



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Fénykibocsátó diódák multi-fizikai élettartam modellezése

Doktori (Ph. D.) értekezés téziszfüzete

Szerző: Hegedüs János
okleveles villamosmérnök

Témavezető: Dr. Poppe András
az MTA doktora
egyetemi tanár

Elektronikus Eszközök Tanszéke
Budapest, 2020.

Előszó: motiváció és célkitűzések

A LED-es világításra történő átállás terjedését elsősorban a LED-ek kellő mértékben megnövekedett hatásfokának, illetve fényhasznosításának köszönhetjük. A LED-es fényforrások alkalmazása azonban nem kevés technikai kihívás elé állítja a tervezőket és a gyártókat. Kulcsfontosságú feladattá vált a világítótestek megfelelő hűtése, ugyanis a hőmérséklet növekedésével a LED-ek hatásfoka és várható élettartama is számottevő mértékben csökken. Elégtelen hűtés esetén nemcsak a LED-ek kerülnek sokkal kedvezőtlenebb munkapontba, de az eszköz öregedése is felgyorsul, ami a hatásfok további romlásával jár, valamint megnövekszik az eszköz hirtelen meghibásodásának valószínűsége is. A LED-es lámpák, világítótestek tervezése a legtöbb esetben még mindig ökölszabályok alapján történik, és noha ezeket sok gyártó alapos tesztek alapján folyamatosan felülvizsgálja és igazítja, a céltudatos tervezés még mindig újabb és újabb előnyöket tartogat.

LED-ek termikus kérdéseinek tárgyalásakor gyakran a környezet hőmérsékletét határozzák meg, pedig a LED-ek nyitófeszültsége és fényárama a LED pn átmenetének hőmérsékletétől függ, ez viszont a mai teljesítmény LED-ek esetében számottevően melegebb a környezetüknél. Sok esetben gyártói adatlapok is utalnak a LED-ek üzemi jellemzőinek hőmérsékletfüggésére, de jellemzően akkor sem kapunk teljes, számszerűsített képet a hőmérsékletfüggésről, ha a működési paraméterek a LED chip hőmérséklete függvényében szerepelnek. Ennek fő oka az lehet, hogy az úgynevezett izotermikus nyitóáram – nyitófeszültség – sugárzott teljesítmény (fényáram) karakterizálás a jelenlegi szabványok mellett meglehetősen bonyolult és időigényes eljárás. Megfelelő és részletes modell szükséges azonban az olyan szimulációk elvégzéséhez, amelyekkel – a korábbi ökölszabályokat felváltva konzisztens módon meghatározható a LED-es világítótestek üzemi hőmérséklete, fényárama, feszültsége, felvett teljesítménye.

A kutató munkám során a cél egy olyan „Ipar 4.0” szemléletű tervezési megoldás alapjainak kidolgozása volt, amelynek segítségével nem csak a hőmérsékletváltozás, de az eltelt üzemidő hatásait kiküszöbölő vezérlés is meghatározható, vagyis a világítótest fényárama akár a teljes élettartam során állandó értéken tartható. Ezáltal csökken a villamosenergia-fogyasztás, a várható élettartam pedig növekszik. Nem utolsósorban javul a lámpa által nyújtott vizuális komfort, hiszen annak fényáramát nem kell 10–30%-kal túltervezni a későbbi fényáram-csökkenés kompenzálása érdekében.

Konstans nyitóáram mellett a világítótest fényárama a hőmérséklet emelkedésével csökken. Ha a specifikációban előírt legkisebb fényáramot minden körülmény között biztosítani kell, akkor a LED-ek nyitóáramát a várható legmelegebb hőmérsékletnek megfelelően kell beállítani. Ez közvilágítási világítótestek, kontinentális klíma esetében azt jelenti, hogy az év túlnyomó részében szükségtelenül nagy lesz a világítótest fényárama, amely a LED-ek villamos fogyasztását növeli, öregedésüket pedig gyorsítja.

Ehhez hasonló helyzetet okoz a LED-ek öregedéséből fakadó, az üzemidővel egyre jelentősebbé váló fényáram-csökkenés. Maradva a közvilágításnál, mint alkalmazási területnél, a mindenkor megkövetelt megvilágítási érték biztosítása érdekében a lámpát a kezdeti időpontban annyival kell túltervezni, hogy annak várható fényárama a tervezett csere idejére is a kritikus érték felett maradjon. Ez a teljes üzemidő alatt jelentős többletfogyasztást és a LED-ek gyorsabb degradációját okozza.

A kutatott eljárás alapja a LED tokok ún. multi-fizikai áramkör-szimulációs modellje, amely leírja az elektromos, termikus és optikai működési paramétereket és ezek egymásra hatásait. A modell részét képezi a LED-tok termikus kompakt modellje is, amelyhez folytonosan csatlakoztatható a mindenkori hűtőszerelvény termikus modellje. A SPICE áramkör-szimuláció során a bemeneti áram és a környezeti hőmérséklet megadása után meghatározhatóak a világítótestre szerelt LED-ek üzemi paraméterei, a pn átmenetek hőmérséklete, az egyes LED-ek nyitófeszültsége, hatásfoka, illetve az előbbieken alapján a sugárzott teljesítménye és az összfényárama is.

A LED modell előállításához elsődlegesen a LED korábban említett izotermikus karakterisztika-serege szükséges, amelyből alkalmas illesztési eljárással határozhatóak meg a modellparaméterek értékei.

A LED-ek öregítésére legelterjedtebben elfogadott módszert az IES LM-80-as leírás rögzíti, a teszt eredményeinek további extrapolálása pedig a TM-21-11-es eljárás – és az Arrhenius-egyenlet – segítségével lehetséges. Ezek eredményeinek és a LED kezdeti multi-fizikai modelljének segítségével, bizonyos elhanyagolásokkal már végezhetőek élettartam-szimulációk, de az elvben pontos eredményeket az üzemidőtől függő modellparaméterek nyújtják.

Kutatási munkám alapját a teljesítmény LED-ek erősen hőmérsékletfüggő működése jelenti. Alapos mérési és tervezési eljárások segítségével a LED-alapú fényforrások hatásfoka és megbízhatósága is tovább növelhető. A várható élettartam vizsgálata és modellezése szintén a kutatási témám része. A végső cél egy olyan LED modell felállítása volt, amelynek segítségével egy világítótest életciklusa alatti tetszőleges időpontra vonatkozó, jellemző állapota már a világítótest tervezési fázisában is meghatározható.

A munkám során a LED-ek által sugárzott energiát / teljesítményt vettem figyelembe; a spektrális teljesítményeloszlás és a szintani paraméterek modellezése túlmutat a jelenleg leírt munkán, ezek kidolgozása a jövőbeni kutatási terveim része.

A világítótestek hőmérsékletfüggő működését és öregedését a munkám során csak a tokozott LED tekintetében vizsgáltam; a LED meghajtó áramkör és az optika vizsgálata nem képezte részét az általam végzett tanulmánynak, ezért a 'világítótest állapota' alatt az arra a legnagyobb befolyással bíró LED tokok tetszőleges eltelt üzemidejére vonatkozó multi-fizikai modellezése alapján megállapított működési jellemzők együttesét értem.

A fontosabb szimbólumok jegyzéke

α, β	a Varshni formula illesztési paraméterei; a TM-21-11 által alkalmazott összfényáramtartást leíró exponenciális karakterisztika illesztési paraméterei
Φ_e	(teljes) radiometriai fluxus (teljes kisugárzott optikai teljesítmény), $\Phi_e = P_{opt}$, [W]
Φ_V	(teljes) fényáram, [lm]
K	a sugárzás (fényforrás) fényhasznosítása, $K = \Phi_V / \Phi_e$, [lm/W]
λ_p	csúcs hullámhossz, [nm]
λ	hullámhossz, [nm]
η_e	energiakonverziós hatásfok, $\eta_e = P_{opt} / P_{el}$, [-] vagy [%]
τ	termikus időállandó (lineáris időskálán), [s]
ω	frekvencia, körfrekvencia, [Hz], [rad/s]
<i>A</i>	az Arrhenius-egyenlet preexponenciális tényezője (mértékegysége megegyezik a reakciósebességi együtthatóéval)
<i>c</i>	a fény sebessége vákuumban (299 792 458 m/s)
<i>C_{th}</i>	hőkapacitás, [Ws/K]
<i>dt</i>	egy reakció során eltelt idő [s]
<i>E_a</i>	aktiválási energia [J] vagy [eV]
<i>E_g</i>	tiltott sáv szélesség (energiában kifejezve) [J] vagy [eV]
<i>F</i>	az Arrhenius-egyenlet segítségével meghatározható gyorsítási faktor [-]
<i>h</i>	Planck állandó ($6.626070 \cdot 10^{-34}$ Js)
<i>I₀</i>	egy LED teljes nyitóáramát leíró Shockley-féle egyenletben alkalmazott áramegyüttható, [A]
<i>I_{0dis}</i>	egy LED <i>I_{dis}</i> nyitóáram komponense karakterisztikaegyenletében szereplő áramegyüttható, [A]
<i>I_{0rad}</i>	egy LED <i>I_{rad}</i> nyitóáram komponense karakterisztikaegyenletében szereplő áramegyüttható, [A]
<i>I_{dis}</i>	egy LED hődisszipációt eredményező nyitóáram komponense, [A]
<i>I_{rad}</i>	egy LED fényemissziót eredményező nyitóáram komponense, [A]
<i>I_F</i>	egy pn-átmenet (LED) teljes nyitóárama, [A]
<i>I_H</i>	termikus tranzienst mérés során alkalmazott fűtőáram, [A]
<i>I_M</i>	termikus tranzienst mérés során alkalmazott mérőáram, [A]
<i>k</i>	reakciósebességi együttható (a mértékegység a reakció rendjétől függ)
<i>k_B</i>	Boltzmann állandó ($1.380649 \cdot 10^{-23}$ J/K)
<i>m</i>	egy LED teljes nyitóáramát leíró Shockley-féle egyenletben alkalmazott idealitási faktor, [-]
<i>m_{dis}</i>	egy LED <i>I_{dis}</i> nyitóáram komponense karakterisztikaegyenletében szereplő idealitási faktor, [-]

m_{rad}	egy LED I_{rad} nyitóáram komponense karakterisztikaegyenletében szereplő idealitási faktor, [-]
n	élettartam igénybevételi meredekség [-]
P_{el}	egy LED-be betáplált teljes elektromos teljesítmény, $P_{el} = I_F \cdot V_F$ [W]
P_{opt}	teljes kisugárzott optikai teljesítmény (vagy: teljes radiometriai fluxus), $P_{opt} = \Phi_e$, [W]
P_H	egy LED teljes fűtőteliessítménye, [W]
q	elemi töltés ($1.602177 \cdot 10^{-19}$ C)
R_S	egy LED soros (elektromos) ellenállása, [Ω]
R_{th}	hőellenállás, [K/W]
R_{thJA}	a pn-átmenettől a környezetig terjedő ún. <i>junction-to-ambient</i> teljes hőellenállás, [K/W]
R_{thJC}	a pn-átmenettől a tok hűtőfelületéig terjedő ún. <i>junction-to-case</i> hőellenállás, [K/W]
$R_{thValós}$	a LED tok optikai értékkel korrigált hőellenállása, [K/W]
S_m	az idealitási faktor hőmérsékleti együtthatója, [1/K]
S_{RS}	a parazita soros ellenállás hőmérsékleti együtthatója, [Ω/K]
t	eltelt idő, [s]; LED öregedésének eltelt ideje, [h]
T	hőmérséklet, [$^{\circ}C$]; ill. abszolút hőmérséklet, [K]
T_A	környezeti hőmérséklet / termikus referencia pont (a "termikus föld") hőmérséklete, [$^{\circ}C$] vagy [K]
T_{cp}	környezeti hőmérséklet / termikus referencia pont (a "termikus föld") hőmérséklete, [$^{\circ}C$] vagy [K]
T_j	pn-átmenet hőmérséklete, [$^{\circ}C$] vagy [K]
T_{ref}	referencia hőmérséklet (önkéntesen választott), [$^{\circ}C$] vagy [K]
V_F	egy pn-átmenet (LED) kapcsain mérhető teljes nyitófeszültség, [V]
V_{Ff}	Termikus tranziens mérés során a mérőáram mellett mért nyitófeszültség, [V]
V_{Fpn}	egy LED belső pn-átmenetének nyitófeszültsége, [V]
V_g	tiltott sáv szélesség potenciálban kifejezve, $V_g = W_g/q$ [V]
V_H	egy LED I_H fűtőáramon mért nyitófeszültsége [V]
V_T	termikus feszültség, $V_T = k \cdot T/q$ [V] (≈ 26 mV 300 K-en)
W_g	tiltott sáv szélesség (energiában kifejezve) [J] vagy [eV]
x	egy reakció során a változó mennyiség
Z_{th}	termikus impedancia (saját impedancia, transzfer impedancia), [K/W]
$Z_{th}(t)$	termikus impedancia függvény (időtartománybeli), [K/W]

1 A hőmérsékletfüggés kompenzálása multi-fizikai LED modellel

1.1 LED-ek és világítótestek hőmérsékletfüggése

A jellemzően áramgenerátorosan táplált LED-ek nyitófeszültsége, hatásfoka és fényhasznosítása egyaránt csökken a pn átmenet hőmérsékletének növekedésével, tehát egyre kevesebb villamos teljesítményt vesznek fel és ennek is mind kisebb részét alakítják át fénné. A közvilágítási világítótestek tervezése során ezt mindenképpen érdemes figyelembe venni, vagyis a minimálisan megkövetelt fényáramot a világítótestnek biztosítani kell az előre várható legmelegebb környezeti hőmérséklet mellett is. Ha egy világítótest állandó nyitóáramon üzemel, akkor ennek értékét (és/vagy a világítótestbe szerelt LED-ek számát) úgy kell meghatározni, hogy a fényárama a várható legmelegebb üzemi hőmérsékleten is kielégítő maradjon. Az év túlnyomó részében azonban a szükségesnél magasabb lesz a fénykibocsátás (különösen a hideg téli éjszakákon).

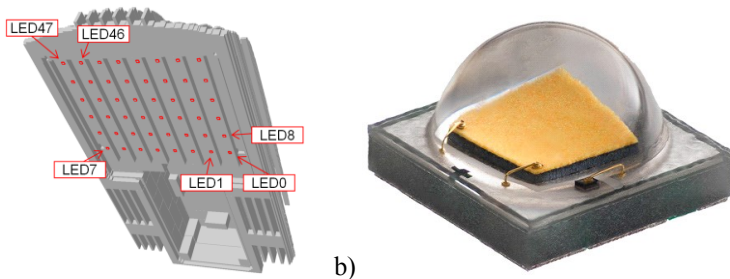
A fent leírt jelenséget a másik irányból tekintve az látszik, hogy a környezet lehűlésével a LED-ek felvett teljesítménye növekszik és fényhasznosításuk javul, ami körültekintő tervezéssel alkalmasan kihasználható. A világítótestben alkalmazott LED-ek hőmérsékletfüggésének pontos ismerete és a világítótest rendszerszintű szimulációja lehetővé teszi a világítótest üzemi fényáramának pontos meghatározását, a környezeti hőmérséklet és a LED-ek nyitóárama függvényében. Vagyis meghatározható egy olyan nyitóáram-vezérlési séma, amely biztosítja a *környezeti hőmérséklet változásának hatásait kompenzáló állandó fényáramú működést*. Ennek segítségével nemcsak jelentős mennyiségű elektromos energia takarítható meg, de a világítótest megbízhatósága és élettartama is növelhető.

1.2 Az üzemi fényáram meghatározása LED modellel

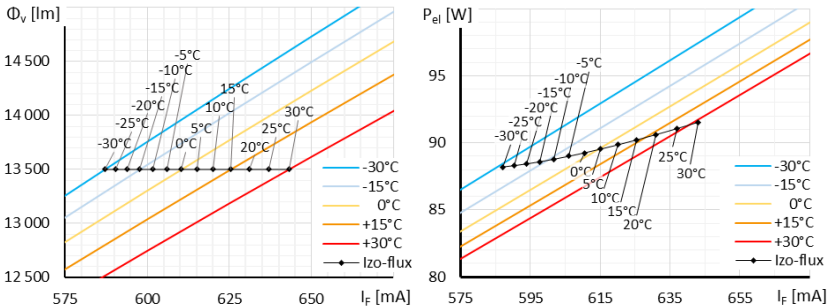
A Hungaro Lux Light Kft. a rendelkezésünkre bocsátotta a PearlLight 48G világítótest egy teljes funkcionalitással rendelkező fizikai példányát (1.1. a) ábra), valamint a világítótestben alkalmazott LED modulok további két példányát (1.1. b) ábra). A kapott LED minták multi-fizikai karakterizálását a JEDEC JESD 51-5x szabványcsaládnak megfelelően végeztem el. A LED tok és a hordozó fém magvas nyomtatott huzalozású lemez együttes termikus kompakt modellje a mérési eredményekből közvetlenül kinyerhető volt. A modellparaméterek meghatározására saját félautomata kalkulátort készítettem MS Excel környezetben.

A világítótest rendszer szintű szimulációit a SPICE-kompatibilis ELDO elektro-termikus áramkör-szimulációs környezetben végeztem el. Az elvégzett szimulációk eredményeit a környezeti hőmérséklet és a nyitóáram értékek szerint két-dimenziós mátrixba rendeztem és alkalmas interpolációs megoldást kerestem a

diszkrét értékekre elvégzett szimulációs eredmények folytonos függvénné alakítására. A szimulációk eredményeül kapott karakterisztikasereg és a hőmérsékletváltozásokat kompenzáló vezérlési séma a 1.2. ábrán látható.



1.1. ábra. a) A PearlLight 48G világítótest részletes 3D MCAD modellje, és b) a világítótestben alkalmazott Cree XP-G2 LED.



1.2. ábra. A PearlLight 48G világítótest összfényáramának és felvett elektromos teljesítményének szimulált és interpolált karakterisztikái a környezeti hőmérséklet és a nyitóáram függvényében. Az ábrákon az állandó fényáramot biztosító, ún. izo-flux tartomány külön jelölve van.

1.3 A szimulációs eredmények verifikációja terepi mérésekkel

A szimulációs eredmények helyességét mindkét működési séma mellett terepi és laboratóriumi mérésekkel igazoltam. A világítótest *in-situ* terepi méréseit két helyszínen végeztem.

A terepi mérések elsődleges célja a világítótest valós viselkedésének a szimulációkkal végzett becslésekkel való összehasonlítása volt. A terepi mérések elvégzése után a világítótest mérését egy *WEISS WK 340/70 típusú klímakamrában* is elvégeztük, ahol a hőmérséklet változtatása során a mérési összeállítás zavartalan és érintetlen maradt, ennek segítségével pedig következetes optikai mérések végezhetőek a hőmérsékletfüggő működést illetően.

I. Tézis

Új, multi-fizikai módszert dolgoztam ki LED-es világítótestek állandó összfényáramú vezérlési sémájának meghatározására. Archív meteorológiai adatok alapján szimulációk segítségével vizsgáltam a vezérlési séma előnyeit az üzemi fényáram és a villamos fogyasztás tekintetében. A vezérlési séma működését egy valós közvilágítási világítótest terepi és laboratóriumi méréseivel igazoltam.

Az eljárás a LED modellek és a lámpatest ház kompakt termikus modellje ismeretében bármely világítótest esetén alkalmazható. Már meglévő világítótestek esetén a módszer lehetővé teszi a villamos fogyasztás előrejelzését, vagyis menetrendeztetőségét.

Kapcsolódó publikációk: [J1], [J2], [B1], [C1], [C2], [C3], [C4]

2 Állandó fényáramú üzem az LM-80 értelemben tekintett öregedés figyelembe- vételével

Az eszközöregedést kompenzáló vezérlési séma napjainkban már számos fényforrásgyártó kínálatában megtalálható. A CLO („Constant Light Output” vagy „Constant Lumous flux Output”) megvalósítását illetően a gyártók jellemzően elég szűkszavú leírást adnak, ezek alapján tipikusan a LED-ek LM-80-as mérési eredményeit alapul véve határozzák meg azt az üzemidőtől függő nyitóáram sémát, amely szerint a LED meghajtó áramkört előre programozzák. A módszer segítségével minden esetben jelentős mennyiségű villamos energia takarítható meg, anélkül, hogy a telepített lámpa kezdeti fényáramát túl kellene tervezni, vagy, hogy az öregedett lámpa fényárama már elégtelen megvilágításhoz vezethetne. Látszólag viszont gyártóspecifikus az, hogy a LED-ek nyitóáramát az üzemidő függvényében milyen módon növelik.

A kültéri világítótestek fényáramtartásának modellezése nem nyilvánvaló, mert a LED-ek pn átmenet hőmérséklete az éppen aktuális időjárástól – hőmérséklettől, légmozgástól, páratartalomtól – függ. A TM-21-es extrapoláció eredményei csak *állandó nyitóáram és állandó pn átmenet hőmérséklet esetén alkalmazhatók*. Hogy változó hőmérséklet (és opcionálisan, változó nyitóáram) mellett meghatározható legyen az öregedés mértéke, ahhoz a *reakciósebességi egyűthetőség* helyébe még a *reakciósebességi egyenlet differenciális alakjában kell behelyettesíteni az Arrhenius-egyenletet* (vagy annak egy megfelelően bővített alakját):

$$-\frac{d\Phi}{dt} = \Phi \cdot k = \Phi \cdot A \cdot \exp\left[\frac{-E_a}{k_B \cdot T_J}\right] \cdot I_F^n \quad (2.1)$$

ahol már a LED-ek T_j lapka hőmérséklete alapján számítom az öregedést. A fenti összefüggést átrendezve és mindkét oldalt integrálva meghatározható bármely két időpont között a kibocsátott optikai paraméter megváltozása:

$$\int_{\Phi_1}^{\Phi_2} \frac{1}{\Phi} d\Phi = - \int_{t_1}^{t_2} A \cdot \exp \left[\frac{-E_a}{k_B \cdot T_j} \right] \cdot I_F^n dt \quad (2.2)$$

ahol a LED-ek lapka hőmérséklete közvetlenül a világítótest hőmérsékletétől, közvetve pedig az időjárási viszonyoktól függ, vagyis T_j az eltelt t üzemidő függvényében írható fel. A nyitóáram értéke a legtöbb alkalmazásban állandó, azonban bármilyen „okos” fényparamszabályozási/vezérlési megoldás esetén ezzel az egyszerűsítéssel már nem élhetünk. A környezeti hőmérséklet változásait is kompenzáló vezérlési séma esetén az I_F nyitóáram elsősorban T_j függvénye, amely végső soron – az időjárási körülmények miatt – az eltelt idő függvényében írható fel.

A teljes élettartamra vonatkozó állandó fényparamot biztosító vezérlési séma telepítéskor történő meghatározása csak durva becsléssel történhet, különösen a forgalmat is figyelő okos megoldások esetén. Ennél elvben pontosabb értéket ad a világítótest hőmérsékletének figyelése és a LED-ek öregedésének *in-situ* meghatározása.

A (2.2) összefüggés nagyban egyszerűsíthető, ha a LED-ek csiphőmérsékletét (és így a nyitóáram értékét is) állandónak tekintjük, és a számításokat csak diszkrét időlépésekkel végezzük el. Tehetjük ezt azért is, mert a világítótestek fő termikus időállandói jellemzően a 10 perces nagyságrendbe esnek.

Ha feltételezzük, hogy az üzemidő csak az eszköz hatásfokát rontja (de pl. a hőmérsékletfüggő paraméterek nem változnak), akkor a különböző munkapontokhoz, de azonos időpillanathoz tartozó fényparam kibocsátás értékek hányadosa állandónak tekinthető:

$$\frac{\Phi_2}{\Phi'_2} = \frac{\Phi_3}{\Phi'_3} = \frac{\Phi_4}{\Phi'_4} = \dots = \text{Konstans}$$

tehát a különböző munkapontokban végbemenő öregedés mértéke arányos és normalizálható. Mindezek alapján definiáltam a *hátramaradó élettartam* („*lifetime-budget*”) fogalmát: legyen η_t egy %-ban kifejezett arányszám, amely hatásfok jelleggel írja le a LED üzemidő függő állapotát. Kezdeti értéke 100%, vagy megegyezik az LM-80-as mérésekhez illesztett görbe nulla órás értékével (tehát β -val). Ennek segítségével egy LED mindenkor fényparama meghatározható úgy, mint az aktuális munkaponthoz tartozó fényparam értéke szorozva a hátramaradó élettartam értékével. A hátramaradó élettartam a diszkrét időlépéses modellben görgetve meghatározható úgy, mint:

$$\eta_{t_{i+1}} = \eta_{t_i} \cdot \exp[-k_{T_{J,IF}} \cdot \Delta t]$$

ahol η_{t_i} és $\eta_{t_{i+1}}$ a megelőző és a következő lépésre vonatkoztatott, általam definiált hátramaradó élettartam %-ban megadva, $k_{T_{J,IF}}$ az aktuális munkapontban vett reakciósebességi együttható, Δt pedig a számítások (t_2 és t_1 időpontok) között eltelt idő.

Az állandó nyitóáramú üzemhez képest az általam javasolt módszerrel jelentős mennyiségű villamos energia takarítható meg, emellett a várható élettartam is számottevően megnövekszik. Az erre vonatkozó szimulációs eredményeket a 2.1. táblázat foglalja össze.

	Állandó nyitóáramú üzem	Állandó fényáramra vezérlés	Az „okos” lámpa előnyei
Az L90-ig tartó élettartam	64,4 ezer óra	83 ezer óra	+29%
	16,7 év	21,4 év	+4,7 év
Fogyasztás 64,4 ezer óra alatt	130,8 kWh	112,8 kWh	-13,7%
Fogyasztás az első évben	7,9 kWh	6,5 kWh	-17,7%

2.1. táblázat. Az állandó fényáramú vezérlési séma segítségével elérhető előnyökre vonatkozó szimulációs eredmények.

II. Tézis

Új elméletet dolgoztam ki, amelynek segítségével a LED-ek szabványos LM-80-as mérési eredményeit felhasználva a teljes üzemidő alatt az üzemi hőmérséklet és nyitóáram függvényében a LED-ek mindenkori állapota, vagyis az öregedés folyamata leírható. Ennek segítségével elvi modellt készítettem egy teljes LED élettartamra vonatkozó állandó összfényáramú vezérlésre, amely egyaránt figyelembe veszi a hőmérsékletváltozás és az öregedés hatásait.

II./A altézis

Archív meteorológiai adatok alapján megbecsültem egy LED-es közvilágítási világítótestnek a teljes LED élettartamra vonatkozó állandó összfényáramú vezérlési séma melletti villamosenergia-megtakarítási lehetőségeit, illetve az így elérhető LED élettartam-növekedést.

II./B altézis

Definiáltam a hátramaradó élettartam fogalmát, amely hatásfok jelleggel írja le egy LED állapotát az eltelt üzemidő függvényében. Javaslatot tettem az állandó összfényáramra vezérelt LED-es világítótestek elhasználódásának a hátramaradó élettartam alapján történő megállapítására.

Kapcsolódó publikációk: [J3], [J4], [B2], [C5]

3 A módosított multi-fizikai LED modell

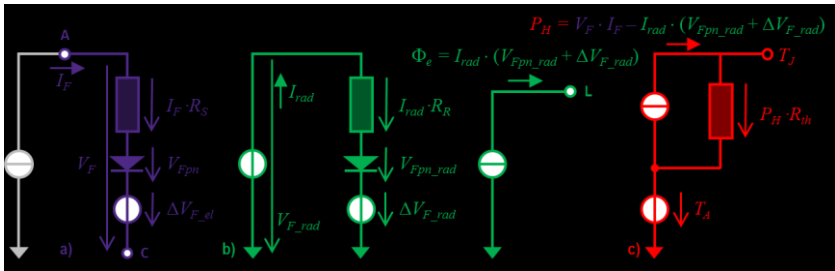
A Delphi4LED projekt egyik célkitűzése volt, hogy a kis- és középvállalkozások számára is elérhető LED modellt biztosítsunk a digitalizált világítótest-tervezés elősegítésére. Az 1. tézisemben használt multi-fizikai LED modell azonban kifejezetten termikus paraméter- és egyenletkészlettel is rendelkező áramkör-szimulációs környezetekhez igazodik. Ilyen elektro-termikus szimulációkra is alkalmas, SPICE netlista kompatibilis platform például az általam is használt ELDO. A professzionális alkalmazásokra program éves licenz díja nagyon magas, ezért nem tekinthető a világítástechnikai ipar szereplői számára széles körben hozzáférhető eszközhöz.

A Delphi4LED projekt megvalósítása a BME EET-n korábban kidolgozott multi-fizikai LED modellt újra fogalmaztuk. Ennek kulcs eleme volt a projektpartnerek azon kérése, mely szerint a modell legyen alkalmas arra, hogy konstans nyitóáramot feltételezve, egyenletek szintjén beépíthető legyen egy termikus szimulációs programba, az ún. relaxációs szimulációs sémát követve.

A korábbi multi-fizikai LED modell ún. *feszültségvezérelt* modell, amely a standard, SPICE jellegű áramkör-szimulációs programok beépített dióda modelljének elektro-termikus kiegészítését igényli. Az iparban szélesebb körben használt SPICE jellegű áramkör-szimulációs programok közül azonban csak az ELDO rendelkezik ilyen modellel. A Delphi4LED partnerek kérésének megfelelő LED modell egy ún. *áramvezérelt* modellt feltételez. Ilyen modell, elektro-termikus hatásokkal is kiegészítve, standard SPICE alaktrész-készletre támaszkodva, bármely SPICE jellegű áramkör-szimulációs programban makromodellként megvalósítható.

3.1 A módosított modell

Az I. tézishez alkalmazott modell két fő részből áll: a LED chip elektromos és optikai működését leíró áramkörből és a termikus modelltől. A módosított modellben a LED csip elektromos és optikai ágait is különválasztottam, így az új modell már három különálló áramköri részből épül fel (3.1. a), b) és c) ábrák).



3.1. ábra. a) Az elektromos ág, b) az optikai ág és c) a termikus modell vázlata. A szürke áramgenerátor külső elem, nem része a modellnek.

Ennek a megközelítésnek az az előnye, hogy feszültségvezérelt feszültség-generátorok beépítésével (ΔV_F generátorok) lehetővé válik az elektro-termikus hatások figyelembevétele úgy, hogy a LED-re jellemző nagyjából logaritmikus $V_F(I_F)$ karakterisztikát standard (azaz nem ‘elektro-termikus’) diódákkal tudjuk reprezentálni.

3.2 A modellezést támogató alkalmazások

Az előző fejezetben bemutatott módosított multi-fizikai LED modell legtöbb paramétere analitikusan nem meghatározható, ezért a korábban készített MS Excel környezetben készített kalkulátort *Visual Basic makrók segítségével paraméterillesztő automatává bővíttem*. A paraméterillesztő algoritmus futási ideje 40 munkapont esetén, egy kétféle és kétszálaltított (tehát az MS Excel működése szempontjából négymagos) középkeletgató Intel processzoron kb. 60 perc.

3.2.1 LED modell paraméterkészletek tömeges előállítás

A Delphi4LED projekt számára 850 darab LED modell paraméterkészletének előállítására külön indító automatát hoztam létre, amelynek futtatását a tanszéki számítógép labor 24 darab asztali PC-je segítségével végeztem el. A teljes modellkészlet előállítására így kb. másfél napot vett igénybe. A modellillesztés során az alapmodellekre a felső nyitóáram dekádban (jellemzően 100 mA... 1000 mA tartományban) a nyitófeszültség és a sugárzott teljesítmény illesztési hibája kevesebb, mint 0,5%, illetve 1,5%. A fényáram illesztési hibája 1,65% a fehér, vörös és borostyán LED-ek esetén, míg a királykék LED-eket is figyelembe véve 11,4%.

Az elkészített nagyszámú LED modell prezentálására egy külön alkalmazást készítettem, praktikusam MS Excel környezetben, ahol a szükséges makrók egy része már a rendelkezésemre állt.

III. Tézis

Új multi-fizikai LED modellt dolgoztam ki, amely bármely, elektro-termikus szimulációkat közvetlenül nem támogató, SPICE alapú áramkör-szimulációs környezetben implementálható.

Az új multi-fizikai LED modell paraméterkészleteinek meghatározására megbízható paraméterillesztő automatát készítettem. Az új LED modellhez legjobban illesztett paraméterkészletekkel a szimulált karakterisztikák pontatlansága a nyitófeszültség és a sugárzott teljesítmény tekintetében egy nyitóáram dekádon belül kevesebb, mint 0,5% és 1,5%. Ezen hibák egy 5-10 példányból álló LED populáció egyedi karakterisztikái szórásán belül vannak. Javaslatot tettem az egyes LED típusok nagyobb populációjának jellemző működését leíró nominális paraméterkészletek meghatározására.

Kapcsolódó publikációk: [J5], [C7], [C8], [C9], [C10], [C11], [C12]

4 Az üzemidőtől függő multi-fizikai LED modell

A II. tézisem célja egy olyan eszközmodell elkészítése volt, amelynek alapvetően az LM-80-as mérési eredményekre támaszkodva, de a munkapont folyamatos változását is figyelembe véve alkalmas módon leírja a LED-ek öregedési folyamatát, akár valós üzemi körülmények között is. A modell azonban nem implementálható SPICE alapú áramkör-szimulációs környezetekben (de legalábbis ennek elősegítése nem volt szempont a modell elkészítése során), illetve bonyolultabb termikus rendszerek esetén közvetlenül nem alkalmas a termikus keresztthatások leírására, a teljes világítótest öregítési vizsgálatai nélkül. A rendszerszintű szimulációkat, így a számítógépes tervezést (virtuális prototípusgyártást) is támogató, teljes élettartamot leíró LED modell elkészítésére a III. tézisem során elkészített multi-fizikai LED modell egyes paramétereinek lehetséges üzemidő függését vizsgáltam meg.

4.1 Seoul 2525 LED-ek élettartam-modellezése

A modellparaméterek időbeli alakulásának vizsgálata szempontjából sokkal előnyösebb lehet, ha a tesztidő előzetes meghatározása helyett inkább az elérni kívánt fényáram csökkenés értéket szabjuk meg. A korábbi tapasztalatok felhasználásával egy újabb LM-80-08 alapú tesztet indítottam, melynek során 18 db Seoul 2525 típusú, kék színben sugárzó, középteljesítményű LED öregedését vizsgáltam.

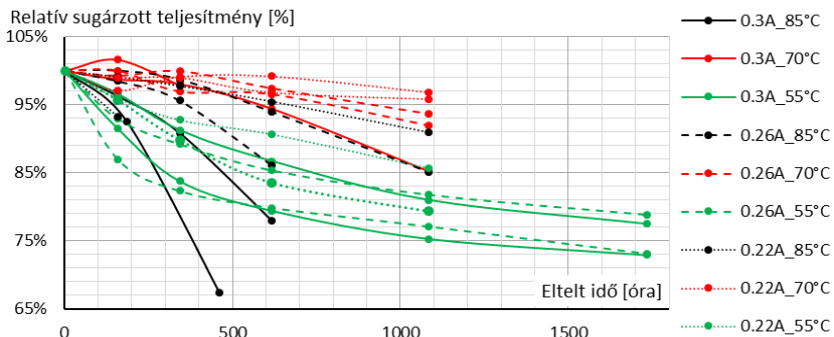
A LED minták LM-80 alapú tesztjét az előírt 55 °C és 85 °C mellett a szabadon választott 70 °C-os környezeti hőmérsékleten végeztem. Minden kamrahőmérsékleten három különböző nyitóáram értéket alkalmaztam, melyek rendre 220 mA, 260 mA és 300 mA voltak (ez utóbbi a LED típus legnagyobb megengedett nyitóáram értéke). A 18 darabos mintakészletet tekintve ez 2 mintát jelentett tesztfeltételként. Ez nem elegendő a TM-21-11-es extrapolációkhoz, de a célom az elméleti

hátter kidolgozása volt, a kitűzött 30% sugárzott teljesítmény csökkenés pedig indokolatlanná tette a további extrapolációkat. A 3×3 határfeltétel szerinti elrendezés mögötti terv az volt, hogy az eredményekből mind a nyitóáram, mind pedig a pn átmenet hőmérséklet tekintetében alkalmas modell készülhessen.

4.2 Az LM-80-08 alapú teszt eredményei

Az LM-80-08 alapú élettartam vizsgálatot 1735 órányi eltelt idő után abba hagytam a magas meghibásodási arány miatt; ekkorra a 18 LED mintából 14 már meghibásodott, a maradék 4 üzembépes LED-ből 2 darab kontakthibás volt.

A vizsgálat során mért sugárzott teljesítmény értékeket az 4.1 ábra szemlélteti. A LED-ek magas meghibásodási aránya mellett a legfontosabb megállapítás az, hogy más öregedési trend tartozik a három kamrahőmérséklethez. Az 4.1. ábrán az $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ környezeti hőmérsékletekhez tartozó mérési eredmények jelölése rendre zöld, piros és fekete. A mérési eredményekből jellegre az látszik, hogy a legkisebb kamrahőmérsékletekhez tartozó minták öregedtek a leggyorsabban. Ennek egyik lehetséges magyarázata a korábban végzett páratartalommal szembeni ellenállás vizsgálat alapján, hogy a kisebb kamrahőmérsékleten nagyobb relatív páratartalom alakulhatott ki, amely a LED-ek öregedését gyorsíthatta. Ez okozhatta az eltérő öregedési jelleget is; míg a többi kamrahőmérséklet esetén a jellegzetesnek mondható exponenciális csökkenés tapasztalható, az $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os öregítési hőmérséklet mellett *konzisztens módon logaritmikus jellegű a fénykibocsátás romlása*.



4.1. ábra. A sugárzott teljesítmények nulla órák értékéhez mért relatív értékei.

A magas meghibásodási arány és a mért eredmények jellege miatt az öregedés nyitóáram és pn átmenet hőmérséklet függésének multi-fizikai modellezése nem volt lehetséges. A továbbiakban a két működőképes minta modellezését, valamint a modellek helyességének ellenőrzését végeztem el. Mindkét minta az $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ környezeti hőmérséklet és 300 mA nyitóáram tesztparaméterekhez tartozott.

4.3 Az üzemidő függő multi-fizikai LED modell: 1. változat

A minták öregedését okozó fizikai folyamatokat leíró képletszerű összefüggések egyelőre nem ismertek, ezért a mérési eredményekhez legjobban illeszkedő modell előállításához a globális paraméterillesztő eljárás során az eltelt idő szerint különféle függvényeket próbáltam ki. Ennek automatizált módon történő elvégzéséhez MS Excel környezetben, Visual Basic makrók segítségével olyan kalkulátort készítettem, amely a feltételezett időfüggvényeknek megfelelő modellparaméterek mellett kiszámította a mérési eredményektől való eltérést.

Az automatizált paraméterillesztésből kapott szaturációs áram, idealitási tényező és soros ellenállás értékek jelentős üzemidő függést mutatnak. A kész modell segítségével egy szimulációsorozatot futtattam, amelynek eredményeit összevettem a valós mérési adatokkal. Ennek alapján a szimulációs hiba átlagosan $-0,5\%$, a legnagyobb eltérés a mérésektől pedig $-1,2\%$. A modell ilyen szintű pontossága a szaturációs áram és az idealitási tényező négyzetes, illetve logaritmikus közelítésének köszönhető, amelyeknek segítségével a modell a kezdeti beégetődési szakasz és a későbbi üzemidő mérési eredményeire is egyaránt jól illeszthető.

A további, nagyobb időbeli felbontásban végzett szimulációkból azonban kiderült, hogy az 1 és 100 órás üzemidők között a modell teljesen inkonzisztenssé válik. Ennek oka szintén a Shockley diódaegyenlet paramétereinek időfüggvényeiben található meg: a szaturációs áram és az idealitási tényező növekedése ellentétes irányba tolja el a szimulációs eredményeket, a logaritmikusnak modellezett idealitási tényező kezdeti hirtelen felfutását pedig a szaturációs áram lapos kezdeti meredeksége nem kompenzálja, így a végeredményekben nem kívánt, negatív irányú kiemelés jelenik meg. Mindezek tükrében a modell csak az első 100 órányi üzemidő után alkalmazható konzisztens módon.

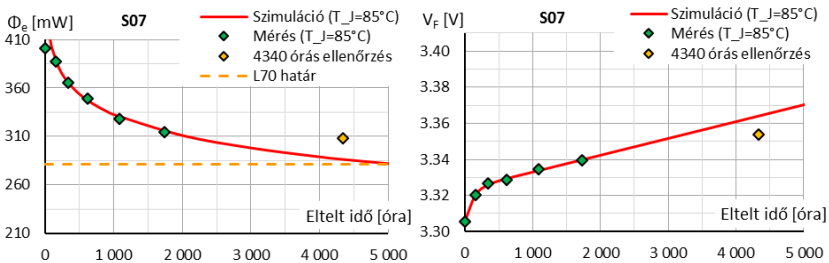
4.4 Az üzemidő függő multi-fizikai LED modell: 2. változat

A megmaradt két LED mintán tovább folytattam az LM-80-08 alapú tesztet, eközben pedig felülvizsgáltam a multi-fizikai modell paramétereinek korábban használt időfüggvényeit. Egy kiterjedt „próba-hiba” („*trial and error*”) jellegű vizsgálat után úgy döntöttem, hogy a modellnek csak azon paramétereit érzékenyítem az üzemidőre, amelyek a szimulációs eredményeket ugyanabba az irányba mozdítják el, a többi paramétert pedig – első közelítésben – konstansnak tekintem. A legnagyobb szimulációs hibát minden esetben a kezdeti beégési szakaszban tapasztaltam, ezért végül *a kezdeti szakaszt kihagytam a modellillesztési eljárásból*, amelynek köszönhetően a multi-fizikai modell jelentősen egyszerűsödött.

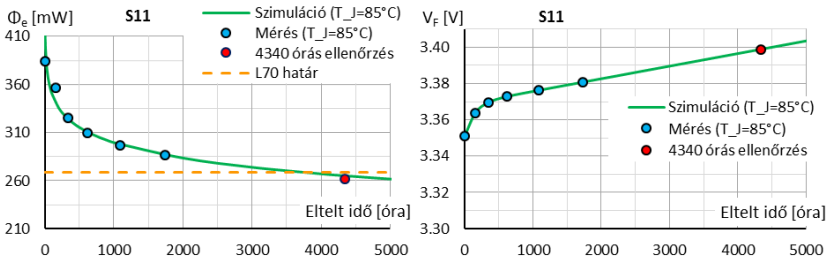
A kezdeti beégetődési szakasz elhagyása után a nyitófeszültség eltolódása egy egyszerű, *az eltelt idővel lineárisan növekvő soros ellenállás segítségével modellezhető*, miközben a *Shockley-féle diódaegyenletben alkalmazott paraméterek* (a szaturációs áram és az idealitási tényező) *állandóak maradnak*. Mindez egyúttal azt

is jelenti, hogy az optikai modellágot tápláló feszültséggenerátor értéke (ami meg- egyezik a belső pn átmeneten eső feszültséggel) nem függ az üzemidőtől, vagyis ily módon a LED elektromos és optikai eltolódása teljesen külön modellezhető. Az LM- 80 értelemben meghatározott fénykibocsátás csökkenésének időfüggvénye közvet- lenül alkalmazható az optikai ág diódájának telítési áramára, miközben annak idealitási tényezője és soros ellenállása állandó marad.

A Seoul 2525 LED-ekre indított LM-80-08 alapú teszt 4340. órájában a tesztbe visszahelyezett S07 és S11 mintákat a tanszéki LED tesztelő állomás segít- ségével újra karakterizáltam. Az ellenőrző mérés során kapott és az előző szakaszban leírt modellek segítségével szimulált sugárzott teljesítmény és nyitófeszültség ered- mények az 4.2. és az 4.3. ábrákon láthatók.



4.2. ábra. Az S07 jelű minta mért és szimulált sugárzott teljesítmény és nyitó- feszültség értékeinek összehasonlítása.



4.3. ábra. Az S11 jelű minta mért és szimulált sugárzott teljesítmény és nyitó- feszültség értékeinek összehasonlítása.

IV. Tézis

A III. tézis szerinti lapka szintű multi-fizikai LED modellt két LED típusra to- vábbfejlesztettem oly módon, hogy az az eltelt üzemidő függvényében alkalmas mó- don leírja a kezdeti beégetődés utáni üzemi csiphőmérséklet, nyitófeszültség és su- gárzott teljesítmény értékeket.

Kapcsolódó publikációk: [J1], [J2], [J4], [C13], [C14]

5 Összefoglalás

A kutatási munkám során a cél egy olyan „Ipar 4.0” szemléletű tervezési megoldás alapjainak kidolgozása volt, amelynek segítségével nem csak a hőmérsékletváltozás, de az üzemidő hatásait kiküszöbölő vezérlés is meghatározható, vagyis a világítótest fényárama akár a teljes élettartam során állandó értéken tartható. Ezáltal csökken a villamosenergia-fogyasztás, a várható élettartam pedig növekszik. Nem utolsósorban javul a lámpa által nyújtott vizuális komfort, hiszen annak fényáramát nem kell 10–30%-kal túltervezni a későbbi fényáram-csökkenés előkompenzálása érdekében.

A hőmérsékletváltozás hatásainak kompenzálására új módszert dolgoztam ki a rendelkezésre álló multi-fizikai LED modell és a hozzá kapcsolódó rendszerszintű szimuláció elméletének felhasználásával. Elkészítettem egy valós közvilágítási világítótest áramkör-szimulációs modelljét. A lámpatest ház CAD modellje alapján készített kompakt termikus modell külső forrásból rendelkezésemre állt, a világítótestbe szerelt LED típus modelljét a saját méréseim alapján állítottam elő. A világítótestcsalád legnagyobb és egy köztes példányának segítségével terepi és laboratóriumi mérésekkel igazoltam az új eljárást a fényáram rövidtávú állandó értéken tartására.

A LED-ek teljes élettartama során tapasztalható fényáramcsökkenés modellezésére először az LM-80-08 és a TM21-11 eljárások segítségével kapható eredményeket használtam fel. Olyan módszert dolgoztam ki a teljes élettartamra vonatkozó fényáramtartás megvalósítására, amelyet a világítótestgyártók kisebb elhanyagolásokkal akár a LED gyártóktól kapott adatlapi értékek alapján is megvalósíthatnak. Az ehhez szükséges kiegészítő áramkörök minimálisak, és szinte bármely „okos”-nak mondott világítótestben megtalálhatóak. Az általam javasolt módszer a hőmérséklet hatásait és a LED-ek öregedését egyaránt kompenzálja. A LED meghajtó áramkörében és a világítótestre szerelt optikai alkatrészekben lezajló változásokkal a munkám során nem foglalkoztam.

A meglévő multi-fizikai LED modell átdolgozásával új modellt készítettem, amely implementálható olyan SPICE alapú áramkör-szimulációs környezetekben is, amelyek közvetlenül nem támogatják az elektro-termikus szimulációk elvégzését. Az átdolgozott LED modell paramétereinek előállítására automatizált alkalmazást készítettem, amelyet a Delpi4LED projektben a modellek tömeges előállítására is felhasználtam.

A rendszerszintű élettartam-szimulációkat is lehetővé tevő LED modell előállítására tovább folytattam a korábbi, LM-80-08 alapú LED öregítést. Mivel ezek eredménye nem tette lehetővé a modell alkalmas előállítását, ezért új tesztorozatot indítottam, amely alapján két üzemidőfüggő multi-fizikai LED modellt is készítettem. Ezek – a munkám során szerzett tapasztalatokkal együtt – jó alapot nyújtanak a további LED típusok élettartam modellezésére.

Tézisekhez szorosan kapcsolódó publikációk

Folyóirat cikkek

- [J1] **Hegedüs J.**, Poppe A., "Közvilágítási lámpatestek karakterizálása multi-domain LED modellekkel – a LED karakterisztikáktól a lámpatest üzemi fénnyáramáig", *ELEKTROTECHNIKA* 110(3-4): 13-20. (2017), <http://www.mee.hu/files/files/et-2017-03-04.pdf#page=13>
- [J2] **J. Hegedüs**, G. Hantos, A. Poppe, "Light output stabilisation of LED based streetlighting luminaires by adaptive current control", *MICROELECTRONICS RELIABILITY*, Vol. 79, pp. 448-456, (2017), DOI: 10.1016/j.microrel.2017.06.060
- [J3] **Hegedüs J.**, "LED-es lámpatestek többlet energia megtakarítási lehetőségei termikus és élettartam szempontokat figyelembe vevő, modell alapú tervezéssel", *ELEKTROTECHNIKA*, 111(6-7-8): 21-26. (2018), <http://www.mee.hu/files/files/et2018-06.pdf#page=21>
- [J4] **J. Hegedüs**, G. Hantos, A. Poppe, " Lifetime Modelling Issues of Power Light Emitting Diodes", *ENERGIES*, 2020, 13(13), 3370, DOI:10.3390/en13133370
- [J5] A. Poppe, G. Farkas, L. Gaál, G. Hantos, **J. Hegedüs**, M. Rencz, "Multi-domain modelling of LEDs for supporting virtual prototyping of luminaires", *ENERGIES*, 2019, 12(10), 1909, DOI:10.3390/en12101909

Könyvrészletként megjelent közlemények

- [B1] P. Horváth, A. Timár, **J. Hegedüs**, A. Szalai, T. Szabó, és A. Poppe, "SmartSSL – okos közvilágítási lámpatest fejlesztése IoT szemlélettel", In: Némethné, Dr. Vidovszky Ágnes; Vass, László; Nagy, János (szerk.) *Világítástechnikai Évkönyv 2016-2017: LED-jen FÉNY!*, 272 p. Budapest: MEE Világítástechnikai Társaság, 2017. pp. 136-143, <https://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCs/Vilagitastechnikai-Evkonyv-2016-2017-SmartSSL.pdf>
- [B2] **J. Hegedüs**, G. Hantos, és A. Poppe, "LED-es lámpatestek modell alapú tervezése", In: Némethné dr. Vidovszky, Ágnes; Poppe, András (szerk.) *Világítástechnikai Évkönyv 2018-2019*, Budapest: MEE Világítástechnikai Társaság, 2019 pp. 83-89, https://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCs/VTT_Evkonyv2018-2019_Hegedus_Hantos_Poppe-modellalap_u_tervezes.pdf

Konferencia közlemények

- [C1] **J. Hegedüs**, A. Poppe, "Simulation of luminaires based on chip level multi-domain modeling of power LEDs", In: *Proc. of the VI. IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries LUMEN V4*, 13-16 September 2016, Karpacz, Poland, pp. 59-64, DOI: 10.1109/LUMENV.2016.7745517
- [C2] **J. Hegedüs**, G. Hantos, A. Poppe, "Embedded Multi-domain LED Model for Adaptive Dimming of Streetlighting Luminaires", In: *Proc. of the 22nd THERMINIC Workshop*, 21-23 September 2016, Budapest, Hungary, pp. 208-212, DOI: 10.1109/THERMINIC.2016.7749053
- [C3] **J. Hegedüs**, P. Horváth, G. Hantos, T. Szabó, A. Szalai, A. Poppe, "A New Dimming Control Scheme of LED Based Streetlighting Luminaires Using an Embedded LED Model Implemented on an IoT Platform to Achieve Constant Luminous Flux at Different Ambient Temperatures", In: *Proc. of Lux Europa 2017 Conference*, 18-20 September 2017, Ljubljana, Slovenia, pp. 87-92, http://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCs/LuxEoropa2017-ID83_Poppe-final_v1.pdf (legutóbbi hozzáférés: 2020. márc. 20.)
- [C4] **J. Hegedüs**, P. Horváth, T. Szabó, A. Szalai, A. Poppe, "A New Dimming Control Scheme of LED Streetlighting Luminaires Based on Multi-Domain Simulation models of LEDs in order to Achieve Constant Luminous Flux at Different Ambient Temperatures", In: *Proc. of the Conference on "Smarter Lighting for Better Life"* at the CIE Midterm Meeting 2017, 2017, pp. 267–276, DOI: 10.25039/x44.2017.OP37
- [C5] A. Poppe, **J. Hegedüs**, A. Szalai, R. Bornoff, J. Dyson, "Creating multi-port thermal network models of LED luminaires for application in system level multi-domain simulation using SPICE-like solvers", In: *Proc. of the 32nd IEEE SEMI-THERM Symp.*, 14-17 March 2016, San Jose, USA, pp. 44-49, DOI: 10.1109/SEMI-THERM.2016.7458444
- [C6] **J. Hegedüs**, G. Hantos, A. Poppe, "Lifetime Iso-flux Control of LED based Light Sources", In: *Proc. of the 23rd THERMINIC Workshop*, 27-29 September 2017, Amsterdam, Netherlands, pp. 181-185, DOI: 10.1109/THERMINIC.2017.8233816
- [C7] A. Poppe, **J. Hegedüs**, A. Szalai, "Multi-domain modeling of power LEDs based on measured isothermal I-V-L characteristics", In: *Proc. of the 2016 CIE Lighting Quality & Energy Efficiency Conference*, 3-5 March 2016, Melbourne, Australia, CIE x042:2016, pp. 318-327, http://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCs/PP23-cie2016-Poppe-et_al_v7.pdf (legutóbbi hozzáférés: 2020. márc. 20.)
- [C8] **J. Hegedüs**, G. Hantos, R. Bornoff, M. Rencz, A. Poppe, "Implementation of a multi-domain LED model and its application for optimized LED luminaire design", In: *Proc. of the 35th SEMI-THERM Symp.*, 18-22 March 2019, San Jose, USA, pp. 12-17

- [C9] G. Hantos, **J. Hegedüs**, "K-factor calibration issues of high power LEDs", In: *Proc. of the 23rd THERMINIC Workshop*, 27-29 September 2017, Amsterdam, Netherlands, pp. 182-187, DOI: 10.1109/THERMINIC.2017.8233798
- [C10] G. Hantos, **J. Hegedüs**, A. Poppe, "Different questions of today's LED thermal testing procedures", In: *Proc. of the 34th IEEE SEMI-THERM Symp.*, 19-23 March 2018, San Jose, USA, pp. 63-70, DOI: 10.1109/SEMI-THERM.2018.8357354
- [C11] G. Hantos, **J. Hegedüs**, M. Bein, L. Gaál, G. Farkas, Z. Sárkány, S. Röss, A. Poppe, M. Rencz, "Measurement issues in LED characterization for Delphi4LED style combined electrical-optical-thermal LED modeling", In: *Proc. of the 19th IEEE Electronics Packaging Technology Conference (EPTC'17)*, Singapore, 6-9 December 2017, DOI:10.1109/EPTC.2017.8277493
- [C12] A. Poppe, M. Rencz, G. Hantos, **J. Hegedüs**, G. Farkas, L. Gaál, "Virtual Prototyping of LED Applications through Multi-Domain Models of LED Packages: The "Industry 4. 0"-Like Approach of the Delphi4LED Project", In: *Proc. of the VII. IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries LUMEN V4*, 18-20 September 2018, Třebíč, Czech Republic, pp. 91-94., doi: 10.1109/LUMENV.2018.8521026
- [C13] **J. Hegedüs**, G. Hantos, A. Poppe, "A step forward in lifetime multi-domain modelling of power LEDs", In: *Proc. of the 29th Session of the CIE*, 2019, pp. 1154-1161, DOI: 10.25039/x46.2019.PO074
- [C14] **J. Hegedüs**, G. Hantos, és A. Poppe, "Reliability Issues of Mid-Power LEDs", In *Proc. of the 25th THERMINIC Workshop*, 25-27 September 2019, Lecco, Italy, pp. 161-167, DOI: 10.1109/THERMINIC.2019.8923802

Tézisekhez szorosan nem kapcsolódó publikációk

- [N1] Poppe A., Szalai A., **Hegedüs J.**, "LED-ek multi-domain szimulációs modelljei és azok gyakorlati vonatkozásai", In: Németh Z., Nagy B. V. (szerk.), *Világítástechnikai Évkönyv 2014-2015: Fények és tények*, 208 p., Budapest: MEE Világítástechnikai Társaság, 2015. pp. 112-121
- [N2] A. Poppe, G. Hantos, **J. Hegedüs**, "Application of the Transient Dual Interface Method in Test Based Modeling of Heat-sinks Aimed at Socketable LED Modules", In: *Proc. of the 31st IEEE SEMI-THERM Symp.*, 15-19 March 2015, San Jose, USA, pp. 261-266, DOI: 10.1109/SEMI-THERM.2015.7100170

- [N3] G. Hantos, **J. Hegedüs**, M. Rencz, A. Poppe, "Aging Tendencies of Power LEDs Under Different Humidity Conditions During Thermal Reliability Testing", In: *Proc. of the 21st THERMINIC Workshop*, 30 September – 2 October 2015, Paris, France, pp. 152-155, doi: 10.1109/THERMINIC.2015.7389624
- [N4] L. Pohl, M. Németh, **J. Hegedüs**, G. Hantos, Zs. Kohári, A. Poppe, "Multi-Domain Modelling and Simulation of White CoB LEDs", In *Proc of the 25th THERMINIC Workshop*, 25-27 September 2019, Lecco, Italy, pp. 151-157, DOI: 10.1109/THERMINIC.2019.8923856
- [N5] M. Németh, Zs. Kohári, **J. Hegedüs**, G. Hantos, L. Pohl, P. Pálovics, A. Poppe, "Transient reduced order thermal model of LEDs with phosphorous layer", In: *Proc. of the Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP'19)*, 12-15 May 2019, Paris, France, pp. 64-69., 6 p., DOI: 10.1109/DTIP.2019.8752937
- [N6] **J. Hegedüs**, G. Hantos, M. Németh, L. Pohl, Zs. Kohári, A. Poppe, "Multi-domain characterization of CoB LEDs", In: *Proc. of the 29th Session of the CIE*, 2019, pp. 387–397, doi: 10.25039/x46.2019.OP53
- [N7] L. Pohl, M. Németh, **J. Hegedüs**, G. Hantos, Z. Kohári, és A. Poppe, "Mixed Detailed and Compact Multi-Domain Modeling to Describe CoB LEDs", *ENERGIES*, 2020, 13(16), 4051, DOI:10.3390/en13164051
- [N8] G. Hantos, **J. Hegedüs**, M. Rencz, A. Poppe, "Aging tendencies of power MOSFETs — A reliability testing method combined with thermal performance monitoring", In: *Proc. of the 22nd THERMINIC Workshop*, 21-23 September 2016, Budapest, Hungary, pp. 220–223, DOI: 876 10.1109/THERMINIC.2016.7749055
- [N9] G. Hantos, **J. Hegedüs**, M. Rencz, "An efficient reliability testing method combined with thermal performance monitoring", *MICROELECTRONICS RELIABILITY*, 78(11), pp. 126-130, 2017, doi: 10.1016/j.microrel.2017.08.011
- [N10] T. Merelle, J.K. Sari, A. Di Bucchianico, G. Onushkin, R. Bornoff, G. Farkas, L. Gaál, G. Hantos, **J. Hegedüs**, A. Poppe, "Does a single LED bin really represent a single LED type?", In *Proc. of the 29th Session of the CIE*, 2019, pp. 1204–1214, DOI: 10.25039/x46.2019.PO102
- [N11] A. Poppe, B. Robin, G. Hantos, **J. Hegedüs**, "Virtual prototyping of LED products across the supply chain speeds development - Part 1", In: *LEDS MAGAZINE* 16 (2019) pp. 21-24.
- [N12] A. Poppe, B. Robin, G. Hantos, **J. Hegedüs**, "Virtual prototyping of LED products across the supply chain speeds development - Part 2", In: *LEDS MAGAZINE* (2019) pp. 14-16.