

Bulk Current Injection (BCI) immunitási vizsgálat és értékelés

Bulk Current Injection (BCI) Immunity Testing and Evaluation

BÖLKÉNY Ildi,

PhD, tudományos főmunkatárs

Miskolci Egyetem FIEK, 3533 Miskolc-Egyetemváros, Informatikai épület I/100., +36-30/8793-600, ildi.bolkeny@uni-miskolc.hu, <https://fiek.uni-miskolc.hu/>

Abstract

Ez a tanulmány a szoftveres támogatás szerepét vizsgálja a tömeges árambefecskendezéses (BCI) zavartűrés-tesztelésben, a kalibrálási pontosságra, az automatizált tesztvégrehajtásra és az eszköz teljesítményértékelésére összpontosítva. A kísérleti eredmények azt mutatták, hogy a vizsgált eszköz összességében megfelelt az ISO 11452-4 szabvány követelményeinek, bár a 90–110 MHz-es tartományban jelentős érzékenység mutatkozott. Az eredmények megerősítik a szoftveralapú automatizálás értékét az EMC-tesztelésben, és arra utalnak, hogy a BCI és a kiegészítő módszerek kombinálása átfogóbb zavartűrés-értékelést eredményezhet.

Keywords: Electromagnetic compatibility (EMC), Bulk Current Injection (BCI), Immunity testing, Software automation, Calibration accuracy,

Kivonat

Ez a tanulmány a szoftveres támogatás szerepét vizsgálja a tömeges árambefecskendezéses (BCI) zavartűrés-tesztelésben, a kalibrálási pontosságra, az automatizált tesztvégrehajtásra és az eszköz teljesítményértékelésére összpontosítva. A kísérleti eredmények azt mutatták, hogy a vizsgált eszköz összességében megfelelt az ISO 11452-4 szabvány követelményeinek, bár a 90–110 MHz-es tartományban jelentős érzékenység mutatkozott. Az eredmények megerősítik a szoftveralapú automatizálás értékét az EMC-tesztelésben, és arra utalnak, hogy a BCI és a kiegészítő módszerek kombinálása átfogóbb zavartűrés-értékelést eredményezhet.

Kulcsszavak: Elektromágneses kompatibilitás (EMC), Bulk Current Injection (BCI), Immunitási vizsgálat, Szoftveres automatizálás, Kalibráció pontossága,

1. BEVEZETÉS

Az elektromágneses kompatibilitás (EMC) tesztelése elengedhetetlen annak biztosításához, hogy az elektronikus eszközök megbízhatóan működjenek elektromágneses környezetükben anélkül, hogy káros interferenciát okoznának vagy tapasztalnának. A különféle EMC tesztelési technikák közül a bulk current injection (BCI) kulcsszerepet játszik a vezetett zavarokkal szembeni immunitás értékelésében, azáltal, hogy RF áramokat injektál a berendezésbe erre a célra szolgáló szondákon keresztül [1], [2], [3].

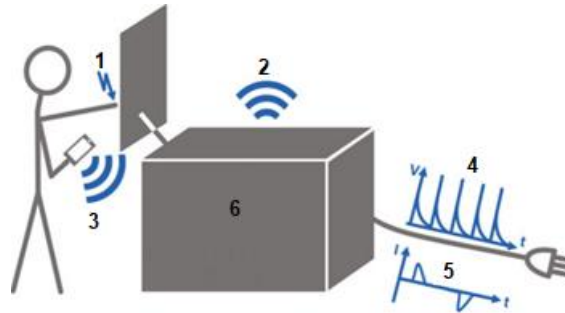
A modern mérnöki gyakorlatban a mérési eljárások automatizálása egyre nagyobb jelentőségre tesz szert. Az automatizált vezérlés javítja az ismételhetőséget, csökkenti a tesztelési időt, és biztosítja a nemzetközi szabványoknak, például az ISO 11452-4 szabványnak való megfelelést. Ugyanakkor a szoftvereszközök rugalmas konfigurációt, hatékony adatgyűjtést és szabványosított jelentéskészítést biztosítanak.

A tanulmány célja annak bemutatása, hogy a szoftveres támogatás hogyan javíthatja a BCI immunitás tesztelését. A munka bemutatja a mérési beállítást, az egyenértékű áramkör modellezését, valamint a szoftver szerepét a kalibrálásban, a teszt végrehajtásában és az eredmények kiértékelésében [4], [5], [6].

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

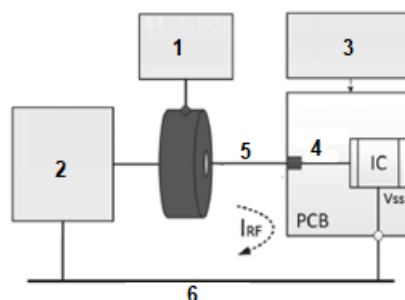
Az elektromágneses kompatibilitás kutatása hosszú hagyományokkal rendelkezik, és továbbra is alapvető követelmény a megbízható elektronika számára [7], [8], [9]. Az EMC-vizsgálat biztosítja, hogy az

eszközök immunisak legyenek a környezeti zavarokkal szemben, és megfeleljenek a kibocsátási határértékeknek, megakadályozva a közeli berendezések zavarását [10]. Az 1. ábrán az immuniást és emissziót, ahol 1. Elektrosztatikus kisülés, 2. Sugárzott emisszió, 3. Sugárzott immunitás (pl. mobiltelefonok ellen), 4. Vezetett immunitás (más berendezések emissziójával szemben), 5. Vezetett emisszió, 6. Termék: A terméknek rendelkeznie kell bizonyos szintű immunitással a zavarokkal szemben, és emisszióját az előírt határértékek alatt kell tartani.



1. ábra. Immunitás és emisszió [10]

A vezetett rádiófrekvenciás zavarokkal szembeni immunitás értékeléséhez széles körben alkalmazzák a tömegáram-injekciós módszert. Egy csatolószonda segítségével rádiófrekvenciás áramot injektálnak a vizsgált eszköz (DUT) kábeleibe, miközben figyelemmel kísérik annak működését [2], [6], [12], [13]. A következő ábrán az immunitás vizsgálatának koncepcióját láthatjuk, ahol 1. RF generátor, 2. Tápegység vagy jelgenerátor, 3. Tesztvezérlő eszközök, 4. Injekciós port, 5. Kábelköteg, 6. Földelő sík, IC, az Integrált áramkör, PCB, a Nyomtatott áramköri lap (PCB), Vss, a föld/negatív tápfeszültség csatlakozás, és IRF, az Injektált RF áram.



2. ábra. Az immunitási vizsgálat (BCI) koncepciója [13]

A módszer az ISO 11452-4 [6] szabvány szerint szabványosított, és általánosan használják autóiipari és ipari alkalmazásokban.

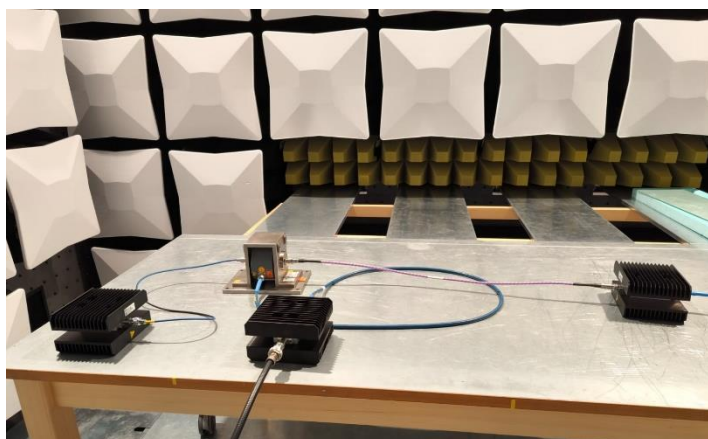
Számos szerző vizsgálta a BCI-t modellezési és mérési szempontból. Kondo és munkatársai [5] elektromágneses analízist alkalmaztak az autóiipari immunitásvizsgálatokhoz, míg Grassi és munkatársai [8] áramkör-szintű modelleket fejlesztettek ki a befecskenedező szondákra. Tan és munkatársai [12] kiemelték a közös módusú és a differenciál módusú injektálás közötti különbségeket, hangsúlyozva a módszer korlátait.

Az utóbbi időben az automatizálás kulcsfontosságú trenddé vált az EMC-vizsgálatokban. Li és munkatársai szerint. [3], a szoftvervezérelt mérőrendszerek jelentősen javítják a tesztek hatékonyságát és megbízhatóságát. A kereskedelmi forgalomban kapható megoldások ma már integrált tesztmenedzsmentet, hardvervezérlést és valós idejű monitorozást biztosítanak [4].

3. MÓDSZERTAN

A BCI tesztpadot az ISO 11452-4 szabvány szerint tervezték, és egy teljesítményerősítőből, egy jelgenerátorból, egy vevőből, egy vonalimpedancia-stabilizáló hálózattól (LISN), csillapítók, egy csatolószondából és a vizsgált eszközből (DUT), amely egy akkumulátorral működő elektronikus egység volt. A teljesítményerősítő (BBA150) elegendő kimeneti teljesítményt biztosított a teljes frekvenciatartományban,

míg a jelgenerátor és a vevő gondoskodott a befecskendezett RF jelek pontos gerjesztéséről és monitorozásáról. Az LISN stabilizálta a hálózati vezeték impedanciáját és izolálta a DUT-ot a külső zajforrásoktól, míg a csatlószonda szabályozott RF áramokat vezetett be a DUT kábelezésébe.



3. ábra. Az eszközök kalibráció közben

A teljes rendszert egy erre a célra szolgáló EMC tesztszoftver vezérelte, amely automatizálta az eszközkommunikációt, a kalibrációs eljárásokat és az adatgyűjtést. A szoftver lehetővé tette a tesztparaméterek rugalmas konfigurálását, beleértve a frekvenciatartományt, a lépésméretet, a befecskendezési szinteket, a tartózkodási időt és a moduláció típusát. Valós idejű vizualizációt is biztosított a befecskendezési szintek és a DUT válaszairól, biztosítva, hogy a referenciaértékektől való eltérések azonnal észlelhetők legyenek.

A teszt eljárás a befecskendezési útvonal kalibrálásával kezdődött, ahol a rendszert úgy állították be, hogy referenciaáram-szinteket hozzon létre az 1–400 MHz-es frekvenciatartományban. A kalibrálás befejezése után a mérési paramétereket az ISO 11452-4 szabvány követelményei és az ügyfél specifikációi szerint határozták meg. A zavartűrés teszt során az RF áramokat fokozatosan injektálták a vizsgált eszköz vezetékezésébe, miközben annak funkcionális viselkedését figyelték. A működés során fellépő bármilyen eltérést vagy hibát a szoftver automatikusan naplózott a megfelelő frekvencia- és áramszinttel együtt.

A tesztparaméterek 1 és 400 MHz közötti frekvenciatartományt tartalmaztak, 1 MHz-es lépésközzel. A befecskendezési szintek 2 és 100 mA között változtak, és a kalibrálás egy érzékelőalapú előremenő teljesítménymódszerre támaszkodott a pontosság biztosítása érdekében. A kiválasztott mérési sorozatokban amplitúdómodulációt és fázismodulációt is alkalmaztak, a moduláció nélküli referenciaméréseken kívül.

4. EREDMÉNYEK

A kalibráció biztosította, hogy a befecskendezési áram $\pm 1,5$ dB pontosságon belül maradjon a tesztávban. A reprezentatív eredményeket az 1. táblázat foglalja össze, amely a kiválasztott frekvenciákon befecskendezett áramértékeket mutatja.

Kalibrációs eredmények

1. táblázat

Frekvencia (MHz)	Beállított szint (mA)	Mért szint (mA)	Eltérés (%)
10	20	19,6	-2,0
50	20	20,3	+1,5
150	20	19,8	-1,0
300	20	20,1	+0,5

A vizsgált eszköz (DUT) válasza a 90–110 MHz-es tartományban mutatott érzékenységet, ahol reprodukálható funkcionális zavarok jelentkeztek 25–30 mA feletti befecskendezési szinteken. Ezen a sávon kívül a vizsgált eszköz stabil maradt 70–80 mA-es befecskendezési szintekig.

A 2. táblázat összefoglalja a megfigyelt érzékenységi küszöbértékeket.

A DUT zavarérzékenységi küszöbértékei

1. táblázat

Frekvenciatartomány (MHz)	Zavarérzékenységi szint (mA)	DUT válasz
1-50	>80	nincs hiba
51-90	40-50	ritka hiba
91-110	25-30	reprodukálható hiba
111-400	70	nincs hiba

Az eredmények megerősítik az ISO 11452-4 szabványnak való általános megfelelést, a 100 MHz körüli kritikus érzékenységi tartomány további figyelmet igényel.

5. ÉRTÉKELÉS

A 100 MHz körül megfigyelt érzékenységi sáv összhangban van a korábbi tanulmányokkal, amelyekben frekvencia-szelektív sebezhetőségekről számoltak be bizonyos DUT-ok esetében BCI körülmények között [12], [13]. Az eredmények rávilágítanak a kiegészítő EMC-módszerek (pl. TEM-cella vagy visszhangkamrás tesztek) szükségességére a valós interferencia-forratókönyvek rögzítéséhez [5], [9].

A szoftveres támogatás jelentős előnyöket biztosított: gyorsabb beállítás és kalibrálás, következetes tesztvégrehajtás és szabványosított adatrögzítés. Ezek az előnyök összhangban vannak Li és munkatársai [3] megállapításaival, akik a szoftvervezérelt automatizálást a modern EMC-tesztelés sarokkövéként hangsúlyozták.

Mindazonáltal továbbra is vannak korlátok. A tesztrendszer rugalmassága a hardver és a szoftverkörnyezet kompatibilitásától függ, és a paraméterek testreszabását a szoftver konfigurációs lehetőségei korlátozzák. Továbbá, bár a BCI kimutatja a vezetett rádiófrekvenciás érzékenységet, nem veszi figyelembe az összetett eszközök által tapasztalt összes elektromágneses környezetet.

Az ipari gyakorlatban, különösen az autóiipari alkalmazásokban, az automatizált BCI-tesztelés hozzájárul a rövidebb fejlesztési ciklusokhoz és a megbízható tanúsításhoz, megerősítve értékét az integrált EMC-validációs stratégia részeként.

6. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JÖVŐBELI KUTATÁSI IRÁNYOK

A tanulmány bemutatta a szoftvertámogatás szerepét a BCI zavartűrés tesztelésében, különös tekintettel a kalibrálási pontosságra, az automatizált mérésvezérlésre és az eszköz teljesítményének értékelésére. Az eredmények azt mutatták, hogy a vizsgált eszköz általánosságban megfelelt az ISO 11452-4 szabvány követelményeinek, bár a 90 és 110 MHz közötti keskeny frekvenciasáv fokozott érzékenységet mutatott. Ez rávilágít arra, hogy az elektronikus rendszerek tervezése és validálása során célzott figyelmet kell fordítani az egyes frekvenciatartományokra.

A dedikált tesztszoftverek használata rendkívül előnyösnek bizonyult, mivel csökkentette a kalibráláshoz szükséges időt, biztosította a mérési folyamat megismételhetőségét, és lehetővé tette a szabványosított adatgyűjtést és jelentéskészítést. Ezek a funkciók különösen értékesek ipari környezetben, ahol a rövidebb fejlesztési ciklusok és a szigorú megfelelési követelmények megbízható és hatékony tesztelési eljárásokat igényelnek. A tanulmány ugyanakkor hangsúlyozta a BCI tesztelés korlátait is, mivel ez a módszer önmagában nem képes teljes mértékben megragadni a valós elektromágneses környezetek összetettségét.

A jövőbeli kutatásoknak ezért az automatizált BCI tesztelésnek a kiegészítő EMC-módszerekkel, például a visszhangkamrákkal vagy a TEM-cellákkal való integrálására kell összpontosítaniuk, hogy teljesebb

képet kapjanak az eszköz zavartűréséről. Ezenkívül a fejlett adatelemzési technikák, beleértve a gépi tanulási megközelítéseket is, alkalmazása lehetővé teszi az eszközválaszok automatizált osztályozását és tovább javíthatja a tesztek hatékonyságát. A tesztelés hatókörének kiterjesztése az eszközök szélesebb körére szintén erősítené az eredmények általánosíthatóságát, és támogatná az univerzálisabb tesztelési keretrendszerek fejlesztését.

Összefoglalva, a szoftvertámogatásról kimutatták, hogy jelentősen növeli mind a BCI immunitási tesztelés hatékonyságát, mind a megbízhatóságát, és folyamatos fejlesztése hozzájárul a robusztusabb termékvalidáláshoz és az iparági szabványoknak való szigorúbb megfeleléshez.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Baranyai B., Póth B., Kistelegdi I. Planning and research of smart buildings and constructions with the ‘Energydesign Roadmap’ method. *Pollack Periodica*. Akadémiai Kiadó, 2013, 8(3), 15–26.
- [2] Denham P., Donnelly A. Managing the hazards of flare disposal systems. *Loss Prevention Bulletin*. Institution of Chemical Engineers, 2015, (243).
- [3] Grassi F., Marliani F., Pignari S. A. Circuit modeling of injection probes for bulk current injection. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, 2007, 49(3), 563–576.
- [4] Huynh H. A., Jo J.-M., Nah W., Kim S. EMC qualification methodology for semicustom digital integrated circuit design. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, 2016, 58(5), 1629–1641.
- [5] Istók R., Kádár P. EMC measurement systems and noise suppression methods for LED lamps and RF lighting controls. *Pollack Periodica*. Akadémiai Kiadó, 2016, 11(3), 141–152.
- [6] Keller R. B. *Design for Electromagnetic Compatibility – In a Nutshell*. Springer, Cham, 2023.
- [7] Kim N., Nah W., Kim S. Immunity test for semiconductor integrated circuits considering power transfer efficiency of the bulk current injection method. *Journal of Semiconductor Technology and Science*. The Korean Institute of Electrical Engineers, 2014, 14(2), 202–211.
- [8] Kondo Y., Izumichi M., Shimakura K., Wada O. Modeling of bulk current injection setup for automotive immunity test using electromagnetic analysis. *IEICE Transactions on Communications*. IEICE, 2015, E98.B(7), 1212–1219.
- [9] Li E.-P., et al. Progress review of electromagnetic compatibility analysis technologies for packages, printed circuit boards, and novel interconnects. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, 2010, 52(2), 248–265.
- [10] Rohde & Schwarz. R&S®ELEKTRA Test Software. Rohde & Schwarz, <https://www.rohde-schwarz.com> (Utolsó letöltés: 2025. 06. 18).
- [11] Sevgi L. Electromagnetic modeling and simulation: challenges in validation, verification, and calibration. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, 2013, 56(4), 750–758.
- [12] Tan L., Li Z., Xiang Y., Feng P., Guo Y. A critical analysis of the bulk current injection immunity test based on common-mode and differential-mode. *Microelectronics Reliability*. Elsevier, 2018, 91, 188–193.
- [13] International Organization for Standardization. ISO 11452-4:2005 Road vehicles. Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy – Bulk current injection (BCI). ISO, <https://knowledge.bsigroup.com/products/road-vehicles-component-test-methods-for-electrical-disturbances-from-narrowband-radiated-electromagnetic-energy-bulk-current-injection-bci> (Utolsó letöltés: 2021. 03. 17).