

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

---

# EMC követelményeket kielégítő fényforrások fejlesztése

---

Tézisfüzet  
Schmidt Gábor

---

Témavezető: Dr. Berta István egyetemi tanár

2012

## 1 Bevezetés és célkitűzések

A korszerű kisülő fényforrások eredményes fejlesztésének egyik fontos feltétele az egyre szigorodó elektromágneses környezetvédelmi előírások kielégítése. Az elektromágneses kompatibilitási (**ElectroMagnetic Compatibility**) feltételek teljesítése a piacképes termékek gyártásának elengedhetetlen kritériuma. Az **EMC** szempontokat is figyelembe vevő fényforrás egyrészt nem bocsát ki a megengedett szintnél nagyobb elektromágneses zavarokat, másrészt egy meghatározott zavar szint alatt üzembiztosan működik.

A villamos, mágneses és elektromágneses zavarok egyrészt vezetett, másrészt sugárzott formában jelentkeznek. A kisülő lámpák folyamatosan termelnek és sugároznak a környezetük felé nagyfrekvenciás zavarokat. Ilyen módon a működés fizikai alapjaiból következik a környezet zavarásának egy jelentős része. A fényforráshoz épített villamos tápláló és szabályozó rendszer ugyanakkor vezetett zavarokat táplál vissza a villamos hálózatra, illetve sugárzott jelekkel zavarja meg a környezetében lévő érzékeny berendezések működését. Nem engedhető meg, hogy a zavarokra rendkívül érzékeny infokommunikációs rendszereink, melyeknek egyre inkább ki vagyunk szolgáltatva, a fellépő zavarok miatt bizonytalanul működjenek. Dolgozatomban a kompakt fénycsövek működését EMC szempontból elemzem – nem csak rendszer szinten, hanem a rendszert elemeire bontva is. Így a kisülőcső - beleértve az elektródokat és magát a kisülést is -, a lámpát működtető elektronikus előtét, valamint az ezeket összekötő vezetékek szerepét is vizsgálom. A világítási rendszerek zavaremissziójának csökkentése csak ezek megértése után válik lehetővé.

Az izzólámpák után újabban a kompakt fénycsöveket is olyan világítási alkalmazásokban kívánják felhasználni, ahol lehetőség van a csövek kibocsátott fényáramának szabályozására (dimmelés). Ez a szabályozás azonban a kisülő fényforrások esetében jóval bonyolultabban valósítható meg, mint az említett izzólámpáknál.

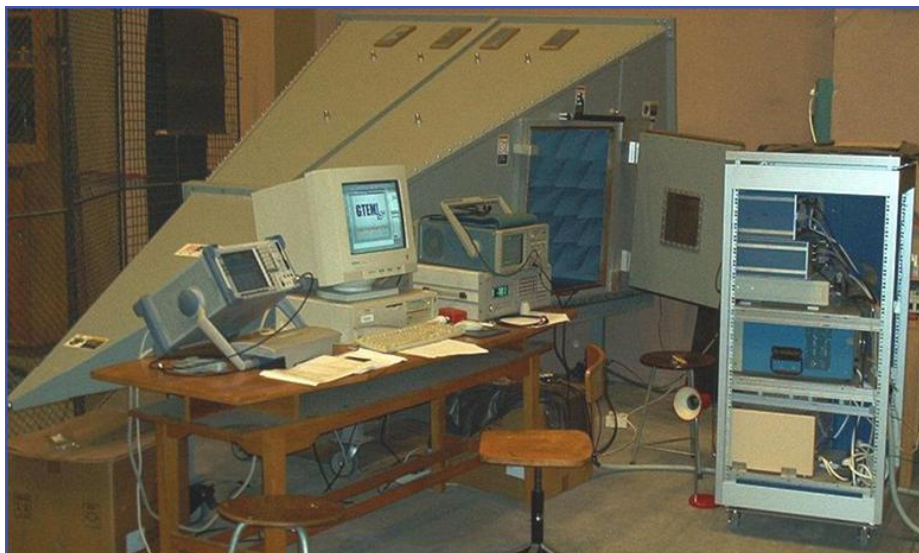
A fényáram-szabályozás során a katódot járulékos fűtőárammal kell fűteni, hogy hőmérséklete a csökkenő áram ellenére is állandó maradjon. A fűtőáram optimális értéke biztosítja az alacsony katódosítást (a katódosítás tartományában fény nem, csak hő keletkezik), ugyanakkor a katód nincs túlfűtve (a túl nagy fűtőáram, így túl nagy katódhőmérséklet a katódmassza túlzott mértékű párolgását idézi elő).

A kompakt fénycsöves rendszerek esetében a dimmelés izzólámpákénál bonyolultabb megvalósíthatósága azonban EMC-vel kapcsolatos kérdéseket is felvetnek, melyeket dolgozatomban szintén részletesen elemzek.

## 2 Módszerek

A Budapesti Műszaki Egyetem Villamos Energetika Tanszékén, szoros együttműködésben a Szélessávú Hírközlő Rendszerek Tanszékkel, valamint a General Electric (GE) Lighting üzletágával új, teljes EMC-mérőrendszert fejlesztettem és építettem ki. A rendszer egyrészt szabványos, nagyfrekvenciás és kisfrekvenciás EMC-vizsgálatok elvégzésére alkalmas, másrészt tudományos kísérletek eszközeül is szolgál.

A rendszer fő alkotóeleme a GTEM (Gigahertz Transversal Electromagnetic) cella (5-2. ábra). A GTEM-cella egy piramis alakú, kétszeres lezárt 50 ohmos tápvonal. A bemenetén egy normál 50 ohmos koaxiális kábel fizikailag egy négyszög alakú keresztmetszetté kerül átalakításra. A keresztmetszeti méretek aránya 3:2 (szélesség:magasság). A középső vezető (melyet septumnak nevezünk), lapos, széles vezető, melyet ha egy függvénygenerátorral egy mikrohullámú erősítőn keresztül meghajtunk, egy jól meghatározott térfogatban egy névlegesen homogén villamos erőtereloszlást fog létrehozni. Ez a névlegesen homogén téreloszlású térfogat alkalmas a sugárzott immunitás tesztek elvégzésére. A reciprocitás elvén a sugárzott emissziós vizsgálatok szintén elvégezhetők ebben a térfogatban. A septumot fizikailag egy 50 Ohm eredő értékű ellenállás-hálózat zárja le annak érdekében, hogy a septum árameloszlásához illeszkedjen. A létrejövő térerősségek – legyenek az immunitási vizsgálatokhoz előállítva, vagy a vizsgált eszköz (EUT – Equipment Under Test) által keltettek -, szabadtéri abszorber-szivaccsal vannak lezárva. A cella bemenetére kapcsolt rádiófrekvenciás feszültség által generált térerősségek síkhullámként terjednek a GTEM-cella elejétől a lezárás felé [73-74].



1. ábra A GTEM cella alapú mérőrendszer

A sugárzott rádiófrekvenciás emissziós vizsgálatok során a fényforrásból vagy lámpatestből érkező zavarjelet a cella elejében található N-típusú csatlakozóra egy 50 ohmos koaxiális kábellel csatlakoztatott EMC-mérővevővel detektálok. A szoftver által vezérelt pneumatikus forgatórendszer lehetővé teszi a vizsgált eszköznek a cella hossz tengelyéhez mért bármilyen irányú forgatását, így az minden orientációban vizsgálható. Léteznek [75-80] 3, illetve 9-bemenetű korrelációs algoritmusok, melyek lehetővé teszik, hogy a 3, illetve 9 orientációban megmért térerősségekből számítani tudjuk egy antennával 3, vagy 6 m távolságban detektálható térerősségeket. Közeltérben (körülbelül 30 MHz-ig) szükség van a 9 mérési pontra a sugárzási karakterisztika összetettsége miatt, távotérben már elegendő három orientációban mérni. A GTEM-cella egészen 20 GHz-es felső határfrekvenciáig alkalmazható sugárzott emissziós vizsgálatokra [81]. Minden esetben figyelniük kell azonban arra, hogy a fényforrás, az előtét, a lámpatest és a kábelek egymáshoz képest stabilan legyenek rögzítve, ugyanis a forgatások közbeni bármilyen elmozdulás befolyásolja a mérési eredményeket, és így a korrelációs algoritmus nem ad megbízható eredményt. Az elmozdulás leginkább természetesen a kábelezést érinti, így ezek rögzítésére fokozottan kell ügyelni.

Az általam bemutatott vizsgálatok során a bonyolultság és a mérés hosszadalmissága miatt nem használtam vizsgálatonként 9 orientációt, ugyanis pontos mérési eredményeknek a szabványnak való megfelelés vizsgálata esetén lenne kiemelt jelentősége, az pedig az előbbiekben leírtak alapján keretantennás mérést ír elő, indukált áram mennyiségre. Másrészt, a szabvány szerinti vizsgálat is három síkban történik, és minden egyes síkban kapott eredménynek ugyanannak a határérték-görbének kell megfelelnie. Tehát a szabvány nem törekszik a sugárzás irányeloszlásának teljes ismeretére.

Ugyanakkor a keretantenna helyett alkalmazott GTEM-cella alapú vizsgálat lehetővé teszi a nagyobb érzékenység elérését, ezáltal lehetővé válik a rendszer részegységeinek (kisülőső, elektródok, elektronikus előtét, vezetékek) egyenkénti vizsgálata.

Az általam kifejlesztett és megvalósított mérőrendszer automatizált, minden mérőműszert egy PC vezérel GPIB (IEEE-488) buszon keresztül. A mérési eredményeket begyűjti és feldolgozza az általam fejlesztett szoftver.

## 3 Tézisek

### 3.1 Első tézis

Noha a kompakt fénycsövek által okozott EMC problémák ismertek, kizárólag az általuk kibocsátott villamos, mágneses, és elektromágneses zavarokat mérik a vonatkozó szabványoknak megfelelően. A zavarkibocsátás fizikai okaival nem foglalkoznak. A rádiófrekvenciás zavaremisszió csökkentése csak az azt létrehozó fizikai folyamatok megértése, elemzése után valósítható meg. A vonatkozó szabványoknak ez nem célja, az azokban meghatározott mérési módszerek fejlesztési célokra nem alkalmasak. Ezért egy új mérőrendszert fejlesztettem és építettem ki, mellyel ezen fizikai folyamatok elemezhetőek és ezáltal a rendszer fejlesztési célokra kifejezetten alkalmas (12, 13).

Although EMC problems caused by compact fluorescent lamps are known, only the electric, magnetic and electromagnetic disturbances they produce are being measured according to the relevant standards. The physical background of the noise emission has not been investigated. Decreasing the effect of the radio-frequency emission is only possible after understanding and analyzing their sources, namely the causing the physical processes. This is not the goal of the relevant standards. The test methods defined by them, are not suitable for development aims. Because of this, I have developed and built a new test system, which can be used for the analysis of the above mentioned physical processes, and as a result, it is optimal for development aims.

A fényforrások, valamint lámpatestek kis- és nagyfrekvenciás emissziójával, valamint immunitásával kapcsolatos EMC-szabványok széles körben ismertek. Így a vonatkozó vizsgálatok is mindennaposnak számítanak a kompakt fénycső-fejlesztés területén. Azonban ezek a vizsgálatok a szabvány előírásainak megfelelően a fényforrást minden esetben, mint rendszert kezelik, és alapvetően arra keresik a választ, hogy a rendszer egésze megfelel-e a szabvány által felállított határértékeknek, vagy sem. Nem céljuk a rendszert annak részegységeire bontva elemezni, az emisszió rendszeren belüli pontos forrását beazonosítani. Így nem kínálnak megoldási javaslatokat a rádiófrekvenciás zavaremisszió csökkentésére [60, 61, 65, 82, 83]. Dolgozatomban részletesen elemeztem EMC-szempontról a kompakt fénycsövek működését mind normál, mind dimmelt működés során és a bemutatom az emisszió lehetséges forrásait a rendszeren belül. Ezen cél eléréséhez kifejlesztettem és megvalósítottam egy új EMC-mérőrendszert, melynek alapja egy, a sugárzott emisszió érzékenyebb vizsgálatára alkalmas GTEM-cella, illetve a kompakt fénycső tetszőleges meghajtását és katódjának tetszőleges fűtését lehetővé tevő generátorrendszer, valamint az ezeket működtető és a mérési eredményeket feldolgozó vezérlőszoftver.

### 3.2 Második tézis

Az általam kifejlesztett mérőrendszeren végrehajtott laboratóriumi mérések alapján, a kisülőcsövet optimális körülmények között meghajtva megállapítottam, hogy a kisülőcső (maga a kisülés) optimális körülmények között az előtét által meghatározott frekvenciákon meghajtva, a 9 kHz – 30 MHz frekvenciatartományban antennaként viselkedik, melynek gerjesztett távoli (elektromágneses) tere elhanyagolható a közeli tere (villamos és mágneses térerősség) mellett. Saját maga ebben az esetben nem termel zajt (12, 13).

Based on the laboratory experiments carried out on the newly developed measurement system, I have concluded that the discharge tube (the discharge itself) operated in optimal circumstances, acts as a antenna, whose generated far (electromagnetic) field is negligible compared to its near field (electric and magnetic field strength), in the frequency range of 9 kHz – 30 MHz at frequencies defined by the ballast. The discharge tube itself does not generate disturbance in this case.

A kompakt fénycsövet, mint fényforrást bizonyos feltételek fennállása esetén képesek vagyunk optimális körülmények között üzemeltetni. Ebben az esetben a lámpát annak tervezett munkapontjában, tehát névleges áramon működtetjük. Továbbá, az alkalmazott katódtípus megfelel a lámpa névleges áramának, így az áram hatására működés közben a katód a termikus emisszióhoz szükséges optimális hőmérsékletű, nincs szükség járulékos katódfűtő áramra. Az előzőknek megfelelően a lámpát nem dimmelt állapotban üzemeltetjük, tehát sem (az emittált elektronok száma szempontjából) túlfűtve, sem alulfűtve (instabil működés és ívtalppont a kis katódhőmérsékeletnek köszönhetően) nincs. Az előbbi feltételek fennállása esetén a kisülőcső (beleértve az ívet is) kizárólag az elektronikus előtét által rákényszerített elektromos paraméterekkel (frekvencia, áram és az ív impedancián keresztül ennek megfelelő ívfeszültség vagy ívfeszültség és az ív impedanciáján keresztül ennek megfelelő áram) jellemezhető antennaként viselkedik, melynek távoli tere a gerjesztett közeli tér mellett elhanyagolható a 9 kHz – 30 MHz frekvenciatartományban vizsgálva. Ezen hatása ugyanakkor árnyékoláson keresztül kiküszöbölhető.

### 3.3 Harmadik tézis

Normál, valamint dimmelt állapotban meghajtott kompakt fénycsövek kisülőcsövének analizését végezve megállapítottam, hogy a fénycsövek, kompakt fénycsövek működése során, elsősorban az ún. dimmelt üzemmódban a kibocsátott rádiófrekvenciás sugárzást döntő mértékben befolyásolja a járulékos katódfűtés és a katódon átfolyó áram hatására emittált elektronok számának, illetve az áramban résztvevő elektronok számának kapcsolata. Ezek különbsége a katód előtti térben okozhat

**rádiófrekvenciás oszcillációt (katódoszcilláció), amely szélessávú zaj-kibocsátásban jelentkezik (5, 6, 8, 12, 13).**

**I have analysed the operation of the discharge tube of compact fluorescent lamps in normal and dimmed mode. I have concluded that during the operation of fluorescent and compact fluorescent lamps, mainly in dimmed operation mode the emitted radio-frequency radiation is strongly affected by the connection between the number of electrons emitted as an effect of the additional cathode heating and the arc current which flows through the cathode and the number of electrons taking part in the arc current flow. The difference of the above may cause a radio-frequency oscillation in the cathode region (cathode oscillation), resulting in wideband noise emission.**

Napjainkban megnőtt az igény a fénycsövek, kompakt fénycsövek kibocsátott fényáramának szabályozhatóságára. A fényáram-szabályozás (amely alatt gyakorlatilag a névleges értékhez képesti csökkentést értjük), a lámpa íváramának változtatásával történik. A fényáram szabályozása az izzólámpákkal szemben azonban problémákat vet fel, ugyanis nem elegendő egyszerűen lecsökkenteni az íváramot, mert ebben az esetben a katódon átfolyó kisebb értékű áram már nem fűti akkora teljesítménnyel a spirált, mint a névleges (nagyobb) áram. A fénycsőkatódokat a meghatározott értékű névleges íváramon történő működésre tervezik. Kisebb átfolyó áram a katódon a termikus emisszióhoz szükségesnél kisebb (elégtelen) hőmérsékletet eredményez.

Az előbbieket miatt a fényáram-szabályozás (dimmelés) során járulékos fűtőáramot folytatunk át az elektródokon. Ez a járulékos fűtőáram az ívet nem táplálja, csak a katódon és az anódon folyik keresztül, természetesen egymástól galvanikusan leválasztott áramkörökön. Noha a kisülő fényforrások dimmelése napjainkra már széleskörűen elterjedt, nehezen határozható meg, hogy az egyes íváram-értékek mellett mekkora fűtőáram-értékek alkalmazandók. Az optimálisan megválasztott fűtőáram biztosítja, hogy a különböző, névlegesnél kisebb íváramú munkapontokban üzemeltetve se csökkenjen a lámpa élettartama, míg a kisebb íváram az alkalmazott fűtőáram ellenére is energia-megtakarítást eredményez. A túl alacsony mértékű fűtés esetén a katódosés megnő, s ez a megnövekedett katód előtti térerősség gyorsítja fel nagyobb sebességre a katód felé áramló pozitív töltésű ionokat, melyek a viszonylag nagy kinetikus energiájuknak köszönhetően a katódmasszába csapódva makroszkópikus anyagdarabokat szakíthatnak ki abból, ami a massa rendkívül gyors fogyását, valamint a kisülőcső elfeketedését eredményezi. A túl nagy járulékos fűtőáram alkalmazása esetén a katódspirál (és vele együtt a rajta lévő katódmassza is) a termikus emisszióhoz szükséges optimális hőmérsékletnél jobban felmelegszik, s ez az emissziós anyag (katódmassza) túlzott párolgását eredményezi. Mindkét jelenség a lámpa élettartamának drasztikus csökkenéséhez vezet.

A nem megfelelő fűtőáram alkalmazása elektromágneses összeférhetőségi (EMC) problémákat is felvet. A lámpa működése közben a katód termikus emisszió során

elektronokat bocsát ki a katód előtti térbe. Ha a dimmelés során az optimálisnál nagyobb fűtőáramot alkalmazunk, a termikusan emittált elektronok száma jóval nagyobb lesz, mint amire az íváram táplálásához szükség van. Azon elektronok, amelyek nem kerülnek az íváramba, a katód előtt negatív töltésfelhőt képeznek, amely az elektród irányába haladó pozitív ionoknak potenciálgödröt jelentenek. A töltésfelhő kialakulása után nincs szükség további ionozásra a katód működéséhez, az ionok ezért lelassulnak és találkoznak a töltésfelhőt alkotó elektronokkal. Az elektronok és pozitív ionok találkozáskor rekombinálnak, minek során a felszabaduló energiát elektromágneses, rádiófrekvenciás sugárzás (oszilláció) formájában bocsátják ki. Az ívfeszültség, valamint a katód hossz menti hőmérséklet-eloszlásának ismeretében a kibocsátott sugárzás intenzitása és frekvenciája megbecsülhető. Soules [38] termikus modellt állít fel a katód működés (dimmelés) közbeni hőmérsékletének eloszlására, de megelégszik a kilépő elektronok számának meghatározásával.

### 3.4 Negyedik tézis

**Megvizsgálva a kompakt fénycsövek ívkisülésében az anóddal kapcsolatos, valamint az anód előtti térben zajló fizikai folyamatokat, és az azokat befolyásoló tényezőket, megállapítottam, hogy az anód előtti térben lejátszódó oszcilláció rádiófrekvenciás sugárzott és vezetett emissziót okoz. További emissziót okozhat az, ív instabilitása (az ívtalppont helyének folyamatos, véletlenszerű, gyors változása) (5, 6, 8, 12).**

**Having analysed the physical processes related to the anode and its pre-sheet volume and their influencing factors, I have concluded that the anode oscillation, which takes place in the pre-sheet volume of the electrode, causes radiated and conducted radio-frequency emission. Further emission can be caused by the instability of the arc (the continuous, stochastic, rapid change of the location of the hot spot).**

Az elektronok az anódhoz érkeve jelentős mozgási energiával rendelkezhetnek. Ez az energia elérheti azt a szintet is, hogy az elektronok járulékos ionozást okozhatnak az anódesés tartományában vagy az az előtti, kisebb plazmasűrűségű tartományban. Ha ez a járulékos ionozás megtörténik, a plazmasűrűség hirtelen megnő, annyira, hogy az anód pozitív anódesés nélkül is be tudja gyűjteni az elektronáramot. Ekkor az anódesés hirtelen 0-ra esik le, minek hatására a járulékos ionozás véget ér. A megnövekedett számú ion az ambipoláris diffúzió során a kisülőcső irányába áramlik el, majd ott lelassulva rekombinálnak az ott jelen lévő elektronokkal. Tehát az eredeti plazmasűrűség visszaáll, s a járulékos ionozás abbamarad. A plazmasűrűség csökkenésével az anódesés nőni kezd, mígnem eléri az ionozáshoz szükséges értéket, s a folyamat újraindul. A jelenség szintén egy oszcillációt okoz, mégpedig az ívfeszültségben, s ezáltal természetesen az íváramban is, mely oszcilloszkópon jól nyomon követhető. A kritikus anódesés megegyezik a Hg ionizációs



potenciáljával, ha ezt a szintet az anódesés eléri, az ionozás hirtelen megindul, ennek megfelelően az anódesés pillanatszerűen 0-ra esik. Az anódoszilláció a katódtér előtti oszcillációhoz hasonlóan elektromágneses sugárzást okoz, az anódesés potenciálvezérlő eszközökkel beállítható, s így az oszcilláció és a neki tulajdonítható elektromágneses sugárzás elkerülhető.

Amennyiben a katódhőmérséklet / az ívtalppont hőmérséklete nem megfelelően nagy, az ív instabillá válik és az ívtalppont gyors iramban cseréli pozícióját (ez az a pont, ahol az ív kezdődik és ahonnan az elektronok kilépnek). Ez a sztochasztikus folyamat véletlenszerű, szélessávú rádiófrekvenciás emissziót hoz létre. Ez a jelenség fennállhat nem megfelelő katód konstrukció esetében; dimmelés közben, ha elégtelen járulékos fűtést alkalmazunk; vagy a lámpa élettartamának végén (EOL – End of Lamp life), amikor a katódmassza teljes egészében elfogyott a katódról. Nem ismert korábbi forrás, amely az instabil ív / instabil ívtalppont hatását a rádiófrekvenciás emissziós viselkedésre bemutatta volna. Waymouth [16] bemutatja ugyan az anódoszilláció jelenségét, de nem hozza összefüggésbe rádiófrekvenciás emissziós viselkedéssel.

### 3.5 Ötödik tézis

Laboratóriumi vizsgálatokat végeztem dimmelt kompakt fénycsöves rendszerekkel. Az IEC61000-3-2 szabvány nem írja elő ezen rendszerek vizsgálatát (kizárólag a részegységekre tartalmazznak előírásokat), a CISPR15 szabvány pedig dimmelt működés esetén nem írja elő a spektrum teljes vizsgálatát, csak néhány előre meghatározott, diszkrét frekvencián történő ellenőrzést. Ugyanakkor, mint azt bemutattam, a rendszer elemei hatnak egymásra az emissziós viselkedés szempontjából, mind a harmonikus áramfelvétel, mind a rádiófrekvenciás vezetett-sugárzott emisszió esetében. Ennek következményeként a rendszer viselkedése kedvezőtlenebb lehet, mint a részegységek egyenkénti viselkedése. Mivel dimmelt működés esetén a kompakt fénycső és a fázishasítás elvén működő dimmer szükségszerűen együttesen, egymásra hatva képezi a világítási rendszert, szükség van ennek figyelembevételére az említett szabványok előírásaiban is (13).

I have investigated the operation of dimmed compact fluorescent lamp systems. The IEC61000-3-2 standard does not require the testing of these systems (they contain requirements for the individual components of the system), while the CISPR15 standard does not require the testing of the full spectrum in dimmed operation, but checking at several pre-defined discrete frequencies only. In fact, the elements of the system interact with each other from emission behaviour point of view, both in case of harmonic currents, both in case of radio-frequency conducted-radiated emission. As a result of this, the behaviour of the system might be less favorable than the behaviour of the individual components. As the phase-cut dimmer and the dimmable compact fluorescent lamp

**necessarily build up the lighting system together, interacting with each other, there is a need for taking this fact into account in the requirements of the above mentioned standards.**

Az IEC61000-3-2 szabvány előírja (az egyébként izzólámpákhoz ajánlott) fázishasításos dimmerek tesztelését az A-osztályra vonatkozó áramharmonikus-határértéknek megfelelően, de kizárólag 1000 W névleges terhelhetőség felett és rezisztív terheléssel. Szintén vizsgálándók a dimmelhető kompakt fénycsövek, de kizárólag nem dimmelt állapotban, a C-osztályra vonatkozó határértékeknek megfelelően. A valós alkalmazásokban ezen dimmereket együtt alkalmazzák a dimmelhető kompakt fénycsövekkel, a tényleges terhelés a kompakt fénycsövek jobb hatásfoka miatt szinte minden esetben kisebb, mint 1000 W (tipikusan 100 W-nál is kisebb). Így ezen rendszerek vizsgálata is indokolt, azonban könnyített kritériummal. A dimmer által hasított szinusz-alakú feszültség miatt ugyanis a CFL már elviekben sem teljesítheti a szabványban előírt, az áram folyási szögére vonatkozó, és az áramcsúcs fázishelyzetére vonatkozó elvárásokat. A fentiek a [65] szabvány hiányosságát támasztják alá. A [60] szabvány ugyan a dimmelhető rendszerre is előír követelményeket, ugyanakkor nem követeli meg a teljes spektrum vizsgálatát, megelégszik néhány előre meghatározott, diszkrét frekvenciavonal vizsgálatával. A fázishasított dimmer és a dimmelhető kompakt fénycső egymásra hatása miatt (mint láttuk, a működési frekvencia dimmelés közben változik) ez ugyanakkor nem elégséges.

A teljes rendszer vizsgálata kívánatos minden esetben, ugyanis a rendszer viselkedése összességében más lehet, mint ahogy arra a rendszert alkotó részegységek egyenkénti viselkedéséből következtethetünk.

## 4 Gyakorlati alkalmazás

Új, teljes EMC-mérőrendszert fejlesztettem és építettem ki a Budapesti Műszaki Egyetem Villamos Energetika Tanszékén, szoros együttműködésben a Szélessávú Hírközlő Rendszerek Tanszékkel, valamint a General Electric (GE) Lighting üzletágával. A rendszerhez saját vezérlő- és kiértékelő szoftvert fejlesztettem, mellyel megoldottam a vizsgálatok automatizálását. A mérőrendszer egyrészt szabványos, nagyfrekvenciás és kisfrekvenciás EMC-vizsgálatok elvégzésére alkalmas, másrészt termékfejlesztések és tudományos kísérletek eszközüül is szolgál.

A kompakt fénycsövek működését az EMC - sugárzott emisszió szempontjából nem csak rendszer-szinten, de a rendszert elemeire bontva is elemeztem. A sugárzott emisszióért felelős fizikai folyamatok megértése lehetővé teszi, hogy olyan fényforrásokat tervezzünk, amelyek jóval kisebb mértékben zavarják a környezetüket. Az emisszió fő forrását a lámpa plazmájaként azonosítottam. Mindazonáltal a spektrumot az elektronikus előtét (az inverter és a rezgőkör) határozza meg a lámpafeszültség és lámpaáram táplálásán keresztül, ugyanis a kisülőső antennaként viselkedik. Amennyiben biztosítjuk a kisülés optimális működését, a kisülőső és a kisülés önmaga zajt nem termel.

EMC szempontból elemeztem a kompakt fénycsövek fényáram-szabályozását (dimmelését). Eszerint kritikus a leggyakrabban használt fázishasítást alkalmazó dimmerek szerepe az emisszió (harmonikus áram-felvétel és RF-emisszió) szempontjából. A lámpában alkalmazott járulékos katódfűtés hatására szélessávú zaj keletkezik a katód előtti térben, a katód-oszcilláció jelensége során. Az elektronikus előtét a működési frekvencia változtatása során fejt ki hatását, a tervezés során tekintettel kell lennünk a mindig jelenlévő harmonikusokra, ugyanis a harmadik harmonikus már a CISPR B-sávba kerülhet, ahol a megengedett emittált zavarfeszültség 14 dB-lel kisebb, mint a CISPR A-sávban (150 kHz alatt).

A tápkábelről, amelynek korábban jelentős szerepet tulajdonítottak a sugárzott zavar-kibocsátásban, bebizonyosodott, hogy hatása 1 m-es vezeték hossz mellett 9 kHz – 30 MHz frekvenciatartományban elhanyagolható. Mindez az ezekhez a frekvenciákhoz tartozó nagy hullámhosszakkal magyarázható. A kompakt fénycsövek dimmelése befolyásolja a sugárzott zaj-kibocsátási karakterisztikájukat a munkapontjuk elcsúsztatásán és az alkalmazott járulékos katódfűtésen keresztül, amely hatással van a kisülésben jelen lévő elektronok számára és katód oszcillációt okozhat. A kisülőlámpa instabil működését el kell kerülni, mivel az ilyen működés EMC szempontból sztochasztikus hatású.

## 5 Továbbfejlesztés

A téma és az elvégzett munka továbbfejlesztéseként a LED-alapú, izzólámpahelyettesítő fényforrások vizsgálata következhet. Ezen – retrofit – fényforrások vizsgálata csak a közeljövőben fog megjelenni a vonatkozó IEC-szabványokban. A fényáramszabályozásra (dimmelésre) ezek esetében is igény van. Ez részben hasonló problémákat vet fel, mint azt a kompakt fénycsövek esetében láttuk, részben különbözik is azoktól az eltérő fizikai működés, illetve részben eltérő meghajtó áramkör miatt.

Egy másik lehetséges jövőbeni fő kísérleti terület a kisülő fényforrások tranziens viselkedésének vizsgálata a gyújtási folyamat alatt. Ekkor egy igen intenzív emisszió zajlik le az esetenként akár néhányszor tíz kilovolt nagyságú gyújtófeszültség hatására.

## 6 A szerző saját publikációi

Jelen felsorolás azokat a saját, illetve társszerzővel közös publikációkat tartalmazza, amelyekre a szerző a disszertációban hivatkozott. Zárójelben [x] jelöltem az adott publikáció irodalomjegyzékben szereplő sorszámát is, a sorrend a megjelenés sorrendje szerinti.

- (1) **Schmidt G.**, Tasi Miklós, Orbán János: A kompakt fénycső, mint az izzólámpa környezetbarát helyettesítője, *Elektrotechnika*, No. 4, 2008 [7]
- (2) Medvedev M., Siti A., **Schmidt G.**: Operating Principles of Induction Fluorescent Lamps, *Svetotechnika*, Moscow, Russia, 2006 [9]
- (3) **Schmidt G.**: Energy Smart – új kompakt fénycső család a GE-től, *Elektrotechnika*, No. 2, 2010 [13]
- (4) **Schmidt G.**: Katódhőmérséklet közvetett mérése kompakt fénycsövekben optimális dimmelési karakterisztika meghatározása céljából, *Diplomaterv*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2001 [30]
- (5) **Schmidt G.**: EMC Problems of Fluorescent and Compact Fluorescent Lamps, *IEEE Postgraduate Power Conference*, Budapest, Hungary, 2002 [54]
- (6) **Schmidt G.**, Novák B., Istók R.: Electromagnetic Interference In Office and Household Appliances Caused by Fluorescent Lighting Systems, *3rd International Conference on Electrical and Power Engineering*, Iasi, Romania, 2004 [55]
- (7) Novák B., **Schmidt G.**, Istók R.: Electromagnetic Interference on Instabus EIB Systems Caused by Continuous Noise Sources such as Fluorescent Lighting Systems, *3rd International Conference on Electrical and Power Engineering*, Iasi, Romania, 2004 [56]
- (8) **Schmidt G.**, Istók R.: Fluorescent Lighting Systems Causing Electromagnetic Interference in Office and Household Appliances, *City of Tomorrow and the Electricity Conference*, Prague, Czech Republic, 2003 [57]
- (9) Istók R., **Schmidt G.**: Fénycsövek nagyfrekvenciás zavaremisszió-vizsgálatának eszközei és rendszere, *Elektrotechnika*, No. 4, 2006 [59]

- (10) Istók R., Bagoly Zs., **Schmidt G.**: A modern autólámpa EMC-vizsgálata, ELEKTRONet, No. 8, 2006 [63]
- (11) Istók R., **Schmidt G.**: Imbunatatirea metodei de masurare a perturbatiilor emise prin conductie de catre lampile auto HID, Electricianul, No. 2., Romania, 2006 [64]
- (12) **Schmidt G.**, Berta I.: Radiated radiofrequency emission from compact fluorescent lamps, International Journal of Plasma Environmental Science & Technology, Japan, 2011 [84]
- (13) **Schmidt G.**: Dimming of Compact Fluorescent Lamps and One of Its Related Aspects – Electromagnetic Compatibility, Acta Electrotechnica et Informatica, Slovakia, 2010 [104]