



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky**

**Zpětný vliv moderních osvětlovacích soustav na elektrickou síť**  
**Electromagnetic disturbance of modern lighting systems**

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Studijní obor: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Marek Bálský, Ph.D.

**Bc. Tomáš Zeifart**

---

**Praha 2018**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zeifart** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **409033**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Zpětný vliv moderních osvětlovacích soustav na elektrickou síť**

Název diplomové práce anglicky:

**Electromagnetic disturbance of modern lighting systems**

Pokyny pro vypracování:

1. Požadavky technických norem na omezení zpětného vlivu moderních osvětlovacích soustav na elektrickou síť.
2. Postup vyhodnocení zpětného vlivu moderních osvětlovacích soustav na elektrickou síť.
3. Analýza zpětného vlivu reálné osvětlovací soustavy na elektrickou síť.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN EN 61000-3-2. Elektromagnetická kompatibilita (EMC): Část 3-2: Meze ? Meze pro emise proudu harmonických (zařízení se vstupním fázovým proudem  $\leq 16$  A).
- [2] ČSN EN 55015 ed. 4 (334215) Meze a metody měření charakteristik vysokofrekvenčního rušení způsobeného elektrickými svítilnami a podobným zařízením.
- [3] HABEL, Jíří, et al. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. 438 s. ISBN 978 80 86534 21 3.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Marek Bálský, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **08.02.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **25.05.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

Ing. Marek Bálský, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_ Podpis studenta



### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne .....

.....

Podpis



### **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Marku Bálskému, Ph.D. za čas, připomínky a cenné rady, které mi pomohly při vypracování diplomové práce.





## **Anotace**

Tématem této práce je popis standardně používaných definic účinníku a jejich rozšíření o efekt vyšších harmonických složek proudu a napětí, které mají vliv na celkový skutečný účinník. Tento jev je demonstrován na měření napájecího proudu LED svítidel a na analýze zpětného vlivu tohoto proudu na elektrickou soustavu jak při zatížení jednotlivým svítidlem, tak i při zatížení velkou osvětlovací soustavou. Výstupem tohoto měření je také tvorba postupu, podle kterého bude možné přesněji určovat skutečný účinník.

## **Klíčová slova**

LED svítidlo, předřadník, norma, vyšší harmonický proud, vyšší harmonické napětí, celkové harmonické zkreslení, účinník, skutečný účinník, činný výkon, zdánlivý výkon, deformační výkon, jalový výkon, postup měření.

## **Annotation**

The main topic of this work is description of commonly used definitions for power factors and their enhancement with effects of higher harmonic currents and voltages which are affecting true power factor. This phenomenon is demonstrated on measurements of input current for LED lights and on analysis of backwards effect of this current on a power grid for a single LED light load and for a complete lighting system load. These measurements results in creation of a manual according to which will be possible to determine true power factor more precisely.

## **Key words**

LED light, ballast, standard, higher harmonic current, higher harmonic voltage, total harmonic distortion, power factor, true power factor, displacement power factor, distortion power factor, active power, apparent power, reactive power, deformation power, measurement procedure.



# Obsah

Seznam použitých symbolů a značek .....	13
Úvod .....	13
1 Požadavky norem na omezení zpětného vlivu osvětlovacích soustav na elektrickou síť .....	15
1.1 Požadavky týkající se účinníku a harmonického zkreslení .....	15
1.1.1 Výkony a účinník lineárních zátěží .....	15
1.1.2 Výkony a účinník nelineárních zátěží při harmonickém napětí .....	16
1.1.3 Účinník nelineárních zátěží při neharmonickém napětí .....	18
1.1.4 Limity harmonických napětí v sítích nízkého napětí .....	19
1.1.5 Limity emisí harmonických proudů .....	20
1.1.6 Limity účinníku .....	23
1.1.7 Kompenzace kapacitního účinníku na straně nízkého napětí .....	24
1.1.8 Vliv vyšších harmonických proudů na střední vodič .....	24
1.2 Požadavky týkající se vysokofrekvenčního rušení .....	25
1.2.1 Vysokofrekvenční rušivé napětí .....	26
1.2.2 Měření vysokofrekvenčního rušivého napětí .....	26
1.2.3 Vyzařované elektromagnetické rušení .....	28
2 Postup vyhodnocení zpětného vlivu osvětlovacích soustav na elektrickou síť .....	29
2.1 Informace o svítidle a předřadníku .....	29
2.1.1 Svítidla s předřadníky s konst. I (CC) nebo konst. U (CV) .....	30
2.1.2 Svítidla se stmívatelnými předřadníky s konst. I (CC) nebo konst. U (CV) .....	30
2.2 Informace o zapojení osvětlovací soustavy .....	32
2.3 Měření zpětného vlivu svítidel na elektrickou síť .....	32
2.4 Postupový diagram měření zpětného vlivu svítidel .....	33
2.4.1 Poznámky k postupovému diagramu .....	33
3 Analýza zpětného vlivu svítidel na elektrickou síť .....	37
3.1 Analýza zpětného vlivu samostatných svítidel .....	37
3.1.1 Přehled analyzovaných svítidel a předřadníků .....	37

3.1.2	Přehled použitých přístrojů a měřicí podmínky .....	38
3.1.3	Kontrola snímaných hodnot analyzátozem .....	39
3.1.4	Harmonické složky naměřené analyzátozem pro vzorky do 25 W .....	40
3.1.5	Harmonické složky naměřené analyzátozem pro svítidla nad 25 W .....	42
3.2	Analýza zpětného vlivu osvětlovací soustavy.....	45
3.2.1	Přehled analyzované soustavy a zapojení .....	46
3.2.2	Měření nesymetrické řady svítidel.....	46
3.2.3	Měření kompletní osvětlovací soustavy.....	49
3.2.4	Vyhodnocení měření nesymetrické řady a celé osvětlovací soustavy .....	51
3.3	Analýza napájení haly včetně osvětlovací soustavy .....	52
4	Závěr .....	54
	Seznam zdrojů a literatury .....	56
	Přílohy a seznam grafů, obrázků a tabulek .....	58
	Grafy .....	58
	Obrázky.....	58
	Tabulky .....	59
	Přílohy.....	59
	Přílohy.....	60
	1 Postupový diagram měření zpětného vlivu svítidel .....	60
	Poznámky k postupovému diagramu .....	60

## Seznam použitých symbolů a značek

$\lambda$ (-)	– účinník podílu P/S
$\lambda_{DSP}$ (-)	– účinník fázového posunu (z anglického displacement power factor)
$\lambda_{DST}$ (-)	– účinník zkreslení (z anglického distortion power factor)
$\lambda_{T-I}$ (-)	– skutečný účinník uvažující neharmonické proudy
$\lambda_{T-UI}$ (-)	– skutečný účinník uvažující neharmonické napětí a neharmonické proudy
$\varphi$ (°)	– fázový posun
$\varphi_k$ (rad)	– korekce chyby posunu výsledného proudu
$\varphi_n$ (rad)	– posun n-tého harmonického proudu vzhledem k první harmonické složce napětí
AC (V)	– střídavý proud
$D$ (VA)	– deformační výkon
DALI	– digitální adresovatelné komunikační rozhraní
DC (A)	– stejnosměrný proud
$f$ (Hz)	– frekvence
$f_n$ (Hz)	– frekvence n-té harmonické složky
HDO	– hromadné dálkové ovládání
$I$ (A)	– okamžitý proud
$I_{ef}$ (A)	– efektivní proud
$I_N$ (A)	– nominální proud
$I_{n\ ef}$ (A)	– vyšší harmonický efektivní proud
IP	– stupeň ochrany krytím (z anglického international protection marking)
LED	– světlo emitující dioda (z anglického light emitting diode)
$n$ (-)	– řád vyššího harmonického proudu
NN	– nízké napětí
$P$ (W)	– činný výkon
PC	– osobní počítač
$PF$ (-)	– power factor
$P_{OUT}$ (W)	– výstupní výkon
PWM	– pulzně šířková modulace (z anglického pulse width modulation)
$Q$ (VAr)	– jalový výkon
$Q_C$ (VAr)	– jalový výkon kapacitního charakteru
$Q_L$ (VAr)	– jalový výkon induktivního charakteru
$S$ (VA)	– zdánlivý výkon
$t$ (s)	– čas
$THD_t$ (%)	– celkové harmonické zkreslení proudu (z anglického total harmonic distortion)

$THD_U$ (%)	– celkové harmonické zkreslení napětí (z anglického total harmonic distortion)
$U$ (V)	– okamžité napětí
$U_{ef}$ (V)	– efektivní napětí
$U_N$ (V)	– nominální napětí
$U_{n\,ef}$ (V)	– vyšší harmonické efektivní napětí
VA	– voltampérová
VN	– vysoké napětí
VVN	– velmi vysoké napětí
$W_P$ (Wh)	– odebraná činná energie
$W_Q$ (VArh)	– odebraná jalová energie

## Úvod

Technologický pokrok v oblasti světelných zdrojů a všeobecný důraz na snižování spotřeby elektrické energie vede v posledním desetiletí k obměně svítidel napříč průmyslovými odvětvími, ale i v domácnostech. Dříve používané teplotní zdroje světla (žárovky) byly a jsou vyřazovány na základě evropských direktiv EC 244/2009 a EC 1194/2012, a jako jejich náhrady slouží moderní výbojové zdroje nebo zdroje založené na technologii světlo emitujících diod, tzv. LED zdroje. Z těchto dvou zdrojů v současnosti převažuje především LED technologie, která předčí výbojové zdroje jak v měrném výkonu na jednotku wattu, tak v životnosti. Dle českých výrobců představuje podíl produkovaných a instalovaných LED svítidel přibližně 80 % podílu na trhu průmyslových svítidel.

LED technologie svítidel však nepřináší pouze výhody. Jedním z problémů této polovodičové technologie je nutnost změny napájecího napětí a proudu ze střídavého na stejnosměrný charakter, tzv. usměrnění. Usměrnění, a s tím spojené řízení stejnosměrného napětí a proudu, se však projevuje nestandardním zpětným vlivem na elektrickou síť, který snižuje kvalitu dodávky elektrické energie. Tato skutečnost zaprvé přispívá ke snižování efektivity dodávky elektrické energie ke spotřebiteli, což je v rozporu s jednou z hlavních výhod LED zdrojů, a zadruhé přispívá ke zvyšování elektromagnetického rušení jak v elektrické síti, tak v bezprostředním okolí. S rostoucím počtem instalovaných LED svítidel tedy dochází k nárůstu obou zmíněných vlivů a bez patřičných opatření může dojít až k finančním přírůstkům na straně spotřebitele, který je zodpovědný za zpětný vliv své osvětlovací soustavy na síť.

Tyto problémy však nejsou způsobeny vlastníky osvětlovacích soustav, ale výrobci předřadných zařízení LED svítidel, kteří mohou u svítidel a předřadníků nižší kvality cíleně používat obvody, které neobsahují vhodné kompenzační prvky pro emise vyšších harmonických proudů a filtrační obvody elektromagnetického rušení. Pro tento případ proto existují normy ČSN EN 61000-3-2, ČSN EN 61000-2-2, ČSN EN 55015 ed.4 apod., které cílí na snižování zpětných vlivů moderních LED svítidel na elektrickou síť.

Navzdory existenci těchto norem mohou nastat případy, kdy jsou jimi stanovené limity překročeny, a to i bez vědomí projektanta osvětlovací soustavy. Tato práce si tedy klade za cíl tvorbu postupu pro analýzu osvětlovací soustavy nebo jednotlivých svítidel, která povede ke zjištění skutečných parametrů odebíraného proudu svítidly, a tedy ke zjištění, zda jsou limity stanovené normami splněny. Takovéto vyhodnocení může vést ke snížení zpětného vlivu svítidel na elektrickou síť a zlepšení kvality dodávky elektrické energie.





# 1 Požadavky norem na omezení zpětného vlivu osvětlovacích soustav na elektrickou síť

První část této práce se zabývá širším přehledem a popisem zpětných vlivů LED svítidel na střídavou elektrickou síť a způsoby měření a kompenzace, resp. filtrace těchto vlivů. Uvádí také požadavky technických norem, limity rušení a další parametry, které by měly být při provozu svítidel dodrženy.

## 1.1 Požadavky týkající se účinníku a harmonického zkreslení

### 1.1.1 Výkony a účinník lineárních zátěží

Pro popis chování LED svítidel v elektrické síti a jejich zpětný vliv je nejprve vhodné popsat chování lineárních zátěží a nelineárních zátěží. LED svítidla se totiž chovají právě jako nelineární zátěže, ale popis nelineárních zátěží navazuje na popis lineárních zátěží. Uvažujeme-li lineární zátěž s lineární VA charakteristikou a sinusové napájecí síťové napětí, pak lze určit tzv. účinník  $\lambda_{DSP}$  (-), který se v anglické literatuře nazývá displacement power factor. Jeho výpočet pro lineární zátěže je následující:

$$\lambda_{DSP} = \cos \varphi \quad (1)$$

přičemž úhel  $\varphi$  (°) představuje fázový posun mezi sinusovkou napětí a proudu ve stupních. Pro čistě induktivní zátěž platí, že proud se zpožďuje za sinusovkou napětí přesně o úhel  $90^\circ$ , a pro čistě kapacitní zátěž naopak platí, že proud předbíhá sinusovku napětí o  $90^\circ$ . Úhel  $\varphi$  je možné snadno měřit v laboratorních podmínkách např. pomocí dvoukanálového osciloskopu a proudové sondy. Ve skutečnosti je výpočet účinníku komplikovanější a je dán podílem činného výkonu  $P$  (W) a zdánlivého výkonu  $S$  (VA). Pro lineární zátěž platí následující vztahy, kde  $Q$  (VAR) představuje zdánlivý výkon [1].

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad (2)$$

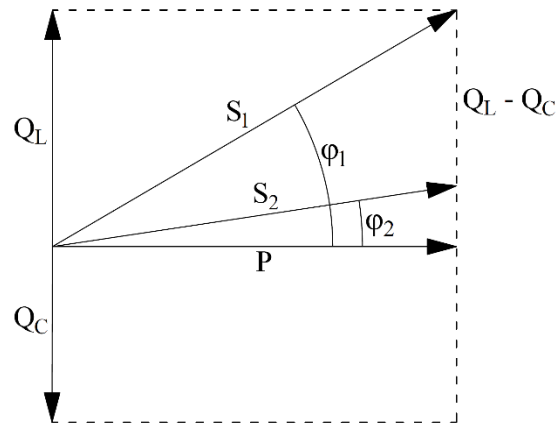
$$P = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

$$Q = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \sin \varphi \quad (4)$$

$$S = U_{ef} \cdot I_{ef} = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (5)$$

Pro lineární zátěže lze kompenzaci induktivního jalového výkonu zajistit pomocí kapacitních baterií paralelně připojených k elektrické síti. Naopak pro kompenzaci kapacitního jalového výkonu lze využít sériově zapojených tlumivek. Velikost kapacity baterií, resp. indukčnosti tlumivek je nutné volit s ohledem na velikost kompenzovaného systému. Tímto způsobem lze dosáhnout snížení jalového a zdánlivého výkonu přenášeného elektrickou sítí a výsledný

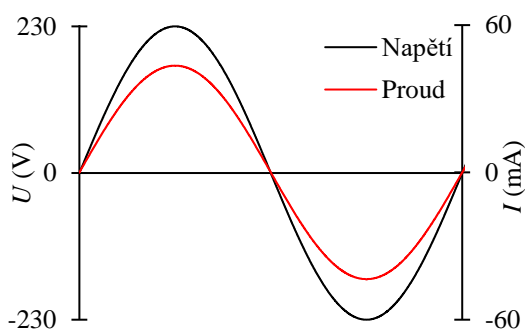
vykompenzovaný jalový výkon se projeví zlepšením účinníku tak, jak je zobrazeno níže. V praxi se kompenzace provádí skokově – připojováním různých kombinací kapacit, resp. indukčností pomocí stykačů, a při této regulaci se účinník hodnotě 1 vždy pouze blíží. Plynule lze řídit účinník např. pomocí kompenzátorů s antiparalelním zapojením tyristorů.



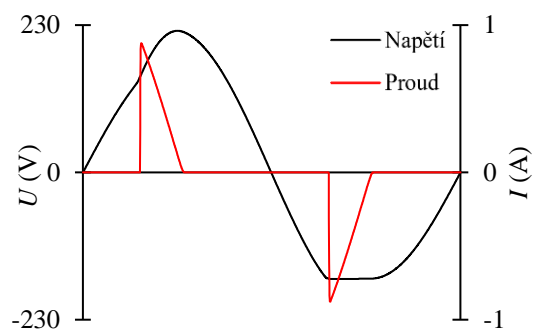
Obrázek č. 1 – Kompenzace induktivního jalového výkonu  $Q_L$  pomocí kapacitního jalového výkonu  $Q_C$   
Zdroj: vlastní zpracování

### 1.1.2 Výkony a účinník nelineárních zátěží při harmonickém napětí

Jak bylo zmíněno, LED svítidla se chovají jako nelineární zátěž. Ve skutečnosti se tak chovají všechna svítidla, a to dokonce i klasické žárovky [2]. VA charakteristiku žárovky lze však přibližně považovat za lineární zátěž s účinníkem 1, protože její indukčnost je zanedbatelná. Toto ovšem neplatí pro moderní svítidla. Výbojová svítidla bez, ale i s elektronickým předřadníkem, a především moderní LED svítidla se chovají jako silně nelineární zátěže, jejich VA charakteristika je tedy nelineární. Níže jsou zobrazeny průběhy napájecích napětí a proudů pro žárovkové a LED svítidlo bez vyhlazování proudu v průběhu jedné periody o délce 20 ms.



Graf č. 1 – Průběh okamžitého napájecího  $U$  a  $I$  pro žárovkové svítidlo  
Zdroj: vlastní zpracování



Graf č. 2 – Průběh okamžitého napájecího  $U$  a  $I$  pro LED svítidlo  
Zdroj: vlastní zpracování

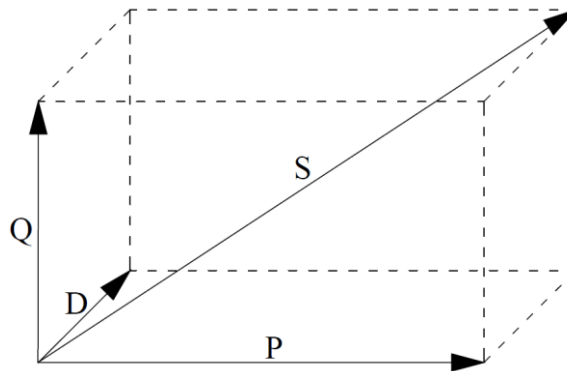
Průběh proudu odebíraného LED svítidlem z elektrické sítě není sinusový, místo toho obsahuje proudové špičky, které pokrývají intervaly nabíjení vyhlazovacího kondenzátoru. Během nich dokonce může docházet k deformaci sinusovky napětí. Ve zbylých časových úsecích je odebíraný proud ze sítě téměř nulový, protože dochází k vybíjení kondenzátoru a výkon je tak

LED čipům dodáván přímo z něho. Důležitým poznatkem je, že takovýto proud obsahuje vyšší harmonické proudy, a proto nelze k určení výkonů a účinníku použít vztahy uvedené v předchozí kapitole 1.1.1. Při výpočtu zdánlivého výkonu nastává situace, kdy je součet čtverců činného a jalového výkonu menší než čtverec odebíraného zdánlivého výkonu, tedy:

$$S^2 > P^2 + Q^2 \quad (6)$$

Aby opět platila rovnost, je nutné doplnit vztah o tzv. deformační výkon  $D$  (VA), který představuje výkon přenášený elektrickou sítí ve formě vyšších harmonických složek proudu a napětí. Výkonový diagram lze poté doplnit o další osu tak, jak je znázorněno na obrázku č. 2.

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (7)$$



Obrázek č. 2 – Jednotlivé složky skutečného zdánlivého výkonu  
Zdroj: vlastní zpracování

V této části bude pro zjednodušení uvažováno sinusové harmonické napětí [2]. Každý neharmonický periodický signál, v tomto případě proud, je možné rozložit pomocí Fourierovy transformace na součet více harmonických proudů – celočíselných  $n$ -násobků základní frekvence, tzv. první harmonické. Poměr efektivní hodnoty všech vyšších harmonických proudů k efektivnímu proudu první harmonické se nazývá celkové harmonické zkreslení  $THD_I$  (%).

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_{2\text{ef}}^2 + I_{3\text{ef}}^2 + \dots + I_{n\text{ef}}^2}}{I_{1\text{ef}}} \cdot 100 \quad (8)$$

Celkový proud tvořený prvním harmonickým proudem a vyššími harmonickými proudy je dán následujícím vztahem:

$$I_{\text{ef}} = I_{1\text{ef}} \cdot \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (9)$$

Činný výkon je poté tvořen pouze první harmonickou složkou proudu, kde úhel  $\varphi_1$  představuje fázový posun mezi první harmonickou proudem a síťovým napětím, tedy v podstatě  $\lambda_{DSP}$ .

$$P = U_{\text{ef}} \cdot I_{1\text{ef}} \cdot \cos \varphi_1 \quad (10)$$

Se znalostí činného výkonu  $P$  a celkového efektivního proudu  $I_{ef}$  lze vypočítat celkový skutečný účinník  $\lambda_{T-I}$  (-) při uvažování sinusového napájecího napětí následujícím způsobem:

$$\lambda_{T-I} = \frac{P}{S} = \frac{U_{ef} \cdot I_{1ef} \cdot \cos \varphi_1}{U_{ef} \cdot I_{1ef} \cdot \sqrt{1 + THD_I^2}} = \cos \varphi_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \quad (11)$$

Celkový účinník  $\lambda_{T-I}$  se poté skládá ze dvou výrazů. První výraz  $\cos \varphi_1$  představuje účinník fázového posunu  $\lambda_{DSP}$  první harmonické proudu vzhledem k sinusovce napětí, podobně jako tomu je u lineárních zátěží. Druhý člen ve výsledné rovnici naopak představuje účinník zkreslení  $\lambda_{DST}$  (-) a závisí pouze na obsahu vyšších harmonických složek proudu. Jak nárůst fázového posunu, tak nárůst harmonického zkreslení má za následek pokles účinníku. Pro zlepšení celkového účinníku nelineárních zátěží je tedy pasivní kompenzace účinníku fázového posunu proudu nedostačující a musí být doplněna o kompenzaci harmonického zkreslení proudu [1, 2].

### 1.1.3 Účinník nelineárních zátěží při neharmonickém napětí

Jak bylo zmíněno v kapitole 1.1.2 a v grafu č. 2, rázový odběr proudu může deformovat sinusovku napětí. Jediné LED svítidlo bude mít na deformaci napětí pouze malý vliv, avšak větší soustava svítidel s příkonem v řádech desítek kW by mohla lokálně sinusovku napětí deformovat. Průběh napětí tak bude neharmonický a bude také obsahovat vyšší harmonické složky. Pro přesný výpočet celkového účinníku je nutné jej rozložit pomocí Fourierovy transformace. Celkové harmonické zkreslení napětí  $THD_U$  (%) se vypočte následovně jako podíl efektivních hodnot vyšších harmonických napětí k efektivnímu napětí první harmonické:

$$THD_U = \frac{\sqrt{U_{2ef}^2 + U_{3ef}^2 + \dots + U_{nef}^2}}{U_{1ef}} \cdot 100 \quad (12)$$

Celkové efektivní napětí tvořené první harmonickou a vyššími harmonickými napětími je pak dáno následovně:

$$U_{ef} = U_{1ef} \cdot \sqrt{1 + THD_U^2} \quad (13)$$

Činný výkon lze poté vypočítat pomocí následující sumy, kde  $n$  představuje řád vyšších harmonických složek.

$$P = \sum_{n=1}^N U_{nef} \cdot I_{nef} \cdot \cos \varphi_n \quad (14)$$

Nyní lze určit celkový účinník  $\lambda_{T-UI}$  bez zanedbání neharmonického napětí následovně.

$$\lambda_{T-UI} = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=1}^N U_{nef} \cdot I_{nef} \cdot \cos \varphi_n}{U_{1ef} \cdot \sqrt{1 + THD_U^2} \cdot I_{1ef} \cdot \sqrt{1 + THD_I^2}} = \frac{P}{S_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD_U^2} \cdot \sqrt{1 + THD_I^2}} \quad (15)$$

Člen  $P/S_1$  v rovnici (15) lze rozložit na dvě části, kde první zlomek představuje účinník fázového posunu  $\lambda_{DSP}$  pouze pro první harmonickou složku napětí a proudu. Druhý výraz v rovnici (15) opět představuje účinník zkreslení  $\lambda_{DST}$ , ale tentokrát bez zanedbání neharmonických napětí.

$$\frac{P}{S_1} = \frac{U_{1\text{ ef}} \cdot I_{1\text{ ef}} \cdot \cos \varphi_1}{U_{1\text{ ef}} \cdot I_{1\text{ ef}}} + \frac{\sum_{n=2}^N U_{n\text{ ef}} \cdot I_{n\text{ ef}} \cdot \cos \varphi_n}{U_{1\text{ ef}} \cdot I_{1\text{ ef}}} \quad (16)$$

Celkový skutečný účinník s uvážením neharmonických napětí i proudů lze pak přepsat následovně:

$$\lambda_{T-UI} = \left( \lambda_{DSP} + \frac{\sum_{n=2}^N U_{n\text{ ef}} \cdot I_{n\text{ ef}} \cdot \cos \varphi_n}{U_{1\text{ ef}} \cdot I_{1\text{ ef}}} \right) \cdot \lambda_{DST} \quad (17)$$

Zlepšení celkového účinníku  $\lambda_{T-UI}$  může být v tomto případě dosaženo pouze pomocí kompenzace účinníku fázového posunu proudu a napětí zároveň s kompenzací harmonického zkreslení proudu a napětí [1].

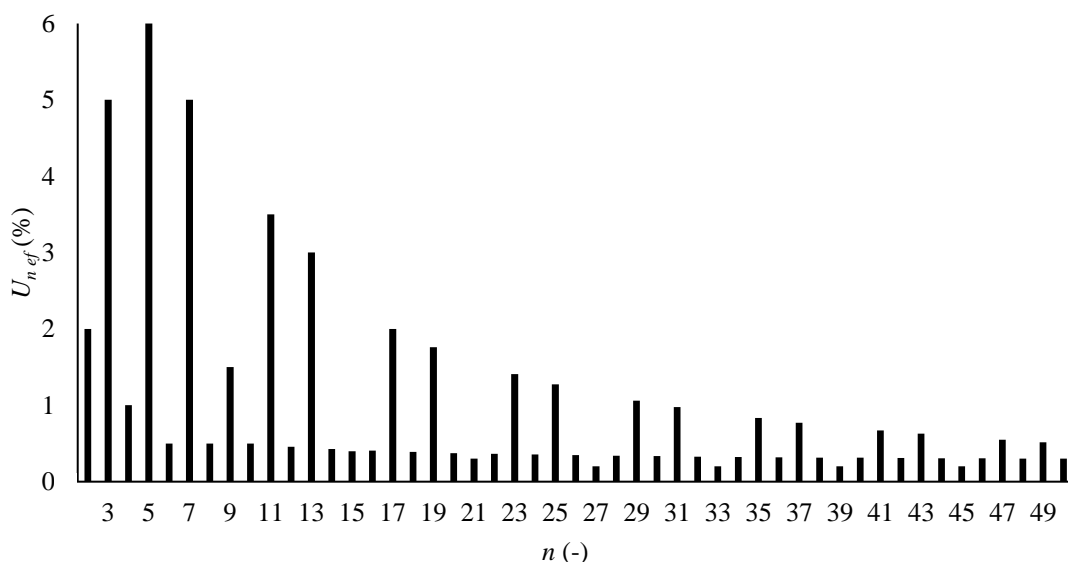
#### 1.1.4 Limity harmonických napětí v sítích nízkého napětí

Vzrůst počtu LED svítidel připojených do elektrické sítě také přispívá k celkovému počtu spotřebičů, které jsou zdrojem vyšších harmonických napětí, tedy k počítačům a dalším moderním elektrickým spotřebičům, které obsahují spínané napájecí zdroje. Spolu s možným poklesem čistě činných zátěží, tedy tepelné techniky, která se v elektrické síti chová jako tlumící prvek, tak může docházet k rostoucímu podílu nelineárních zátěží. Nárůst úrovně vyšších harmonických napětí má posléze negativní účinky na elektrickou síť. V krátkodobém měřítku se jedná o rušivé účinky na citlivé elektronické přístroje a v dlouhodobém měřítku o zvýšené tepelné namáhání elektrických rozvodů. Tato skutečnost je popsána v normě ČSN EN 61000-2-2, která uvádí maximální dovolené efektivní hodnoty vyšších harmonických napětí v procentech vzhledem k efektivní hodnotě první harmonické složky napětí.

Liché harmonické $n$ není násobkem tří		Liché harmonické $n$ je násobkem tří		Sudé harmonické	
Řád vyšší harmonické $n$	Napětí vyšší harmonické v %	Řád vyšší harmonické $n$	Napětí vyšší harmonické v %	Řád vyšší harmonické $n$	Napětí vyšší harmonické v %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,4	6	0,5
13	3	21	0,3	8	0,5
$17 \leq n \leq 49$	$38,59/n - 0,27$	$21 \leq n \leq 45$	0,2	$10 \leq n \leq 50$	$2,5/n + 0,25$

Tabulka č. 1 – Maximální relativní povolené hodnoty vyšších harmonických napětí  
Zdroj: ČSN EN 61000-2-2

Jelikož osvětlovací soustavy jsou většinou v provozu v řádech jednotek až desítek hodin, jedná se o spotřebiče, které mají dlouhodobý účinek na elektrickou síť. V takovém případě je kompatibilní úroveň celkového harmonického zkreslení daná normou rovna  $THD_U = 8\%$ . Pro krátkodobé účinky platí hodnota  $THD_U = 11\%$  [4]. Na níže uvedeném grafu č. 3 je názorně vidět, že nejvyšší hodnoty vyšších harmonických složek jsou povoleny v několika prvních lichých násobcích první harmonické složky napětí.



Graf č. 3 – Maximální relativní povolené hodnoty vyšších harmonických napětí  
Zdroj: vlastní zpracování dle [4]

### 1.1.5 Limity emisí harmonických proudů

Podobné limity jako pro harmonické zkreslení napětí platí i pro emise vyšších harmonických proudů. Tyto limity jsou uvedeny v normě ČSN EN 61000-3-2 ed. 4, která pokrývá zařízení se vstupním proudem do 16 A. Svítidla jsou zde zařazena do třídy C a rozdělena na dvě skupiny podle činného příkonu. Do 25 W včetně a nad 25 W. Část do 25 W včetně však výslovně zmiňuje limity pouze pro výbojová svítidla. Výrobci LED svítidel tedy nejsou povinni tyto limity respektovat. Pokud se však vezme v úvahu, že moderní výbojová svítidla jsou napájena pomocí vysokofrekvenčních střídačů se stejnosměrným meziobvodem, které pracují v usměrňovací a vyhlazovací části podobně jako předřadníky LED svítidel, pak by bylo možné limity uvedené pro výbojová svítidla použít i pro LED svítidla.

Pro svítidla do 25 W včetně tedy platí, že nesmí překročit hodnoty uvedené v tabulce č. 2 nebo následující podmínky uvedené opět v normě ČSN EN 61000-3-2 ed. 4:

*„Proud třetí harmonické, vyjádřený jako procentní hodnota základní složky proudu, nesmí překročit 86 % a pátá nesmí překročit 61 %. Také tvar vlny vstupního proudu musí být takový, aby dosáhl prahovou hodnotu 5 % před nebo*

v 60°, měl vrcholovou hodnotu před nebo v 65° a proud neklesl pod prahovou hodnotu 5 % před 90°, vzhledem k průchodu základního napájecího napětí nulovou hodnotou. Prahová hodnota proudu je 5 % nejvyšší absolutní vrcholové hodnoty, která se vyskytuje v okně měření a úhel fázového posunu se provádí na cyklu, který obsahuje tuto absolutní vrcholovou hodnotu [5, str. 21].“

Proudy vyšších harmonických pro svítidla s příkonem nad 25 W nesmí naopak překročit relativní limity uvedené v tabulce č. 3, kde jsou limity vyjádřeny v procentech vstupního proudu první harmonické složky. Pro třetí harmonickou složku v tabulce č. 3 představuje výraz  $\lambda$  účinník svítidla uvedený výrobcem. Pro svítidla nad 25 W a osazená stmívači platí hodnoty uvedené v tabulce č. 4, kde už jsou naopak uvedeny absolutní hodnoty v ampérech.

Řád vyšší harmonické $n$ (-)	Proud vyšší harmonické na watt mA/W
3	3,4
5	1,9
7	1,0
9	0,5
11	0,35
$13 \leq n \leq 39$ (lichá $n$ )	$3,85/n$

Tabulka č. 2 – Limity pro svítidla do 25 W  
Zdroj: ČSN EN 61000-3-2 ed.4

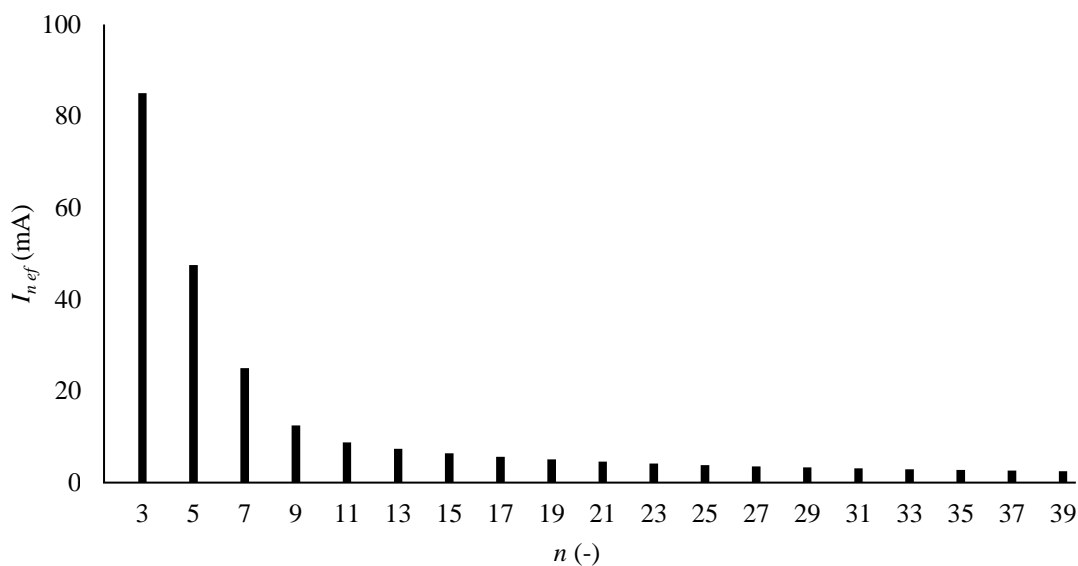
Řád vyšší harmonické $n$ (-)	Dovolený proud v % první harmonické $I$ %
2	2
3	$30 \cdot \lambda$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$ (lichá $n$ )	3

Tabulka č. 3 – Limity pro svítidla nad 25 W  
Zdroj: ČSN EN 61000-3-2 ed.4

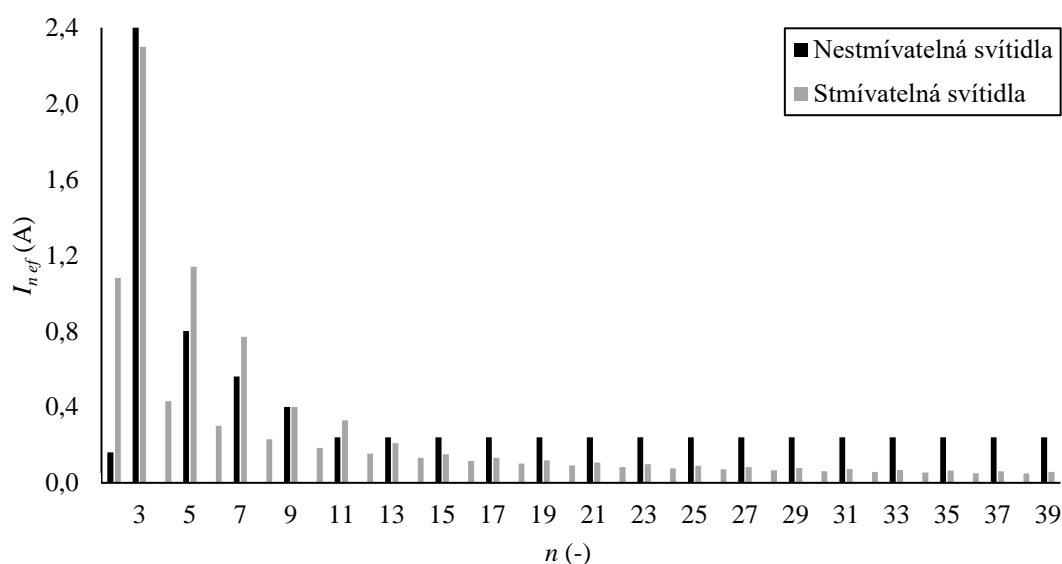
Pokud budeme uvažovat svítidlo s maximálním příkonem 25 W, získáme po vynásobení limity mA/W, viz graf č. 4. Podobný průběh lze vykreslit i pro svítidla s příkonem nad 25 W. Pro nestmívatelná svítidla jsou však limity relativní a pro stmívatelná naopak absolutní. Pro porovnání je nutné převést limity do stejného rozměru. Můžeme tedy uvažovat hypotetické svítidlo s odběrem proudu například 8 A a  $\lambda = 1$ . Poté lze sestavit graf č. 5. Z obou grafů je vidět, že nejvyšší harmonické proudy jsou povolené v několika prvních lichých  $n$  násobcích a je vidět jejich postupný pokles.

Řád vyšší harmonické $n$ (-)	Proud vyšší harmonické $I$ (A)
2	1,08
3	2,30
4	0,43
5	1,14
6	0,30
7	0,77
$8 \leq n \leq 40$ (sudá $n$ )	$0,23 \cdot 8/n$
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$ (lichá $n$ )	$0,15 \cdot 15/n$

Tabulka č. 4 – Limity pro svítidla se stmívači  
Zdroj: ČSN EN 61000-3-2 ed.4



Graf č. 4 – Maximální limity vyšších harmonických proudů pro svítidla s příkonem do 25 W  
Zdroj: vlastní zpracování dle [5]



Graf č. 5 – Limity vyšších harmonických proudů pro svítidla s příkonem nad 25 W  
Zdroj: vlastní zpracování dle [5]

Jak bylo zmíněno v kapitole 1.1.2., obsah vyšších harmonických proudů zvyšuje celkové harmonické zkreslení  $THD_i$ , a tedy snižuje celkový účinník  $\lambda_{T.I.}$ . Zatímco v normě ČSN EN 61000-2-2 jsou uvedeny limity pro celkové harmonické zkreslení napětí, v normě ČSN EN 61000-3-2 nejsou celkové limity pro harmonické zkreslení proudu vůbec uvedeny. Může tedy nastat situace, kdy budou limity pro jednotlivé  $n$  násobky vyšších harmonických proudů splněny, ale celkové harmonické zkreslení bude přesto dosahovat hodnot v řádech desítek procent. Budeme-li uvažovat svítidlo s ideálním účinníkem 1, pak lze dosažením celkových hodnot harmonického zkreslení proudů do vztahu (11) v kap. 1.1.2. vypočítat zhoršení účinníku.



$THD_I = 94,5 \% \rightarrow \lambda_{T-I} = 0,73$  – pro svítidla s příkonem do 25 W včetně

$THD_I = 34,8 \% \rightarrow \lambda_{T-I} = 0,94$  – pro svítidla s příkonem nad 25 W

$THD_I = 39,7 \% \rightarrow \lambda_{T-I} = 0,93$  – pro svítidla se stmívači a příkonem nad 25 W

K největšímu snížení účinníku může dle výpočtu dojít u svítidel do 25 W, zatímco u svítidel nad 25 W může dojít k menšímu srovnatelnému poklesu pro obě dvě varianty. Trvalý pokles účinníku kapacitního charakteru je však pro odběratele nežádoucí a důvody jsou popsány v následující kapitole.

### 1.1.6 Limity účinníku

Jak bylo zmíněno, ideální hodnota účinníku je rovna jedné, tedy stavu, kdy je ze sítě odebírán nulový jalový výkon. K měření účinníku distributorem elektrické energie dochází v místě připojení na napěťové hladiny VN a VVN, ke kterým jsou nejčastěji připojeni průmysloví odběratelé nebo systémy napájení veřejného osvětlení komunikací apod. Výsledný účinník takových odběrů je poté nepřetržitě vyhodnocován následujícím způsobem pomocí tzv. čtyřkvadrantového elektroměru a výsledná hodnota je v měsíčním vyúčtování stanovena jako průměr za celkové období:

$$\tan \varphi = \frac{W_Q}{W_P} \quad (-) \quad (18)$$

$W_Q$  (kVArh) – naměřená odebraná jalová energie

$W_P$  (kWh) – naměřená odebraná činná energie

Energetický regulační úřad však těmto odběratelům umožňuje odebírat výkon v tzv. neutrálním pásmu s rozmezím účinníku 1 až 0,95 induktivního charakteru, ve kterém není spotřebiteli účtována přírážka za dodávku energie. Při poklesu průměrného účinníku odběru výkonu pod úroveň 0,95 je spotřebiteli účtována přírážka dle Energetického regulačního věstníku str. 16, která roste s klesajícím účinníkem, a to od 2,85 % při účinníku menším než 0,95 a až do maximální přírážky 100 % při účinníku nižším než 0,6.

Výše uvedené podmínky však neplatí pro odběr jalového výkonu kapacitního charakteru, při kterém účinník opět klesá pod ideální hodnotu jedna. Finanční přírážka za odběr s účinníkem menším než jedna je zde určena konstantní částkou ve výši 440 Kč/MVArh a spotřebitel tedy platí přesně za jalovou energii, která je kvůli němu navíc sítí přenesena. Tato přírážka však není spotřebiteli účtována, je-li kapacitní výkon krátkodobě odebírán v pásmu 0,999 až 1 po dobu kratší než 90 sekund. Tato výjimka je v Energetickém regulačním věstníku umístěna pravděpodobně z důvodu přechodných stavů při zapínání většího počtu spínaných zdrojů, které v okamžiku sepnutí pracují s velmi nízkým účinníkem, a také z důvodu krátkodobého

překompenzování kapacitními bateriemi při náhlém poklesu odebíraného jalového výkonu induktivního charakteru.

Pro domácnosti a podobné odběratele na hladině NN se individuální měření účinníku neprovádí, a proto se na ně nevztahují přírázky za odběr jalového výkonu libovolného charakteru. Nahromadění velkého počtu odběratelů a spotřebičů s nízkým příkonem a účinníkem však může mít také za následek zvětšený odběr jalového výkonu ze sítě a následné zhoršování kvality dodávky energie [6].

### **1.1.7 Kompenzace kapacitního účinníku na straně nízkého napětí**

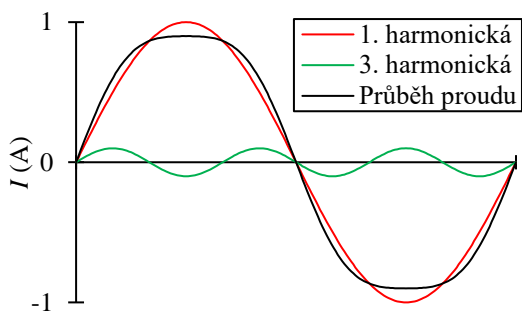
Chce-li se odběratel vyhnout platbě za nedodržení limitů kapacitního účinníku, je zapotřebí jeho kompenzace na hodnotu 1. Ke sledování aktuálního charakteru výkonu slouží tzv. regulátory kompenzace, a to např. regulátor Novar 1114 od společnosti KMB systems, který se zapojuje např. na napájecí šiny umístěné v nízkonapěťové rozvodně.

Vstupem měřicího obvodu regulátoru je fázové nebo sdružené napětí a proud sekundárního vinutí měřicího transformátoru proudu. Regulátor s těmito signály provede výpočet pomocí rychlé Fourierovy transformace a rozloží je na harmonické složky napětí a proudu. Regulátor také vyhodnocuje celkové harmonické zkreslení  $THD_I$  a  $THD_U$ , a to až do 19. řádu [7]. Okamžitý účinník je podle popisu regulátoru dán pouze podílem činné složky výkonu k celkové hodnotě výkonu základní harmonické v síti, což by znamenalo, že ve výpočtu účinníku není zahrnuto harmonické zkreslení.  $THD$  však není regulátorem úplně ignorováno a lze nastavit jeho meze, při kterých dojde k odpojení kompenzačních stupňů. Toto ovšem neřeší chybu, která bude vznikat při připojení zátěží, které jsou zdrojem harmonického zkreslení.

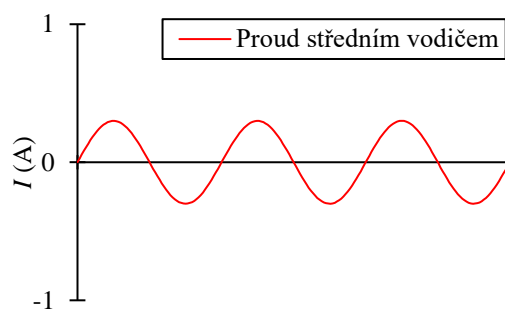
Cílovou funkcí regulátoru je pak spínání různých kombinací kompenzačních stupňů pomocí výstupních relé, která slouží jako ovládací obvody pro stykače zodpovědné za spínání kompenzačních stupňů [7].

### **1.1.8 Vliv vyšších harmonických proudů na střední vodič**

Jedním z negativních vlivů, které mohou být při dimenzování moderních osvětlovacích soustav opomenuty, je vliv vyšších harmonických složek proudu na střední vodič. K velkoodběratelům je elektrická energie dodávána na hladinách VN nebo VVN a po transformaci na hladinu NN jsou svítidla zapojena do typů sítě TN-S atd. Tyto sítě obsahují fázové vodiče  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ , střední vodič N a ochranný vodič PE. V rámci symetrizace zatížení je nutné větší osvětlovací soustavy rozdělit přibližně na třetiny podle výkonu a každou tuto třetinu napájet jednou fází. Na všechny tři fáze poté připadá jeden střední vodič a při připojení lineárních zátěží s harmonickým odběrem proudu je součet proudů ve středním vodiči vždy roven nule. Toto neplatí pro nelineární zátěže, u nichž je součet vyšších harmonických proudů ve středním vodiči nenulový.



Graf č. 6 – Průběh  $I$  a rozložení na harmonické  
Zdroj: vlastní zpracování dle [8]

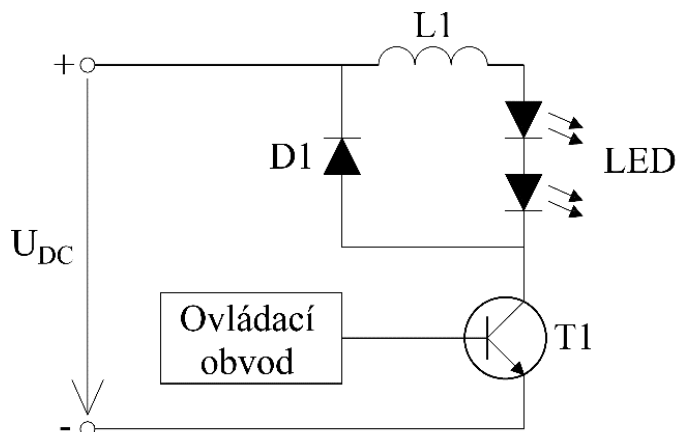


Graf č. 7 – Součet proudů středním vodičem  
Zdroj: vlastní zpracování dle [8]

Na grafu č. 6 je černě zobrazen hypotetický neharmonický průběh proudu jednou fází a jeho rozklad na první a třetí harmonickou složku. Pokud jsou takto zatíženy všechny tři fáze, dojde k vzájemnému vyrušení pouze prvních harmonických složek fázových proudů, a také k součtu všech vyšších harmonických proudů všech fází a střední vodič tak bude zatěžován nenulovým proudem, jak je zobrazeno na grafu č. 7. Pokud má tento proud hodnotu větší než 15 % proudu první harmonické, pak nesmí být průřez středního vodiče menší než průřez fázových vodičů [8].

## 1.2 Požadavky týkající se vysokofrekvenčního rušení

Další negativní vliv, zapříčiněný způsobem napájení některých moderních LED svítidel, se může projevit a přenášet nejen přímo v elektrické síti, ale i mimo ni. Jedná se o vysokofrekvenční elektromagnetické rušení způsobené elektronickými spínanými zdroji, které jsou součástí předřadníků LED svítidel. Výhodou těchto spínaných zdrojů je efektivní transformace stejnosměrného napětí a proudu na hodnoty vhodné k napájení LED diod, a to bez použití rozměrných součástek jako jsou transformátory. Princip jednoduchého spínaného zdroje je vysvětlen na obrázku č. 3, kde je spínacím prvkem tranzistor T1. V sepnutém stavu prochází proud skrze tranzistor a v rozepnutém stavu je k udržení proudu použita indukčnost L1 a zpětná dioda D1. Změnou frekvence, resp. střídou spínání tranzistoru lze poté měnit výkon na LED diodách, čehož lze využít k jejich stmívání [9].



Obrázek č. 3 – Schéma spínaného zdroje tzv. buck converter  
Zdroj: vlastní zpracování dle [9]

Nevýhodou takového zapojení je tvorba vysokofrekvenčního elektromagnetického rušení v širokém frekvenčním pásmu od 9 kHz až do 300 MHz. Toto rušení se může šířit dvěma následujícími způsoby.

### 1.2.1 Vysokofrekvenční rušivé napětí

Vysokofrekvenční rušivé napětí se přenáší přímo po vodičích elektrickou sítí a může způsobovat problémy při napájení citlivých elektronických zařízení, např. počítačů nebo může rušit systémy hromadného dálkového ovládání tzv. HDO. Meze a metody měření vysokofrekvenční rušivých napětí jsou popsány v normě ČSN EN 55015 ed. 4, která se zabývá přímo svítidly. Meze jsou v této normě stanoveny tak, aby mohlo být dosaženo jejich potlačení v ekonomicky přijatelných mezích, tzn. že určité rušení je dovolené. LED svítidla, která neobsahují spínané zdroje, automaticky splňují požadavky normy, protože nejsou zdrojem rušivých napětí. Všechny ostatní typy LED svítidel musí splňovat meze uvedené v tabulce č. 5. Ta uvádí povolené hodnoty v poměrné decibelové stupnici. Pro bližší představu skutečné amplitudy rušivého napětí je možné přepočítat poměrné hodnoty dB $\mu$ V do hodnot napětí pomocí následujícího vztahu.

$$U = 10^{\frac{\text{dB}\mu\text{V}-120}{20}} \text{ (V)} \quad (19)$$

Maximální uvedená hodnota 110 dB $\mu$ V tedy představuje hodnotu 316 mV a naopak nejmenší uvedená hodnota 46 dB $\mu$ V představuje přibližně 200  $\mu$ V.

Kmitočtový rozsah	Meze dB ( $\mu$ V)	
	kvazivrcholová	střední
9 kHz až 50 kHz	110	-
50 kHz až 150 kHz	90 až 80	-
150 kHz až 0,5 MHz	66 až 56	56 až 46
0,5 MHz až 5 MHz	56	46
5 MHz až 30 MHz	60	50

Tabulka č. 5 – Meze rušivého napětí na napájecích svorkách

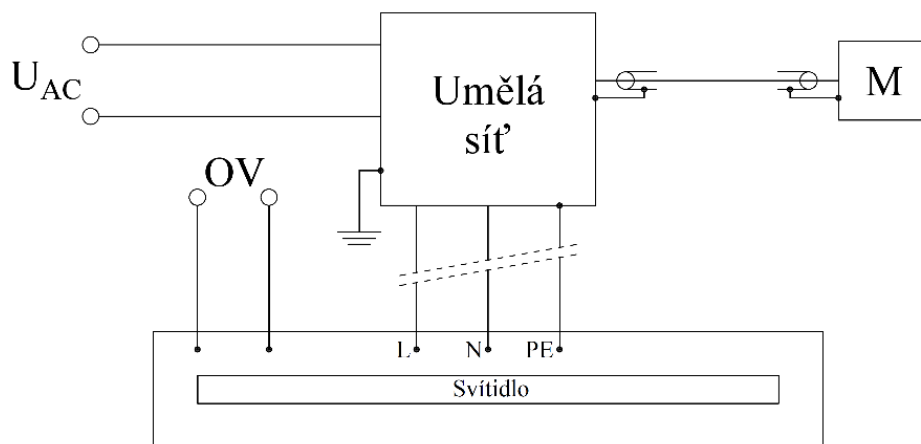
Zdroj: ČSN EN 55015 ed.4

Z tabulky č. 5 je patrná klesající tendence dovoleného rušivého napětí s rostoucí frekvencí, přičemž pozornost by měla být věnována kvazivrcholovému průběhu, který je černě zobrazen na grafu č. 8.

### 1.2.2 Měření vysokofrekvenčního rušivého napětí

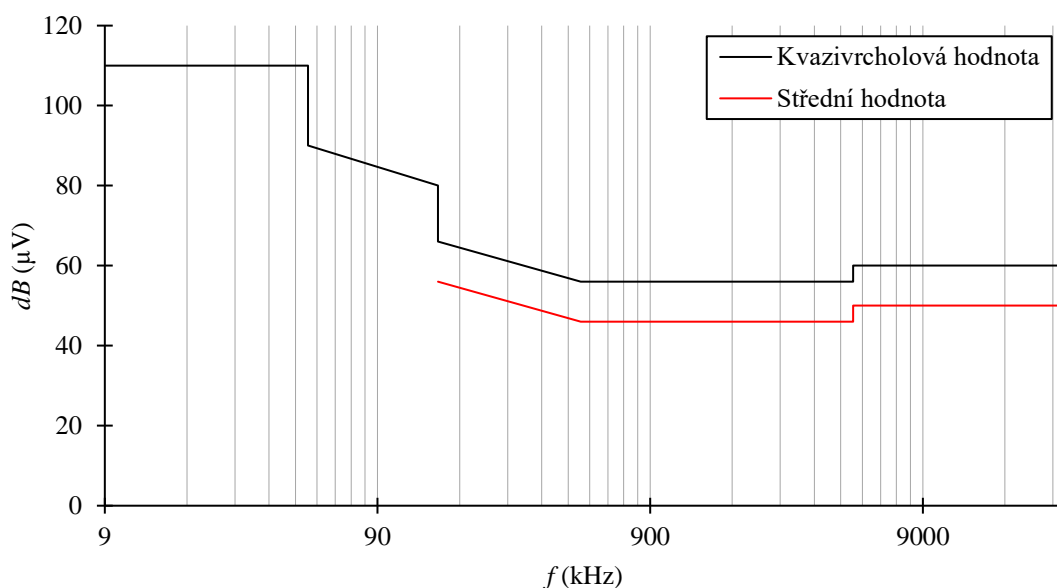
Způsob měření rušivého napětí generovaného jedním LED svítidlem je popsán v normě ČSN EN 55015 ed. 4. Přičemž měřící uspořádání se v zásadě neliší, jedná-li se o svítidlo s integrovaným předřadníkem, např. nerozebíratelné LED svítidlo s patičí E27 nebo jedná-li se

o svítidlo opatřené krytem obsahující LED diody a nezávislý předřadník, např. průmyslové highbay svítidlo. Pokud je svítidlo vybaveno předřadníkem, který umožňuje stmívání, pak tato skutečnost nemá na měřicí uspořádání vliv, protože ovládací vodiče nejsou zahrnuty do měřicího obvodu. Zváží-li se fakt, že většina svítidel je v praxi používána tak, jak jsou vyrobena, pak nejvhodnějším způsobem, jak svítidla měřit, bude nezasahovat do jejich vnitřního zapojení a pouze přizpůsobit délku napájecího kabelu, což je u většiny svítidel možné. Délka přívodního kabelu by dle normy neměla přesahovat 80 cm, přičemž napájení svítidla musí být zajištěno z tzv. umělé sítě, která zajišťuje, že na měřicích svorkách bude detekováno pouze rušení generované zkoušeným svítidlem, a ne rušení, které se již v napájecí síti vyskytuje.



Obrázek č. 4 – Uspořádání pro měření napětového rušení, OV – ovládací vodiče, M – měřicí přijímač  
Zdroj: vlastní zpracování dle [10]

Takové odrušení je zajištěno nízkofrekvenční propustí na vstupních svorkách umělé sítě a vysokofrekvenční propustí na výstupních svorkách vedoucích k měřicímu přijímači.



Graf č. 8 – Průběh dovoleného rušivého napětí na napájecích svorkách LED svítidla  
Zdroj: vlastní zpracování

### 1.2.3 Vyzařované elektromagnetické rušení

Dalším typem elektromagnetického rušení je rušení, které je vyzařováno přímo z předřadníků svítidel a vodičů k nim připojeným do okolního prostředí. Tímto vyzařováním může docházet k rušení běžných radiových přenosů, které jsou provozovány na frekvencích cca od 50 MHz až do 150 MHz, ale i k rušení ostatních frekvenčních pásem. V tabulkách dle normy ČSN EN 55015 ed. 4 jsou uvedeny hodnoty ve dvou různých rozměrech, a to v dB $\mu$ A a dB $\mu$ V/m, a to zřejmě z důvodu odlišné metody jejich měření.

Kmitočtový rozsah	Mezní hodnoty pro smyčku podle průměru dB ( $\mu$ A)		
	2 m	3 m	4 m
9 kHz až 70 kHz	88	81	75
70 kHz až 150 kHz	88 až 58	81 až 51	75 až 45
150 kHz až 3 MHz	58 až 22	51 až 15	45 až 9
3 MHz až 30 MHz	22	15 až 16	9 až 12

Tabulka č. 6 – Meze vyzařovaného elektromagnetického rušení v rozsahu 9 kHz až 30 MHz

Zdroj: ČSN EN 55015 ed.4

Kmitočtový rozsah	Kvazivrcholové meze dB ( $\mu$ V/m)
30 MHz až 230 kHz	30
230 MHz až 300 MHz	37

Tabulka č. 7 – Meze vyzařovaného elmag. rušení v rozsahu 30 MHz až 300 MHz ve vzdálenosti 10 m

Zdroj: ČSN EN 55015 ed.4

K měření vyzařovaného elektromagnetického rušení je zapotřebí tzv. smyčková anténa, v jejímž středu je svítidlo umístěno. Vlivem elektromagnetických vln, procházejících skrze vodič smyčky, dochází k indukování proudu v této smyčce a proud je poté možné měřit pomocí proudové sondy. Pro měření ve frekvenčním rozsahu 30 až 300 MHz je naopak zapotřebí anténa, která je umístěna ve vzdálenosti 10 metrů. Tato měření je vhodné provádět v elektromagneticky stíněných prostorech, které jsou navíc vybaveny např. stěnami s nízkou odrazivostí elektromagnetických vln [11].

## 2 Postup vyhodnocení zpětného vlivu osvětlovacích soustav na elektrickou síť

Cílem postupu vyhodnocení zpětného vlivu svítidla nebo osvětlovací soustavy bude zjištění skutečného charakteru proudu, který je svítildy odebírán. S touto znalostí bude možné určit, zda jsou splněny limity stanovené normami a provést rozhodnutí, zda jsou zvolená svítidla nebo zkoumaná světelná soustava akceptovatelná. V následujících částech jsou popsána doporučení pro jednotlivé kroky postupu.

### 2.1 Informace o svítidle a předřadníku

Výrobci dnes poskytují technické listy, resp. datasheety na svých webových stránkách nebo na vyžádání, a v těchto dokumentech je obsažen přehled informací o svítidle. Účinník a charakter odebíraného výkonu však bývá v těchto dokumentech uveden pouze zřídka a u účinníku navíc nebývá uvedeno, zdali se jedná o účinník  $\lambda$  podílu  $P$  k  $S$  nebo o celkový účinník  $\lambda_{T-I}$ . Pakliže je účinník uveden, pak někteří výrobci uvádějí doplňující informace o tom, že předřadník pracuje nejhůře s minimální udanou hodnotou účinníku anebo i informace o zmíněném charakteru odběru (písmeno C). Účinník pak bývá označen číselně jedním z následujících způsobů:

- Účinník (min.) 0,96 [12]
- $PF = 0,92$  [13]
- $\lambda = 0,45$  C [14]
- Přesné označení typu předřadníku

Účinník svítidla je však závislý na instalovaném předřadníku, který je možné u profesionálních svítidel měnit dle potřeby. Z tohoto důvodu nebývá u některých svítidel účinník vůbec uveden a k jeho zjištění je potřeba provést výše uvedený postup znovu a nalézt technický list ke zvolenému předřadníku, resp. získat předřadník, na kterém je vytištěn výrobní štítek s účinníkem. U některých svítidel s odnímatelným krytem je možné zjistit model a parametry předřadníku bez porušení záruky svítidla, avšak tento postup není univerzální.

#### **Xitanium 44W 1.0A/1.05A 42V I 230V**

**9290 014 186**

$P_n$ (W)	$I_n$ (A)	$P_{out}$ (W)	$I_{out}$ (A)	PF
50	0.23	44	1.05	0.92C
47	0.22	42	1.00	0.92C
Un: 220-240V, fn: 50/60Hz				
Uout: 30-42Vdc, 60Vdc MAX.				
tc: 80°C				

Philips Lighting, IBRS 10461, 5600VB, NL Made in China  
CTS 17425C 中国制造

Obrázek č. 5 – Výrobní štítek předřadníku Xitanium od společnosti Philips Lighting  
Zdroj: vlastní zpracování dle [13]

Další vlastností předřadníků, na kterou je možné se zaměřit, je závislost účinníku a celkového harmonického zkreslení proudu a napětí na výstupním výkonu předřadníku. Některé předřadníky totiž umožňují připojení LED diod na různé napájecí svorky, nebo umožňují měnit výstupní výkon pomocí zabudovaného přepínače. Výstupní výkon předřadníku se také mění při stmívání, např. pomocí systému DALI. Z technických listů takových předřadníků je např. [15] někdy možné zjistit, že s klesajícím výkonem klesá i deklarovaný účinník. Pokud dochází k takovéto změně, bylo by dobré zjistit i závislost celkového harmonického zkreslení a jeho vliv na celkový účinník. Za tímto účelem je potřeba stanovit způsob, který bude reprodukovatelný u kombinací všech svítidel a předřadníků. V současnosti se lze setkat s několika typy předřadníků, přičemž pro účely tvorby postupu vyhodnocení zpětného vlivu je lze rozdělit do dvou skupin, viz kapitola 2.1.1 a 2.1.2.

### **2.1.1 Svítidla s předřadníky s konstantním proudem (CC) nebo konstantním napětím (CV)**

Pro svítidla vybavená předřadníky s konstantním proudem nebo s konstantním napětím bez stmívání bude nejvhodnější měřit jejich zpětný vliv podle toho, jak jsou ve svítidle nastaveny přímo od výrobce, tedy beze změny. Shodné doporučení uvádí i norma ČSN EN 61000-3-2 ed. 4 [5, str. 29].

### **2.1.2 Svítidla se stmívatelnými předřadníky s konstantním proudem (CC) nebo konstantním napětím (CV)**

Pro svítidla osazená stmívatelnými předřadníky by bylo ideální měřit závislost v celém rozsahu stmívání, ale tento postup by byl časově neefektivní a získali bychom zbytečně velké množství dat. Proto bude nutné stanovit vhodné úrovně stmívání, pro které bude měření provedeno. Norma [5, str. 29] stanovuje rozmezí pěti úrovní stmívání včetně maximální a minimální hodnoty, tedy nastavení stmívače na 0%, 25%, 50%, 75% a 100% úroveň stmívání. V současnosti lze však použít řadu různých způsobů stmívání ovládaných např. na 1–10 V nebo DALI způsobem a založených na pulzně šířkové modulaci tzv. PWM nebo na analogovém stmívání. V budoucnosti mohou však vzniknout další nové způsoby stmívání, a proto by bylo vhodné určit způsob měření úrovně stmívání aplikovatelný na všechny současné technologie, ale i na případné nové technologie. Problém nastává při přesném určení úrovně stmívání. Jednotlivé technologie stmívání a ovladače k nim použité, např. vypínače nebo tlačítka, totiž nemusí poskytovat informaci o úrovni stmívání a samotný průběh stmívání nastavený v předřadníku nemusí být lineární.

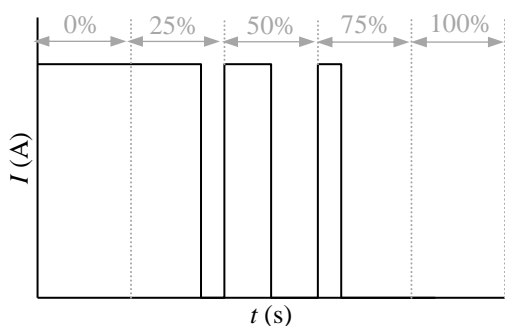
Pro přesné určení úrovně stmívání je možné použít např. DALI řídicí jednotku, připojenou k PC, pomocí které lze přesně nastavovat požadované stmívání. Tato možnost však nemusí být



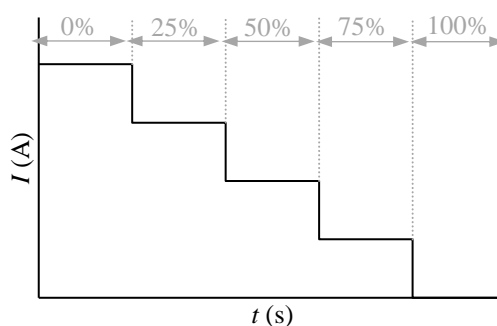
vždy dostupná, a v takovýchto případech bude nejvýhodnější omezit měření na stav při 0% stmívání, tedy při plném výkonu svítidel.

Pro analogovou technologii stmívání se přirozeně nabízí měření výstupního proudu předřadníku, jemuž by měl být přímo úměrný výstupní výkon, a tedy i světelný tok svítidla. U většiny svítidel jsou však použity LED diody produkující bílé světlo a závislost světelného toku na proudu zde nemusí být přesně lineární. Proto je použití tohoto způsobu sporné [16]. V takovémto případě zůstává výstupní napětí předřadníku konstantní a ke změně proudu dochází spojitě. Tento způsob je však realizovatelný pouze u některých typů svítidel, např. u průmyslových závěsných svítidel, u kterých je možné odejmout kryt a proudovou sondu, resp. napěťové svorky umístit přímo na výstup předřadníku. Tento postup není realizovatelný především u menších svítidel nebo u svítidel s vyšší třídou ochrany IP. U všech ostatních svítidel, kde je tento způsob možný, je tento postup nejjednodušší a nejspolehlivější.

Obdobný způsob je realizovatelný u svítidel s předřadníky s pulzně šířkovou modulací stmívání, která je založena na vysokofrekvenčním přerušování dodávky výkonu z předřadníku. U těchto svítidel zůstává výstupní proud během sepnutí konstantní, avšak dochází ke změně poměru mezi dobou sepnutí a rozepnutí výstupu předřadníku, a tak dochází ke změně tzv. střídy. Pokud má svítidlo s takovýmto předřadníkem odnímatelný kryt, pak je možné připojit proudovou sondu na výstup a snímat tak průběh střídy proudu pomocí osciloskopu. Úroveň stmívání by měla být nepřímo úměrná velikosti střídy, takže je-li střída 75%, pak je stmívání nastaveno na 25% úroveň. Rozdíl mezi průběhem PWM a analogového stmívání je zobrazen níže.



Graf č. 9 – PWM stmívání a úrovně stmívání  
Zdroj: vlastní zpracování dle [17]



Graf č. 10 – Součet proudů středním vodičem  
Zdroj: vlastní zpracování dle [17]

Bude-li svítidlo opatřeno nerozebíratelným krytem, pak by bylo možné provést odhad úrovně stmívání pomocí měření osvětlenosti. Umístíme-li luxmetr blízko svítidlu a přibližně do středu vyzařovací charakteristiky, pak by měla naměřená hodnota odpovídat světelnému toku svítidla, a tedy přibližně i výstupnímu výkonu předřadníku. Po určení maximální a minimální osvětlenosti a rozdělení tohoto intervalu na pět hodnot by mělo být možné odhadnout úroveň stmívání. Při tomto postupu je však nutné omezit vliv okolního osvětlení na minimum, což

může být v praxi neproveditelné a určování úrovní stmívání bude jen velmi přibližné. Výhodou tohoto způsobu je možnost použití na všechna svítidla bez rozdílu technologie stmívání.

Bude-li měření prováděno např. na větší halové osvětlovací soustavě, která je již uvedena do provozu, a která je vybavená světlíky nebo okny, pak bude nejvhodnější měřit soustavu při 0% stmívání, tedy při plném výkonu.

## 2.2 Informace o zapojení osvětlovací soustavy

Další užitečnou informací při vyhodnocení zpětného vlivu je skutečné zapojení napájecích obvodů osvětlovací soustavy. Tyto informace jsou obsaženy v projektové dokumentaci ve formě výkresů, ve kterých je zakresleno skutečné provedení zapojení, a lze z nich určit např. celkový počet svítidel, jejich rozmístění a typ, a tedy i celkový příkon soustavy, rozdělení napájení svítidel podle fází, zapojení středního vodiče nebo zdali jsou na napájecí vodiče připojeny i jiné spotřebiče, které mohou ovlivňovat výsledky měření. Lze z nich také určit průřezy napájecích vodičů a středního vodiče, které je vhodné znát z důvodu volby vhodných proudových sond a následné analýzy proudové zatížitelnosti vodičů. Tyto výkresy lze získat od zodpovědných osob nebo mohou být umístěny přímo v nízkonapěťové rozvodně.

## 2.3 Měření zpětného vlivu svítidel na elektrickou síť

Pro měření zpětného vlivu je zapotřebí zařízení, které je schopné provádět rychlou Fourierovu transformaci a dále dokáže měřit následující parametry napětí, proudu a výkonových toků. Pokud zvolené zařízení dokáže měřit i další parametry sítě, pak lze tyto údaje použít např. ke kontrole nebo ke zjednodušení výpočtů.

- $U_{n\,ef}$  – efektivní hodnotu všech harmonických složek napětí, ideálně do 50. řádu
- $I_{n\,ef}$  – efektivní hodnotu všech harmonických složek proudu, ideálně do 40. řádu
- $THD_I$  – celkové harmonické zkreslení proudu
- $THD_U$  – celkové harmonické zkreslení napětí
- $\lambda$  – účinník podílu P/S
- $\lambda_{DSP}$  – účinník fázového posunu

Uvedené parametry dokáže měřit např. jednofázový analyzátor kvality sítě C.A 8220 od společnosti Chauvin Arnoux Metrix, ke kterému je možné připojit napěťové svorky a proudovou sondu. Jelikož je výstupem Fourierovy transformace velké množství dat, je pro následnou analýzu vhodné zvolit zařízení, které je schopné uložit data nejlépe do CSV souboru nebo jej lze propojit s PC.

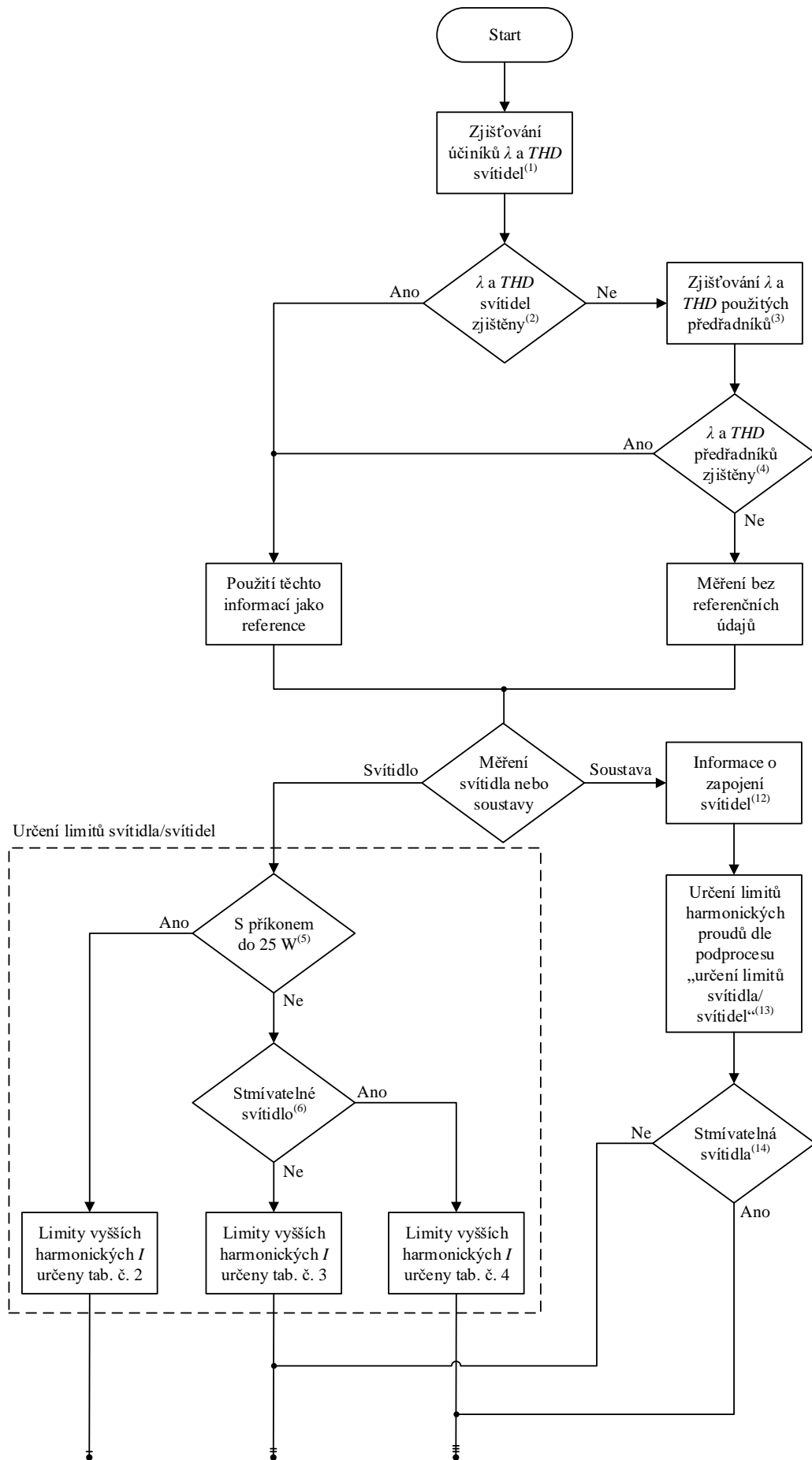
## 2.4 Postupový diagram měření zpětného vlivu svítidel

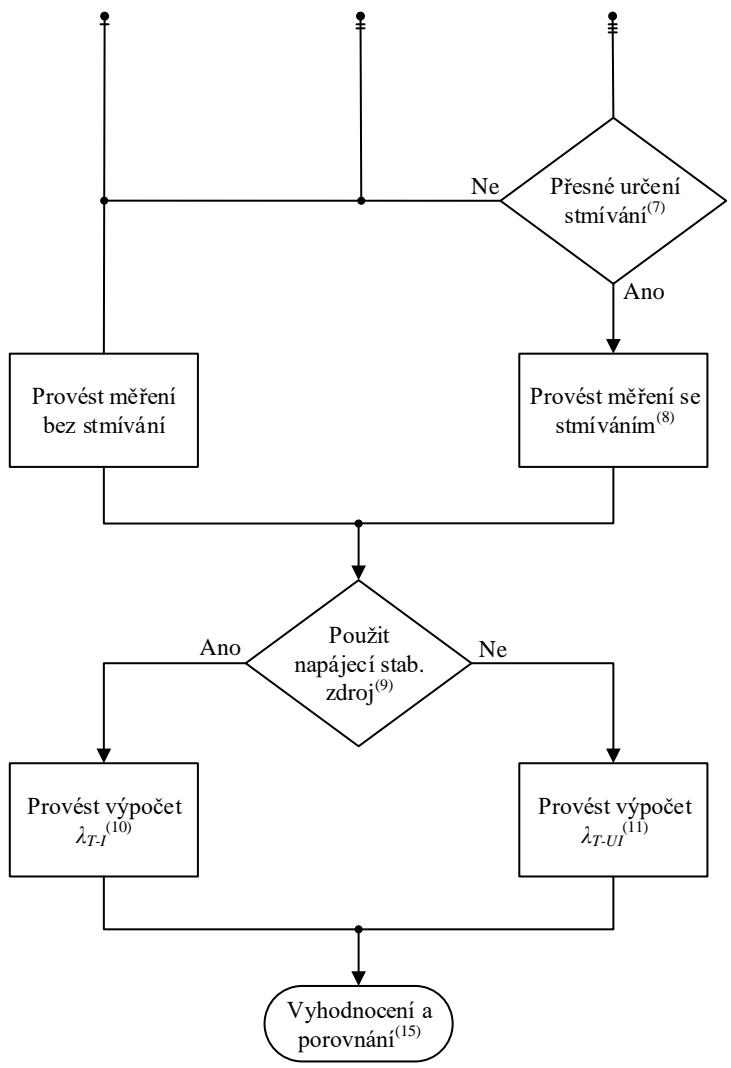
Na následujících stránkách je zobrazen algoritmus postupu měření pro jednotlivá svítidla a osvětlovací soustavy, s jehož pomocí bude možné provést měření a určit, zda jsou splněny požadavky norem. Postup má několik společných částí pro samostatná svítidla a osvětlovací soustavy, ale v několika závěrečných krocích se liší. K jednotlivým očíslovaným krokům diagramu jsou také připojeny níže uvedené poznámky, podle kterých je možné při analýze postupovat. Diagram a poznámky lze z této práce vyjmout a vytvořit z nich samostatný návod, tak jak je uvedeno v příloze. Níže uvedený diagram byl také použit pro měření svítidel a vyhodnocení údajů uvedených v následující kapitole.

### 2.4.1 Poznámky k postupovému diagramu

- (1) Tyto informace lze zjistit z výrobního štítku svítidla nebo z technického listu svítidla.
- (2) Zjištěné informace je vhodné poznamenat do tabulky.
- (3) Tyto informace lze zjistit z výrobního štítku nebo technického listu předřadníku.
- (4) Viz bod (3).
- (5) Viz bod (1) nebo (3).
- (6) Viz bod (1).
- (7) Lze určit a nastavit například při použití DALI řídicí jednotky propojené s PC.
- (8) Úrovně stmívání jsou určeny normou ČSN EN 61000-3-2 ed. 4 na hodnoty 0 %, 25 %, 50 %, 75 % a 100 %.
- (9) Napájecí zdroj s nezkrasleným sinusovým napětím a s možností regulace velikosti napětí a frekvence. V rámci reprodukovatelnosti měření je vhodné provádět toto měření se zmíněným napájecím zdrojem.
- (10) K výpočtu  $\lambda_{T-I}$  je použit vztah (11) a je potřeba znát harmonické zkraslení proudu  $THD_I$  a fázový posun mezi první harmonickou napětí a proudu  $\lambda_{DSP} = \cos \varphi$ . Pokud není známo  $THD_I$ , pak jej lze vypočítat z efektivních hodnot vyšších harmonických proudů pomocí vztahu (8). Pokud není znám účinník  $\lambda_{DSP} = \cos \varphi$ , pak jej lze určit inverzní Fourierovou transformací.
- (11) K výpočtu  $\lambda_{T-UI}$  je použit vztah (15) a je potřeba znát harmonické zkraslení proudu  $THD_I$ , harmonické zkraslení napětí  $THD_U$ , činný příkon  $P$  a zdánlivý příkon  $S$ . Pokud není známo  $THD_I$ , pak jej lze vypočítat z efektivních hodnot vyšších harmonických proudů pomocí vztahu (8). Pokud není známo  $THD_U$ , pak jej lze vypočítat z efektivních hodnot vyšších harmonických napětí pomocí vztahu (12).
- (12) Lze zjistit z projektové dokumentace nebo přímo v rozvodně nebo rozvaděči.
- (13) Určení limitů harmonických proudů a zkraslení je shodné s určením pro jednotlivá svítidla s tím rozdílem, že výsledné limity harmonických proudů jsou součtem všech příspěvků od svítidel připojených na konkrétní fázi.

- (14) Viz bod (1) nebo bod (12).
- (15) Porovnání vypočtených hodnot z bodů (10) a (11) s hodnotami zjištěnými v bodech (1) a (2) a porovnání naměřených vyšších harmonických proudů a napětí s limity danými tabulkami č. 2, 3 a 4 dle normy ČSN EN 61000-3-2 ed. 4.





### 3 Analýza zpětného vlivu svítidel na elektrickou síť

Pro skutečnou představu zpětného vlivu svítidel je nutné provést jejich měření a získání skutečných hodnot. Měření může být provedeno pro jednotlivá svítidla, ale protože v praxi jsou v budovách nebo průmyslových objektech instalovány velké osvětlovací soustavy, je vhodné změřit a analyzovat chování osvětlovací soustavy jako celku. V následujících kapitolách je popsán průběh takovýchto měření.

#### 3.1 Analýza zpětného vlivu samostatných svítidel

##### 3.1.1 Přehled analyzovaných svítidel a předřadníků

Pro analýzu zpětného vlivu samostatných prvků na elektrickou síť byla vybrána níže uvedená svítidla a předřadníky, a to od různých výrobců, ale i od tzv. off-brand nepojmenovaných značek tak, aby mohly být použity a otestovány různé větve postupového digramu uvedeného v předchozí kapitole 2.4.

Č.	Typ svítidla	Typ předřadníku	$U_N$ (V)	$I_N$ (A)	$P_N$ (W)	$P_{OUT}$ (W)	$\lambda$ (-)
1	D3225-CM-NW	Neuvedeno	220 - 240	-	20	-	0,9
2	Neuvedeno	Xitanium	220 - 240	0,22	47	42	0,92C
3	Hormen Oizzo A3	Tridonic	220 - 240	0,152	35	30	0,95
4	Hormen Terra	TCI	220 - 240	0,4	-	73,5	0,95
5	Pouze předřadník	Helvar	220 - 240	-	-	12	0,5C
6	Pouze předřadník	TCI	220 - 240	0,12	20	5,4 - 20	0,91C

Tabulka č. 8 – Zjištěné parametry měřených svítidel a předřadníků

Zdroj: vlastní zpracování

První svítidlo, které bylo zahrnuto do měření, bylo ploché nerozebíratelné downlight s třídou ochrany II a s integrovaným předřadníkem, který byl označen pouze štítkem s parametry, ale nebyl označen výrobcem ani zemí původu. Vyhledáním typového označení D3225-CM-NW bylo zjištěno, že výrobcem svítidla je společnost Imigy a zemí původu Čína.

Podobně na tom bylo i druhé svítidlo výklopné downlightové konstrukce, na kterém opět nebyl uveden výrobce ani země původu. Ke svítidlu byl však připojen externí předřadník Xitanium 44W 1,0/1,05A 42V 230V od společnosti Philips, který byl opět vybaven výrobním štítkem s potřebnými parametry. Předřadník byl také vybaven dvěma svorkami s možností volby výstupního výkonu, a to mezi 44 W a 42 W. Pro měření byla ponecháno původní zapojení o výkonu 44 W.

Třetí downlight byl již označen výrobcem a dostatečným typovým označením, ale opět byl vybaven externím předřadníkem s vytištěným výrobním štítkem s parametry od společnosti Tridonic. Celé typové označení předřadníku bylo LC 30W 700mA fixC SR SNC.

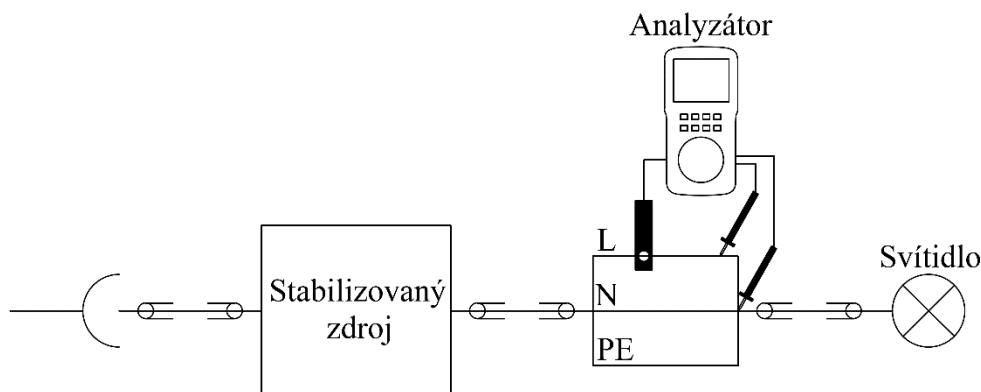
Poslední svítidlo bylo tzv. prachotěsné konstrukce, a opět nebylo označeno výrobcem, zemí původu a ani typovým označením. Díky rozebíratelné konstrukci svítidla však nakonec bylo možné určit typ svítidla a předřadníku. Celé označení předřadníku bylo TCI MP 80/500 SLIM a byl vybaven tzv. DIP switch přepínačem, který byl nastaven na výstupní výkon 73,5 W. U tohoto svítidla byly však zaznamenány neshody mezi příkonem uvedeným na výrobním štítku svítidla a na štítku předřadníku konkrétně 61 W oproti 73,5 W.

Dále byly do měření zahrnuty dva samostatné předřadníky určené pro napájení LED svítidel, které byly za účelem správné funkce zatíženy posuvným rezistorem. První předřadník byl od společnosti Helvar a byl bez možnosti volby výstupního výkonu. Tento předřadník byl vybaven výrobním štítkem se všemi potřebnými údaji a jeho celé označení bylo LL1x12-E-CC-350.

Druhý předřadník s označením TCI Universale 20 LC byl také opatřen výrobním štítkem, ale jednalo se o předřadník s regulací výstupního výkonu. Ta byla zajištěna pomocí DIP přepínače, který umožňoval nastavení devíti kombinací výstupního výkonu v rozmezí od 5,4 W až do 20 W. Měření odebíraného proudu tímto předřadníkem proto bylo provedeno pouze pro hodnoty 5,4 W, 14 W a 20 W.

### 3.1.2 Přehled použitých přístrojů a měřicí podmínky

Pro zajištění jednotných podmínek měření byl k napájení svítidel a předřadníků použit napájecí, od sítě galvanicky oddělený a stabilizovaný laboratorní zdroj napětí Pacific Smart Source 125AMX, jehož výstupem je sinusový průběh napětí obsahující pouze první harmonickou složku. Na tomto zdroji bylo možné přesně nastavit požadovanou efektivní hodnotu napětí na 230 V a frekvenci na 50 Hz. Tyto dva parametry se jinak v průběhu měření nepatrně měnily, a to v závislosti na příkonu připojeného svítidla, resp. předřadníku. Měřené vzorky byly k napájecímu zdroji připojeny přes svorkovnici s rozprostřenými vodiči, která umožňovala snadnou manipulaci s jednotlivými vodiči. Do této svorkovnice byl připojen standardní napájecí kabel se třemi měděnými žilami o průřezu 0,75 mm<sup>2</sup>, který byl dále připojen na svítidlo, resp. předřadník. Náčrt uspořádání měření je uveden níže.



Obrázek č. 6 – Uspořádání měřicího obvodu pro jednotlivá svítidla a předřadníky  
Zdroj: vlastní zpracování

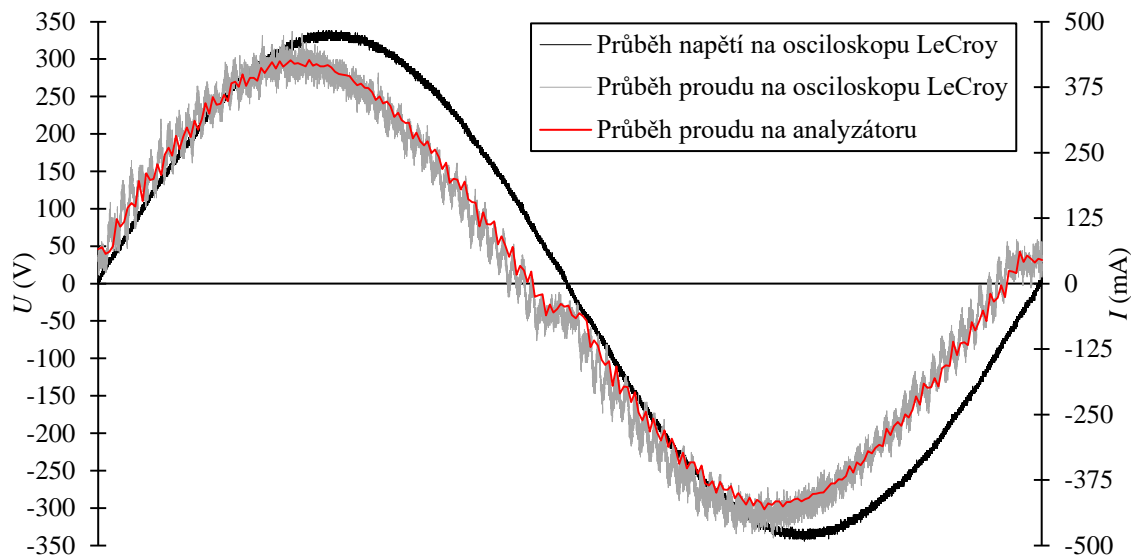


K samotnému měření byl použit analyzátor kvality sítě Chauvin Arnoux 8220 a proudová sonda MN93A od stejného výrobce, jejíž měřicí rozsah byl nastaven od 5 mA až do 6 A. Samostatná LED svítidla však v současnosti odebírají ze sítě relativně malý proud v řádech desítek až stovek miliampér, a proto byl fázový vodič protažen okem proudové sondy pěti smyčkami tak, aby byl celkový proud procházející sondou uměle navýšen a měření neprobíhalo blízko minimu měřicího rozsahu proudové sondy. V kombinaci s dvouseťnásobným převodem sondy a pěti vodiči procházejícími jejím okem byl výsledný proud měřený analyzátozem tisíckrát větší než ve skutečnosti. Toto zvětšení však bylo možné snadno odstranit podělením naměřených hodnot tisíci. Analyzátor byl poté připojen k PC a pomocí softwaru Power Analyser Transfer byly naměřené údaje vyexportovány do souborů XLS. Pro každý vzorek tak byly vytvořeny dva soubory. První obsahoval efektivní hodnoty jednotlivých harmonických proudů až do 50. řádu a druhý obsahoval časový průběh okamžitých hodnot napětí a proudu, které byly uloženy ve 256 hodnotách během jedné 20 ms trvající periody.

### **3.1.3 Kontrola snímaných hodnot analyzátozem**

Dle manuálu [18, str. 40] splňuje požitý analyzátor normu ČSN EN 61000-4-7, která popisuje pokyny pro měření a přístroje měřící vyšší harmonické složky. Manuál také uvádí, že pro výpočet harmonických složek je použita rychlá Fourierova transformace, která vzorkuje síťový kmitočet 50 Hz pomocí 256 vzorků na jednu periodu. Výsledný počet vzorků za jednu vteřinu je tedy 12 800. Porovnáme-li tuto hodnotu s Nyquistovým teorémem, který tvrdí, že počet vzorků pro zpětnou rekonstrukci signálu musí být větší než dvojnásobek nejvyšší harmonické složky snímaného signálu, která je v tomto případě 50. řádu o frekvenci 2,5 kHz, a dvojnásobek je tedy 5 kHz, zjistíme, že tato podmínka je bezpečně splněna.

Pro kontrolu správnosti získaného průběhu proudu a napětí a tím i potvrzení, že analyzátor bude při výpočtu vyšších harmonických složek zpracovávat dostatečně přesný průběh, bylo provedeno dodatečné měření pomocí osciloskopu LeCroy LT264 a proudové sondy Agilent 1146B s převodem 100 mV/A. Tento osciloskop vzorkuje snímaný průběh s frekvencí 2 GHz a na jednu periodu síťového napětí tak připadá přibližně 40 000 vzorků, což je 156x více než u analyzátoru Chauvin Arnoux 8220. K tomuto měření bylo využito jedno z dříve změřených svítidel, a to konkrétně Hormen Terra. Na grafu č. 11 jsou zobrazeny získané průběhy napájecích proudů současně a je z nich patrné, že jsou si velmi podobné. I přes relativně nízkou vzorkovací frekvenci analyzátoru jsou na příslušném průběhu proudu částečně patrné vysokofrekvenční zákmity. Tyto zákmity jsou ještě více patrné na průběhu získaném pomocí osciloskopu a po přiblížení je z nich možné určit jejich frekvenci, a to konkrétně 14,2 kHz. Při dalším přiblížení jsou viditelné další proudové zákmity tentokrát s frekvencí přibližně 172 kHz. Popsané zákmity jsou způsobeny spínaným zdrojem, který je umístěn v předradníku svítidla. Tyto proudové zákmity pak mohou způsobovat rušení popsaná v kapitole 1.2.

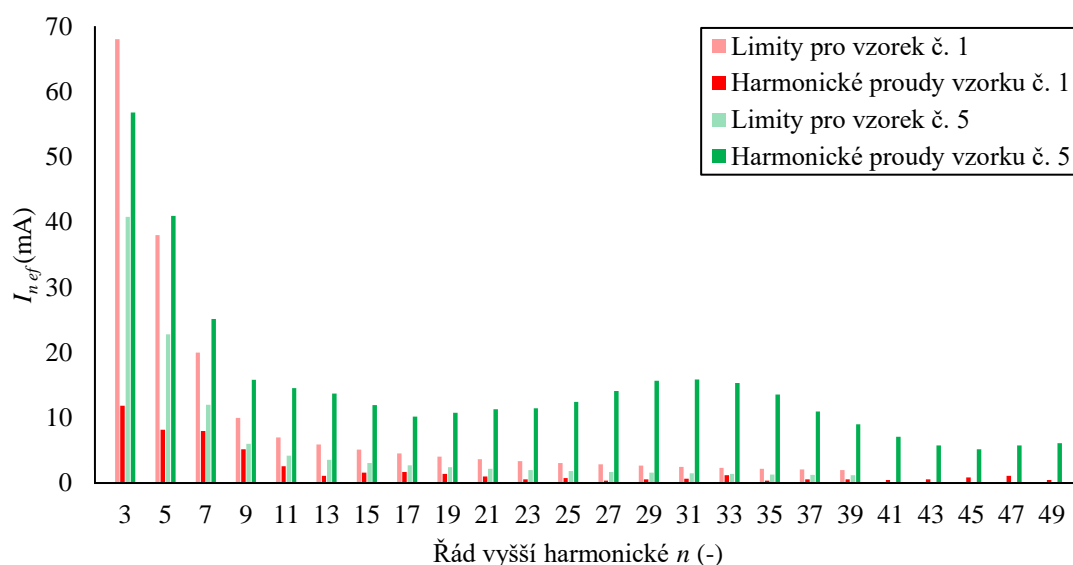


Graf č. 11 – Porovnání průběhů proudů získaných pomocí osciloskopu a pomocí analyzátoru  
Zdroj: vlastní zpracování

### 3.1.4 Harmonické složky naměřené analyzátozem pro vzorky do 25 W

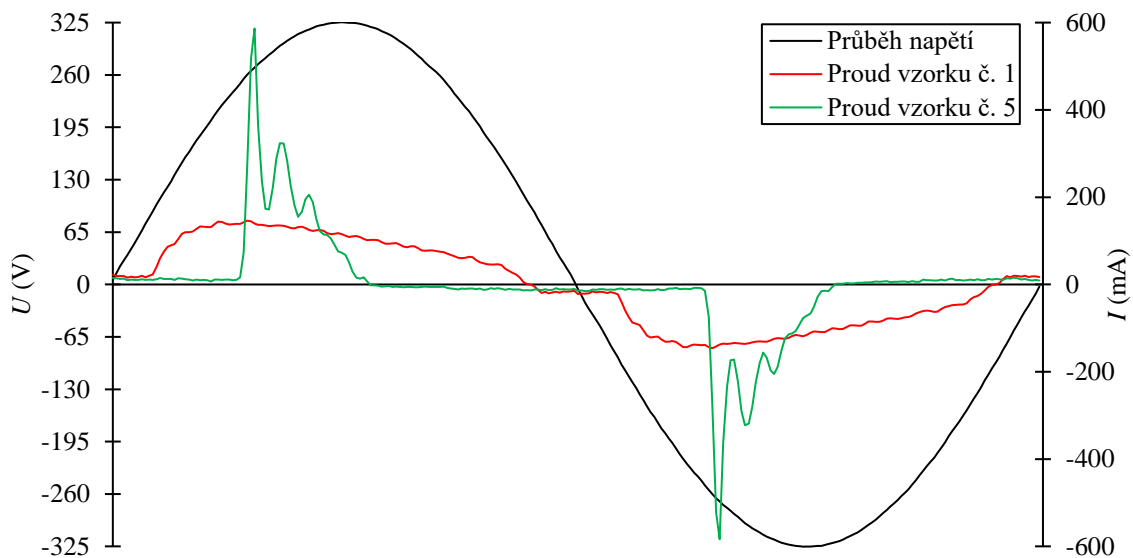
Z tabulky č. 8 lze zjistit, že u pěti ze šesti měřených vzorků je uváděn poměrně dobrý účinník, a to v rozmezí 0,9 až 0,95. U žádného ze vzorků však nebylo určeno celkové harmonické zkreslení proudu, které lze ale určit z naměřených hodnot. Pro rychlé porovnání jednotlivých složek všech vzorků je nejjednodušší zobrazit amplitudy harmonických složek v grafech.

Graf č. 12 zobrazuje vzorky č. 1 a č. 5, které mají příkon do 25 W. Maxima jednotlivých harmonických proudů jsou pro tyto svítidla stanovena vzhledem k jejich příkonu a pro jejich určení je potřeba provést přepoččet dle tabulky č. 2.



Graf č. 12 – Naměřené efektivní vyšší harmonické proudy pro vzorky č. 1 a č. 5  
Zdroj: vlastní zpracování

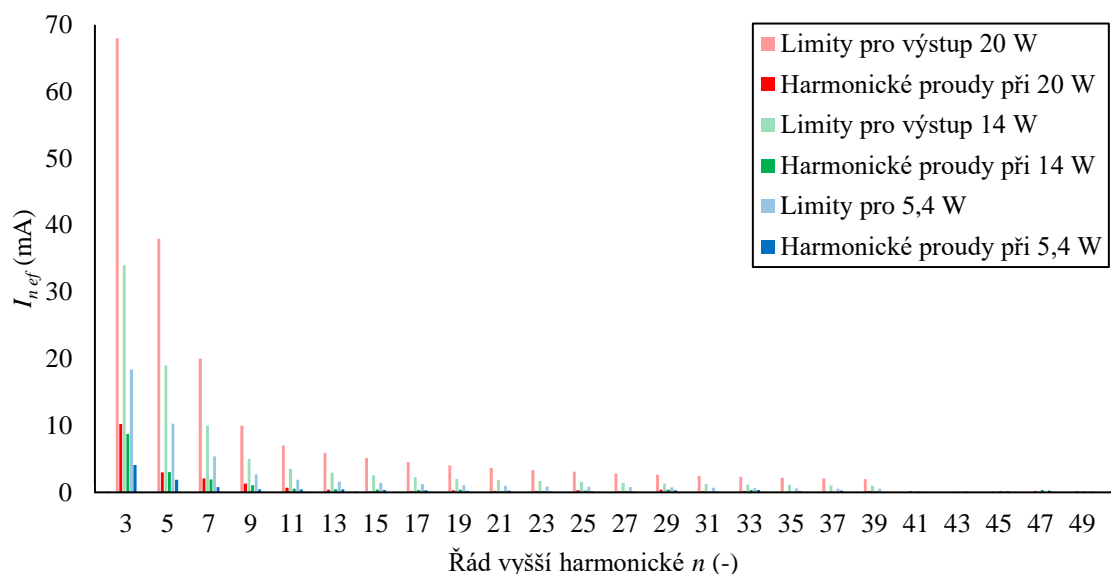
Z grafu č. 12 je patrné, že pro vzorek č. 1 nejsou možné limity harmonických proudů překročeny, zatímco pro vzorek č. 5 jsou limity překročeny. U prvních několika lichých harmonických složek jsou limity překročeny přibližně 1,3x až 2x a u dalších lichých složek jsou překročeny dokonce desetinásobně. Ze získaného časového průběhu proudu v grafu č. 13 je jasně patrné, proč je tomu tak. Například vzorek č. 1 má větší příkon než vzorek č. 5, konkrétně 20 W oproti 12 W, ale přesto vzorek č. 5 odebírá skokově větší okamžitý proud než vzorek č. 1, a to až 586 mA. Kvůli tomuto neharmonickému průběhu vzorek č. 5 musí být v souladu s podmínkami, které by na něj mohly být stanoveny normou ČSN EN 61000-3-2 ed. 4. Výsledné harmonické zkresení proudu vzorků č. 1 a 5 je uvedeno v tabulce č. 9.



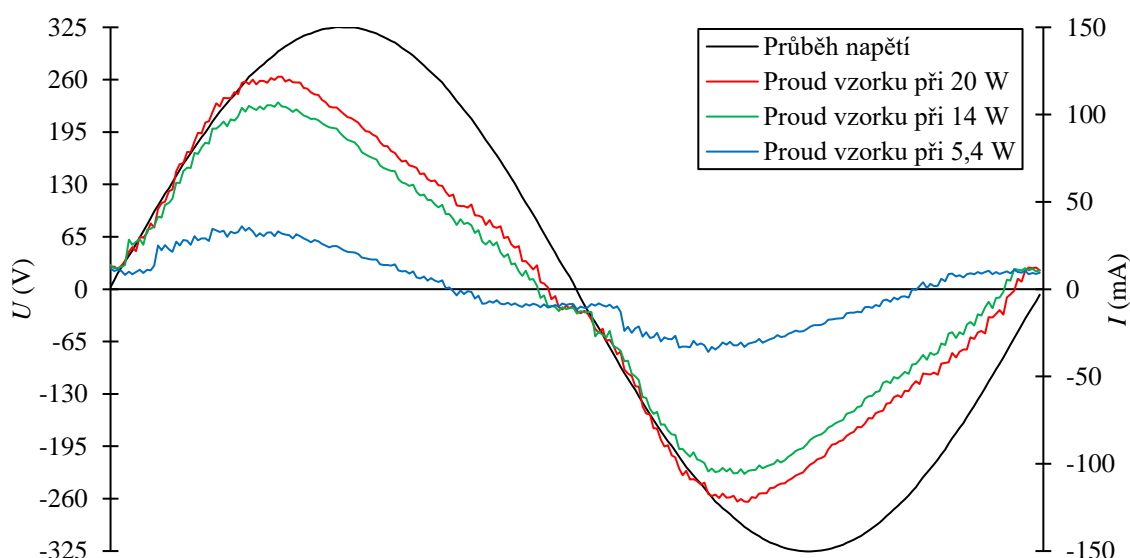
Graf č. 13 – Průběhy napájecích proudů pro vzorky č. 1 a č. 5  
Zdroj: vlastní zpracování

Další měření bylo provedeno na vzorku č. 6. Tento předřadník měl nastavitelný výstupní výkon a měření bylo provedeno pro hodnoty 5,4 W, 14 W a 20 W. Protože se jedná o zařízení s příkonem do 25 W, je opět možné vypočítat limity harmonických proudů dle tabulky č. 2 a výsledky měření porovnat pomocí grafu č. 14. Otázkou ale zůstává, zdali by u takovýchto předřadníků měly být zvoleny limity pro každou možnou hodnotu výstupního výkonu, nebo by měli být určeny pouze maximálním možným výkonem. Z tohoto grafu je vidět, že v žádné z nastavených kombinací proud vyšších harmonických nepřekročil možné limity stanovené normou ČSN EN 61000-3-2 ed. 4. a předřadník by tak splnil možné limity.

Dále lze sestavit a porovnat průběhy proudů pro jednotlivé výkony. Na grafu č. 15 je vidět, že tvarem vlny se průběh proudu liší pouze při výkonu 5,4 W, kdy dochází k průchodu proudu nulou dříve než u zbylých průběhů. U těch dochází pouze k očekávanému poklesu amplitudy proudu. Pro tyto průběhy je celkové harmonické zkresení uvedeno opět v tabulce č. 9.



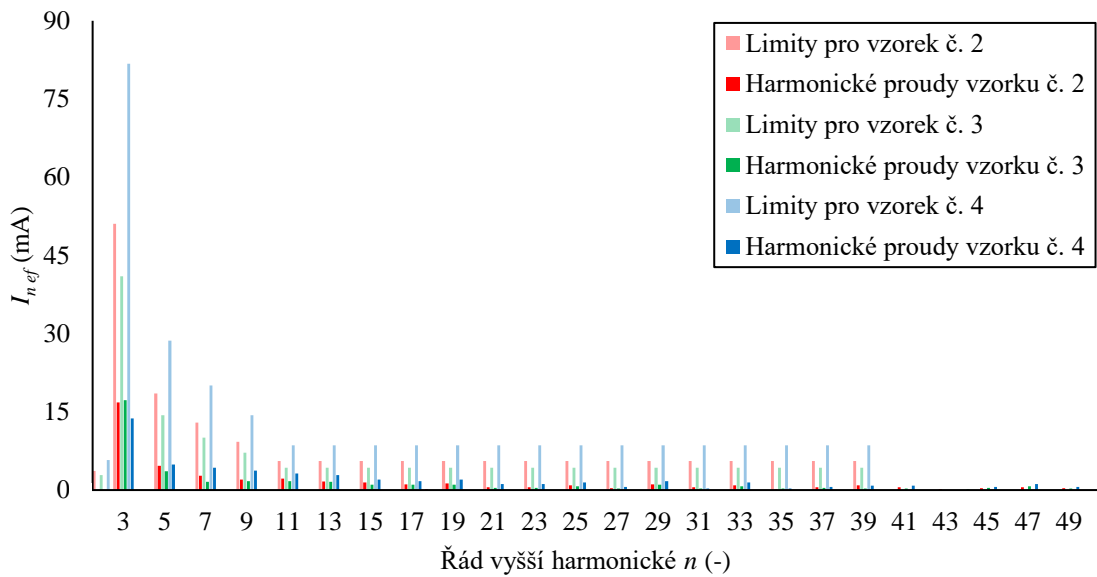
Graf č. 14 – Naměřené efektivní vyšší harmonické proudy pro vzorek č. 6 při 20 W, 14 W a 5,4 W  
Zdroj: vlastní zpracování



Graf č. 15 – Průběhy napájecích proudů pro vzorek č. 6 při 20 W, 14 W a 5,4 W  
Zdroj: vlastní zpracování

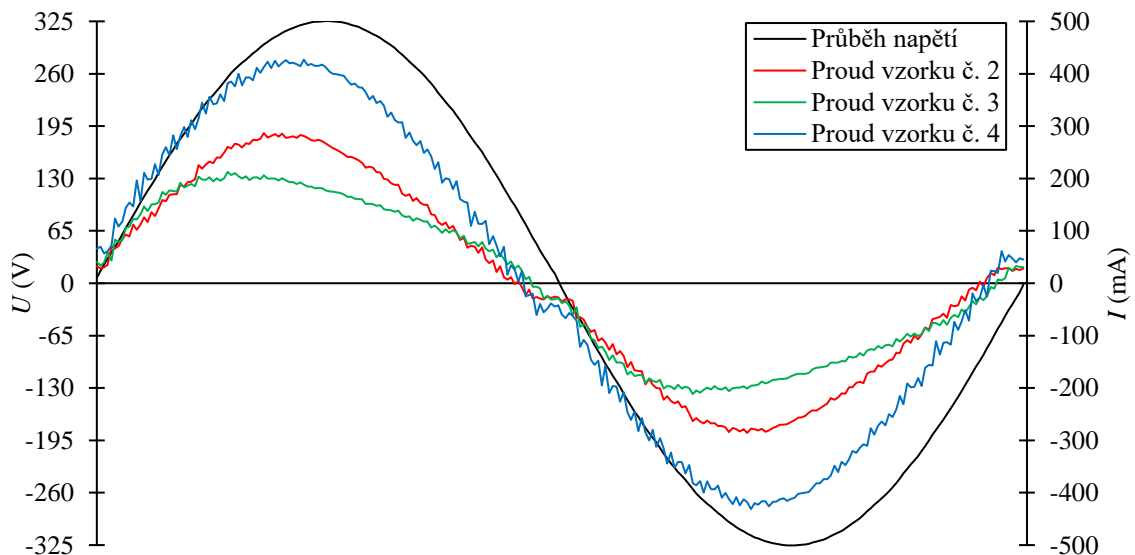
### 3.1.5 Harmonické složky naměřené analyzátořem pro svítidla nad 25 W

Měření vzorků č. 2, 3 a 4 bylo provedeno shodně s měřením předchozích vzorků, ale pro výpočet maximálních harmonických proudů byla použita tabulka č. 3. Z naměřených dat bylo tedy nejprve nutné zjistit efektivní hodnoty proudů prvních harmonických složek a s jejich pomocí vynásobit tabulkové hodnoty. Pro třetí harmonickou bylo také nutné použít účinník zjištěný při získávání informací o svítidlech. Z grafu č. 16 je opět patrné, že žádné z měřených svítidel nepřekračuje limity stanovené normou ČSN EN 61000-3-2 ed. 4 a na rozdíl od svítidel s příkonem do 25 W jsou tyto limity platné.



Graf č. 16 – Naměřené vyšší harmonické proudy pro vzorky č. 2, 3 a 4  
Zdroj: vlastní zpracování

Z naměřených údajů lze také sestavit průběhy odebíraných proudů a ověřit tak, že svítidla neodebírají rázový proud a jsou vybavena obvody, které slouží k jeho vyhlazení. Především proud vzorků č. 2 a 4 se velmi blíží sinusovému průběhu. Ze všech získaných průběhů proudu je však vidět, že proudová vlna není ani v jednom případě zcela hladká a vykazuje vždy malé zákmity v řádech jednotek miliampér. Tyto zákmity se mohou projevit jako elektromagnetické rušení a způsobovat další problémy, jak je popsáno v kapitole 1.2.3.



Graf č. 17 – Průběhy napájecích proudů pro vzorky č. 2, 3 a 4  
Zdroj: vlastní zpracování

Nejdůležitějším výstupem tohoto měření je však celkové harmonické zkreslení proudu. To lze snadno vypočítat z jednotlivých vyšších harmonických proudů pomocí vztahu (8) v kapitole

1.1.2. V tomto případě ale dokázal použitý analyzátor provést tento výpočet automaticky, a tak byly použity tyto hodnoty  $THD_I$ .

Další krokem je zjištění fázového posunu  $\cos \varphi_I$  první harmonické složky proudu vzhledem k první harmonické složce napětí, v tomto případě k počátku průběhu napájecího napětí. Tuto hodnotu poskytuje přímo analyzátor nebo ji lze zjistit rekonstrukcí průběhu proudu pomocí naměřených harmonických proudů. Získané hodnoty  $THD_I$  byly změřeny v efektivních hodnotách, ale bylo nutné je vynásobit hodnotou  $\sqrt{2}$ , aby bylo možné sestavení identického průběhu. K sestavení jednotlivých sinusovek byla použita následující rovnice sinusoidy, a všechny získané sinusovky byly poté sečteny v rekonstruovaný průběh.

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot \sum_{n=1}^{50} I_{n\text{ef}} \cdot \sin(2\pi \cdot f_n \cdot t + \varphi_n + n \cdot \varphi_k) \quad (20)$$

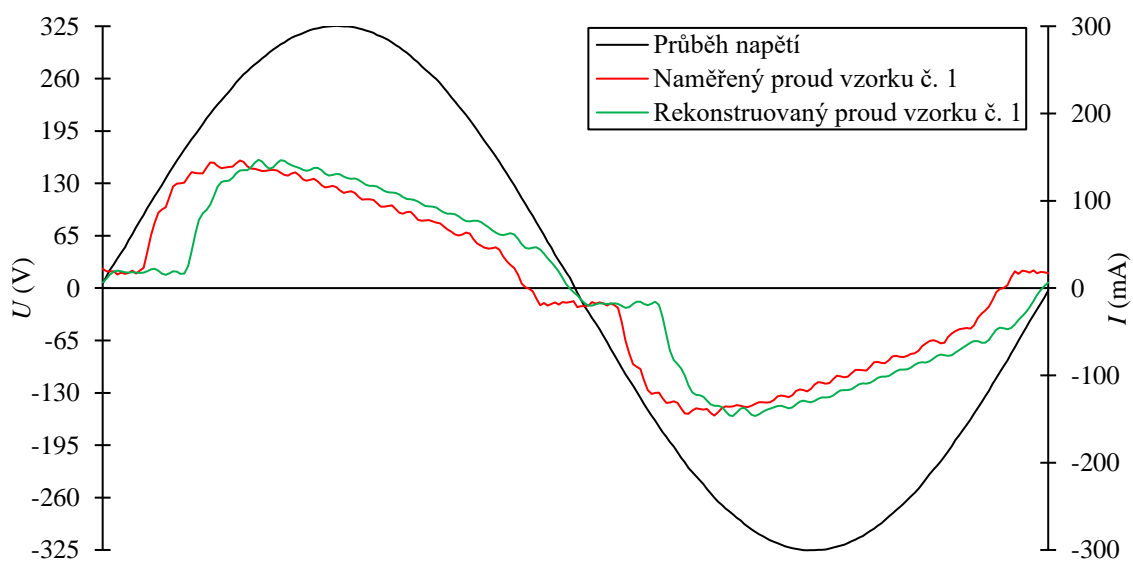
$f_n$  (Hz) – frekvence n-tého harmonického proudu

$\varphi_n$  (rad) – posun n-tého harmonického proudu vzhledem k první harmonické složce napětí

$n$  (-) – řád vyššího harmonického proudu

$\varphi_k$  (rad) – korekce chyby posunu výsledného proudu

Protože získané hodnoty harmonických proudů byly rekonstruovány ve stejném grafu jako průběh napětí, byly tak vztaženy ke stejnému počátku. To ovšem ve výsledném grafu způsobuje chybu a rekonstruovaný proud je fázově posunut oproti skutečnému naměřenému průběhu. V rovnici (20) tak vystupuje člen  $\varphi_k$  zajišťující korekci a tento úhel představuje i hledaný úhel  $\varphi_I$  mezi první harmonickou složkou napětí a proudu. Níže je názorně uveden stav rekonstrukce proudu vzorku č. 1 bez kompenzace fáze.



Graf č. 18 – Porovnání naměřeného a rekonstruovaného proudu vzorku č. 1

Zdroj: vlastní zpracování

Uvedeným postupem byly zjištěny všechny úhly  $\varphi_I$  pro všechna svítidla a předřadníky a se znalostí těchto úhlů a harmonického zkreslení proudu byly pomocí vztahu (11) vypočteny účinníky  $\lambda_{T-I}$  uvažující proudové zkreslení.

Č.	Typ svítidla	Typ předřadníku	$\lambda$ (-)	$THD_I$ (%)	$\varphi_I$ (°)	$\cos \varphi_I$ (-)	$\lambda_{T-I}$ (-)
1	D3225-CM-NW	Neuvedeno	0,9	18,9	17,0	0,956	0,940
2	Neuvedeno	Xitanium	0,92C	9,9	14,0	0,970	0,966
3	Hormen Oizzo A3	Tridonic	0,95	12,5	16,5	0,959	0,951
4	Hormen Terra	TCI	0,95	5,8	12,5	0,976	0,975
5	Pouze předřadník	Helvar	0,5C	131,1	30,0	0,866	0,525
6	Pouze předřadník	TCI při 20 W	0,91C	14,1	13,5	0,972	0,963
		TCI při 14 W		14,5	16,0	0,961	0,951
		TCI při 5,4 W		23,9	38,0	0,788	0,766

Tabulka č. 9 – Zjištěné parametry měřených svítidel a vypočítané účinníky  $\lambda_{T-I}$

Zdroj: vlastní zpracování

Pomocí získaných hodnot uvedených v tabulce č. 9 je možné provést porovnání údajů uváděných výrobcem a nově vypočítaných účinníků  $\lambda_{T-I}$  se zahrnutím harmonického zkreslení proudu. U sedmi měření z osmi bylo zjištěno, že účinníky neklesají pod výrobcem udávanou hodnotu, a to ani po zahrnutí harmonického zkreslení. Díky zahrnutí harmonického zkreslení však nově vypočtená hodnota účinníku  $\lambda_{T-I}$  poklesla řádově o jednotky procent nebo méně, a to konkrétně u vzorků č. 1, 2, 3, 4 a 6. Pro vzorek č. 5 však hodnota  $\lambda_{T-I}$  poklesla o celých 40 %, a to kvůli harmonickému zkreslení dosahujícího 131,1 %. Tento vzorek tedy dokazuje očekávaný následek nárůstu harmonického zkreslení, který je popsán na straně 22 a 23.

Dalším výsledkem tohoto měření je důkaz klesající závislosti účinníku s klesajícím výstupním výkonem stmívatelných předřadníků, a to konkrétně u vzorku č. 6. Pro vyšší hodnoty výstupního výkonu 20 W a 14 W účinník neklesá pod výrobcem uvedenou hodnotu, ale pro nejmenší výstupní výkon klesá až na hodnotu 0,766. V tomto případě neodpovídá údaj uvedený na výrobním štítku předřadníku skutečné hodnotě a nabízí se otázka, zdali by nebylo vhodnější, aby výrobce uváděl nejhorší možný účinník, se kterým může předřadník pracovat.

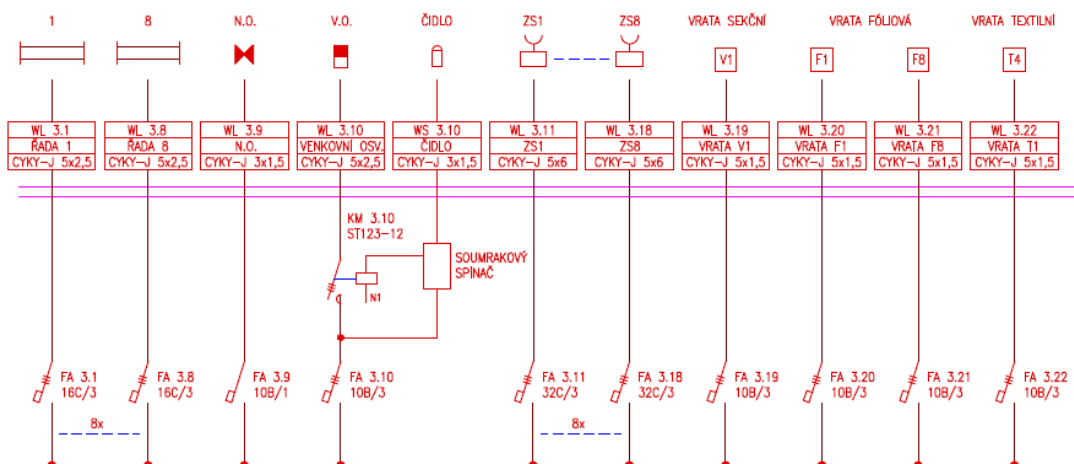
### 3.2 Analýza zpětného vlivu osvětlovací soustavy

Z předchozí kapitoly 3.1 by bylo možné vzít výsledné hodnoty účinníku  $\lambda_{T-I}$  a použít je pro odhad celkového vlivu velké osvětlovací soustavy. Problém nastává při střetu této úvahy s praxí, kdy mohou být v jedné osvětlovací soustavě použita různá svítidla s různými parametry a technologiemi, a výsledný zpětný vliv je pak kombinací jednotlivých zpětných vlivů od každého svítidla. Z tohoto důvodu bylo provedeno měření zpětných vlivů na osvětlovací soustavě instalované v podniku Juta a.s. ve Dvoře Králové nad Labem.

### 3.2.1 Přehled analyzované soustavy a zapojení

Analyzovaná světelná soustava je instalována jako hlavní osvětlení v halovém pracovním prostoru určeném pro spřádání textilií a sestává se z celkem 142 ks závěsných LED svítidel typu Surya Z2 C X 17k8 840 DALI od výrobce Elektro-Lumen, které umožňují stmívání. Ze získané technické dokumentace bylo zjištěno, že každé svítidlo má příkon 120 W a při plném výkonu má tedy soustava příkon 17 040 W. Bohužel další informace o účinnosti svítidel nebo použitím předřadníku nebylo možné zjistit a v provozu ani nebylo možné změřit zpětný vliv jednotlivých svítidel.

Samotné napájení svítidel bylo realizováno v osmi řadách, přičemž šest řad obsahovalo 18 ks svítidel a dvě řady obsahovaly pouze 17 ks svítidel. Každá z těchto řad byla připojena na jeden třífázový jistič s charakteristikou C a jmenovitým proudem 16 A, a to pomocí kabelu CYKY-J 5x2,5 a samotná řada pak byla rozdělena na třetiny, z nichž každá byla napájena jednou fází z příslušného jističe. Takto bylo dosaženo symetrického zatížení všech tří fází v poměru svítidel 6/6/6. Pro řady obsahující 17 ks svítidel byla svítidla rozdělena v poměru 5/5/7 na fázi. Tato malá nesymetrie je v poměru k celkovému příkonu bezvýznamná a lze ji proto zanedbat. Níže je uvedeno schéma zapojení jističů a napájení svítidel.



Obrázek č. 7 – Schéma zapojení jističů, napájení svítidel a dalších spotřebičů

Zdroj: projektová dokumentace výrobní haly

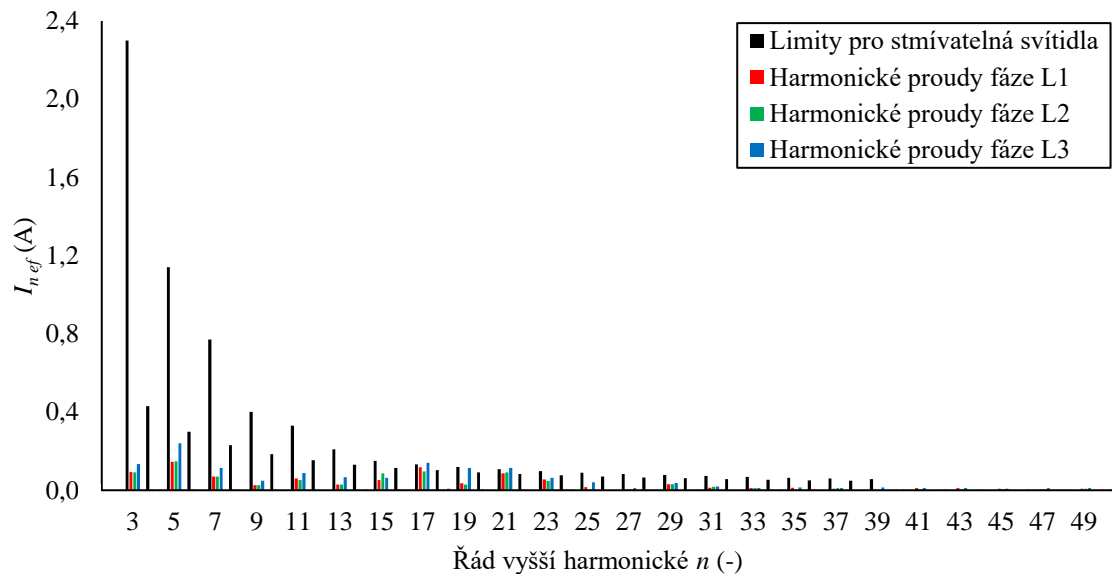
Na obrázku č. 8 je také vidět, že vodiče, které napájí jističe svítidel, napájí i další spotřebiče, například nouzové osvětlení, vrata apod. Tyto jističe byly během měření rozepnuty, tak aby se zamezilo možnému vlivu na měření. Ostatní spotřebiče v celém závodě však musely zůstat v provozu a jejich vliv například na průběh napájecího napětí tak nemohl být omezen. Zváží-li se však, že toto je běžný pracovní stav svítidel, pak tyto měřicí podmínky odpovídají realitě.

### 3.2.2 Měření nesymetrické řady svítidel

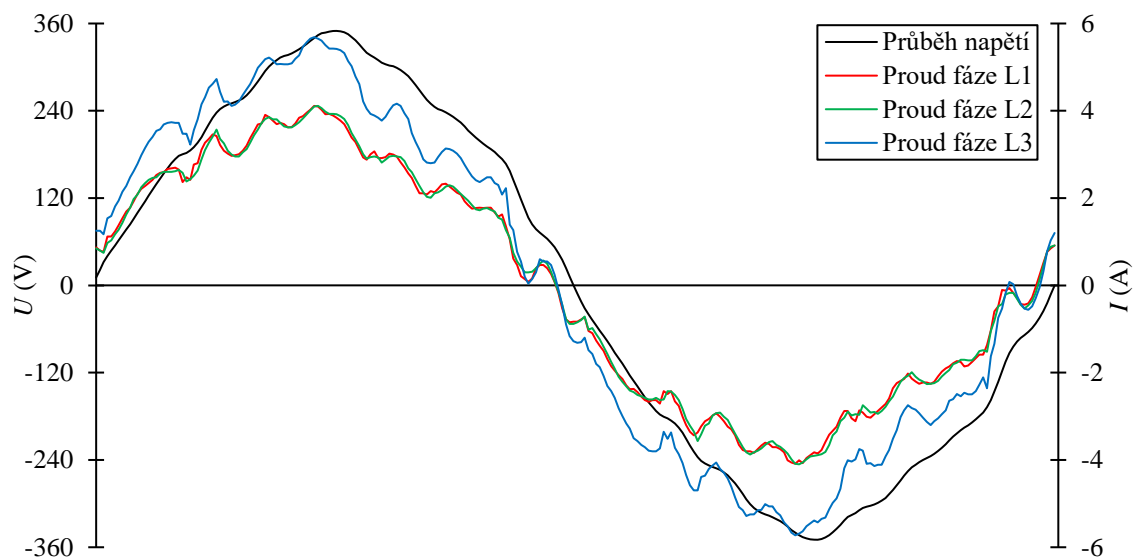
Právě na zmíněné nesymetricky zapojené řadě svítidel bylo provedeno první měření, a to opět pomocí analyzátoru sítě Chauvin Arnoux 8220 a proudové sondy MN93A. Proudová sonda byla



připojena vždy na jeden fázový vodič a napěťové svorky vždy mezi příslušnou fází a střední vodič. Takto byly proměřeny všechny tři fáze a z naměřených hodnot opět sestaveny grafy uvedené níže.



Graf č. 19 – Naměřené vyšší harmonické proudy pro jednotlivé fáze nesymetrické řady 5/5/7  
Zdroj: vlastní zpracování

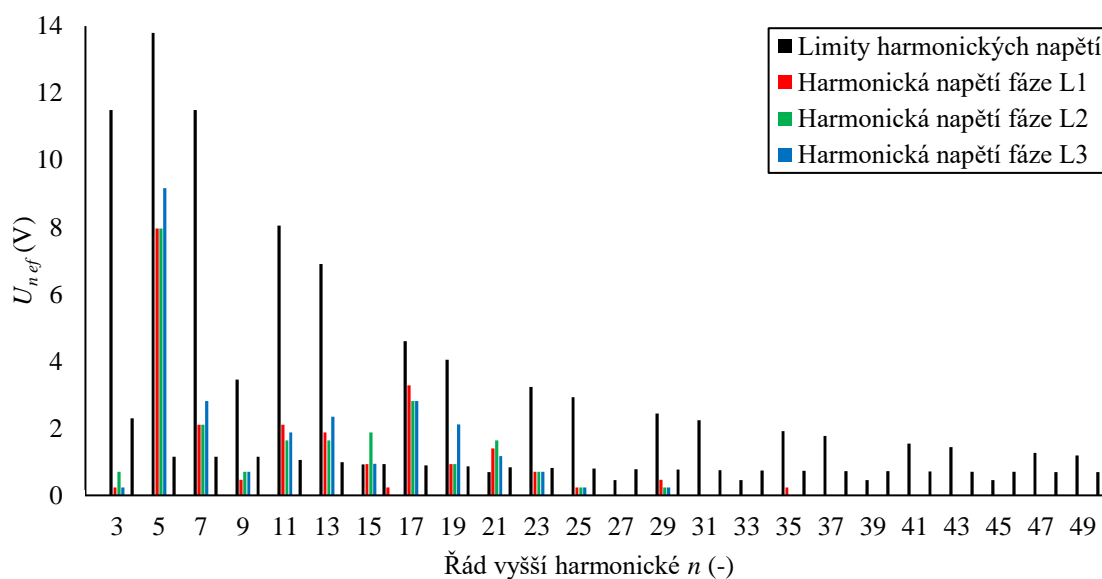


Graf č. 20 – Naměřené napájecí napětí a proudy pro nesymetrickou řadu 5/5/7  
Zdroj: vlastní zpracování

Protože měřená svítidla byla stmívatelná, jsou v grafu č. 19 použity limity uvedené v tabulce č. 4. Tato tabulka ovšem uvádí poměrně vysoké limity harmonických proudů, a navíc je uvádí pouze v absolutních hodnotách v ampérech. Z takto uvedených limitů není zřejmé, jsou-li hodnoty vztaženy pro samostatné svítidlo, nebo pro zapojení většího množství svítidel. Pokud by byly hodnoty vztaženy k většímu množství svítidel, není jasné, jaký konkrétní počet je

normou myšlen. Z grafu č. 19 je navíc patrné, že ani při zapojení pěti, resp. sedmi kusů svítidel na fázi nejsou limity několika prvních lichých harmonických proudů ani zdaleka překročeny. Bude-li se ale počet svítidel připojených na fázi zvyšovat dojde eventuálně k jejich překročení. Toto ale bude zapříčiněno přirozeným sčítáním napájecích proudů svítidel, a ne nesplněním limitů pro jednotlivé svítidlo. Pokud norma vztahuje limity k samostatnému svítidlu, což by dávalo největší smysl, pak jsou uvedené hodnoty značně vysoké.

Na grafu č. 20, zobrazujícím průběh napětí referenční fáze L1 a proudu všech tří fází, je zřetelně vidět, že průběh napětí se velmi liší od ideální sinusovky, a navíc napětí v maximech dosahu amplitudy až 350 V, což je o 25 V více než je jmenovitá maximální hodnota síťového napětí. Toto zvlnění a přepětí pravděpodobně není zapříčiněno pouze světelnou soustavou, která má příkon jenom 17 kW a představuje tak pouhý zlomek připojeného výkonu k transformátoru, ale je způsobeno kolektivním vlivem všech spotřebičů zapojených v síti. Nelze však také vyloučit její příspěvek na celkové zvlnění napětí. Pro zajímavost je níže zobrazen graf, obsahující střední hodnoty harmonických napětí získaných pomocí analyzátoru.

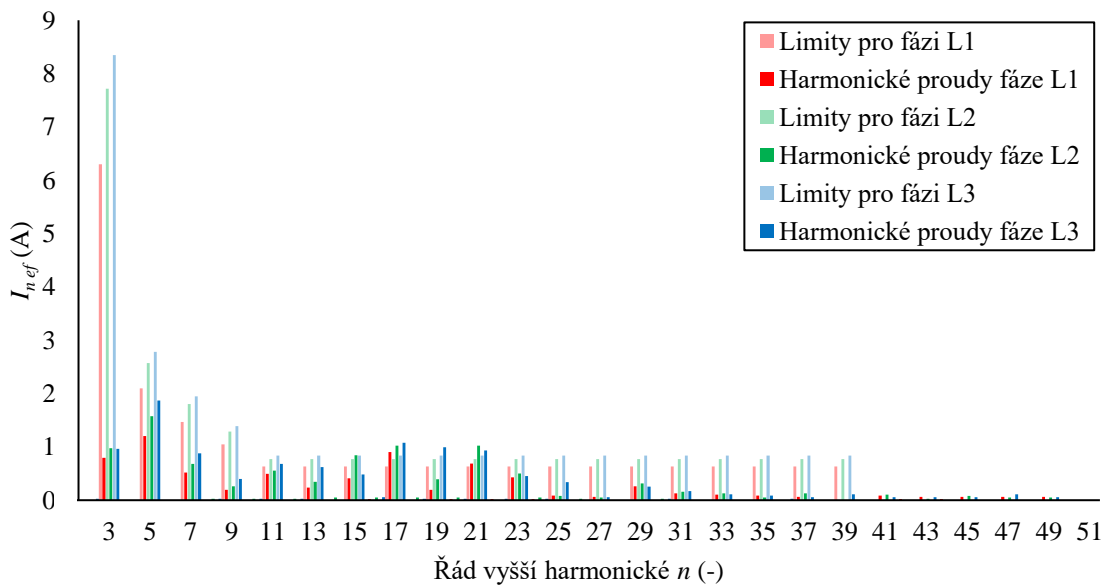


Graf č. 21 – Naměřená vyšší harmonická napětí při měření nesymetrické řady 5/5/7  
Zdroj: vlastní zpracování

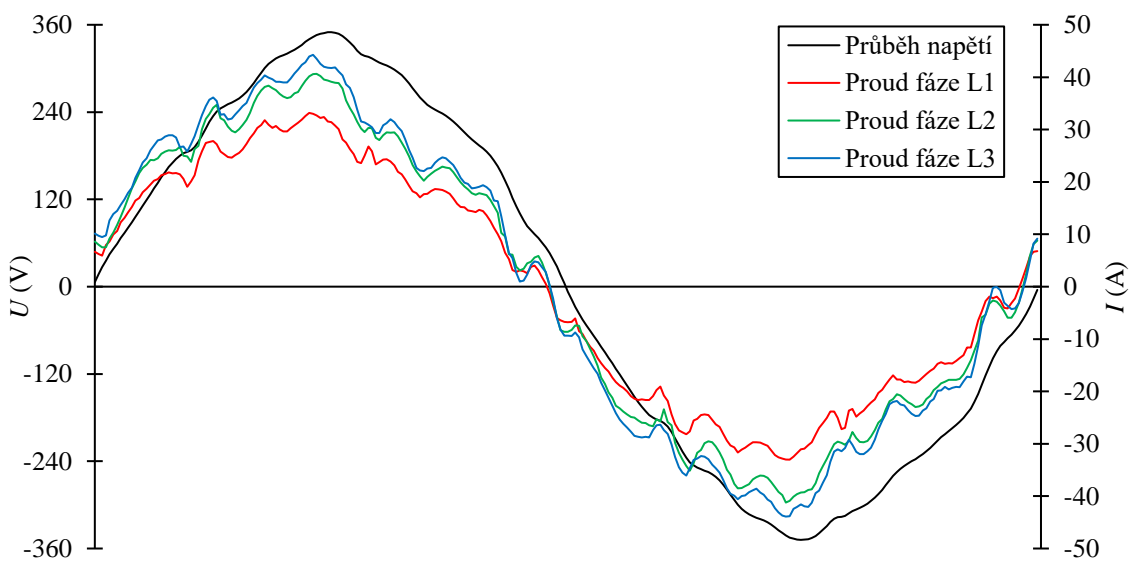
Hodnoty limitů harmonických napětí byly vypočítány podle tabulky č. 1. Na grafu č. 21 je vidět, že žádné harmonické napětí nepřekračuje stanovené limity. Celkové naměřené harmonické zkreslení bylo 4,2 % pro fáze L1, L2 a pro fázi L3 bylo 4,6 %. Zkreslení tedy nepřesahuje ani dlouhodobě dovolených 8 %. Hodnoty harmonického zkreslení proudu tohoto měření jsou uvedeny ve shrnutí v tabulce č. 10. Dalším zajímavým poznatkem na grafu č. 20 je, že průběh proudu sleduje průběh napětí, a to tak, že v místech zvlnění napájecího napětí dochází ke stejnému poklesu odebraného proudu.

### 3.2.3 Měření kompletní osvětlovací soustavy

Další měření bylo provedeno na osvětlovací soustavě při plném příkonu 17 kW. Soustava však byla připojena na řídicí jednotku DALI, která byla opatřena vnitřním čidlem přisvítu, a stmívala tak svítidla dle potřeby s cílem snížení spotřeby. Tato jednotka byla tedy za účelem měření vypnuta a svítidla se tak uvedla automaticky do stavu s 0% stmíváním. Napájení každé fáze jističů bylo zajištěno dvěma slanými vodiči, a aby bylo možné změřit celkový proud pomocí sondy MN93A, byl jeden z těchto vodičů vždy krátkodobě odpojen a celkový proud jedné fáze pak procházel pouze druhým vodičem. Naměřené hodnoty a průběhy jsou opět uvedeny níže.



Graf č. 22 – Naměřené vyšší harmonické proudy po fázích při napájení všech 142 ks svítidel  
Zdroj: vlastní zpracování

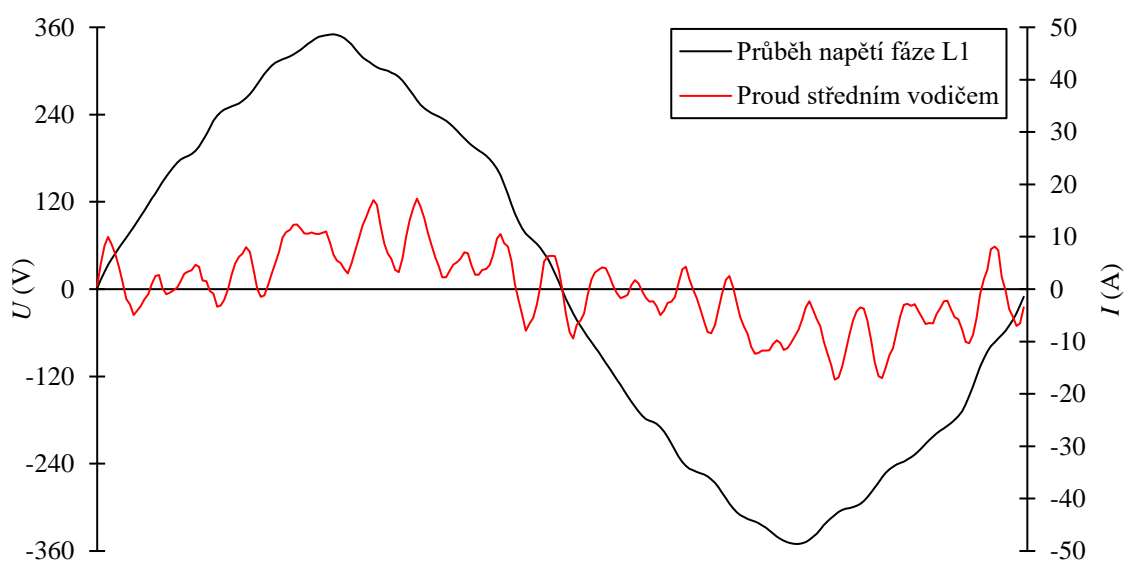


Graf č. 23 – Naměřené napájecí napětí a proudy pro všech 142 ks svítidel při plném výkonu  
Zdroj: vlastní zpracování

U tohoto měření opět nastává problém při určení limitů harmonických proudů. Navíc bylo zjištěno, že rozdělení svítidel na třetiny není přesně symetrické. Pokud by byly limity určeny tabulkou č. 4 a poté vynásobeny 40, 49 a 53 kusy svítidel připadajících na příslušné fáze, bylo by zjištěno, že například limity pro 3. harmonický proud vychází přibližně 110 A. Takovéto hodnoty v kontextu celkového měření nedávají smysl, protože celkový proud první harmonické pro všechna svítidla dosahuje pouze 76 A. Z tohoto důvodu byly pro toto měření použity limity pro nestmívatelná svítidla s příkonem nad 25 W z tabulky č. 3, ve které jsou limity uvedeny v procentech vzhledem k první harmonické složce proudu. K výpočtu limitu pro 3. harmonickou složku je však zapotřebí účinník  $\lambda$  svítidla. Ten se bohužel nepodařilo dohledat, a tak byl účinník svítidla odhadnut na hodnotu 0,95, a to dle výsledků kapitoly 3.2, kde lze v tabulce č. 9 zjistit, že se účinník příkonově větších LED svítidel velmi často pohybuje v okolí této hodnoty.

Z grafu č. 22 lze zjistit, že v prvních několika lichých násobcích vyšších harmonických proudů nebyly limity překročeny pro žádnou z fází. Naopak pro 15., 17., 19. a 21. harmonickou složku byly limity překročeny, a to jednou nebo více fázemi. Zajímavým zjištěním je, že například proud 19. harmonické složky fáze L1 dosahuje hodnoty 194 mA a proud stejné harmonické složky fáze L3 dosahuje 990 mA, což je 5x více. Na fázi L1 je však připojeno 40 svítidel a na fázi L3 pouze o 13 více. Pokud jsou všechna svítidla shodná, měla by ve fázi L3 odebírat přibližně 1,3x větší proud na všech harmonických složkách než svítidla na fázi L1. Toto platí například pro 1. harmonickou složku, ale ne pro zmíněnou 19. složku.

Dále je patrné, že na 15. harmonické složce je proud fáze L2 větší než proud fáze L3, přičemž fáze L2 obsahuje o 4 svítidla méně než fáze L3. Výsledné harmonické proudy fáze L3 by tedy měly být vyšší než u fáze L2. Podobný jev je pozorovatelný i u 3., 21., 23. a 29. složky.



Graf č. 24 – Naměřený proud procházející středním vodičem pro všech 142 ks svítidel  
Zdroj: vlastní zpracování

Dále bylo provedeno měření proudu procházejícího středním vodičem. Pokud by bylo rozdělení svítidel na fázi symetrické a jednalo by se o lineární zátěže, pak by byl výsledný proud středním vodičem nulový. Toto ale v tomto případě neplatí. Kvůli nesymetrii a obsahu vyšších harmonických proudů protéká středním vodičem nenulový proud. Jelikož se proudy lichých harmonických složek v nulovém vodiči sčítají nezávisle na fázi, nelze určit, ke které fázi napětí je možné proud vztáhnout. Na grafu č. 24 je tedy uveden průběh napětí na fázi L1, ale je čistě ilustrativní.

Špičkově dosahoval proud ve středním vodiči amplitudy až 17 A, ale celkový efektivní proud byl přibližně 7,3 A. V kapitole 1.1.8 je uvedeno, že dosahuje-li efektivní proud procházející středním vodičem 15 % proudu první harmonické, pak nesmí být průřez středního vodiče menší než průřez fázových vodičů. To bylo v tomto případě splněno, protože proud první harmonické dosahoval pro každou fázi cca 26 A a 15 % z této hodnoty jsou cca 4 A.

### 3.2.4 Vyhodnocení měření nesymetrické řady a celé osvětlovací soustavy

Z výše uvedených průběhů je zřejmé, že v reálné síti je průběh napětí také neharmonický, a proto lze pro výpočet účinníku aplikovat skutečný účinník  $\lambda_{T-UI}$  uvažující harmonické zkreslení jak napětí, tak i proudu, který je dán vztahem (15). K tomuto výpočtu je potřeba navíc znát zkreslení harmonického napětí  $THD_U$ , které bylo opět zjištěno pomocí analyzátoru. Po dosazení do vztahu (15) vyjdou hodnoty uvedené v tabulce č. 10.

Z uvedených hodnot je vidět, že u nesymetrické řady svítidel s rostoucím počtem svítidel na fázi rostlo harmonické zkreslení proudu a zároveň tak klesal účinník  $\lambda_{T-UI}$ . Pokles účinníku byl však pouze v řádech setin. Stejný pokles účinníku  $\lambda_{T-UI}$  je patrný i z měření kompletní osvětlovací soustavy, jehož pokles byl pouze v řádech tisícín. Dalším viditelným trendem je nárůst harmonických zkreslení proudu a napětí s rostoucím počtem připojených svítidel na fázi, a to jak pro měření samostatné řady, tak i pro měření kompletní soustavy. Ve sloupečku 6 je však účinník téměř konstantní pro všechny fáze a výsledný pokles účinníku  $\lambda_{T-UI}$  s rostoucím harmonickým zkreslením je patrný až po jeho započtení.

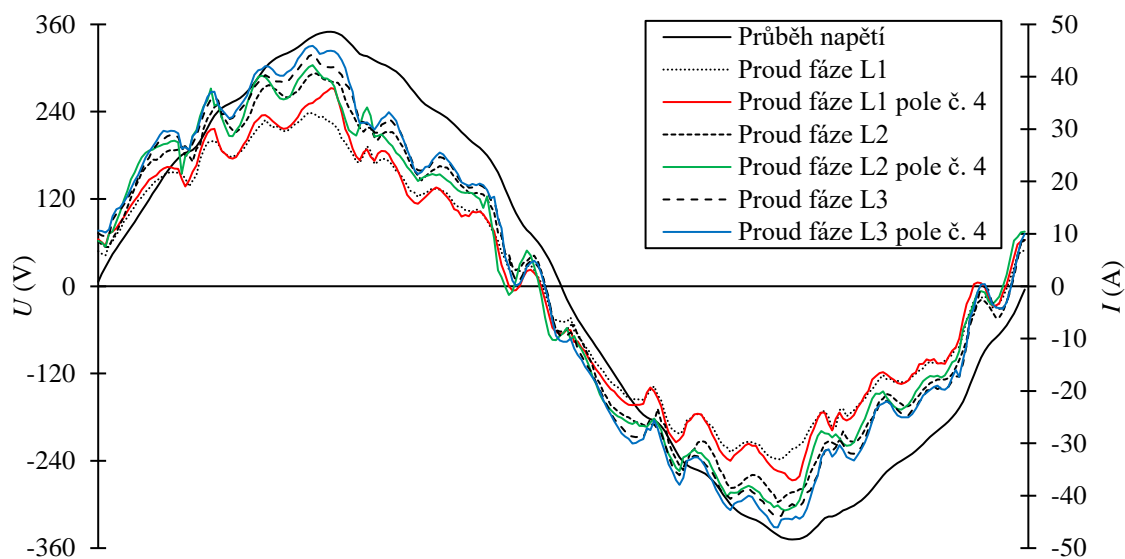
Fáze	Měření	Počet svítidel	$P$ (W)	$S$ (VA)	$P/S$ (-)	$THD_U$ (%)	$THD_I$ (%)	$\lambda_{T-UI}$ (-)
L1	Nesymetrické řady svítidel	5	603	619	0,974	4,2	10,4	0,968
L2		5	603	619	0,974	4,2	10,4	0,968
L3		7	842	866	0,973	4,6	11,1	0,966
L1	Kompletní osvětlovací soustavy	40	4 932	5 061	0,974	3,8	9,6	0,969
L2		49	6 034	6 192	0,974	4,2	10,6	0,968
L3		53	6 509	6 685	0,974	4,6	10,8	0,967

Tabulka č. 10 – Zjištěné parametry měřených svítidel a vypočítané účinníky  $\lambda_{T-UI}$

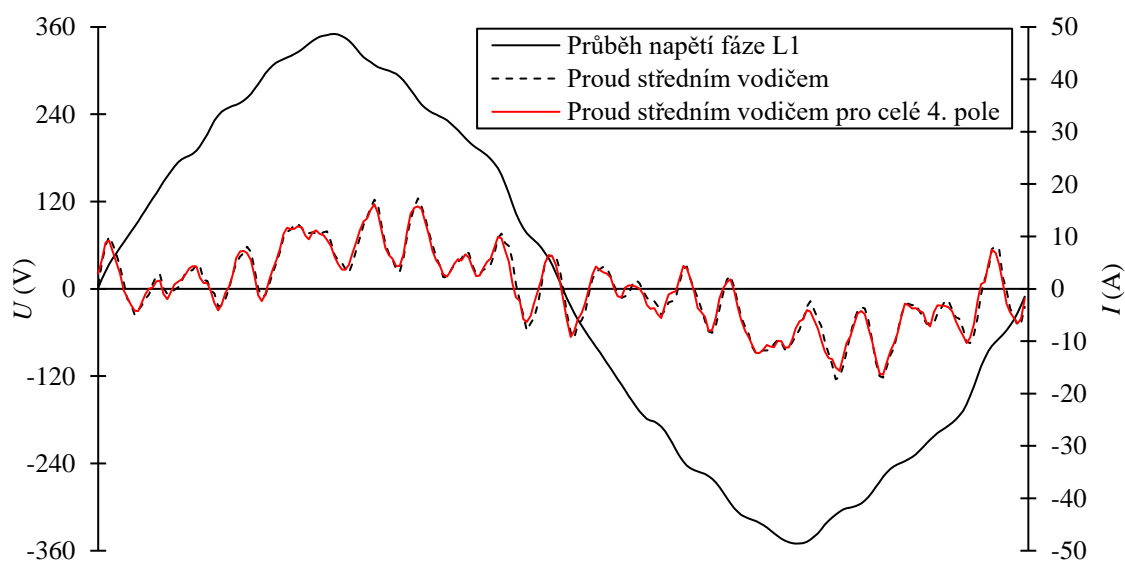
Zdroj: vlastní zpracování

### 3.3 Analýza napájení haly včetně osvětlovací soustavy

Jako poslední měření bylo provedeno měření proudu přímo před jističem OEZ Modeion BC160, který napájel obslužnou sekci rozvaděče (pole č. 4), na kterou byly krom svítidel připojeny i zmíněná vrata, nouzové osvětlení, DALI řídicí jednotka apod. Obslužná sekce se ovšem skládala ze spotřebičů, které byly většinou vypnuty a krom svítidel odebíraly minimální proud. Samotná svítidla totiž odebírala efektivní proudy 21,5 A, 26,3 A a 28,3 A na fázi a při měření obslužné sekce odebírala proudy 22,4 A, 26,7 A a 29,1 A na fázi, takže došlo pouze k mírnému zvýšení o cca 1 A na fázi. Níže jsou zobrazeny průběhy napájení svítidel a celé obslužné sekce.



Graf č. 25 – Naměřený proud fázových vodičů pro celé pole č. 4 a pouze pro svítidla  
Zdroj: vlastní zpracování



Graf č. 26 – Proud procházející středním vodičem pro 142 ks svítidel a pro celé rozvaděčové pole č. 4  
Zdroj: vlastní zpracování

U středního vodiče obslužné sekce rozvaděče nedošlo ke zvýšení efektivního proudu vlivem ostatních spotřebičů, protože jejich celkový odběr proudu nebyl dostatečný, tak aby se výrazně projevil při měření. Pro lepší výsledky by bylo vhodné měřit proud napájející všechna pole rozvaděče. To bohužel nebylo možno provést, protože rozvaděč byl napájen pomocí měděných pásů, ke kterým nebylo možné připojit proudovou sondu analyzátoru.

## 4 Závěr

V závěrečné části této práce bylo měřením a výpočty dokázáno, že vztahy uvedené v první kapitole doopravdy mají za následek snížení hodnoty skutečných účinníků uvažujících neharmonické proudy a neharmonická napětí, tedy vztahy  $\lambda_{T-I}$  a  $\lambda_{T-UI}$ . Největší pokles celkového účinníku  $\lambda_{T-I}$  byl dle očekávání zaznamenán u vzorku č. 5, což byl samostatný předřadník o malém výkonu. U tohoto vzorku byl deklarován účinník  $\lambda$  na hodnotu 0,5C a vypočtená hodnota účinníku  $\lambda_{T-I}$  byla po započtení 131,1%  $THD_I$  rovna hodnotě 0,525. Dále bylo u vzorku č. 6, tedy předřadníku o malém regulovatelném výstupním výkonu zjištěno, že s klesajícím výkonem klesal i účinník  $\lambda_{T-I}$ , a to v rozmezí od 0,963 do 0,766. Na výrobním štítku předřadníku však byla uvedena pouze hodnota účinníku  $\lambda = 0,91$  C, která neodpovídá účinníku  $\lambda_{T-I} = 0,766$ , který byl vypočten pro nejmenší nastavený výstupní výkon. Nabízí se zde otázka, zdali by nebylo lepší, aby výrobci uváděli interval účinníku  $\lambda_{T-I}$ , ve kterém může předřadník pracovat místo jedné jediné hodnoty, a to především u takto regulovatelných nebo stmívatelných svítidel. Alternativou tohoto zápisu by mohlo být uvedení účinníku například ve tvaru  $\lambda_{T-I} \geq$  číslo, kde je na místě čísla uvedena minimální hodnota účinníku  $\lambda_{T-I}$  přičemž informace o tom, že svítidlo může pracovat i s lepším účinníkem zůstává stále zachována. Nutno poznamenat, že s tímto způsobem zápisu je možné se již setkat u některých výrobců svítidel a předřadníků. Výše uvedený proces zpřesnění výpočtu účinníku a jeho zápisu lze obecněji aplikovat i na další zařízení, která odebírají neharmonický proud, a která mění svůj výstupní výkon v čase, tedy v podstatě veškerá elektronika obsahující regulovatelné spínané zdroje, jako jsou stolní počítače, televize, záložní zdroje UPS nebo průmyslové usměrňovače, které mohou trvale odbírat výkon, který je v porovnání s domácími spotřebiči nezanedbatelný.

U ostatních vzorků samostatných svítidel, které měly větší výkon než samostatně měřené předřadníky, se účinník  $\lambda_{T-I}$  pohyboval okolo hodnoty 0,95, což odpovídalo hodnotám uvedeným na výrobních štítcích svítidel, resp. na použitých předřadnicích. U žádného svítidla neklesl účinník  $\lambda_{T-I}$  pod uvedenou hodnotu, a tak není v těchto případech nutná změna zápisu účinníku. Nicméně bude-li takovýto svítidel zapojeno do jedné soustavy více, bude mít odebíraný výkon stále kapacitní charakter a v dlouhodobém měřítku bude nutná kompenzace pomocí tlumivek.

Právě proto bylo provedeno měření reálné soustavy svítidel s příkonem cca 17 kW, u které se prokázalo, že odebíraný výkon je stále kapacitního charakteru. Také se dokázalo, že na pokles skutečného účinníku  $\lambda_{T-UI}$  má vliv nejen harmonické zkreslení proudu, ale i harmonické zkreslení síťového napětí, které však nemůže být bez kolektivního přičinění všech spotřebitelů jakkoliv změněno. U tohoto měření se však také ukázalo, že pokles účinníku  $\lambda_{T-UI}$  je při malých hodnotách harmonických zkreslení minimální až zanedbatelný. Proto může nastat situace, kdy dojde



k vykompenzování kapacitního výkonu přirozeně od jiných instalovaných zařízení, která odebírají výkon induktivního charakteru. U této soustavy svítidel bylo dále zjištěno, že nárůst počtu svítidel má za následek nárůst harmonického zkreslení proud a napětí a také, že celkové proudy 15., 17., 19. a 21. harmonické složky přesahovaly vypočtené limity řádově o stovky miliampér až jednotky ampér. V porovnání s proudem první harmonické, který dosahoval hodnot v rozmezí 22 až 29 A jsou však tyto hodnoty malé a vzniká zde otázka, je-li případná filtrace takovýchto vyšších harmonických proudů výhodná.

Navzdory skutečnosti, že se v praxi mohou účinnky zařízení s rozdílnými charaktery odběru navzájem vykompenzovat, je postup uvedený v druhé kapitole stále platný a s drobnými modifikacemi, jako například použitím jiných limitů uvedených v normách pokrývajících měřené zařízení, může být použit i pro další zařízení odebírající neharmonické proudy a napětí nezávisle na charakteru odebíraného výkonu.

V posledním měření se také prokázalo, že s rostoucím počtem svítidel s odběrem proudu s obsahem vyšších harmonických složek dochází k nárůstu proudu středním vodičem, který je však také silně neharmonický. Tento proud dosahoval ve špičkách až 15 A avšak díky průřezu středního vodiče nebyl vodič přetěžován.

## Seznam zdrojů a literatury

- [1] SANDOVAL, Gonzalo. *Power Factor in Electrical Power Systems with Non-Linear Loads* [online]. [cit. 28. února 2018]. Dostupné z: [http://www.apqpower.com/assets/files/PF\\_nonlinearloads.pdf](http://www.apqpower.com/assets/files/PF_nonlinearloads.pdf)
- [2] STEVANOVIĆ, Dejan. PETKOVIĆ, Predrag. *The Losses at Power Grid Caused by Small Nonlinear Loads* [online]. [cit. 3. března 2018]. Serbian journal of electrical engineering. Vol. 10, No. 1, February 2013, 209-217. Dostupné z: [http://www.journal.ftn.kg.ac.rs/Vol\\_10-1/19-Stevanovic-Petkovic.pdf](http://www.journal.ftn.kg.ac.rs/Vol_10-1/19-Stevanovic-Petkovic.pdf)
- [3] MARTÍNEZ, José Raul. KRUG, David. *Voltage-Current Characteristic of Incandescent Lightbulbs: Measurement and Analysis* [online]. [cit. 7. března 2018]. ResearchGate, July 2013. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/251567174\\_Voltage-Current\\_Characteristic\\_of\\_Incandescent\\_Lightbulbs\\_Measurement\\_and\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/251567174_Voltage-Current_Characteristic_of_Incandescent_Lightbulbs_Measurement_and_Analysis)
- [4] ČSN EN 61000-2-2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 2-2: Prostředí - Kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením a signály ve veřejných rozvodných sítích nízkého napětí*. Praha: ÚNMZ, únor 2003.
- [5] ČSN EN 61000-3-2 ed.4. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 3-2: Meze - Meze pro emise proudu harmonických (zařízení se vstupním fázovým proudem  $\leq 16$  A)*. Praha: ÚNMZ, duben 2015.
- [6] *Energetický regulační věstník* [online]. [cit. 15. března 2018]. Energetický regulační úřad, ročník 17, částka 10/2017, Jihlava 2017. Dostupné z: [https://www.eru.cz/documents/10540/2887244/ERV\\_10\\_2017.pdf/4238e02c-ad52-4f59-8fd5-bf67cf68e47f](https://www.eru.cz/documents/10540/2887244/ERV_10_2017.pdf/4238e02c-ad52-4f59-8fd5-bf67cf68e47f)
- [7] *Regulátory jalového výkonu Novar 1114* [online]. [cit. 17. března 2018]. KBM systems, s.r.o., Liberec 2017. Dostupné z: <http://www.kmb.cz/index.php/cs/regulatory-ucinniku/novar-11xx-a-12xx>
- [8] KŘÍŽ, Michal. *Zatížení nulového vodiče* [online]. [cit. 19. března 2018]. Sborník č. 69 - Vyšší harmonické v elektrických instalacích, měření prováděná při revizích, Brno 2014. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/69mik5-zatizeni-nuloveho-vodice/view>
- [9] NDOKAJ, A. DI NAPOLI, A. *LED Power Supply and EMC Compliance* [online]. [cit. 24. března 2018]. University Roma Tre, Dept of Mech. & Indust. Engineering, Rome, Italy. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/251567174\\_Voltage-Current\\_Characteristic\\_of\\_Incandescent\\_Lightbulbs\\_Measurement\\_and\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/251567174_Voltage-Current_Characteristic_of_Incandescent_Lightbulbs_Measurement_and_Analysis)
- [10] ČSN EN 55015 ed. 4. *Meze a metody měření charakteristik vysokofrekvenčního rušení způsobeného elektrickými svítilny a podobným zařízením*. Praha: ÚNMZ, duben 2014.
- [11] DŽENRINŠ, Guntis. ASMANIS, A. ASMANIS, G. *LED Lighting Equipment Electromagnetic Compatibility* [online]. [cit. 27. března 2018]. 2017 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8124832/>
- [12] PHILIPS LIGHTING. *Leták PacificLED gen4* [online]. [cit. 1. dubna 2018]. Dostupné z: <http://www.assets.lighting.philips.com/is/content/PhilipsLighting/fp910925863791-pss-cs-cz>

- [13] PHILIPS LIGHTING. *Xitanium 44W 1.0A/1.05A 42V I 230V*. Výrobní štítek předřadníku svítidla Hormen.
- [14] HEP GROUP. *Leták předřadníku LSV4WxxHSP UNI* [online]. [cit. 1. dubna 2018]. Dostupné z: <http://www.hepgroup.net/en/product-256685/0-4-W-Constant-Voltage-LED-Driver-12-V-16-V-24-V-LSV4WxxHSP-UNI.html>
- [15] PHILIPS LIGHTING. *Xitanium LED drivers – linear HV non-isolated Xitanium 75W 0.12-0.4A 215V TD 230V* [online]. [cit. 3. dubna 2018]. Dostupné z: [http://www.docs.lighting.philips.com/en\\_gb/oem/download/xitanium/Xitanium\\_75W\\_0.12-0.4A\\_215V\\_TD\\_230V\\_929000852103.pdf](http://www.docs.lighting.philips.com/en_gb/oem/download/xitanium/Xitanium_75W_0.12-0.4A_215V_TD_230V_929000852103.pdf)
- [16] *LED Controls* [online]. [cit. 10. dubna 2018]. Dostupné z: <http://www.ledacademy.net/wp-content/uploads/2015/03/lesson4.pdf>
- [17] AIMTEC. *Pulse Width Modulation (PWM) vs. Analog Dimming of LEDs* [online]. [cit. 5. dubna 2018]. Dostupné z: [http://www.aimtec.com/site/Aimtec/files/documents/Application Notes/a031e\\_pwm vs analog dimming of leds.pdf](http://www.aimtec.com/site/Aimtec/files/documents/Application%20Notes/a031e_pwm_vs_analog_dimming_of_leds.pdf)
- [18] METRIX. *Single phase power analyser C.A 8220* [online]. [cit. 10. dubna 2018]. Dostupné z: [http://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/D00PKS19\\_4.PDF](http://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/D00PKS19_4.PDF)
- [19] DREYFUS, Gabrielle. GALLINAT, Chad. *Rise and Shine: Lighting the World with 10 Billion LED Bulbs* [online]. [cit. 12. dubna 2018]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/articles/rise-and-shine-lighting-world-10-billion-led-bulbs>
- [20] SANKARAN, C. *Effects of Harmonics on Power Systems* [online]. [cit. 24. dubna 2018]. Říjen 1999. Dostupné z: <http://www.ecmweb.com/power-quality/effects-harmonics-power-systems>

# Přílohy a seznam grafů, obrázků a tabulek

## Grafy

Graf č. 1 – Průběh okamžitého napájecího $U$ a $I$ pro žárovkové svítidlo.....	16
Graf č. 2 – Průběh okamžitého napájecího $U$ a $I$ pro LED svítidlo.....	16
Graf č. 3 – Maximální relativní povolené hodnoty vyšších harmonických napětí.....	20
Graf č. 4 – Maximální limity vyšších harm. proudů pro svítidla s příkonem do 25 W.....	22
Graf č. 5 – Limity vyšších harmonických proudů pro svítidla s příkonem nad 25 W.....	22
Graf č. 6 – Průběh $I$ a rozložení na harmonické .....	25
Graf č. 7 – Součet proudů ve středním vodičem .....	25
Graf č. 8 – Průběh dovoleného rušivého napětí na napájecích svorkách LED svítidla.....	27
Graf č. 9 – PWM stmívání a úrovně stmívání .....	31
Graf č. 10 – Součet proudů středním vodičem .....	31
Graf č. 11 – Porovnání průběhů proudů získaných pomocí osc. a pomocí analyzátoru.....	40
Graf č. 12 – Naměřené efektivní vyšší harmonické proudy pro vzorky č. 1 a č. 5 .....	40
Graf č. 13 – Průběhy napájecích proudů pro vzorky č. 1 a č. 5.....	41
Graf č. 14 – Naměřené ef. vyšší harm. proudy pro vzorek č. 6 při 20 W, 14 W a 5,4 W .....	42
Graf č. 15 – Průběhy napájecích proudů pro vzorek č. 6 při 20 W, 14 W a 5,4 W .....	42
Graf č. 16 – Naměřené vyšší harmonické proudy pro vzorky č. 2, 3 a 4 .....	43
Graf č. 17 – Průběhy napájecích proudů pro vzorky č. 2, 3 a 4 .....	43
Graf č. 18 – Porovnání naměřeného a rekonstruovaného proudu vzorku č. 1.....	44
Graf č. 19 – Naměřené vyšší harm. proudy pro jednotlivé fáze nesymetrické řady 5/5/7 .....	47
Graf č. 20 – Naměřené napájecí napětí a proudy pro nesymetrickou řadu 5/5/7 .....	47
Graf č. 21 – Naměřená vyšší harmonická napětí při měření nesymetrické řady 5/5/7.....	48
Graf č. 22 – Naměřené vyšší harm. proudy po fázích při napájení všech 142 ks svítidel.....	49
Graf č. 23 – Naměřené napájecí napětí a proudy pro všech 142 ks svítidel při plném výkonu ..	49
Graf č. 24 – Naměřený proud procházející středním vodičem pro všech 142 ks svítidel .....	50
Graf č. 25 – Naměřený proud fázových vodičů pro celé pole č. 4 a pouze pro svítidla.....	52
Graf č. 26 – Proud procházející N vod. pro 142 ks svítidel a pro celé rozvaděčové pole č. 4 ....	52

## Obrázky

Obrázek č. 1 – Komp. ind. jalového výkonu $Q_L$ pomocí kapacitního jalového výkonu $Q_C$ .....	16
Obrázek č. 2 – Jednotlivé složky skutečného zdánlivého výkonu .....	17
Obrázek č. 3 – Schéma spínaného zdroje tzv. buck converter .....	25
Obrázek č. 4 – Uspořádání pro měření napěťového rušení .....	27
Obrázek č. 5 – Výrobní štítek předřadníku Xitanium od společnosti Philips Lighting.....	29
Obrázek č. 6 – Uspořádání měřicího obvodu pro jednotlivá svítidla a předřadníky .....	38

Obrázek č. 7 – Schéma zapojení jističů, napájení svítidel a dalších spotřebičů.....	46
---	----

## **Tabulky**

Tabulka č. 1 – Maximální relativní povolené hodnoty vyšších harmonických napětí.....	19
Tabulka č. 2 – Limity pro svítidla do 25 W .....	21
Tabulka č. 3 – Limity pro svítidla nad 25 W .....	21
Tabulka č. 4 – Limity pro svítidla se stmívači .....	21
Tabulka č. 5 – Meze rušivého napětí na napájecích svorkách .....	26
Tabulka č. 6 – Meze vyzařovaného elmag. rušení v rozsahu 9 kHz až 30 MHz .....	28
Tabulka č. 7 – Meze vyz. elmag. rušení v rozsahu 30 MHz až 300 MHz ve vzdálenosti 10 m..	28
Tabulka č. 8 – Zjištěné parametry měřených svítidel a předřadníků .....	37
Tabulka č. 9 – Zjištěné parametry měřených svítidel a vypočítané účinníky $\lambda_{T-I}$ .....	45
Tabulka č. 10 – Zjištěné parametry měřených svítidel a vypočítané účinníky $\lambda_{T-UI}$ .....	51

## **Přílohy**

Příloha č. 1 – Postupový diagram měření zpětného vlivu svítidel .....	60
---	----

## Přílohy

### 1 Postupový diagram měření zpětného vlivu svítidel

Na následujících stránkách je zobrazen algoritmus postupu měření pro jednotlivá svítidla a také pro osvětlovací soustavy s jehož pomocí bude možné provést měření a určit, zda jsou splněny požadavky norem. Postup má několik společných částí pro samostatná svítidla a osvětlovací soustavy, ale v několika závěrečných krocích se liší. K jednotlivým očíslovaným krokům diagramu jsou také připojeny níže uvedené poznámky, podle kterých je možné při analýze postupovat.

#### Poznámky k postupovému diagramu

- (1) Tyto informace lze zjistit z výrobního štítku svítidla nebo z technického listu svítidla.
- (2) Zjištěné informace je vhodné poznamenat do tabulky.
- (3) Tyto informace lze zjistit z výrobního štítku nebo technického listu předřadníku.
- (4) Viz bod (3).
- (5) Viz bod (1) nebo (3).
- (6) Viz bod (1).
- (7) Lze určit a nastavit například při použití DALI řídicí jednotky propojené s PC.
- (8) Úrovně stmívání jsou určeny normou ČSN EN 61000-3-2 ed.4 na hodnoty 0 %, 25 %, 50 %, 75 % a 100 %.
- (9) Napájecí zdroj s nezkresleným sinusovým napětím a s možností regulace velikosti napětí a frekvence. V rámci reprodukovatelnosti měření je vhodné provádět toto měření se zmíněným napájecím zdrojem.
- (10) K výpočtu  $\lambda_{T-I}$  je použit vztah (1) a je potřeba znát harmonické zkreslení proudu  $THD_I$  a fázový posun mezi první harmonickou napětí a proudu  $\lambda_{DSP} = \cos \varphi$ . Pokud není známo  $THD_I$ , pak jej lze vypočítat z efektivních hodnot vyšších harmonických proudů pomocí vztahu (2). Pokud není znám účinník  $\lambda_{DSP} = \cos \varphi$ , pak jej lze určit inverzní Fourierovou transformací.

$$\lambda_{T-I} = \cos \varphi_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \quad (1)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_{2\text{ ef}}^2 + I_{3\text{ ef}}^2 + \dots + I_{n\text{ ef}}^2}}{I_{1\text{ ef}}} \cdot 100 \quad (2)$$

- (11) K výpočtu  $\lambda_{T-UI}$  je použit vztah (3) a je potřeba znát harmonické zkreslení proudu  $THD_I$ , harmonické zkreslení napětí  $THD_U$ , činný příkon  $P$  a zdánlivý příkon  $S$ . Pokud

není známo  $THD_I$ , pak jej lze vypočítat z efektivních hodnot vyšších harmonických proudů pomocí vztahu (2). Pokud není známo  $THD_U$ , pak jej lze vypočítat z efektivních hodnot vyšších harmonických napětí pomocí vztahu (4).

$$\lambda_{T-UI} = \frac{P}{S_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD_U^2} \cdot \sqrt{1 + THD_I^2}} \quad (3)$$

$$THD_U = \frac{\sqrt{U_{2\text{ef}}^2 + U_{3\text{ef}}^2 + \dots + U_{n\text{ef}}^2}}{U_{1\text{ef}}} \cdot 100 \quad (4)$$

- (12) Lze zjistit z projektové dokumentace nebo přímo v rozvodně nebo rozvaděči.
- (13) Určení limitů harmonických proudů a zkreslení je shodné s určením pro jednotlivá svítidla s tím rozdílem, že výsledné limity harmonických proudů jsou součtem všech příspěvků od svítidel připojených na konkrétní fázi.
- (14) Viz bod (1) nebo bod (12).
- (15) Porovnání vypočtených hodnot z bodů (10) a (11) s hodnotami zjištěnými v bodech (1) a (2) a porovnání naměřených vyšších harmonických proudů a napětí s limity danými tabulkami č. 1, 2 a 3 dle normy ČSN EN 61000-3-2 ed.4

Řád vyšší harmonické $n$ (-)	Proud vyšší harmonické na watt mA/W
3	3,4
5	1,9
7	1,0
9	0,5
11	0,35
$13 \leq n \leq 39$ (lichá $n$ )	$3,85/n$

Tabulka č. 1 – Limity pro svítidla do 25 W

Zdroj: ČSN EN 61000-3-2 ed. 4

Řád vyšší harmonické $n$ (-)	Dovolený proud v % první harmonické $I$ %
2	2
3	$30 \cdot \lambda$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$ (lichá $n$ )	3

Tabulka č. 2 – Limity pro svítidla nad 25 W

Zdroj: ČSN EN 61000-3-2 ed. 4

Řád vyšší harmonické $n$ (-)	Proud vyšší harmonické $I$ (A)
2	1,08
3	2,30
4	0,43
5	1,14
6	0,30
7	0,77
$8 \leq n \leq 40$ (sudá $n$ )	$0,23 \cdot 8/n$
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$ (lichá $n$ )	$0,15 \cdot 15/n$

Tabulka č. 3 – Limity pro svítidla se stmívači

Zdroj: ČSN EN 61000-3-2 ed. 4



