

Analýza startů zářivky s elektromagnetickým předřadníkem

V. Šolcová¹, M. Novák¹

¹ Ústav mechatroniky a technické informatiky, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
TU v Liberci,

Studentská 2/1402, Liberec

E-mail: veronika.solcova@gmail.com, miroslav.novak@tul.cz

Anotace:

Článek se zabývá detailnější analýzou startů zářivky s elektromagnetickým předřadníkem. Teoretická část se věnuje stavovému popisu startování a provozu zářivkového svítidla, včetně uvedení náhradních obvodů jednotlivých stavů – ohřev startéru, žhavení vláken zářivky, svícení. V experimentální části je popsán způsob provedení měření průběhu startů, jejich analýzy a jsou zde prezentovány výsledky v podobě histogramů četností dob trvání stavů v závislosti na napájecím napětí zářivkových svítidel pro paralelní i sériovou (DUO) kompenzaci účinnku.

Abstract:

This paper deals with analysis of fluorescent lamp starts for luminaries with the electromagnetic ballast. The theoretical part describes the state description of the fluorescent lamp start and operation including the equivalent circuits of individual states – the glow starter heating, the fluorescent lamp filament preheating, the lightening. The experimental part presents the lamp start measurement method and the subsequent analysis. The results are presented in form of histograms of the individual states duration in dependence on the supply voltage of the fluorescent lamp for both power factor compensation types of the luminary – parallel and lead-lag (DUO).

ÚVOD

Zářivkové osvětlení je z ekonomických důvodů prioritní volbou v mnoha oblastech použití a v současné době tvoří asi 78 % umělého světla po celém světě. Jejich podíl na spotřebované energii pro osvětlování však činí pouze 17 % [1]. Zářivky vynikají vysokou účinností, rovnoměrným osvětlením a dlouhou dobou života. Příkladem použití jsou rozsáhlé osvětlovací soustavy veřejných interiérů typu administrativních budov, obchodních center, divadel, škol, továren, ale také pouliční, dopravní a nouzové osvětlení.

V centru zájmu stále stojí snaha o prodloužení doby života zářivek. Nejvíce pozornosti budí termoemisioní vrstva katod. Dřívější publikace se zabývaly její optimální tloušťkou a složením, současné články se soustřeďují na optimální tepelné poměry katod při startech [2], [3], [4], [5], [6], [7] a při stmívání [8], [9], které výrazně ovlivňují dobu života zářivky. Řeší se optimální nažhavení během teplého startu [10], zkrácení života při studených startech [11], [12] a optimalizace startu při současném stmívání [13]. Druhým aktuálním tématem je optimalizace dávkování rtuti do zářivky [14]. Z ekologických důvodů je snahou přiblížit se fyzikálnímu minimu. Problémem je přesné dávkování při výrobě a pokles obsahu rtuti díky reakci s držáky elektrod a s vrstvou luminoforu.

Dalším důležitým úkolem je zvyšování účinnosti. Zde hraje klíčovou roli opět katodový úbytek a kvalita termoemisioní vrstvy katod. Z provozně technických důvodů je ovšem nutné nastolit takové

standardy, aby zářivky mohly pracovat s různými předřadníky při zachování hlavních parametrů. Všechny komponenty svítidla proto podléhají standardizaci. Aktuální vývoj v oblasti osvětlování zářivkami dokládají i nově revidované normy [IEC60081].

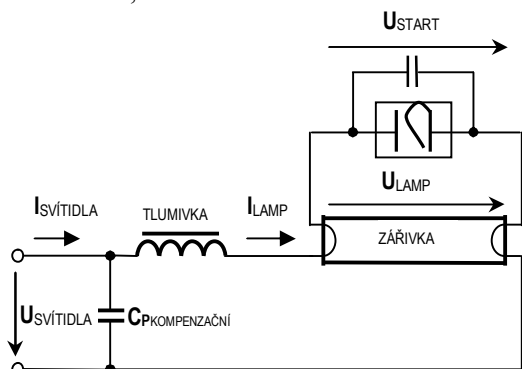
Ve snaze o minimalizaci dopadu na životní prostředí je současně trh osvětlovacích systémů regulován, např. v EU je to nařízením ES č. 245/2009, kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2005/32/ES na ekodesign zářivek bez elektronického předřadníku, vysoce intenzivních výbojek a předřadníků svítidel, jež mohou sloužit k provozu těchto zářivek a výbojek [16]. V nejnovější úpravě, tato směrnice zavádí maximální ztráty svítidla jako celku a mění tak význam samostatně definované energetické kategorie pro předřadníky. Směrnice obsahuje řadu kontroverzních prvků, např. srovnává svítidla s elektronickými a magnetickými předřadníky při různých výstupních světelných tocích. Vztah pro bázi účinnosti předřadníků EBB [16] neopodstatněně definuje nižší požadavky na elektronické předřadníky pro kategorii B1 jsou vyžadovány nižší ztráty než pro A3! Po přepočtu splňují magnetické předřadníky kategorie B1 požadavky na účinnost elektronických předřadníků kategorie A2 [17]. Elektromagnetické předřadníky tedy splňují náročné požadavky platné legislativy a stále zabírají díky svým vlastnostem a nižší ceně významné místo na trhu nových svítidel.

Život zářivky je rozhodujícím způsobem ovlivněn podmínkami, za kterých zářivka startuje, tzn., že je závislá na životě všech komponent, ze kterých sestává celé svítidlo, a které jsou ovlivňovány

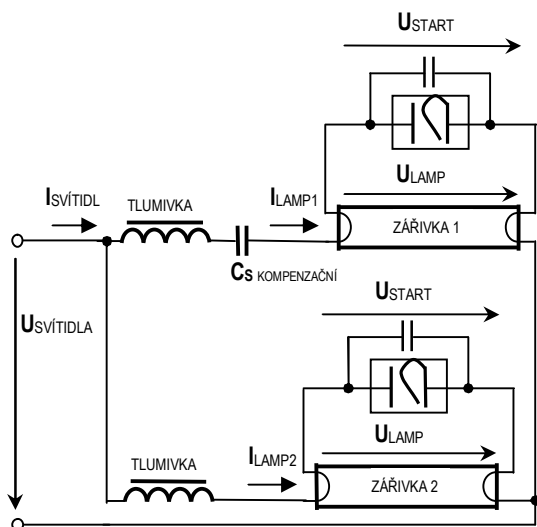
různými činiteli při jejím startu a provozu. Zapálení výboje je komplikovaný proces, kterého se aktivně účastní všechny komponenty svítidla. To skýtá jedinečnou možnost pro jejich posuzování a diagnostiku.

STAVOVÝ DIAGRAM STARTU

Základní zapojení svítidla s paralelní a sériovou kompenzací účinníku jsou uvedeny na následujících obrázcích 1, 2.



Obrázek 1: Zapojení s paralelní kompenzací účinníku



Obrázek 2: Zapojení se sériovou, resp. DUO, kompenzací účinníku

Startovací proces zářivky je v tomto článku popsán stavovým diagramem, viz obr. 3, klasifikovaným základními stavy: vypnutí, ohřev startéru, žhavení elektrod zářivky a svícení.

Po *připojení napájení* je na elektrody startéru přivedeno plné síťové napětí. Vzhledem k tomu, že v baňce startéru je obsažen zředěný plyn a elektrody jsou blízko u sebe, dojde mezi nimi k doutnavému výboji. Doutnavý výboj při hoření uvolňuje teplo, díky kterému se elektroda startéru vyrobená z bimetalu postupně *prohřeje* a prohne, což má za následek sepnutí obou elektrod.

Po sepnutí startéru začne elektrodami procházet zkratový proud tlumivky, který se uzavírá přes vlákna

zářivky a dochází ke *žhavení elektrod zářivky* na teplotu, při níž dochází k termoemisi z vláken zářivky. Plynná náplň zářivky se díky tomu ionizuje. Rozmezí teplot doporučené pro zahřátí elektrod je, dle [Wak06], 700 °C až 1000 °C.

Sepnutím kontaktů přestane hořet ve startéru doutnavý výboj, nastává ochlazení bimetalu a po krátkém časovém intervalu dojde k *rozpojení elektrod startéru*. Proud, tekoucí vlákny zářivky a tlumivkou, se přeruší, a tím se na tlumivce naindukuje napětí okolo 500 V, které se sčítá se síťovým napětím. Je-li součet obou napětí dostatečný, dochází k *zapálení zářivkového výboje*.

Napětí je dostatečné pouze v případě, nastane-li přerušení proudu ve správném fázovém okamžiku, tj. v době, kdy neprochází střídavý proud v obvodu vláken a tlumivky okolím nuly. V opačném případě k *zapálení zářivkového výboje nedojde* a celý startovací proces začíná opětovným ohřevem startéru. K nezapálení výboje dochází i vlivem dalších okolností např. na konci života zářivky nebo při nízkých teplotách.

Ve stavovém diagramu figuruje také stav *odskok kontaktů*. Protože přítlak bimetalové elektrody startéru není vždy spolehlivý, dochází ke krátkodobým odskokům v 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 v diagramu vyznačen šedou barvou.

Pro DUO, resp. sériovou, kompenzací 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. Na výsledcích lze 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 nestihne neuplatnit.

Jednotlivé stavy jsou navzájem propojeny tzv. přechody, přičemž všechny se mohou v praxi uplatnit. Přechody vyznačené tečkovaně jsou přechody nestandardní. Zbývající přechody, vyznačené čárkovaně, odpovídají poruchovým stavům a přerušují napájecího napětí. Poruchové přechody nebyly vyšetřovány.

Odpor vláken

Odpor vláken zářivky $R_{VLÁKEN}$ byl změřen dvojím způsobem. Odpor chladného vlákna při pokojové teplotě multimetrem a Ohmovou metodou při úrovni žhavicího proudu:

$$\text{multimetrem} \quad R_{VLÁKEN} = 2 \cdot 2,5 = 5 \Omega$$

Ohmovou metodou pro obě vlákna:

$$U_1 = 7,5 \text{ V}; I_1 = 0,53 \text{ A} \quad R_{VLÁKEN} = 2 \cdot \frac{U}{I} = 28 \Omega$$

$$U_2 = 6,7 \text{ V}; I_2 = 0,53 \text{ A} \quad R_{VLÁKEN} = 2 \cdot \frac{U}{I} = 25 \Omega$$

Odpor startéru

Odpor startéru je určen doutnavým výbojem. Přibližná hodnota byla určena ze zápalného napětí startéru a proudu jím procházejícím. Při měření bylo zvyšováno napětí na startéru, a jakmile došlo k zažehnutí doutnavého výboje ve startéru, bylo odečteno zápalné napětí a proud. Průměrná hodnota odporu startéru vypočtená z naměřených dat činí $R_{STARTÉRU} = 520 \pm 30 \text{ k}\Omega$.

Indukčnost a odpor tlumivky

Tyto hodnoty lze vypočítat z hodnot napětí U , proudu I , činného příkonu P a jalového příkonu Q , naměřených na analyzátoru sítě. Při měření se zapojí do série s tlumivkou reostat, kterým se nastaví jmenovitý proud protékající tlumivkou. Pro výpočty byly použity vztahy

$$X_L = \frac{Q}{I^2}, \quad L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f}, \quad R = \frac{P}{I^2}, \quad (2)$$

a průměrné hodnoty vyšly $L_{tl} = 1,36 \text{ H}$; $R_{tl} = 53,10 \Omega$.

Náhradní obvod zářivky

Protože odběr výboje zářivky má značný induktivní charakter, jak je patrné z níže uvedeného výpočtu, lze výboj zářivky nahradit ideálním sériovým zapojením RL.

Zářivce Philips Master TL-D 36 W / 840, použité v tomto experimentu, odpovídají katalogové hodnoty $P = 36 \text{ W}$, $U = 103 \text{ V}$ a $I = 0,44 \text{ A}$, ze kterých lze určit odpor a indukčnost zářivkového výboje následovně:

$$R_{LAMP} = \frac{P}{I^2} = \frac{36}{0,44^2} = 186 \Omega. \quad (3)$$

$$S_{LAMP} = U \cdot I = 103 \cdot 0,44 = 45,3 \text{ VA}. \quad (4)$$

$$Q_{LAMP} = \sqrt{S_{LAMP}^2 - P^2} = 27,5 \text{ VAr}. \quad (5)$$

$$X_L = \frac{Q}{I^2} = 142 \Omega. \quad (6)$$

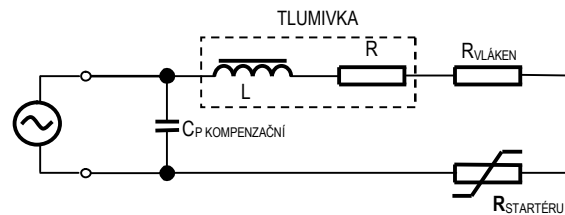
$$L_{LAMP} = \frac{X_L}{\omega} = 0,45 \text{ H}. \quad (7)$$

Náhradní obvody pro jednotlivé stavy startu a jejich výsledné impedance

Obvody pro paralelní kompenzaci

Ohřev startéru

Po připojení síťového napětí dojde mezi elektrodami startéru k doutnavému výboji. V obvodu se proto uplatní nejen náhradní obvod tlumivky, kompenzační kondenzátor a odpor vláken, ale i odpor doutnavého výboje startéru.



Obrázek 4: Náhradní obvod svítidla s paralelní kompenzací pro stav „Ohřev startéru“

Impedance pro sériovou větev obvodu se určí jako součet impedancí jednotlivých prvků v dané větvi

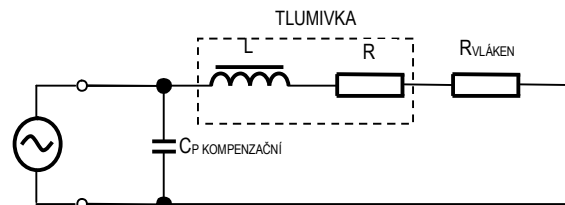
$$Z_I = Z_L + Z_R + Z_{Rvl} + Z_{Rstart}. \quad (8)$$

Celková impedance svítidla je potom

$$Z_{celk} = \frac{Z_I \cdot Z_C}{Z_I + Z_C} = \frac{U}{I}. \quad (9)$$

Žhavení

Vlivem doutnavého výboje se bimetalová elektroda zahřeje a prohne, čímž dojde ke spojení elektrod. Odpor startéru klesne prakticky na nulu. Startérem prochází proud přes vlákna zářivky a dochází k jejich žhavení a termoemisi. Proud je při žhavení omezen tlumivkou a odporem vláken zářivky. Induktivní odběr proudu je tak silný, že jej kompenzační kondenzátor vykompenzuje jen částečně.



Obrázek 5: Náhradní obvod svítidla s paralelní kompenzací pro stav „Žhavení zářivky“

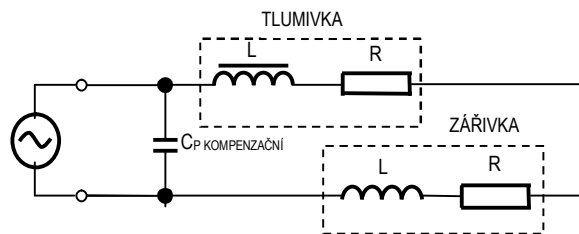
Impedance sériové větve tohoto obvodu se vypočte jako

$$Z_I = Z_L + Z_R + Z_{Rvl} \quad (10)$$

a celková impedance při žhavení je dána vzorcem (9).

Svícení

Po přerušení proudového obvodu při žhavení se na tlumivce naindukuje napětí, které se sečte se síťovým. Výsledný součet obou napětí zapálí výboj na elektrodách zářivky.



Obrázek 6: Náhradní obvod svítidla s paralelní kompenzací pro stav „Svícení“

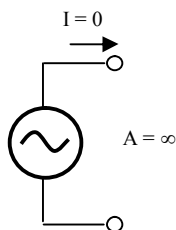
Při svícení se v obvodu uplatní náhradní obvody tlumivky a zářivky. Impedance sériové větve obvodu při svícení se vypočte jako

$$Z_1 = Z_{Lil} + Z_{Ril} + Z_{Lzár} + Z_{Rzár} \quad (11)$$

Celková impedance obvodu při svícení je opět dána vztahem (9).

Vypnutí

Při vypnutí je zářivkové svítidlo odpojeno vypínačem a jeho impedance je tedy nekonečně velká.



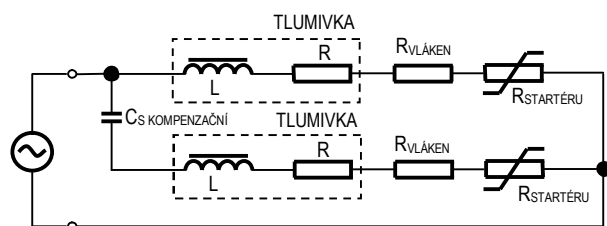
Obrázek 7: Náhradní obvod pro stav „Vypnutí“

Odskok kontaktů

Náhradní obvod pro odskok kontaktů odpovídá obvodu pro ohřev. Doba trvání odskoku kontaktů je minimální, a proto dochází k potížím při zjišťování tohoto stavu z měření dle parametrů A a φ .

Obvody pro sériovou (DUO)kompenzaci

Ohřev startéru



Obrázek 8: Náhradní obvod svítidla se sériovou kompenzací pro stav „Ohřev startéru“

Impedance nekompenzované větve se určí jako součet impedancí jednotlivých prvků v dané větvi

$$Z_1 = Z_L + Z_R + Z_{Rvl} + Z_{Rstart} \quad (12)$$

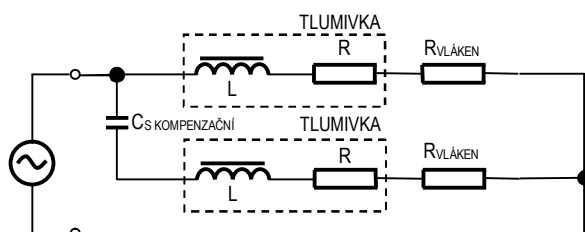
Podobně se určí komplexní impedance větve kompenzované

$$Z_2 = Z_C + Z_L + Z_R + Z_{Rvl} + Z_{Rstart} \quad (13)$$

Celková impedance obvodu při ohřevu startéru je pak dána součtem převrácených hodnot impedancí samostatných větví

$$Z_{celk} = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{U}{I} \quad (14)$$

Žhavení



Obrázek 9: Náhradní obvod svítidla se sériovou kompenzací pro stav „Žhavení zářivky“

Impedance nekompenzované větve je dána

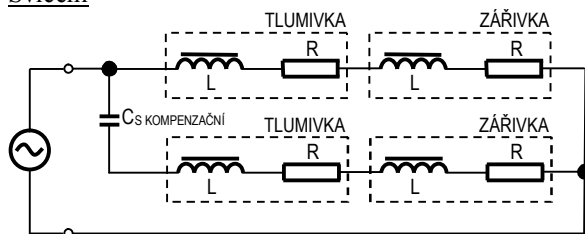
$$Z_1 = Z_L + Z_R + Z_{Rvl} \quad (15)$$

Podobně se určí komplexní impedance větve kompenzované

$$Z_2 = Z_C + Z_L + Z_R + Z_{Rvl} \quad (16)$$

Celková impedance obvodu při stavu žhavení je pak dána vztahem (14).

Svícení



Obrázek 10: Náhradní obvod svítidla se sériovou kompenzací pro stav „Svícení“

Impedance nekompenzované větve je dána

$$Z_1 = Z_L + Z_R + Z_{Lzár} + Z_{Rzár} \quad (17)$$

Podobně se určí komplexní impedance větve kompenzované

$$Z_2 = Z_C + Z_L + Z_R + Z_{Lzár} + Z_{Rzár} \cdot \quad (18)$$

Celková impedance obvodu při svícení je pak dána dle vzorce (14).

Při poruše jedné ze zářivek DUO obvodu zůstane příslušná část obvodu nefunkční a obvod se bude chovat jako samostatná větev. Celková impedance pak bude rovna impedanci samostatné větve s funkční zářivkou.

Tabulka 1: Impedance svítidel v různých stavech

PROVOZNÍ STAV	Paralelní kompenzace CpL1		
	Z (Ω)	φ (°)	I (A)
OHŘEV STARTÉRU	730	-87,4	0,32
ŽHAVENÍ	820	68,3	0,28
ODSKOK STARTÉRU	-	-	-
SVÍCENÍ	1520	26,1	0,15
VYPNUTÍ	∞	-	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

AUTOMATICKÁ DETEKCE STAVŮ

Pro automatickou detekci stavů a přechodů mezi jednotlivými stavy byl vytvořen skript v jazyce MATLAB.

Podmínky pro detekci stavů byly zobrazeny tak, aby program mohl bezchybně pracovat jak s obvody s paralelní kompenzací účinníku, tak i kompenzací sériovou (resp. DUO). Program využívá jednak průběhy obvodových veličin svítidla (napětí a proud ze sítě, napětí na startéru, napětí a proud zářivkou), tak signál z čidla světelného toku. Výstupem programu jsou doby trvání jednotlivých stavů a četnosti přechodů mezi nimi.

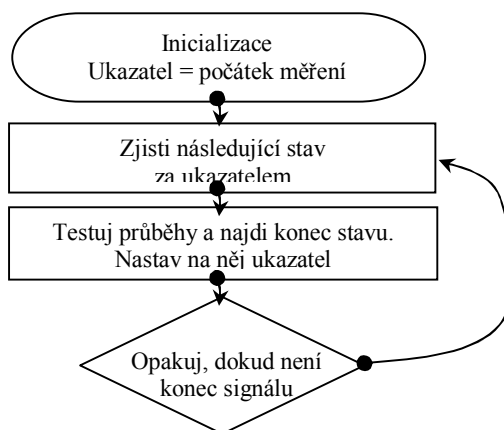
Stručný vývojový diagram tohoto programu je uveden na obrázku 11.

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.

Testy příslušnosti k jednotlivým stavům jsou prováděny na různě dlouhých datových úsecích.

Typicky odpovídají době trvání 1/8, 1/4, 1/2, 1 a 5 periodám 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 vypočteného z náhradního obvodu svítidla je příslušný stav ohodnocen bodovým skóre. Na konci všech testů je vybrán stav s nejvyšším bodovým ohodnocením a považován za stav následující.



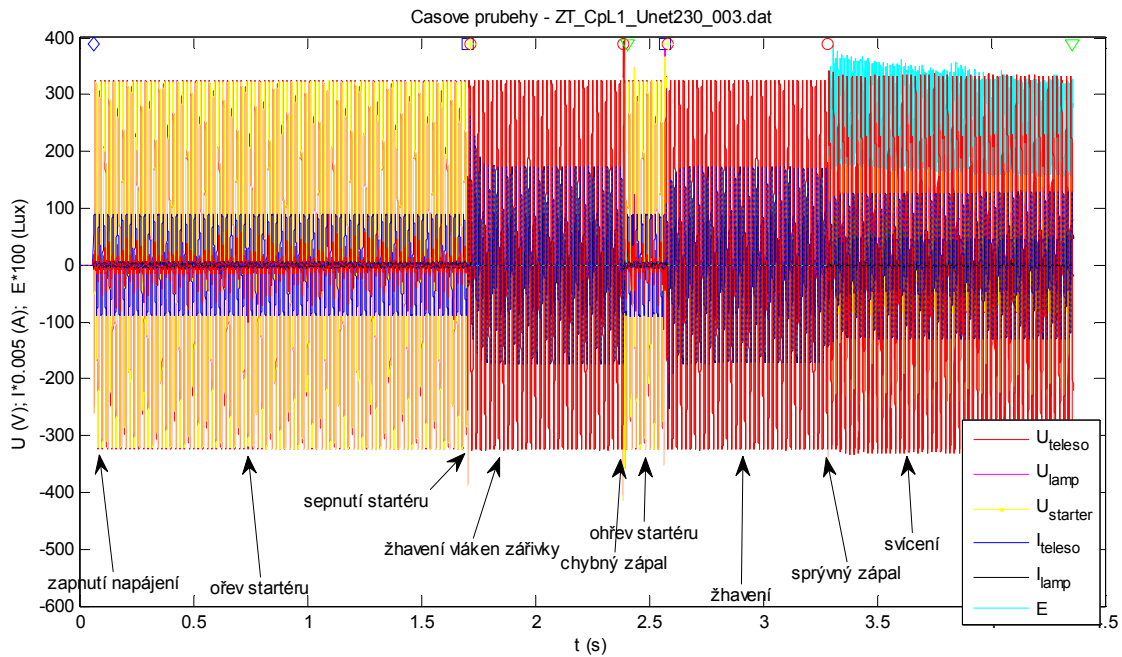
Obrázek 11: Stručný vývojový diagram vyhodnocovacího programu

Nalezené stavy se vyznačují grafickými značkami do zobrazeného oscilogramu pro kontrolu uživatelem, viz tabulka 2.

Záznam typického průběhu startování zářivky s paralelní kompenzací účinníku demonstruje obr. 12, ze kterého je zřetelný chybný zápal po nažhavení vláken zářivky. Dochází tak k opakování celého cyklu s výsledkem správného zápalu zářivky a následným svícením. Na obrázku jsou zobrazeny všechny měřené veličiny. Pod horním okrajem jsou dobře patrné grafické značky vytvořené skriptem pro automatické rozpoznávání stavů.

Tabulka 2: Význam grafických značek vymezujících rozhraní stavů

Značka	Význam
◇	Konec stavu bez napájení, začátek ohřevu startéru
□	Konec stavu ohřev startéru
○	Konec stavu žhavení
*	Odskok kontaktů startéru – žhavení pokračuje
▽	Konec stavu svícení
★	Konec stavu nárůst napětí na kondenzátoru sériové kompenzace



Obrázek 12: Záznam průběhu startu zářivky v zapojení s paralelní kompenzací (CpL1) dle obr. 2.3. Tlumivka DFT 5336 kategorie C, napájení 230 V

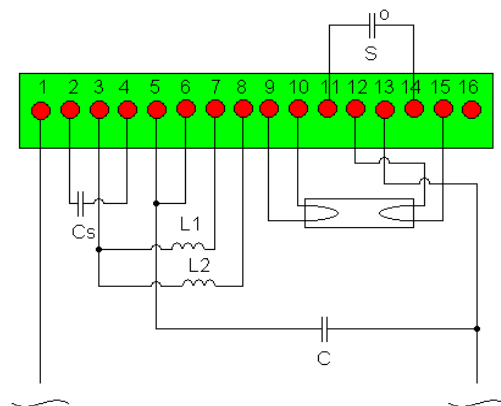
Měření startů zářivkového svítidla

Analýza startů zářivkového osvětlení s elektromagnetickým předřadníkem byla realizována na modelu osvětlovací sítě na Ústavu mechatroniky a technické informatiky Technické univerzity v Liberci.



Obrázek 13: Model osvětlovací sítě

Model je tvořen šesti osvětlovacími svítidly a umožňuje snadno a rychle překonfigurovat zapojení osvětlovacího svítidla, např. změnit typ kompenzace účinníku. Jedno svítidlo přitom sestává ze čtyř zářivek, panelu osazeného výbroji 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. 14.



Obrázek 14: Schéma zapojení jednoho svítidla v modelu osvětlovací sítě – propojovací konektor

Celková analýza startů byla prováděna pro jmenovité napětí 230 V s odchylkami $\pm 5\%$ a $\pm 10\%$, v zapojení s DUO a s paralelní kompenzací účinníku a pro dva typy tlumivek L1, L2 v různých kategoriích účinnosti (C, B1), přičemž výsledky v tomto článku jsou uvedeny pouze pro jeden typ tlumivky L1 (kategorie C). Měření tak proběhlo celkem pro pět různých napětí v zapojení s DUO a s paralelní kompenzací účinníku, s tlumivkami L1 a L2 a bez kompenzace s tlumivkou L1 s označením CpL1, CpL2, CsL1, CsL2 a L1.

Pro statistické vyhodnocení se měřilo ve dvou výběrových souborech: a) na jedné zářivce, b) na 12 zářivkách, přičemž 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 osvětlenost ze snímače umístěného v blízkosti povrchu zářivky. Realizace měření proběhla na 18kanálovém přístroji EMU-2 se vzorkovací frekvencí 12,8 kHz, ovládaným programem v jazyce Delphi. Zároveň byl vytvořen skript v jazyce MATLAB pro vyhledávání jednotlivých stavů během startu zářivky a pro automatickou detekci přechodů mezi nimi, který pracuje s výše uvedenými zaznamenanými oscilogramy obvodových veličin.

Zpracováním dat byly získány stavové diagramy (viz obr. 3) ohodnocené četnostmi přechodů mezi jednotlivými stavy startování zářivkového svítidla. Hodnoty četností pro jmenovité napětí sítě jsou uvedeny v tabulkách 3 a 4. Hodnoty 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, mají četnosti těchto přechodů nulové hodnoty.

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 zdaleka nejsou zanedbatelné.

Tabulka 3: Četnosti přechodů mezi stavy pro zářivku s **paralelní** kompenzací účinníku (CpL1) 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: Četnosti přechodů mezi stavy pro zářivku s **sériovou** kompenzací účinníku (CsL1) a napájecím napětím 230 V, svítidlo 11, 50 měření

PŘECHOD		DO STAVU					
		VYP- NUTÍ	OHŘEV STARTÉRU	ŽHA- VENÍ	ODSKOK	SVI- CENÍ	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

Na rozdíl od paralelní kompenzace, přibyl u sériové kompenzace stav „nárůst napětí před zapálením“, plynoucí ze změn startovacího procesu, způsobených sériovým zařazením kompenzačního kondenzátoru. Poměr tohoto jevu ke 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 narostl oproti kompenzaci paralelní i počet „odskoků kontaktů startéru“ a to o 90 %. 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 změna proudu je malá. 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 zářivek v zapojení se sériovou kompenzací.

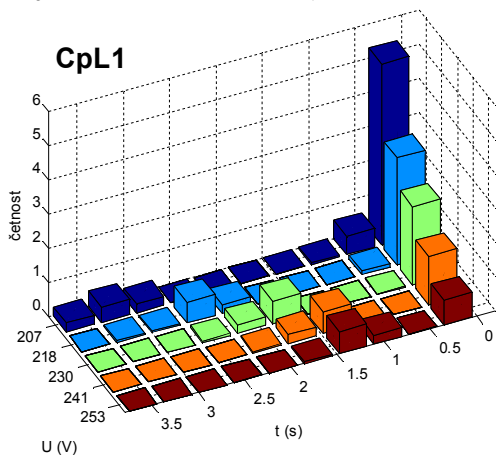
Histogramy dob trvání jednotlivých stavů

Z důvodu větší přehlednosti jsou naměřené hodnoty zobrazeny prostřednictvím histogramů, které zachycují průměrné četnosti jednotlivých stavů v závislosti na délce trvání stavu a na velikosti napájecího napětí zářivkových svítidel.

Ohřev startéru

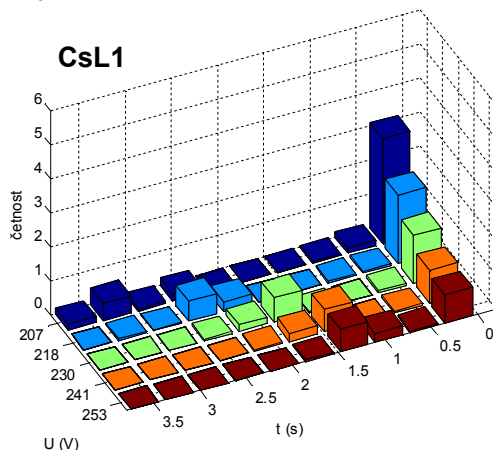
Na obr. 15, 16 jsou vyneseny četnosti trvání stavu „ohřev startéru“. První ohřev startéru po přivedení napájení na svítidlo je reprezentován nižšími sloupci v časech nad jednu sekundu, což odpovídá normální funkci startéru. Součet četností těchto malých sloupců musí tedy být vždy jedna.

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



Obrázek 15: Četnost doby trvání stavu „ohřev startéru“ během 12× 10 startů svítidel 1÷12 v závislosti na napájecím napětí pro paralelní kompenzaci účinníku s tlumivkou L1

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



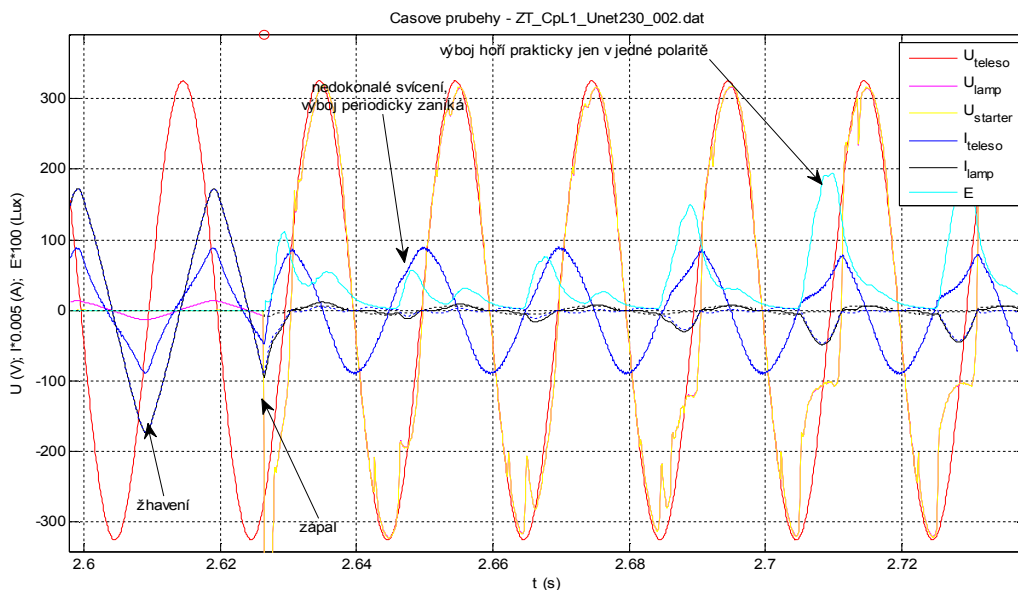
Obrázek 16: Četnost doby trvání stavu „ohřev startéru“ během 12× 10 startů svítidel 1÷12 v závislosti na napájecím napětí pro sériovou kompenzaci účinníku s tlumivkou L1

Výrazná závislost ohřevu na napájecím napětí není lineární a odpovídá ploše sinusového průběhu napětí na svítidle $U_{TELESO} = U \cdot \sin(\omega t)$, který je větší než zápalné napětí startéru

$$\int_{U_{ZAPAL}}^{\infty} U_{TELESO} du > U_{ZAPAL}$$

Tato část grafů je

neoměnná pro různé tlumivky i zapojení kompenzace. 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.



Obrázek 17: Svícení s nízkou teplotou elektrod (CpL1)

V grafech na obr. 15, 16 jsou dále patrné vysoké četnosti stavu „ohřev startéru“ s časem pod jednu

sekundu, které odpovídají dalším krátkým ohřevům startéru, kdy se nepovedlo zářivku rozsvítit napoprvé

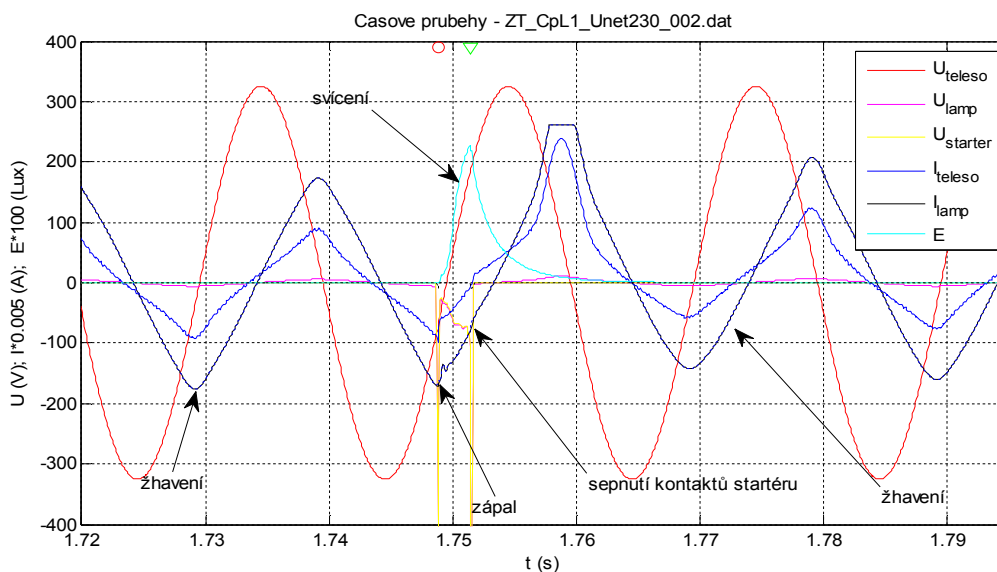
a bylo nutné její dožhavení, nebo se jednalo o další přechodové stavy s nestabilním výbojem.

Příkladem jednoho z nestabilních stavů jsou cyklické přechody „svícení- ohřev startéru- svícení“, viz obr. 17.

Ty lze vysvětlit nedostatečným žhavením vláken zářivky. Termoemise vláken s nízkou teplotou vede na velký katodový úbytek. Výboj má tendenci zanikat. Obvyklé je, že výboj hoří jen v jedné polaritě napájecího napětí a to v tom směru, na kterém katoda dosáhla vyšší teploty. K průchodu proudu výbojem zářivky dochází pouze v části periody, kdy napětí na zářivce nabývá hodnot v okolí své amplitudy.

Situace se může vyvíjet podle dvou scénářů. Buď se katody dopadem iontů stále více zahřívají a podíl svícení zářivky postupně narůstá až k úplnému svícení, nebo převládá chladnutí elektrod a podíl svícení ubývá až úplnému zániku a zářivka přejde do stavu ohřevu startéru.

Startér je ovšem aktivní i v této době nedokonalého svícení. Napětí na startéru totiž zpravidla minimálně v jedné polaritě překračuje jeho zápalné napětí. Může se tedy stát, že tento stav ukončí startér sepnutím kontaktů. Zastoupení tohoto přechodu mezi stavy je malé.



Obrázek 18: Nestandardní přechod „žhavení – svícení“ a „svícení – žhavení“, paralelní kompenzace účinníku (CpL1)

Dalším nestandardním přechodem je opětovné sepnutí startéru v době, kdy už výboj zářivky hoří, viz obr. 18. Vznik tohoto přechodu je v principu podobný přechodu „odskoku kontaktů startéru“. Je způsoben malým přitlakem kontaktů na konci doby jejich chladnutí. Výboj startéru se opětovně zapaluje, dochází k ohřevu jeho kontaktů až do spojení. Přerušování obvodu je v porovnání s přechodem „odskoku kontaktů“ delší, a zářivka se tak stihne zapálit a vygenerovat světlo. Dochází rovněž k přechodovému ději a přesycení tlumivky.

Při porovnání obou kompenzací jsou četnosti následných ohřevů startéru v sériové větvi DUO kompenzace mnohem menší, což znamená, že zapalení 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 přerušování obvodu při odskoku k prudkému nárůstu indukovaného napětí cca 300 V/μs a průrazu nevodivého kontaktu. Sériový kompenzační

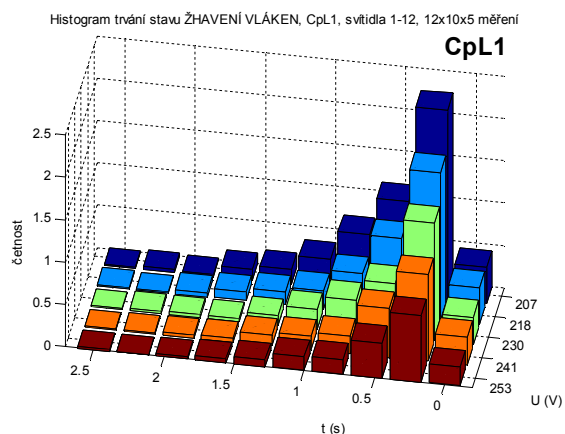
kondenzátor způsobuje snížení strmosti nárůstu napětí na kontaktech startéru < 200 V/μs. Vodivost kontaktů není obnovena, ale napětí je dostatečné k proražení výbojového kanálu zářivky. To způsobí krátkodobý záblesk světla, který je ukončen opětovným spojením kontaktů startéru.

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

Žhavení

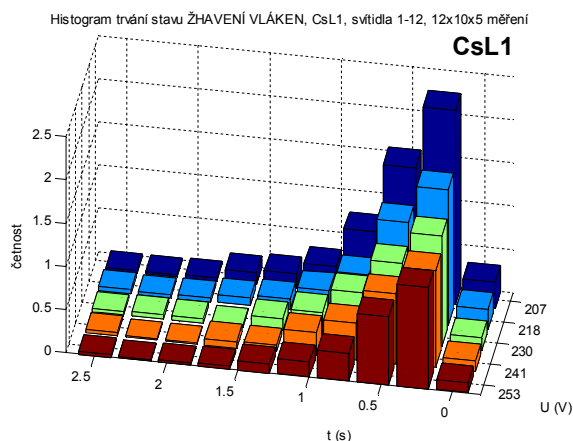
Trvání stavů žhavení, jak vyplývá z histogramů na obr. 19, 20 je pro sériovou větev DUO kompenzace mírně delší než u kompenzace paralelní. Výjimkou jsou velmi krátká žhavení zářivky pod 0,3 s. Těch je u sériové větve DUO kompenzace výrazně méně.

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



Obrázek 19: Četnost doby trvání stavu „žhavení vláken zářivky“ během 12×10 startů **svítidel 1÷12** v závislosti na napájecím napětí pro paralelní kompenzaci účiníku s tlumivkou L1

Protože jsou zářivkové startéry sestaveny tak, aby za určitou dobu rozpojily žhavicí obvod zářivky, pak za stejnou dobu, bude mít menší žhavicí proud za následek nižší teplotu na předžhavicích elektrodách a zážeh zářivky při nedostatečně nažhavených elektrodách. Dochází tak k poškození emisní vrstvy elektrod v důsledku vytrhávání materiálu elektrickým polem a ke zkrácení života 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.

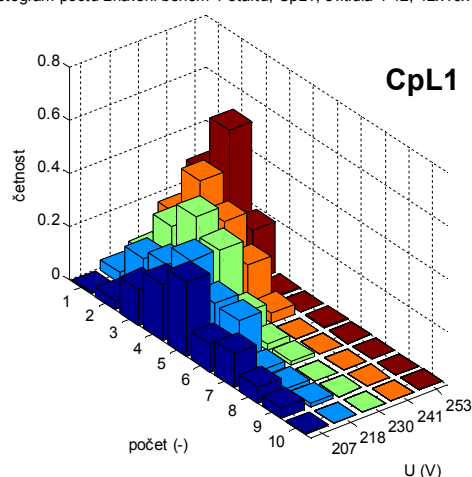


Obrázek 20: Četnost doby trvání stavu „žhavení vláken zářivky“ během 12×10 startů **svítidel 1÷12** v závislosti na napájecím napětí pro sériovou kompenzaci účiníku s tlumivkou L1

Na obr. 21, 22 jsou vyobrazeny histogramy počtu úseků žhavení během jednoho startu.

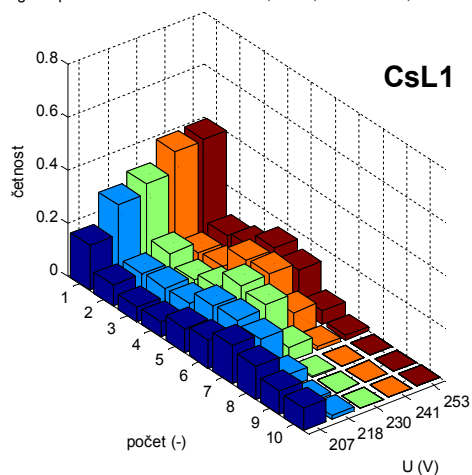
Paralelní kompenzace zpravidla nespustí napoprvé. Pro jmenovité napětí potřebuje cca 3 cykly žhavení. Naopak sériová větev DUO kompenzace s pravděpodobností 30 % startuje napoprvé, tj. s jedním cyklem žhavení během jednoho. Pokud se start na poprvé nepovede, je naopak počet žhavení větší než u paralelní kompenzace. Zjevný je nárůst počtu žhavení s klesajícím napájecím napětím.

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



Obrázek 21: Četnost počtů žhavení během jednoho startu zářivky, ze 12×10 startů na **svítidlech 1÷12** v závislosti na napájecím napětí pro paralelní kompenzaci účiníku s tlumivkou L1

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



Obrázek 22: Četnost počtů žhavení během jednoho startu zářivky, ze 12×10 startů na **svítidlech 1÷12** v závislosti na napájecím napětí pro sériovou kompenzaci účiníku s tlumivkou L1

Svícení

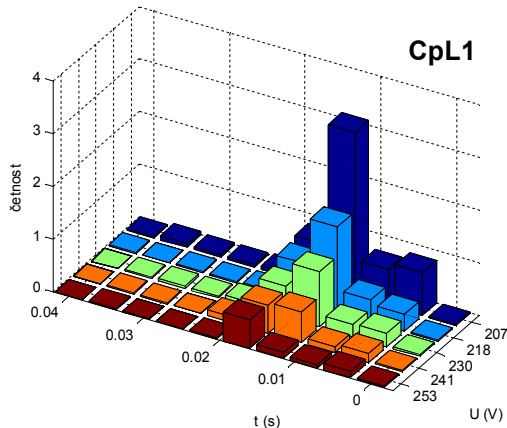
Při startování zářivkového svítidla může nastat situace, kdy se výboj v zářivce neudrží. Zářivka se tak nerozsvítí a dochází k opětovnému ohřevu startéru. Neúspěšné úseky stavu „svícení“, respektive četnosti délky jejich trvání, jsou zachyceny na histogramech na obr. 23, 24, ze kterých plyne, že tyto krátké záblesky trvají od 1/6 do 1 periody napájecího napětí.

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

Ve všech případech je zjevná závislost na napájecím napětí svítidla, kde roste počet neúspěšných startů a celková doba startu zářivky.

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.

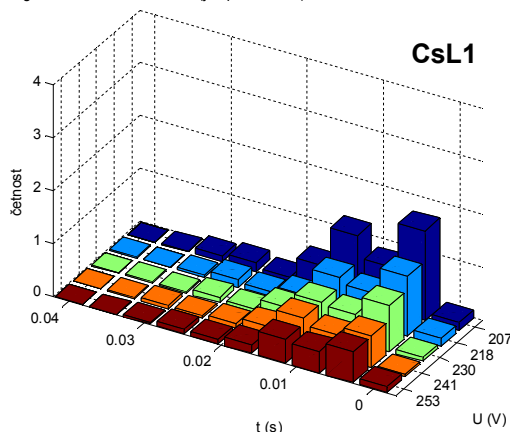
Histogram trvání stavu SVÍCENÍ (jen přechodové), CpL1, svítidla 1-12, 12x10x5 měření



Obrázek 23: Četnost doby trvání stavu „svícení“ během 12×10 startů svítidel 1=12 v závislosti na napájecím napětí pro paralelní kompenzaci účinníku s tlumivkou L1

V sériově kompenzované větvi DUO zapojení se častěji vyskytují krátké záblesky svícení zářivky, způsobené ztrátou spojení na bimetalových kontaktech 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 ½ periody napájecího napětí.

Histogram trvání stavu SVÍCENÍ (jen přechodové), CsL1, svítidla 1-12, 12x10x5 měření

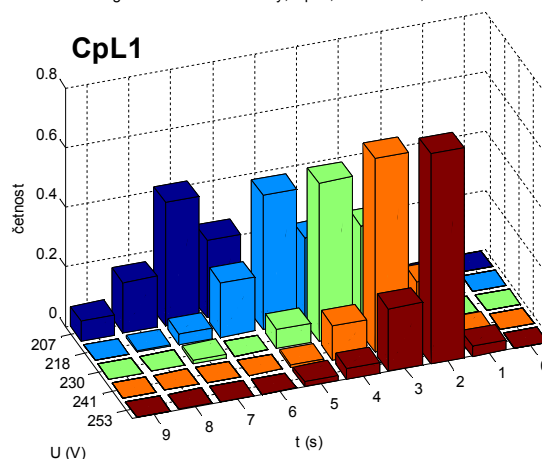


Obrázek 24: Četnost doby trvání stavu „svícení“ během 12×10 startů svítidel 1=12 v závislosti na napájecím napětí pro sériovou kompenzaci účinníku s tlumivkou L1

Celková doba trvání startu zářivky

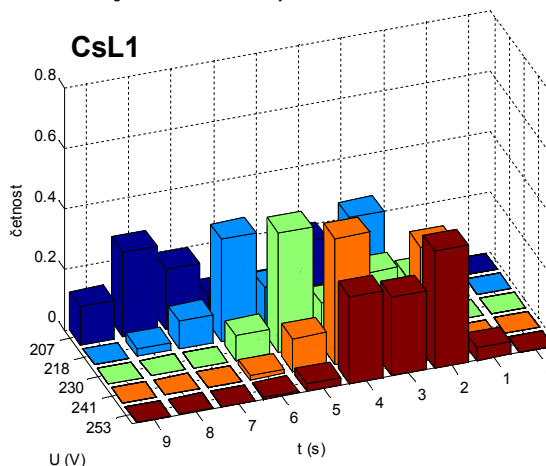
Celková doba startu zářivky je uvedena na histogramech na obr. 25, 26.

Histogram trvání startu zářivky, CpL1, svítidla 1-12, 12x10x5 měření



Obrázek 25: Četnost celkové doby startu zářivky během 12×10 startů svítidel 1=12 v závislosti na napájecím napětí pro paralelní kompenzaci účinníku s tlumivkou L1

Histogram trvání startu zářivky, CsL1, svítidla 1-12, 12x10x5 měření



Obrázek 26: Četnost celkové doby startu zářivky během 12×10 startů svítidel 1=12 v závislosti na napájecím napětí pro sériovou kompenzaci účinníku s tlumivkou L1

Délka startu významně závisí na napájecím napětí, a to u obou 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.

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 zářivky. Rozdíl je způsoben výrazně větším počtem startovacích cyklů u zářivky se sériovou kompenzací.

ZÁVĚR

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.

Svítidla s paralelní kompenzací prokázala výbornou stabilitu startovacího procesu. Dobré předžhavení elektrod zářivky a stabilní doba zapálení jsou ve prospěch života zářivek. 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.

Uvedené měření jednoznačně prokázalo horší parametry startu svítidel s DUO kompenzací, které zapříčiňuje snížení života zářivek. DUO zapojení je tedy vhodné pro rozsáhlejší instalace s větším počtem svítidel tam, kde nedochází k častému zapínání osvětlovací soustavy. V takovém případě se plně projeví výhody tohoto zapojení, zejména lepší a stabilnější odběrové parametry, imunita vůči proudovým oscilacím a potlačení stroboskopického efektu. Snížený život zářivek pak nebude hrát významnou roli.

LITERATURA

- [1] RICHTER, A.; NOVÁK, M. Science and technology of power systems for light sources State of the art, Future Challenges. [pevný disk] Tutorial conference ECMS, 2003
- [2] JI, Y., et al. Compatibility testing of fluorescent lamp and ballast systems. *IEEE Journals: Industry Applications*. 1999, vol. 35, no. 6, s. 1271 - 1276. ISSN 0093-9994.
- [3] JI, Y.; DAVIS, R. Starting performance of high-frequency electronic ballasts for four-foot fluorescent lamps. *IEEE Journals: Industry Applications*. 1997, vol. 33, no. 1, s. 234 - 238. ISSN 0093-9994.
- [4] HAMMER, E.E.; HAAS, D. Phot'ocell enhanced technique for measuring starting electrode temperatures of fluorescent lamps. In *IEEE Conferences: Industry Applications*. New Orleans: IEEE, 1997, vol. 3, s. 2313 - 2333. ISBN 0-7803-4067-1.
- [5] WAKABAYASHI, F.T., et al. Setting the Preheating Process of Electronic Ballasts for Hot-Cathode Fluorescent Lamps, considering the R_H/R_C Ratio. In *IEEE Conferences: IEEE Industrial Electronics*. Paris: IEEE, 2006. s. 2396 - 2401. ISBN 1-4244-0390-1.
- [6] BUSO, D., et al. Predictive Evaluation of Fluorescent Lamp Lifetime. In *IEEE Conferences: Industry Applications*. Houston: IEEE, 2009. s. 1 - 7. ISBN 978-1-4244-3475-6
- [7] TLAIS, Z., et al. Auxiliary heating influence on barium loss from fluorescent lamp electrode under HF operation. In *IEEE Conferences: Plasma Science*. Norfolk: IEEE, 2010. s. 1. ISBN 978-1-4244-5474-7.
- [8] Final Report: Year 2. In *Reducing Barriers to Use of High efficiency Lighting Systems*. New York: Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, 2003. s. 107.
- [9] TETRI, E. *Effect of dimming and cathode heating on lamp life of fluorescent lamps*. Helsinki, Finland, 2001. 120 s. Doctoral Thesis. Helsinki University of Technology, Lighting Laboratory.
- [10] DORLEIJN, J.W.F.; GOUD, L.H. Standardisation of the static resistances of fluorescent lamp cathodes and new data for preheating. In *IEEE Conferences: Industry Applications*. Pittsburgh: IEEE, 2002, vol. 1, s. 665 - 672. ISBN 0-7803-7420-7
- [11] TETRI, E. Profitability of Switching off Fluorescent Lamps: Take-a-break. *Right Light* [online]. 1997, vol. 1, no. 4, s. 113 - 116, [cit. 2011-02-23]. Dostupný z WWW: <http://www.iaeel.org/IAEEL/Archive/Right_Light_Proceedings/Proceedings_body/BOK4/RL4tetri.pdf>.
- [12] BIERMAN, A., et al. Testing a Lamp Life Predictor for Instant-Start Fluorescent Systems. In *IESNA Annual Conference Technical Papers*. New York: IESNA, 2002. s. 141-156.
- [13] DORLEIJN, J.W.F.; GOUD, L.H. Standardized data for dimming of fluorescent lamps. In *IEEE Conferences: Industry Applications*. Pittsburgh: IEEE, 2002, vol. 1, s. 673 - 679. ISBN 0-7803-7420-7.
- [14] CORAZZA, A.; GIORGI, S.; MASSARO, V. Mercury Dosing in Fluorescent Lamps. In *IEEE Conferences: Industry Applications Society Annual Meeting*. Edmonton: IAS, 2008, s.1 - 4. ISBN 978-1-4244-2278-4.
- [15] EU. NAŘÍZENÍ KOMISE (ES) č. 244/2009 ze dne 18. března 2009, kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2005/32/ES, pokud jde o požadavky na ekodesign nesměrových světelných zdrojů pro domácnost.

In *Úřední věstník Evropské unie*. 2009, L 76, s. 3-16.

- [16] EU. NAŘÍZENÍ KOMISE (ES) č. 245/2009 ze dne 18. března 2009, kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2005/32/ES, pokud jde o požadavky na ekodesign zářivek bez integrovaného předřadníku, vysoce intenzivních výbojek a předřadníků a svítidel, jež mohou sloužit k provozu těchto zářivek a výbojek, a kterým se zrušuje směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/55/ES. In *Úřední věstník Evropské unie*. 2009, L 76, s. 17-44.
- [17] FASSBINDER, Stefan. Optimal selection and operation of ballasts for fluorescent lamps. In *The Global Community for Sustainable Energy Professionals* [online]. Düsseldorf: Deutsches Kupferinstitut Berufsverband, Transl. to Eng. from Elektropraktiker, HUSS-MEDIEN GmbH, 10400 Berlin, ed. 11/03, ed. 04/05, ed. 11/06, ed. 12/06, ed. 12/08, ed. 05/09 [cit. 2011-07-12]. Dostupné z WWW: <www.leonardo-energy.org/webfm_send/4751>.