6. Egy konkrét termékfejlesztés: a növényházi alkalmazásra kifejlesztett termékcsalád

6.1. A növényházi termékcsalád konstrukciós kérdései

A 2.1.2. fejezetben ismertettük a nagyintenzitású kisülőlámpák egy speciális alkalmazásának, a növényházi használatnak a főbb elvárásait. A 2.4. ábrán megmutattuk, hogy ez az alkalmazás az általános világitási célokra kifejlesztett lámpáktól eltérő spektrumot igényel. A növényházak elektromos üzemeltetési szempontjából előnyösebb, ha nem a szokásos egyfázisú, 230V hálózati feszültségről üzemelő, hanem két fázis közé kötött, 400V hálózati feszültségről üzemelő lámpát használnak. Mind az eltérő spektrum, mind pedig az eltérő elektromos üzemeltetési környezet a termék teljesen új konstrukcióját követelik. A fejlesztés alapjául mind fényáramtartási, mind megbízhatósági szempontból a már ismertetett monolit konstrukciót választottuk. A fejezetben összefoglalom a lámpa főbb konstrukciós paramétereit és kapcsolatukat a lámpa néhány kulcsjellemzőjével.

A lámpa égésfeszültsége

Az első jelentős különbséget a megszokott konstrukciókhoz képest a nagyobb hálózati feszültség jelenti. Tipikus szabály szerint elektromágneses előtét esetén a lámpa égésfeszültsége körülbelül fele kell, hogy legyen a hálózatának. A nagyobb hálózati feszültség emiatt legelőször is a lámpa égésfeszültségének megemelkedésével kell, hogy járjon. A lámpa égésfeszültségét (Burning Voltage, BV) a

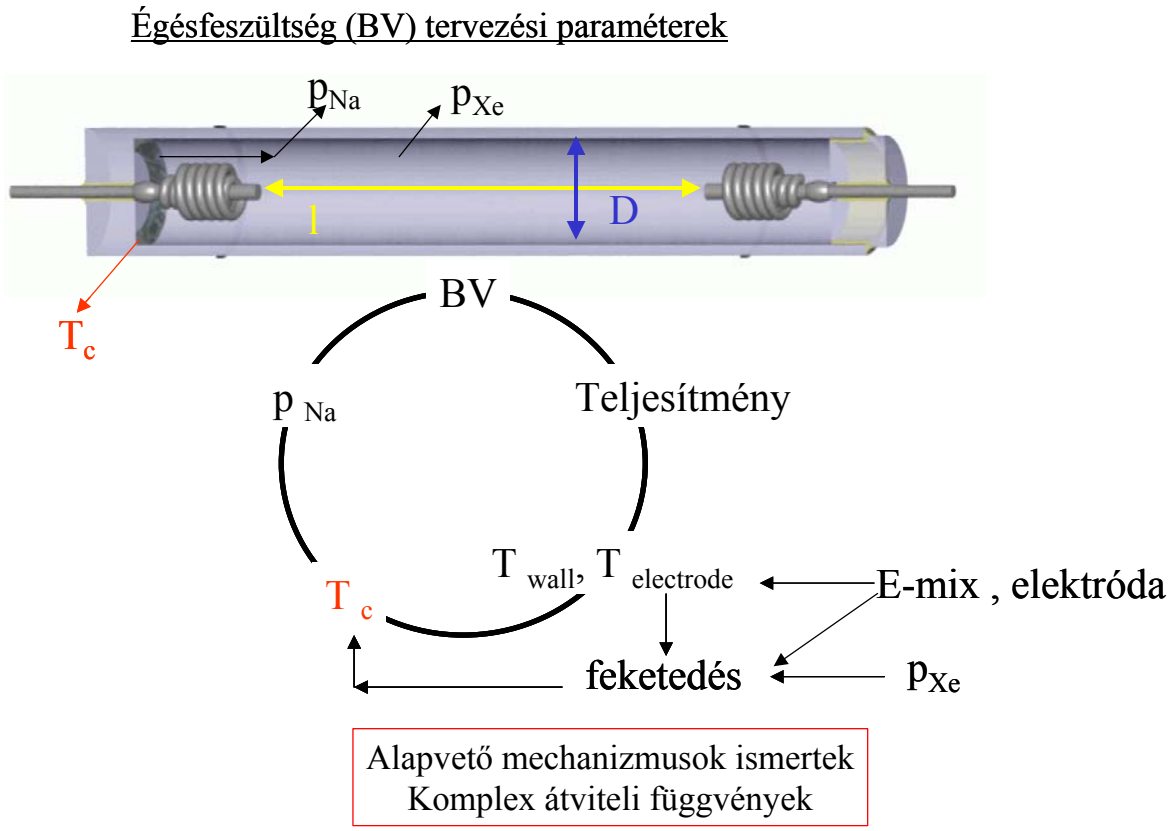
$$BV=E*l+\phi \qquad (6.1)$$

képlet írja le, ahol E az elektromos térerősség, l a lámpa ívhossza (a két elektróda közötti távolság, ahol az ív kialakul), ϕ pedig a katód kilépési munkája. Vevői elvárás volt, hogy a lámpának be kell férnie a jelenleg már használt lámpatestekbe így – mivel az összhosszát növelni nem tudjuk – az ívhossz sem nőhet meg, illetve változhat jelentős

mértékben. A kilépési munka értékét sem tudjuk növelni, hiszen láttuk, hogy ez fényhasznosítás romláshoz vezetne. Marad tehát a térerősség növelése, amit az

$$E=A*D^{-0.38}*p_{Na}^{0.56} \qquad (6.2)$$

formulával írhatunk le, ahol D az égőtest belső átmérője, p_{Na} a nátrium gőznyomása az égőtestben, A pedig konstans. A tervezési paramétereket, és kapcsolatukat az égésfeszültséggel mutatja a 6.1. ábra.



6.1. ábra A lámpa égőtestjének fontosabb paraméterei, és ezek hatása a lámpa égésfeszültségére. A mennyiségek kapcsolatának részletezése a szövegben található.

P_{Na} : a Na gőznyomása

P_{Xe}: a Xe buffergáz gőznyomása

D: az égőtest belső átmérője

l: az égőtest ivhossza

Tc: hidegpont hőmérséklet

Twall: kerámiacső falhőmérséklet

Telectrode: elektróda hőmérséklet

Teljesítmény: a lámpa által felvett elektromos teljesítmény
E-mix: az emissziós anyag fajtája

Induljunk el az égésfeszültségtől (BV) a 6.1. ábrán látható körön. A térerősség (és ezáltal az égésfeszültség) növelésének egyik módja (6.2.) szerint a nátrium gőznyomásának (P_{Na}) növelése. A gőznyomás az adalék (a nátrium-higany amalgám) összetételétől és a lámpa leghidegebb pontjának, az úgynevezett hidegpontnak a hőmérsékletétől függ, melyet az ábra Tc-vel jelöl. Most a hidegpont hatását vizsgáljuk meg. Normális működés közben a lámpa hidegpontján kondenzálódik ki az adalék folyadék fázisú része, e folyadék fázis hőmérséklete határozza meg az egyensúlyi gőznyomást. A monolit konstrukció esetében ez a hidegpont a monolit sarokban van. A hidegpont hőmérsékletét meghatározzák:

- A kerámiacső, illetve elektróda felől érkező a vezetett hő. A lámpába táplált elektromos teljesítmény egy része hővé alakul, a kerámiacső falát melegíti. Az üzemi hőfok(T_{wall}) konstrukciótól függően 1250-1450 K között változik. Az z elektróda hőmérséklete $T_{electrode}$., 2200-2500 K között mozog.
- konvekció az égőtesten belül
- .a kerámiacső (monolit vég) belső felülete által elnyelt hő
- a kerámiacső külső felülete által lesugárzott hő. Ez a falhőmérsékletet befolyásolja az égőtest teljes hosszában.
- az adalék helyváltoztatásából eredő hőmérséklet változás.

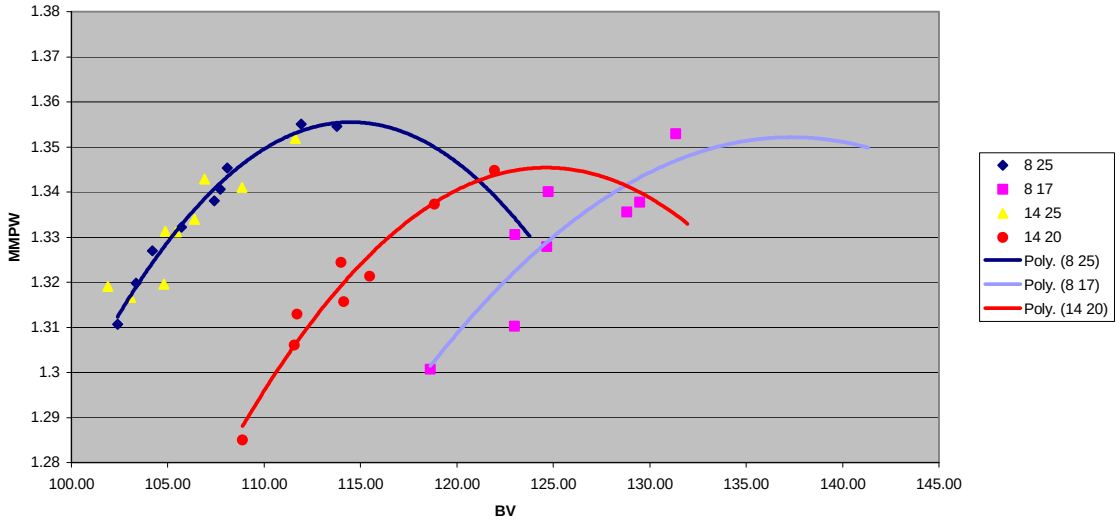
A vezetett hő a kerámiacső, illetve a katód felől érkezik: minél magasabb a fal- és az elektródahőmérséklet, annál magasabb lesz a hidegpont hőmérséklet is. A kerámiacső hőmérsékletét a lámpa által felvett teljesítmény határozza meg: minél nagyobb elektromos teljesítmény érkezik az égőtestbe, annál melegebb lesz a falhőmérséklet is. A lámpa teljesítményfelvételét azonban a lámpa égésfeszültsége határozza meg. Bezárult a 6.1. ábrán látató kör: bár az alapvető mechanizmusok ismertek, a végső eredmény az ismertetett kölcsönhatások miatt nehezen jelezhető előre.

A térerősség növeléséhez a másik lehetőség a kerámia égőtest átmérőjének (D) csökkentése. Ez az égőtest külső felületének csökkenését vonja maga után. Könnyű

belátni, hogy ugyanakkora elektromos betáplált teljesítmény melleti kisebb felület nagyobb falterhelést, azaz nagyobb falhőmérsékletet fog jelenteni. Ez elsődlegesen szintén hatással van az égésfeszültségre, de mind fénytartásbeli, mind pedig élettartambeli problémákhoz is vezethet. A nagyobb falhőmérsékleten megnő a kisülésből a Na diffúziója, amint arra a 2. fejezetben utaltunk (Lovass xxx). Ennek a kockázatnak a mérséklésére volt kritikus feltárni a Na kerámiacsőbeli diffúziós tulajdonságait. A geometria paramétereket tehát a kerámia maximális üzemi hőmérséklete szabja meg. A falhőmérséklet növekedését némileg ellensúlyozni lehet az égőtest falvastagságának a növelésével. Ekkor egyfelől nagyobb az égőtest hősugárzó külső felülete, másfelől pedig a vastagabb fal megnöveli az égőtest hidegebb végei felé történő hőtranszportot. Bár az égőtest kerámiacsöve áttettsző, mégis könnyű belátni, hogy a megnövekedett falvastagság megnövekedett fényelnyeléshez is vezet. A falvastagság növelésének tehát a fényhasznosítás csökkenése szab határt.

A lámpa spektruma

A lámpa PAR értékét a lámpa spektrális eloszlása szabja meg. A nátrium gőznyomásának változtatása közvetlenül magára a lámpa spektrumára is hatással van. A lámpa jellegzetes aranysárga színét ugyanis a nátrium 589 nm-es D-vonala adja. Ennek természetes vonalszélessége mindössze 0.025 nm volna. A körülbelül 4000 K-es ívet körülveszi azonban egy körülbelül 3000 K hőmérsékletű köpeny, ami szintén tartalmaz Na atomokat. Ezek az atomok rezonancia adszorpció révén elnyelik az ívben keletkezett fotonokat, ezáltal gerjesztődnek, majd újra emittálnak. Tulajdonképpen az ív fényét átbocsájtjuk egy olyan rezonancia szűrőn, aminek középpontja egybeesik az ív sugárzásával. Ezzel és a köpeny sugárzásával alakul ki a 2.2. ábrán bemutatott, kiszélesedett nátriumlámpa spektrum, ahol a két ‘csúcs’ közötti távolság, szaknyelven szólva D-vonal kiszélesedés mértéke a 10 nm-es nagyságrendbe esik. A nagyobb nátrium gőznyomás nagyobb rezonancia adszorpciót, azaz jobban kiszélesedett spektrumot is jelent. Az adalék higanytartalma szintén hatással van a lámpa spektrumára. Ezen a ponton célszerű megvizsgálni, hogyan hat az adalékösszetétel a lámpa égésfeszültségére és a spektrumából számított PAR értékre.



6.2. ábra. Az adalékmennyiség és összetétel változtatásának eredménye: a fényhasznosítás (PAR/W, illetve más elnevezéssel micromol/W egy adott fotoszintézis hatásgörbe szerinti súlyozás esetében) az égésfeszültség függvényében néhány kísérleti adalékösszetétel esetében

Az adalék összetételétől való égésfeszültség és PAR érték változást mutatja be a 6.2. ábra egy 230 V-os konstrukcióban végzett kísérlet esetében. Az égőtest geometriai paraméterei azonosak voltak, mindössze az adalék Na-Hg arányát és összetételét változtattuk. Az ábrán három parabola-szerű görbe látható, ami a fényáram változását mutatja a lámpa égésfeszültségének függvényében. Látható, hogyan tolódik el az a görbe a különböző amalgámöszetételek esetén a nagyobb égésfeszültségek irányába. Az adalékösszetételt pedig épp eszerint határozzuk meg: a kívánt égésfeszültségnél a legnagyobb PAR értéket nyújtsa.

A fenti görbéken mozogni egy adott amalgámösszetétel esetében a hidegpont hőmérsékletének változtatásával lehet. A hidegpont hőmérsékletének emelésével a nagyobb égésfeszültség értékek felé mozdulunk el. Amennyiben viszont a hidegpont hőmérsékletét megemeljük, akkor – különösen, ha tekintetbe vesszük a kisebb égőtest átmérőt – meg fog emelkedni a beforrasztás hőmérséklete is. Emiatt, hogy a monolit konstrukció esetében megakadályozzuk az adalék meleg oldalra történő kondenzálódását, a meleg oldali beforrasztás hőmérsékletét is meg kell emelnünk. Ez viszont a megbízhatóság szempontjából kritikus, a konstrukció tervezésénél a megbízhatóság erre

vonatkozó részét is figyelembe kell venni, illetve a beforrasztási művelet, a beforrasztásban fellépő feszültségeket eszerint kell optimalizálni.

A lámpa égésfeszültségének emelkedése a tartóségetés során

Sajnos a lámpa égésfeszültsége nem állandó a használat során, hanem folyamatos emelkedést mutat. A lámpa kezdeti égésfeszültség értékének beállítását ezért valójában úgy kell elvégezni, hogy a kívánt égésfeszültségnél az adott adalékhoz tartozó maximum érték előtt legyünk adott értékkel. Ha ugyanis kezdetben éppen a görbe maximumán helyezkedik el a lámpa, akkor az égésfeszültség emelkedése miatt egyre inkább a görbe lefelé hajló ágán haladva egyre kisebb és kisebb fényáramot kapnánk a használat során. Ez elfogadhatatlan az alkalmazásban, hiszen a növénytermesztő adott, állandó, tervezhető fényáramsűrűséget akar a lámpa használata során. Mindenképp kívánalom tehát a lámpa égésfeszültség emelkedésének a visszaszorítása.

A lámpa égéafeszültség emelkedésének okait szintén a 6.1. ábrán bemutatott égésfeszültség kör alapján érthetjük meg. Az egyik fő ok a lámpa hidegponti hőmérsékletének az emelkedése. Ennek oka, mint az 5. fejezetben utaltunk rá, a lámpa végének feketedése. Ezt, mint megállapítottuk, az elektróda anyagának és a rajta lévő emissziós anyagnak a porlódása és párolgása okozza. A másik ok az adalékösszetétel változása: a különböző nátriumveszteségi folyamatok miatt az adalék összetétele változik, ez okozza az égésfeszültség emelkedését.

Az elektródák

Az égőtest kisebb belső átmérője, valamint a megváltozott elektromos áram szükségessé teszi a katódok áttervezését is. A kisebb belső átmérő kisebb méretű katódot igényel, de nem szabad a hőmérsékletét túlságosan megemelni, hiszen ekkor a megnövekett párolgás a fent említett fényáramtartási, sőt akár megbízhatósági problémákhoz is vezethetne. Az elektróda felől érkező, az ívből származó teljesítmény ugyancsak hatással van a hidegpont hőmérsklétére, kritikus tehát az elektróda rendszer,

beleértve mind az emissziós anyag fajtáját és tulajdonságait, mind pedig az elektróda jellemzőit. A katód tervezésekor a katódon mért hőmérséklet gradienst is figyelembe kell venni, ennek nem megfelelő volta szintén feketedési problémákhoz vezet.

Az égőtest geometriája

Mint említettük, az égőtest geometriáját a termikus tulajdonságok szabják meg. Megválasztásakor biztosítani kell a magas kezdeti fényáram, ennek minél kisebb csökkenése a tartóségetés során, illetve a meghibásodások számának lehető legalacsonyabb értéken történő tartását.

6.2. A termékfejlesztési metodika és termékvalidálás

Az optimalizálás e hármas, egymásnak ellnetmondó és kompromisszumokkal teli követelményrendszerben rendkívül nehéz feladat.A termékfejlesztés során a Six Sigma (Hat Szigma) metodika segíti a fejlesztők munkáját. A módszer neve a statisztikai szórásszámításra és valamely kulcsparaméter kívánt középérte körüli tartományban elhelyezkedő mintaszámra utal. A módszer statisztikai elemzéseken alapul, de jóval több annál: olyan komplex módszertan, ami a vevőkhöz kerülő termékek minmális számú meghibásodását biztosítja a lámpa tervezett élettartama során. Már a tervezés korai fázisában számba vesszük az összes lehetséges meghibásodási módot, és a termékbe kerülő alapanyagokat, a termék tervezési paramétereit (geometriai méretek, adalékmennyiség stb) valamint a gyártási folyamatokat is olyan módon tervezzük, hogy a fényforrás az alapanyagok vagy a gyártófolyamat hosszú távú szórása mellett is maximum a kívánt számú meghibásodást mutassa majd. A tervezés és a metodika alapvető eleme a kisérletezés. Megfelelően tervezett kísérletek sorozatával meghatározható a fent említett tervezési paraméterek és a termék kulcs jellemzői közötti kapcsolat, az úgynevezett átmeneti függvény. Ezeknek a függvényeknek segítségével elvégezhető az optimalizálás, azaz a tervezési paraméterek olyan kombinációja, amelyek a legmegfelelőbben teljesítik a termékkel szembeni elvárásokat. Az optimalizálás során nem elég azonban a kívánt kulcs jellemző maximális értékét nyújtó tervezési

paraméterbeállításokat meghatározni. Az átmeneti függvények tájékoztatás nyújtanak arról is, hogy egy adott tervezési paraméter elrendezés mellett milyen lesz a kulcs paraméter szórása (figyelembe véve a tervezési paraméterek szórását). Ennek segítségével meghatározhatjuk, hogy milyen tűréstartományba kell essenek a tervezési paraméterek, hogy a kulcs jellemző végül az általunk kívánt szórással rendelkezzék. Előfordulhat, hogy ez nem lehetséges (például a gyártási folyamat nem teszi lehetővé a lámpába adalékolt adalékmennyiség adott pontosságának adott szint fölött tartását). Ekkor olyan tervezési paraméter értékeket választunk, amik ugyan némileg kisebb fényáramot fognak szolgáltatni, de azt jóval kisebb szórással. Így érhető el az egyenletes minőség és a minimális számú meghibásodás.

Természetesen igazolnunk kell, hogy az átmeneti függvények alapján meghatározott tervezési paraméterek csakugyan a kívánt eredményt szolgáltatják. Ez a termékvalidálás fázisa. A legfontosabb validálás fényforrások esetében a lámpa kezdeti értékeinek meghatározása és a tartóségetés. Utóbbi a fény- és színtartásra, valamint a meghibásodások számára, azaz az élettartamra is választ ad. Nagyintenzitású kisülőlámpák esetében, ahol az élettartam akár több tízezer óra is lehet, különösen fontos, hogy megfelelő módszereket dolgozzunk a névleges élettartam és a használat során bekövetkező meghibásodási ráta meghatározására. Ez utóbbi különösen fontos az optimális cserestratégia meghatározásához. Szerencsére több módszer is rendelkezésünkre áll:

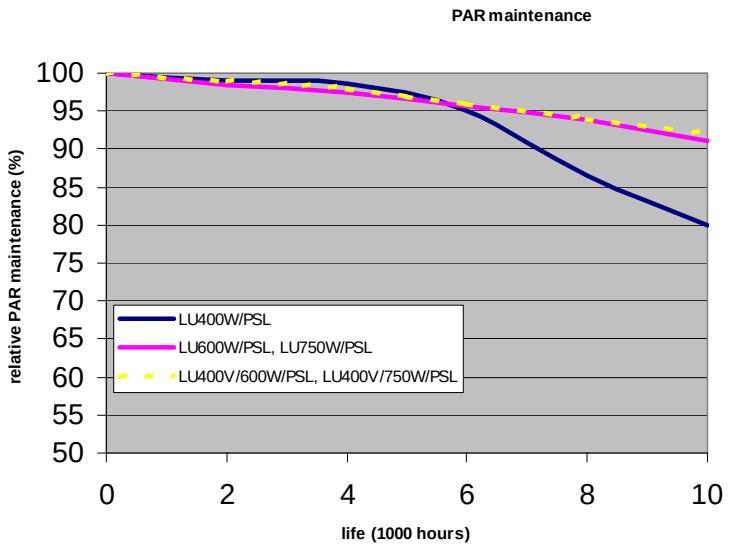
- Statisztikai módszerek: A lámpák meghibásodásának időbeli függvénye valamilyen statisztikai eloszlást követ. Elegendő számú meghibásodás esetén a különböző hibaokok miatt bekövetkező meghibásodások szétválaszthatóak, a statisztikai eloszlások paraméterei meghatározhatóak. Ezen statisztikai paraméterek ismeretében egy új teszt esetén már igen kisszámú meghibásodás esetében is jó becslés végezhető a lámpák túlélési görbéjére. A leggyakoribb alkalmazott statisztika a Weibull eloszlás.
- Gyorsított élettartam vizsgálatok: egy-egy adott komponens meghibásodásának vizsgálatához lehetőség van az adott komponens túlterhelésére. Ekkor azonban különösös gondot kell fordítani a túlterhelt

élettartam és a valós körülmények melletti élettartam korrelációjának vizsgálatára is.

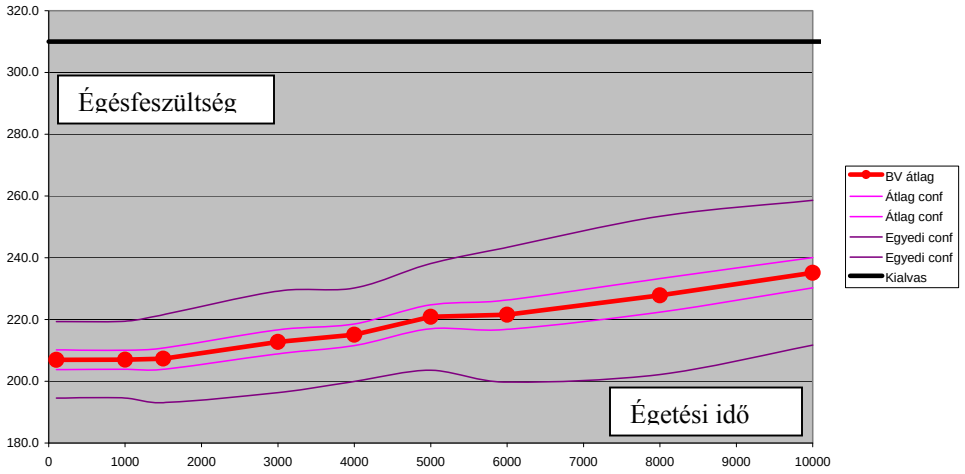
6.3. A PSL lámpacsalád

Az imént elmondottak, főként a különböző konstrukciós pontok hőmérsékleteinek hatása különönösen érvényesek a nagyobb, 750W-os konstrukcióra. A minél nagyobb hasznos fotonfluxus elérése érdekében ugyanis mind 230V-os, mind pedig 400V-os hálózati feszültségű konstrukcióban egy 750 W névleges teljesítményű nagynyomású nátriumlámpát fejlesztettünk ki. Ezzel a termékkel egyedül a General Electric cég van a piacon. A lámpa a korábban bevezetett emelt fényáramú, XO (eXtra Output) tipusjelű család legnagyobb teljesítményű tagja, mind 230V-os, mind pedig 400V-os hálózati feszültségű konstrukcióban. A lámpa paramétereit úgy választottuk meg, hogy a nagy kezdeti fényáram stabil fénytartással és kedvező üzemeltetési költséggel (PAR/W) párosuljon. Az XO család többi tagjához hasonlóan a 750 W –os típus esetében is a monolit égőtest konstrukció, az adalékolt kerámia égőtest, a szinterelt gyújtásrásegítő és a nem párologtatott getter biztosítja a hosszú élettartamot és a kiváló fényáramtartást (Toth 2002-2004). A lámpacsalád tipikus fényáramtartási és égésfeszültség stabilitási görbéit mutatja a 6.3. és a 6.4. ábra. A lámpa fénytartása kiváló, elektromos paraméterei rendkívül stabilak..

A fent leírt optimalizálás eredményeképp egy teljes növényházi felhasználásra optimalizált lámpacsaládot fejlesztettünk ki és vezettünk piacra. A lámpacsalád elnevezése PSL, Photosinthesys Light, azaz Fotoszintézis fény. A lámpacsalád 230V –os konstrukcióban 400, 600 és 750W-os, míg 400V-os hálózati feszültségű könstrukcióban 600 és 750 W-os teljesítményekben érhető el. A lámpacsalád igen jó fogadtatást kapott a piacon. A lámpacsalád teljes leírása, a termékek fényáramtartását és megbízhatóságát bemutató brossúra a Függelékben található. A brossúra tartalmaz további részleteket a növényházi világítás egyéb aspektusairól is. A lámpatestgyártók részére bővebb adatokat tartalmazó katalógus (GE2005OEM)-ben található meg. Egy tipikus lámpatestet tartalmazó, a 400V lámpacsaládot vevői szemmel (Gavita) bemutató adatlapot szintén a függelékben helyeztem el.



6.3. ábra. A PSL lámpacsalád fényáramtartási görbéi tipikus növényházi használat során



6.4. ábra. LU400V/600W/PSL lámpa égésfeszültség emelkedése a tartóségetés során. Az átlag mellett feltüntettem az átlagra, illetve az egyedi értékekre vonatkozó 95% konfidencia intervallumokat. Az ábra szintén mutatja a kialvási feszültség értékét (310 V). Amikor a lámpa égésfeszültsége eléri ezt az értéket, kialszik. Látható, hogy a tipikus növényházi használatot jelentő 10000 órás használat során minimális valószínűséggel fog ilyen okból meghibásodni a lámpa.