

## Recenzja pracy doktorskiej

Autor:

*mgr inż. Grzegorz Oleszek*

Tytuł:

*Comprehensive methodology for emission level prediction from magnetically coupled nonlinear circuits in automotive*

Niniejsza recenzja została przygotowana na zlecenie dr hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. Uczelni, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika, Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, pismem z dnia 03.03.2022r. Recenzja zawiera ocenę spełniania warunków stawianych rozprawom doktorskim, określonych w ustawie "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" z dnia 20 lipca 2018 (Dz.U. 2018 poz. 1668) Rozdział 2 "Stopień doktora" Oddział 1 "Nadawanie stopnia doktora" art. 187.1 i 187.2. Recenzja obejmuje siedem rozdziałów, stanowiących integralną całość. Jest ona pisana na sześciu stronach maszynopisu.

### 1. Zagadnienia naukowe i naukowo-techniczne rozprawy

Autor rozpatruje układ stacyjka – klucz zapłonu, pracujący z częstotliwością 125 kHz. Taki układ, zgodnie z wymaganiami CISPR 25: 2021 musi przejść badania emisji promieniowanej w zakresie częstotliwości od 150 kHz do 2.5 GHz.

W pracy skupiono się na zakresie częstotliwości od 150 kHz do 30 MHz. W tym zakresie częstotliwości wykonuje się pomiar emisji promieniowanej anteną prętową, mierzącą pole elektryczne.

Dopuszczalne poziomy zaburzeń promieniowanych zależą od klasy, do której przyporządkowany jest badany układ. CISPR 25: 2021 przewiduje 5 klas. Klasa 5 jest najbardziej rygorystyczna. Przyporządkowanie urządzenia do klasy jest sprawą do uzgodnienia między producentem pojazdu, a dostawcą podzespołu. Autor przyjął w rozprawie jako punkt odniesienia klasę 5, rozwiązując tym samym problem dla klas pozostałych.

Na Rys. 1.1 przedstawiono dolny wycinek widma zaburzeń dla pomiaru anteną prętową (od 150 kHz do 1.8 MHz).

Widmo zaburzeń, przedstawione na Rys. 1.1 dowodzi, że harmoniczne częstotliwości pracy mogą przekraczać dopuszczalne poziomy zaburzeń (druga i szósta harmoniczna).

Autor przedstawił kompleksową analizę rozpatrywanego zagadnienia. Analiza ta pozwala przewidywać poziom promieniowanych zaburzeń. Ponadto pozwala tak zaprojektować układ, aby z dużym prawdopodobieństwem układ przeszedł badania finalne w ALSE.

Autor uczciwie podkreśla, że metoda zaprezentowana w pracy nie ma na celu zastąpienie metody wymaganej w dokumencie CISPR 25:2021, tylko pozwala oszczędzić koszty badań

finalnych w ALSE i zmniejszyć liczbę wizyt w laboratorium badawczym. Obydwa te czynniki nie są bagatelne.

### **TEZA PRACY:**

Autor stawia tezę, że możliwe jest opracowanie metody analizy układu stacyjka nadawcza – kluczyk zapłonu, dzięki której można przewidzieć poziom zaburzeń różniący się od pomiarów na stanowisku w ALSE, zgodnym z CISPR 25:2021 o mniej niż  $\pm 6$  dB.

Udowodnieniem tej tezy są wyniki pomiarów przedstawione na Rys. 6.21, na które naniesione są wyniki analityczne i przewidywane.

Uważam błąd przyjęty w tezie pracy  $\pm 6$  dB, czyli czynnik dwukrotny za realistyczny dla tej metody pomiarowej.

## 2. Organizacja i redakcja rozprawy, odniesienia do literatury

Rozprawa wraz z załącznikami obejmuje 152 stron maszynopisu, 244 pozycje literatury, w tym 4 pozycje indywidualne Autora, w których zostały zaprezentowane wybrane zagadnienia ujęte w opiniowanej rozprawie. Pozycje literatury są dobrane starannie i adekwatnie do prezentowanej tematyki.

Rozprawa została podzielona na 8 rozdziałów, przy czym ostatni rozdział jest dodatkiem.

## 3. Osiągnięcia naukowe

- Udowodnienie tezy pracy.
- Dodatkową zaletą udowodnienia tezy pracy jest fakt, że na etapie projektowania, cewkę odbiorczą  $L_S$  z Rys. 1.2 można umieścić na płytce drukowanej w takiej odległości i pod takim kątem względem cewki nadawczej  $L_P$ , umieszczonej w stacyjce, aby zminimalizować zaburzenia harmonicznych sygnału nośnego (125 kHz) mierzone antena prętową.
- Nowatorska metoda pomiaru nieliniowej impedancji dla częstotliwości podstawowej.
- Odwzorowanie obszarów dopuszczalnego ustawienia cewek względem siebie, tak aby obwód cewki odbiorczej był w zakresie liniowym ( $U_S = 2 - 4.7$  V), a prąd wtórny był mniejszy niż  $-20$  dBmA.
- Ewaluacja eksperymentalna wzorów analitycznych na indukcyjność wzajemną. Wyniki ewaluacji przedstawione na Rys. od 3.10 do 3.12 potwierdzają zbieżność symulacji z eksperymentem.
- Całościowe zaprezentowanie w rozdziale 5 nieliniowego modelu obwodu wtórnego AFE.

## 4. Uwagi krytyczne i polemika

### **1.2.3 Inductance**

W rozdziale tym rozpatrywana jest indukcyjność cewek. Autor słusznie twierdzi, że jest ona sumą indukcyjności wewnętrznej  $L_{INT}$ , zewnętrznej  $L_{EXT}$  i wzajemnej między zwojami  $L_{MUT}$ . Pomija jednak dwie cechy tej indukcyjności:

- indukcyjność wewnętrzna jest znacznie mniejsza od dwu pozostałych,
- tylko indukcyjność wewnętrzna zależy od częstotliwości, na dodatek maleje ona w przybliżeniu proporcjonalnie do pierwiastka z częstotliwości.

Podobnie jak dla rezystancji, Autor wprowadza współczynnik  $F_L$ , uwzględniający zależność

indukcyjności od częstotliwości. W pracy nie ma wzoru, pokazującego jak Autor używa tego współczynnika. Z rozmowy wiem, że przez ten współczynnik przemnaża całkowitą indukcyjność. Skutkuje to tym, że maleje ona z częstotliwością, co widać na przebiegu pokazanym na Rys. 2.9. Takie potraktowanie indukcyjności uważam za błędne.  $F_L$  trzeba przemnożyć tylko przez indukcyjność wewnętrzną. Ponieważ ta indukcyjność jest bardzo mała, w porównaniu do pozostałych składników, całkowita indukcyjność powinna być stała. Zmiany indukcyjności pokazane na Rys. 2.9 są bardzo małe, tak że wpływ tych zmian na model jest niewielki, ale model zjawiska, założony przez Autora jest błędny.

Brak informacji dla jakiego przewodu AWG33, czy AWG40 są obliczone rezystancja i indukcyjność (Rys. 2.9 i 2.10).

Wzrost rezystancji dla nieskończenie długiego przewodu AWG33 i AWG40 powinien następować dla częstotliwości począwszy odpowiednio od ok. 2 MHz i 15 MHz. Na tych rysunkach zmiany zaczynają się już w okolicy 100 kHz. Czyżby kształt kołowy przewodu odgrywał tu rolę? A może rysunki odnoszą się do cewek zbudowanych z drutu nawojowego o innym przekroju? Tej informacji brakuje w tekście.

#### **4.3.6. Uncertainty assessment**

Przyjęcie w tabeli 7 rozkładów normalnych dla wszystkich składowych niepewności pomiarowej jest błędne. Rozkład normalny przypisuje się tylko składnikom uzyskanym z niezależnej kalibracji. Natomiast wszelkim niepewnościom uzyskanym z danych katalogowych trzeba przypisać rozkład prostokątny (jednorodny).

#### **6.1.2. CISPR 25**

W mierniku zaburzeń nie można zdefiniować więcej niż jednego współczynnika antenowego. W pomiarze anteną prętową korzysta się ze współczynnika przeliczającego pole elektryczne na napięcie na przyłączu anteny. Nie ma możliwości przeliczać równocześnie pola E i H, co sugeruje Autor.

#### **6.1.3. Radiated emission sources**

##### **Wiring harness**

W rozdziale tym Autor przytacza, że na Rys. 4.2 jest widoczny  $C_{res}$ , który odpowiada za rezonans. Takiego kondensatora nie ma na tym rysunku.

Dalej powołuje się na wzór (36) w rozdziale 5. Pierwszy wzór w tym rozdziale ma numer (65).

#### **6.1.5. Review of predicted methods**

##### **Proposed coupling method**

Współczynnikom transmisji dał bym indeksy  $T_M$  i  $T_E$ , bądź  $T_L$  i  $T_C$ .

#### **6.1.5. Rod antenna**

##### **Antenna inductance**

Wzór (117) jest błędny.

Zgodnie z pozycją [238] przybliżona indukcyjność pręta wyraża się wzorem

$$L_a = \frac{\mu_0 h_a}{2\pi} \ln \left( \frac{h_a}{r_a} + \sqrt{\left(\frac{h_a}{r_a}\right)^2 + 1} \right) \quad (1)$$

Patrz wzór (5.18a) w [238].

Czy podana w pracy wartość indukcyjności  $L_a = 1.1 \mu\text{H}$  wynika z prawidłowego wzoru?

Ponadto w pracy przemilczany jest fakt, że wzór na indukcyjność  $L_a$  jest wyprowadzony przy

założeniu stałego rozkładu prądu wzdłuż przewodu, co nie ma miejsca w antenie prętowej. Z drugiej jednak strony wzór (1) dotyczy przewodu umieszczonego w przestrzeni otwartej. Antena prętowa jest monopolem, a więc przewodem umieszczonym w półprzestrzeni.

#### 6.1.6. Coupling consideration

##### Transmission factors

- $V_x$ , odpowiedzialne za sprzężenie elektryczne wiązki z antena prętową jest napięciem common mode wiązki. Na jakiej podstawie przyjęto  $V_x = 1$  V. To wymaga wyjaśnienia?
- $I_x$ , jest odpowiedzialne za sprzężenie magnetyczne wiązki, cewki nadawczej i odbiorczej z antena prętową. Owszem dla cewek przyjęcie  $I_x = 0.1$  A jest prawidłowe, bo taki prąd płynie w cewkach. Natomiast przyjęcie takiego samego prądu jako common mode we wiązce, wymaga wyjaśnienia.

Przyjęcie  $V_x$  i  $I_x$  w sposób arbitralny czyni bezużytecznym porównanie na Rys. 6.14 składników poszczególnych sprzężeń.

#### 6.2.2. Results

Autor pisze, że napięcie  $V_{cm}$  wiązki jest wyliczone ze wzoru (36) w rozdziale 5. Wzór (36) jest w rozdziale 3 i dotyczy indukcyjności wzajemnej cewek. Wobec powyższego nie ma zupełnie wyjaśnienia według jakich przesłanek wybrano  $V_{cm}$ . To jest istotna słabość pracy.

#### 6.2.2. Chapter summary

Dla inżyniera praktyka, wczytującego się w pracę jest niemalże pewne, że udział pola elektrycznego, wytworzonego przez cewkę nadawczą, czy odbiorczą, w sygnale zaindukowanym w antenie prętowej, ustawionej w strefie bliskiej pola jest pomijalnie mały w stosunku do sygnału zaindukowanego od pola elektrycznego wytworzonego przez wiązkę przewodów. Nie umniejsza to zasługi Autora, że nie przyjął tego założenie jako pewnik, tylko postarał się rozeznąć to zagadnienie na drodze analitycznej i eksperymentalnej. Potwierdzenie tezy o pomijalnie małym udziale pola elektrycznego od cewek w sygnale mierzonym anteną prętową przebija w wielu miejscach pracy. Dla mnie koronnym argumentem jest wzór (104) wyrażający natężenie pola elektrycznego wokół elementarnego radiatora pętlowego. Sprawdziłem wartość tego pola dla warunków podanych w pracy i uzyskałem wynik zbliżony z wartością podaną w pracy (59.6 dB $\mu$ V/m). Autor zaznacza, że wartość tego pola jest o 40 dB mniejsza, od całkowitego pola mierzonego na stanowisku pomiarowym (~100 dB $\mu$ V/m dla 125 kHz na Rys. 6.21.).

Notabene, wzór (104) odnosi się do cewki umieszonej w przestrzeni otwartej. Stanowisko pomiarowe odzwierciedla półprzestrzeń. Wobec tego maksymalne natężenie pola elektrycznego od cewki w półprzestrzeni może być co najwyżej 2 razy większe, czyli o 6 dB większe, a więc o ok. 36 dB mniejsze, od całkowitego pola mierzonego na stanowisku pomiarowym.

36 dB oznacza relację 1:63. Dla inżyniera już relacja 1:10 upoważnia do pominięcia składnika w rozważaniach.

Mniej przekonujące jest zestawienie udziałów poszczególnych sprzężeń w natężeniu pola elektrycznego mierzonego przez antenę prętową, zestawionych na Rys. 6.14 po stronie prawej. Powodem jest przyjęcie  $V_x = 1$  V i  $I_x = 100$  mA. Przyjęcie takich wartości dla napięcia i prądu asymetrycznego dla wiązki wymaga bardziej szczegółowego wyjaśnienia przez Autora.

W świetle powyższego, zdumiewający jest wniosek Autora, że dotychczas wszyscy pomijali wpływ pola elektrycznego cewki na sygnał mierzony anteną prętową. Niniejsza praca udawadnia nieprawdziwość tego stwierdzenia. Moim zdaniem jest odwrotnie. Niniejsza praca potwierdza dotychczasowe podejście uznające udział pola elektrycznego emitowanego przez cewkę nadawczą i odbiorczą za pomijalnie mały.

### **UWAGI DO UŻYTYCH POJEĆ:**

- Czasami mylone są pojęcie indukcyjności i reaktancji indukcyjnej. Coś takiego ma miejsce na początku strony nr 14.
- Wiązka, czy przewód nie jest źródłem zaburzenia, a tylko medium, którym zaburzenie może propagować od źródła do ofiary, (Rozd. 6.1, str. 98).
- Antena prętowa jest przetwornikiem natężenia pola elektrycznego na napięcie na jej przyłączy, a nie pola elektromagnetycznego, (Rozd. 6.1, str. 98).
- Jeżeli jakaś wielkość ma stałą wartość, w funkcji innej zmiennej, to nie mówimy o niej "fixed", tylko constant. (Rys. 2.13 i teks ze stron 26, 34)
- W rozdziale 5.3 po raz pierwszy pojawia się termin "radiated disturbance level". Uważam ten termin za nieadekwatny do rozpatrywanego zagadnienia. Największa rozpatrywana częstotliwość wynosi 1.8 MHz. Dla tej częstotliwości długość fali elektromagnetycznej w powietrzu wynosi ok. 167 m. Dla częstotliwości podstawowej, 125 kHz wynosi ona 2400 m. Pomiar anteną prętową umieszczoną w odległości 1 m od źródła pola jest pomiarem w strefie bliskiej, w której zjawisko promieniowania jest pomijalnie małe w stosunku do sprzeżenia na drodze elektrycznej lub magnetycznej. W rozdziale 6.1.1, na str. 99 Autor potwierdza fakt, że rozpatrywane zjawisko ma miejsce w strefie bliskiej, co pozwala traktować parametry obwodów jako skupionych elementów. Ponieważ jednak w dokumencie CISPR 25:2021 mówi się o pomiarze emisji promieniowanej w zakresie od 150 kHz do 2.5 GHz, przejdźmy do porządku dziennego and tą nieścisłością

### **UWAGI POLEMICZNE:**

1. Czym się różni układ, którego widmo przedstawiono na Rys. 1.1 od układu przedstawionego na Rys. 6. 21, skoro chrakter widm częstotliwości jest tak różny? Jeden ma składowe parzyste i nieparzyste, drugi, tylko składowe nieparzyste.
2. Dlaczego Autor skoncentrował się na wytłumieniu trzeciej harmonicznej (375 kHz), skoro dla tej częstotliwości, wg. CISPR 25: 2021 nie istnieje ograniczenie poziomu zaburzenia?
3. Wyznaczanie stref dopuszczalnych ustawienia cewek względem siebie, zilustrowane na Rys. 5.21 uważam za oryginalne i bardzo przydatne w praktyce projektowej osiągnięcie Autora pracy. Jednakże umieszczenie AFR w tej strefie zapewnia jedynie niewchodzenie obwodu AFE w zakresy nieliniowości. Natomiast brakuje mi powiązania tego faktu z poziomem pola mierzonego anteną prętową.
4. W jaki sposób wyznaczono  $V_{cm}$  i  $I_{cm}$  dla układu pomiarowego przedstawionego na Rys. 6.15? Rozumiem, że kondensatory szeregowo  $C_{res1}$  i  $C_{res2}$  służą do wytrącenia z równowagi zrównoważonej pary przewodów (symmetrical line in balance). Czyli kondensatory te są odpowiedzialne za konwersję składowej poprzecznej na wzdłużną (Transverse Conversion Loss). W tekście nie ma ani jednego słowa jak  $V_{cm}$  i  $I_{cm}$  są wyznaczone i jakie przyjmują wartości. Ich wyznaczenie jest krytycznym krokiem w weryfikacji pomiarowej przedstawionych analiz.
5. Czy nie lepiej byłoby wytrącić z równowagi układ pomiarowy z Rys. 6.15, montując kondensatory  $C_{res1} \neq C_{res2}$  od każdego przewodu do masy odniesiona zamiast szeregowo? Chyba łatwiej byłoby wtedy wyznaczyć  $V_{cm}$  i  $I_{cm}$  na drodze analitycznej.

## 6. Przydatność rozprawy dla nauk technicznych

Praca jest kompleksowym rozwiązaniem problem naukowego, mającym praktyczne zastosowanie w projektowaniu i weryfikacji układów stacyjka-kluczyk zapłonu, montowanych w pojazdach samochodowych. Zawiera wiele oryginalnych rozwiązań technicznych.

Godnym podkreślenia jest rozwiązanie umożliwiające na etapie projektowania znalezienia takiego usytuowania na płycie drukowanej cewki odbiorczej  $L_S$  z Rys. 1.2 względem cewki nadawczej  $L_P$  umieszczonej w stacyjce, uwzględniające ich odległość i kąt, aby zminimalizować zaburzenia harmonicznego sygnału nośnego (125 kHz) mierzone antena prętową.

## 7. Wniosek końcowy

Pomimo wszystkich polemicznych uwag uznaję, iż rozprawa doktorska mgr. inż. Grzegorza Oleszka zatytułowana **Comprehensive methodology for emission level prediction from magnetically coupled nonlinear circuits in automotive** spełnia wymagania określone w ustawie "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" z dnia 20 lipca 2018 (Dz.U. 2018 poz. 1668) Rozdział 2 "Stopień doktora" Oddział 1 "Nadawanie stopnia doktora".

W szczególności praca spełnia wymagania:

- Art. 187.1, bowiem prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika w zakresie nauk inżynierskich i technicznych oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej,
- Art. 187.2., bowiem przedmiotem rozprawy jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Wobec powyższego wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony



Prof. dr hab. inż. Jan Sroka