla których odnotowano przekroczenia.

Współczynnik ten wyznaczony jest wzorem:

$$k = \frac{\Delta f}{F} \cdot 100\% \quad (6)$$

gdzie $F = 970$ MHz dla badania w zakresie częstotliwości 30...1000 MHz

Wartości współczynników dla poszczególnych pojazdów obliczono przy użyciu dedykowanego programu komputerowego. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 6 oraz zilustrowano wykresem przedstawionym na rys. 18.

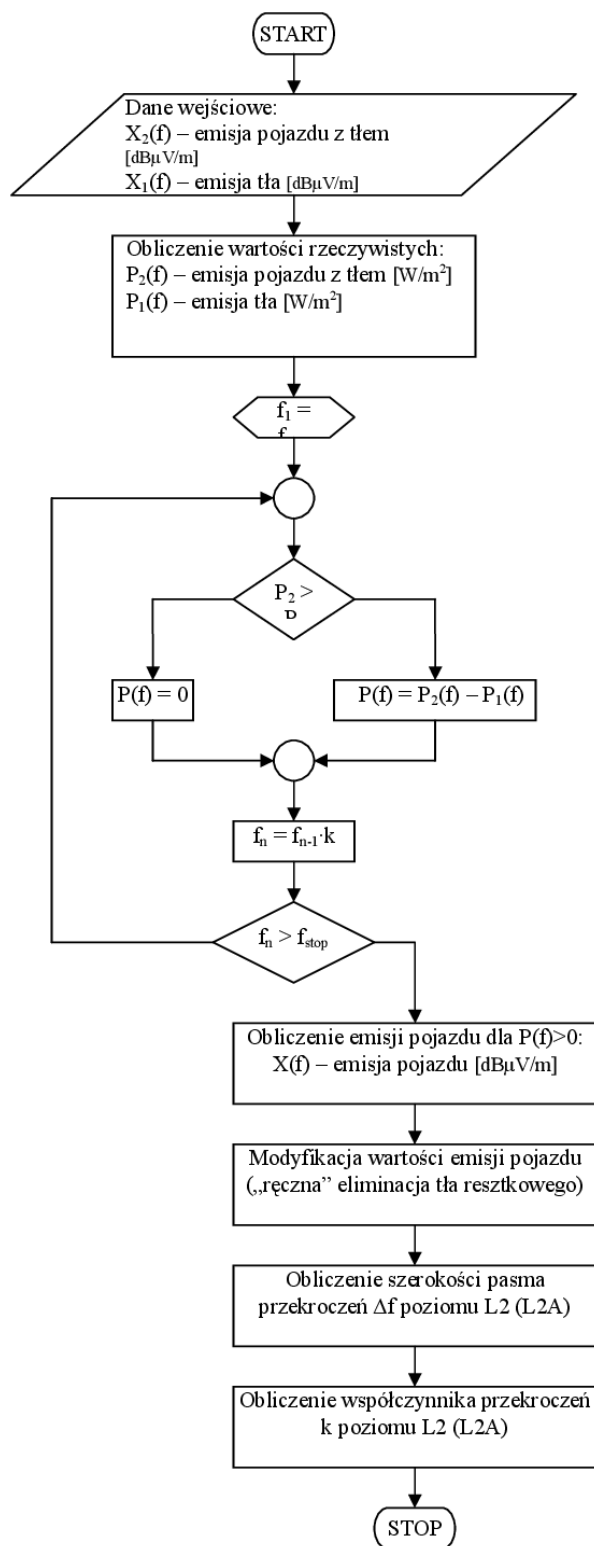


Rysunek 18. Porównanie współczynników emisji elektromagnetycznej przy badaniach EMC samochodów EV
 Oś x – pojazd
 Oś y – współczynnika emisji elektromagnetycznej

Tab. 6. Porównanie współczynników emisji elektromagnetycznej przy badaniach EMC samochodów EV.

Lp.	Marka badanego pojazdu	Poziom L2 / L2A					Klasyfikacja
		30...300 MHz		300...1000 MHz		razem	
		Σf_{over} [MHz]	$k_{30..300}$ [%]	Σf_{over} [MHz]	$k_{300..1000}$ [%]	k [%]	
	1	2	3	4	5	6	7
1.	Opel Ampera	4.1915	1.55	0	0.00	0.4321	1
2.	Renault Fluence	5.7451	2.13	0	0.00	0.5923	2
3.	Citroen Zero	12.3163	4.56	1.9591	0.28	1.4717	3
4.	Mega e-City	24.7374	9.16	0.8322	0.12	2.6360	4

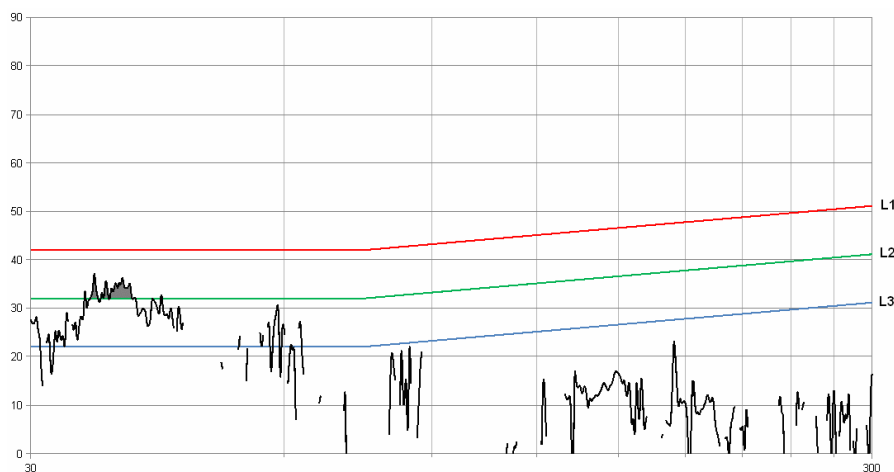
Poszczególne etapy obliczania współczynników emisji elektromagnetycznej pojazdów przedstawiono w postaci algorytmu na rysunku 19.



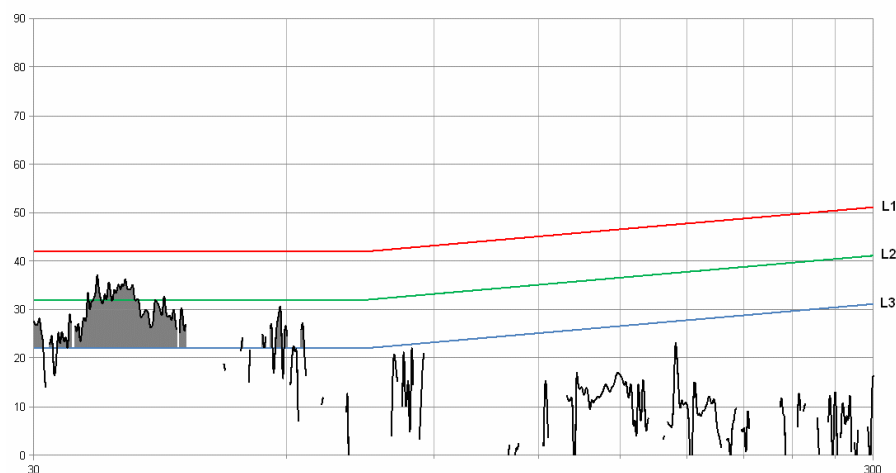
Rysunek 19. Algorytm obliczania współczynników energii przy metodzie ML2+

3. Ocena PEM metodą połową (MP2)

W metodzie tej ocenę kompatybilności elektromagnetycznej pojazdów pod względem emisji elektromagnetycznej przeprowadza się na podstawie zarówno pasma przekroczeń linii odniesienia L2 i L3 jak i poziomu natężenia pola elektromagnetycznego w odniesieniu do linii granicznych L1. Miarami poziomu emisji elektromagnetycznej pojazdów są w tej metodzie pola powierzchni ograniczonych wykresem zarejestrowanej emisji elektromagnetycznej oraz liniami granicznymi L1, L2 i L3. Ilustrację oceny poziomu emisji elektromagnetycznej metodą trzyliniową połową przedstawiono na rys. 20 i 21.



Rys. 20. Ocena emisji elektromagnetycznej pojazdu na podstawie pola powierzchni ograniczonego wykresem zarejestrowanej emisji oraz linią graniczną L2



Rys. 21. Ocena emisji elektromagnetycznej pojazdu na podstawie pola powierzchni ograniczonego wykresem zarejestrowanej emisji oraz linią graniczną L3

Pola powierzchni ograniczonych wykresem zarejestrowanej emisji oraz liniami granicznymi L1, L2, L3 obliczane są na podstawie wzoru:

$$k_i = \frac{1}{\Delta F} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} (X - L_i) df \quad (7)$$

lub w przypadku funkcji dyskretnej:

$$k_i = \frac{1}{\Delta F} \sum_{k=1}^N (X_k - L_i) \quad \text{gdzie } N - \text{rozmiar tablicy danych} \quad (8)$$

Obliczenia wykonano, przy użyciu opracowanego programu komputerowego, na danych identycznych jak w przypadku metody dwuliniowej plus.

Jako poziomy odniesienia L1/L1A przyjęto poziomy graniczne zdefiniowane w Regulaminie EKG ONZ 10.04. Jako poziomy odniesienia L2/L2A przyjęto, analogicznie do metody dwuliniowej plus:

- 1) L2 = L1 – 10 dB dla pomiarów wykonywanych z odległości 3 m,
- 2) L2A = L1A – 8 dB dla pomiarów wykonywanych z odległości 10 m.

Jako poziomy L3/L3A przyjęto, analogicznie do metody dwuliniowej plus:

- 3) L3 = L2 – 10 dB dla pomiarów wykonywanych z odległości 3 m,
- 4) L3A = L2A – 8 dB dla pomiarów wykonywanych z odległości 10 m (L3A).

W tabelach 7-10 przedstawiono wyniki obliczeń dla poszczególnych pojazdów:

Tab. 7.

Opel Ampera			
	L1	L2	L3
30-300 MHz	-35,9352	0,0569	0,8143
300-1000 MHz	-37,4028	0,0000	0,0000

Tab. 8.

Renault Fluence			
	L1A	L2A	L3A
30-300 MHz	-20,2057	0,0735	1,0821

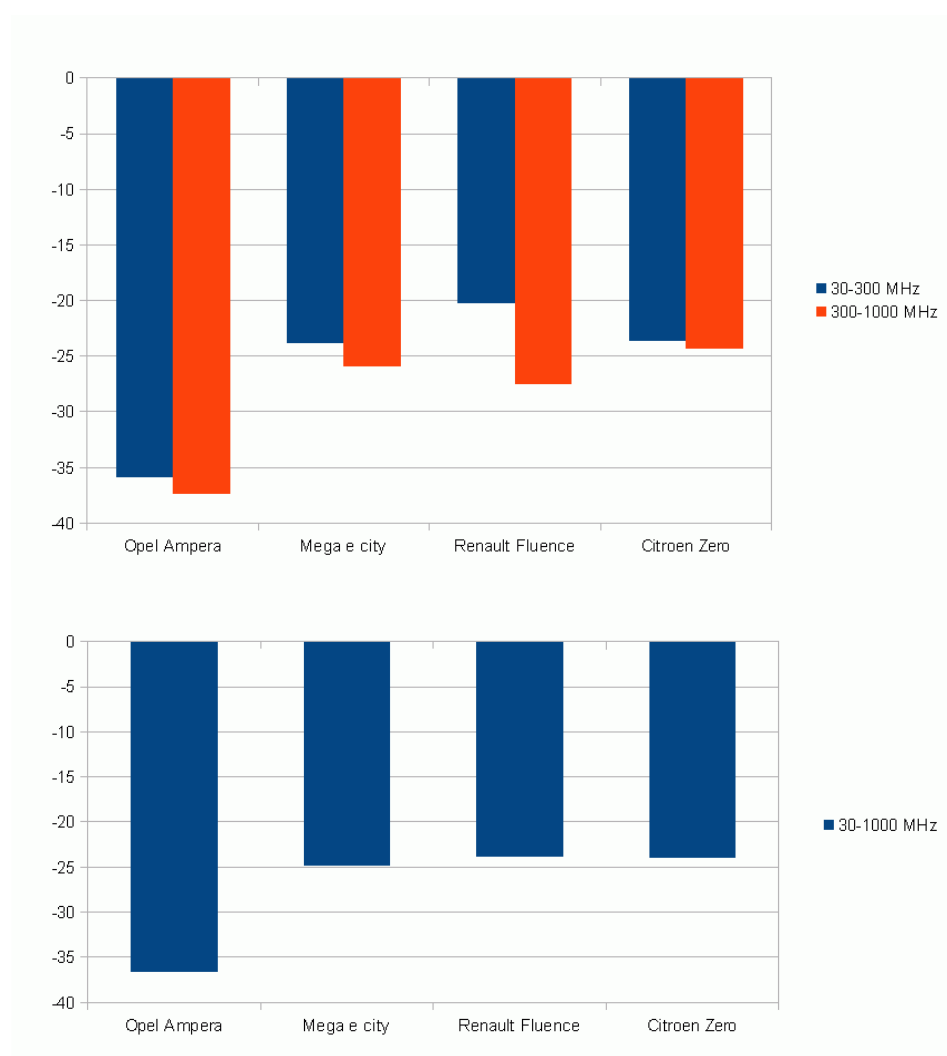
Tab. 9.

Citroen Zero			
	L1A	L2A	L3A
30-300 MHz	-23,6186	0,2203	1,4269
300-1000 MHz	-24,3279	0,0138	0,1217

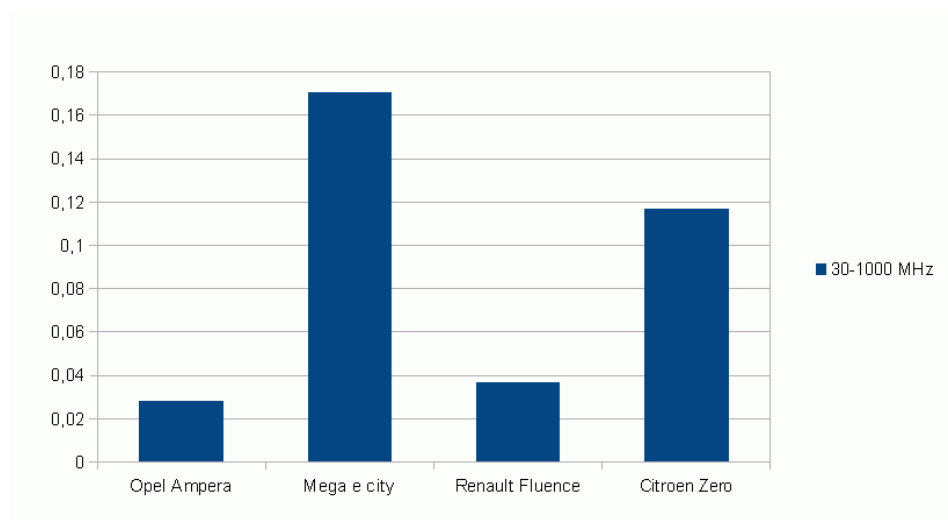
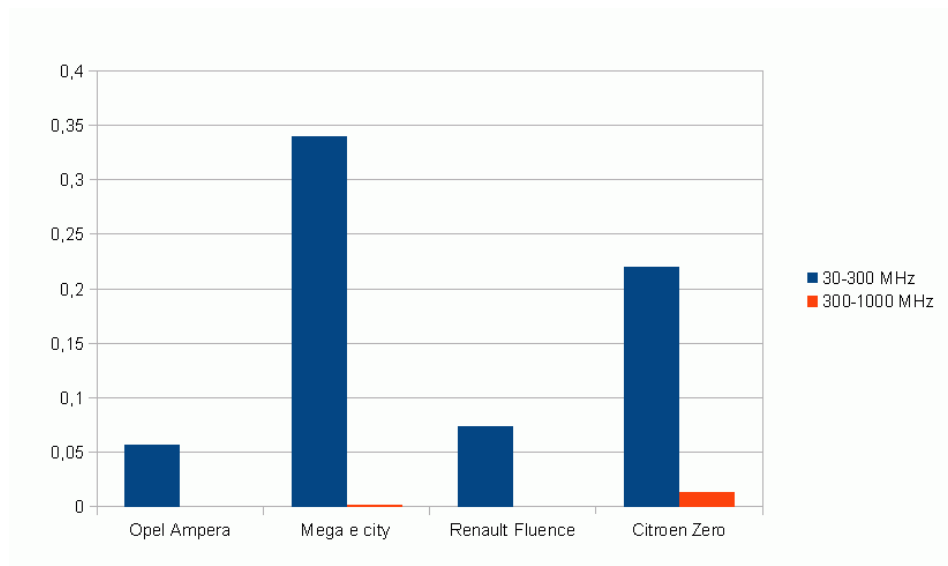
Tab. 10.

Mega e-city			
	L1	L2	L3
30-300 MHz	-23,8429	0,3398	2,5052
300-1000 MHz	-25,9069	0,0019	0,4500

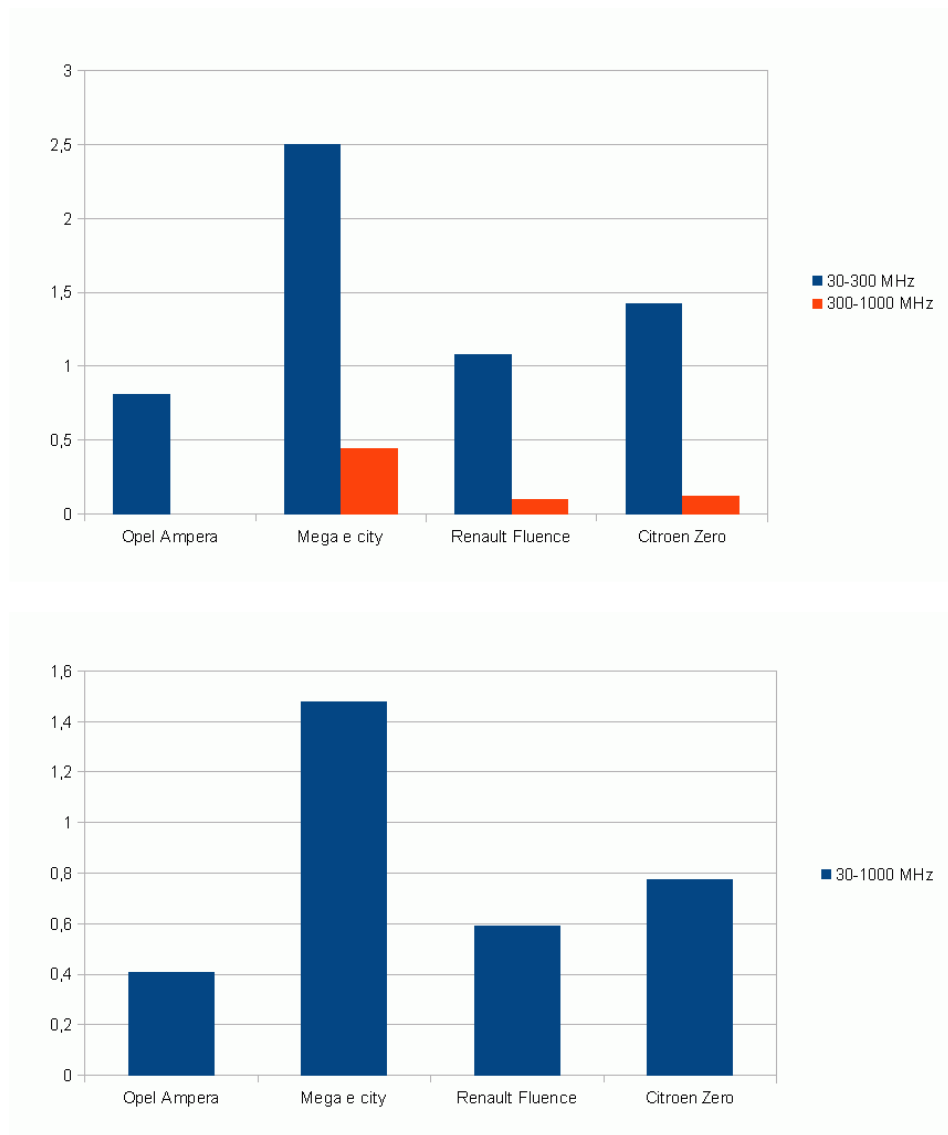
Uzyskane wyniki oceny PEM metodami polowymi dla badań emisji PEM przedstawiono w formie wykresów słupkowych na rys.: 22, 23 i 24.



Rys. 22. Porównanie wartości pól powierzchni pomiędzy wykresami emisji elektromagnetycznej a linią graniczną L1/L1A (objaśnienia w tekście)



Rys. 23. Porównanie wartości pól powierzchni pomiędzy wykresami emisji elektromagnetycznej a linią graniczną L2/L2A (objaśnienia w tekście)



Rys. 24. Porównanie wartości pól powierzchni pomiędzy wykresami emisji elektromagnetycznej a linią graniczną L3/L3A (objaśnienia w tekście)

4. Ocena PEM metodą estymacji parametrów (MEP)

Do oceny kompatybilności elektromagnetycznej pojazdów w zakresie emisji elektromagnetycznej zastosowano także metodę estymacji parametrów (MEP). W obliczeniach uwzględniono estymatory następujących parametrów związanych z mocą emitowanego sygnału elektromagnetycznego:

- a) estymator wartości średniej $\bar{X}$
- b) estymator wartości średniokwadratowej X^2
- c) estymator wariancji W
- d) estymator wartości skutecznej RMS
- e) estymator odchylenia standardowego S
- f) estymator amplitudy A

Obliczenia wykonano, przy użyciu opracowanego programu komputerowego, na danych identycznych jak w przypadku metody dwuliniowej plus (M2L+) i metody połowej trzyliniowej. Estymatory obliczono po przeliczeniu wartości natężenia pola elektromagnetycznego uzyskanych w wyniku pomiarów ze skali logarytmicznej na liniową.

Do obliczeń wykorzystano następujące wzory:

$$\text{- estymator wartości średniej} \quad \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (9)$$

$$\text{- estymator wartości średniokwadratowej} \quad X^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad (10)$$

$$\text{- estymator wariancji} \quad W = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (11)$$

$$\text{- estymator wartości skutecznej} \quad RMS = \sqrt{X^2} \quad (12)$$

$$\text{- estymator odchylenia standardowego} \quad S = \sqrt{W^2} \quad (13)$$

$$\text{- estymator amplitudy} \quad A = \bar{X} + S \quad (14)$$

Powyższe estymatory obliczono również dla poziomów odniesienia L1 , L2/L2A i L3/L3A.

Jako poziomy odniesienia L1/L1A przyjęto poziomy graniczne zdefiniowane w Regulaminie EKG ONZ 10.04. Jako poziomy odniesienia L2/L2A przyjęto, analogicznie do metody dwuliniowej plus oraz metody trzyliniowej połowej:

5) $L2 = L1 - 10$ dB dla pomiarów wykonywanych z odległości 3 m,

6) $L2A = L1A - 8$ dB dla pomiarów wykonywanych z odległości 10 m.

Jako poziomy L3/L3A przyjęto, analogicznie do metody dwuliniowej plus oraz metody trzyliniowej połowej:

7) $L3 = L2 - 10$ dB dla pomiarów wykonywanych z odległości 3 m,

8) $L3A = L2A - 8$ dB dla pomiarów wykonywanych z odległości 10 m.

W wyniku obliczeń uzyskano wyniki zestawione w tabeli 11:

Tab. 11.

Analizowany sygnał	X	X ²	W	RMS	S	A	d
Opel Ampera	7,14E-013	3,40E-024	2,90E-024	1,85E-012	1,70E-012	2,42E-012	3 m
Mega e-City	3,36E-012	3,90E-023	2,77E-023	6,25E-012	5,27E-012	8,63E-012	
L1	3,04E-010	1,38E-019	4,51E-020	3,71E-010	2,12E-010	5,16E-010	
L2	3,04E-011	1,38E-021	4,51E-022	3,71E-011	2,12E-011	5,16E-011	
L3	3,04E-012	1,38E-023	4,51E-024	3,71E-012	2,12E-012	5,17E-012	
Renault Fluence	1,53E-013	1,68E-025	1,45E-025	4,10E-013	3,80E-013	5,33E-013	10 m
Citroen Zero	3,75E-013	8,51E-025	7,12E-025	9,23E-013	8,44E-013	1,22E-012	
L1A	3,04E-011	1,38E-021	4,51E-022	3,71E-011	2,12E-011	5,16E-011	
L2A	4,82E-012	3,46E-023	1,13E-023	5,88E-012	3,37E-012	8,19E-012	
L3A	7,64E-013	8,69E-025	2,85E-025	9,32E-013	5,34E-013	1,30E-012	

Następnie obliczono estymatory parametrów dla poszczególnych pojazdów względem estymatorów dla linii granicznych zgodnie z poniższym wzorem:

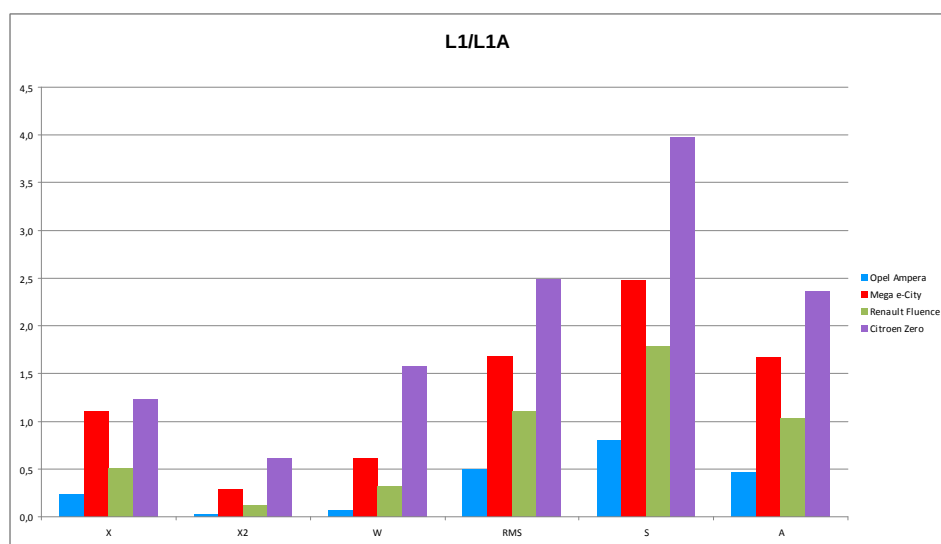
$$E = \frac{E_p}{E_{Li}} \quad (15)$$

gdzie $E \in \{\bar{X}, X^2, W, RMS, S, A\}$ - obliczany estymator

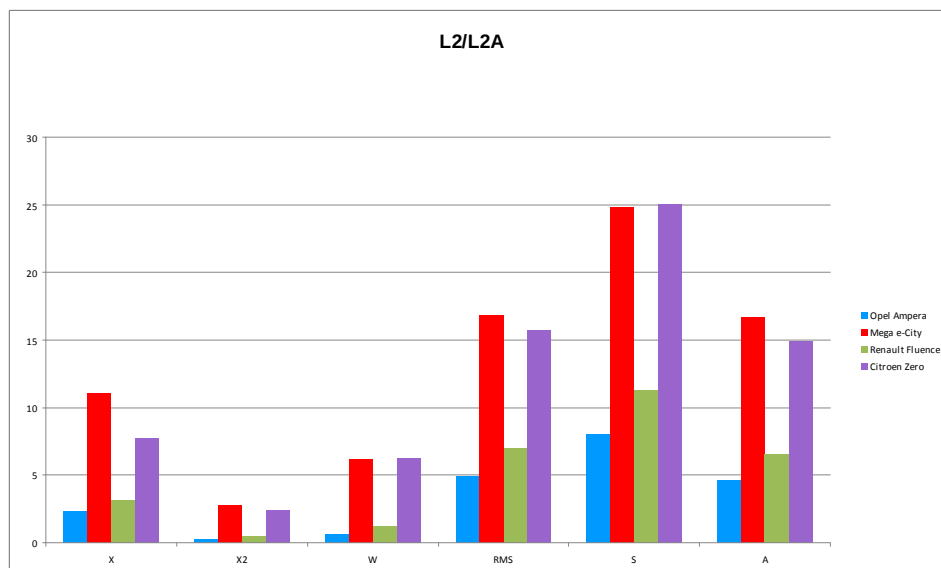
E_p – estymator parametru dla danego pojazdu

E_{Li} – estymator parametru dla linii granicznej $i = 1..3$

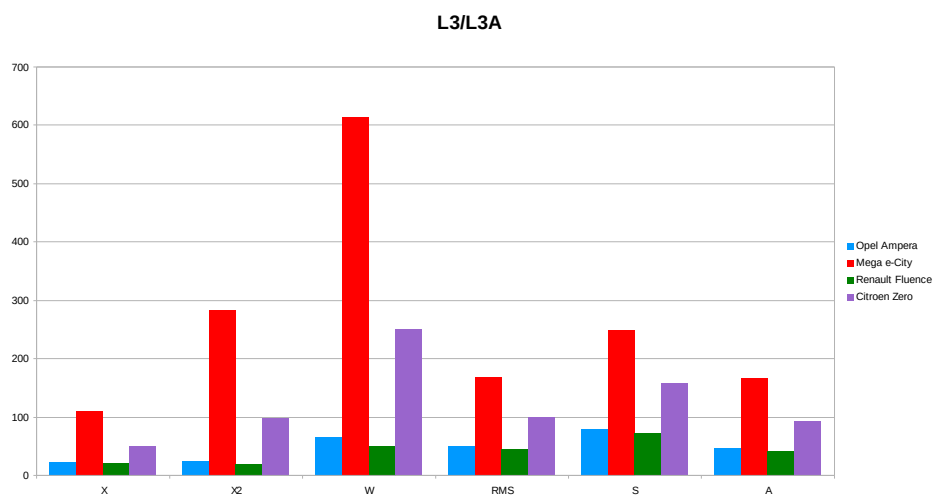
Na rysunkach 25, 26 i 27 przedstawiono wykresy obliczonych estymatorów badanych pojazdów względem linii granicznych L1, L2 i L3.



Rys. 25. Estymatory parametrów względem linii granicznej L1/L1A (objaśnienia w tekście)



Rys. 26. Estymatory parametrów względem linii granicznej L2/L2A (objaśnienia w tekście)



Rys. 27. Estymatory parametrów względem linii granicznej L3/L3A
(objaśnienia w tekście)

5. Analiza oceny PEM pojazdów

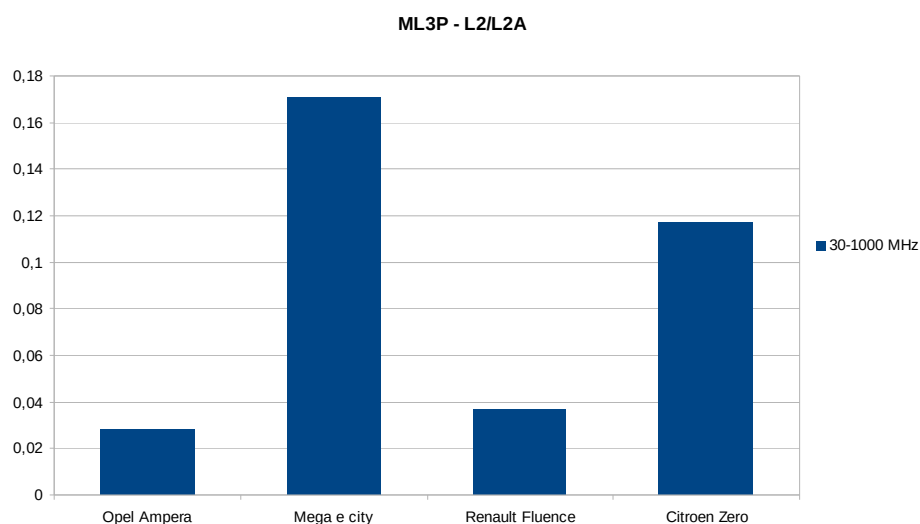
Ocenę kompatybilności elektromagnetycznej pojazdów pod względem emisji elektromagnetycznej przeprowadzono przy użyciu trzech metod:

- g) Metody dwuliniowej plus (ML2+),
- h) Metody połowej (MP),
- i) Metody estymacji parametrów (MEP).

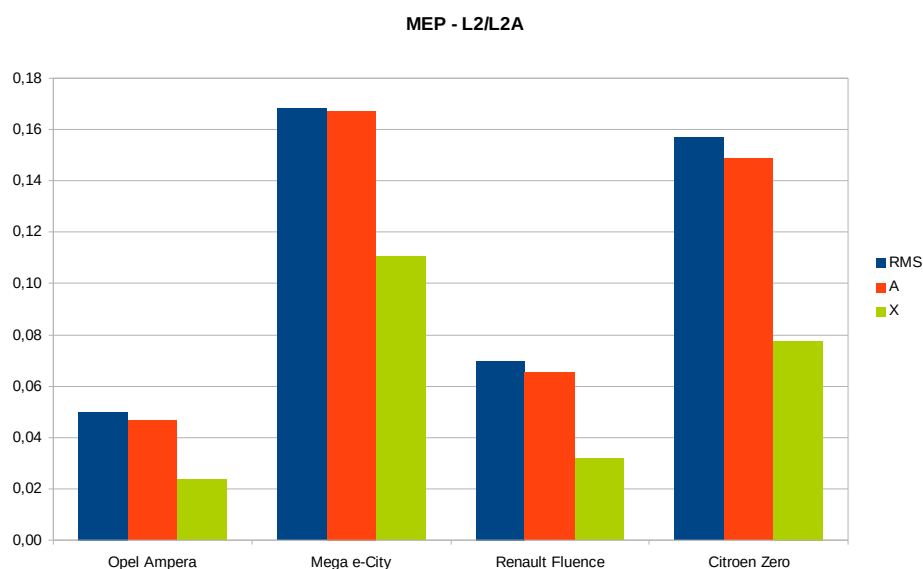
Uzyskane wyniki obliczeń są porównywalne dla poszczególnych metod. Na uwagę zasługuje zwłaszcza silna korelacja pomiędzy wynikami obliczeń dla metod: ML2+, MP i MEP (estymatory wartości średniej, wartości skutecznej i amplitudy) względem linii odniesienia L2/L2A, którą zilustrowano w tabeli 12 oraz na rysunkach 28 i 29.

Tab. 12. Zestawienie wyników obliczeń współczynnika emisji elektromagnetycznej względem linii odniesienia L2/L2A dla poszczególnych metod

samochód	ML2+	ML3P	MEP		
			RMS	A	X
Opel Ampera	0,43	0,03	0,05	0,05	0,02
Mega e-City	2,64	0,17	0,17	0,17	0,11
Renault Fluence	0,59	0,04	0,07	0,07	0,03
Citroen Zero	1,47	0,12	0,16	0,15	0,08



Rysunek 28. Wykres współczynnika emisji elektromagnetycznej względem linii odniesienia L2/L2A dla metody ML3P (objaśnienia w tekście)



Rysunek 29. Wykres współczynnika emisji elektromagnetycznej względem linii odniesienia L2/L2A dla metody MEP (estymatory wartości średniej, wartości skutecznej i amplitudy) (objaśnienia w tekście)

6. Podsumowanie

Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) pojazdów samochodowych a zwłaszcza elektrycznych stanowi bardzo ważny czynnik ich oceny. Zapewnienie wysokich jakościowo parametrów wpływających na ocenę, w tym przede wszystkim promieniowania elektromagnetycznego (PEM) ma wpływ nie tylko na poprawne działanie pojazdu ale też na zdrowie przebywających wewnątrz: kierowcy i pasażerów. Przedstawione w dokumentach normatywnych (Regulamin nr 10 EKG ONZ i Dyrektywa 72/245/EWG) kryteria dotyczą PEM w oparciu o graniczne wartości, stanowią wymagania minimalne. Nie ma kryteriów jakości umożliwiających analizę i ocenę PEM pojazdów samochodowych w badaniach EMC.

W artykule zostały omówione wymagania EMC dla pojazdów i urządzeń samochodowych oraz metody badań PEM w oparciu o podane wyżej dokumenty normatywne stanowiące podstawę dopuszczenia do produkcji i ruchu (homologacja) danego pojazdu. Dla oceny PEM pojazdów zostały zaproponowane i opisane w części I artykułu trzy grupy metod: liniowe, polowe i estymacji parametrów. Na podstawie przeprowadzonych w PIMOT badań kilku samochodów elektrycznych w zakresie PEM przeprowadzono analizę i ocenę wg wybranych metod. Do analizy i obliczeń wykorzystano następujące pojazdy elektryczne: OPEL Ampera, RENAULT Fluence, CITROEN C-Zero i MEGA e-City.

Pośród zaproponowanych i opisanych w cz. I artykułu grup metod analizy i oceny PEM pojazdów samochodowych do badanych pojazdów zastosowano:

- metodę dwuliniową plus (ML2+),
- metodę polową (MP2),
- metodę estymacji parametrów (MEP).

Podstawę obliczeń stanowiły rzeczywiste przebiegi PEM badanych pojazdów w odniesieniu o linie graniczne L1, L2 i L3 zdefiniowane w cz. I artykułu.

Linia L1 stanowi o minimalnych wymaganiach jaką musi spełniać badany pojazd i została zdefiniowana obowiązującymi przepisami homologacyjnymi [1, 2].

Porównanie zaproponowanych metod analizy i oceny PEM przedstawione na przykładzie czterech badanych pojazdów EV zawiera punkt 5. Wykorzystano zdefiniowany w pracy współczynnik emisji elektromagnetycznej. Z zestawienia podanego w tabeli 12 punkt 5 wynika jednoznacznie taka sama kolejność zmian tego współczynnika w każdej z metod i wskazuje na silną korelację. Najlepszy wynik uzyskał pojazd OPEL Ampera a najgorszy Mega e-City. Niedogodnością stosowanych metod jest dość skomplikowany aparat matematyczny, który w następnych pracach „inżynierskich” w oparciu o zdobyte doświadczenie można będzie prawdopodobnie uprościć.

Przeprowadzona analiza i obliczenia wykazały dużą zbieżność przydatności zaproponowanych metod oceny PEM pojazdów samochodowych.

Wyniki pracy mogą być stosowane i rozpowszechniane szczególnie przez konstruktorów i badaczy pojazdów samochodowych, zwłaszcza EV, w których występują duże ilości systemów i modułów elektronicznych.

Literatura

1. Regulation No. 10 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to electromagnetic compatibility (04 series)
2. COUNCIL DIRECTIVE 72/245/EEC of 20 June 1972 relating to the radio interference (electromagnetic compatibility) of vehicles
3. CISPR 12 Vehicles', motorboats' and spark-ignited engine-driven devices' radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement („Charakterystyka zaburzeń radioelektrycznych z pojazdów, łodzi silnikowych oraz urządzeń z napędem silnikowym o zapłonie iskrowym”), wydanie piąte z 2001 r. oraz poprawka 1: 2005 r.
4. CISPR 16-1-4 Specifications for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Antennas and test sites for radiated disturbances measurements („Wymagania dotyczące aparatury pomiarowej i metod pomiarów zaburzeń radioelektrycznych oraz odporności na zaburzenia – Część 1: Aparatura do pomiaru zaburzeń radioelektrycznych i do badań odporności – Anteny i poligony pomiarowe do pomiaru zaburzeń promieniowanych”), wydanie trzecie z 2010 r.
5. CISPR 25 Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics for the protection of receivers used on board vehicles („Dopuszczalne poziomy i metody pomiaru charakterystyki zaburzeń radioelektrycznych w odniesieniu do ochrony odbiorników stosowanych w pojazdach”), wydanie drugie z 2002 r. i sprostowanie z 2004 r.
6. ISO 7637-1 Road vehicles – Electrical disturbance from conduction and coupling – Part 1: Definitions and general considerations („Pojazdy drogowe – Zaburzenia elektryczne przenoszone przez przewodzenie oraz przez sprzężenia – Część 1: Definicje i postanowienia ogólne”), wydanie drugie z 2002 r.
7. ISO 7637-2 Road vehicles – Electrical disturbance from conduction and coupling – Part 2: Electrical transient conduction along supply lines only on vehicles with nominal 12 V or 24 V supply voltage („Pojazdy drogowe – Zaburzenia elektryczne przenoszone przez przewodzenie oraz przez sprzężenia – Część 2: Przewodzenie elektrycznych przebiegów przejściowych wyłącznie wzdłuż przewodów zasilających w pojazdach z instalacją elektryczną o nominalnym napięciu zasilania 12 V lub 24 V”), wydanie drugie z 2004 r.
8. ISO-EN 17025 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories („Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących”), wydanie drugie z 2005 r. i sprostowanie: 2006 r.
9. ISO 11451 Road vehicles – Electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy – Vehicle test methods” („Pojazdy drogowe – Zaburzenia elektryczne powodowane wąskopasmowym promieniowaniem energii elektromagnetycznej – Metody badania pojazdów”):
10. ISO 11452 Road vehicles – Electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy – Component test methods („Pojazdy drogowe – Zaburzenia elektryczne powodowane wąskopasmowym promieniowaniem energii elektromagnetycznej – Metody badania pojazdów”):
11. IEC 61000-3-2 Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3-2 – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase) („Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 3-2: Poziomy dopuszczalne emisji harmoniczných prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika ≤ 16 A”), wydanie 3.2 – 2005 r. + poprawka 1:2008 r. + poprawka 2:2009 r.

12. IEC 61000-3-3 Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3-3 - Limits - Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage systems for equipment with rated current ≤ 16 A per phase and not subjected to conditional connection („Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 3-3: Poziomy dopuszczalne – Ograniczanie zmian napięcia, wahań napięcia i migotania światła w publicznych sieciach zasilających niskiego napięcia, powodowanych przez odbiorniki o znamionowym prądzie fazowym ≤ 16 A przyłączone bezwarunkowo”), wydanie 2.0 – 2008 r.
13. Łukjanow S, Kołodziejczak M, Pijanowski B. Project of the evaluation and classification system of vehicles and automobile devices in aspect of electromagnetic compatibility, Journal of KONES Powertrain and Transport. 2009; 16(1).
14. Łukjanow S., Pijanowski B. „Badania kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) w aspekcie rozwoju techniki motoryzacyjnej” Czasopismo Techniczne z 8-M/2008, Kraków 2008 r.
15. Projekt Badawczy MNiSW: „Metoda i model systemu do badań kompatybilności elektromagnetycznej pojazdów i urządzeń samochodowych”, Kier. proj. S. Łukjanow. PIMOT 2007 – 2009 r.
16. Więckowski T. W. „Badania kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń elektrycznych i elektronicznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2001
17. Paweł A. Mazurek - Selected aspects of electrical equipment operation with respect to power quality and EMC. Electrical Review. No. 1/2017
18. Araujo, H. X. , Melo, M. D. B. , Casella, I. R. S. , Capovilla, C. E. - A low cost EMC precompliance board for electronic devices and smart grids networks. Electrical Review. No. 3/2017
19. Marcin Steczek - Input impedance of multi-drive traction vehicle. Electrical Review. No. 6/2017
20. Paweł Bieńkowski, Joanna Podlaska - Electromagnetic field in the environment - measurement and monitoring in Poland. Electrical Review. No. 12/2017
21. Amin Frikha ; Mohamed Bensetti ; Lionel Pichon ; Frédéric Lafon ; Fabrice Duval ; Nabil Benjelloun - Magnetic Shielding Effectiveness of Enclosures in Near Field at Low Frequency for Automotive Applications. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility (Volume: 57, Issue: 6, Dec. 2015)