

„Metodologia prognozowania poziomu emisji zaburzeń promieniowanych w nieliniowych obwodach sprzężonych magnetycznie dla potrzeb przemysłu motoryzacyjnego”

Rozwój modułów elektronicznych używanych w pojazdach samochodowych wymaga wielu etapów weryfikacji, których znaczącą część stanowią testy kompatybilności elektromagnetycznej EMC. Przy ograniczonym dostępie do zasobów laboratoryjnych i krótkich terminach realizacji zapewnienie zgodności z wymaganiami jest znaczącym wyzwaniem dla zespołu projektowego. W tym względzie posiadanie wspomagającej metody umożliwiającej rzetelne przewidywanie poziomu zaburzeń promieniowanych we wczesnej fazie projektowania jest uzasadnione.

Zaproponowana metoda badawcza umożliwia analizę sprzężonych magnetycznie obwodów rezonansowych reprezentowanych przez cewki indukcyjne i współpracujące z nimi komponenty, w tym nieliniowy układ AFE (Analog Front End) stanowiący obciążenie części wtórnej obwodu. Nieliniowości tego układu analizowano uwzględniając jego selektywny charakter pracy (typowo 125 kHz) oraz silne występowanie dochodzące do 20 Vpp. Amplitudy i fazy wzbudzonych sygnałów harmoniczných określono w zakresie częstotliwości od 100 kHz do 1,8 MHz wykorzystując dedykowaną metodę kompensacyjną. Bazowała ona na dwóch zsynchronizowanych fazowo generatorach sinusoidalnych, z których jeden stanowił pobudzenie układu AFE, zaś drugi umożliwił indywidualną eliminację wybranego sygnału harmonicznego z widma częstotliwości stanowiącego odpowiedź układu. Dzięki użyciu analizatora widma jako wskaźnika zera możliwe było uzyskanie dużej dokładności określenia impedancji układu AFE (przy częstotliwości pobudzenia) oraz amplitud i faz sygnałów harmoniczných. Na bazie uzyskanych charakterystyk częstotliwościowych, zależnych od aktualnego poziomu wzbudzenia, skonstruowano modele symulacyjne opisane zestawem nieliniowych równań różniczkowych oraz wielkosygnałowymi parametrami X.

Sprężenie magnetyczne w obwodzie przeanalizowano dla dowolnej orientacji cewek w przestrzeni, w konfiguracji zawierającej cewkę powietrzną oraz cewkę z prętowym rdzeniem ferromagnetycznym. W tym celu skorzystano z metod analitycznych oraz symulacji 3D, których wyniki zweryfikowano wykorzystując dedykowany zestaw pomiarowy. Potwierdzono poprawność przyjętej metodologii w analizowanym zakresie częstotliwości, jednocześnie uzyskując znaczący wzrost szybkości obliczeń, bez istotnej utraty jakości i dokładności modelu.

Stosując analityczną metodę balansu harmoniczných oraz modele cewek i układu AFE wyznaczono planarny rozkład prądów i napięć w obwodzie. Na jego podstawie zdefiniowano korzystny (pod względem poziomu dominującej trzeciej harmoniczných) zakres pracy całego obwodu, który następnie zweryfikowano pomiarami w komorze ALSE. Jednocześnie skonstruowano równoważny model symulacyjny układu pomiarowego zgodnego z normą CISPR 25, na bazie którego estymowano poziom zaburzeń promieniowanych. Finalnie uzyskano zbieżność prognozowanych poziomów z pomiarami lepszą niż ± 6 dB, co stanowi potwierdzenie tezy niniejszej pracy. Przenalizowano również trzy pytania badawcze, z których każde znalazło właściwe umocowanie w wykonanych badaniach i uzyskało potwierdzającą odpowiedź.

Grzegorz Oleszek

23.11.2021

Grzegorz Oleszek

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

The development of electronic modules used in motor vehicles requires many verification steps, a significant part of which are EMC electromagnetic compatibility tests. With limited access to laboratory resources and short development time, ensuring compliance with the requirements is a significant challenge for the project team. In this regard, it is justified to have a supportive method to reliably predict the radiated disturbance level at an early design stage.

The proposed research method allows the analysis of magnetically coupled resonant circuits represented by inductors and cooperating components, including the nonlinear analog front end (AFE) component, used as a load on the secondary side of the circuit. This component's nonlinearities were analyzed considering its selective nature of the operation (typically at 125 kHz) and high excitation up to 20 Vpp. The amplitudes and phases of the exciting harmonic spurs were determined in the frequency range from 100 kHz to 1.8 MHz using a dedicated compensation method. It was based on two phase-synchronized sinusoidal generators, one of which provided the excitation of the AFE, and the other allowed for the selective elimination of a given harmonic spur from the frequency spectrum constituting the circuit's response. Thanks to the use of a spectrum analyzer as a null detector, it was possible to obtain a high accuracy of determining the impedance of the AFE at the excitation frequency and the amplitudes and phases of harmonic signals. Based on the obtained frequency characteristics, the simulation models described by non-linear differential equations and large-signal X-parameters were constructed depending on the current excitation level.

A magnetic coupling was analyzed for any orientation of the coils in space, in a configuration containing an air coil and a ferromagnetic core coil. For this purpose, analytical methods and 3D simulations were used, which were verified using a dedicated measurement setup. As a result, the correctness of the chosen methodology was confirmed in the analyzed frequency range. Simultaneously, it supported obtaining a significant increase of the calculation speed with a negligible loss of quality and accuracy of the model.

The planar map of currents and voltages in the coupled circuits were determined using the harmonic balance method. The favorable (in terms of the dominant third harmonic spur) operating range was defined on its basis, which was then verified in the ALSE chamber. At the same time, an equivalent model of the measurement setup compliant with the CISPR 25 standard was constructed, on which basis the level of radiated disturbances was predicted. Finally, the simulation results were corroborated with the measurements showing compliance level better than ± 6 dB, which confirms the thesis of this study. Three research questions were also analyzed, each finding proper support in the performed research and obtaining a positive answer.

Grzegorz Oleszek

23.11.2021

Grzegorz Oleszek