

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 399*

*ISSN 1213-4198*



*Ing. Jiří Drápela*

**Zpětné rušivé vlivy  
osvětlovacích soustav  
na napájecí síť**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

**Ing. Jiří Drápela**

**ZPĚTNÉ RUŠIVÉ VLIVY OSVĚTLOVACÍCH SOUSTAV  
NA NAPÁJECÍ SÍŤ**

**DISTURBING INFLUENCES OF LIGHTING SYSTEMS TO  
THE SUPPLY NETWORK**

**ZKRÁCENÁ VERZE Ph.D. THESIS**

Obor: Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika  
Školitel: Ing. Petr Baxant, Ph.D.  
Oponenti: Prof. Ing. Karel Sokanský, CSc.  
Prof. Ing. Josef Tlustý, CSc.  
Datum obhajoby: 20. 11. 2006

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Světelné zdroje, charakteristiky odběru, harmonické, sčítání a šíření harmonických, zatížení středního vodiče, výkonové ztráty, dovolené zatížení vedení, zkreslení napětí.

## **KEY WORDS**

Light sources, Power consumption characteristics, Harmonics, Simulation, Harmonics summation and propagation, Neutral conductor loading, Power losses, Cable Derating Factor, Voltage distortion.

## **MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE**

Práce je k dispozici na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně, Údolní 53, Brno, 602 00

© Jiří Drápela, 2007

ISBN 978-80-214-3352-6

ISSN 1213-4198

# **OBSAH**

|                                                                                         |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 ÚVOD .....</b>                                                                     | <b>5</b>  |
| <b>1.1 CÍLE PRÁCE .....</b>                                                             | <b>6</b>  |
| <b>2 SVĚTELNÉ ZDROJE A CHARAKTERISTIKY JEJICH ODBĚRU .....</b>                          | <b>6</b>  |
| <b>2.1 ODBĚR SVĚTELNÝCH ZDROJŮ V ZÁKLADNÍM A USTÁLENÉM STAVU .....</b>                  | <b>6</b>  |
| 2.1.1 Teplotní světelné zdroje – žárovky .....                                          | 8         |
| 2.1.2 Výbojky s indukčním předřadníkem .....                                            | 8         |
| 2.1.3 Výbojky s elektronickým předřadníkem a žárovky, LED s elektronickým měničem ..... | 9         |
| <b>2.2 VLIV NAPĚŤOVÝCH CHARAKTERISTIK NA CHARAKTER ODBĚRU SVĚTELNÝCH ZDROJŮ .....</b>   | <b>11</b> |
| 2.2.1 Charakteristiky odběru při deformovaném napájecím napětí .....                    | 12        |
| <b>3 VLIV ODBĚRU OSVĚTLOVACÍCH SOUSTAV NA NAPÁJECÍ SÍŤ .....</b>                        | <b>13</b> |
| <b>3.1 ŠÍŘENÍ A KUMULACE HARMONICKÝCH .....</b>                                         | <b>14</b> |
| <b>3.2 VELIKOST ZATÍŽENÍ VEDENÍ A ZTRÁTY V NAPÁJECÍ SÍTI.....</b>                       | <b>15</b> |
| 3.2.1 Zatížení napájecího – krajního vodiče .....                                       | 15        |
| 3.2.2 Zatížení středního vodiče .....                                                   | 16        |
| 3.2.3 Celkové zatížení napájecího vedení – vodiče, kabelu.....                          | 19        |
| <b>3.3 VLIV ODBĚRU NA CHARAKTERISTIKY NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ.....</b>                        | <b>20</b> |
| 3.3.1 Deformace napětí způsobená odběrem osvětlovacích soustav .....                    | 21        |
| <b>4 ZÁVĚR .....</b>                                                                    | <b>23</b> |
| <b>4.1 SHRNUÍ NOVÝCH VĚDECKÝCH POZNATKŮ PRÁCE A VLASTNÍ PŘÍNOS .....</b>                | <b>25</b> |
| <b>4.2 VÝZNAM A VYUŽITÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ .....</b>                                   | <b>26</b> |
| <b>4.3 MOŽNOSTI DALŠÍHO ZAMĚŘENÍ PRÁCE.....</b>                                         | <b>26</b> |
| <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>                                                  | <b>27</b> |
| <b>CURRICULUM VITAE .....</b>                                                           | <b>28</b> |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                                                   | <b>30</b> |



# 1 ÚVOD

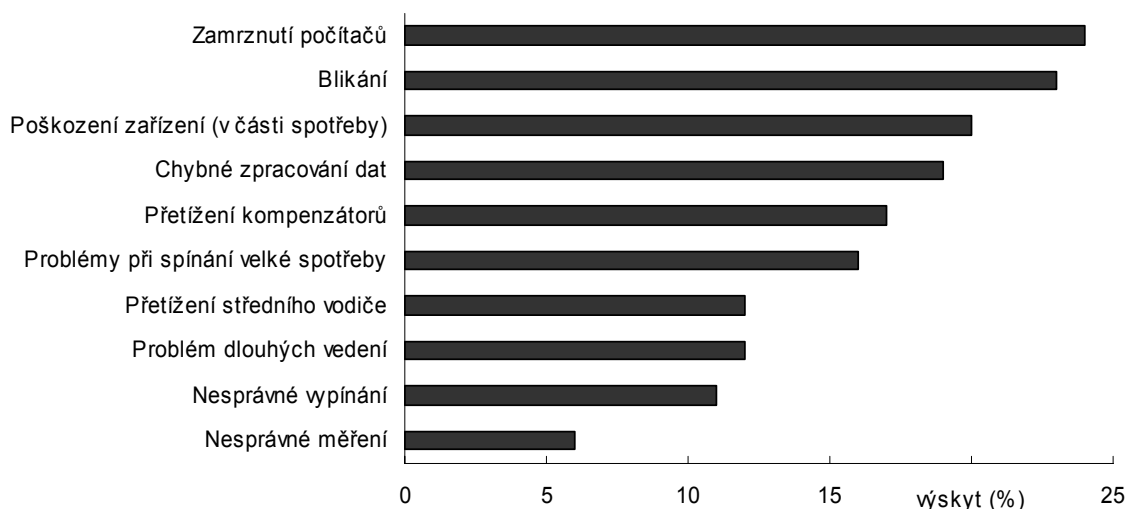
S vývojem energetických i jiných elektromagnetických systémů rostou i požadavky na jejich bezpečnost a bezporuchovost, které často závisí na kvalitě elektrické energie. Kvalita elektrické energie (PQ – Power Quality) je souhrnný název pro soubor ukazatelů a parametrů určující její jakost a je nejen závislá na kvalitě výroby, ale také na jejím přenosu a především na kvalitě odběru.

Vzhledem k vzájemné provázanosti a nerozdělitelnosti těchto i ostatních obklopujících systémů, jenž určují genezi elektrické energie, je nevyhnutelná „jistá“ míra snášenlivosti, která zaručí jejich slučitelnost. Podmínka vzájemné snášenlivosti, kdy je zajištěna bezpečná funkce elektromagnetických systémů se nazývá elektromagnetická kompatibilita (EMC) [23].

Problémy elektromagnetické kompatibility a kvality elektrické energie spolu úzce souvisí a nelze je proto řešit odděleně. Stejně tak nelze předem konstatovat, že dodržení kvality elektrické energie v elektrické síti podle platných norem, či jiných právně platných dokumentů, znamená zajištění elektromagnetické kompatibility daného systému.

Kvalita odběru se potom projevuje všemi známými či méně známými způsoby ve zvýšených ztrátách napájecího systému a následném přetížení jeho jednotlivých prvků, zkrácení napájecího napětí a následné chybné funkci některých zařízení, atd.

Podle studie provedené organizací European Copper Institute v roce 2001, zahrnující 1 400 sítí v 8 zemích, existuje v sítích (nízkého napětí) provozovaných v Evropě 5–20 % pravděpodobnost výskytu jednoho či více problémů souvisejících s kvalitou elektrické energie, které jsou uvedeny na Obr. 1.1. Typicky, polovina sítí se soustředěným odběrem (průmyslové sítě nebo sítě kancelářských budov) je postiženo dvěma a více problémy z uvedených na Obr. 1.1. Velice málo elektrických sítí je provozováno bez potíží souvisejících s kvalitou elektrické energie [13].



Obr. 1.1 Nejvíce převažující problémy patřící svou příčinou do oblasti PQ [13]

Přirozeně, nízká kvalita elektrické energie není vždy jedinou příčinou výskytu důsledků uvedených na Obr. 1.1, ale může se na nich podílet spolu s konkrétním řešením napájecí a spotřebitelské sítě.

Jedním z důvodů nízké kvality elektrické energie je především podstatná změna charakteru její spotřeby, zejména spotřebiči s příkonem od jednotek do stovek wattů. Tento trend je zřejmý i v osvětlovací technice a do jisté míry je to dáno vývojem a možnostmi v uplatnění elektronických obvodů a jejich hromadným nasazením, ale i provozem spotřebičů starších koncepcí v nových provozních podmínkách. Ve většině případů jsou však zdroji elektromagnetického rušení a ovlivňují zpětně negativně napájecí soustavu do které jsou připojeny, a ostatní spotřebiče. Mají však nesporné výhody, mezi které patří především vysoká energetická účinnost a tak se stále ve větším počtu vyskytují v kancelářských, veřejných a obytných prostorách, v průmyslu apod.

Typickými spotřebiči s naznačenou charakteristikou jsou světelné zdroje s předřadnými obvody, které jsou buďto nezbytné pro jejich provoz či výhodným způsobem zvyšují jejich užitnou hodnotu. Bez rozdílu konkrétního provedení lze říci, že předřadníky a snižující měniče všech konstrukčních a elektrických provedení, jsou zdrojem elektromagnetického rušení, nebo také zdrojem elektromagnetické interference (EMI) a charakter jejich odběru pak určuje vlastní podobu zpětných rušivých vlivů na napájecí síť.

Zároveň jsou, stejně jako ostatní spotřebiče ovlivňované (interferované) napájecí sítí a proto je nutné spolu s jejich elektromagnetickým rušením řešit i úroveň jejich elektromagnetické odolnosti či citlivosti (EMS).

Světelné zdroje jsou dále zapojovány do osvětlovacích soustav a to i značných rozsahů, což z nich činí zvláštní případ, vyznačující se vysokou koncentrací spotřebičů s frekvenčně závislou či nelineární charakteristikou na přípojném místě. Instalovaný počet jednotek může v jednom objektu činit tisíce až desetitisíce kusů a přitom podíl energie na osvětlení například v kancelářské budově může činit až 60%.

Práce se zabývá elektromagnetickou interferencí po vedení mezi světelnými zdroji osvětlovacích soustav (OS) a napájecí sítí, tedy vzájemným ovlivňováním v nízko-frekvenční oblasti. Konkrétně je zaměřena na odběr světelných zdrojů spojený s generováním harmonických, jejich šířením v napájecí síti a způsoby zatěžování napájecí sítě v uzavřeném elektrickém systému.

## 1.1 CÍLE PRÁCE

Problematika odběru světelných zdrojů zapojených v osvětlovacích soustavách, s dopadem na napájecí síť a jednotlivé světelné zdroje, dosud nebyla řešena souhrnně a na takové úrovni, jako u jiných typů spotřebičů (např. [11] [15] [17]). Cílem práce je stanovit pravděpodobný charakter odběru osvětlovací soustavy a jeho bezprostřední vliv na napájecí síť na základě:

- **použitých typů světelných zdrojů.** Odběr světelného zdroje, jeho charakter, je dán především principiálním typem a předřadnými obvody, které jsou buď nezbytné pro jeho činnost či vhodným způsobem zvyšují jeho užitnou hodnotu. Budu se zabývat pouze světelnými zdroji pro všeobecné osvětlování.
- **na parametrech napětí sítě v místě připojení.** Podstatný vliv na charakter odběru světelného zdroje mají i podmínky v místě připojení, které mohou být popsány napěťovými charakteristikami používanými pro popis kvality elektřiny a které ovlivňují jeho činnost. Například prostřednictvím velikosti napětí, jeho harmonických či mezharmónických složek.
- **konfigurace a topologie OS.** I když je světelný zdroj v osvětlovací soustavě primárním zdrojem rušení, nelze jeho zpětné rušivé vlivy hodnotit samostatně. Musí se uvažovat se sumačním účinkem celé osvětlovací soustavy, který ovšem závisí na kombinaci typů světelných zdrojů a jejich rozmístění do obecně třífázové napájecí sítě.
- **a na podmínkách připojení na napájecí soustavu.** Úhrnný vliv OS je potom závislý na celkové úrovni generovaných rušivých vlivů a zároveň na připojovacích podmínkách, které se dají charakterizovat výkonovým potenciálem či systémovou impedancí v místě připojení. Důsledky odběru OS se promítají do problematiky zatížení napájecího systému a také do charakteristik kvality elektrické energie, kterou jsou napájeny připojené spotřebiče a která je zároveň distribuována ostatním odběratelům. Tím se samozřejmě změní i provozní charakteristiky světelných zdrojů.

## 2 SVĚTELNÉ ZDROJE A CHARAKTERISTIKY JEJICH ODBĚRU

### 2.1 ODBĚR SVĚTELNÝCH ZDROJŮ V ZÁKLADNÍM A USTÁLENÉM STAVU

Design světelného zdroje je záležitostí konkrétního technologického provedení principu přeměny elektrické energie na světlo a vývoje v oblasti elektronických prvků a elektrických obvodů. Důsledkem toho je v současné době používáno velké množství různých typů světelných zdrojů, s či bez předřadných obvodů, které se ale z hlediska vlastností vstupních elektrických obvodů, majících vliv na odběr, dají třídít pouze do několika kategorií.

Světelné zdroje, jako i jiné spotřebiče, se v ustáleném stavu vyznačují odběrem samozřejmě činného výkonu  $P$  a jalového výkonu  $Q$ . Přitom součin efektivních hodnot napětí a odebíraného proudu určuje zdánlivý příkon  $S=U \cdot I$ . V případě, že je odebíraný proud deformovaný (neharmonický), ale periodický, lze jej podle Fourierova teorému rozložit na řadu harmonických průběhů s frekvencemi, které jsou  $\nu=1,2,3,4,5,\dots$  násobkem základního kmitočtu 50 Hz a stejnosměrnou složku:

$$i(t) = \sum_{\nu=0}^n i_{\nu}(t) = I_0 + \sum_{\nu=1}^n I_{\nu,m} \cdot \sin(\nu\omega t + \varphi_{I,\nu}) \quad (2.1)$$

s efektivní hodnotou:

$$I = \sqrt{\sum_{\nu=0}^n I_{\nu}^2} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots} \quad (2.2)$$

Obdobné vztahy platí i pro napětí. Průběhy proudu a napětí však ve většině případů neobsahují stejnosměrnou složku a jsou souměrné podle časové osy a tedy rovnice ( 2.1 ) a ( 2.2 ) budou obsahovat pouze liché složky. Po dosažení a za předpokladu sinusového napájecího napětí  $U=U_1$ , je vztah pro  $S$ :

$$S = U_1 \cdot I = U_1 \cdot \sqrt{\sum_{v=1}^n I_v^2} = \sqrt{U_1^2 \cdot \sum_{v=1}^n I_v^2} = \sqrt{(U_1 \cdot I_1)^2 + U_1^2 \cdot \sum_{v=2}^n I_v^2} \quad (2.3)$$

Další úpravou dostaneme pro zdánlivý výkon:

$$S = \sqrt{(U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1)^2 + (U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1)^2 + U_1^2 \cdot \sum_{v=2}^n I_v^2} = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (2.4)$$

Součin napětí a proudu je tedy rozložen na součin základní harmonické napětí a proudu, což je zdánlivý příkon na první harmonické, nebo také činný a jalový příkon (přičemž  $P=P_1$  a  $Q=Q_1$ ) a na součin napětí a proudů různých frekvencí. Ten se stejně tak jako jalový výkon nepodílí na činné práci – jeho střední hodnota za jednu periodu je rovna nule a nazývá se deformační výkon  $D$  [11].

Odběr spotřebiče je v souladu s předchozím možné popsat různými charakteristikami, parametry, které v souhrnu popisují způsob odběru. Nejzákladnějším je účinník odběru  $\cos \varphi_1$ , který udává podíl jalového příkonu (především induktivního charakteru) na celkovém odběru lineárního spotřebiče, přičemž každému odběrateli elektrické energie je předepsána povinnost trvale kompenzovat jalový odběr elektrických zařízení, který není uskutečňován s účinníkem  $\cos \varphi_1 = 0,95_{\text{IND}}$  až  $\cos \varphi_1 = 1$ . V technické praxi se však provádí kompenzace odběru jalové energie u spotřebičů s činným příkonem  $P > 25 \text{ W}$ .

Parametr odběru, který zahrnuje i deformační výkon spotřebiče, je celkový účinník  $\lambda$  a jeho matematický zápis i se vztahem ke  $\cos \varphi_1$  je:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \cdot \cos \varphi_1 \quad (2.5)$$

Celkovou míru deformace křivky střídavé veličiny popisuje celkové harmonické zkreslení  $THD$ , se vztahy pro výpočet, konkrétně celkového harmonického zkreslení proudu:

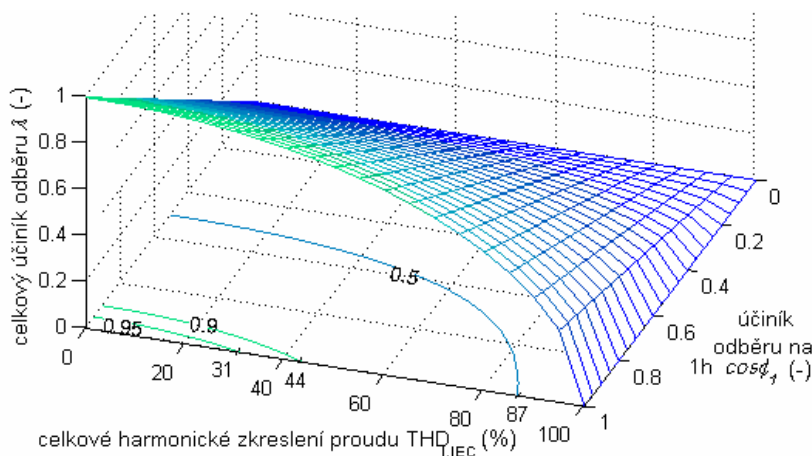
$$THD_{I,IEC} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} \cdot 100 \quad ; \quad THD_{I,ČSN} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (2.6)$$

Za předpokladu sinusového napájecího napětí lze úpravou předchozích rovnic vyjádřit vztah mezi popisovanými charakteristikami odběru:

$$\lambda^2 = (1 - THD_{I,IEC}^2) \cdot \cos^2 \varphi_1 \quad (2.7)$$

Grafické znázornění vymezující teoretickou oblast vazeb ve vztahu ( 2.7 ) je na Obr. 2.1. Na základě uvedených skutečností lze spotřebiče (světelné zdroje) rozdělit na ty, které pracují s  $\lambda < 0,5$  (LPF-Low Power Factor), dále  $0,5 \leq \lambda < 0,9$  (NPF-Normal Power Factor) a  $\lambda \geq 0,9$  (HPF-High Power Factor). Doplnující je potom úroveň  $\lambda \geq 0,95$ , která je dána požadavkem vykompenzovaného odběru. Na charakteru odběru se tedy vlastní měrou podílí jak jalový příkon (prostřednictvím  $\cos \varphi_1$ ) tak i obsah harmonických složek v odebíraném proudu (prostřednictvím  $THD_{I,IEC}$ ).

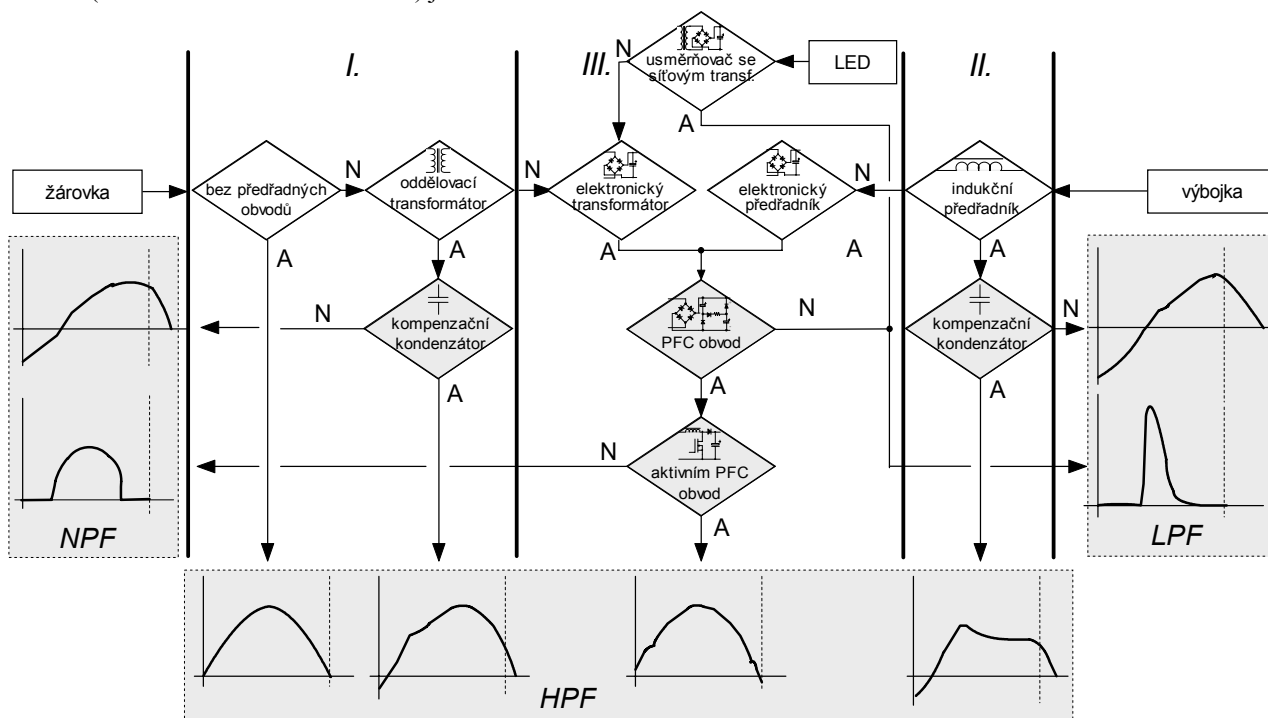
V první části disertační práce je analyzován odběr světelných zdrojů používaných pro všeobecné osvětlování, žárovek, LED modulů a výbojek s napájecími či předřadnými obvody nezbytnými pro jejich funkci, v základním a ustáleném stavu. Základním stavem světelného zdroje, i s předřadným obvodem, je myšlen nominální provoz, tedy bez regulace, při jmenovitých podmínkách napájení. Základní stav je zároveň výchozím provozním stavem, při kterém musí být zajištěna řada požadavků na provozní vlastnosti světelného zdroje, jako např. správná funkce vlastního světelného zdroje, splnění mezi níz-



Obr. 2.1 Grafické vyjádření rovnice ( 2.7 )



kofrekvenčního a vysokofrekvenčního rušení a elektrické bezpečnosti podle platných norem, světelný zdroj jako celek musí být ekonomicky efektivní, atd. Tyto a mnohé další specifické požadavky potom určují celkové technické řešení konstrukce světelného zdroje s odpovídajícím charakterem odběru. V souhrnu je charakter odběru závislý na typu a parametrech vlastního světelného zdroje a/nebo na typu, zapojení a dimenzování napájecího či předřadného obvodu. Rozdělení světelných zdrojů pro všeobecné osvětlování z hlediska jejich vstupních obvodů a navazujícího charakteru odběru (dle celkového účinníku odběru) je na Obr. 2.2.



Obr. 2.2 Vliv typů předřadných obvodů světelných zdrojů pro všeobecné osvětlování na průběh odebíraného proudu v jedné půlperiodě a tedy i charakteristiky odběru

Postupně byl analyzován odběr žárovek na síťové napětí, žárovek na malé napětí napájených snižujícím transformátorem, výbojek s indukčním předřadníkem bez a s paralelní kompenzací, elektronických snižujících měničů pro napájení žárovek na malé napětí a LED modulů, a elektronických předřadníků (EP) pro napájení výbojek. Pro stanovení velikostí harmonických proudů a dalších charakteristik odběru a jejich rozsahu pro jednotlivé typy světelných zdrojů byly použity zjednodušené výpočty založené na předpokládaném průběhu okamžité hodnoty proudu odebíraného ze sítě, matematické simulace sestavených modelů světelných zdrojů odpovídající požadavku na zjištění charakteristik odběru, a měření odběru komerčních produktů.

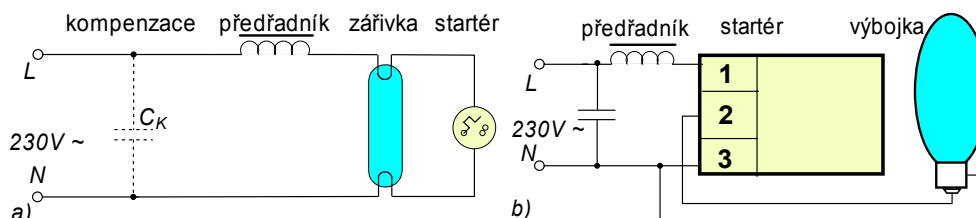
### 2.1.1 Teplotní světelné zdroje – žárovky

Žárovky na nízké napětí jsou standardní, při frekvenci napájecího napětí 50Hz, téměř lineární spotřebiče určené k přímému připojení na napájecí síť nn s  $\cos \varphi_i \approx \lambda \approx 1$ , které ve svém základním zapojení a při ustáleném stavu nenarušují kompatibilitu v kterémkoli systému. V osvětlovacích soustavách se dále používají žárovky na malé napětí, které jsou na napájecí připojeny přes oddělovací snižující transformátor. K napájecí síti se transformátor chová jako ohmicko-induktivní zátěž s odběrem činného a jalového výkonu s  $\cos \varphi = 0,7-0,85$  (při optimálním zatížení). Vzhledem k nelinearitě magnetického obvodu je odebíraný magnetizační proud transformátoru neharmonický, což se projeví v deformaci celkového odebíraného proudu. Celkové harmonické zkreslení odebíraného proudu je podle zatížení do  $THD_{I,IEC} < 20\%$ .

### 2.1.2 Výbojky s indukčním předřadníkem

Nejrozšířenější jsou zářivky, či jiné výbojky, provozované s klasickým indukčním předřadníkem, od příkonu 25 W i s kompenzací. Výbojka s tlumivkou zapojenou v sérii je spotřebič induktivního charakteru s typickým fázovým posuvem  $\varphi$  odebíraného proudu k napájecímu napětí. Průběh napětí na výboji má pro frekvenci napájecího napětí 50 Hz obdélníkový průběh okamžité hodnoty se znovu-zapalovacími špičkami a změnou polaritu každou půl-periodou. Rozdílové napětí mezi napětím sítě a napětím na výboji je úbytek napětí na tlumivce, a je buzen procházejícím proudem, který je výsledkem stabilního ustáleného stavu obvodu, daného velikostí tlumivky (její impedancí) a výsledným průběhem nelineární elektrické vodivosti výboje. Proud odebíraný výbojkou s klasickým indukčním předřadníkem je také roven podílu napětím na tlumivce a její impedance. Průběh okamžité hodnoty napětí na tlumivce je ovšem nehar-

nický, daný rozdílem napětí sítě a výboje, a proto výsledný odebíraný proud je rovněž neharmonický s obsahem harmonických složek. Dalším důvodem deformace odebíraného proudu je nelinearita VA charakteristiky tlumivky způsobená hysterezí a sycením magnetického obvodu. Prakticky je hodnota účinníku odběru výbojky s klasickým indukčním předřadníkem dle popsaných závislostí v rozmezí  $\cos \varphi_I = 0,25-0,65$  a celkové harmonické zkreslení odebíraného proudu v rozmezí  $THD_{IEC} = 6-20 \%$ . Proud odebíraný z napájecí sítě tedy obsahuje poměrně malé procento harmonických složek s řádem větším než 1. Amplitudové spektrum je výrazně klesající a lze jej uvažovat pouze po 11. harmonickou. Vykompenzování základní harmonické kompenzačním kondenzátorem na  $\cos \varphi_{IK} = 0,9-0,95_{IND}$  dosáhneme snížení efektivní hodnoty odebíraného proudu, ovšem musíme počítat s vyšším projevem harmonických. Celkové harmonické zkreslení dosahuje hodnot  $THD_{IEC} = 12-35 \%$ .



Obr. 2.3 Schématické zapojení výbojky s indukčním předřadníkem a s či bez paralelní kompenzace; a) zářivka; b) vysokotlaká výbojka

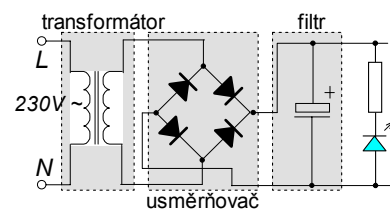
### 2.1.3 Výbojky s elektronickým předřadníkem a žárovky, LED s elektronickým měničem

S rozvojem polovodičových měničů došlo i v osvětlovací technice k uplatnění nových koncepcí napájecích obvodů světelných zdrojů s podstatným zvýšením jejich světelně technických i užitných vlastností a dále mohly být vyvinuty a nasazeny nové progresivní typy světelných zdrojů, které jsou provozovány:

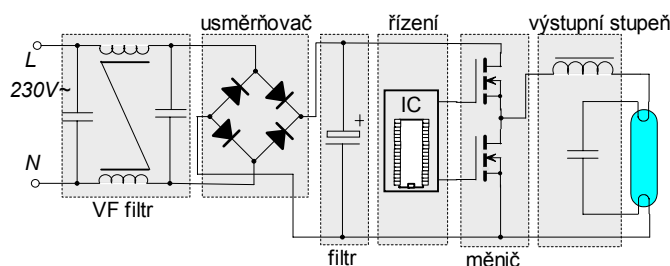
- s elektronickými předřadníky
  - zářivky, vysokotlaké výbojky (Obr. 2.5),
  - bezelektrodové výbojky,
- s elektronickými snižujícími měniči – žárovky (Obr. 2.6),
- se snižujícími měniči – LED (Obr. 2.4 a Obr. 2.6).

Všechny měniče (střídače, vf generátory i pulsní měniče) potřebují pro svou funkci zdroj stejnosměrného napětí, tedy napájení ze stejnosměrného meziobvodu napětíového typu. Základem napájecího obvodu, jehož elektrické zapojení i parametry odběru jsou ve všech případech až na menší rozdíly shodné, je můstkový usměrňovač s vyhlazovacím kondenzátorem, který může být dále doplněn o pasivní Power Factor Corrector (PFC) obvod zlepšující parametry odběru a nebo aktivní PFC, který je vzhledem ke své funkci označován i jako DC-DC měnič nebo preregulátor. Výsledné obvody se potom vůči napájecí síti i světelnému zdroji projevují svým charakteristickým způsobem. Primárním důvodem zavádění PFC obvodů do napájecích stupňů je splnění mezí pro emise harmonických odebíraného proudu podle normy ČSN EN 61000-3-2 [5]. Základní rozdělení napájecích obvodů podle odebíraného proudu je na Obr. 2.7.

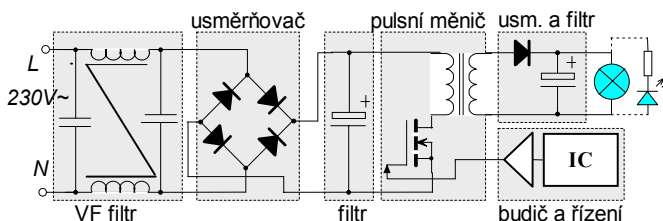
Napájecí obvod tvořený pouze usměrňovačem a vyhlazovacím filtrem je charakteristický odběrem impulsních proudů, které jsou důsledkem principu nabíjení vyhlazovacího kondenzátoru a jsou závislé na jeho velikosti. Přesněji šířka odebíraného proudového impulsu závisí na úhlu otevírání usměrňovače a ten je dán poměrem velikosti kondenzátoru  $C_{SS}$  a velikosti odebíraného proudu zátěží. Na tomto poměru závisí rovněž zvlnění DC napětí, které však u měničů pro světelné zdroje musí být malé, jelikož určuje zvlnění proudu světelným zdrojem.



Obr. 2.4 Principiální schéma zapojení AC/DC měniče se síťovým transformátorem pro napájení LED

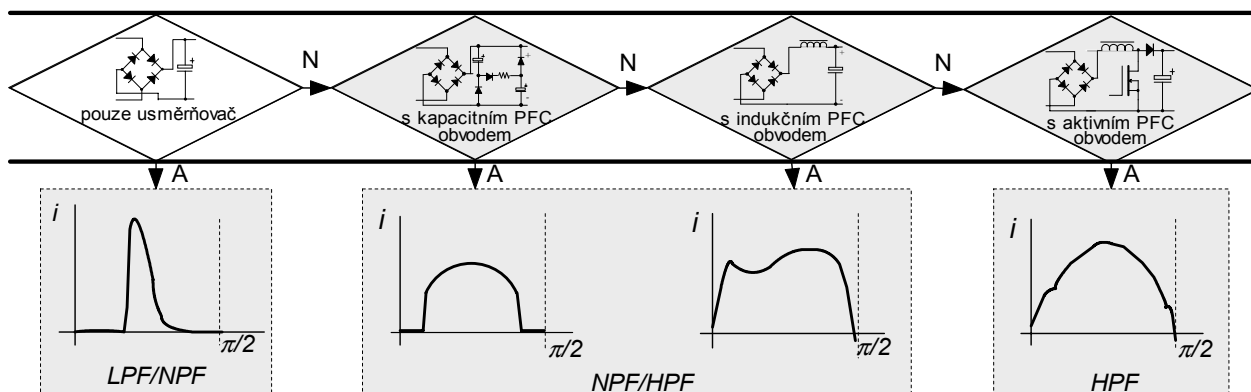


Obr. 2.5 Blokové schématické zapojení elektronického předřadníku pro zářivku



Obr. 2.6 Blokové schématické zapojení elektronického snižujícího měniče s blokujícím měničem

K nabití kondenzátoru tedy dochází pouze ve vrcholu průběhu okamžité hodnoty napájecího napětí a výsledný impulsní proud odebraný ze sítě s dobou vedení do 3ms za  $\frac{1}{2}$  periodu se vyznačuje vysokým obsahem harmonických složek s  $THD_{I,IEC}=78-85\%$ . Tento napájecí obvod je používán v elektronických předřadnících pro výbojky s příkonem do 25W. Nejčastěji u kompaktních zářivek s integrovaným elektronickým předřadníkem.



Obr. 2.7 Vliv typů elektronických napájecích obvodů na průběh odebraného proudu

Aplikací nízkofrekvenčního pasivního filtru můžeme velice příznivě ovlivnit průběh proudu odebraný napájecím obvodem pro EP a snižující měniče. Tyto obvody nazýváme pasivní PFC obvody. V zásadě rozlišujeme dva typy pasivních PFC obvodů – indukční [15] a kapacitní [20]. Do první skupiny patří pasivní indukční PFC obvod, kdy zařazením tlumivky do obvodu (na střídavou nebo stejnosměrnou stranu usměrňovače) vytvoříme sériový L-C filtr, který podle vlastní rezonanční frekvence upravuje průběh odebraného proudu. Druhou skupinou pasivních PFC obvodů jsou usměrňovače s pasivním kapacitním PFC obvodem s upraveným kapacitním filtrem, který je tvořen kapacitami rozdělenými diodami do kapacitního můstku. Princip funkce je založen na sériovém nabíjení a paralelním vybíjení kapacit můstku. Technikami na bázi pasivních PFC obvodů lze snížit celkový obsah harmonických složek na úroveň  $THD_{I,IEC}=15-60\%$ . Nicméně pasivní PFC obvody u některých typů světelných zdrojů přinášejí snížení emise harmonických na úkor výrazného zhoršení provozních vlastností a ekonomických ukazatelů a proto mají pouze omezené uplatnění.

Téměř sinusového průběhu odebraného proudu z napájecí sítě, namísto impulsního či jiného dosaženého pasivními a hybridními PFC obvody, lze dosáhnout pouze plným řízením nabíjení kondenzátoru pro napájení střídače. Z toho důvodu byly do obvodu zaintegrovaný DC-DC měnič ve funkci vysokofrekvenčního aktivního PFC obvodu [22]. V měničích pro napájení světelných zdrojů se používá výhradně neizolovaný DC-DC měnič se zvyšující topologií. Princip funkce je založen na cyklickém spínání spínače aktivního PFC obvodu s frekvencí, která je o několik řádů vyšší než síťová frekvence (50 – 150 kHz), tak aby proud odebraný ze sítě byl v ideálním případě sinusový. Resp. aby proud odebraný ze sítě sledoval průběh napětí sítě, a tím se zátěž z napájecí strany emulovala dynamickou VA charakteristiku lineárního spotřebiče. Konkrétní průběh proudu odebraného ze sítě je závislý především na použité metodě a zpracování řízení spínání aktivního PFC obvodu, dimenzování prvků PFC obvodu včetně VF filtru a také na výkonu. Nízkofrekvenční deformace odebraného proudu může být velmi nízká s celkovým harmonickým zkreslením do  $THD_{I,IEC}<10\%$  a charakter odběru na základní harmonické je prakticky vždy kapacitní s účinnkem v rozsahu  $\cos\varphi_I=1-0,97c$ . Aktivní PFC obvod se v současné době používá u většiny elektronických předřadníků s příkonem větším než 25W.

Měniče pro světelné zdroje patří mezi aplikace s malým příkonem. Jejich příkon je převážně do 100 W a v naprosté většině do 500 W. Přestože PFC obvod má z určitého hlediska nesporné výhody, jeho použití podstatným způsobem zvyšuje výrobní náklady. Výsledkem snah o zjednodušení byla integrace aktivního PFC obvodu do výstupního měniče a z dvou-stupňové topologie se stala jednostupňová [18] [21]. Vlastní integrace spočívá v tom, že na místo původního PFC obvodu je v topologii použito specifické zapojení pasivních prvků a rychlých diod a ty spolu se spínačem nebo více spínači výstupního měniče vytvářejí aktivní PFC obvod. Řízení spínání výstupního měniče zároveň i řízení PFC stupně. V současné době se s jednostupňovou topologií u komerčně vyráběných EP nebo snižujících měničů setkáme jen výjimečně. Důvodem je zavedená výroba dvoustupňových topologií a také stále probíhající vývoj jednostupňových zapojení, u kterých je nutné vyřešit určité technické problémy, vyplývající ze závislosti PFC stupně na provozních podmínkách. Konkrétně na změně zátěže, změně frekvence výstupního měniče, změnách napájecího napětí, atd. Jednostupňové topologie jsou ale cenově velmi efektivní a proto mají pro uplatnění značný potenciál. Prakticky mohou jednostupňové měniče, při správné funkci PFC stupně, generovat harmonické s celkovou úrovní  $THD_{I,CSN}=3-30\%$ . Charakter odběru na základní harmonické je opět kapacitní s účinnkem v rozsahu  $\cos\varphi_I=1-0,98c$ .

Pro stanovení velikostí harmonických proudů a dalších charakteristik odběru a jejich rozsahu pro jednotlivé typy světelných zdrojů byly použity zjednodušené výpočty založené na předpokládaném průběhu okamžité hodnoty proudu odebraného ze sítě a matematické simulace sestavených modelů světelných zdrojů odpovídající požadavku na zjištění

charakteristik odběru, které byly doplněny o měření na reálných světelných zdrojích. Podrobně zpracované výsledky jsou součástí vlastní práce [10]. Příklady vybraných charakteristik odběru světelných zdrojů jsou uvedeny v Tab. 2.1.

Tab. 2.1. Příklady charakteristik odběru pro různé světelné zdroje při sinusovém jmenovitém napájecím napětí

|                                     |                                                              | P (W) | $\lambda$ (-) | $\cos \varphi_1$<br>(-) | THD <sub>I, ČSN</sub><br>(%) | THD <sub>I, IEC</sub><br>(%) |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------|---------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <b>Teplotní zdroje</b>              |                                                              |       |               |                         |                              |                              |
|                                     | 100 W žárovka 230V                                           | 101   | 1             | 1                       | 1                            | 1                            |
|                                     | síťový transformátor/ 50W nízkonap. halog. žárovka           | 62    | 0,97          | 0,97                    | 6                            | 6                            |
|                                     | síťový transform. elektronický/ 50W nízkonap. halog. žárovka | 61    | 0,99          | 1                       | 10                           | 10                           |
| <b>Zářivky (P≤25W)</b>              |                                                              |       |               |                         |                              |                              |
| Indukční předřadník                 | Philips Prismatic SL 13W                                     | 13,1  | 0,53          | 0,53                    | 15,1                         | 14,9                         |
|                                     | Layrton A20P + 1xD 18W                                       | 22    | 0,5           | 0,5                     | 13,1                         | 13                           |
| Indukční předřadník s kompenzací    | 2x TRIDONIC EC 18 + 4μF + 2xD 18W                            | 45    | 0,92          | 0,94                    | 20,4                         | 20,0                         |
| EP bez PFC obvodu                   | OSRAM Dulux EL Economy 21W                                   | 16,7  | 0,52          | 0,96c                   | 147                          | 82                           |
|                                     | TUNGSRAM E6/S 20W                                            | 16,7  | 0,49          | 0,95c                   | 167                          | 86                           |
|                                     | Osram Dulux EL Vario 23W                                     | 21,8  | 0,65          | 0,94c                   | 103,5                        | 72                           |
| EP s aktivním PFC obvodem           | GE Biax FEA18TBX/HPF/I 20W                                   | 20,8  | 0,97          | 0,98c                   | 15,5                         | 15,3                         |
|                                     | Osram Quicktronic QT-D/E 1x18W                               | 16,6  | 0,98          | 0,99c                   | 12,6                         | 12,5                         |
| <b>Zářivky (P&gt;25W)</b>           |                                                              |       |               |                         |                              |                              |
| Indukční předřadník s kompenzací    | HELVAR L65 + 7μF + 1xT8 58W                                  | 66,2  | 0,96          | 0,985                   | 23                           | 22                           |
| EP bez PFC obvodu                   | Beghelli 2x36W + 2xT8 36W                                    | 70,1  | 0,96          | 0,99                    | 24,8                         |                              |
| EP s pasivním indukčním PFC obvodem | TRIDONIC PC 32 C001 + 1xT8 36W                               | 36,3  | 0,965         | 0,998c                  | 27                           | 26                           |
| EP s aktivním PFC obvodem           | Fulgar 1xD42 + 1xD 42W                                       | 46    | 0,94          | 0,95c                   | 15,1                         | 15                           |
|                                     | Helvar EL 1x58HF + 1xT8 58W                                  | 56,3  | 0,99          | 1c                      | 3,8                          | 3,8                          |
|                                     | Zumtobel LM-PCA2/32 + 2xT8 36W                               | 70    | 0,975         | 0,98                    | 8,2                          | 8,2                          |
|                                     | Vossloh Schwabe ELXc 414.380 + 3xT5 14W                      | 45,1  | 0,98          | 0,985c                  | 6,5                          | 6,5                          |
|                                     | Energy Savings ES-2-T5-54-230-K + 2xT5 54W                   | 102   | 0,99          | 0,997c                  | 9,5                          | 9,5                          |
| Jednostupňový EP                    | Brilux 2x36W + 2xT8 36W                                      | 68,6  | 0,98          | 0,99c                   | 11,6                         | 11,7                         |
| <b>Vysokotlaké výbojky</b>          |                                                              |       |               |                         |                              |                              |
| Indukční předřadník s kompenzací    | TRM H/400 PA-230 + 35μF + Philips HPI-T 400W                 | 410   | 0,965         | 0,975                   | 14,1                         | 14,0                         |
| EP s aktivním PFC obvodem           | Light Drive 1000 (sírná výbojka)                             | 1350  | 0,99          | 0,99c                   | 2,7                          | 2,7                          |

## 2.2 VLIV NAPĚŤOVÝCH CHARAKTERISTIK NA CHARAKTER ODBĚRU SVĚTELNÝCH ZDROJŮ

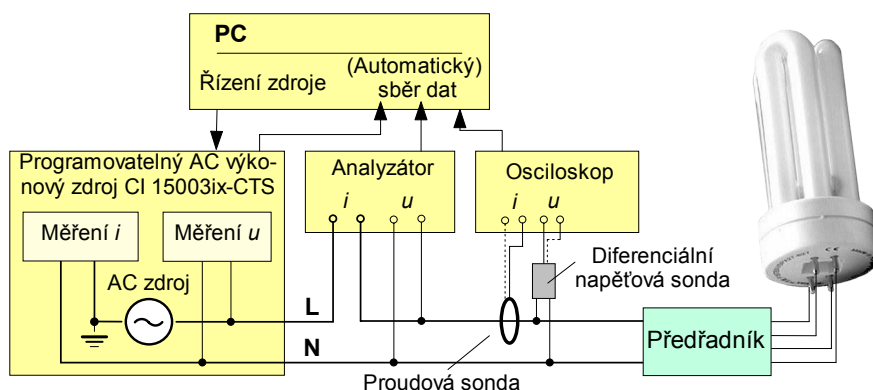
Provozní charakteristiky světelných zdrojů, mezi které patří i charakteristiky odběru, jsou ve většině případů deklarovány pro ideální napájecí napětí, tedy ustálené sinusové s efektivní hodnotou 230V. Rovněž při zkouškách a testech podle norem řady ČSN EN 61000-3 je požadováno napájecí napětí blízké se tomuto ideálnímu. V reálních sítích se ovšem průběh okamžité hodnoty napětí neustále mění a napětí považujeme za stochastickou veličinu, která se mění s místem a časem.

Světelné zdroje, tak jako všechny spotřebiče, reagují na napájecí napětí adekvátním odběrem, který je závislý na konkrétním časovém průběhu napětí v jedné či více periodách i na krátkodobém a dlouhodobém průběhu jeho efektivních hodnoty. Průběh napájecího napětí se obvykle vyjadřuje kvalitativními parametry - napětovými charakteristikami, které popisují a separují jednotlivé odchylky od ideálního průběhu, a které jsou vhodné i pro popis vlivu napájecího napětí na odběr světelných zdrojů. Vliv napětí na odběr a jeho charakter je závislý na typu světelného zdroje, topologii a dimenzování jeho napájecího obvodu a dané charakteristice napětí a je nedílnou součástí výsledných charakteristik odběru v místě připojení.

### 2.2.1 Charakteristiky odběru při deformovaném napájecím napětí

Možnosti určení charakteristik odběru v závislosti na napěťových charakteristikách jsou v zásadě dvě: simulace a měření. Simulace odezvy světelných zdrojů s různým typem předřadného obvodu mohou být provedeny v programu PSpice s využitím sestavených modelů.

Druhou možností, která byla použita, je měření. Charakteristiky odběru v závislosti na deformaci napětí mohou být měřeny přímo v reálných podmínkách. Jestliže ale má být vliv deformace napájecího napětí na odběr světelných zdrojů zkoumán systematicky je nutné separovat změny harmonických napětí od ostatních, jako např. efektivní hodnoty, a zároveň stabilizovat jejich časový průběh. Tyto podmínky nelze v reálné síti zajistit, a proto musí být použita umělá napájecí síť s programovatelným výkonovým zdrojem. Blokové schéma zapojení měřicího systému je na Obr. 2.8.



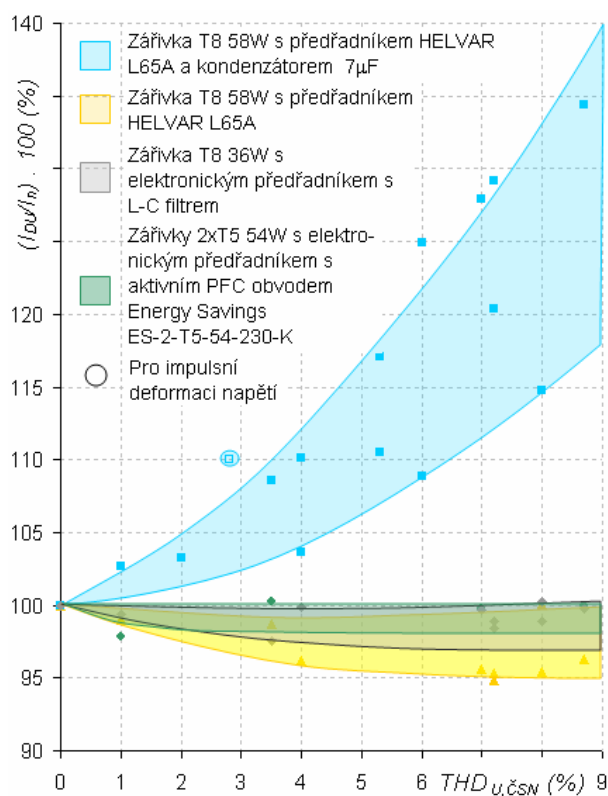
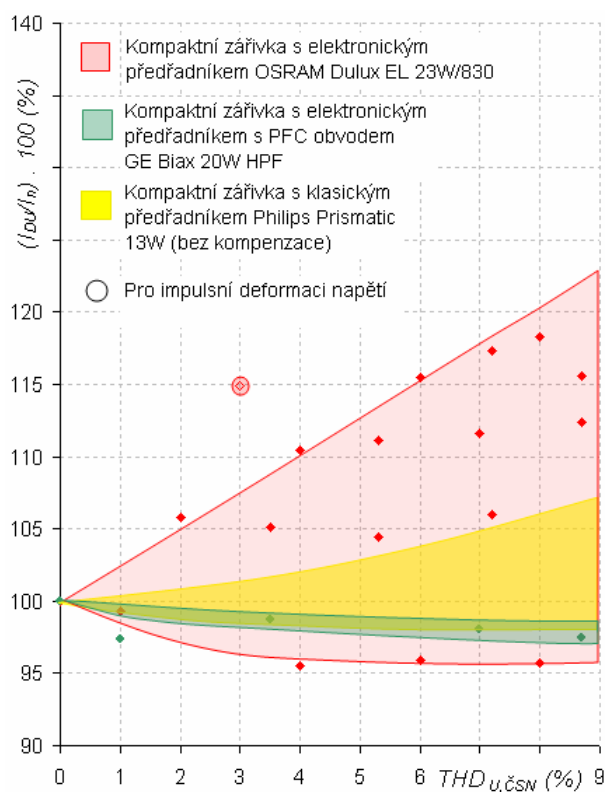
Obr. 2.8 Blokové zapojení měřicího systému pro určování vlivu napěťových charakteristik na světelné zdroje

Pro zkoušky byl definován prostor deformací napájecího napětí určený:

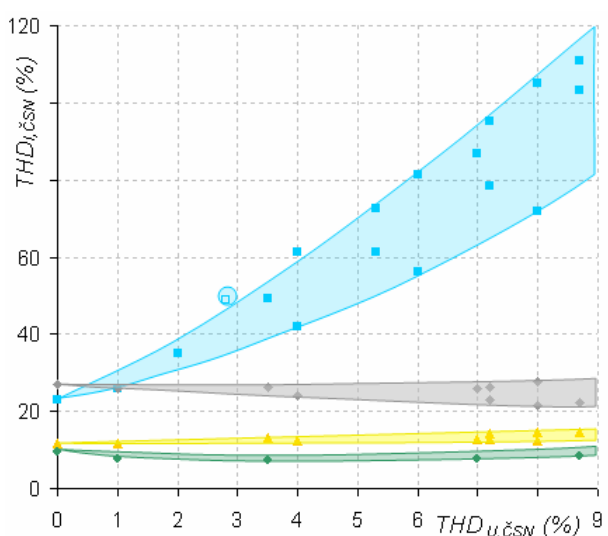
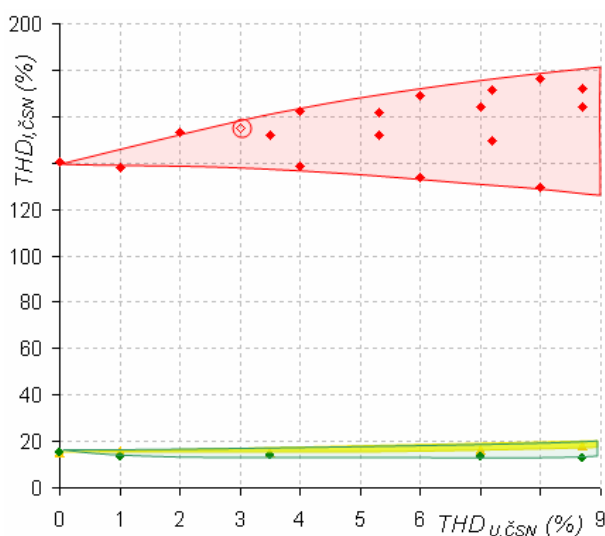
- derivací zkušebních napětí normy ČSN EN 61000-4-13 [6] pro odolnost spotřebičů na harmonické zkreslení napětí, která stanovuje zkušební napětí definovaných typu a úrovní deformací na základě časových průběhů reálných tvarů napětí,
- na podkladě velikostí a fází jednotlivých harmonických napětí, složených specifickým způsobem do jednotlivých zkušebních spekter.

Z hlediska vlivu deformace napájecího napětí na průběh okamžité hodnoty proudu, může spotřebiče rozdělit podle vstupní impedance na lineární, frekvenčně závislé a nelineární. Lineární spotřebiče mají VA charakteristiku nezávislou na frekvenci napětí. Typickou lineární zátěží je ideální teplotně nezávislý rezistor, za který můžeme (s jistým omezením) považovat i žárovku. Při deformaci napětí bude proud odporem sledovat napětí a obě spektra (napětí a proudu) budou totožná se stejným *THD*. Činný příkon bude přenášen na všech harmonických a výsledný celkový účinník odběru bude stále 1. Typickými frekvenčně závislými spotřebiči jsou ideální tlumivka a ideální kondenzátor. Jejich VA charakteristiky jsou frekvenčně závislé. Zatímco u kondenzátoru je změna proudu rovna velikosti kapacity a rychlosti změny napětí, což znamená, že jeho impedance (reaktance) je nepřímo úměrná frekvenci napětí, u tlumivky je změna napětí na tlumivce rovna velikosti indukčnosti a rychlosti změny proudu, a proto její impedance je úměrná frekvenci napětí. Pokud připojíme tyto zátěže na napětí deformované harmonickými složkami, nebudou spektra napětí a proudu totožná. V případě kondenzátoru se bude amplitudové spektrum proudu oproti spektru napětí s rostoucím řádem harmonické zesilovat a u tlumivky naopak zeslabovat. Tzn., že kondenzátor i tlumivka se budou při deformovaném napájecím napětí chovat jako nelineární spotřebiče. Charakteristickým frekvenčně závislým spotřebičem v osvětlovací technice je kompenzační kondenzátor. VA charakteristiky nelineárního spotřebiče nejsou lineární ani při sinusovém napájecím napětí a při deformovaném napájecím napětí se budou rovněž měnit. Nelineárními spotřebiči jsou z tohoto pohledu všechny světelné zdroje.

Příklady výsledků měření charakteristik odběru světelných zdrojů při nesinusovém napájecím napětí jsou na Obr. 2.9 a Obr. 2.10.



Obr. 2.9 Procentní efektivní hodnota odebíraného proudu v závislosti na deformaci napájecího napětí při stejné efektivní hodnotě 230V pro kompaktní zářivky a pro zářivky s externími předřadníky



Obr. 2.10 Změna  $THD_I$  s deformací napájecího napětí při stejné efektivní hodnotě 230V pro kompaktní zářivky a pro zářivky s externími předřadníky (legenda je shodná s Obr. 2.9)

### 3 VLIV ODBĚRU OSVĚTLOVACÍCH SOUSTAV NA NAPÁJECÍ SÍŤ

Šíření harmonických v napájecí síti je jeden z nejvýznamnějších projevů odběru světelných zdrojů v ustáleném stavu. Na síťových impedancích (impedance jednotlivých prvků od spotřebiče ke zdroji) vznikají úbytky napětí s frekvencí procházející harmonické proudy a tím přispívají rovněž k deformaci napětí v systému. Dále se průchodem harmonických přes jednotlivé prvky (vodiče, kabely, transformátory, atd.) zvyšují ztráty a tím se snižuje i jejich dovolené zatížení. V případě vhodné RLC kombinace sítě a za přítomnosti zdroje rušení může rovněž na určitých harmonických frekvencích docházet k rezonancím.

Osvětlovací soustavu můžeme z hlediska elektrického obvodu chápat jako světelný zdroj, prvky nezbytné pro jeho funkci, prvky nezbytné z hlediska platných norem a prvky zvyšující jeho užitnou hodnotu. V nejjednodušším případě se tedy jedná o světelný zdroj, přívodní vedení a ovládací prvek. Ale v protikladu s tím může být osvětlovací soustava tvořena značným množstvím světelných zdrojů s nejrůznějším charakterem odběru. Celkový instalovaný příkon takové osvětlovací soustavy, například administrativních budov, letišť, obchodních center, atd., může činit i 40% z celkového instalovaného příkonu či výkonu napájecího uzlu (transformátoru). Potom ovšem jejich sumační účinek na napájecí soustavu závisí na mnoha faktorech.

### 3.1 ŠÍŘENÍ A KUMULACE HARMONICKÝCH

Konfigurace a topologie, které zahrnují použité typy světelných zdrojů, jejich rozmístění do obecně trojfázové napájecí sítě a vzájemné elektrické vzdálenosti, spolu se symetričností napěťové soustavy, určují celkovou úroveň harmonických a charakteristiky odběru analyzované OS. Přitom časové průběhy proudů odebíraných světelnými zdroji v jednotlivých fázích se sčítají a vytváří průběh celkového odebíraného fázového proudu.

Nelineární zátěž, která generuje harmonické může být pro daný ustálený stav reprezentována „lineární“ zátěží paralelně s proudovými zdroji pro každou harmonickou frekvenci. Impedance  $Z_L$  určuje odběr na základní harmonické a je obecně tvořena RLC kombinací. Jednotlivé proudové zdroje pro harmonické proudy jsou zadány velikostí, frekvencí a úhlem. Parametry ekvivalentních obvodů světelných zdrojů mohou být vyjádřeny z rozborů provedených u jednotlivých typů. Generované harmonické proudy se šíří od svého zdroje směrem do napájecí sítě a přitom „vidí“ její výslednou impedanci. Rozložení harmonických proudů na jednotlivé větve sítě se řídí Ohmovým zákonem a výpočet obvodu pro každou frekvenci může být proveden s použitím Theveninovy věty a principu superpozice. Jednotlivé harmonické proudy zátěží ( $i$ ) lze tedy počítat samostatně jako komplexní veličiny. Vektorový součet proudů všech spotřebičů v dané fázi potom určuje celkové zatížení či příspěvek k zatížení napájecího systému.

$$\operatorname{Re}[I_\nu] = \sum_i \operatorname{Re}[I_\nu^{(i)}] \quad \operatorname{Im}[I_\nu] = \sum_i \operatorname{Im}[I_\nu^{(i)}] \quad (3.1)$$

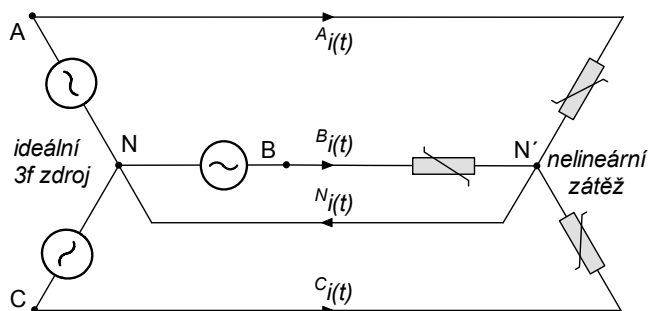
$$I_\nu = \sqrt{\left(\sum_i \operatorname{Re}[I_\nu^{(i)}]\right)^2 + \left(\sum_i \operatorname{Im}[I_\nu^{(i)}]\right)^2} \quad (3.2)$$

a výsledná efektivní hodnota odebíraného proudu ve fázi  $F$ :

$$^F I = \sqrt{\sum_{\nu=1}^n \left( \left( \sum_i \operatorname{Re}[I_\nu^{(i)}] \right)^2 + \left( \sum_i \operatorname{Im}[I_\nu^{(i)}] \right)^2 \right)} \quad (3.3)$$

Přitom může docházet k částečné filtraci (pokud na některé harmonické nedochází k rezonanci), která se projevuje především jako vyhlazení časového průběhu. Nejnejpříznivější konfigurace vzhledem k možné „samo-filtraci“ je při provozování světelných zdrojů se stejnými průběhy odebíraného proudu, tedy stejného typu a výrobce. Řešení problému ve frekvenční oblasti je z hlediska filtračních účinků názornější.

Světelné zdroje (jednofázové spotřebiče) připojené do všech třech fází tvoří obecný případ osvětlovací soustavy. Jestliže jsou světelné zdroje do jednotlivých fází rozloženy rovnoměrně, zatěžuje OS napájecí soustavu symetricky. V případě zapojení pouze do jedné z fází představuje OS úplně nesymetrickou zátěž. Typicky je potom soustava spotřebičů připojena na třífázovou čtyř či pěti vodičovou napájecí síť dle Obr. 3.1. Pro okamžité hodnoty fázových proudů můžeme pomocí Fourierovy řady napsat vztahy:



Obr. 3.1 Třífázová čtyřvodičová síť s ideálním třífázovým zdrojem a nelineárními jednofázovými spotřebiči v Y zapojení

$$\begin{aligned} {}^A i(t) &= {}^A I_0 + \sum_{\nu=1}^n {}^A I_{\nu,m} \cdot \sin(\nu\omega t + {}^A \varphi_{I,\nu}), \quad {}^B i(t) = {}^B I_0 + \sum_{\nu=1}^n {}^B I_{\nu,m} \cdot \sin(\nu(\omega t - 120^\circ) + {}^B \varphi_{I,\nu}) \\ {}^C i(t) &= {}^C I_0 + \sum_{\nu=1}^n {}^C I_{\nu,m} \cdot \sin(\nu(\omega t + 120^\circ) + {}^C \varphi_{I,\nu}) \end{aligned} \quad (3.4)$$

a okamžitá hodnota proudu ve středním vodiči je:

$$i(t) = I_0 + I_0 + I_0 + \sum_{v=1}^n \left[ I_{v,m} \cdot \sin(v\omega t + \varphi_{I,v}) + I_{v,m} \cdot \sin(v(\omega t - 120^\circ) + \varphi_{I,v}) + I_{v,m} \cdot \sin(v(\omega t + 120^\circ) + \varphi_{I,v}) \right] \quad (3.5)$$

Pro zjednodušení nyní předpokládejme, že světelné zdroje s deformovaným odběrem proudu jsou co do elektrických vlastností stejné a tvoří symetrickou zátěž v symetrické napájecí soustavě.

$$I_v = I_v = I_v = I_v, \quad \varphi_{I,v} = \varphi_{I,v} = \varphi_{I,v} = \varphi_{I,v} \text{ pro všechny } v \quad (3.6)$$

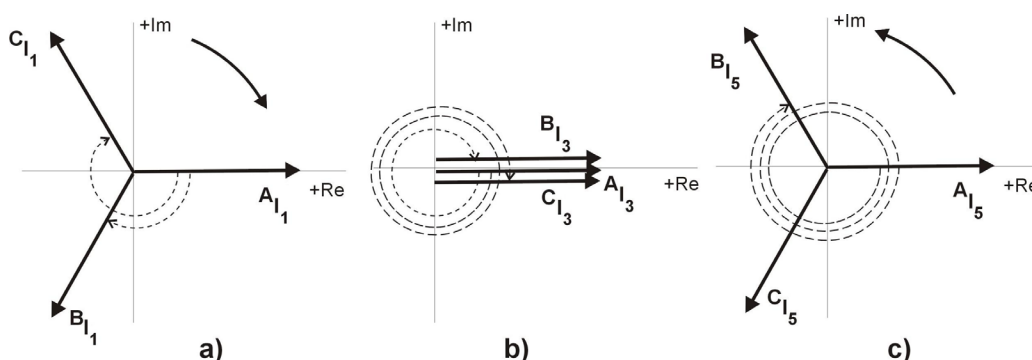
Jestliže nyní sestojíme fázorový diagram proudů odebíraných na základní harmonické, dostaneme proudovou soustavu, která se vyznačuje fázovou i modulovou symetrií. Provedením rozkladu na souměrné složky tedy dostáváme pouze souslednou soustavu. Harmonické složky odebíraného proudu v jednotlivých fázích mohou být rovněž reprezentovány fázory v kruhovém diagramu. A za stejných předpokladů je na Obr. 3.2 uveden případ pro 1., 3. a 5. harmonickou odebíraného proudu v třífázové soustavě [7].

Obecně pro  $v$ -tou harmonickou platí:

$$I_v = I_v \cdot e^{-j \cdot v \cdot 120^\circ}, \quad I_v = I_v \cdot e^{-j \cdot v \cdot 240^\circ} \quad (3.7)$$

Potom při souměrném zatížení budou všechny fázové symetrické harmonické složky odebíraného fázového proudu rotační, s příspěvkem do sousledné či zpětné složky proudu a všechny fázové asymetrické harmonické složky proudu budou vytvářet statickou soustavu s příspěvkem do nulové složky proudu. Pro tento stav tedy:

- sousledná harmonická složka  $v = 3 \cdot n + 1$  kde  $n = 1, 2, 3, \dots$
- zpětná harmonická složka  $v = 3 \cdot n - 1$
- nulová harmonická složka  $v = 3 \cdot n$



Obr. 3.2 Fázorové diagramy první a) třetí b) a páté c) harmonické složky proudu při třífázovém symetrickém odběru a jejich projev v souměrných soustavách

Pro proud ve středním vodiči to znamená, že:

- základní harmonické a všechny harmonické řádu  $v = 3 \cdot n \pm 1$  jednotlivých fází se ve středním vodiči vyruší a
- případné stejnosměrné složky a harmonické řádu  $v = 3 \cdot n$  jednotlivých fází se ve středním vodiči skalárně sečtou.

V disertační práci jsou dále provedeny rozbor proudu v napájecí síti pro případy:

- úplné nesymetrie odběru, odběr pouze v jedné fázi,
- symetrického a nesymetrického odběru jednofázovými spotřebiči v třífázové třívodičové síti, kdy je zátěž zapojena do hvězdy s izolovaným uzlem (na Obr. 3.1 je uzel N' izolován od uzlu N),
- symetrického a nesymetrického odběru jednofázovými spotřebiči v třífázové třívodičové síti, kdy je zátěž zapojena do delta

## 3.2 VELIKOST ZATÍŽENÍ VEDENÍ A ZTRÁTY V NAPÁJECÍ SÍTI

### 3.2.1 Zatížení napájecího – krajního vodiče

Jak je popsáno výše, časové průběhy proudů odebíraných jednotlivými světelnými zdroji ve fázi se sčítají a výsledkem je průběh celkového odebíraného proudu. Sčítání proudů přes jednotlivé harmonické složky je uvedeno ve vztazích (3.1), (3.2) a (3.3). Vliv sčítání odběrů různých reálných světelných zdrojů na velikost celkového odběru a jeho charakteristiky byl analyzován na souboru odběrů sestavených z kombinací vybraných typů světelných zdrojů.



Velikosti harmonických spektra výsledného proudu jsou závislé na vektorovém součtu harmonických jednotlivých typů světelných zdrojů. Přitom každý typ světelného zdroje má odlišné amplitudové a fázové spektrum a dále vliv vektorového součtu fázorů roven nebo menší než jejich skalární součet. Vliv vektorového součtu na výslednou velikost harmonických je principem samofiltrace. Pro vyjádření míry samofiltrace v důsledku rozdílných časových průběhů proudu jednotlivých zdrojů, tedy fázového posuvu jednotlivých harmonických, byly definovány koeficienty samofiltrace s označením  $sum(n)$ :

$$sum(n) = \frac{\sqrt{\sum_{v=1}^n \left( \left( \sum_i \operatorname{Re}[I_v^{(i)}] \right)^2 + \left( \sum_i \operatorname{Im}[I_v^{(i)}] \right)^2 \right)}}{\sqrt{\sum_{v=1}^n \left( \sum_i I_v^{(i)} \right)^2}} \quad (3.8)$$

a  $sum(n-1)$ :

$$sum(n-1) = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n \left( \left( \sum_i \operatorname{Re}[I_v^{(i)}] \right)^2 + \left( \sum_i \operatorname{Im}[I_v^{(i)}] \right)^2 \right)}}{\sqrt{\sum_{v=2}^n \left( \sum_i I_v^{(i)} \right)^2}} \quad (3.9)$$

Matematická definice koeficientů samofiltrace je založena na účinku vektorového sčítání proudů jednotlivých harmonických a vyjadřuje, na kolik se sníží skutečná efektivní hodnota celkového proudu oproti teoretické celkové velikosti proudu bez účinků vektorového sčítání. Tzn. oproti celkovému proudu, jehož velikost harmonických složek ve spektru je vypočtena skalárním součtem přes všechny zátěže. Přitom  $sum(n)$  zahrnuje všechny harmonické včetně základní, takže se v jeho výsledku projeví i kompenzace. Vztah pro  $sum(n-1)$  potom reprezentuje dopad vzájemného sčítání harmonických s řádem větším než 1.

Nejvyšší dosažený koeficient  $sum(n-1)$  byl 0,69. Tzn., že celková efektivní hodnota harmonických složek řádu 2 až  $n$  je přibližně o 30% nižší než jejich „prostá“ suma přes všechny spotřebiče. V ideálním případě bude vektorový součet příspěvků od všech spotřebičů na každé harmonické roven nule. Pro harmonické dvou typů zátěží to znamená, že musí mít stejnou velikost a opačnou fázi. Ovšem takový stav je spíše teoretický a rozhodně ho nemůžeme očekávat na všech frekvencích spektra proudu zároveň. Nejhorší případ nastane při použití naprosto shodných světelných zdrojů.

Praxe je taková, že osvětlovací soustavy větších celků jsou dodávány vždy od jednoho výrobce. A obvykle nebývá ve svítidlech použito více než čtyřech typů napájecích obvodů, které mají pro zahrnutí do vzájemné filtrace relevantní celkový příkon. Reálné snížení celkové efektivní hodnoty odebíraného proudu pak může být do 10% a snížení efektivní hodnoty harmonických složek řádu 2 až  $n$  v celkovém proudu do 20 %.

Kromě celkového snížení velikostí harmonických v celkovém odebíraném proudu, je také podstatné v jaké části spektra ke snižování emisí dochází. Například při použití stejných typů světelných zdrojů, ale s rozdílným dimenzováním, typicky od různých výrobců, se účinek vektorového sčítání proudů projevuje výrazněji u harmonických vyšších řádů (např. od 7. harmonické). Naopak u odběru, který je sestaven ze světelných zdrojů různých typů, se samofiltrace dotýká především harmonických nižších řádu, do 15. harmonické. Podrobné výsledky rozboru jsou uvedeny ve vlastní práci [10].

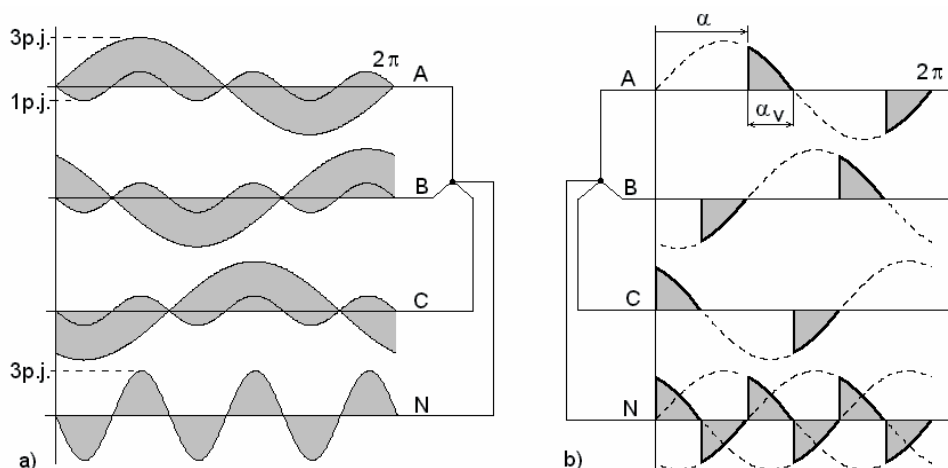
Provedené kalkulace platí za předpokladu, že se vlivem impedance napájecí sítě nezmění vlastní odběr jednotlivých spotřebičů. Ve skutečnosti proud odebíraný každým světelným zdrojem způsobuje na impedanci napájecí sítě úbytky napětí a dále síťové impedance vytvářejí se vstupními napájecími obvody elektronických měničů vyhlazovací L-C filtry. Následkem čehož se tvar proudů mění a pro získání přesnějších výsledků je nutné provést numerický výpočet celé sítě (nebo alespoň její ekvivalentní části) na vhodně zvoleném modelu.

### 3.2.2 Zatížení středního vodiče

Z Obr. 3.2 vyplývá, že proudy třetí harmonické se přidávají k nulovým složkám a ve středním vodiči potom proud odpovídá až tří násobku (skalární součet) proudu třetí harmonické ve fázi. Na velikosti proudu středním vodičem se kromě vyváženosti odběru podílí i soufázové harmonické složky fázových proudů. Obecně, pro souměrný a vyvážený odběr spotřebičů stejného typu ve všech fázích, lze napsat:

$$^N I = 3 \cdot \sqrt{\sum_i^n I_i^2} \quad \text{kde } i = 3, 9, 15, 21, 27, 33, 39, 45, 51, 57, \dots \quad (3.10)$$

Tento fakt má přímý dopad na velikost zatížení středního vodiče. Názorně je celý problém zobrazen v časové oblasti na Obr. 3.3.

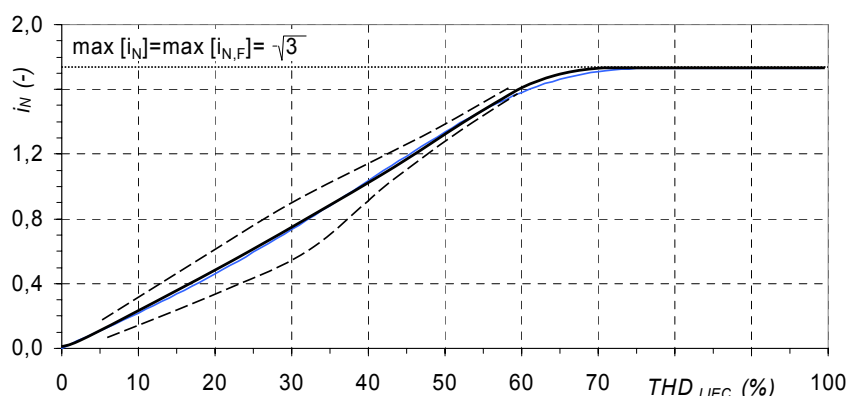


Obr. 3.3 Příklad sčítání proudů ve středním vodiči při souměrném odběru v souměrné síti; a) sčítání 1. a 3. harmonické; b) sčítání odebraného proudu v třífázové soustavě souměrným fázově regulovaným odporovým spotřebičem

Vyjádření proudu středním vodičem efektivní (absolutní) hodnotou je nepraktické a proto byla zavedena poměrná velikost proudu středním vodičem vztažená k proudu fází:

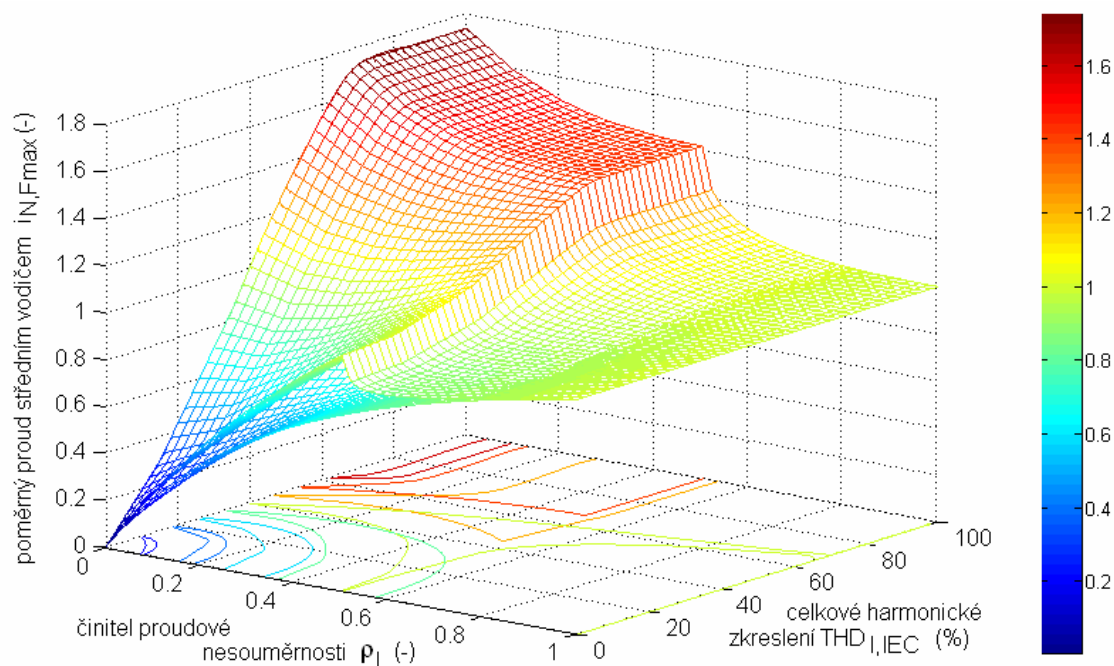
$$i_{N,F} = \frac{N}{F} I \quad (3.11)$$

Pro praktické aplikace je potom nezbytná znalost její velikosti, která je dle předchozího závislá na vyváženosti odběru a obsahu soufázových harmonických složek ve fázových proudech. Pro krajní meze souměrnosti odběru a míry deformace fázových proudů odebraných jednofázovými spotřebiči, byly vyjádřeny mezní hodnoty poměrné velikosti proudu středním vodičem. Odvozená a vypočtená maximální velikost je  $\max[i_{N,F}] = \sqrt{3}$ , kterou lze očekávat při symetrickém zatížení třífázové sítě proudy s maximální deformací a s naprosto stejným průběhem okamžité hodnoty (včetně velikosti) ve všech třech fázích. V souhrnu velikost  $i_{N,F}$  nabývá, v závislosti na deformaci odebraných proudů (obsahu soufázových harmonických), tedy na typu zátěže a na jejím rozložení do třífázové napájecí sítě, hodnot v rozsahu  $<0; \sqrt{3}>$ . Vyjádřená závislost poměrné velikosti proudu středním vodičem na celkovém harmonickém zkreslení proudu  $THD_I$  odebraného jednotlivými typy světelných zdrojů při jejich souměrném zapojení do třífázové napájecí sítě je na Obr. 3.4. V důsledku variací obálky spektra proudu mohou výpočty vést při stejném  $THD_I$  na více než jednu hodnotu  $i_{N,F}$  a závislost  $i_{N,F}$  na  $THD_I$  tedy není jednoznačná. Černá plná čára potom reprezentuje pravděpodobné rozložení velikostí harmonických ve spektru fázového proudu průměrného světelného zdroje s daným  $THD_I$ . Čárkovanou čarou jsou na obrázku vyneseny mezní odchylky, které ohraničují množinu všech vypočtených bodů.



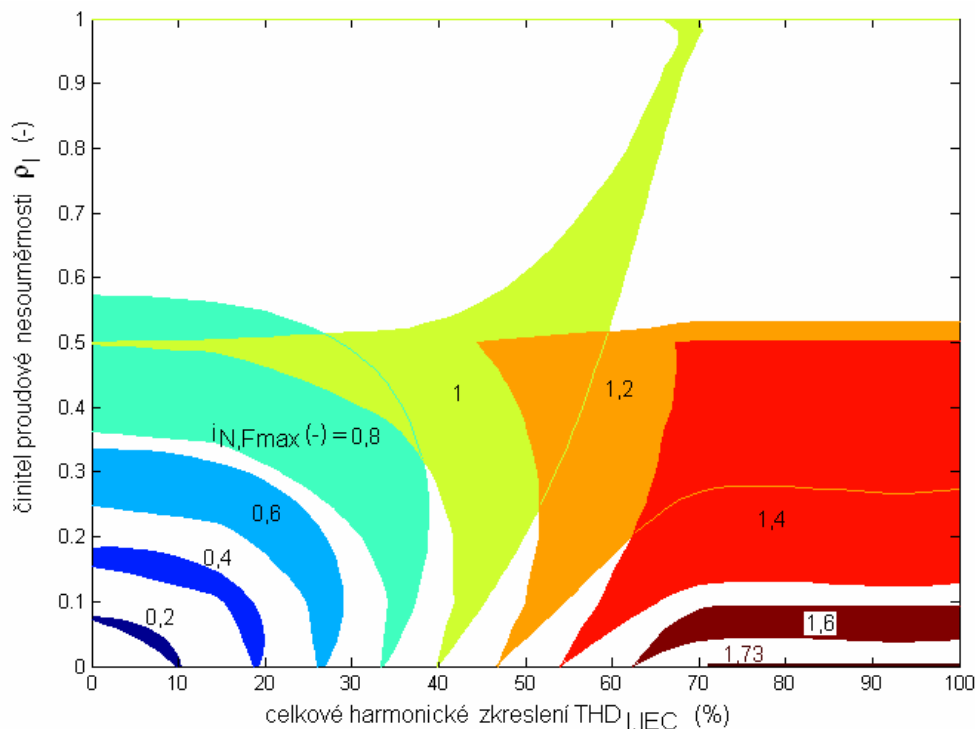
Obr. 3.4 Závislost  $i_N$  na  $THD_{I,IEC}$  pro uvažované typy spotřebičů a jejich pravděpodobný charakter odběru, při  $U=U_I$  (odběr symetrický v 3 fázové souměrné napěťové soustavě)

Na následujícím Obr. 3.5 je závislost  $i_{N,F}$  rozšířena o modulovou nesouměrnost proudového zatížení jednotlivých fází, vyjádřenou prostřednictvím činitele proudové nesouměrnosti  $\rho_I$ , který je definován poměrem celkových efektivních hodnot zpětné a sousledné složky proudu. Přitom zcela logicky, proud středním vodičem musí být vztažen k proudu fází, která je nejvíc zatížena  $F_{max} I$ .



Obr. 3.5 Závislost poměrné velikosti proudu středním vodičem  $i_{N,Fmax}$  na celkovém harmonickém zkreslení fázového proudu  $THD_{I,IEC}$  a činiteli proudové nesouměrnosti  $\rho_I$ , při zatížení ideální 3f sítě stejnými typy světelných zdrojů

Z důvodu nejednoznačných výsledků, které dává  $\rho_I$  pro různé kombinace rozložení zatížení do jednotlivých fází, není závislost na Obr. 3.5 plocha, ale shora a zdola ohraničený prostor. Průmět Obr. 3.5 do izoploch se stejnou velikostí  $i_{N,Fmax}$  je na Obr. 3.6. Určitou dělicí hranicí je v daném prostoru plocha s velikostí  $i_{N,Fmax}=1$ , kdy je velikost proudu ve středním vodiči stejná jako velikost proudu v nejvíce zatížené fázi. Přičemž typicky je průřez středního vodiče stejný nebo menší než průřez fázového vodiče.



Obr. 3.6 Izoplochy se stejnou velikostí  $i_{N,Fmax}$  v závislosti na celkovém harmonickém zkreslení fázového proudu  $THD_{I,IEC}$  a činiteli proudové nesouměrnosti  $\rho_I$ , vyjádřené z Obr. 3.5.

### 3.2.3 Celkové zatížení napájecího vedení – vodiče, kabelu

Dovolené zatížení kabelových vedení (1,3-fázové; 3,4,5,...-vodičové) je obvykle stanoveno na základě jejich dovoleného tepelného namáhání, které je způsobeno procházejícím sinusovým proudem. Přičemž předpokladem je, že proud prochází pouze odpovídajícím počtem vodičů. Pokud bude kabel zatížen světelnými zdroji shodných elektrických vlastností generující harmonické, které tvoří symetrickou zátěž v symetrické napájecí soustavě, bude proud středním vodičem nenulový a jeho velikost je dána velikostí soufázových složek harmonických fázového proudu, které se ve středním vodiči ze všech tří fází sčítají. Jinými slovy, jestliže i středním vodičem protéká proud, pak jsou v kabelu zdrojem tepla více než například tři vodiče a je třeba snížit jejich dovolené zatížení (Joulové ztráty), do kterého je třeba zahrnout i vliv skin efektu. Zároveň však nesmí docházet k lokálnímu přetěžování středního vodiče.

Velikost přenášeného výkonu (proudu) vodičem je limitována ztrátami na jeho činném odporu a poměrné zvýšení ztrát vlivem procházejících harmonických může být definováno vztahem [16]:

$$\sum_{v=1}^n \left( \frac{I_v}{I_1} \right)^2 = 1 + THD_{I, \text{ČSN}}^2 \quad (3.12)$$

Přitom musíme počítat i s přidavnými ztrátami, které vznikají vlivem skin efektu, kdy činný odpor vodiče roste s frekvencí procházejícího proudu a vlivem teplotní závislosti odporu vodiče  $\psi_t$ . Přidavné ztráty vlivem skin efektu reprezentuje součinitel  $\psi_v$ , který může být pro konkrétní spektrum vyjádřen i v integrální formě  $\Psi_v$ . Zahrnutím součinitelů přejde rovnice (3.12) na tvar:

$$\sum_{v=1}^n \psi_v \cdot \psi_t \cdot \left( \frac{I_v}{I_1} \right)^2 = \Psi_v \cdot \psi_t \cdot (1 + THD_{I, \text{ČSN}}^2) \quad (3.13)$$

Z rovnosti ztrát na vodiči, kterým v jednom případě prochází jmenovitý sinusový proud a v druhém případě proud s obsahem harmonických, můžeme stanovit součinitel jeho proudového zatížení způsobující tepelné namáhání – Cable Rating Factor (CRF) (bez uvažování vlivu skin efektu a tepelné závislosti odporu):

$$\Delta P_{nlin} = \Delta P_{lin}; I_{nlin}^2 = (CRF \cdot I_{lin})^2 \Rightarrow CRF = \frac{I_{nlin}}{I_{lin}} \quad (3.14)$$

Mezní případ nastane, bude-li při zatížení sítě nelineárním odběrem protékat středním vodičem maximální velikost proudu. V tom případě je velikost proudů ve všech fázích stejná a za předpokladu stejného odporu všech vodičů (fázových i středního) můžeme napsat:

$$\Delta P_{nlin} = {}^A R \cdot {}^A I^2 + {}^B R \cdot {}^B I^2 + {}^C R \cdot {}^C I^2 + {}^N R \cdot (\sqrt{3} \cdot {}^A I)^2 = 6 \cdot {}^A R \cdot {}^A I^2 \quad (3.15)$$

Naopak s lineární symetrickou zátěží budou ztráty:

$$\Delta P_{lin} = {}^A R \cdot {}^A I^2 + {}^B R \cdot {}^B I^2 + {}^C R \cdot {}^C I^2 = 3 \cdot {}^A R \cdot {}^A I^2 \quad (3.16)$$

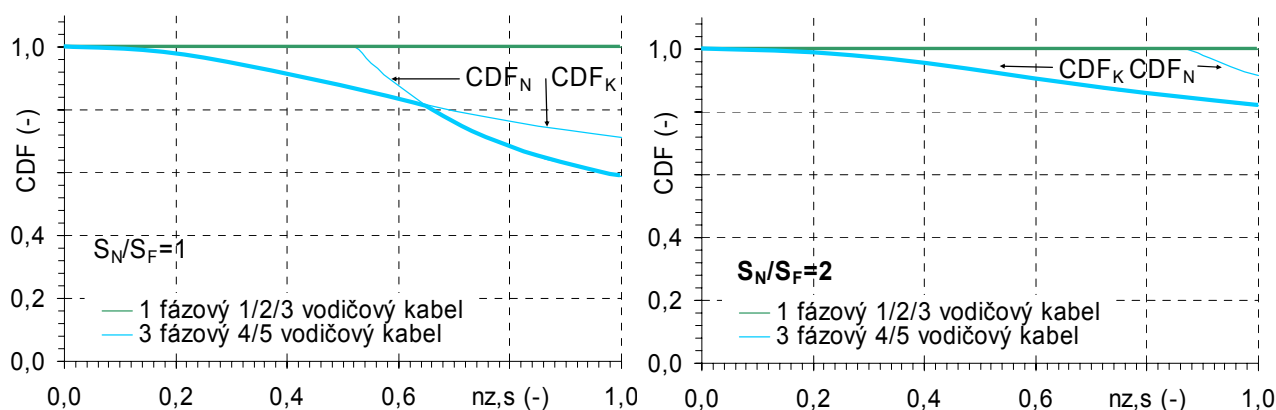
Tzn. že navýšení ztrát, které způsobují tepelné namáhání kabelů je až dvojnásobné.

Pro vyjádření úrovně zatížení jednotlivých vodičů a kabelu jako celku (CRF) a následného potřebného snížení proudového zatížení jednotlivých vodičů a kabelu jako celku – Cable Derating Factor (CDF) (při konstantních ztrátách) v závislosti na skladbě odběru, byla zpracována metodika, která:

- vychází z postupné náhrady původně činné zátěže odebírající sinusový proud, nelineární zátěží se stejnou velikostí odebíraného proudu, ale deformovaným průběhem,
- respektuje změnu velikosti průřezu středního vodiče oproti fázovým vodičům,
- a umožňuje adaptaci na různé kombinace uspořádání vodičů, jako jsou: 1f a 3f kabel, 1f a 3f přípojnícové systémy, nebo neizolovaná venkovní vedení.

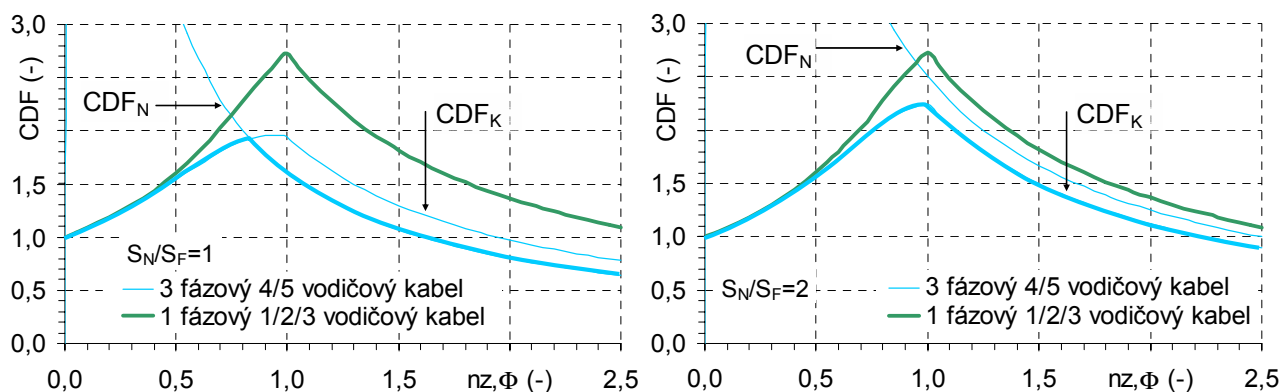
Příklad výsledného průběhu CDF pro 1f a 3f kabel s různým poměrem velikostí průřezu středního a krajního vodiče  $S_N/S_F$  je na Obr. 3.7. U 1f kabelu je proud ve fázi roven proudu ve středním vodiči a  $S_F=S_N$  a protože vliv skin efektu je zanedbatelný, je  $CDF_C$  (celkové) pro 1f kabel v celém rozsahu  $n_{Z,S}$  roven jedné. Pro 3f kabel je omezení určeno  $CDF_N$  (CDF z hlediska zatížení středního vodiče) a  $CDF_K$  (CDF z hlediska zatížení kabelu jako celku), kromě případu s  $S_N=2 \cdot S_F$ , kde  $CDF_C$  tvoří pouze  $CDF_K$ .

Při zatížení 3f kabelu souměrnou 1f nelineární zátěží s impulsním průběhem odebíraného proudu s  $THD_{I, IEC} > 70\%$ , vychází citelné omezení dovolené zátěže. Rozhodující vliv má velikost středního vodiče, resp. jeho průřez ve vztahu k průřezu fázového vodiče. Např. pro  $S_N/S_F=1$  je  $CDF_C=0,6$ , což znamená, že kabel s touto zátěží je možné zatížit proudem, který je pouze 60 % jmenovité hodnoty daného kabelu. Při  $S_N/S_F=2$  je  $CDF_C$  přijatelných 0,85 a na druhou stranu použití kabelu s  $S_N/S_F < 1$  je pro uvedenou zátěž skutečně nevhodné [9].



Obr. 3.7 Potřebné proudové snížení zatížení 1f a 3f kabelu pro dva vybrané poměry  $S_N/S_F$  v závislosti na poměrném zastoupení lineární a nelineární zátěže s  $THD_{I,IEC}=83\%$

Kromě výpočtu zatížení (a změny zatížení) napájecího vedení se změnou kombinace nebo typu zátěže na stejnou velikost odebraného proudu, je v disertační práci provedena i analýza CRF a CDF při náhradě jednoho typu světelného zdroje druhým na stejný světelný tok. Tato modifikace byla využita pro stanovení změny zatížení napájecích vedení při náhradě žárovek kompaktními zářivkami s ekvivalentním světelným tokem. Pro výpočet byly zvoleny kompaktní zářivky s elektronickým předřadníkem s typicky vysokým obsahem harmonických složek v odebraném proudu. Výsledkem je, že při plné náhradě žárovek zářivkami s definovanými parametry, v 1f i 3f síti, bude tepelné namáhání napájecího vedení (ztráty v napájecí síti) mešni než v případě použití žárovek se stejným světelným tokem. V jednofázové síti potom můžeme počet daných zářivek zvýšit až 2,7-krát. V trojfázové síti s ohledem na zatížení středního vodiče, např. pro  $S_N/S_F=1$  pouze 1,6-krát. Příklad výsledného průběhu CDF pro 1f a 3f kabel s různým poměrem velikostí průřezu středního a krajního vodiče  $S_N/S_F$  je na Obr. 3.7. Podrobné výsledky jsou publikovány např. v [8].



Obr. 3.8 Potřebné proudové snížení zatížení, nebo možné zvýšení zatížení, 1f a 3f kabelu pro dva vybrané poměry  $S_N/S_F$  v závislosti na poměrném zastoupení lineární a nelineární zátěže s  $THD_{I,IEC}=83\%$  se stejným světelným tokem

### 3.3 VLIV ODBĚRU NA CHARAKTERISTIKY NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ

V důsledku odběru světelných zdrojů dochází na impedancích sítě k úbytkům napětí a změnám napětí v jednotlivých uzlech sítě. Dominantní spotřebiče v daném napájecím bodě tak ovlivňují i sami sebe. Jestliže jsou v určitém napájecím bodě sítě dominantní spotřebiče světelné zdroje, jejich odběr pak do značné míry určuje napěťové charakteristiky v místě jejich připojení.

Vlivem šíření harmonických generovaných světelnými zdroji osvětlovacích soustav vznikají úbytky napětí na příslušných frekvencích a tím dochází i k deformaci napájecího napětí a napětí v jednotlivých uzlech sítě. Velikost příspěvku k deformaci napětí závisí samozřejmě na celkové úrovni generovaných harmonických OS a zároveň i na připojovacích podmínkách, které se dají charakterizovat výkonovým potenciálem nebo frekvenční charakteristikou impedance v místě připojení.

Výpočet ustáleného stavu sítě, uzlových napětí a proudů větví, se zdroji harmonických proudů, lze provést např. využitím standardní metody uzlových napětí, která se používá pro výpočet ustáleného chodu sítě [14] a principu superpozice. Na základě topologie sítě a náhradních schémat jednotlivých prvků je vytvořena impedanční větvová matice, jejíž prvky jsou komplexní impedance větví sítě pro danou harmonickou. Nelineární spotřebiče jsou nahrazeny

ideálními proudovými zdroji a výpočet se provádí postupně pro každou frekvenci zadaného frekvenčního spektra. Impedanční větвовá matice je nejdříve převedena na uzlovou admitanční matici. Vlastní výpočet spočívá v řešení soustavy lineárních rovnic s komplexními koeficienty popsanou maticovým zápisem pro každou harmonickou frekvenci zvlášť:

$$[\bar{I}]_v = [\bar{Y}]_v \cdot [\bar{U}]_v \quad (3.17)$$

kde  $[\bar{I}]_v$  je vektor uzlových proudů pro  $v$ -tý řád harmonické,  $[\bar{U}]_v$  vektor uzlových napětí k referenčnímu uzlu, a  $[\bar{Y}]_v$  je matice uzlových admitancí. Výsledné napětí a proudy v síti se vypočtou z příspěvků jednotlivých harmonických složek pro daný uzel.

Popsaná metoda modelování sítě a její výpočet má ovšem jednu podstatnou neodstranitelnou nevýhodu. Tou je náhrada nelineárních spotřebičů ideálními proudovými zdroji, které jsou nezávislé na změnách napětí v síti. Sestavený model tak nerespektuje změnu parametrů odběru při změně napájecího napětí. Obvykle zadané parametry proudových zdrojů odpovídají hodnotám vypočteným nebo změřeným pro nelineární zátěž v jistém provozním stavu, který zahrnuje i podmínky napájení, včetně průběhu napětí na svorkách. Pokud se provede výpočet sítě podle výše uvedeného postupu, jsou jeho výsledky relevantní pouze v případě, že v uzlu s připojenými proudovými zdroji nelineární zátěže bude stejné napětí, jako při kterém byly harmonické složky pro proudové zdroje získány. Tzn., že může být namodelována „kopie“ určitého případu, ale nelze provádět prediktivní výpočty vlivu nelineární zátěže na napájecí síť. Obzvláště pokud by se mělo napětí v uzlech výrazně měnit.

Reálné chování spotřebičů (světelných zdrojů) v napájecí síti, a jejich dopad na napájecí síť, lze určit pouze simulacemi sítě s použitím reálných modelů světelných zdrojů, které jsou součástí první části disertační práce. Tzn. řešit napájecí síť se spotřebiči v časové oblasti jako přechodný děj, jehož výsledkem jsou průběhy okamžitých hodnot napětí a proudů.

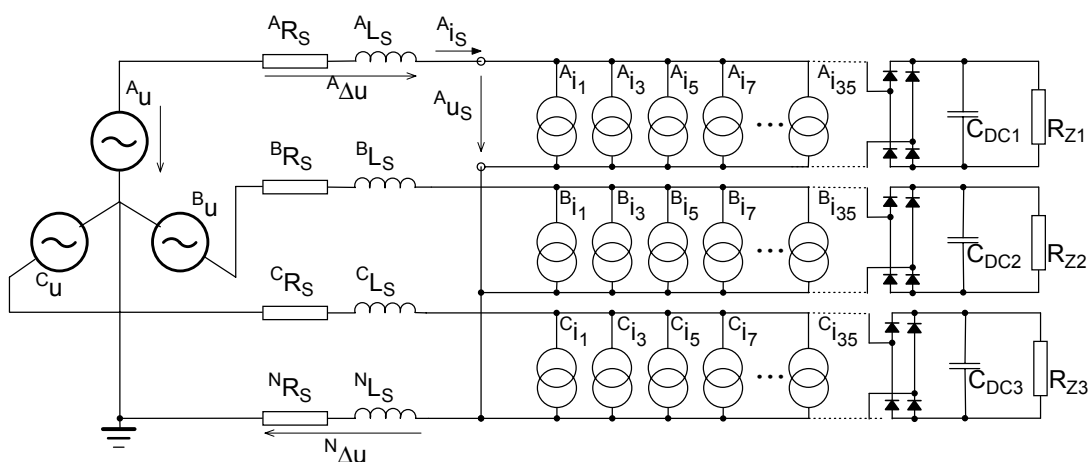
### 3.3.1 Deformace napětí způsobená odběrem osvětlovacích soustav

Limity pro emise harmonických proudů jsou pro světelné zdroje, obecně pro spotřebiče s fázovým proudem do 16 A, v normě ČSN EN 61000-3-2 [5] stanoveny na základě předpokládaného zatížení napájecí soustavy s přihlédnutím k plánovaným úrovním tak, aby za normální situace nebyly v napájecích bodech překročeny kompatibilní úrovně pro harmonická napětí normy ČSN EN 61000-2-2 [4]. Základní metoda pro stanovení mezí harmonických proudů je popsána v normě IEC 61000-1-4 [12]. V této normě je stanoven maximální příspěvek k velikosti jednotlivých harmonických napětí na napěťové hladině nn 20-30 %, s tím že systémová impedance v 90 % Evropských spotřebitelských sítí 230V 50Hz je menší než vztažná impedance definovaná v normě ČSN IEC 725. Za těchto podmínek a z předpokládané úrovně zatížení sítě určitým typem spotřebiče, byly stanoveny limity normy ČSN EN 61000-3-2. Tedy i pro světelné zdroje s příkonem do 25W a nad 25W, které spadají do zařízení třídy C.

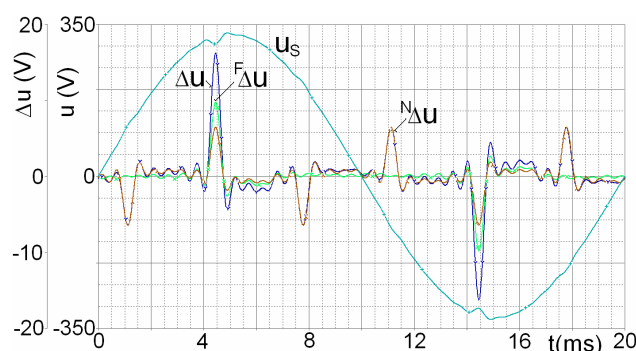
Z uvedeného vyplývá, že zkreslení napětí definované jednotlivými harmonickými složkami by v žádném bodě napájecí sítě typických instalací nemělo přesáhnout stanovené meze kompatibility. Tato metodika ovšem nepočítá s některými jevy, které se při zatížení reálných sítí nelineárními spotřebiči projevují. Opět jsou to především změny charakteristik odběru spotřebičů při změnách napájecího napětí (deformace a změna velikosti), a rovněž možný vznik rezonancí (náhradní schéma celé napájecí sítě je pro výpočet redukováno do vztažné impedance, skládající se ze sériové kombinace odporu a indukčnosti s parabolicky rostoucí závislostí modulu impedance na frekvenci).

Pro míru příspěvku světelných zdrojů, zapojených do OS, k deformaci napětí v síti je v každém případě rozhodující úroveň generovaných harmonických a skutečná frekvenční charakteristika impedance sítě v místě připojení, která se v závislosti na topologii sítě a jejích prvcích může od frekvenční charakteristiky vypočtené ze vztažné impedance značně lišit. Typem světelného zdroje s největším podílem harmonických složek v odebíraném proudu je dle předchozího kompaktní zářivka s integrovaným EP bez PFC obvodu. Jeden světelný zdroj samozřejmě nemůže způsobit deformaci napětí v systému, což se ale mění s jejich zapojením do rozsáhlých OS. Nejhorší případ nastane při jejich koncentrovaném zapojení, kdy jsou vzájemné elektrické vzdálenosti mezi jednotlivými světelnými zdroji minimální a fázové úhly impedancí tedy neovlivní sčítání harmonických od jednotlivých zdrojů, a zároveň při jejich souměrném zapojení do třífázové sítě, protože prostřednictvím středního vodiče ovlivňuje zátěž v jedné fázi napětí v ostatních fázích. Výše popsany model pro simulaci je na Obr. 3.9, s příkladem odsimulovaných výsledných průběhů fázového napětí na zátěži a úbytků napětí na síťových impedancích na Obr. 3.10. Dále je na Obr. 3.11 příklad reálného průběhu okamžité hodnoty napětí s deformací typickou právě pro síť s významným podílem spotřebičů s impulsním průběhem odebíraného proudu.

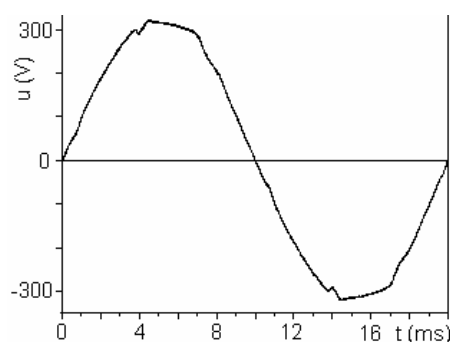
Všechny ostatní typy světelných zdrojů budou mít na deformaci napětí podstatně menší vliv. Jejich maximální příspěvek k deformaci napětí lze stanovit rovněž simulací s využitím sestavených modelů.



Obr. 3.9 Jednoduchý model třífázové sítě s náhradou nelineárních jednofázových spotřebičů s impulsním průběhem odebíraného proudu ideálními proudovými zdroji nebo zjednodušeným modelem



Obr. 3.10 Příklad výsledků simulace modelu na Obr. 3.9 v PSpice; úbytky napětí na síťových impedancích a průběh výsledného napájecího napětí



Obr. 3.11 Změřený průběh okamžité hodnoty napětí typický pro síť s významným podílem spotřebičů s impulsním průběhem odebíraného proudu

Pro zjištění skutečného příspěvku dané osvětlovací soustavy k míře deformace napájecího napětí v systému, je dle dílčích závěrů práce nutné provést komplexní simulace na adekvátním modelu sítě, s náhradou daného typu světelného zdroje příslušným modelem. V závislosti na preciznosti náhrady sítě, může být výsledný model pro simulaci značně rozsáhlý. Přitom nelze stanovit jednoznačný soubor pravidel pro zjednodušování modelů, který by zároveň deklaroval úměru mezi mírou zjednodušení a přesností výsledku. Výchozím vodítkem pro případné provedení rozboru s následnou simulací inkriminované sítě, potom může být vztah odvozený pro odhad možného příspěvku třífázové osvětlovací soustavy k celkové deformaci napájecího fázového napětí, který je rovněž součástí disertační práce [10].

## 4 ZÁVĚR

Odběr světelných zdrojů v osvětlovacích soustavách je vždy spojen se zpětnými rušivými vlivy na napájecí síť. V ustáleném stavu patří mezi nejzávažnější nízkofrekvenční rušení šířené po vedení jednoznačně generování harmonických proudů, jejichž úroveň závisí na typu světelného zdroje a předřadném obvodu, jeho zapojení a dimenzování a rovněž na připojovacích podmínkách, které jsou charakterizovány parametry napájecího napětí a frekvenční charakteristikou sítě v místě připojení. I když je světelný zdroj v osvětlovací soustavě primárním zdrojem rušení, nelze jeho dopad na napájecí síť hodnotit samostatně. Musí se uvažovat se sumačním účinkem celé osvětlovací soustavy, který závisí na kombinaci typů světelných zdrojů, jejich koncentraci a rozmístění do obecně třífázové napájecí sítě. Harmonické složky proudů, odebíraných jednotlivými světelnými zdroji, určují výsledné součtové proudy procházející fázovým a středním vodičem a způsobují nadměrné výkonové ztráty a zatížení prvků napájecí sítě, harmonické úbytky napětí na síťových impedancích s deformací napětí ve všech bodech sítě, a další sekundární jevy spojené s deformací proudové a napěťové soustavy.

Cílem práce bylo stanovit pravděpodobný charakter odběru osvětlovací soustavy v závislosti na použitých typech světelných zdrojů, na parametrech napětí v místě jejich připojení, dále na rozsahu, konfiguraci a topologii osvětlovacích soustav a na podmínkách připojení a určit dopad na zatížení napájecího vedení a deformaci napětí v místě připojení.

V první části byl analyzován odběr světelných zdrojů používaných pro všeobecné osvětlování, žárovek, LED modulů a výbojek s napájecími či předřadnými obvody nezbytnými pro jejich funkci, v základním a ustáleném stavu. Základním stavem světelného zdroje, i s předřadným obvodem, je myšlen nominální provoz, tedy bez regulace, při jmenovitých podmínkách napájení. Základní stav je zároveň výchozím provozním stavem, při kterém musí být zajištěna řada požadavků na provozní vlastnosti světelného zdroje, jako např. správná funkce vlastního světelného zdroje, splnění mezi nízkofrekvenčního a vysokofrekvenčního rušení a elektrické bezpečnosti podle platných norem, světelný zdroj jako celek musí být ekonomicky efektivní, atd. Tyto a mnohé další specifické požadavky potom určují celkové technické řešení konstrukce světelného zdroje s odpovídajícím charakterem odběru. V souhrnu je charakter odběru závislý na typu a parametrech vlastního světelného zdroje a/nebo na typu, zapojení a dimenzování napájecího či předřadného obvodu. Postupně byl analyzován odběr žárovek na síťové napětí, žárovek na malé napětí napájených snižujícím transformátorem, výbojek s indukčním předřadníkem bez a s paralelní kompenzací, elektronických snižujících měničů pro napájení žárovek na malé napětí a LED modulů, a elektronických předřadníků pro napájení výbojek. Pro stanovení velikostí harmonických proudů a dalších charakteristik odběru a jejich rozsahu pro jednotlivé typy světelných zdrojů byly použity zjednodušené výpočty založené na předpokládaném průběhu okamžité hodnoty proudu odebíraného ze sítě, matematické simulace sestavených modelů světelných zdrojů odpovídající požadavku na zjištění charakteristik odběru, a měření odběru komerčních produktů.

Vliv na charakter odběru světelného zdroje a tedy i velikost harmonických složek odebíraného proudu má rovněž velikost (efektivní hodnota) napětí a deformace průběhu jeho okamžité hodnoty v místě připojení. Pro určení vlivu harmonického zkreslení napájecího napětí na odběr světelných zdrojů byl navržen prostor deformací napětí, vycházející z typického obsahu harmonických složek a typických průběhů okamžité hodnoty napětí. Z provedených měření a vyhodnocení vyplývá, že deformace napětí významným způsobem ovlivňuje odběrové charakteristiky především elektronických snižujících měničů a elektronických předřadníků bez PFC obvodu v napájecím stupni, a výbojek s tlumivkou a paralelní kompenzací.

Světelné zdroje osvětlovacích soustav jsou jednofázové spotřebiče zapojené do obecně třífázové napájecí sítě. Použité typy světelných zdrojů, jejich rozmístění do jednotlivých fází a vzájemné elektrické vzdálenosti, spolu se symetričností napěťové soustavy, určují celkové součtové velikosti a charakteristiky fázových proudů a velikost proudu středním vodičem. Sčítání proudů jednotlivých odběrů ve fázovém vodiči je ovlivněno tzv. samofiltrací harmonických proudů, která snižuje obsah harmonických ve výsledném odebíraném proudu a která je závislá na fázových posuvech jednotlivých harmonických složek a tedy na průbězích okamžitých hodnot proudů odebíraných jednotlivými typy zátěží. Míra možné samofiltrace s dopadem na charakteristiky celkového odběru byla stanovena rozбором celkových odběrů, vytvořených kombinacemi různých typů světelných zdrojů. Osvětlovací soustavy větších celků jsou ale téměř vždy provozovány se stejnými typy světelných zdrojů od jednoho výrobce. V těchto případech je účinek samofiltrace prakticky minimální. Velikost proudu středním vodičem je dána velikostí a symetrií fázových proudů (jejich jednotlivých harmonických složek), a zároveň obsahem soufázových harmonických složek ve fázových proudtech. Pro limitní stavy jmenovaných podmínek byly odvozeny a vypočteny mezní hodnoty poměrné velikosti proudu středním vodičem vztahované k velikosti největšího fázového proudu. Poměrná velikost proudu středním vodičem je v úhrnu závislá na souměrnosti proudového zatížení jednotlivých fází, která zahrnuje míru souměrnosti všech harmonických proudových soustav, a na celkovém harmonickém zkreslení proudů ve fázových vodičích, které u jednofázových spotřebičů představuje i úroveň obsahu soufázových harmonických složek. Uvedené závislosti byly zpracovány pro specifické zapojení světelných zdrojů do třífázové napájecí sítě s očekávaným pravděpodobným celkovým odběrem dané osvětlovací soustavy.



Zatížení napájecích vodičů proudy s nesinusovým průběhem okamžité hodnoty způsobuje stejně jako odběr jalového výkonu přídavné výkonové ztráty, které jsou úměrné kvadrátu celkového obsahu harmonických složek s řádem vyšším než jedna. Dále, v důsledku vyššího obsahu nulových složek harmonických proudů v případě zatížení trojfázové sítě jednofázovými nelineárními spotřebiči, je výsledná velikost proudu ve středním vodiči větší, než v případě výkonově ekvivalentní zátěže odbírající sinusové proudy. Nejzávažnější je situace při souměrném zatížení, kdy jsou průběhy a velikosti proudů v jednotlivých fázích totožné a posunuté o stejný elektrický úhel. Velikost proudu středním vodičem je potom úměrná trojnásobku obsahu soufázových složek ve fázovém proudu, v případě jednofázových spotřebičů i jeho celkovému harmonickému zkreslení, a nabývá hodnot od nuly až po 1,73-násobek efektivní hodnoty fázového proudu. Vyšší hodnota proudu středním vodičem se rovněž podílí na zvýšených výkonových ztrátách. Odběr světelných zdrojů osvětlovacích soustav tak více zatěžuje napájecí vedení, u kterých je třeba s ohledem na dovolené oteplení, v určitých případech, snižovat maximální (jmenovitý) zatěžovací proud. Pro vyjádření míry zatížení kabelů i samostatných vodičů, jednofázových i trojfázových napájecích systémů a určení následného potřebného snížení jejich proudového zatížení v závislosti na skladbě odběru, byla zpracována metodika, která zohledňuje i velikost průřezu středního vodiče ve vztahu k průřezu fázových vodičů a umožňuje srovnání zatížení napájecího vedení při záměně lineární zátěže (žárovek na síťové napětí) nelineární (všechny ostatní typy světelných zdrojů) za podmínky ekvivalentního zdánlivého příkonu, nebo činného příkonu a nebo světelného toku. Každý přístup k ekvivalenci zátěže má pro určení zatížení napájecího vedení osvětlovacími soustavami své opodstatnění.

Vlivem šíření harmonických proudů generovaných světelnými zdroji osvětlovacích soustav v napájecí síti, vznikají úbytky napětí na příslušných frekvencích a tím dochází i k deformaci napájecího napětí a napětí v jednotlivých uzlech sítě. Velikost příspěvku osvětlovacích soustav k harmonickému zkreslení napětí závisí na celkové úrovni generovaných harmonických proudů v jednotlivých fázích a na frekvenční charakteristice impedance sítě, a do jisté míry je limitována mezemi pro emisi harmonického proudu normy ČSN EN 61000-3-2. Limity této normy by za normálních podmínek a při uvažovaném maximálním rozsahu osvětlovací soustavy měly zajistit, že velikost harmonických složek napětí v napájecí síti, v důsledku odběru osvětlovacích soustav, nepřekročí přibližně 18% velikosti kompatibilních úrovní pro harmonická napětí normy ČSN EN 61000-2-2. Předpoklad určitého blíže nespecifikovaného rozsahu osvětlovací soustavy, spolu se zjednodušenými parametry napájecí sítě, však nemusí být dostatečnou zárukou toho, že úroveň deformace napětí v síti nebude vyšší. Výpočet šíření harmonických proudů a harmonického zkreslení napětí v uzlech sítě se obvykle provádí na analytickém modelu s náhradou harmonických proudů spotřebičů ideálními proudovými zdroji. Náhrada je statická, nerespektující změny průběhu odebíraného proudu, který se v reálných sítích mění se vzrůstajícím podílem daného typu zátěže a závisí na výsledné velikosti napájecího napětí, ale i na způsobené deformaci a indukčnosti napájecí sítě. Řešením je simulace modelu sítě s náhradou světelných zdrojů nebo osvětlovacích soustav odpovídajícími modely sestavenými v první části práce. Celková úroveň vypočtených harmonických proudů světelných zdrojů a jejich dopad na deformaci napájecího napětí potom může být menší (např. u elektronických měničů bez PFC obvodu v napájecím stupni), nebo větší (např. pro výbojky s indukčním předřadníkem a paralelní kompenzací), než při náhradě ideálními proudovými zdroji. Míra vlivu osvětlovací soustavy na deformaci napájecího napětí v závislosti na poměrném celkovém příkonu byla určena simulacemi zjednodušeného trojfázového modelu napájecí sítě s náhradou zátěže zjednodušenými modely a pro srovnání i ideálními proudovými zdroji. Prezentovány byly výsledky pro zátěž tvořenou elektronickými měniči bez PFC obvodu pro napájení kompaktních zářivek. Tyto světelné zdroje mají největší obsah harmonických v odebíraném proudu a zároveň se vyznačují silnou závislostí jeho průběhu na reálných parametrech sítě se zvětšujícím se podílem dané zátěže napájecího bodu.

Celkový dopad osvětlovacích soustav na provoz napájecí sítě je dán mnoha faktory, zejména použitými typy světelných zdrojů a jejich množstvím, zapojením do napájecí sítě a soudobostí. S ohledem na analyzované body vzájemné interference napájecí sítě a světelných zdrojů jsou problematické především osvětlovací soustavy se světelnými zdroji s vysokým nebo potenciálně vysokým obsahem harmonických složek (kompaktní zářivky s elektronickým předřadníkem bez PFC obvodu resp. výbojky s indukčním předřadníkem a paralelní kompenzací) a s koncentrovaným a soudobým odběrem velkého množství jednotek. V takových případech je vhodné upravit konvenční metody dimenzování napájecích vedení podle uvedených postupů a provést ověření harmonického zkreslení napětí v uzlech sítě a zatížení napájecích vedení simulací relevantního modelu napájecí sítě s nezjednodušenou topologií a s odpovídajícími modely napájecích zdrojů, prvků sítě a světelných zdrojů.

Šíření harmonických v napájecí síti způsobuje i další problémy které je nutné uvažovat. Např. možnost vzniku rezonancí, nadměrné zatěžování dalších prvků sítě a spotřebičů, jako napájecích transformátorů [3] [19], kompenzačních kondenzátorů, atd., ovlivňování funkce měřících, jistících, ochranných prvků a připojených spotřebičů, atd., s následnými sekundárními jevy, kterými jsou zkracování životnosti, chybná funkce spotřebičů a prvků sítě, vznik poruchových stavů, atd. [2].

## 4.1 SHRNUÍ NOVÝCH VĚDECKÝCH POZNATKŮ PRÁCE A VLASTNÍ PŘÍNOS

Disertační práce řeší v úvodu stanovené cíle, přičemž nové poznatky a hlavní přínos práce lze stručně shrnout do následujících bodů.

1. Analýza odběru používaných nebo perspektivních světelných zdrojů pro všeobecné osvětlování v základním a ustáleném stavu:
  - a. Studium a zpracování poznatků podstatných pro výsledný charakter odběru jednotlivých světelných zdrojů.
  - b. Určení obsahu harmonických složek v odebíraném proudu a celkového účinníku odběru v závislosti na typu a parametrech vlastního světelného zdroje a/nebo na typu, zapojení a dimenzování napájecího či předřadného obvodu.
    - Sestavení a odvození vztahů pro zjednodušený výpočet harmonických složek odebíraného proudu a dalších charakteristik odběru.
    - Sestavení modelů vybraných typů světelných zdrojů pro simulace odběru.
    - Návrh a prezentace výsledků simulace nového typu pasivního kapacitního PFC obvodu s napětím řízenou nábojovou pumpou pro elektronické předřadníky s příkonem větším než 25W.
2. Analýza charakteristik odběru světelných zdrojů v závislosti na deformaci napájecího napětí.
  - a. Definice souboru harmonického zkreslení napájecího napětí, s různým průběhem a celkovou úrovní deformace pro určení odezvy světelných zdrojů měřením nebo simulacemi.
  - b. Měření a rozbor odběru světelných zdrojů při napájecím napětí deformovaném harmonickými složkami.
3. Rozbor šíření harmonických proudů generovaných světelnými zdroji v třífázové napájecí síti a jejich sčítání v krajním a středním vodiči.
  - a. Vyjádření vlivu vektorového sčítání harmonických proudů souboru různých typů světelných zdrojů na celkový průběh odebíraného proudu ve fázi, jeho amplitudové spektrum a výsledné charakteristiky odběru.
    - Definice koeficientů vzájemné kompenzace a filtrace harmonických proudů.
  - b. Analýza sčítání fázových proudů a jejich harmonických složek ve středním vodiči a určení velikosti proudu středním vodičem.
    - Odvození a výpočet mezních hodnot poměrné velikosti proudu středním vodičem.
    - Určení závislostí poměrné velikosti proudu středním vodičem na celkovém harmonickém zkreslení fázových proudů a souměrnosti proudového zatížení jednotlivých fází pro specifické zapojení světelných zdrojů do osvětlovacích soustav.
4. Výpočet výkonových ztrát na napájecích vedeních a zatížení kabelů i samostatných vodičů, jednofázových i trojfázových napájecích systémů, jednofázových i trojfázových osvětlovacích soustav.
  - a. Zpracování metodiky pro výpočet míry zatížení napájecích vedení a určení následného potřebného snížení jejich proudového zatížení, s ohledem na jejich dovolené oteplení, v závislosti na skladbě odběru.
    - Vyjádření nezbytného snížení maximální dovolené (jmenovité) velikosti proudu kabelů při jejich zatížení kompaktními zářivkami s elektronickým předřadníkem s impulsním průběhem odebíraného proudu.
    - Výpočet změny ztrát v napájecím kabelu a jeho zatížení při náhradě žárovek kompaktními zářivkami s elektronickým předřadníkem.
5. Určení harmonického zkreslení fázového napájecího napětí zjednodušené třífázové napájecí sítě při zatížení souměrným a koncentrovaným odběrem osvětlovací soustavy.
  - a. Výpočet harmonických složek napájecího napětí a jeho celkového harmonického zkreslení, pro uvažovaný zjednodušený model napájecí a spotřebitelské sítě, v závislosti na poměrném jmenovitém zdánlivém příkonu osvětlovací soustavy, sestavené ze světelných zdrojů s největším obsahem harmonických v odebíraném proudu.
  - b. Porovnání výsledků pro náhradu odběru zátěže ideálními proudovými zdroji a pro náhradu světelného zdroje odpovídajícím modelem.
  - c. Vyjádření vztahu pro první odhad možného příspěvku třífázové osvětlovací soustavy k celkové deformaci napájecího fázového napětí.

## 4.2 VÝZNAM A VYUŽITÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Provedený rozbor funkce a odběru jednotlivých typů světelných zdrojů pro všeobecné osvětlování se všemi napájecími či předřadnými obvody je možné aplikovat i na výzkum dalších aspektů vzájemného ovlivňování světelných zdrojů a napájecí sítě, jako je například vliv kolísání napájecího napětí na blikání světelných zdrojů, nebo obecně vliv jakýchkoliv změn napětí na provoz světelných zdrojů. Stejně tak je možno výsledky použít pro analýzu odběru světelných zdrojů v jejich dalším provozním stavu, kterým je regulace.

Prakticky lze výsledky práce použít při návrhu osvětlovacích soustav a elektrických rozvodů, na jejichž základě lze doplnit metodiku pro vhodný výběr světelných zdrojů pro danou aplikaci, upravit a doplnit postupy návrhu dimenzování a topologie světelných rozvodů. Závěry a odvozené důsledky pro modifikaci konvenčních postupů pro dimenzování vedení s ohledem na harmonické proudy lze samozřejmě použít při návrhu každé sítě zatížené jednofázovými nelineárními spotřebiči, mezi které patří především napájecí elektronické zdroje pro zařízení informačních technologií, kancelářské techniky, domácích spotřebičů, atd.

Výsledky, spolu s dílčími i souhrnnými závěry, se také implicitně dotýkají normy ČSN EN 61000-3-2 [5]. Konkrétně zkušební obvodu pro měření emisí harmonických a systému mezi. Nedostatečná definice zkušební impedance může například v důsledku znamenat, že při testu napájecích obvodů bez PFC stupně je možno prostřednictvím indukčnosti sítě manipulovat s výsledky zkoušek. Z provedených analýz odběru světelných zdrojů dále vyplývá, že distribuce velikostí harmonických složek ve spektru se řídí jednoduchými pravidly a výrazná odchylka od uvedených rozložení není pravděpodobná. V tomto směru by bylo možné zjednodušit systém mezi pouze na limity celkového harmonického zkreslení a celkového účinníku odběru. Současná norma rovněž nerozlišuje aplikační sféru, která výrazně ovlivňuje koncentraci a soudobost provozu spotřebičů. Na základě rozdělení prostředí na obytné, průmyslové a obchodní, s možností stanovení rozdílných limitů, by bylo možné lépe kontrolovat dopady na provoz dané napájecí sítě. Obdobný systém mezi uplatňuje norma ANSI C82.77-2002 [1].

## 4.3 MOŽNOSTI DALŠÍHO ZAMĚŘENÍ PRÁCE

Kromě základního provozního jmenovitého stavu mohou být světelné zdroje provozovány v regulačním režimu, při kterém je záměrně snižována velikost jejich světelného výkonu. Regulace světelného toku se u všech světelných zdrojů provádí změnou velikosti napětí nebo proudu. Těchto změn lze dosáhnout přímo zařízením, které je nezbytné pro provoz světelného zdroje, nebo je k tomuto účelu používáno další přídavné zařízení-regulátor. Do první skupiny patří EP pro výbojky a elektronické snižující měniče pro žárovky na malé napětí a LED moduly, kde se regulace provádí přímo změnou řízení měniče. Do druhé skupiny patří výbojky s klasickým indukčním předřadníkem a s kompenzací nebo bez ní, žárovky na nízké napětí a žárovky na malé napětí provozované se snižujícím transformátorem, které se regulují změnou efektivní hodnoty napětí externím regulátorem. Jako externí regulátory se používají např. sériové přepínací tlumivky, odbočkové transformátory, autotransformátory, tyristorové nebo tranzistorové měniče napětí a měniče na principu napěťového střídače. V každém případě, regulací dochází ke změně charakteristik odběru světelných zdrojů, nebo celé OS s externím regulátorem a tím i ke změně vlivu jejich odběru na napájecí síť. Dalším cílem je tedy provedení obdobné analýzy odběru regulovaných světelných zdrojů a regulátorů světelných zdrojů a jejich zpětných rušivých vlivů na napájecí síť.

Pro přesné modelování chování světelných zdrojů v napájecí síti je nezbytné provést jejich náhradu odpovídajícími dynamickými modely. Stejně tak pro modelování osvětlovacích soustav je třeba uvažovat s rozložením světelných zdrojů ve vlastní síti osvětlovací soustavy s nenulovými vzájemnými elektrickými vzdálenostmi. Modely světelných zdrojů pro simulaci jejich odběru byly v této práci sestaveny v programu PSpice. Nicméně prostředí PSpice není vhodné pro modelování rozsáhlé sítě s více spotřebiči. V dalším kroku by tedy bylo potřeba na základě modelů v PSpice vytvořit dynamické makro-modely světelných zdrojů v prostředí Matlab Simulink nebo ATP a provést komplexní simulace osvětlovacích soustav s typickými případy rozložením světelných zdrojů, se stanovením zatížení napájecího systému a dopadu na parametry napětí v napájecí síti.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ANSI C82.77-2002. *Harmonic Emission Limits-Related Power Quality Requirements for Lighting Equipment*. ANSI Lighting Group – NEMA, 2002
- [2] CONROY, E. Power monitoring and harmonic problems in the modern building. *Power Engineering Journal*, Vol. 12, Number 2, April 2001, IEE 2001 UK, pp. 101-107, ISSN 0950-3366
- [3] COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION. Harmonics, Transformers and K-Factors [on line]. *CDA Publication*, no. 144, September 2000, 8 pp., [www.cda.org.uk](http://www.cda.org.uk)
- [4] ČSN EN 61000-2-2 ed.2:2003. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Část 2-2: Prostředí - Kompatibilní úroveň pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením a signály ve veřejných rozvodných sítích nízkého napětí*. idt IEC 61000-2-2:2002. Vydána leden 2003
- [5] ČSN EN 61000-3-2 ed.2: 2001. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 3-2: Meze pro emise harmonického proudu (zařízení se vstupním fázovým proudem do 16 A včetně)*. mod IEC 61000-3-2:2000. Vydána listopad 2001
- [6] ČSN EN 61000-4-13:2003. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Část 4-13: Zkušební a měřicí technika – Harmonické a meziharmonické včetně signálů v rozvodných sítích na střídavém vstupu/výstupu napájení – Nízkofrekvenční zkoušky odolnosti*. idt IEC 61000-4-13:2002. Vydána leden 2003
- [7] DÁN, A., SANTARIUS, P., GAVLAS, J., KUŽELA, M. *Kvalita dodávané elektrické energie v sítích nízkého napětí*. International Copper Association, Hungarian Copper Promotion Centre - Budapešť, 2000, 47 stran
- [8] DRÁPELA, J., PLCH, J. Zatížení napájecí sítě kompaktními zářivkami s elektronickým předřadníkem bez PFC obvodu. *5. mezinárodní konference SVĚTLO 2002*. Brno, 11. - 13. 6, 2002. 1. vydání, ed. Jiří Drápele, Brno: ČSO, 2002. str. 181-187, ISBN 80-238-8928-1
- [9] DRÁPELA, J., NOVÁK, T., PLCH, J., SOKANSKÝ, K. Vzájemné ovlivňování světelných zdrojů (OS) a napájecí sítě. *Konference ČK CIRED 2002*. Tábor, 5.-6.11. 2002, ČK CIRED, 2002, 22 str., na CD-ROM
- [10] DRÁPELA, J. *Zpětné rušivé vlivy osvětlovacích soustav na napájecí síť*. Disertační práce, FEKT VUT v Brně, Brno 2006
- [11] DRECHSLER, R. *Měření, hodnocení a kvalita odběru elektrické energie v provozu tyristorových zařízení*. SNTL/ALFA, Praha 1982, 130 stran
- [12] IEC 61000-1-4/CD. *ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) – Part 1-4: General –Rationale for limiting power-frequency conducted harmonic and interharmonic current emissions from equipment, in the frequency range up to 9 kHz* [on line]. IEC Committee Draft (CD), IEC SC77A - 77A/WG1/TF3-010123PL21B, 5.2.2001
- [13] KEULENAER, H. *Power Quality Self-assessment Guide. Power Quality Application Guide*. Copper Development Association. European Copper Institute. May 2002. [www.cda.org.uk](http://www.cda.org.uk)
- [14] KUČERA, D. *Přenos a rozvod elektrické energie*. Skriptum VUT v Brně, 1982, 198 stran
- [15] KŮS, V. *Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu*. BEN-technická literatura, Praha 2002. 1. vydání, 184 stran, ISBN 80-7300-062-8
- [16] KUŽELA, M., SANTARIUS, P. *Vliv nelineárních spotřebičů na dimenzování distribučních sítí nn. IV. konference ERU 2000*, Brno, 2000, 10 stran, CD-ROM
- [17] MAČÁT, J., VACULÍKOVÁ, P., ZÁVIŠKA, O. *Zpětný vliv výkonových polovodičových měničů na napájecí síť*. SNTL, Praha 1978, 295 stran
- [18] QIAN, J. *Advanced Single-Stage Power Factor Correction Techniques*. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 1997
- [19] RADA, J. Proudý ve vinutích a v přívodech při obecném nesouměrném zatížení trojfázového transformátoru. *Elektrotechnický magazín (Etm)*, 5/95 ročník 5, str. 11 – 14
- [20] SUM, K.K. Improved Halley-Fill Passive Current Shaper. *PowerSystems World 97*, 1997, 8pp.
- [21] TAO, F. *Advanced High-Frequency Electronic Ballasting Techniques for Gas Discharge Lamps*. Dissertation, Center for Power Electronics System, Blacksburg, Virginia, 2001
- [22] TENTI, P., SPIAZZI, G. Harmonic Limiting Standards and Power Factor Corrector Techniques [on line]. *6th European Conference on Power Electronics and Applications - EPE '95*, 144 pp.
- [23] Vaculíková, P., Vaculík, E a kol. *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů*. Grada Publishing, spol s r.o., 1. vydání, Praha, 1998, 504 stran, ISBN 80-7169-568-8

# CURRICULUM VITAE

**Ing. Jiří Drápela**

Narozen: 10. 2. 1976, Nové Město na Moravě  
Kontakt: Tel: +420 541 149 234  
E-mail: drapela@feec.vutbr.cz

## Vzdělání:

1990 – 1994 Střední průmyslová škola v Jihlavě obor Elektroenergetika  
1994 – 1999 **(Ing.)** FEI VUT v Brně, obor Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika, téma diplomové práce: „Analýza přechodných jevů při startu dieselgenerátorů v jaderných elektrárnách“  
2005 VUT v Brně, Centrum vzdělávání a poradenství, doplňující pedagogické studium pro pedagogy VUT, téma závěrečné písemné práce: „Zavedení nového výukového předmětu“  
1999 – 2006 **(Ph.D.)** FEKT VUT v Brně, postgraduální studium, obor Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika (D-SEE), prezenční a kombinované studium

## Praxe, zaměstnání:

2004 – dosud technický pracovník, FEKT VUT v Brně, Ústav elektroenergetiky

## Pedagogická praxe:

1999 – 2006 FEKT VUT v Brně, Ústav elektroenergetiky, participace na cvičeních v předmětech Elektrické teplo a světlo, Světelná a osvětlovací technika, Provoz osvětlovacích soustav, Optické komunikace a sítě, Světelná technika, Osvětlovací soustavy, Elektrotepelná technika  
2004 FEKT VUT v Brně, Ústav elektroenergetiky, příprava akreditace studijního oboru Elektroenergetika magisterského studijního programu Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika, se zavedením tří nových předmětů: Kvalita elektrické energie a EMC 1, Kvalita elektrické energie a EMC 2, Diagnostika v elektroenergetice.  
2005 – dosud FEKT VUT v Brně, Ústav elektroenergetiky, výuka předmětů: Užití elektrické energie, Kvalita elektrické energie a EMC 1, Kvalita elektrické energie a EMC 2, Diagnostika v elektroenergetice.  
2003 – dosud FEKT VUT v Brně, Ústav elektroenergetiky, vedení 9 diplomových a 4 bakalářských prací, v oblasti kvality elektrické energie a odolnosti spotřebičů na nízkofrekvenční rušení šířené po vedení, a světelné a osvětlovací techniky.

## Účast na řešení projektů:

2003 – 2005 *Realizace expertního systému pro osvětlování prostoru s vyšší zřakovou náročností.* GAČR 2003-2005, č. projektu GA102/03/1162, řešitel: Ing. Petr Baxant, Ph.D. Charakteristika výsledku: Zpracování a realizace základní struktury expertního systému pro osvětlování prostorů a jeho naplnění expertními znalostmi získanými v rámci řešení projektu. (Součástí projektu bylo i řešení dílčích úkolů zabývajících se problematikou vlivu napájecího napětí na kvalitu osvětlení).  
2004 *Inovace laboratoře elektrických sítí.* FRVŠ 2004, typ A, č. projektu 1532/2004, řešitel: doc. Ing. Antonín Matoušek, CSc., celková investice 2,2 mil. Kč. Charakteristika výsledku: vybudování pracoviště s výkonovým programovatelným třífázovým AC zdrojem California Instruments CI 15003-ix s výkonem 3x5kVA pro simulaci reálných nn sítí a jejich měření.  
2006 *Inovace laboratoře světelné techniky.* FRVŠ 2006, typ A, č. projektu 486/2006, řešitel: Ing. Petr Baxant, Ph.D., celková investice 1,9 mil. Kč. Charakteristika výsledku: vybudování nových pracovišť pro měření spektrálních vlastností světla, kolorimetrii a spektrofotometrii.  
2000 – dosud Participace či samostatné řešení více než 60 projektů (zakázek) financovaných soukromým sektorem.

**Jazyky:** angličtina, ruština (pasivně)

## Ohodnocení a ocenění:

1999 6. místo v soutěži diplomových prací „Cena ČEZ, a.s., ‘99“  
2001 3. místo v soutěži prací studentů doktorských studijních programů FEI VUT v Brně STUDENT FEI 2001 (ze 76 hodnocených)

**Členství v organizacích:** ČK CIREN – člen, sekce č. 2 a 4

WSEAS – member

**Vybrané publikace:**

- [1] DRÁPELA, J., MASTNÝ, P., PROCHÁZKA, Z. Light flicker caused by interharmonics and interharmonic-flicker curves of lamps. *WSEAS Transactions on Power Systems*, ISSN 1790-5060, 2006, roč. 1, č. 2, s. 554 - 561.
- [2] DRÁPELA, J., KRÁTKÝ, M., WEIDINGER, L., ZÁVODNÝ, M. *Light Flicker of Fluorescent Lamps with Different Types of Ballasts Caused by Interharmonics* In IEEE PowerTech 2005 Conference Proceedings. PowerTech'2005. St. Petersburg: IEEE PES, 2005, s. 1 - 7, ISBN 5-93208-034-0
- [3] ZLOMEK, M., DRÁPELA, J. *Experimental Assessment of Voltage Sags Effects on Induction Machine Operation* In IEEE PowerTech 2005 Conference Proceedings. PowerTech'2005. St. Petersburg: IEEE PES, 2005, s. 1 - 7, ISBN 5-93208-034-0
- [4] DRÁPELA, J., MASTNÝ, P., PROCHÁZKA, Z. *Interharmonics-Flicker Curves of Lamps and Compatibility Level for Interharmonic Voltages* In Proceedings of the 5th WSEAS International Conference POWER'05. 5th WSEAS / IASME International Conference on: ELECTRIC POWER SYSTEMS, HIGH VOLTAGES, ELECTRIC MACHINES (POWER'05). Tenerife, Spain: WSEAS, 2005, s. 1 - 6, ISBN 960-8457-39-4
- [5] DRÁPELA, J., PLCH, J. *The load on the neutral wire by nonlinear electrical appliances in four line wire feeder supply mains* In Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika 2001. Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika 2001. ÚVEE, FEI VUT v Brně, Technická 8: Brno, ÚVEE FEI VUT v Brně, 2001, ISBN 80-214-1887-7
- [6] DRÁPELA, J. *Low input nonlinear electrical appliances in three-phase feeder supply mains* In Proceedings of 7th conference STUDENT FEI 2001. Konference a soutěž STUDENT FEI 2001. : FEI VUT v Brně, 2001, s. 57 - 61, ISBN 80-214-1860-5
- [7] DRÁPELA, J., BAXANT, P. *Systematical Analysis of Lamps Sensitivity to Voltage Variations and its Application in Systems for Design of Lighting Systems* In Proceeding from the 16th International Conference LIGHT 2005. LIGHT-SVETLO 2005. Bratislava: Typhoon, Bratislava, 2005, s. 60 - 126, ISBN 80-969403-0-9
- [8] DRÁPELA, J. *Voltage fluctuation caused by integer and non-integer harmonics* In Proceedings of the 7th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2006. 7th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2006. Brno: Brno University of Technology, FEEC, DEPE, 2006, s. 261 - 269, ISBN 80-214-3180-6
- [9] DRÁPELA, J., PLCH, J. Souhrnný pohled na zpětné rušivé vlivy OS na napájecí síť - část 1. *Světlo*, ISSN 1212-0812, 2002, roč. 2002, č. 2, s. 34 - 39.
- [10] DRÁPELA, J., PLCH, J. Souhrnný pohled na zpětné rušivé vlivy OS na napájecí síť – část 2. *Světlo*, ISSN 1212-0812, 2002, roč. 5, č. 4, s. 48 - 50.
- [11] DRÁPELA, J., PLCH, J. *Zatížení napájecí sítě kompaktními zářivkami s elektronickým předřadníkem bez PFC obvodu* In Sborník přednášek 5. mezinárodní konference SVĚTLO 2002. 5. mezinárodní konference SVĚTLO 2002. Brno: Česká společnost pro osvětlování, 2002, s. 181 - 187, ISBN 80-238-8928-1
- [12] DRÁPELA, J., NOVÁK, T., PLCH, J., SOKANSKÝ, K. *Vzájemné ovlivňování světelných zdrojů (OS) a napájecí sítě* In Sborník konference ČK CIREN 2002. Konference ČK CIREN 2002. Praha: ČK CIREN, 2002, (CD-ROM)
- [13] DRÁPELA, J., PLCH, J. *Kompaktní zdroje v osvětlovacích soustavách a jejich zpětné vlivy* In IV. odborná konference ERU 2000. IV. odborná konference ERU 2000. Brno: ELCOM a.s., Brno, 2000, s. 1 - 23, (CD-ROM)
- [14] DRÁPELA, J. *Aplikace polovodičových měničů pro soustavy veřejného osvětlení* In Proceedings of 14th International Conference LIGHT 2003. 14th International Conference Light 2003. Bratislava, SR, 2003, s. 243 - 247, ISBN 80-233-0488-7
- [15] DRÁPELA, J. *Zpětné rušivé vlivy elektronických předřadníků světelných zdrojů na napájecí síť* In Proceedings of 14th International Conference LIGHT 2003. 14th International Conference Light 2003. Bratislava, SR, 2003, s. 248 - 253, ISBN 80-233-0488-7
- [16] DRÁPELA, J. *Interference mezi svítidly a signálem HDO* In Sborník konference ČK CIREN 2004. Konference ČK CIREN 2004. České Budějovice: ČK CIREN, 2004, s. 1 - 21, (CD-ROM)
- [17] DRÁPELA, J. *Flikr způsobený meziproharmonickými složkami napětí* In Sborník konference ČK CIREN 2006. Konference ČK CIREN 2006. Tábor: EGC-České Budějovice, 2006, s. 1 - 19, ISBN 80-248-1190-1

## ABSTRACT

The dissertation thesis deals with backward disturbing influences of light sources connected in illuminating systems on supply network which is a part of mutual interference within low-frequency sphere. Concretely it is focused on the light sources and illuminating systems consumption in a steady state, associated with generating of current harmonic components, its propagation in the supply network and with the impact on the typical supply electrical system operation.

The first part targets the consumption analysis of all commonly used or perspective types of light sources for a general use in the fundamental and steady state along with sine-wave nominal supply voltage. The part of the study is the light sources working principle analysis which is essential for setting the values of consumption characteristics and its range according to the type, design and dimensioning of light source. For setting the range of the consumption characteristics values regarding possible technical solutions, the light source correct operation, valid standards and economic efficiency, there are used simplified calculations based on the assumed instantaneous value behaviour of demand current, mathematical simulations of lamps consumption on assembled models and consumption measurement on the existing light sources. Hereafter the results of the measurement and the evaluation of impact the supply voltage harmonic distortion on the consumption of each light source type are pointed.

Following part of the dissertation deals with summation of harmonic current components of light sources and its propagation within the three-phase low-voltage supply network and with the impact of overall illuminating systems demand on the supply conductors loading, losses in the supply network and the voltage distortion in the point of coupling.

The gain of the dissertation thesis is the overall analysis of the light sources demand and concomitant low-frequency phenomena relating to light sources connection into waste three-phase illuminating systems, with creating basis for setting of presumable current and power demand character of illuminating system and its immediate impact on the supply network based on the used types of light sources, voltage parameters in the point of connection, configuration and topology of illuminating systems and based on the circumstances of the connection to the supply network.