

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

**FAKULTA MECHATRONIKY, INFORMATIKY
A MEZIOBOROVÝCH STUDIÍ**

ÚSTAV MECHATRONIKY A TECHNICKÉ INFORMATIKY

**ANALÝZA STARTŮ ZÁŘIVKOVÉHO
OSVĚTLENÍ S ELEKTROMAGNETICKÝM
PŘEDŘADNÍKEM**

**ANALYSIS OF LAMP STARTS FOR LUMINARIES
WITH ELECTROMAGNETIC BALLAST**

AUTOREFERÁT K DISERTAČNÍ PRÁCI

ING. ŠOLCOVÁ VERONIKA

LIBEREC, 2010

Téma práce: Analýza startů zářivkového osvětlení s elektromagnetickým předřadníkem

Autor: Ing. Šolcová Veronika

Studijní program: 2612V Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612V045 Technická kybernetika

Pracoviště: Katedra elektrotechniky a elektromechanických systémů
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Technická Univerzita v Liberci

Školitel: Ing. Miroslav Novák, Ph.D.

S disertační prací je možno se seznámit na děkanátu FM TU v Liberci,
Hálkova ulice č.2, budova A, tel.: 485 353 110

Abstrakt

Disertační práce se zabývá problematikou životnosti světelných zdrojů, konkrétně životností zářivkového osvětlení, které je z ekonomických důvodů prioritní volbou v mnoha oblastech použití a v současné době tak tvoří asi 78 % umělého světla po celém světě. Životnost světelných zdrojů je zároveň jednou ze základních hledisek moderních osvětlovacích systémů.

Protože je životnost zářivky rozhodujícím způsobem ovlivněna podmínkami, za kterých zářivka startuje, tzn., že je závislá na životnosti všech komponentů, ze kterých sestává, a které jsou ovlivňovány různými činiteli při jejím startu a provozu, je práce konkrétně zaměřena na stavový popis startování/provozu zářivkového tělesa.

V první fázi jsou prezentovány náhradní obvody jednotlivých stavů svítidla s elektromagnetickým předřadníkem během startu: bez napájení, ohřev startéru, žhavení vláken, svícení. Uvedeny jsou výsledky výpočtů komplexních impedancí, které jednotlivé stavy definují.

Následovalo opakované měření startů na souboru dvanácti zářivkových svítidel. Měřenými veličinami byla napětí na tělese, napětí na zářivce, napětí na startéru, dále pak proud tělesa, proud zářivky a světelný tok. Měření byla prováděna na modelu osvětlovací sítě na Ústavu mechatroniky a technické informatiky multikanálovým přístrojem EMU-2 se vzorkovací frekvencí 12,8 kHz.

V druhé fázi byl vytvořen skript v jazyce MATLAB pracující se zaznamenanými oscilogramy z rozběhu zářivkového svítidla, který automaticky vyhledává jednotlivé stavy a detekuje přechody mezi nimi. Podmínky pro detekci stavů byly zobecněny tak, aby program mohl bezchybně pracovat jak s obvody s paralelní kompenzací účinníku, tak i kompenzací sériovou (resp. DUO). Program zároveň využívá signály z čidel světelného toku. Výstupem programu jsou doby trvání jednotlivých stavů a četnosti přechodů mezi nimi, dále celková doba a energie žhavení, odpor vláken na konci žhavení a celková energie ohřevu startéru. Uvedené hodnoty jsou určovány jak pro zářivku se standardním osazením elektromagnetickým předřadníkem, tak i s předřadníkem elektronickým.

Výsledkem práce je souhrnná analýza stavových diagramů a histogramů četností dob trvání jednotlivých stavů v závislosti na napájecím napětí zářivkových těles obou kompenzací.

Abstract

The dissertation thesis deals with lifetime problems of luminaries, concretely with lifetime of fluorescent lamps, which are the foreground selection in many application field due to the economic aspect and there are make about 78 % of candlelight all over the world today. The lifetime of luminaries is also one of the basic aspects for modern lighting systems.

Because, the lifetime of fluorescent lamp is decisively affected by the start lamp conditions, it means it depends on the lifetime of all components of fluorescent lamp, which are affected by various factors on the fluorescent lamp start and function, is the thesis concretely aimed at the state description of fluorescent lamp start/function.

In the first part are presented the substitution circuits of individual states for lamp with the electromagnetic gear in process of start: no supply, starter rating, filaments glowing and lightening. There are the results of complex impedance computations mentioned, which define these individual states.

It followed the start remeasurement of the twelve fluorescent lamps file. The measured values were illuminator voltage, lamp voltage, start voltage, next illuminator current, lamp current and luminous flux. The measurements were realized on lighting main model on Institute of Mechatronics and Computer Engineering and were performed by the multi-channel device EMU-2 with sampling frequency of 12,8 kHz.

In the second part was created the MATLAB script. The script works with recorded oscillograms from fluorescent lamp start, and it automatically retrieves the individual states and detects the transitions between them. The conditions for state detection were generalized so the program could perfectly work both with parallel compensation circuits and with series or DUO compensation circuits. The program exploits the luminous flux sensor signals too. Program output are individual states time and transitions frequency between them, next heating total time and heating energy, filaments resistance at the end of heating and total energy of starter heating.

These mentioned values are determined both for fluorescent lamp with the standard electromagnetic gear and with the electronic gear.

The gain of the dissertation thesis is the overall analysis of the state diagrams and frequency histograms of individual states time in dependence on supply voltage of fluorescent lamps of both compensations.

OBSAH

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | ÚVOD | 11 |
| 1.1 | SOUČASNÝ STAV VE VÝZKUMU ZÁŘIVKOVÉHO OSVĚTLENÍ | 12 |
| 1.2 | CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE | 12 |
| 2 | PRVKY ZÁŘIVKOVÉHO TĚLESA | 14 |
| 2.1 | PŘEDŘADNÍK | 14 |
| 2.2 | VÝBOJOVÁ TRUBICE A FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ JEJÍ ŽIVOTNOST | 16 |
| 3 | NÁHRADNÍ OBVODY PRO STAVY STARTU | 18 |
| 3.1 | VÝSLEDNÉ IMPEDANCE NÁHRADNÍCH OBVODŮ V JEDNOTLIVÝCH STAVECH | 19 |
| 4 | MĚŘENÍ STARTŮ ZÁŘIVKOVÉHO TĚLESA | 20 |
| 4.1 | SKRIPT V JAZYCE MATLAB | 22 |
| 4.2 | STAVOVÝ DIAGRAM STARTU ZÁŘIVKOVÉHO SVÍTIDLA | 23 |
| 4.3 | ČETNOSTI PŘECHODŮ MEZI JEDNOTLIVÝMI STAVY | 25 |
| 4.4 | HISTOGRAMY DOB TRVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH STAVŮ | 28 |
| 4.4.1 | <i>Ohřev startéru</i> | 28 |
| 4.4.2 | <i>Žhavení</i> | 30 |
| 4.4.3 | <i>Svícení</i> | 32 |
| 4.4.4 | <i>Celková doba trvání startu zářivky</i> | 33 |
| 5 | ZÁVĚR | 36 |
| 6 | CITOVANÁ LITERATURA | 38 |
| 7 | VLASTNÍ PUBLIKACE | 40 |

1 Úvod

Umělé světelné zdroje doplňují přirozené sluneční světlo a pomáhají vytvářet světelné podmínky v různých obytných i venkovních prostorách. Světlo motivuje člověka k práci, vyvolává slavnostní náladu, pocit bezpečí nebo naopak utlumuje pracovní výkonnost a uspává. Dobré osvětlení je tedy pro každého z nás životně důležité. Správný návrh osvětlení a výběr světelného zdroje je mezioborová disciplína vyžadující často složité kompromisy.

Umělé osvětlení přitom celosvětově spotřebovává 2 000 TWh elektrické energie ročně, což činí 10÷15 % celosvětové produkce [Ric03]. Důsledkem je roční produkce jednoho bilionu tun CO₂ a produkce 40 000 tun odpadu kontaminovaného rtuťí. Každodenně na světě svítí 30 biliónů světelných zdrojů a ročně se vyrobí 10 biliónů nových zdrojů za téměř 50 miliard eur [ČTK10].

Výbojové zdroje světla celosvětově generují cca 78 % umělého světla, ale jejich podíl na spotřebované energii pro osvětlování činí pouze 17 % [Ric03]. Zářivky –nízkořákové rtuťové výbojky jsou prioritní volbou v mnoha oblastech použití, protože se vyznačují vysokým měrným výkonem přibližně 100 lm/W a nízkou spotřebou elektrické energie. Příkladem použití jsou rozsáhlé osvětlovací soustavy veřejných interiérů typu administrativních budov, obchodních center, divadel, škol, továren, ale také pouliční, dopravní a nouzové osvětlení. Zavedení kompaktní verze vedlo k masovému využití zářivek v domácnostech. Jinak řečeno, zářivka je doposud nejekonomičtějším, nejrozšířenějším a v podstatě nejúčinnějším zdrojem bílého světla s nízkými pořizovacími náklady.

V porovnání se žárovkou spotřebovává zářivka přibližně pětinu elektrické energie. Také z hlediska životnosti jsou zářivky vynikající alternativou, protože průměrná životnost zářivky se pohybuje okolo 20 000 hodin ve srovnání s životností žárovky, která je přibližně 1 000 hodin. Dalšími výhodami jsou jednoduchost a možnost ovlivňovat barevné podání světla prostřednictvím použitého luminoforu. Běžně jsou používány zářivky s barvou odpovídající dennímu světlu, kterého nelze dosáhnout u žárovek, protože by se roztavilo jejich wolframové vlákno.

Zářivky jsou ekologické zdroje. Při hodnocení dopadu na životní prostředí se projevuje dlouhá doba života s nízkou spotřebou, která převažuje nad dopady při výrobě [Wha02]. Kromě toho se dají recyklovat. Více než 90 % hmotnosti zářivek lze znovu použít při výrobě nových světelných zdrojů. Zbývajících 10 % hmotnosti může najít využití při výrobě jiných produktů [Lin08].

V současné době patří zářivky stále mezi prioritní světelné zdroje s vysokou účinností, rovnoměrným osvětlením a dlouhou dobou života. V budoucnu zřejmě dojde k postupnému ústupu zářivek směrem k LED diodám. LED diody nepodléhají výkonovému omezení Planckova zákona 683 lm/W jako teplotní a výbojové zdroje a předpokládá se, že ho výrazně překonají. Již dnes nejmodernější komerční LED s bílým světlem přesahují účinnost 100 lm/W [LED10]. V roce 2009 tvořil příjem z prodeje LED diod u firmy Philips 6÷8 % z celkového prodeje světelných zdrojů [ČTK10]. Započítáme-li průměrnou cenu LED zdroje s nízkou teplotou chromatičnosti 46 \$ na 1000 lm oproti nákladům na žárovku stejného světelného toku 0,26 \$, je ovšem prodaný objem LED zdrojů zlomkem v řádu jednotek promile celkového počtu prodaných zdrojů.

Zářivky jsou masově využívány od konce 40. let minulého století a jejich technologie je zvládnuta na velmi vysoké úrovni. Díky jejich obrovskému nasazení jsou stále v centru zájmu vědců a vývojářů. Mnoho současných článků popisuje různá technologická vylepšení.

1.1 Současný stav ve výzkumu zářivkového osvětlení

V centru zájmu stále stojí snaha o prodloužení doby života zářivek. Nejvíce pozornosti budí termoemísni vrstva katod. Dřívější práce se zabývaly její optimální tloušťkou a složením. Současné články se soustřeďují na optimální tepelné poměry katod při startech [JiY99], [JiY95], [Ham97], [Wak06], [Bus09], [Tla10] a při stmívání [Res03], [Tet01], které výrazně ovlivňují dobu života zářivky. Řeší se optimální nažhavení během teplého startu [Dor02], zkrácení života při studených startech [Tet97], [Bie02] a optimalizace startu při současném stmívání [Gou02]. Druhým aktuálním tématem je optimalizace dávkování rtuti do trubice [Cor08]. Z ekologických důvodů je snahou přiblížit se fyzikálnímu minimu. Problémem je přesné dávkování při výrobě a pokles obsahu rtuti díky reakci s drážky elektrod a s vrstvou luminoforu.

Dalším klíčovým úkolem je zvyšování účinnosti. Zde hraje klíčovou roli opět katodový úbytek a kvalita termoemísni vrstvy. Z provozně technických důvodů je ovšem nutné nastolit takové standardy, aby zářivkové trubice mohly pracovat s různými předřadníky při zachování hlavních parametrů. Všechny komponenty osvětlovacího tělesa proto podléhají standardizaci. Aktuální vývoj v oblasti osvětlování zářivkami dokládají i nově revidované normy [IEC60081]. Velký potenciál skýtá nízká účinnost luminoforu <50 %. Slibný se jeví vývoj tzv. dvoukvantových luminoforů, kde jeden UV foton s vysokou energií excituje soli vzácných zemin Ytterbia a Erbina, a ty následně vyzáří dva fotony ve viditelné oblasti [Mah99]. Jiným řešením nízké účinnosti luminoforu je přímé generování světla ve viditelné oblasti pomocí vysoce těkavých molekul [Wha02]. Z posledního desetiletí můžeme vybrat ještě úpravu geometrie trubice kompaktních zářivek, kde nový tvar snižuje ztráty vzájemným stíněním částí trubice.

Podporu výzkumným oblastem přináší dnes neodmyslitelná oblast počítačového modelování výboje [Ach90], [Car98], [Mad92], [Kop07], nebo jen chování elektrod trubice [Wak07b], či celých obvodů svítidla [Hsi98], [Wak06]. Nejnovějším trendem jsou fyzikální modely výboje schopné simulovat i dynamické děje [Zis03].

Samozřejmý je výzkum v oblasti napájení zářivek vyššími frekvencemi prostřednictvím elektronických předřadníků. Řeší se jednak ovlivnění účinnosti a parametrů trubice v závislosti na předžhavení elektrod [Wak07a], tak i samozřejmě konstrukce předřadníků [Mad96], [Sha06]. Největších úspor, až 75 %, dosahují elektronické stmívatelné předřadníky vybavené senzory okolního osvětlení [Tam03], [Kli03]. Důležitým aspektem při stmívání je ovlivnění doby života zářivky přímo související s optimalizací teploty katod během celého provozu.

Podíl elektronických předřadníků na trhu mírně přesahuje 50 % [Amp08]. Elektronické předřadníky jsou, a vždy budou, díky vyšší složitosti mírně dražší. Přestože dosahují vyšší účinnosti a lze snadno spočítat ekonomickou návratnost takové investice, dává řada investorů stále přednost předřadníkům elektromagnetickým. Důvodem mohou být ovšem další rozdílné vlastnosti. Elektromagnetický předřadník je robustnější – lépe odolává přepětím v napájecí síti i vyšším teplotám v osvětlovacích tělesech a má proto vyšší spolehlivost i dobu života.

1.2 Cíl disertační práce

Práce je zaměřena na měření a detailní analýzu startů zářivkových svítidel s elektromagnetickým předřadníkem. Zapálení výboje je komplikovaný proces, kterého se aktivně účastní všechny komponenty svítidla. To skýtá jedinečnou možnost pro jejich posuzování a diagnostiku. Zároveň, start

zásadním způsobem ovlivňuje dobu života zářivky. Lze očekávat, že studium poměrů při startu přinese doporučení, která zapojení jsou vhodnější. Vzhledem ke stále masovému nasazení zářivkového osvětlení s elektromagnetickými předřadníky očekáváme přímé ekonomické důsledky. Pro porovnání budou provedena měření i na elektronickém předřadníku.

Teoretický rozbor si klade za cíl popsat všechny části svítidla s ohledem na jejich účast při startu zářivky. Popis se zaměří na aspekty ovlivňující dobu života jednotlivých komponent a mechanismy vzniku jejich poruch.

V experimentální části budou opakovaně měřeny starty zářivkových svítidel, a to ve dvou základních zapojeních používaných v evropském regionu, tj. s paralelní kompenzací účiníku a v tzv. duo zapojení – čili se sériovou kompenzací účiníku. Dle [Div08] se v České republice využívá především kompenzace paralelní, naopak v některých zemích, například Beneluxu, se z normativních důvodů uplatňuje kompenzace sériová.

Měření bude prostřednictvím měřicí ústředny zaznamenáno ve formě vícekanálových oscilogramů, které se následně zpracují off-line na počítači. Realizace měření proběhne opakovaně se dvěma typy výběrových souborů: a) jedna trubice, b) sada více trubic. Tento systém měření umožní sledovat vzájemné rozdíly parametrů komponent svítidel mezi sebou a zároveň určit na jedné z trubic hodnoty přesně.

Vyhodnocení se zaměří na rozdíly startů s DUO versus s paralelní kompenzací účiníku. Dále bude studován vliv typu tlumivky na proces startu. K dispozici jsou tlumivky s energetickou třídou C, které podle evropské směrnice 2000/55/EC nemohou být od roku 2005 montovány do nových instalací [EU05], a tlumivky s nízkými ztrátami v energetické třídě B.

2 Prvky zářivkového tělesa

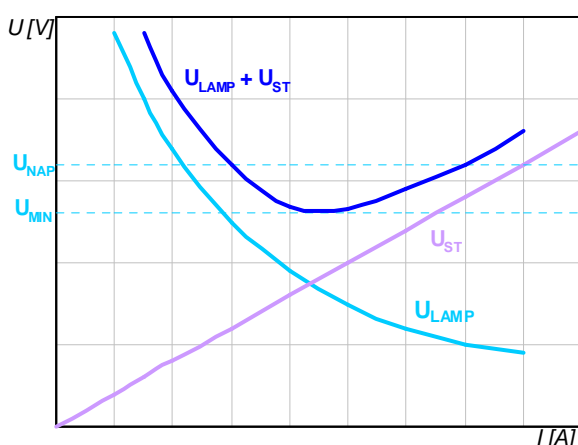
Nejzákladnějšími komponenty zářivkového tělesa jsou předřadník (startér a stabilizační prvek), výbojová trubice a kompenzační kondenzátor.

2.1 Předřadník

Díky negativní VA charakteristice výbojových zdrojů ($dI/dU < 0$), se výbojové zdroje nemohou připojovat přímo k elektrické síti, ale pouze v sérii s předřadníkem, který má kladnou VA charakteristiku ($dI/dU > 0$) a omezuje a stabilizuje elektrický proud procházející výbojovou trubicí na jmenovitou hodnotu. Proud procházející stabilizačním prvkem předřadníku je roven proudu zářivky I_{LAMP} , a je možné jej vyjádřit pomocí síťového napětí a impedance stabilizačního prvku takto:

$$I_{LAMP} = (U_{NAP} - U_{LAMP})/Z_{ST}, \quad (2.1)$$

kde I_{LAMP} proud tekoucí zářivkovou trubicí,
 U_{LAMP} napětí na zářivce,
 U_{NAP} síťové napájecí napětí,
 Z_{ST} impedance stabilizačního prvku



Obrázek 2.1: Voltampérová charakteristika zářivky zapojené do série se stabilizačním prvkem, díky kterému požadované napětí na zářivce (lampě) vzrůstá s rostoucím proudem lampy; následkem je stabilnímu stav [App00].

Kromě této nejdůležitější funkce předřadník dále zajišťuje chod zářivky i v případě průchodu proudu nulou, poskytuje zápalné napětí pro její počáteční start, zajišťuje ohřev elektrod zářivky během zápalného procesu a v některých případech také během normálního provozu, zajišťuje dostatečně vysoký účinník (Power Factor), omezuje harmonické zkreslení síťového proudu, poskytuje dostatečné potlačení elektromagnetického rušení, omezuje zároveň zkratové proudy, popř. proudy během rozběhu zářivky, čímž chrání elektrody před přetížením, a v souladu s technickými podmínkami omezuje napětí, proud a výkon zářivky po dobu kolísání síťového napětí. Optimální funkce zářivek je tedy dána převážně vlastnostmi použitého předřadníku.

V současné době existují dva základní typy předřadníků, a to klasický indukční předřadník, sestávající z tlumivky a startéru, a elektronický předřadník, jehož základní součástí je měnič frekvence, který zvyšuje pracovní frekvenci výboje ze síťové na 25÷50 kHz [Daš02].

S přechodem od tradičních předřadníků zářivek k elektronickým, bylo zavedeno více elektrických parametrů pro lepší standardizaci zářivek související se zvýšením účinnosti, možnosti

smívání a především delší životností, která výrazně závisí na řádném předžhavení elektrod zářivky ještě před samotným zapálením výboje.

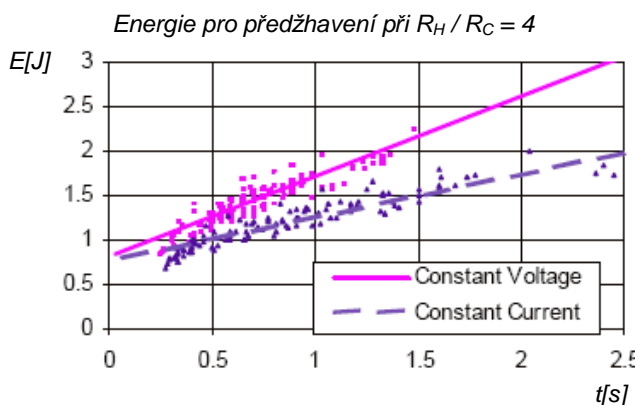
Elektrody zářivky se žhaví na teplotu, při které jsou schopny emitovat elektrony. Tato teplota u všech elektrod přesahuje hodnotu 900 K a využitím teoremu o teplotní závislosti odporu ji lze odvodit z poměru odporů wolframového vinutí R_H/R_C , kde R_H představuje odpor wolframového vinutí (vlákna) při zvýšené teplotě a R_C představuje odpor vlákna při pokojové teplotě. K emisi

elektronů dochází při $R_H/R_C \geq 4$. Při teplotě elektrody pod hodnotou $R_H/R_C \approx 4$, není zajištěno správné předžhavení a dochází ke zkrácení životnosti a naopak při teplotách nad hodnotou $R_H/R_C > 5,5$, dochází k nadměrnému vypařování emisní hmoty, které vede ke zčernání konců zářivky. Dle [Wak06], [Wak07a] jsou tyto meze o něco rozdílnější, nabývají hodnot 4,25 (odpovídá cca 700 °C) a 6,25 (odpovídá 1000 °C). Zároveň doporučený časový interval pro předžhavení elektrod by se měl pohybovat v mezích 500 ms ÷ 1,5 s. Příklady těchto standardů dle IEC 60901 uvádí tabulka 2.1, kde sloupec „Test current“ znamená proud, při kterém se poměr odporů pohybuje v rozsahu $4,75 \pm 0,5$.

| Cap | Watt (W) | Sheet no 901-IEC- | Test current (A) | Hot resistance of each cathode (Ω) | | |
|-------|----------|-------------------|------------------|------------------------------------|------|------|
| | | | | Rated | Min | Max |
| 2G7 | 5 | 2005 | 0.130 | 50 | 37.5 | 62.5 |
| | 7 | 2007 | 0.130 | 50 | 37.5 | 62.5 |
| | 9 | 2009 | 0.130 | 50 | 37.5 | 62.5 |
| | 11 | 2011 | 0.130 | 50 | 37.5 | 62.5 |
| 2G11 | 18 | 2218 | 0.340 | 12 | 9 | 15 |
| | 24 | 2224 | 0.340 | 12 | 9 | 15 |
| | 36 | 2236 | 0.385 | 11 | 8.2 | 13.8 |
| | 40 | 6240 | 0.340 | 12 | 9 | 15 |
| | 55 | 6255 | 0.500 | 8 | 6 | 10 |
| G24q | 10 | 2510 | 0.140 | 50 | 37.5 | 62.5 |
| | 13 | 2513 | 0.140 | 50 | 37.5 | 62.5 |
| | 18 | 2518 | 0.190 | 26 | 19.5 | 32.5 |
| | 26 | 2516 | 0.310 | 13 | 9.7 | 16.3 |
| 2G10 | 18 | 3118 | 0.340 | 12 | 9 | 15 |
| | 24 | 3124 | 0.340 | 12 | 9 | 15 |
| | 36 | 3136 | 0.385 | 11 | 8.2 | 13.8 |
| GX24q | 13 | 3413 | 0.140 | 50 | 37.5 | 62.5 |
| | 18 | 3418 | 0.190 | 26 | 19.5 | 32.5 |
| | 26 | 3426 | 0.310 | 13 | 9.7 | 16.3 |
| | 32 | 7432 | 0.310 | 13 | 9.7 | 16.3 |
| | 42 | 7442 | 0.310 | 13 | 9.7 | 16.3 |

Tabulka 2.1: Standardizovaný odpor katody a testovací proud pro hotovou zářivku [Dor02]

Dle [Dor02] lze správné předžhavení elektrod rovněž vyjádřit prostřednictvím množství spotřebované energie. Příklad, uvedený na obrázku 2.2, zachycuje měření energie provedené na několika rozdílných elektrodách CFL zářivek při poměru $R_H/R_C = 4$ v různých časech pro předžhavení, a to pro oba způsoby předžhavení, tj. evropský způsob, kde jsou elektrody předehřívány konstantním proudem $P(t) = I^2 \cdot R_{\text{elektrod}}(t)$ a americký způsob, kde je energie pro předžhavení elektrod dodávána prostřednictvím konstantního napětíového zdroje $P(t) = U^2/R_{\text{elektrod}}(t)$.



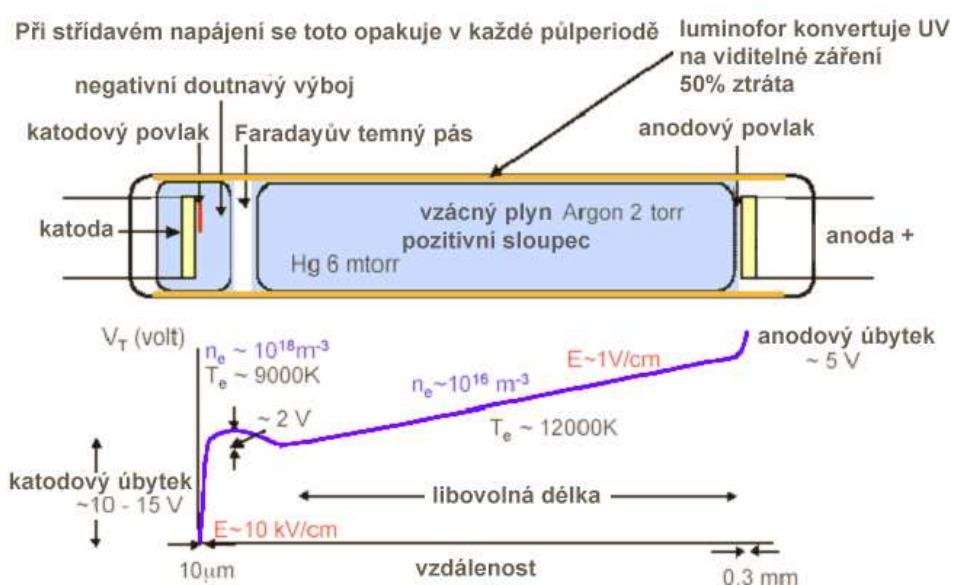
Obrázek 2.2: Energie pro předžhavení CFL zářivek, konkrétně pro PL - C 26 W [Dor02]

2.2 Výbojová trubice a faktory ovlivňující její životnost

Výbojový prostor trubice sestává z několika základních intervalů. Poblíž katody se nachází tenká svítící vrstva, tzv. katodová, a prostor mezi touto vrstvou a katodou se nazývá Astonovým temným prostorem. Z druhé strany svítící vrstvy se nachází slabě svítící Crookesův tmavý prostor, často uváděný jako prostor katodového spádu, který přechází ve svítící oblast zvanou doutnavé světlo. Všechny tyto vrstvy tvoří katodovou část doutnavého výboje. S oblastí doutnavého výboje hraničí Faradayův temný prostor. Hranice mezi nimi je neostrá. Zbývající část výbojové trubice je tvořena kladným (pozitivním) anodovým sloupcem [Ele10], obr. 2.3.

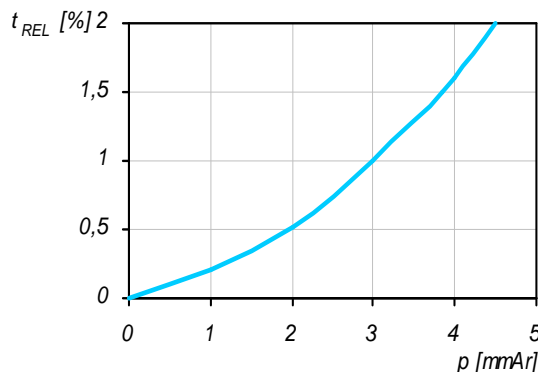
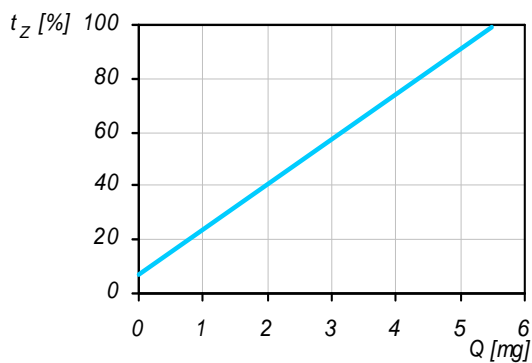
Potenciál podél trubice se mění nerovnoměrně [Ele10]. Téměř celý spád napětí připadá na první tři intervaly výbojového prostoru až po temný Crookesův prostor včetně, tzv. katodový spád napětí. Jde o největší spád potenciálu, který je roven téměř celému napětí mezi elektrodami. Rozložení potenciálu závisí na druhu plynu, a na materiálu, ze kterého je katoda vyrobena. V oblasti doutnavého výboje se potenciál nemění a intenzita pole je rovna nule. V poslední fázi, tj. ve Faradayově temném prostoru a kladném sloupci, potenciál pomalu roste. Toto rozdělení potenciálu je způsobeno vznikem kladného náboje v oblasti Crookesova temného prostoru. Základní procesy, potřebné k udržení doutnavého výboje probíhají v jeho katodové oblasti. Kladný anodový sloupec se vyznačuje konstantním elektrickým polem, bývá nejdelší částí zářivého prostoru v trubici a má charakteristickou barvu plynu.

Lineární zářivky jsou vyráběny v široké škále o průměrech \varnothing 38, 26, 16, 7 mm označované T12, T8, T5, T2, v délkách 136÷1500 mm a výkonech 4÷65 W.

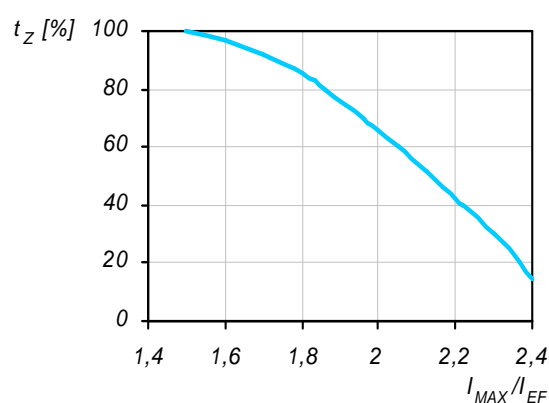
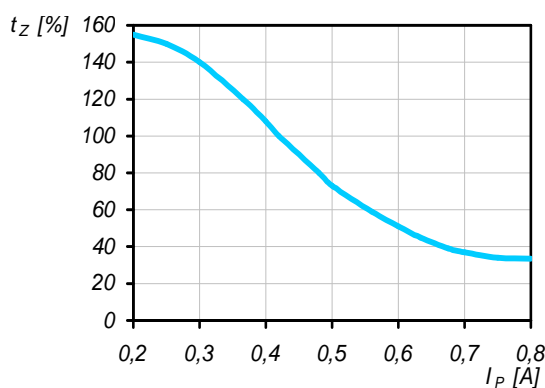


Obrázek 2.3: Oblast výboje zářivky a napěťová charakteristika při stejnosměrném napájení [Šol04]

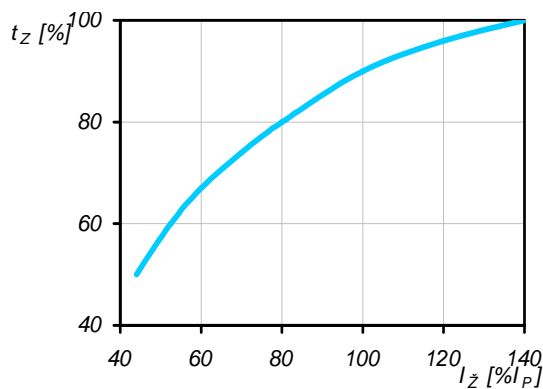
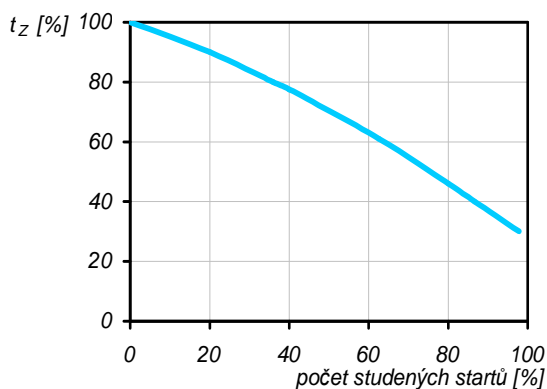
Životnost zářivek, stejně jako i jiných světelných zdrojů, je definována poklesem světelného toku o určitou hodnotu z původní jmenovité hodnoty v % nebo přerušením jejich svícení. Dle [Daš02] obvykle končí životnost při poklesu světelného toku zdroje pod 70 % jmenovité hodnoty. Životnost závisí na mnoha faktorech jak konstrukčního, tak i provozního charakteru, přičemž provozní faktory jsou v první řadě dány vlastnostmi předřadného zařízení. Mezi ovlivňující faktory může patřit například kvalita světelného zdroje, počet zapnutí, kolísání napětí v síti, teplota okolí nebo frekvence napětí. Jednotlivé závislosti jsou uvedeny na následujících grafech, viz 2.4 až 2.7.



Obrázek 2.4: Vlevo závislost doby života zářivky na množství emisní hmoty nanesené na elektrodě (katodě), vpravo závislost doby života zářivky na tlaku argonové náplně [Kin64]

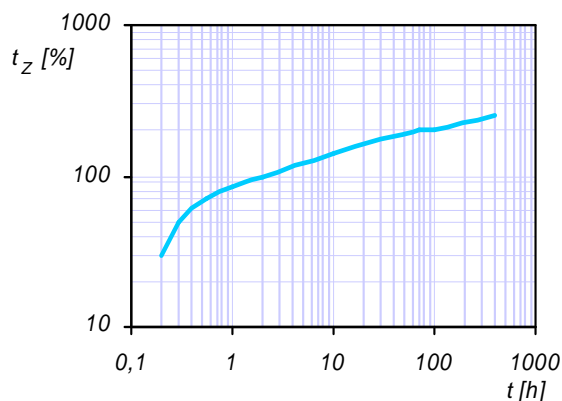


Obrázek 2.5: Vlevo závislost doby života zářivky na pracovním proudu, vpravo závislost doby života zářivky na tvaru proudové křivky [Kin64]



Obrázek 2.6: Vlevo závislost doby života zářivky na počtu studených (mžítkových) startů, vpravo závislost doby života zářivky na velikosti žhavicího proudu [Kin64]

Obrázek 2.7: Závislost doby života zářivky na počtu hodin svícení připadajících na jedno rozsvícení [Kin64]



3 Náhradní obvody pro stavy startu

Před rozбором startu zářivkového svítidla v kapitole 4, je nutné znát ustálené hodnoty obvodových veličin v jednotlivých stavech svítidla během procesu zapalování zářivky. Zapalovací proces je v této práci popisován stavovým diagramem, jenž obsahuje základní stavy: ohřev startéru, žhavení elektrod, svícení atd.

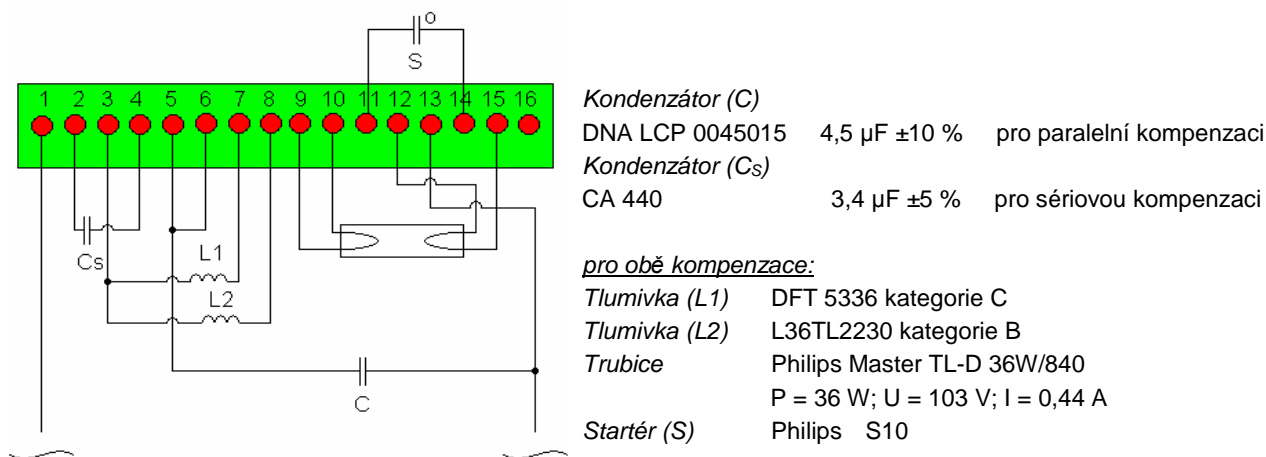
Jednotlivé stavy ve stavovém diagramu lze popsat náhradními obvody, jejichž parametry lze vypočítat. Výsledky z tohoto analytického postupu budou použity k nastavení mezí algoritmu, automaticky rozpoznávajícího jednotlivé stavy. Při zpracování dat z více reálných zářivkových svítidel musíme navíc počítat s rozptylem parametrů prvků. Proto si můžeme dovolit zjednodušené řešení úlohy linearizací jednotlivých obvodových prvků. Stavy svítidla můžeme pak definovat pouze komplexní impedancí. Model stavů tak může být popsán rovnicí

$$\mathbf{Z} = A \cdot e^{j\varphi} + \sigma, \quad (3.1)$$

kde \mathbf{Z} je impedance daného stavu,
 A je amplituda,
 φ je fázový posun,
 σ jsou parazitní vlivy.

Pro výpočet komplexních impedancí a následného určení výsledných konstant impedancí A a φ v jednotlivých provozních stavech zářivkového svítidla je třeba znát parametry náhradního obvodu svítidla.

Pro tento experiment byla použita svítidla jak s paralelní, tak i sériovou kompenzací účinníku. Měření byla provedena na modelu osvětlovací sítě se 24 svítilidly zapojenými podle obr. 3.1. Jednotlivá zapojení: paralelní kompenzace ($CpL1$, $CpL2$), sériová kompenzace ($CsL1$, $CsL2$) a bez kompenzace ($L1$) byla měřena s následujícím osazením:



Obrázek 3.1: Schéma zapojení jednoho svítidla v modelu osvětlovací sítě

Měření byla tedy provedena se dvěma typy tlumivek v různých kategoriích účinnosti (C, B).

3.1 Výsledné impedance náhradních obvodů v jednotlivých stavech

Výpočet impedancí v jednotlivých stavech je uveden v příloze 8.2 disertační práce. V této podkapitole jsou uvedeny pouze výsledky analýzy.

K výpočtu komplexních impedancí dle vzorců (8.1) až (8.15), viz příloha 8.2 disertační práce, byly použity průměrné hodnoty parametrů kondenzátoru uvedené v tabulkách 8.1 a 8.2 přílohy 8.1 disertační práce a hodnoty tlumivky, vláken, startéru a zářivky v tabulkách 8.3 až 8.5 uvedených opět v příloze 8.1 disertační práce.

Tabulka 3.1: Impedance svítidel v různých stavech

| PROVOZNÍ STAV | Paralelní kompenzace CpL1 | | | bez kompenzace L1 | | | Sériová kompenzace CsL1 | | |
|-----------------|------------------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|----------------------------|-------|-------|
| | Z (Ω) | φ (°) | I (A) | Z (Ω) | φ (°) | I (A) | Z (Ω) | φ (°) | I (A) |
| OHŘEV STARTÉRU | 730 | -87,4 | 0,32 | 16300 | 2,6 | 0,014 | 16300 | -0,6 | 0,014 |
| ŽHAVENÍ | 820 | 68,3 | 0,28 | 392 | 79,8 | 0,59 | 535 | -82,5 | 0,43 |
| ODSKOK STARTÉRU | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SVÍCENÍ | 1520 | 26,1 | 0,15 | 565 | 70,4 | 0,41 | 428 | -63,8 | 0,54 |
| VYPNUTÍ | ∞ | - | 0 | ∞ | - | 0 | ∞ | - | 0 |

| PROVOZNÍ STAV | DUO zapojení CsL1 + L1 | | |
|-----------------|---------------------------|-------|-------|
| | Z (Ω) | φ (°) | I (A) |
| OHŘEV STARTÉRU | 8120 | 0,97 | 0,028 |
| ŽHAVENÍ | 1050 | 43,5 | 0,22 |
| ODSKOK STARTÉRU | - | - | - |
| SVÍCENÍ | 594 | -14,6 | 0,39 |
| VYPNUTÍ | ∞ | - | 0 |

4 Měření startů zářivkového tělesa

Měření byla prováděna na modelu osvětlovací sítě na Ústavu mechatroniky a technické informatiky Technické univerzity v Liberci. Model je tvořen šesti osvětlovacími tělesy a umožňuje snadno a rychle překonfigurovat zapojení osvětlovacího tělesa, např. změnit typ kompenzace účinníku. Jedno těleso přitom sestává ze čtyř zářivek, panelu osazeného výzbrojí elektromagnetického předřadníků v různých variantách a panelu s elektronickými předřadníky. Panely předřadníků obsahují konektor pro měření obvodových veličin svítidla, který zároveň slouží pro konfiguraci zapojení předřadníku, viz obr. 3.1. Fotografie modelu je na obr. 4.1.



Obrázek 4.1: Vlevo model osvětlovací sítě, uprostřed měřicí pracoviště – EMU-2, vpravo výkonový zdroj PRC 2000LA

K napájení byl použit programovatelný výkonový zdroj 2 kVA, KIKUSUI PCR 2000LA, který zajistil čistě harmonické testovací napájení 50 Hz se zanedbatelnými odchylkami. Testy byly prováděny pro jmenovité napětí 230 V a odchylky $\pm 5\%$ a $\pm 10\%$. Celkem tak bylo měřeno při pěti různých napětích v zapojení s DUO a s paralelní kompenzací účinníku, s tlumivkami L_1 a L_2 a bez kompenzace s tlumivkou L_1 .

Pro statistické vyhodnocení se měřilo ve dvou výběrových souborech: a) na jedné zářivce s počtem měření 50 pro stejné podmínky a b) na 12 zářivkách, z nichž na každé proběhlo 10 měření při stejných podmínkách.

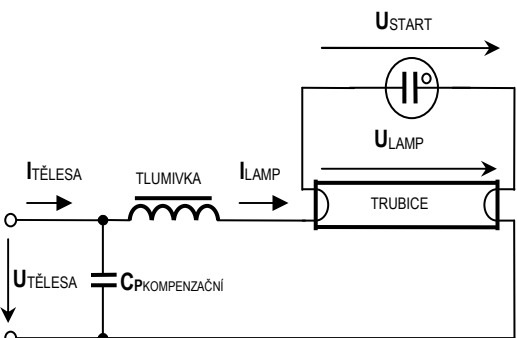
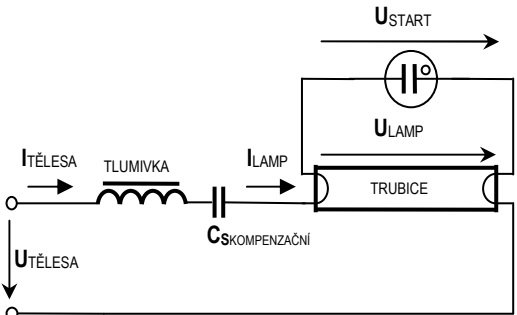
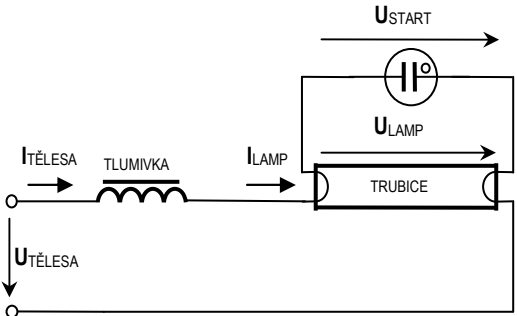
To znamená, že v případě výběrového souboru jedné zářivky ad a) bylo provedeno 1250 měření a v případě souboru s 12 zářivkami ad b) 3000 měření.

Z každého měření byly několik sekund po přivedení napájecího napětí zaznamenány oscilogramy obvodových veličin a intenzity světelného toku trubice. Realizace měření proběhla na 18 kanálovém přístroji EMU-2 se vzorkovací frekvencí 12,8 kHz, ovládaným skriptem v jazyce Delphi.

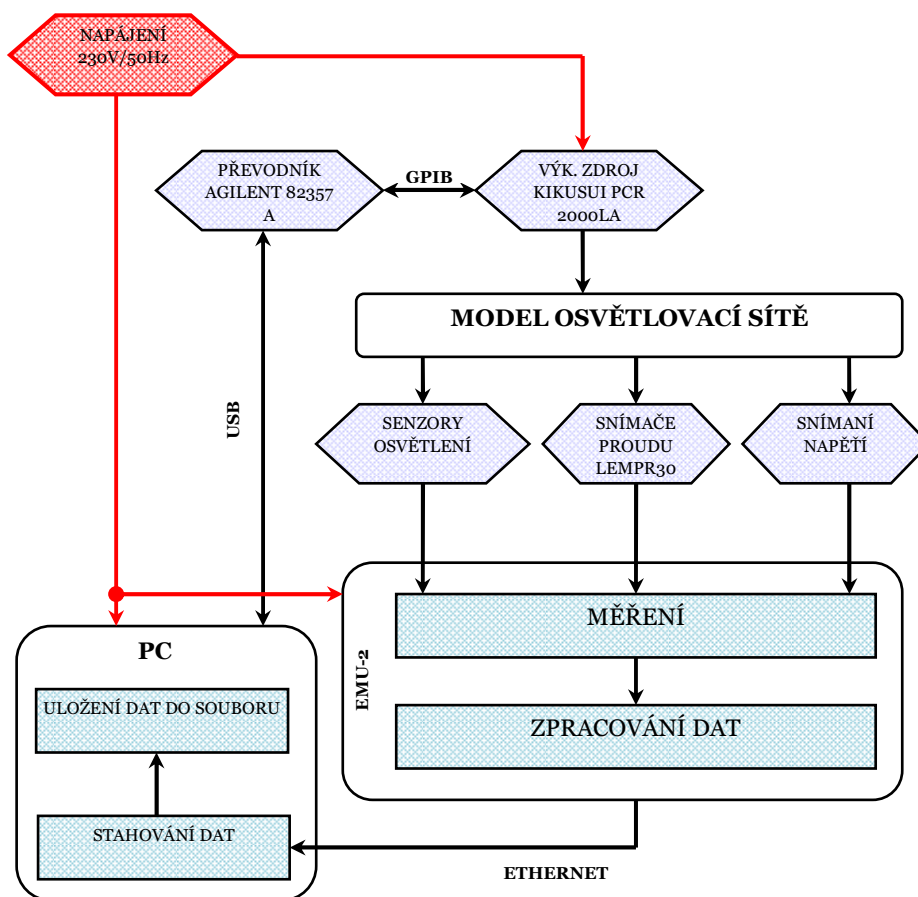
Měření se realizovalo na konfiguracích, uvedených v tabulce 4.1. Napětí byla změřena přímo napěťovými vstupy měřicí ústředny EMU-2. Pro měření proudu tělesa $I_{\text{TĚLESO}}$ a proudu zářivky I_{LAMP}

se použily snímače proudu s kompenzovanou Halloovou sondou LEM PR30. V obvodu se sériovou kompenzací účinníku a v obvodu bez kompenzace se oba proudy rovnají. Měřena byla také intenzita světelného toku pomocí sestrojěných čidel.

Tabulka 4.1: Topologie svítidel při jednotlivých měřeních

| ZAPOJENÍ | OZNAČENÍ/VARIANTY | MĚŘENÉ VELIČINY |
|---|--|---|
|  | Paralelní kompenzace účinníku CpL1 CpL2 | $U_{TÉLESO}$ (V) U_{LAMP} (V) $U_{STARTÉR}$ (V) $I_{TÉLESO}$ (A) I_{LAMP} (A) Svět. tok (lm) |
|  | Sériová větev DUO kompenzace účinníku CsL1 CsL2 | $U_{TÉLESO}$ (V) U_{LAMP} (V) $U_{STARTÉR}$ (V) $I_{TÉLESO}$ (A) \equiv $\equiv I_{LAMP}$ (A) Svět. tok (lm) |
|  | Větev bez kompenzace pro DUO kompenzací účinníku L1 | $U_{TÉLESO}$ (V) U_{LAMP} (V) $U_{STARTÉR}$ (V) $I_{TÉLESO}$ (A) \equiv $\equiv I_{LAMP}$ (A) Svět. tok (lm) |

Základem čidel intenzity osvětlení je snímač SFH 5711 s logaritmičtým proudovým výstupem, který má integrován spektrální filtr s citlivostí odpovídající lidskému oku. Snímač byl umístěn v držáku tvarovaném podle zářivkové trubice T8 ve vzdálenosti 5 mm od povrchu zářivky. Díky neměnnému geometrickému uspořádání odpovídá intenzita osvětlení přímo úměrně světelnému toku generovanému zářivkou. Výstup snímače byl zatížen rezistorem 56 k Ω a impedančně oddělen zesilovačem rail-rail MCP 601. Přesnost snímače byla ověřena porovnáním s luxmetrem CA811. Chyba v celém rozsahu nepřesahovala 5 %. Výhodou snímače je spektrální citlivost odpovídající oku a rychlost odezvy, kde výrobce garantuje zpoždění menší než 0,1 ms při dosažení 90 % výstupní hodnoty [Hig06].



Obrázek 4.2: Blokový diagram popisovaného měření

Měření probíhala plně automatizovaně z ovládací aplikace naprogramované v Borland Delphi. Opakovaná měření probíhala v sekvenci. Měření byla provedena pro napájecí napětí:
 $U = 230 \text{ V}$; $U_{-5\%} = 218,5 \text{ V}$; $U_{-10\%} = 207 \text{ V}$; $U_{+5\%} = 241,5 \text{ V}$; $U_{+10\%} = 253 \text{ V}$.

4.1 Skript v jazyce MATLAB

Tento skript byl vytvořen pro automatickou detekci přechodů mezi jednotlivými stavy a vyhledává jednotlivé stavy.

Původně sestavený program, publikovaný v [Nov06], byl určen pro detekci přechodů pouze pro obvody s paralelní kompenzací účinníku. Aby mohl program pracovat bezchybně i se zapojeními se sériovou kompenzací a při rozptylu parametrů svítidel, byly v programu kompletně zobrazeny podmínky detekce stavů a zároveň došlo k jeho doladění pro využití signálů z čidel světelného toku.

Program pracuje se zaznamenanými oscilogramy z rozběhu zářivkového svítidla tak, že jimi postupně prochází od začátku do konce a vyhledává jednotlivé stavy. Aktuální pozice v oscilogramu je dána ukazatelem, který se při průchodu oscilogramem postupně posouvá na konce jednotlivých stavů. Ukazatel je umístěn na časové ose a od jeho pozice skript určuje následující stav svítidla z analýzy průběhů (oscilogramů) obvodových veličin a intenzity světelného toku. Testy jsou realizovány porovnáním středních hodnot usměrněných signálů s limitními hodnotami. Testy jsou prováděny na různě dlouhých datových úsecích. Typicky odpovídají době trvání $1/8$, $1/4$, $1/2$, 1 a více period napájecího napětí. Testování signálu v několika úsecích periody bylo zvoleno z důvodu robustnosti algoritmu, protože přechody mezi jednotlivými stavy bývají poznamenány přechodovými

ději. Střední hodnoty jsou, na rozdíl od efektivních hodnot, vypovídající i při zpracování signálu s necelou délkou periody. Při splnění limitu je příslušný stav ohodnocen bodovým skóre.

Po provedení testování je podle nejvyššího dosaženého bodového skóre známo, o jaký stav se jedná. Následně je prohledáván signál a vyhledá se konec daného stavu. Podmínky pro ukončení stavu jsou mírně odlišné od podmínek vyhledávání stavu následujícího. V některých případech se používá přesné dohledávání tak, aby bylo možné určit okamžik přechodu mezi stavy co nejpřesněji.

Na vyhledanou pozici konce stavu se posune ukazatel a jsou zaznamenány údaje o parametrech a délce trvání stavu. V tomto místě se vyhodnocují a ukládají sledované veličiny v příslušných stavech.

Tabulka 4.2: Veličiny vyhodnocované v jednotlivých stavech

| STAV | VELIČINY | VZTAHY |
|-------------------|---|--|
| OHŘEV STARTÉRU | Energie na ohřev startéru E_s (J) Činný příkon do P_{Cp} (W) Napětí na U_{Cp} (U) Proud do I_{Cp} (I) Kapacita C_p (F) | $E_s = \int_{t=\text{begin}}^{t=\text{end}} u_{\text{starter}} i_{\text{lamp}} dt$ $P_{Cp} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t=\text{begin}}^{t=\text{end}} u_{\text{teleso}} (i_{\text{teleso}} - i_{\text{lamp}}) dt$ $C_p = \frac{1}{2\pi f U_{Cp}^2} \sqrt{(U_{Cp} I_{Cp})^2 - P_{Cp}^2}$ |
| ŽHAVENÍ | Energie na žhavení vláken E_z (J) Úbytek napětí na vláknech ΔU_f (V) Žhavicí proud I_z (A) Činný příkon tlumivky P_{tl} (W) Úbytek napětí na tlumivce ΔU_{tl} (V) Odpor vláken za studena R_C (Ω) Odpor vláken před zapálením R_H (Ω) | $E_z = \int_{t=\text{begin}}^{t=\text{end}} (u_{\text{lamp}} - u_{\text{starter}}) i_{\text{lamp}} dt$ $P_{tl} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t=\text{begin}}^{t=\text{end}} (u_{\text{teleso}} - u_{\text{lamp}}) i_{\text{lamp}} dt$ $R_C = \frac{u_{\text{lamp}} - u_{\text{starter}}}{i_{\text{lamp}}} \quad 2T \text{ po začátku žhavení}$ $R_H = \frac{u_{\text{lamp}} - u_{\text{starter}}}{i_{\text{lamp}}} \quad 2T \text{ před koncem žhavení}$ |
| SVÍCENÍ | Intenzita sv. toku po zapálení E_{zap} (lm) | $E_{zap} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t=\text{begin}}^{t=\text{begin}+T} edt$ |

Celý proces vyhledávání se opakuje, dokud není dosaženo konce oscilogramů. Rozhodovací úrovně byly nastaveny dle teoretických hodnot pro 36 W lineární zářivku s přihlédnutím k přesnosti měření. Chybovost vyhledání stavů je zanedbatelná.

4.2 Stavový diagram startu zářivkového svítidla

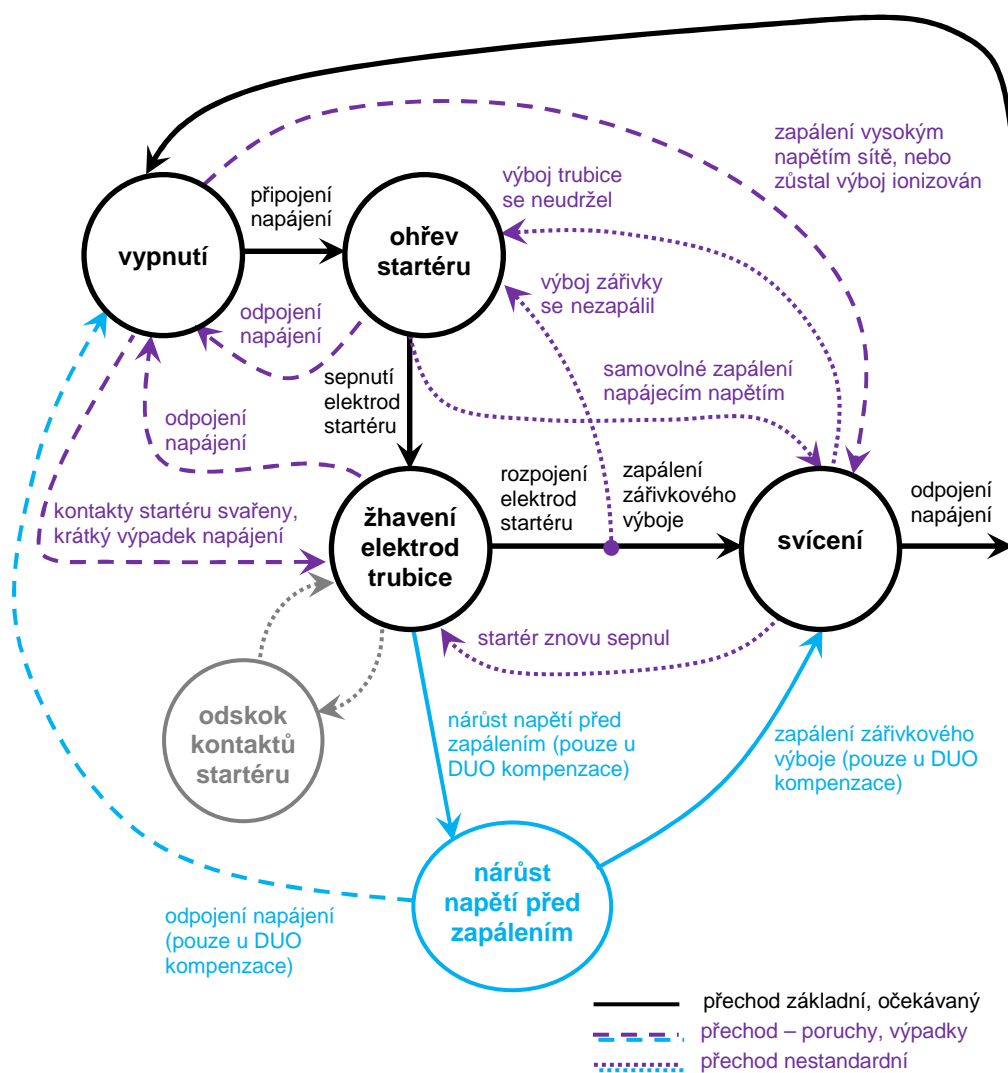
Funkce obvodu, lze přehledně vystihnout stavovým diagramem zachycujícím jednotlivé stavy startování zářivkového tělesa, viz obr. 4.3.

Stavový diagram sestává ze čtyř základních stavů: ohřev startéru, žhavení elektrod trubice, svícení a vypnutí.

Pro DUO, resp. sériovou, kompenzaci byl navíc zařazen stav „nárůst napětí před zapálením“. Po rozpojení kontaktů startéru někdy nedojde k okamžitému zažehnutí výboje zářivky, ale dojde k němu až následně nárůstem napětí na zářivce, kdy se napětí na kondenzátoru sčítá se síťovým napětím až

dojde k proražení výbojového kanálu zářivky. Tento případ nastává, když je žhavení ukončeno při průchodu žhavicího proudu okolím nuly a nevznikne dostatečně velké indukované napětí na zažehnutí výboje. Po důkladné analýze byl tento poměrně dlouhý přechodový děj označen zvláštním stavem. Lze tak na výsledcích sledovat, s jakou četností dochází k zapálení zářivky tímto mechanismem. Nutno zmínit, že zároveň s nárůstem napětí dochází k ohřevu startéru, který se ale následným zapálením výboje neuplatní.

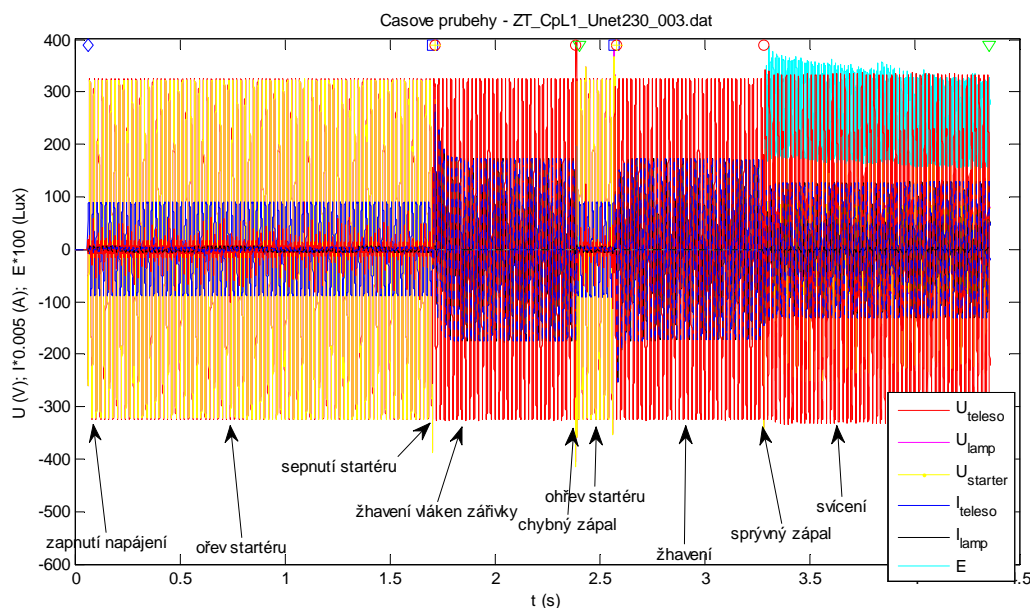
Ve stavovém diagramu figuruje také stav „odskok kontaktů“. Protože přítlak bimetalové elektrody startéru není vždy spolehlivý, dochází ke krátkodobým odskokům řádu jednotek μs . Chování odpovídá posuvnému kontaktu s povrchovým znečištěním. Doba trvání odskoku je mnohem menší než perioda sítě a energie ohřívající startér během odskoku je zanedbatelná. Jde o stav v podstatě nežádoucí, ale poměrně častý. Z toho důvodu byl tento stav označen zvláštním stavem a je diagramu vyznačen šedou barvou.



Obrázek 4.3: Stavový diagram zapalování zářivkového tělesa

Jednotlivé stavy jsou navzájem propojeny tzv. přechody, přičemž všechny se mohou v praxi uplatnit. Přechody vyznačené tečkovaně jsou přechody nestandardní a popis některých z nich včetně oscilogramů je uveden v kapitole 4.2 disertační práce. Zbývající přechody, vyznačené čárkovaně, odpovídají poruchovým stavům a přerušení napájecího napětí. Poruchové přechody nebyly vyšetřovány.

Záznam typického průběhu startování zářivky s paralelní kompenzací účinníku demonstruje obr. 4.4, ze kterého je zřetelný chybný zápal po nažhavení vláken zářivky. Dochází tak k opakování celého cyklu s výsledkem správného zápalu zářivky a následným svícením.



Obrázek 4.4: Záznam průběhu startu zářivky v zapojení s paralelní kompenzací (CpL1) dle obr. 2.3. Tlumivka DFT 5336 kategorie C, napájení 230 V

4.3 Četnosti přechodů mezi jednotlivými stavy

Zpracováním dat byly získány stavové diagramy ohodnocené četnostmi přechodů mezi jednotlivými stavy startování zářivkového tělesa. Hodnoty uvedené v tabulkách 4.3 až 4.6, popř. v diagramech na obrázcích 4.16 a 4.17 disertační práce, tedy představují průměrnou četnost přechodů během jednoho startu zářivky. Přechody, které zůstaly neohodnoceny (v diagramu vyznačeny čárkovaně), jsou způsobovány poruchovými stavy nebo výpadky napájení během rozběhu. Vzhledem k tomu, že tyto podmínky testovány nebyly, nabývaly četnosti přechodů nulových hodnot.

Protože bylo napětí pro každý oscilogram zapnuto pouze jednou na začátku měření, nabývaly přechody ze stavu „vypnutí“ do stavu „ohřev startéru“ vždy četnosti 1. Stejnou hodnotu četnosti, tj. 1, měl i přechod mezi stavy „svícení“ a „vypnutí“, který odpovídá vypnutí svítidla.

Základní přechody mezi stavy „ohřev startéru“, „žhavení“ a „svícení“, vyznačené ve stavovém diagramu černou barvou, jsou přechody očekávané a nastávají během zapálení minimálně jednou, tj. při zapálení na první pokus, a proto jejich četnosti mohou nabývat hodnot 1 a více. Bude-li například četnost přechodu mezi ohřevem startéru a žhavením nabývat hodnoty 2,94, znamená to, že zářivka v daném zapojení provede průměrně 2,94 žhavení na jeden start.

Samozřejmou podmínkou je, že součet četností přechodu vedoucí ke změně na určitý stav, musí být roven součtu četností přechodů z tohoto stavu.

Větší pozornost je třeba věnovat přechodům mezi stavy, které jsou zakresleny tečkovaně. Jedná se o tzv. přechody nestandardní, které se běžně v literatuře nepopisují, nicméně jejich četnosti nejsou zdaleka zanedbatelné.

Rozdíl četností přechodů pro tlumivku kategorie C (L1) a kategorie B (L2) je pro jmenovité napájecí napětí uveden v tabulkách 4.3 a 4.4, popř. 4.5 a 4.6. Kompletní výsledky jsou uvedeny v příloze 7.3 disertační práce.

Tabulka 4.3: Četnosti přechodů mezi stavy pro zářivku s **paralelní** kompenzací účinníku (C_{pL1}) a napájecím napětím 230 V, svítidlo 11, 50 měření

| PŘECHOD | | DO STAVU | | | | |
|----------|----------------|----------|----------------|---------|--------|---------|
| | | VYPNUTÍ | OHŘEV STARTÉRU | ŽHAVENÍ | ODSKOK | SVÍCENÍ |
| ZE STAVU | VYPNUTO | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | OHŘEV STARTÉRU | 0 | 0 | 2,94 | 0 | 0,82 |
| | ŽHAVENÍ | 0 | 0,16 | 0 | 4,1 | 3,2 |
| | ODSKOK | 0 | 0 | 4,1 | 0 | 0 |
| | SVÍCENÍ | 1 | 2,6 | 0,42 | 0 | 0 |

Tabulka 4.4: Četnosti přechodů mezi stavy pro zářivku s **paralelní** kompenzací účinníku (C_{pL2}) a napájecím napětím 230 V, svítidlo 11, 50 měření

| PŘECHOD | | DO STAVU | | | | |
|----------|----------------|----------|----------------|---------|--------|---------|
| | | VYPNUTÍ | OHŘEV STARTÉRU | ŽHAVENÍ | ODSKOK | SVÍCENÍ |
| ZE STAVU | VYPNUTO | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | OHŘEV STARTÉRU | 0 | 0 | 2,72 | 0 | 0,6 |
| | ŽHAVENÍ | 0 | 0,16 | 0 | 5,24 | 2,94 |
| | ODSKOK | 0 | 0 | 5,24 | 0 | 0 |
| | SVÍCENÍ | 1 | 2,16 | 0,38 | 0 | 0 |

Tabulka 4.5: Četnosti přechodů mezi stavy pro zářivku se **sériovou** kompenzací účinníku (C_{sL1}) a napájecím napětím 230 V, svítidlo 11, 50 měření

| PŘECHOD | | DO STAVU | | | | | |
|----------|----------------|----------|----------------|---------|--------|---------|---------------|
| | | VYPNUTÍ | OHŘEV STARTÉRU | ŽHAVENÍ | ODSKOK | SVÍCENÍ | NÁRŮST NAPĚTÍ |
| ZE STAVU | VYPNUTO | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | OHŘEV STARTÉRU | 0 | 0 | 3,48 | 0 | 0,64 | 0 |
| | ŽHAVENÍ | 0 | 0,2 | 0 | 7,76 | 4,92 | 0,34 |
| | ODSKOK | 0 | 0 | 7,76 | 0 | 0 | 0 |
| | SVÍCENÍ | 1 | 2,92 | 1,98 | 0 | 0 | 0 |
| | NÁRŮST NAPĚTÍ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,34 | 0 |

Tabulka 4.6: Četnosti přechodů mezi stavy pro zářivku se **sériovou** kompenzací účinníku (C_{sL2}) a napájecím napětím 230 V, svítidlo 11, 50 měření

| PŘECHOD | | DO STAVU | | | | | |
|----------|----------------|----------|----------------|---------|--------|---------|---------------|
| | | VYPNUTÍ | OHŘEV STARTÉRU | ŽHAVENÍ | ODSKOK | SVÍCENÍ | NÁRŮST NAPĚTÍ |
| ZE STAVU | VYPNUTO | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | OHŘEV STARTÉRU | 0 | 0 | 3,14 | 0 | 0,58 | 0 |
| | ŽHAVENÍ | 0 | 0,12 | 0 | 8,04 | 4,32 | 0,52 |
| | ODSKOK | 0 | 0 | 8,04 | 0 | 0 | 0 |
| | SVÍCENÍ | 1 | 2,60 | 1,82 | 0 | 0 | 0 |
| | NÁRŮST NAPĚTÍ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,52 | 0 |

Protože podmínky měření byly pro obě tlumivky identické, můžeme tvrdit, že tlumivka s nižším sycením (L2) způsobuje, oproti tlumivce (L1), nárůst úspěšnosti zapálení výboje o 16 %, tj. ubylo přechodů, kdy zaniká výboj v zářivce: svícení-ohřev startéru a svícení-žhavení. Ubylo také přechodů, kdy se střídají stavy ohřev startéru-svícení. Tyto opačné přechody se vyskytují prakticky jen při zapálení nedostatečně nažhavené trubice. To znamená, že kategorie tlumivky ovlivňuje i dobu setrvání v režimu nedokonalého hoření výboje v zářivce, kdy je výboj nestabilní a po část periody zaniká.

Pro tlumivku L2 je, oproti L1, větší počet odskoků bimetalových kontaktů startéru ve fázi žhavení. Pro jmenovité napětí 230 V to je o 22 %, přestože celková doba žhavení, jak plyne z tabulky 4.6 disertační práce, se zvýšila pouze o necelých 8 %. Takový nárůst počtu odskoků není způsoben pouze prodloužením celkové doby žhavení.

Přehled četností přechodů pro sériovou kompenzaci s tlumivkou L1 pro jmenovité napájecí

napětí je uveden v tabulce 4.5. Na rozdíl od paralelní kompenzace zde přibyl stav „nárůst napětí před zapálením“, plynoucí ze změn zapalovacího procesu, způsobených sériovým zařazením kompenzačního kondenzátoru. Poměr tohoto jevu k standardnímu okamžitému zapálení je 7 %.

Počty žhavení na jedno zapálení jsou u sériové kompenzace vyšší až o 40 %. Doby trvání stavů rozdělujících žhavení na úseky jsou ovšem relativně krátké. Současně pro sériovou kompenzaci oproti kompenzaci paralelní narostl i počet „odskoků kontaktů startéru“ a to o 90 % u tlumivky kategorie C (L1) a o 50 % u tlumivky kategorie B (L2). Základní příčinou je nárůst celkové doby žhavení, u kterého můžeme očekávat přímou souvislost s počtem odskoků kontaktů bimetalového startéru. Další příčinou by mohl být rozdílný žhavicí proud, ale tomu neodpovídá rozdíl počtu odskoků mezi měření s tlumivkami L1 a L2. Vysvětlení spočívá v rozdílném charakteru relaxačního napětí na právě rozpojených kontaktech startéru způsobeném vložením sériového kompenzačního kondenzátoru.

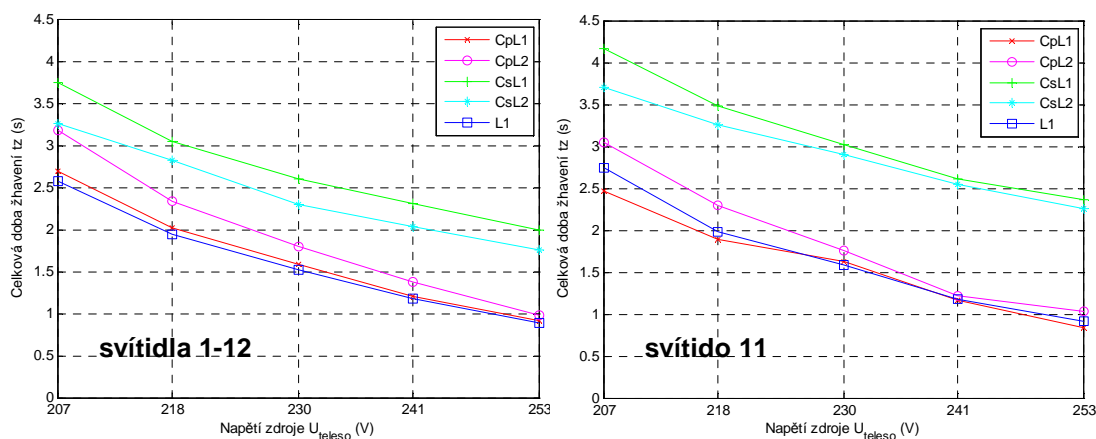
Celkově je patrné, že počty neúspěšných pokusů o zapálení výboje zářivky jsou u sériové kompenzace vyšší. Termoemisní vrstva elektrod je v průběhu neúspěšných zápalů více namáhána vysokými gradienty elektrostatického pole, a to má za důsledek kratší dobu života zářivkových trubic v zapojení se sériovou kompenzací.

Tlumivka s nižšími ztrátami (L2) má u sériové kompenzace pozitivní vliv a snižuje počet odskoků kontaktů startéru během žhavení. Snižuje také četnosti přechodů mezi stavy „ohřev startéru“ – „svícení“ – „ohřev startéru“, které jsou charakteristické pro zapálení zářivky s nedostatečně nažhavenými elektrodami. Naopak vliv na podíl počtu zapálení probíhajících přes stav „nárůst napětí na zářivce před zapálením“ nebyl potvrzen.

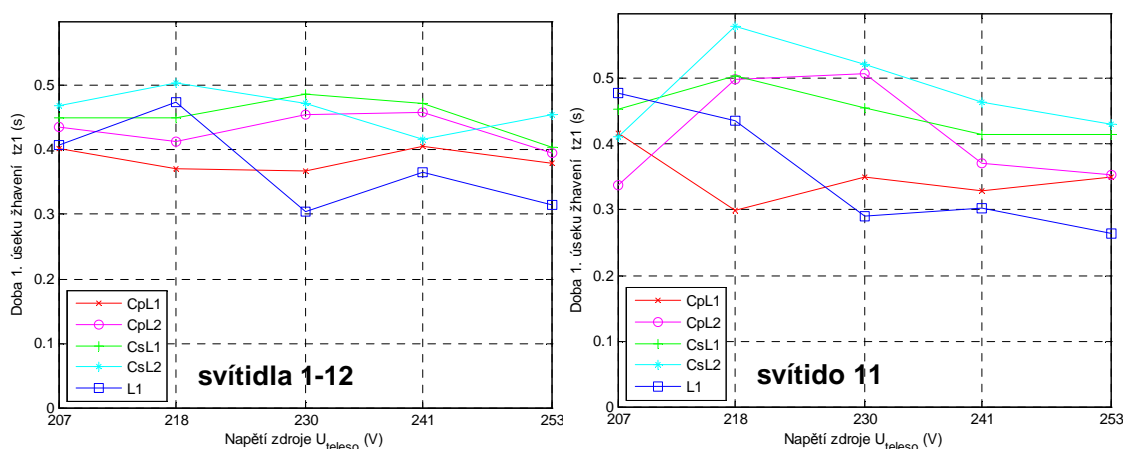
Celkové doby žhavení byly vypočteny jako součet dílčích žhavení během jednoho startu. Na grafech 4.5 jsou uvedeny mediány z 50 měření. Doba žhavení nemá normální rozdělení, proto byly použity mediány. Velmi zajímavé je, že vliv kategorie tlumivky na celkovou dobu žhavení je u sériové kompenzace účinnější než u kompenzace paralelní, a to na všech napěťových hladinách. Tlumivka s nižšími ztrátami (L2) má u sériové kompenzace kratší celkovou dobu žhavení. Obdobně dopadly výsledky výběrového souboru 12 svítidel. Rozdíl mezi oběma výběrovými soubory je patrně dán rozptylem parametrů komponent svítidel. U paralelní kompenzace účinnější je největší rozdíl mezi výběrovými soubory, a to pro oba typy tlumivek < 9 %. U sériové kompenzace je to až 22 %. Změna směru trendu je zjevně závislá na velikosti žhavicího proudu, kde se uplatňuje charakter rezonačního obvodu u sériové kompenzace.

Na obr. 4.5 jsou graficky znázorněny výsledky celkových dob žhavení – tj. součtu dílčích úseků žhavení během jednoho startu z dat v tabulkách 4.6, 4.7 disertační práce. S přibývajícím napětím se doba žhavení zkracuje jako důsledek nárůstu počtu neúspěšných zapálení výboje zářivky. Dobře patrné je delší žhavení u předřadníků se sériovou kompenzací účinnější.

Zajímavé je porovnání s dobou 1. úseku žhavení na obr. 4.6. Ta je ovlivněna především tepelnou charakteristikou doutnavkového startéru. Při žhavení, prostor doutnavkového startéru chladne. Rychlost ochlazování závisí na proměnné okolní teplotě. Dalo by se očekávat, že pro nižší napětí, kde trvá ohřev startéru mnohem déle, bude i doba 1. žhavení delší – to se ovšem nepotvrdilo.



Obrázek 4.5: Závislost mediánů celkové doby žhavení na napájecím napětí pro různé způsoby kompenzace účinníku, vlevo výběrový soubor **svítidla 1÷12** (10×12×5×5 měření), vpravo výběrový soubor **svítidlo 11** (50×5×5 měření)



Obrázek 4.6: Závislost mediánů doby 1. úseku žhavení na napájecím napětí pro různé způsoby kompenzace účinníku, vlevo výběrový soubor **svítidla 1÷12** (10×12×5×5 měření), vpravo výběrový soubor **svítidlo 11** (50×5×5 měření)

4.4 Histogramy dob trvání jednotlivých stavů

Z důvodu větší přehlednosti byly informace zpracované v tabulkách zobrazeny prostřednictvím histogramů, které jsou cenným výstupem z měření a zachycují délku trvání jednotlivých stavů v závislosti na napájecím napětí zářivkových těles.

Na jednom obrázku je vždy porovnán tentýž stav pro oba typy kompenzace účinníku: paralelní (Cp) a sériová větev duo kompenzace (Cs), a to pro oba typy tlumivek (L1) a (L2).

Vyhodnocení bylo provedeno pro dva typy výběrového souboru: a) 1 svítidlo a b) 12 svítidel. V tomto autoreferátu jsou prezentovány pouze výsledky pro výběrový soubor b), kde bylo provedeno pro každou trubici 10 měření za stejných podmínek, tzn. 10 měření pro jedno z pěti měřených zapojení předřadníku a jednu hodnotu z pěti napájecích napětí svítidla. Celkem to znamená 3000 měření. Výsledky z výběrového souboru b) lépe odrážejí skutečnost, protože se zde zprůměrují parazitní vlivy, např. okolní teploty při měření.

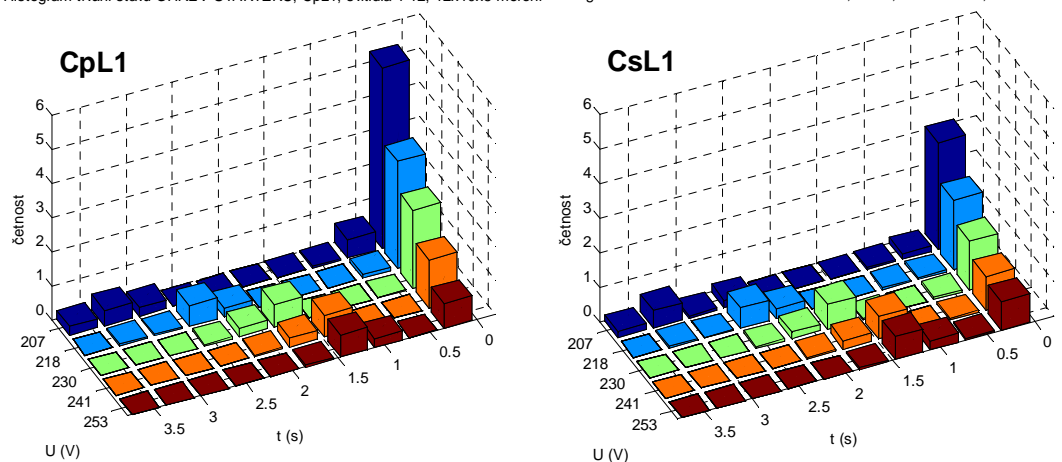
4.4.1 Ohřev startéru

Na obr. 4.7 jsou vyneseny četnosti trvání stavu „ohřevu startéru“. První ohřev startéru po přivedení napájení na těleso je reprezentován nižšími sloupci v časech nad jednu sekundu, což odpovídá normální funkci startéru. Součet četností těchto malých sloupců musí tedy být vždy jedna.

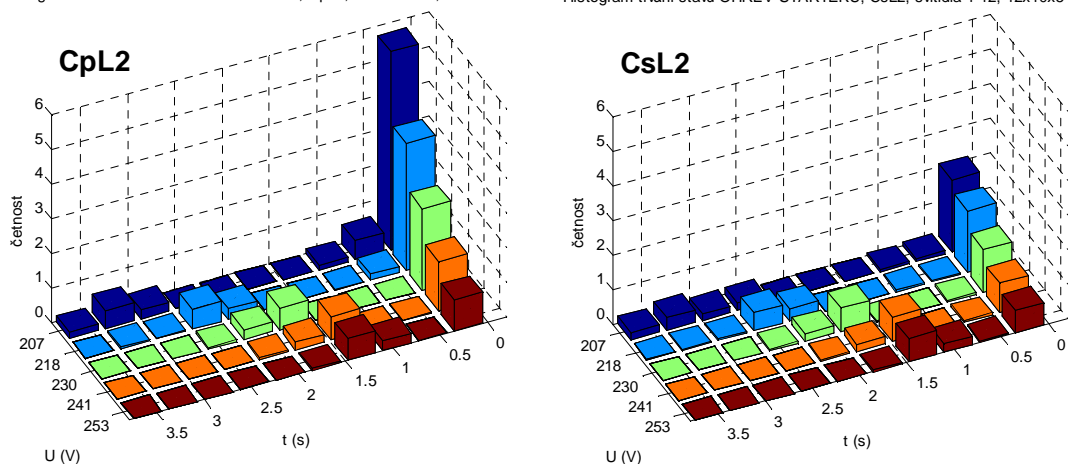
Výrazná závislost ohřevu na napájecím napětí není lineární a odpovídá ploše sinusového průběhu

napětí na svítidle $U_{\text{teleso}} = U \cdot \sin(\omega t)$, který je větší než zápalné napětí startéru $\int_{U_{\text{zapal}}}^{\infty} U_{\text{teleso}} du > U_{\text{zapal}} \cdot$

Histogram trvání stavu OHŘEV STARTÉRU, CpL1, svítidla 1-12, 12x10x5 měření Histogram trvání stavu OHŘEV STARTÉRU, CsL1, svítidla 1-12, 12x10x5 měření



Histogram trvání stavu OHŘEV STARTÉRU, CpL2, svítidla 1-12, 12x10x5 měření Histogram trvání stavu OHŘEV STARTÉRU, CsL2, svítidla 1-12, 12x10x5 měření



Obrázek 4.7: Četnost doby trvání stavu „ohřev startéru“ během 12x 10 startů svítidel 1÷12 v závislosti na napájecím napětí pro oba typy kompenzace účinníku s tlumivkou L1 a L2

Tato část grafů je neměnná pro různé tlumivky i zapojení kompenzaci. To ostatně vyplývá z analýzy obvodu ve stavu „ohřev startéru“. Největší impedanci zde představuje samotný doutnavý výboj startéru a nevelké změny impedance tlumivky, případně sériově zapojeného kondenzátoru, téměř neovlivní dobu ohřevu startéru.

V grafech na obr. 4.7 jsou dále patrné vysoké četnosti stavu „ohřev startéru“ s časem pod jednu sekundu, které odpovídají dalším krátkým ohřevům startéru, kdy se nepovedlo trubici rozsvítit napoprvé a bylo nutné její dožhavení, nebo se jednalo o další přechodové stavy s nestabilním výbojem.

Při porovnání obou kompenzací jsou četnosti těchto následných ohřevů startéru v sériové větvi DUO kompenzace mnohem menší, což znamená, že zapálení proběhne s menším počtem cyklů startéru. Počet cyklů žhavení je ale naopak v sériové větvi vyšší.

Tento rozpor je dán mnohem větším počtem přechodů ze stavu „svícení“ do stavu „žhavení“ v sériové větvi. Jde o špatný kontakt bimetalového startéru, zatímco u paralelní kompenzace dojde při přerušení obvodu při odskoku k prudkému nárůstu indukovaného napětí cca 300 V/μs a průrazu

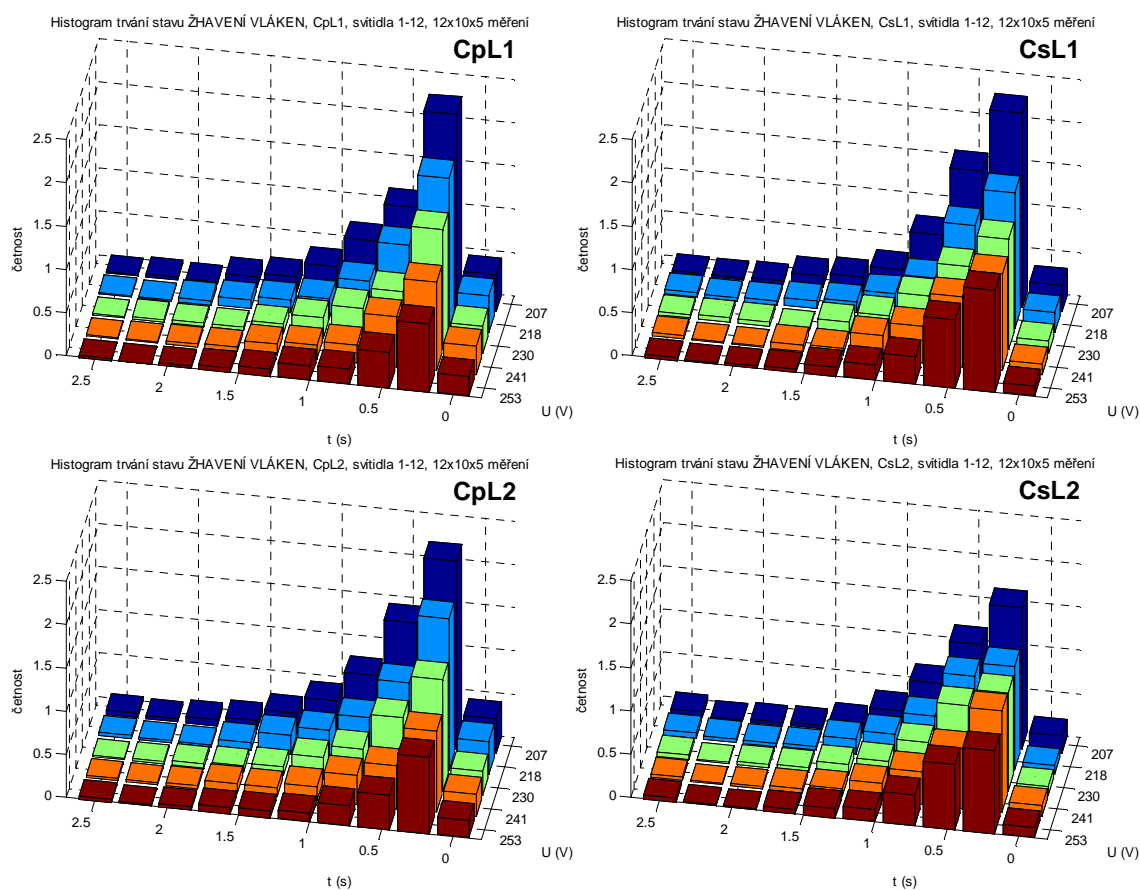
nevodivého kontaktu. Sériový kompenzační kondenzátor způsobuje snížení strmosti nárůstu napětí na kontaktech startéru $< 200 \text{ V}/\mu\text{s}$. Vodivost kontaktů není obnovena, ale napětí je dostatečné k proražení výbojového kanálu zářivkové trubice. To způsobí krátkodobý záblesk světla, který je ukončen opětovným spojením kontaktů startéru.

Na částech histogramu s časy pod 1s je opět patrná změna počtu stavů „ohřev startéru“ při použití tlumivky L1 a L2. Ta souvisí se změnou žhavicího proudu, který tlumivka ovlivňuje.

Obecně lze konstatovat, že počet cyklů, resp. stavů nutných k rozsvícení zářivky, ubývá s vyšším napájecím napětím.

4.4.2 Žhavení

Trvání stavů žhavení, jak vyplývá z histogramů na obr. 4.8, je pro sériovou větev DUO kompenzace mírně delší než u kompenzace paralelní. Výjimkou jsou velmi krátká žhavení zářivky pod 0,3 s. Těch je u sériové větve DUO kompenzace výrazně méně.



Obrázek 4.8: Četnost doby trvání stavu „žhavení vláken trubice“ během 12× 10 startů svítidel 1÷12 v závislosti na napájecím napětí pro oba typy kompenzace účinku s tlumivkou L1 a L2

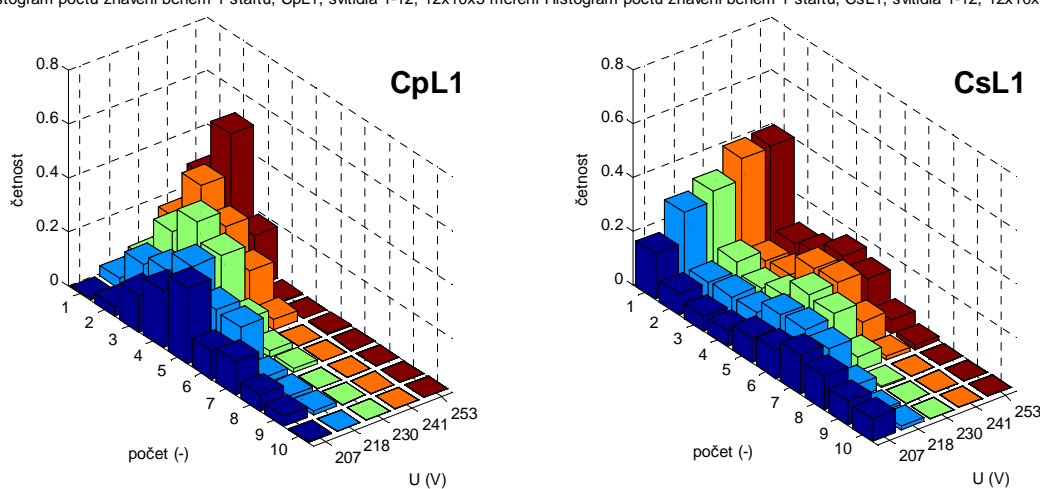
Zajímavé je srovnání s obr. 4.6. Při opakovaném žhavení dojde k ohřátí struktury startéru na vyšší teplotu, než je obvyklé, a žhavení pak trvá déle. Tento případ má úměrně menší četnost a souvisí s více pokusy o zapálení při nižším napájecím napětí.

Samotná doba žhavení je dána především konstrukcí startéru, přičemž záleží na čase, který je potřebný k vyzáření a odvedení tepla z prostoru startéru. Tomu odpovídá prohnutí bimetalového kontaktu startéru. Žhavicí proud je v sériové větvi DUO kompenzace nižší, jak bylo uvedeno výše.

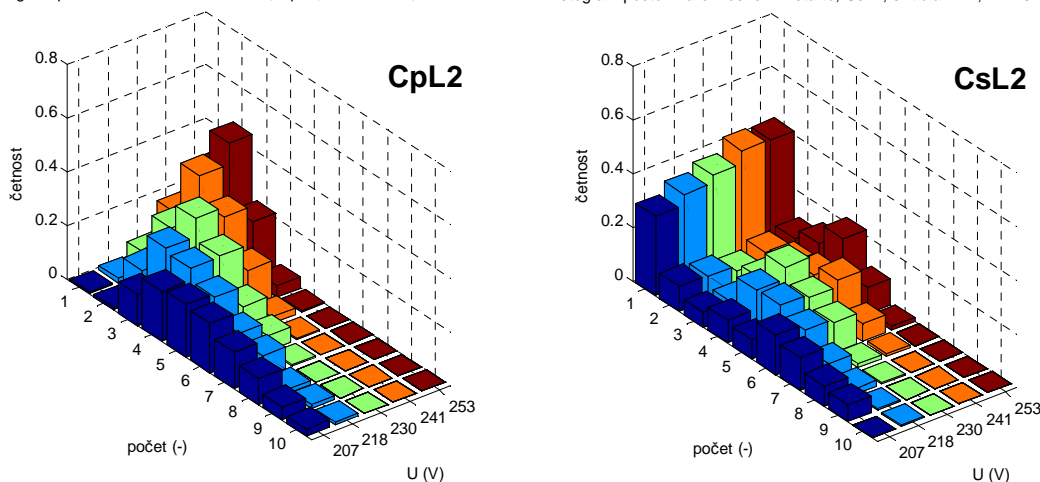
Protože jsou zářivkové startéry sestrojeny tak, aby za určitou dobu rozpojily žhavicí obvod zářivky, pak za stejnou dobu, bude mít menší žhavicí proud za následek nižší teplotu na předžhavení elektrod a zážeh zářivky při nedostatečně nažhavených elektrodách. Dochází tak k poškození emisní vrstvy elektrod v důsledku vytrhávání materiálu elektrickým polem a ke zkrácení životnosti zářivek. Úbytek napětí na katodě je při nízké teplotě totiž vyšší právě z důvodu nízké termoemise elektronů z elektrod. Naopak vyšší teplota předžhavení způsobuje odpařování elektrod během předžhavení.

Na obr. 4.9 jsou vyobrazeny histogramy počtu úseků žhavení během jednoho startu. Paralelní kompenzace zpravidla nespustí napoprvé. Pro jmenovité napětí potřebuje cca 3 cykly žhavení. Naopak sériová větev DUO kompenzace s vysokou pravděpodobností startuje napoprvé, tj. s jedním cyklem žhavení během jednoho startu při jmenovitém napětí s pravděpodobností 30 %. Pokud se start na poprvé nepovede, je naopak počet žhavení větší než u paralelní kompenzace.

Histogram počtu žhavení během 1 startu, CpL1, svítidla 1-12, 12x10x5 měření Histogram počtu žhavení během 1 startu, CsL1, svítidla 1-12, 12x10x5 měření

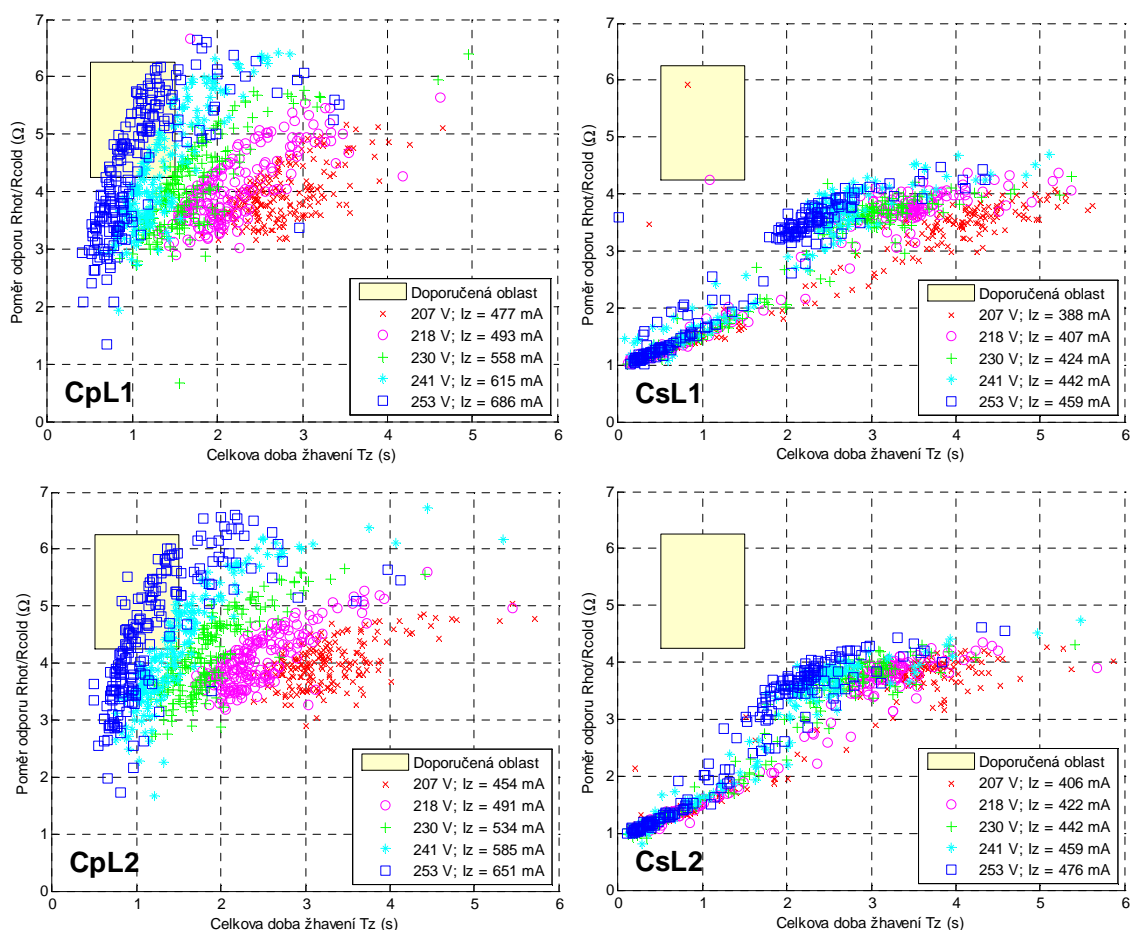


Histogram počtu žhavení během 1 startu, CpL2, svítidla 1-12, 12x10x5 měření Histogram počtu žhavení během 1 startu, CsL2, svítidla 1-12, 12x10x5 měření



Obrázek 4.9: Četnost počtů žhavení během jednoho startu zářivky, ze 12x10 startů na svítidlech 1÷12 v závislosti na napájecím napětí pro oba typy kompenzace účinníku s tlumivkou L1 a L2

Na výsledcích pro výběrový soubor b) dvanáct svítidel, je patrné zvýšení počtů fází žhavení během jednoho startu u paralelní kompenzace s tlumivkou kategorie B (L2) oproti zapojení s tlumivkou kategorie C (L1). V sériově kompenzované větvi je posun počtu žhavení na jeden start mezi tlumivkami menší a opačný.



Obrázek 4.10: Poměr odporu R_H/R_C v závislosti na celkové době žhavení pro soubor **svítidel 1÷12** pro oba typy kompenzace účinníku s tlumivkou L1 a L2

Na obr. 4.10 je vynesena závislost poměru odporu teplé a studené elektrody zářivky R_H/R_C v závislosti na celkové době žhavení. Do grafů je zanesena i doporučená oblast žhavení podle [Wak07a]. Z obrázků je patrné, že zářivka při paralelní kompenzaci není zapálena, pokud poměr odporů nepřekročí hodnotu cca 3. Výjimkou jsou starty s napájecím napětím 253 V, kde dochází, díky vyššímu napětí, ke startům s nedostatečně nažhavenými elektrodami.

V případě sériové větve DUO kompenzace, je třetina startů provedena s velmi málo nažhavenými elektrodami. Důsledkem je snížení doby života zářivek provozovaných se sériovou kompenzací účinníku.

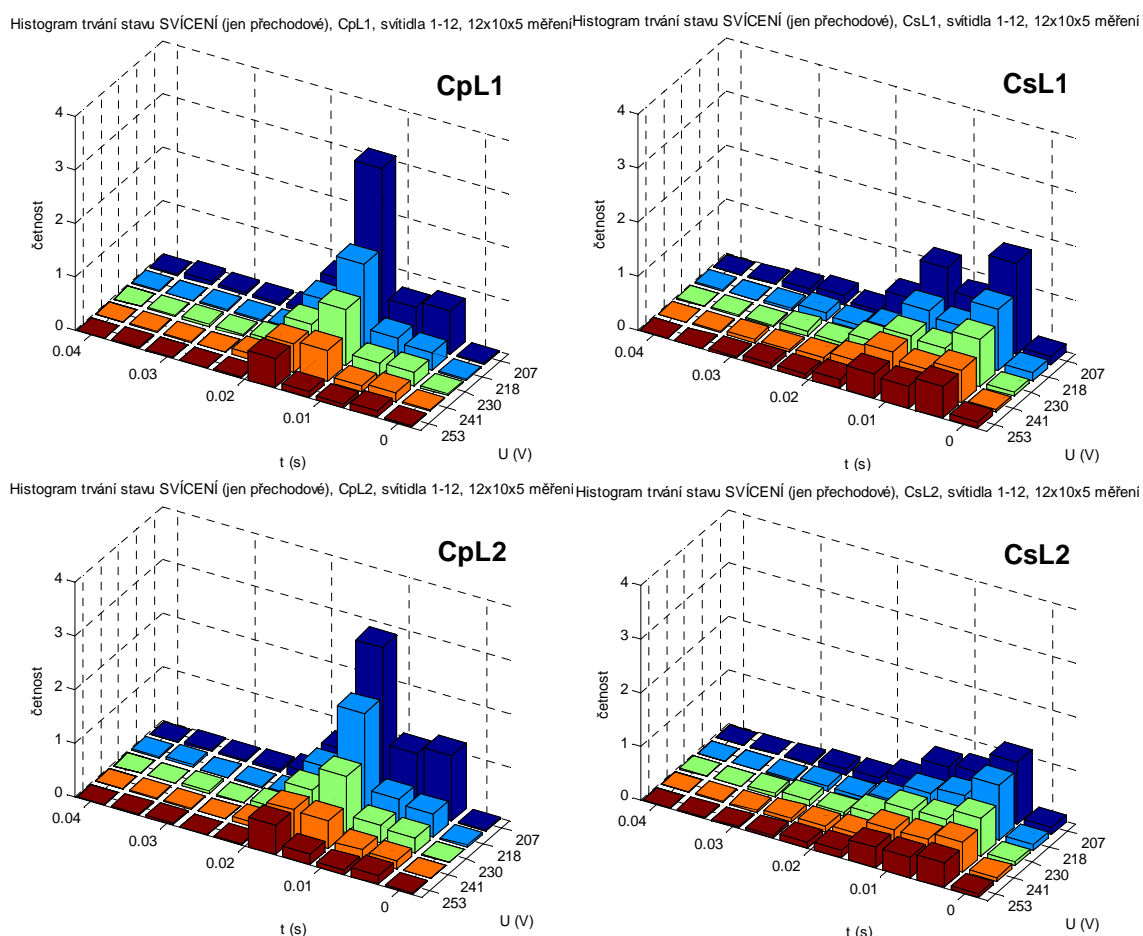
4.4.3 Svícení

Při startování zářivkového svítidla může nastat situace, kdy se výboj v zářivce neudrží. Zářivka se tak nerozsvítí a dochází k opětovnému ohřevu startéru. Neúspěšné úseky stavu „svícení“, respektive četnosti délky jejich trvání, jsou zachyceny na histogramech na obr. 4.11, ze kterých plyne, že tyto krátké záblesky trvají od 1/6 do 1 periody napájecího napětí.

Samozřejmě je, že na konci startovacího procesu byla trubice u každého provedeného měření na nových zářivkových trubicích rozsvícena. Svícení pak trvalo do ukončení vzorkování dat. Tyto úseky byly vždy delší jak jedna sekunda.

U paralelní kompenzace odpovídají tyto krátké záblesky neúspěšným zápalům zářivky, a také zapálení výboje s nedostatečným nažhavením elektrod, kde dochází k přerušování hoření výboje těsně

po jeho zapálení. Střídají se tak stavy „svícení“ a „ohřev startéru“. Vlákna jsou dožhávána kolizemi iontů z výbojového kanálu, a během několika period dochází k rychlé stabilizaci výboje. Při poklesu proudu výbojovým kanálem má při tom výboj tendenci zhasnout.

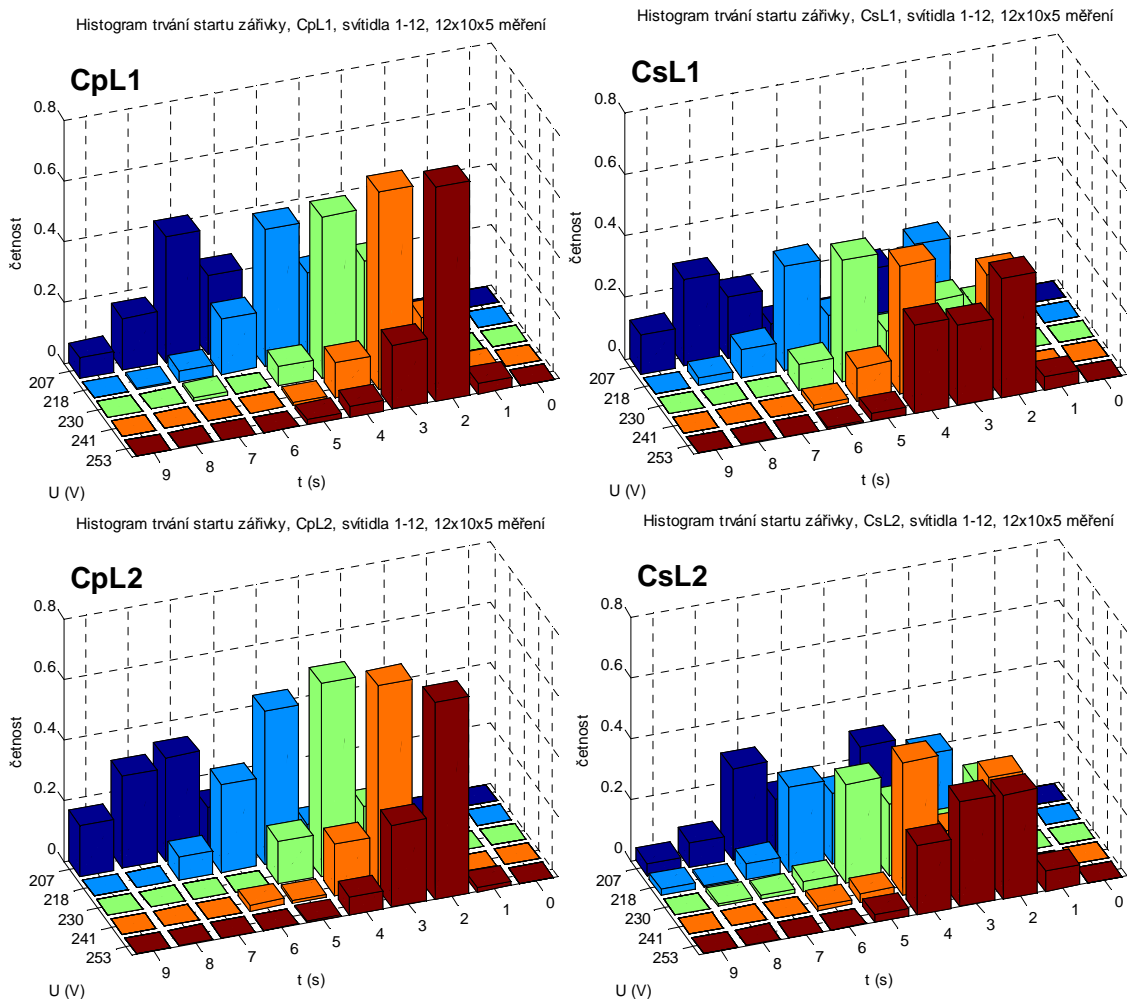


Obrázek 4.11: Četnost doby trvání stavu „svícení“ během 12× 10 startů svítidel 1÷12 v závislosti na napájecím napětí pro oba typy kompenzace účinniku s tlumivkou L1 a L2

V sériově kompenzované větvi DUO zapojení se častěji vyskytují krátké záblesky svícení zářivky, způsobené ztrátou spojení na bimetalových kontaktech startéru. Mechanismus byl již diskutován v kapitole Ohřev startéru. Tyto záblesky mají kratší dobu trvání než částečné hoření výboje při běžném neúspěšném startu. To je dobře patrné na histogramech nárůstem četností trvání záblesků svícení pod 0,01 s, tedy poj $\frac{1}{2}$ periody napájecího napětí.

4.4.4 Celková doba trvání startu zářivky

Celková doba startu zářivky je uvedena na histogramech na obr. 4.12. Délka startu významně závisí na napájecím napětí, a to u všech zapojení. Zapojení s paralelní kompenzací mají menší rozptyl doby trvání startu. Přestože průměrně při jednom startu dochází ke třem žhavením, je celková doba zapálení zářivky překvapivě vyrovnaná. U sériové větve DUO kompenzace je rozptyl doby startu větší. Navíc střední hodnota je posunuta – starty jsou cca o sekundu pomalejší.

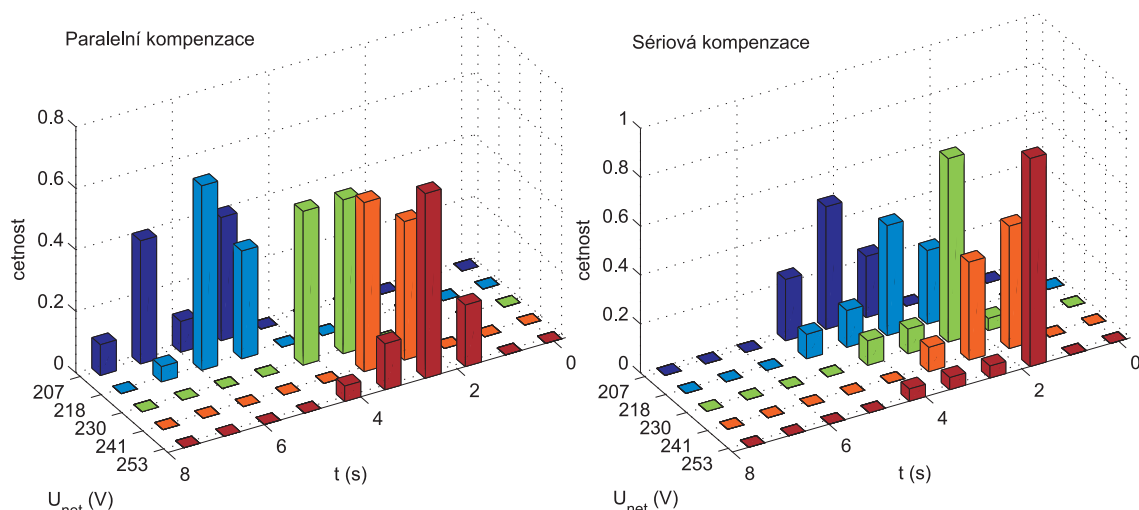


Obrázek 4.12: Četnost celkové doby **startu zářivky** během 12x10 startů **svítidel 1÷12** v závislosti na napájecím napětí pro oba typy kompenzace účinniku s tlumivkou L1 a L2

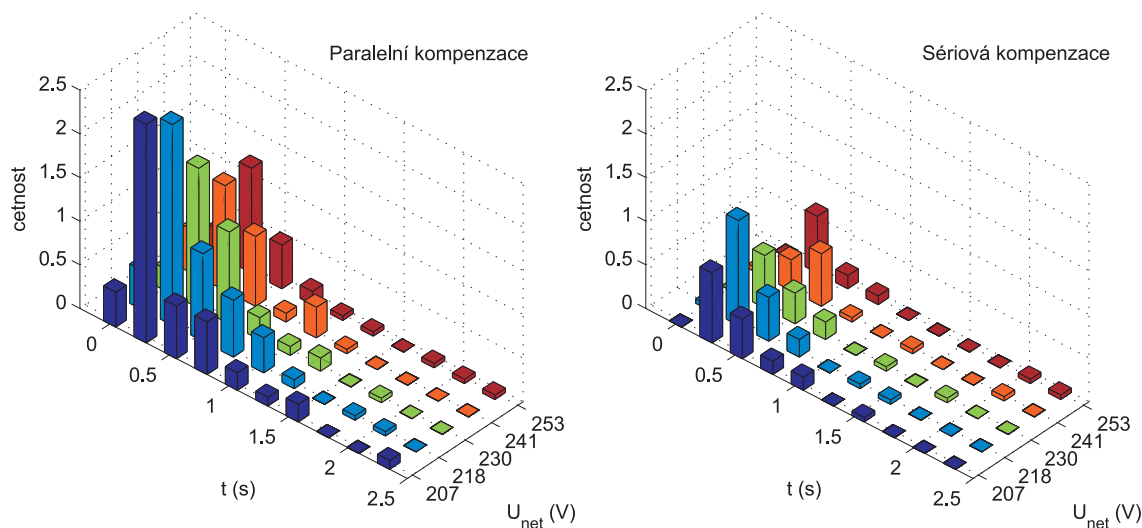
Nejdelším stavem celého rozsvěcování je doba prvního ohřevu startéru po připojení napájení, která je přitom pro oba typy kompenzace téměř totožná stejně tak, jako doba trvání prvního žhavení vláken trubice. Rozdíl je způsoben výrazně větším počtem zapalovacích cyklů u zářivky se sériovou kompenzací.

Měření uvedená v této práci byla prováděna na modelu osvětlovací sítě v laboratoři TUL. Tento model byl pořízen v roce 2004. Následně na něm byla prováděna měření s nevelkým počtem startů. Intenzivnější využití přišlo až v roce 2006, kdy jsem na modelu prováděla systematická měření startů zářivek pro článek [Nov06]. Při tomto měření byla zatížena pouze svítidla č.11 a 12 cca 500 starty. Následně, v rámci diplomové práce Milana Diviše [Div08], byla každá trubice zatížena dalšími cca 500 starty a trubice č.11 a 12 dvojnásobkem. Poté se na přelomu roku provádělo ověřovací měření, kdy byly trubice zatíženy dalšími cca 1000 starty. Porovnáme-li výsledky změřené pro tuto práci s daty naměřenými při prvních měřeních startů, dojdeme k zajímavému zjištění. Zatímco průběh a doba trvání startu se u paralelní kompenzace příliš nezměnily, u sériové kompenzace došlo k výraznému nárůstu počtu žhavicích cyklů a celkové doby startu zářivky, viz obr. 4.13 a 4.14 publikované v [Nov06].

Přestože tehdejší verze vyhodnocovacího algoritmu byla značně odlišná, je evidentní, že došlo k opotřebování komponent svítidel. Celková doba trvání startu je totiž oběma algoritmy vyhodnocena stejně bezchybně. Také stav žhavení lze detekovat snadno a prvotní algoritmus ho detekoval správně.



Obrázek 4.13: Četnost doby **startu zářivky** během jednoho startu **svítidla 11÷12** v závislosti na napájecím napětí pro oba typy kompenzace účinníku s tlumivkou L1, 2×10 měření, původní měření z roku 2006 [Nov06]



Obrázek 4.14: Četnost doby **žhavení vláken zářivky** během jednoho startu **svítidla 11÷12** v závislosti na napájecím napětí pro oba typy kompenzace účinníku s tlumivkou L1, 2×10 měření, původní měření z roku 2006 [Nov06]

Zatímco u prvotního měření [Nov06] startovala větev se sériovou kompenzací nejčastěji s jedním žhavicím stavem, tj. napoprvé (např. při jmenovitém napětí dosahuje úspěšnost startů na poprvé 63 %), tak v sadě měření, vyhodnocované v této práci, klesla úspěšnost startů na poprvé na 30 %.

Podrobnějším studiem oscilogramů bylo zjištěno, že dramaticky narostl počet odskoků kontaktů doutnavkového startéru a rovněž stavy krátkého svícení s přechodem do žhavení u sériové kompenzace. Došlo zjevně k narušení povrchu kontaktů startéru.

Opatřování termoemisní vrstvy elektrod zářivky je také možné. Zářivky č.11 a 12 byly před tímto měřením vystaveny cca 2500 startům, což odpovídá 38 % životnosti podle standardní testovací procedury (3 h zapnuto, 15 min vypnuto). Konce trubic ovšem nejeví nejmenší známky zčernání. Navíc startování při paralelní kompenzaci účinníků vykazuje téměř stejné hodnoty jako v prvotním měření.

Hlavní problém tedy spočívá v degradaci startéru a zvýšení počtu odskoků kontaktů. Sériová kompenzace je na tyto odskoky mnohem citlivější a proto došlo k prodloužení startů.

5 Závěr

V průběhu řešení této disertační práce byly změřeny starty zářivkových svítidel osazených elektromagnetickým předřadníkem ve dvou zapojeních a to s paralelní a DUO kompenzací účinníku. Zároveň byl zjišťován vliv energetické účinnosti tlumivky předřadníku na kvalitu startů zářivky. Cílem bylo objasnit, jaká topologie obvodu svítidla je optimální. Měření byla pro porovnání doplněna změřením startů zářivky s elektronickým předřadníkem.

Předpoklad, že start je vhodným procesem pro diagnostiku všech komponent svítidla, se potvrdil. Vzhledem k nevelkému opotřebením svítidla během měření, nebyly pozorovány žádné změny na parametrech kompenzačních kondenzátorů ani tlumivek předřadníků. To se nedalo ani očekávat, protože během měření byla osvětlovací soustava napájena umělým zdrojem napětí a nebyla tak vystavena přepětím. Rovněž teplota v laboratoři zdaleka nepřekračovala provozní podmínky těchto komponent.

Nejdůležitějším závěrem je srovnání startů při paralelní a duo kompenzací účinníku. Obrovskou výhodou je, že jsem měla k dispozici výsledky z počátků mé práce, kdy byly komponenty svítidel nové a mohla jsem je tak porovnat se stavem po absolvování cca 2500 startů. Až toto srovnání objasnilo rozdíly ve startech svítidel obou typů kompenzace.

Sériová větev svítidla s DUO kompenzací startuje s vysokou pravděpodobností po prvním cyklu žhavení elektrod zářivky. Dochází tak k zapálení výboje zářivky s nedostatečně nažhavenými elektrodami s poměrem odporů teplé ku studené katodě $R_H/R_C < 2$, přitom optimální hodnota je $>4,25$. Dále se v tomto zapojení vyskytuje větší počet nestandardních dějů, kde svítidlo přechází z fáze žhavení elektrod zářivky do svícení a zpět ke žhavení. Tento jev je zřejmě způsoben snížením strmosti nárůstu indukovaného napětí po rozpojení elektrod startéru vlivem sériově zapojeného kompenzačního kondenzátoru. Četnost těchto přechodů se s opotřebením startérů po cca 2500 cyklech zapálení zářivky zvětšila 13krát! Obdobně stoupla 8krát i četnost poruch nazývaných odskok kontaktů doutnavkového startéru. Díky tomuto opotřebením klesla úspěšnost startu na poprvé z 65 % na 30 % a výrazně se prodloužila celková doba startu zářivky. Zatímco s novými komponenty startovaly zářivky v sériové větvi DUO kompenzace rychleji než s paralelní kompenzací, po opotřebením startéru je start sériové větve pomalejší, zatímco u paralelní kompenzace zůstal počet cyklů žhavení a celková doba startu téměř nezměněna.

Důsledkem je, že s novými startéry startují zářivky v sériové větvi DUO kompenzace příliš rychle s nedostatečně nažhavenými elektrodami a s opotřebenými startéry startují pomalu. Současně narůstá vlivem poruch spojení bimetalových kontaktů startéru počet krátkých zápalů výbojového kanálu zářivky. Oba tyto mechanismy zvýšenou měrou opotřebovávají termoemisní vrstvu elektrod a zkracují dobu života zářivkové trubice. Lze tedy konstatovat, že standardní doutnavkové startéry S10 nejsou pro tento provozu vhodné.

Na druhou stranu má DUO kompenzace řadu výhod: snížení stroboskopického efektu, nižší závislost světelného toku na změnách napájecího napětí, větší odolnost proti krátkým výpadkům napájecího napětí, vysoká impedance předřadníku pro vf signály, obzvláště HDO, menší zkrácení odebíraného proudu THDi, odolnost proti oscilacím s parazitní indukčností napájecí sítě, dosahuje lepšího účinníku v místech připojení s větší impedancí napájecí sítě aj. To vše vede k menším ztrátám a

úsporám provozních nákladů osvětlovacích sítí se svítidly v DUO zapojení. Zkrácení doby života při sériové kompenzaci je možno eliminovat použitím elektronického startéru, který z principu netrpí uvedenými poruchami.

Svítidla s paralelní kompenzací prokázala výbornou stabilitu zapalovacího procesu i s degradovanými startéry. Dobré předžhavení elektrod zářivky a stabilní doba zapálení jsou ve prospěch životnosti zářivkových trubíc. U tohoto typu kompenzace je výraznější závislost kvality předžhavení na napájecím napětí. Při podpětí v napájecí síti -10 %, protíná úroveň předžhavení oblast optimálních hodnot, což bude mít za následek zvýšené opotřebování elektrod zářivky.

Vliv kategorie tlumivky v obou zapojeních kompenzace není výrazný. U svítidel s paralelní kompenzací došlo k mírnému zhoršení průměrného předžhavení elektrod, ale v sériové větvi DUO kompenzace naopak došlo ke zlepšení. Zapalování termomechanickým doutnavkovým startérem je značně citlivé na změny podmínek.

Porovnávací měření na svítidla s elektronickým předřadníkem prokázalo vysokou stabilitu zapalovacího procesu. Úroveň předžhavení elektrod byla stabilní, mírně pod hranicí optimálních hodnot.

Provedená analýza startů tedy potvrdila předpoklady ovlivňující dobu života zářivkových trubíc. Nejvhodnější jsou elektronické předřadníky, kde je úroveň předžhavení přesně definovaná a stabilní. Druhým v řadě je zapojení svítidel s elektromagnetickým předřadníkem s paralelní kompenzací účinníku, a tedy i nekompensované větve v DUO zapojení, kde je předžhavení elektrod na dobré úrovni a je stabilní i s degradovanými startéry. Nejhorších výsledků dosáhly sériově kompenzované větve v DUO zapojení. S novými startéry je předžhavení příliš krátké. S opotřebovanými startéry zde dochází ke zvýšenému počtu krátkých zápalů s nedostatečně nažhavenými elektrodami. To potvrzuje známý vliv na snížení doby života cca o 20-30 %.

DUO zapojení je tedy vhodné pro rozsáhlejší instalace s větším počtem svítidel tam, kde nejsou použity drahé kvalitní trubice a nedochází k častému zapínání osvětlovací soustavy. V takovém případě se plně projeví výhody tohoto zapojení, zejména lepší a stabilnější odběrové parametry. Snížená životnost trubíc pak nebude hrát významnou roli.

Instalace, u kterých je vyžadováno časté rozsvěcování nebo ve kterých jsou použity drahé trubice, je výhodnější použít elektronické předřadníky. Ty jsou obecně lepší jak v odběrových parametrech, tak z pohledu životnosti trubíc.

V průběhu řešení této práce byla vypracována metodika měření a zejména automatického vyhodnocování startovacího procesu zářivkového svítidla. Vytvořený program je univerzální a detekuje bezchybně všechny stavy zapalovacího děje u svítidel s paralelní i sériovou kompenzací účinníku.

Teoretická část práce shrnuje současné poznatky o životnosti komponent zářivkového svítidla. Zejména dobře je zpracována oblast optimalizace startu zářivky a mechanismy poškození kompenzačních kondenzátorů.

Logickým pokračováním této práce by bylo posuzování startů elektronických předřadníků, zejména předřadníků stmívatelných. Podmínky jejich provozu jsou již velmi dobře prozkoumány. Vhodné by bylo ověřit např. jejich robustnost k poruchám napájecí sítě, potlačení flikru nebo porovnat předřadníky různých výrobců.

6 Citovaná literatura

- [Ach90] ACHA, E. SEMLYEN, A. RAJKOCVIC, N. A harmonic domain computational package for nonlinear problems and its application to electric arc. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 5. No. 3. July 1990. pg. 1390-1397, ISSN 0885-8977
- [Amp08] Poměr prodeje elektronických a elektromagnetických předřadníků. Elkovo-Čepelík, OSRAM. [ústní sdělení], Veletrh Amper 2008
- [App00] APPLICATION GUIDE TO 3 'TL', CFL, QL AND HALOGEN LAMPS LAMP CONTROL GEAR [online]. [s.l.] : [s.n.], [200?] [cit. 2009-04-26]. Dostupné z WWW: <http://www.lighting.philips.com/de_de/tools_downloads/downloads/technology/downloads/applgfluo.pdf>.
- [Bie02] BIERMAN, A, O'ROURKE, C. DENG, L. NARENDRAN, N. Testing a Lamp Life Predictor for Instant-Start Fluorescent Systems. IESNA 2002, Annual Conf. Lighting Updates. Pr. 141-156.
- [Bus09] BUSO, D. et al. Predictive Evaluation of Fluorescent Lamp Lifetime. Industry Applications Society Annual Meeting, 2009. IAS 2009. ISSN: 0197-2618
- [Car98] CARRILLO, Camilo. CIDRÁS, José. Harmonic model for the fluorescent lamp. IEEE. 1998. ISBN 0-7803-5105-3
- [Cor08] CORAZZA, A.; GIORGI, S.; MASSARO, V. Mercury Dosing in Fluorescent Lamps. Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS '08. pg.1-4. ISSN: 0197-2618
- [ČTK10]. PHILIPS: LED osvětlení překoná tržbami tradiční zdroje kolem 2015. O Světle, aktuálně o světle a osvětlení. [online] [cit. 7. 12. 2010], Dostupné na www: <<http://www.osvetle.cz/index.php/profesional/48-ostatniprofesional/54-philips-led-vize.html>>
- [Daš02] DAŠEK, Martin, et al. Osvětlování vnitřních prostorů: Praktické rady nejen pro elektrikáře [online]. Praha : SEVEn, 2002 [cit. 2009-10-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.efficientlighting.net/formerdoc/pubdoc/ELI68.pdf>>.
- [Div08] DIVIŠ, Milan. Startování zářivkových svítidel s paralelní a s DUO kompenzací účinníku. Liberec, 2008. 68 s. Diplomová práce. Technická Univerzita v Liberci.
- [Dor02] DORLEIJN, J.W.F.; GOUD, L.H. Standardisation of the static resistances of fluorescent lamp cathodes and new data for preheating: pg. 665 - 672 vol.1. In Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Pittsburgh, PA, USA, 13.-18.10.2002 [online].[cit. 2010-09-27]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1044169>. ISBN 0-7803-7420-7.
- [Ele10] Scribd [online]. 2010-01-13 [cit. 2010-05-13]. 2. Elektrický proud v plynech a ve vakuu. Dostupné z WWW: <<http://www.scribd.com/doc/25145163/2-Elektrick%C3%BD-Proud-v-Plynech-a-Ve>>.
- [EU05] EU-Compliant Magentic Ballasts, Situation with effect from 21 November 2008. Vossloh-Schwabe. 2005. [online] [cit. 7. 12. 2010] Dostupné na www: <http://www.vossloh--sschwabe.com/images/onecms/site/publications/2000_55_EG_GB.pdf>
- [Gou02] GOUD, L.H. DORLEIJN, J.W.F. Standardized data for dimming of fluorescent lamps. IEEE 2002. pg. 673-679. ISBN 0-7803-7420-7
- [Ham97] HAMMER, E.E.; HAAS, D. PHOT'OCCELL ENHANCED TECHNIQUE FOR

- MEASURING STARTING ELECTRODE TEMPERATURES OF FLUORESCENT LAMPS : str. 2313 - 2333 vol.3 . In Industry Applications Conference ,5.10.1997 - 9.10.1997 [online]. [cit. 2010-11-28]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=626386>. ISBN 0-7803-4067-1.
- [Hig06] High Accuracy Ambient Light Sensor SFH 5711. Osram. 2006-08-03. [cit. 7. 7. 2008] Dostupné z www: <<http://www.datasheet4u.com/download.php?id=581207>>
- [Hsi98] HSIEH, Guan-Chyun; LIN, Chang-Hua; YU, Ben-Jong Igniting Behavior of the Fluorescent Lamp in High-Frequency Operation : pg. 964 - 969 vol.2 . In Industrial Electronics ,31.8.1998 - 4.9.1998 [online]. [cit. 2010-11-28]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=724224>.ISBN 0-7803-4503-7.
- [IEC60081] IEC60081. 2003
- [JiY95] JI, Yunfen; DAVIS, Robert Starting Performance Of High-Frequency Electronic Ballasts For 4-Foot Fluorescent Lamps : pg. 2083 - 2089 vol.3 . In Industry Applications Conference, 8.10.1995 - 12.10.1995 [online]. [cit. 2010-11-28]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=530568>. ISBN 0-7803-3008-0.
- [JiY99] JI, Yunfen. DAVIS, Robert. O'ROURKE, Conan. CHUI, Edmod Wai Mun. Compatitility Testing of Fluorescent Lamp and Ballast Systems. IEEE Trans. On Industry Appl. Vol. 35. No. 6. Nov. 1999. pg. 1271-1276. ISSN 0093-9994
- [Kin64] KINSKÝ, Vlastimil. Zářivky. Praha: SNTL, 1964. 116 s.
- [Kli03] KLIEN, D. A sensing and regulation concept for high end dimming ballasts. Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Vol. 2. pg. 785-790.
- [Kop07] KOPRNICKÝ, Jan. Electric Conductivity Model of Discharge Lamps. [Ph.D. Thesis], Tech. Univ. of Liberec, Univ. Paul Sabatier Toulouse III. 2007
- [LED10] Cree's New Lighting-Class LEDs Shatter Industry Performance Standards. Cree, Inc. 2010. [online], [cit. 7. 12. 2010]. Dostupné na www: <http://www.cree.com/press/press_detail.asp?i=1289396994146>
- [Lin08] OSRAM [online]. 2008 [cit. 2009-10-15]. Lineární zářivky. Dostupné z WWW: <http://www.osram.cz/osram_cz/KATALOG/04_LINEARNI_ZARIVKY.pdf>.
- [Mad92] MADER, U. HORN, P. A Dynamic Model for the Electrical CHaracteristics of Fluorescent Lamps, IEEE. 1992. ISBN 0-7803-0634-1
- [Mad96] MADER, Urs. Steady*State Analysis of a Voltage-Fed Inventur with Sekond-Order Network and Fluorescent Lamp Load. IEEE, 1996. pg. 609-615. ISBN 7-7803-3044-7
- [Mah99] MAHAJAN K. S., KHARE P. K., CHANDRA B. P. The kinetic limitation of anti-Stokes luminescence of Er³⁺ and Yb³⁺ doped infrared upconversion materials. Journal of physics. Vol. 53, No. 5 November 1999. pp. 903–910
- [Res03] Reducing Barriers to Use of High efficiency Lighting Systems. Final Report, Year 2. Lighting Research Center. Rensselaer Polytechnic Institute. New York, 2003.
- [Ric03] RICHTER, Aleš, NOVÁK, Miroslav. Science and technology of power systems for light sources State of the art, Future Challenges. [pevný disk] Tutorial conf. ECMS, 2003
- [Sha06] SHAFI, M.A.; MCMAHON, R.A. Influence of Voltage and Frequency Dimming on Power Losses in HF Electronic Ballasts for Compact Fluorescent Lamps. Industry Applications

Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Vol. 5. pg. 2193-2197

- [Tam03] TAM, P.W. et al. Practical evaluation of dimming control methods for electronic ballasts. Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Vol. 2. pg. 799-804.
- [Tet01] TETRI, Eino. Effect of dimming and cathode heating on lamp life of fluorescent lamps. [Ph.D. Thesis] Helsinki University of Technology
- [Tet97] TETRI, Eino. Profitability of Switching off Fluorescent Lamps: Take-a-break. Right Light 4. 1997. Vol. 1.
- [Tla10] TLAIS, Z. et al. Auxiliary heating influence on barium loss from fluorescent lamp electrode under HF operation. Plasma Science, 2010 IEEE International Conf.
- [Wak06] WAKABAYASHI, F.T., et al Setting the Preheating Process of Electronic Ballasts for Hot-Cathode Fluorescent Lamps, considering the Rh /Rc Ratio: pg. 2396 - 2401 . In IEEE Industrial Electronics, IECON 06.-10.11.2006 [online]. [cit. 2010-09-27]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4153116>. ISBN 1-4244-0390-1.
- [Wak07a] WAKABAYASHI, F.T., et al Setting the Preheating and Steady-State Operation of Electronic Ballasts, Considering Electrodes of Hot-Cathode Fluorescent Lamps: pg. 899 - 911 . In Power Electronics, IEEE Transactions [online]. [cit. 2010-09-27]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4182484>. ISSN 0885-8993.
- [Wak07b] WAKABAYASHI, F.T., et al Model for Electrodes' Filaments of Hot Cathode Fluorescent Lamps, During Preheating With Constant rms Current: pg. 719 - 726 . In Power Electronics, IEEE Transactions [online] [cit. 2010-11-28]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4182483>. ISSN 0885-8993.
- [Wha02] WHARMBY, David. Science and technology of light sources, State of the art, Future Challenges. [pevný disk] Meeting of COST project, Toulouse 2002.
- [Zis03] ZISSIS, Georges. BUSO, David. Using full Physical Model for Fluorescent Lamps in Ballast Engineering. IEEE Industry Appl. Conference, 2003. Pg. 537-541. ISBN 0-7803-7883-0
ISSN 1070-9878.

7 Vlastní publikace

- [Šol04] ŠOLCOVÁ, Veronika. Zářivky. K⁷ vědecko- populární časopis TU v Liberci. 2004, 4, s. 5-8. ISSN 1214-7370.
- [Šol05a] ŠOLCOVÁ, Veronika. Stavový model startování zářivkového svítidla. K⁷ vědecko- populární časopis TU v Liberci. 2005, 4, s. 30-35. ISSN 1214-7370.
- [Nov06] Novák, M., Václavík, J., Šolcová, V. Stavový model startování zářivkového tělesa II. – měření. K⁷ vědecko populární časopis TU v Liberci. 1/2006. s. 9–16. ISSN 1214-7370
- [Šol11a] ŠOLCOVÁ, Veronika; NOVÁK, Miroslav. Standardizace statického odporu a energie potřebná pro předžhavení elektrod zářivky. *Elektrorevue : časopis pro elektrotechniku* [online]. 21. 03. 2011, 2011/12 - 21. 3. 2011, [cit. 2011-10-07]. Dostupný z WWW: <<http://elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika-vykonova-elektronika->

elektrotechnologie/0/standardizace-statickeho-odporu-a-energie-potrebna-pro-predzhaveni-elektrod-zarivky>. ISSN 1213-1539.

[Šol11b] ŠOLCOVÁ, V.; NOVÁK, M. Analýza startů zářivky s elektromagnetickým předřadníkem. *Electroscope : online časopis pro elektrotechniku* [online]. 22. 07. 2011, č. 3, [cit. 2011-10-07]. Dostupný z WWW:

<http://147.228.94.30/index.php?option=com_content&view=article&id=258:analyza-start-zarivky-s-elektromagnetickym-pedadnikem&catid=34:islo-32011-&Itemid=48>. ISSN 1802-4564.

[Šol11c] ŠOLCOVÁ Veronika, NOVÁK Miroslav. Modeling Fluorescent Lamp Electrode Preheating Powered by Electronic Ballast. In 2011 International Conference on Applied Electronic. Vyd. 1. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. s. 353-357. ISSN 1803-7232, ISBN 978-80-7043-987-6

Doktorandka spolupracovala na řešení EU projektu COST 529 „Účinnější osvětlení v 21. století, Zářivkové předřadníky s vyšší účinností“ (2001-2006 Richter)

Název disertační práce: Analýza startů zářivkového osvětlení s elektromagnetickým předřadníkem

Autor: Ing. Šolcová Veronika
Studijní program: 2612V Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 2612V045 Technická kybernetika
Pracoviště: Katedra elektrotechniky a elektromechanických systémů
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Technická Univerzita v Liberci

Školitel: Ing. Miroslav Novák, Ph.D.
Sazba: Microsoft Office 2007
Vydání: první
Náklad: 10 výtisků

© Ing. Veronika Šolcová, 2010

