



Bakalářská práce

Modelování citlivosti LED předřadníků s ohledem na viditelný flickr

Studijní program:

B0714A270001 Mechatronika

Autor práce:

Filip Hroneš

Vedoucí práce:

Ing. Leoš Kukačka, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Liberec 2023



Zadání bakalářské práce

Modelování citlivosti LED předřadníků s ohledem na viditelný flickr

Jméno a příjmení:

Filip Hroneš

Osobní číslo:

M19000080

Studijní program:

B0714A270001 Mechatronika

Zadávací katedra:

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Akademický rok:

2021/2022

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou LED předřadníků a viditelného flickru.
2. Dle dostupné literatury vyberte vhodný typ předřadníku a vytvořte model.
3. Proveďte citlivostní analýzu, model verifikujte na dostupných datech.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 30–40 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] COLLIN, A., S. DJOKIC, J. DRAPELA, R. LANGELLA a A. TESTA, 2019. Light Flicker and Power Factor Labels for Comparing LED Lamp Performance. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. 1–1. ISSN 0093-9994. Dostupné z: doi:10.1109/TIA.2019.2919643
- [2] DRAPELA, J., R. LANGELLA, A. TESTA, A. J. COLLIN, X. XU a S. Z. DJOKIC, 2018. Experimental evaluation and classification of LED lamps for light flicker sensitivity. In: *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP): 2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)* [online]. s. 1–6. Dostupné z: doi:10.1109/ICHQP.2018.8378857
- [3] KUKAČKA, L. a J. DRÁPELA, 2020. A Preliminary Study on Modeling of Voltage Induced Flicker Sensitivity of Fluorescent and LED Lamps with Closed-Loop Control. In: *2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP): 2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)* [online]. s. 1–5. ISSN 2164-0610. Dostupné z: doi:10.1109/ICHQP46026.2020.9177905
- [4] DRÁPELA, Jiří, M. KRÁTKÝ, L. WEIDINGER a M. ZAVODNY, 2005. Light Flicker of Fluorescent Lamps with Different Types of Ballasts Caused by Interharmonics. In: *Power Tech, 2005 IEEE Russia: Power Tech, 2005 IEEE Russia* [online]. s. 1–7. Dostupné z: doi:10.1109/PTC.2005.4524419
- [5] DRÁPELA, Jiří a P. TOMAN, 2007. Interharmonic – Flicker Curves of Lamps and Compatibility Lever for Interharmonic Voltages. In: *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne: Power Tech, 2007 IEEE Lausanne* [online]. s. 1552–1557. Dostupné z: doi:10.1109/PCT.2007.4538546

Vedoucí práce: Ing. Leoš Kukačka, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání práce: 12. října 2021
Předpokládaný termín odevzdání: 22. května 2023

L.S.

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D.
vedoucí ústavu

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Modelování citlivosti LED předřadníků s ohledem na viditelný flickr

Abstrakt

Hlavním tématem práce je sestavení modelu či modelů předřadníku pro LED osvětlení v prostředí Matlab Simulink, rozbor vlivu jeho jednotlivých částí a funkcí a jejich dokumentace. Při tvorbě modelu je navrženo několik potenciálně použitelných postupů, jejich použití či zamítnutí je pádně zdůvodněno. Vhodný model či modely jsou následně verifikovány na několika sadách Gain Factoru naměřeného na reálných LED svítidlech. Verifikace je dále zdokumentována pro snadnou replikaci výsledků.

Klíčová slova: LED osvětlení, Elektronický předřadník, Flickr, Gain Factor, Buck měnič, Buck-boost měnič, Simulink

Modeling LED Driver Sensitivity to Visible Flicker

Abstract

Main aim of the thesis is to create one or several models of an electronic driver for LED lamp using Matlab Simulink environment, analysing its specific parts and functions and documenting them. Several ways of approaching this issue are proposed, their acceptance or rejection is validly justified. Accepted model or models are then verified on a number of pre-measured sets of Gain Factor data. The model's verification is then documented for an easy reproduction of achieved results.

Keywords: LED lighting, Electronic driver, Flicker, Gain Factor, Buck converter, Buck-boost converter, Simulink

Poděkování

V první řadě bych chtěl vyjádřit díky vedoucímu práce, Ing. Leoši Oldřichu Kukačkovi Ph.D. za jeho trpělivost a zároveň jeho dlouhodobou a pravidelnou ochotu poradit mi jak s teoretickými, tak i s technickými dotazy a potížemi. Také bych mu chtěl poděkovat za poskytnutí zařízení k provádění simulací.

Dále bych rád poděkoval prof. Ing. Jiřímu Drápelovi Ph.D. za poskytnutí ukázkového modelu LED žárovky Tesla a naměřených dat pro verifikaci, bez kterých by se práce neobešla.

Nakonec také děkuji Bc. Tomáši Linhartovi, že mi v případech potřeby umožnil pokračovat v práci na svém PC.

Contents

| | |
|--|-----------|
| Seznam zkratek | 10 |
| List of Symbols | 11 |
| 1 Úvod | 13 |
| 2 Teoretická část | 14 |
| 2.1 Vysvětlení pojmu flickr | 14 |
| 2.1.1 Měření flickru | 15 |
| 2.2 Problematika ze zdravotního hlediska | 15 |
| 2.2.1 Potíže s okamžitou působností | 16 |
| 2.2.2 Dlouhodobé potíže | 16 |
| 2.2.3 Stroboskopický jev a phantom array | 16 |
| 2.3 Způsoby eliminace flickru | 17 |
| 2.4 Měření citlivosti předřadníku na vnější rušení | 17 |
| 2.4.1 Gain Factor | 17 |
| 2.5 Kategorizace předřadníků | 19 |
| 2.5.1 Kategorizace dle topologie | 19 |
| 2.5.2 Bližší specifikace použité kategorie | 20 |
| 3 Praktická část | 21 |
| 3.1 Seznámení s použitým modelem | 21 |
| 3.1.1 Obecný popis modelu | 21 |
| 3.1.2 Rozdělení modelu | 21 |
| 3.2 Citlivostní analýza vlivu parametrů na Gain Factor | 29 |
| 3.2.1 Závislosti na parametrech v AC části | 29 |
| 3.2.2 Závislosti na parametrech v DC části | 30 |
| 3.2.3 Závislosti na parametrech ve výstupní části | 36 |
| 3.3 Tvorba zjednodušených obecných modelů | 38 |
| 3.3.1 Model buck s nastavenou střídou | 39 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3.2 | Model buck s regulovanou střídou | 42 |
| 3.3.3 | Model buck s regulací periody sepnutí | 44 |
| 3.3.4 | Model buck-boost s nastavenou střídou | 45 |
| 3.3.5 | Model buck-boost s regulovanou střídou | 46 |
| 3.3.6 | Model buck-boost s regulací periody sepnutí | 49 |
| 3.4 | Verifikace modelů na naměřených datech | 51 |
| 3.4.1 | Verifikace původního modelu | 52 |
| 3.4.2 | Verifikace zjednodušených modelů | 55 |
| 4 | Závěr | 60 |
| A | Citlivostní analýza původního modelu | 64 |
| B | Citlivostní analýzy zjednodušeného modelu typu buck s konstantní střídou | 69 |
| C | Citlivostní analýzy zjednodušeného modelu typu buck s PI regulátorem | 70 |
| D | Citlivostní analýzy zjednodušeného modelu typu buck s regulačním blokem Cpeak_AwSwC | 76 |
| E | Citlivostní analýzy zjednodušeného modelu buck-boost s konstantní střídou | 83 |
| F | Citlivostní analýzy zjednodušeného modelu buck-boost s PI regulátorem | 86 |
| G | Citlivostní analýzy zjednodušeného modelu typu buck-boost s regulačním blokem Cpeak_AwSwC | 91 |

Seznam zkratek

| | |
|-----------------------|--|
| AC | Alternating Current/Střídavý proud |
| DC | Direct Current/Stejnoseměrný proud |
| LED | Light Emitting Diode |
| EMI | Electromagnetic Interference/Elektromagnetické rušení |
| aPFC | Active Power Factor Correction/Aktivní korekce účinníku |
| CCR | Constant Current Regulator/Regulátor konstantního proudu |
| FFT | Fast Fourier Transform/Rychlá Fourierova transformace |
| GF | Gain factor |
| GF_φ | Luminous flux Gain Factor/Gain factor světelného toku |
| LFI | Luminous Flux Index/Index zhodnocení světelného toku |
| PFI | Power Factor Index/Index zhodnocení účinníku |
| SMPS | Switch Mode Power Supply/Spínaný zdroj |
| AvSwC | Average Switching Controller |
| CCM | Continuous Conduction Mode/Mód spojitého vedení |
| DCM | Discontinuous Conduction Mode/Mód nespojitého vedení |
| A | Anode/Anoda diody |
| K | Katode/Katoda diody |
| D | Drain |
| S | Source |

Seznam symbolů

| Symbol | Jednotka | Popis |
|--------------|----------|--|
| U_{in} | V | Vstupní napětí |
| U_{out} | V | Výstupní napětí |
| U_n | V | N-tá harmonická složka napětí |
| U_f | V | Konkrétní náhradní zdroj napětí |
| U_{ih} | V | Interharmonická složka vstupního napětí |
| U_d | V | Napětí na diodě |
| I_L | A | Proud cívkou |
| I_{ipkmax} | A | Maximální povolený proud v peakové hodnotě |
| Φ | lm | Světelný tok |
| $\bar{\Phi}$ | lm | Světelný tok - střední hodnota |
| R_{eq} | Ω | Ekvivalentní odpor svítidla |
| R_{fdc} | Ω | Konkrétní vnitřní odpor |
| R_{fdc1} | Ω | Konkrétní vnitřní odpor |
| R_f | Ω | Konkrétní vnitřní odpor |
| C_b | F | Kapacita konkrétního kondenzátoru |
| C_d | F | Kapacita konkrétního kondenzátoru |
| C_{fdc1} | F | Kapacita konkrétního kondenzátoru |
| C_{fdc2} | F | Kapacita konkrétního kondenzátoru |
| C_{fdc3} | F | Kapacita konkrétního kondenzátoru |
| C_{fac} | F | Kapacita konkrétního kondenzátoru |
| L_b | H | Indukčnost konkrétní cívky |
| L_{fdc} | H | Indukčnost konkrétní cívky |
| L_{fac} | H | Indukčnost konkrétní cívky |
| f_{ih} | Hz | Frekvence interharmonické složky napětí |
| f_{sw} | Hz | Spínací frekvence |
| f_{vis} | Hz | Viditelná frekvence |

| Symbol | Jednotka | Popis |
|--------------|----------|--------------------------------------|
| f_1 | Hz | První harmonická frekvence 50 Hz |
| T_{ONMAX} | s | Maximální délka periody sepnutí |
| T_{ONMIN} | s | Minimální délka periody sepnutí |
| T_{OFFMAX} | s | Maximální délka periody rozepnutí |
| T_{OFFMIN} | s | Minimální délka periody rozepnutí |
| τ_L | s | Časová konstanta lampy |
| P_{st} | | Faktor závažnosti flikru, krátkodobý |
| P_{inst} | | Faktor závažnosti flikru, okamžitý |
| d | | Střída |
| K | | Citlivost předřadníku |
| Q | | Kvociant rozšíření parametru |

1 Úvod

V moderní dochází k čím dál většímu rozšíření LED osvětlení v domácnostech i v kancelářských či průmyslových prostorách. Díky jejich relativně dlouhé životnosti a energetické účinnosti jsou totiž LED světla ekonomicky i ekologicky příznivější variantou oproti jejich předchůdcům, obzvláště v porovnání s energeticky nevýhodnými filamentovými žárovkami. Tento způsob osvětlení s sebou však přináší mnohé méně známé potenciální zdravotní potíže a s jejich rozšířením je třeba investovat více zdrojů do výzkumu a vývoje způsobů jejich potlačení.

Hlavním problémem, kterým se širší výzkum i téma této práce zabývají, je takzvaný flickr. Jedná se o rychlé změny v intenzitě osvětlení, které mají negativní vliv na lidský zrak a jsou doprovázeny zdravotními potížemi jako migrény, závratě, nebo hrozba záchvatu u citlivějších jedinců.

Pro snížení závažnosti efektu flickru je v osvětlení třeba využití předřadníků – zařízení upravujících blikání lampy na přijatelnou míru. Provádí to užitím specializovaných obvodů a regulačních systémů, které vyhlazují průběh proudu lampou, a tím pádem i průběh výstupního světelného toku.

Cílem teoretické části práce bude seznámit čtenáře s možnou technickou a zdravotní problematikou spojenou se zavedením umělého osvětlení a způsoby měření závažnosti flickru. Dále zde bude popsán princip předřadníků, jejich rozdělení podle konstrukce a funkce a způsob zhodnocení jejich účinnosti.

V rámci praktické části byl poskytnut model konkrétního 9 W LED svítidla značky Tesla a několik sad dat Gain Factoru naměřených na dalších lampách. Gain Factor zatím můžeme chápat jako způsob vyjádření velikosti výkyvů v osvětlení. Cílem praktické části bude model zanalyzovat, povážit možnosti zjednodušení a zobecnění modelu a možné alternativy zrealizovat a optimalizovat. Následně budou původní model i všechny použitelné zjednodušené modely upraveny pro verifikaci na poskytnutých datech, aby odpovídaly dalším reálným svídlům. Verifikované modely bude možné využít pro modelování těchto konkrétních žárovek v rámci algoritmu flickrmetru, případně mohou být využity ve vývoji pokročilejších předřadníků.

2 Teoretická část

2.1 Vysvětlení pojmu flickr

Flickr je v [1] definován jako vnímání nestálosti osvětlení v závislosti na čase pro statického pozorovatele ve statickém okolí. Podle této technické poznámky flickr spadá pod produkty časové modulace světla, tzv. *temporal light artefacts*. Mezi další *temporal light artefacts* patří také světelné fenomény vnímané pohyblivým pozorovatelem nebo na pohyblivém pozorovaném objektu. Tyto fenomény jsou známé jako stroboskopický jev a fantomový jev, dále popsané v podkapitole 2.2.3.

Zjednodušeně je flickr rychlou a opakovanou změnou v intenzitě jasu světla. Jedná se o problém standardně spojený s umělým osvětlením. V LED svítidle je tento jev způsoben oscilací vstupního napětí, způsobující průchod nestálého množství proudu skrz LED.

Flickr lze rozlišit na viditelný a neviditelný, popřípadě postřehnutelný a nepostřehnutelný. Viditelný lze jasně a vědomě rozeznat lidským okem. Změny v rozsahu 1 - 35 Hz jsou významné[2], rozeznatelné jsou ale až po 70 Hz.[3] Vyšší frekvence by neměly být rozeznatelné a spadají pod neviditelný flickr, avšak dlouhodobé vystavení i neviditelnému flickru o nižších frekvencích (až po 165 Hz) může mít na člověka negativní vliv.[3]

Frekvence pravidelného blikání lampy je dvojnásobnou vůči frekvenci harmonické složky vstupního napětí. Jelikož střídavé napětí ze sítě operuje na frekvenci 50 Hz, popřípadě 60 Hz v Severní Americe, flickr utvářený lampou o dané frekvenci standardně spadá pod neviditelný a nerozeznatelný. Nižší frekvence blikání však může být zapříčiněna interharmonickými vlivy v síti, jako napěťové poklesy a přepětí, případně i jako následek poklesu životnosti lampy. Zde vzniká nutnost úpravy frekvence napětí na lampě, zpravidla užitím předřadníku.

2.1.1 Měření flickru

Zařízení měřící flickr se nazývá flickrmetr. Flickrmetr zachycuje výkyvy v intenzitě osvětlení snímaného okolí. V závislosti na realizaci flickrmetru jsou tyto změny zachyceny v podobě elektrického signálu, který je následně zesílen, vyfiltrován a vyčíslen. Výsledný flickr se uvádí primárně v mírách závažnosti flickru značených P_{st} , kde index 'st' znamená *short – time*, tedy krátkodobou závažnost. Flickrmetr může být realizován jako světelný nebo jako napěťový. Rozdíl spočívá ve způsobu získávání signálu a také ve složitosti měření. Napěťový flickrmetr je v [4] popsán jako standardizovaný, světelný tedy můžeme považovat za jeho zjednodušení.

Napěťový flickrmetr je popsán v normě IEC 61000-4-15.[4] Je připojen do obvodu svítidla a jeho vstupem je hodnota výstupního napětí na lampě. Systém sestává z pěti funkčních bloků. První blok obsahuje adaptér vstupního napětí, který naškáluje vstup na konkrétní referenční úroveň. Druhý blok převádí průběh napětí na průběh okamžitého výkonu teoretické 60 W žárovky. Třetí blok obsahuje filtry horní a dolní propusti pro eliminaci rušení a vážicí filtr simulující frekvenční odezvu lidského oka na fluktuace v osvětlení tvořené teoretickou žárovkou. Čtvrtý blok obsahuje signál umocňující obvod a dolní propust, dohromady modelující lidské vnímání flickru. Výstupem čtvrtého bloku je okamžitá závažnost flickru P_{inst} . Pátý blok zachycuje předchozí výstupy minulých bloků s určitou frekvencí a provádí statistickou analýzu pro výpočet krátkodobé závažnosti flickru P_{st} .

Světelný flickrmetr je popsán v IEC TR 61547-1.[5] Jeho vstupem je světelný tok z měřeného svítidla. Systém sestává ze čtyř funkčních bloků. Světelný tok na vstupu je zachycen s pomocí fotodiody jako elektrický signál a dále zesílen. První blok normalizuje signál přiváděný z fotodiody. Napětí na diodě je seškálováno vydělením jeho střední hodnotou. To zajišťuje nezávislost snímání flickru na amplitudě míry osvětlení. Následující tři funkční bloky nebude třeba do detailu popisovat, jsou totiž obdobné vůči třetímu až pátému funkčnímu bloku napěťového flickrmetru.

2.2 Problematika ze zdravotního hlediska

Zavádění umělého osvětlení do prostor jako jsou kanceláře, průmyslové haly nebo domácí prostředí má sice své ekonomické i produktivní výhody, přináší s sebou ale mnoho veřejnosti méně známých zdravotních rizik.

Zdravotní potíže způsobené flickrem lze rozdělit na dvě kategorie: problémy s okamžitou působností a problémy vyvolané dlouhodobým vystavením blikajícím

osvětlení. Další instance zhoršeného vidění mohou nastat v případě sledování pohybujícího se objektu, nebo v prostředí s pohybujícím se zdrojem světla.[6] Mezi tyto jevy patří například stroboskopický efekt nebo tzv. phantom array. Tyto jevy spolu s flikrem také patří mezi *temporal light artefacts*.

První kategorie je zapříčiněna viditelným flikrem, zpravidla o frekvenci v rozsahu zhruba do 30 až 70 Hz.[3] Spadají do ní zdravotní potíže jako špatné rozeznávání statických nebo pohybujících se objektů, bolest očí, bolest hlavy, nevolnost nebo epileptické záchvaty. Druhá kategorie je způsobena osvětlením blikajícím nižšími frekvencemi, které se ale nacházejí mimo viditelný rozsah.

2.2.1 Potíže s okamžitou působností

Fotosenzitivní epilepsie - V roce 2017 byl zhruba 1 člověk mezi čtyřmi tisíci diagnostikován nějakou formou fotosenzitivní epilepsie.[7] I krátkodobé vystavení rychle blikajícímu osvětlení může postiženým jedincům způsobit záchvat projevující se neovladatelnými pohyby a/nebo ztrátou vědomí. Prvotní výskyt bývá krátce před, během a krátce po pubertě, to zahrnuje věkové skupiny 7 až 20 let. V této věkové skupině jsou důsledky epilepsie znatelné mnohem více než na starších jedincích, zhruba u $\frac{3}{4}$ jedinců se postižení přenáší do dospělosti.[3]

2.2.2 Dlouhodobé potíže

Bylo dokázáno (viz [6]), že flikr nad hranici pozorovatelnosti může při dlouhodobém vystavení způsobovat migrény jedincům, kteří jimi nikdy netrpěli. Naproti tomu lidé s předchozími pravidelnými bolestmi hlavy si všimli až zdvojnásobení jejich výskytu.

2.2.3 Stroboskopický jev a phantom array

Takzvaný stroboskopický jev vzniká při interakci pohybujícího se objektu s blikajícím osvětlením. Pravidelně rotující objekt se může jevit pomalejší, v případě vyrovnání frekvencí rotace a flikru se může dokonce zdát, že se objekt nepohybuje vůbec. Pro pracovníky zacházející s vysokovýkonovými obráběcími stroji jako jsou frézy nebo soustruhy může být tato optická iluze extrémně nebezpečná.

Phantom array je přízvisko pro jev vyskytující se při pozorování zdroje blikajícího světla pohybujícího se s určitou relativní rychlostí vůči pozorovateli. Relativní rychlost je v tomto případě vztažena i na pohyby samotného oka. Phantom array

může v dostatečných rychlostech být patrný i při velkých frekvencích flikru, a to při 200 až 500 Hz. Obraz LED se promítne v jeden okamžik do několika míst na sítnici, což se pozorovateli jeví jako kdyby pohybující se světlo za sebou zanechávalo stopu. Tento jev může být nebezpečný na vozovce, kde řidič může nesprávně odhadnout reálnou polohu okolních vozů, a to obzvláště ve tmě, kdy lze okolní vozy rozeznat primárně díky jejich rozsvíceným světlům.[6]

2.3 Způsoby eliminace flikru

Vhodným způsobem vyhlazování výstupního světelného toku je užití elektronického předřadníku. Předřadník je zařízení zapojené na vstupu LED nebo fluorescenčních lamp. V případě LED, funkcí elektronických předřadníků je usměrnění vstupního napětí, snížení výstupního napětí, vyhlazení proudu na výstupu a případné dodatečné funkce ne přímo spjaté s flikrem, jako například filtrace vnějších elektromagnetických vlivů nebo možnost tlumení intenzity světla.

2.4 Měření citlivosti předřadníku na vnější rušení

2.4.1 Gain Factor

Výpočetní metodou určení citlivosti svítidla na výkyvy napětí je určení Gain Factoru z vstupního napětí a výstupního světelného toku. Zdroj [8] definuje GF jako poměr relativní změny výstupního světelného toku Φ a relativní změny vstupního napětí U .

Pro přiblížení závislosti v následujících měření bude nejlepší charakterizovat Gain Factoru jako funkce interharmonické frekvence podle [9], [10] a [2]. Tato definice zdůrazňuje závislost na interharmonické složce napětí. GF_{Φ} pro danou interharmonickou napětovou složku je vyjádřen jako:

$$GF(f_{ih}) = \frac{\Phi(f_{vis})}{\frac{\bar{\Phi}}{U(f_{ih})}}, \quad (2.1)$$

Kde: Φ značí světelný tok, $\bar{\Phi}$ jeho střední hodnotu, $U(f_{ih})$ značí hodnotu vstupního napětí, \bar{U} hodnotu základní složky U , n přirozená čísla, f_{ih} danou interharmonickou frekvenci, f_{vis} viditelný produkt modulačního světelného toku pro n -tou interharmonickou rodinu v rozsahu 1 až 50 Hz $f_{vis} = |nf_1 - f_{ih}|$, kde f_1 je první harmonická funkce 50 Hz.

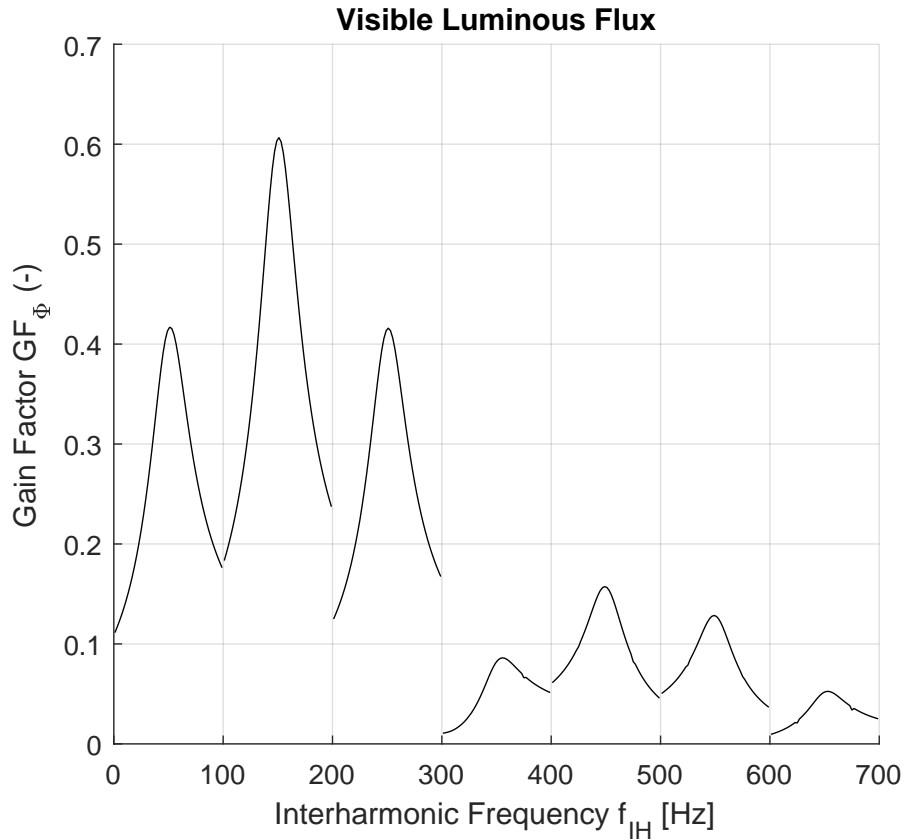


Figure 2.1: Ukázkový průběh GF v závislosti na interharmonické frekvenci

Na grafu výše je vidět, že Gain Factor utváří pravidelné skupiny podobného chování. Tyto skupiny se nazývají interharmonické frekvenční rodiny. Je-li n přirozené číslo, pak intervaly ohraničené n -tými násobky f_1 , tedy v rozsahu $2 \cdot (n - 1) \cdot f_1; 2 \cdot n \cdot f_1$, označujeme jako n -té interharmonické frekvenční rodiny. Gain Factor ve většině případů dosahuje lokálního maxima uprostřed jednotlivých interharmonických rodin, tedy v lichých násobcích n .

Jak vidíme, průběh funkce mezi jednotlivými interharmonickými rodinami je obdobný - v případě lichých rodin je lokální minimum na začátku intervalu, funkce je rostoucí až po dosažení maxima v lichém násobku f_1 . V případě sudých rodin funkce dosahuje maximální hodnoty na začátku a klesá až do dalšího sudého násobku f_1 . Při přechodu mezi interharmonickými rodinami je GF v lichých násobcích f_1 spojitý, v sudých násobcích většinou nespojitý.

Toto chování lze vyčíst z definice pro f_{vis} , která dosahuje minimální hodnoty 0 Hz v sudých násobcích f_1 a maximální hodnoty 50 Hz v násobcích lichých.

Hodnota Gain Factor je citlivosti předřadníku úměrná a tudíž z ní lze vyjádřit

přenosovou funkci pro výskyt flikru. Aby GF byl danou přenosovou funkcí, musí platit určitá úroveň linearity mezi výkyvy vstupního napětí a výstupního světelného toku. V opačném případě je GF platný pouze pro měřenou hodnotu interharmonické složky.[11]

2.5 Kategorizace předřadníků

Zdrojový článek [8] užívá dvou indexů pro zhodnocení kvality návrhu předřadníku z ekonomického i zdravotního hlediska – index účinníku (PFI – Power Factor Index) pro zohlednění spotřeby a index světelného toku (LFI - Luminous Flux Index) pro zohlednění jevu flikru. Pro optimalizaci daných indexů článek dělí předřadníky mezi 8 topologických kategorií.

2.5.1 Kategorizace dle topologie

Kategorie I

Kategorie I neobsahuje aktivní složky regulace. Pasivní regulace je zajišťována kondenzátorem připojeným paralelně k matici LE diod. Kondenzátor vhodně zvolené kapacity snižuje vliv periodického kolísání napětí, předřadníku však chybí nástroj pro dynamickou regulaci nepravidelných odchylek.[8]

Kategorie II – VI

Kategorie II až VI obsahují jednostupňovou aktivní regulaci prováděnou regulátorem pro konstantní proud (CCR – Constant Current Regulator), spínaným zdrojem (SMPS – Switch Mode Power Supply), nebo spínaným zdrojem spojeným s aktivní korekcí účinníku (aPFC - active Power Factor Correction). Řízení konstantního proudu maticí LE diod nebo spínaný zdroj zde zajišťují snížení efektu flikru, aktivní korekce účinníku zvyšuje účinnost spotřebiče. Kategorie II obsahuje pouze zpětno-vazební CCR.

Kategorie III a IV lze obě charakterizovat přítomností SMPS s kondenzátory na vstupu i výstupu. Typ IV se odlišuje přítomností zpětné vazby do bloku SMPS. Topologie se SMPS a aPFC přítomnými v jednom stupni nedokáží plně uplatnit korekci účinníku i stálosti výstupního proudu tekoucího do LED lampy, provedení tedy obvykle upřednostní jeden z těchto prostředků před druhým.

Toto platí pro kategorie V a VI, které lze označit jako zaměřené na korekci účinníku (typ V) a na řízení výstupu (typ VI). Topologický rozdíl je v přítomnosti

dopředné vazby v případě typu V a zpětné vazby v případě typu VI, směřujících do řídicího bloku.[8]

Kategorie VII a VIII

Kategorie VII a VIII nabízí postupnou regulaci aktivní korekcí účinníku a spínaným zdrojem rozdělených do dvou stupňů, kdy probíhá korekce účinníku, na kterou je poté navázána regulace stálosti výstupu. Kondenzátory jsou umístěny na výstupech obou segmentů. Do bloku aPFC vstupuje dopředná i zpětná vazba v obou kategoriích, v případě typu VIII je zpětná vazba přítomna i u bloku SMPS.[8]

2.5.2 Bližší specifikace použité kategorie

Model, na kterém probíhalo měření, spadá do třídy V, charakterizované spojením stupňů aktivní korekce účinníku a spínaného zdroje s důrazem na řízení korekce účinníku. Cílem hlavně potlačení harmonického zkreslení proudu protékajícího lampou.

3 Praktická část

3.1 Seznámení s použitým modelem

Model použitý k měření byl sestaven prof. Ing. Jiřím Drápelou, Ph.D působícím v Ústavu elektroenergetiky na Vysokém učení technickém v Brně. Model představuje předřadník kategorie V s parametry počátečně nastavenými tak, aby vyhovovaly hodnotám Gain Factoru naměřeným na devítiwattové LED žárovce značky Tesla.

3.1.1 Obecný popis modelu

Model zastupuje topologickou kategorii V. Na rozdíl od kategorizace zmíněné v kapitole 2.5.1 model obsahuje napěťovou zpětnou vazbu napětí na spotřebiči. Zpětná vazba je v modelu přítomna k výpočtu dílčích veličin jako střídny d a spínací frekvence f_{sw} pro funkci SMPS, místo k řízení výstupního napětí.

Model byl vytvořen v prostředí Matlab Simulink a je realizován primárně užitím komponentů z balíčku Simscape Electrical. Pasivní součástky jsou zastoupeny volitelnými bloky typu *Series RLC Branch*, převody elektrických veličin na signály jsou provedeny bloky *Voltage Measurement* a *Current Measurement*. Veškeré simulace byly prováděny v režimu *Continuous*, s využitím solveru ode23tb(stiff/TR-BDF2) v režimu *Accelerator*.

V této kapitole bude proveden podrobný rozbor modelu, jelikož většina jeho komponent a procesů budou využity při tvorbě dalších, zjednodušených modelů.

3.1.2 Rozdělení modelu

Model předřadníku lze rozdělit do 3 segmentů:

1. AC část - Obsahuje zdroj AC napětí a pasivní součástky modelující impedanci sítě a EMI filtr. Část je zakončena usměrňovačem. Pasivní elektrotechnické komponenty nemají na výsledný světelný tok žádný nebo minimální vliv.

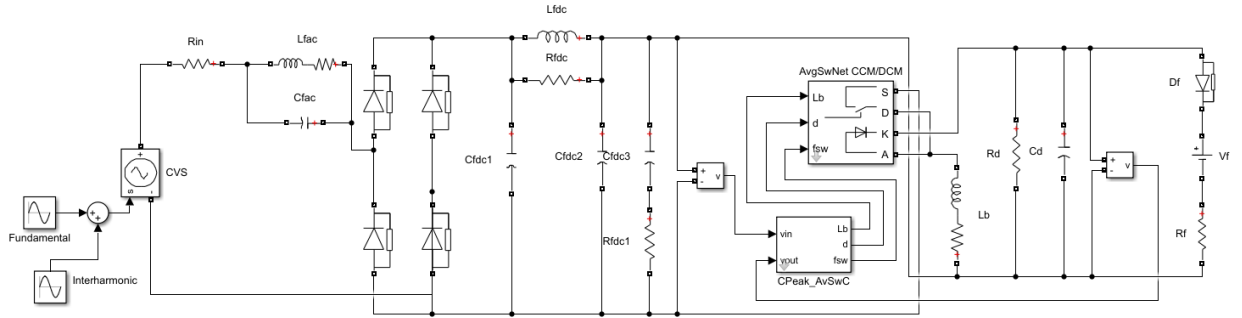


Figure 3.1: Původní verze modelu

2. DC část – Obsahuje pasivní elektrotechnické komponenty pro vyhlazování napětí a proudu vystupujících z usměrňovače a dále funkční bloky s rolí aPFC a SMPS. Pasivní součástky pro vyhlazování signálu mají znatelný vliv na výstupní světelný tok.
3. Výstupní část – Větev se součástkami s indexem f představuje v modelu zástupce samotného svítidla, které je realizováno jako LED matice s odpovídajícími vlastnostmi. Se svítidlem paralelně zapojený kondenzátor C_d dále upravuje frekvenci napětí vystupujícího z funkčního bloku uzavírajícího část 2. Z pasivních součástek přítomných v obvodu má na výstupní světelný tok nejvýraznější vliv.

AC část

AC část modelu představuje zdroj napětí dodávaného ze sítě 230 V 100 Hz, EMI filtr, rezistor reprezentující vnitřní odpor zdroje a diodový usměrňovací můstek pro přeměnu AC vstupu na DC výstup.

Zdroj je tvořen blokem CVS – řízeným napětovým zdrojem (Controlled Voltage Source), do kterého je přiváděn součet signálů "Fundamental" 230 V o frekvenci $f_1 = 50$ Hz a "Interharmonic" $0,01 \cdot 230$ V o proměnné interharmonické frekvenci f_{ih} . Toto uskupení představuje kombinaci harmonického vstupního napětí a 1% meziharmonických výkyvů, na kterých závisí výsledný výpočet Gain Factoru. Rezistor R_{in} zastupuje vnitřní odpor zdroje.

Vstupní část je tvořena paralelně zapojeným kondenzátorem C_{fac} s kapacitou 1 nF a cívkou L_{fac} s indukčností 2 mH. C_{fac} podle měření nemá na výsledný světelný tok žádný vliv, L_{fac} má vliv minimální. Článek modeluje EMI filtr a zároveň vlastní

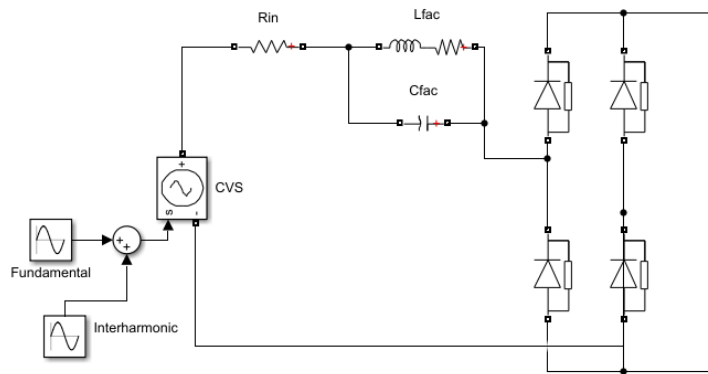


Figure 3.2: Zastoupení vstupního AC segmentu v modelu

impedanci sítě.

AC část je zakončena diodovým usměrňovacím můstkem pro přeměnu vstupního AC napětí na DC, se kterým pracuje zbytek modelu.

DC část

Účelem DC části modelu je vyhlazování proudu uváděného na LED lampu. K této funkci slouží π -článek složený ze součástí C_{fdc1} , L_{fdc} , R_{fdc} a C_{fdc2} . Článek je provedený jako dolní propuť a dále přechází do bloků značených jako "Cpeak_AvSwC" a "AvgSwNet CCM/DCM", reprezentujících funkce aPFC a SMPS. Na výstupu funkčního bloku je kondenzátor C_d a rezistor R_d pro výsledné vyhlazení proudu vstupujícího do lampy.

Blok s označením Cpeak_AvSwC simuluje regulaci měniče na teoretickou maximální hodnotu vstupního proudu I_{pkmax} a provádí výpočet střídy d a frekvence spínání f_{sw} pro jednotlivé stavy spínaného zdroje v následujícím bloku a jejich limity saturací period setrvání v jednotlivých stavech.

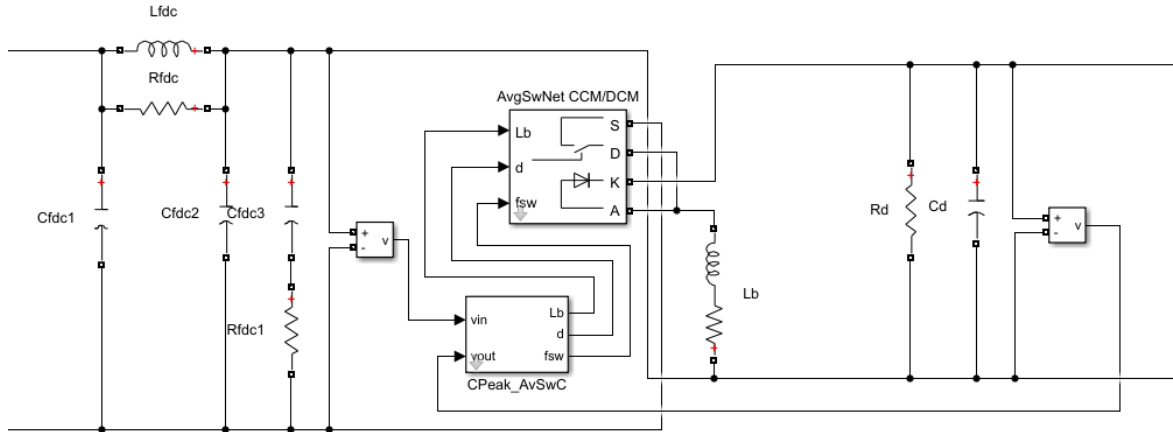


Figure 3.3: Zastoupení DC segmentu v modelu

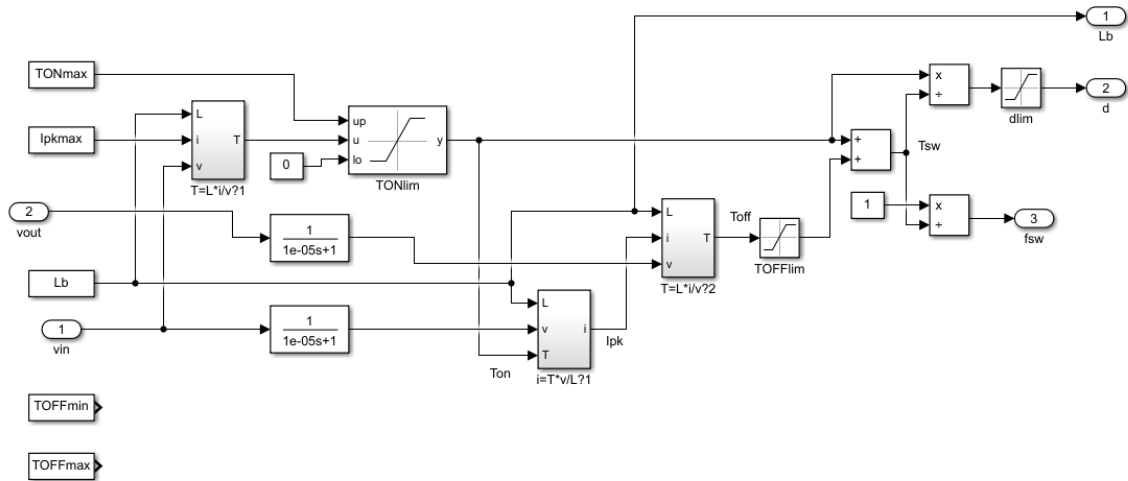


Figure 3.4: Náhled do bloku Cpeak_AvSwC

Blok dostává pevné vstupní parametry I_{pkmax} , L_b , T_{ONmax} , T_{ONmin} , T_{OFFmax} , T_{OFFmin} , představující maximální proud při sepnutí, indukčnost cívky L_b a maximální a minimální hodnoty period setrvání v jednotlivých stavech. Jejich základní hodnoty: $I_{pkmax} = 385 \text{ mA}$, $L_b = 2,6 \text{ mH}$, $T_{ONmax} = 6,2 \mu\text{s}$, $T_{ONmin} = 0$, $T_{OFFmax} = 40 \mu\text{s}$, $T_{OFFmin} = 1,5 \mu\text{s}$.

Z dopředné a zpětné napěťové vazby na vstupu a výstupu bloku jsou přivedeny hodnoty napětí U_{in} a U_{out} . Výpočet period jednotlivých stavů je následující:

$$T_{ON} = \frac{L_b \cdot I_{pkmax}}{U_{in}}, \quad T_{OFF} = \frac{L_b \cdot I_{pkmax}}{U_{out}} \quad (3.1)$$

Vypočtené hodnoty jsou omezeny podle parametrů T_{ONmax} , T_{ONmin} , T_{OFFmax} a T_{OFFmin} . Z omezených hodnot periody jsou dále dopočítány frekvence f_{sw} a střída d :

$$f_{sw} = \frac{1}{T_{ON} + T_{OFF}}, \quad d = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \quad (3.2)$$

Střída je dále omezena hranicemi 0,0001 a 0,9999, aby dosahovala pouze smysluplných hodnot. Výsledné hodnoty frekvence a střídý jsou spolu s neměnnou indukčností L_b uváděny na vstup následujícího bloku.

Blok značený AvgSwNet CCM/DCM obsahuje náhradu spínaného zdroje, jehož frekvence spínání je odvozena ze střídý a frekvence f_{sw} vypočtených v minulém bloku.

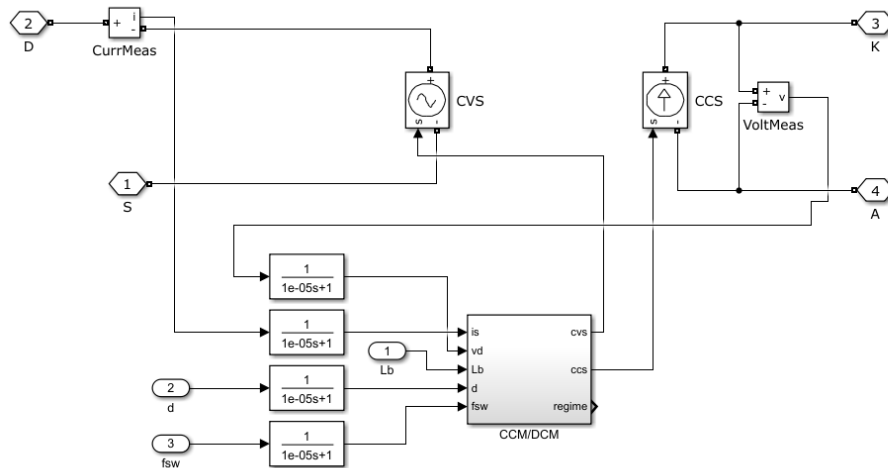


Figure 3.5: Vnitřní struktura bloku AvgSwNet CCM/DCM

Spínaný zdroj, který by v praxi byl realizován unipolárním N-kanálovým tranzistorem, má v modelu zastoupení řízeným zdrojem napětí a proudu. Tato náhrada je provedena na základě "Switch-averaging principle", tedy principu odhadnutí spínání, popsaného v [12]. Tento princip zjednodušuje výpočty v systému využitím průměrných hodnot všech zúčastněných veličin, místo toho aby byla simulována reálná spínací frekvence, která by kvůli své vysoké hodnotě způsobovala nadměrnou složitost výpočtů.

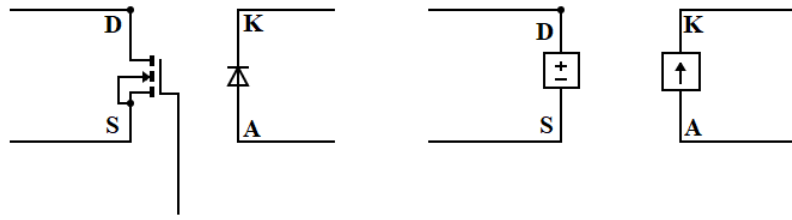


Figure 3.6: Nahrazení tranzistoru řízenými zdroji

Jak je vidět na obrázku 3.6, tranzistor je nahrazen řízeným zdrojem napětí a dioda řízeným zdrojem proudu. Ty jsou řízeny signály C_{VS} a C_{CS} , které jsou výstupem bloku CCM/DCM. Jeho vstupem jsou dříve vypočítaná frekvence spínání f_{sw} , střída d , indukčnost $L_b = 2,6 \text{ H}$, napětí na imaginární diodě U_d naměřené mezi porty K a A a proud imaginárním tranzistorem I_s naměřený mezi porty D a S.

Signály pro spínané zdroje jsou z daných hodnot spočítány následovně:

$$C_{VS} = V_d \cdot \frac{1 - d_s}{d_s}, \quad (3.3)$$

$$C_{CS} = I_s \cdot \frac{1 - d_s}{d_s} \quad (3.4)$$

Kde $d_s = d$ v případě, že platí:

$$d \geq \frac{d^2}{\frac{I_s}{V_d} \cdot L_b \cdot f_{sw} \cdot 2 + d^2} \quad (3.5)$$

V opačném případě se d_s rovná výrazu na pravé straně.

Výstupní část

Výstupní část modelu zahrnuje samotnou LED matici a s ní paralelně zapojeným odporem R_d a kondenzátorem C_d . Kondenzátor je součástí základní topologie buck-boost měniče, na které je předřadník založený.

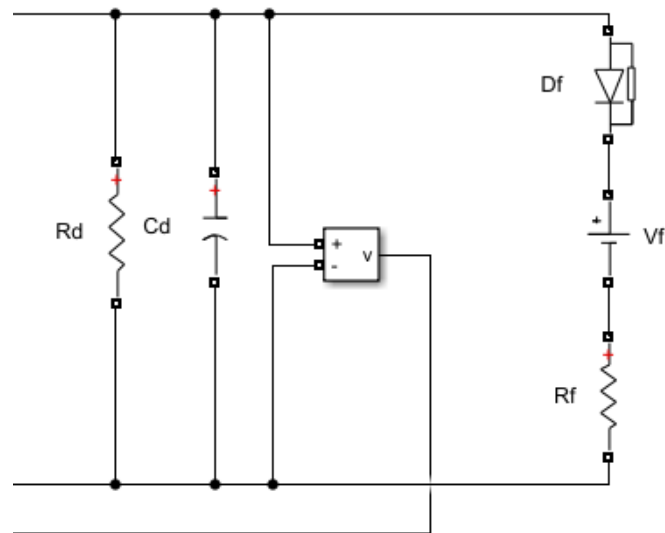


Figure 3.7: Zastoupení výstupního segmentu v modelu

LED matice je v modelu zastoupena v sérii zapojenou diodou D_f , zdrojem DC napětí V_f a rezistorem R_f . Dioda D_f zde pro voltamperovou charakteristiku zařízení modeluje standardní chování diody, rezistor R_f její sklon pro danou barvu světla a zdroj napětí V_f posun průrazného napětí. Zvolené hodnoty jednotlivých parametrů byly: $V_f = 64,9\text{ V}$, $R_f = 41\ \Omega$.

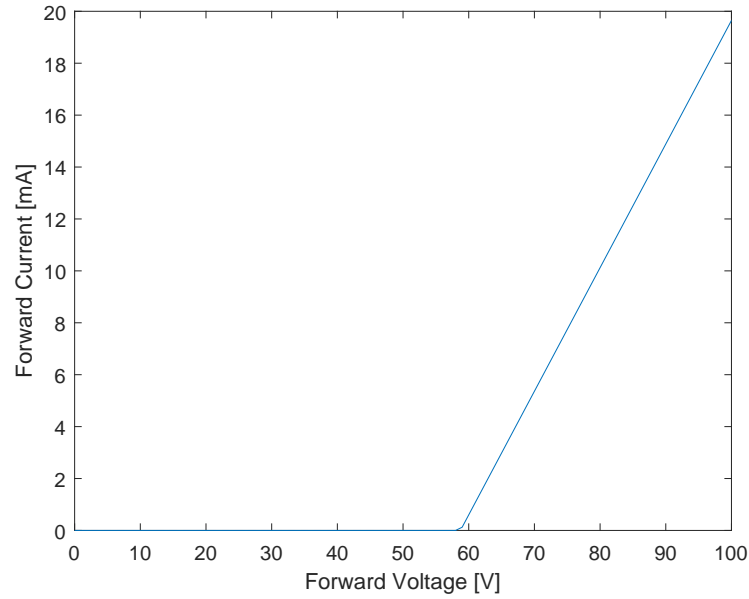


Figure 3.8: VA charakteristika výstupní LED matice

Interpretace výstupních elektrických veličin jako světelného toku

Ze změřeného napětí na výstupní LED U_{dc} a ekvivalentního odporu lampy R_{eq} je spočten okamžitý výkon P_{inst} . Ten je vstupem přenosové funkce druhého řádu, kde figurují veličiny účinnost lampy L a časová konstanta lampy τ_L (tauL ve výňatku z modelu). Přenosová funkce byla přejata z [13].

$$\phi(s) = \frac{L}{\frac{\tau_L}{1000} \cdot s^2 + \tau_L \cdot s + 1} \quad (3.6)$$

Výstup přenosové funkce je umocněn polovinou citlivostní konstanty lampy K a je dán do absolutní hodnoty. Citlivostní konstanta K měla hodnotu 1,41. Výstupem je okamžitý světelný tok označený jako ϕ_{inst} (f_{inst} ve výňatku).

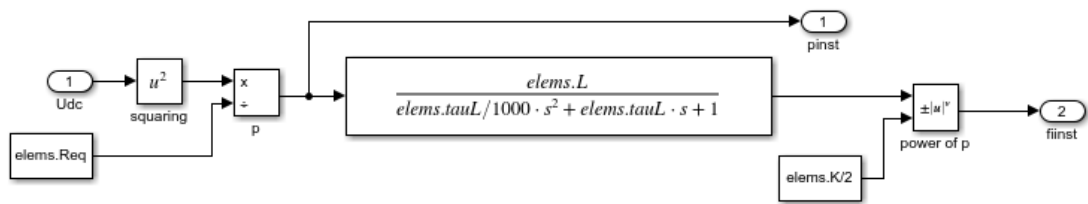


Figure 3.9: Přenosová funkce pro výpočet výstupního světelného toku

3.2 Citlivostní analýza vlivu parametrů na Gain Factor

V následující části práce budou provedeny simulace s výpočtem GF pro různé hodnoty komponentů v předřadníku. Cílem této části je porovnat výsledné hodnoty GF se základními daty, specifikovat vliv těchto součástí na výsledek, určit jejich krajní přijatelné meze a dále na základě měření případně navrhnout provedení změn v konstrukci předřadníku.

Při měření budou zpravidla použity tyto hodnoty: $U = 230 \text{ V}$, $U_{ih} = 0,01 \cdot 230 \text{ V} = 2,28 \text{ V}$, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $f_{ih} = \{1:600\} \text{ Hz}$. Φ je spočítáno s pomocí FFT z výkonu lampy pro její ekvivalentní odpor, v tomto případě $R_{eq} = 4415 \Omega$.

Při měření vlivu jednotlivých součástí bude použita jejich základní hodnota násobena koeficientem Q , který bude zároveň indexem měření zobrazeném po pravé části výstupního grafu. Každému jednomu Q odpovídá GF stejné barvy.

3.2.1 Závislosti na parametrech v AC části

V této části byly pozměněny pouze kondenzátor C_{fac} a cívka L_{fac} . Funkcí těchto součástí na předřadníku je filtrace vnějších elektromagnetických vlivů, které nejsou v modelu ničím reprezentovány. Změna těchto součástí měla na výsledný GF minimální nebo žádný vliv. Původní hodnota kapacity kondenzátoru C_{fac} byla 1 nF. GF byl změřen a porovnán pro hodnoty $C_{fac} = 0,1 \text{ nF}$, $0,2 \text{ nF}$, $0,5 \text{ nF}$, 1 nF , 2 nF , 5 nF , 10 nF , z nichž žádná se nezdála vést k rozdílnému výsledku.

Kondenzátor GF nijak neovlivňuje, vzhledem k jeho hlavní funkci jako součást EMI filtru by však měl být v konstrukci zachován. Původní indukčnost cívky L_{fac} byla 2 mH. GF byl změřen a porovnán pro hodnoty $L_{\text{fac}} = 0,1$ mH, 0,2 mH, 0,4 mH, 2 mH, 10 mH, 20 mH a 40 mH. Grafy GF pro cívku se nachází v příloze A.1.

Vliv cívky je z důvodu jejího umístění minimální. S rostoucí indukčností roste i hodnota GF, toto platí téměř po celém zkoumaném frekvenčním spektru s výjimkou intervalu 300 až 400 Hz. Zde se hodnota GF chová obráceně, tedy klesá s rostoucí indukčností. Zdá se, že k této změně v průběhu dochází v krajních mezích intervalu, tedy $f_{\text{ih}} = 300$ Hz a $f_{\text{ih}} = 400$ Hz. Celkový vliv indukčnosti se prohlubuje s rostoucí interharmonickou frekvencí.

Přestože cívka ovlivňuje GF jen zanedbatelně, měla by vzhledem k její funkci jako součást EMI filtru být v konstrukci zachována. Graf průběhu GF po vyjmutí obou součástí z modelu se nachází v příloze A.3.

3.2.2 Závislosti na parametrech v DC části

DC část předřadníku obsahuje mnohem více komponentů než AC část. Tyto komponenty již mají relevantní vliv na výsledný GF. Simulace proběhnou pro 6 pasivních součástí a také pro mezní hodnoty periody spínání v bloku CPeak_AvSwC.

Původní kapacita kondenzátoru C_{fde1} byla 22 nF. GF byl změřen a porovnán pro hodnoty $C_{\text{fde1}} = 11$ nF, 22 nF, 44 nF, 110 nF, 220 nF.

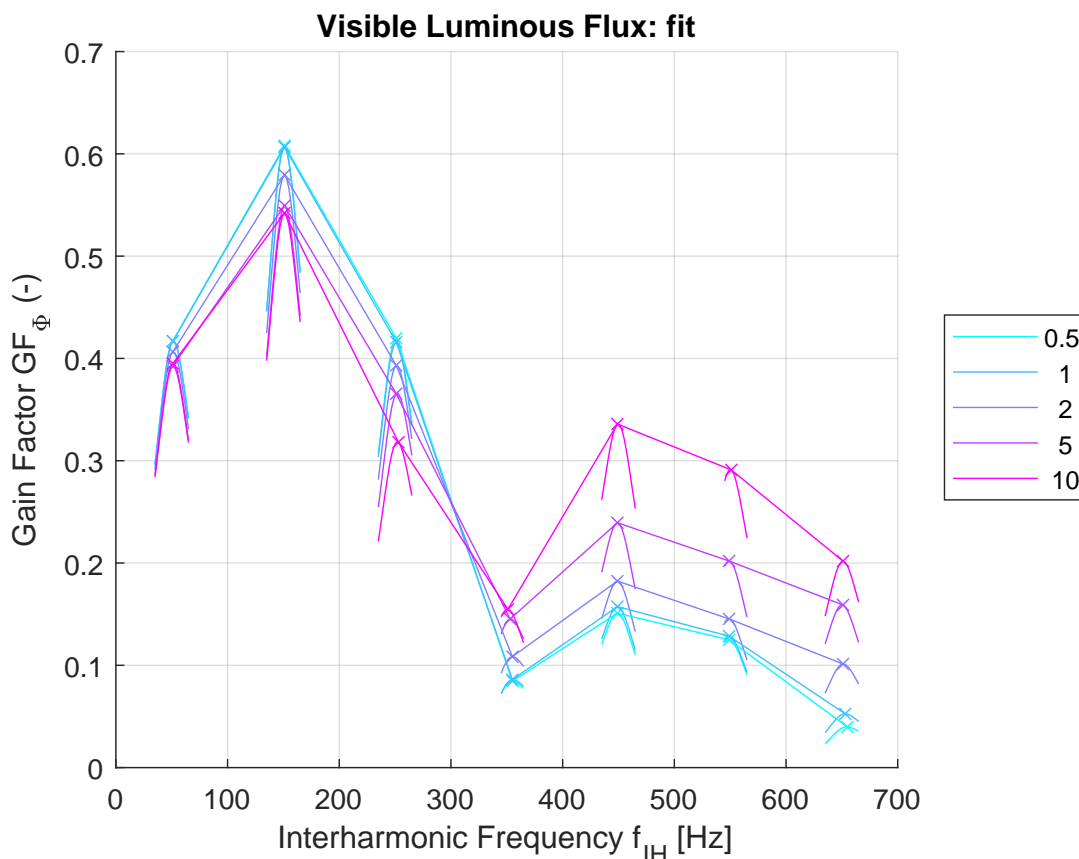


Figure 3.10: Průběhy GF pro změněné hodnoty kondenzátoru C_{fdc1} v závislosti na koeficientu rozšíření. Maximální hodnoty jednotlivých interharmonických rodin byly spojeny pro lepší zřetelnost průběhu GF

Vliv kapacity C_{fdc1} na GF je znatelný. V intervalu $f_{ih} = 1$ až 300 Hz GF roste s klesající kapacitou, ve zbytku rozsahu se chování obrací. Vliv kapacity se prohlubuje s rostoucí interharmonickou frekvencí.

Původní indukčnost cívky L_{fdc} byla 2 mH. GF byl změřen a porovnán pro hodnoty $L_{fdc} = 0,4$ mH, 1 mH, 2 mH, 4 mH, 10 mH, 20 mH, 30 mH. Vliv indukčnosti L_{fdc} na výsledný GF je vzhledem k umístění cívky nízký, po bližším průzkumu zjistíme, že je identický s vlivem cívky L_{fac} . To znamená rostoucí GF s rostoucí indukčností ve všech intervalech kromě intervalu $f_{ih} = 300$ až 400 Hz, kde GF s rostoucí indukčností klesá. Grafy GF pro cívku se nachází v příloze v sekci A.2.

Původní kapacita kondenzátoru C_{fdc2} byla 110 nF. GF byl změřen a porovnán pro hodnoty $C_{fdc2} = 22$ nF, 55 nF, 110 nF, 220 nF, 550 nF, 880 nF, 1,1 μ F. Snížení kapacity nemá tak razantní vliv jako její zvýšení, to ale způsobuje silně nepravidelný nárůst úrovně GF ve všech interharmonických rodinách mimo druhou - tedy v inte-

rvalu 100 až 200 Hz - a zvýšení úrovně v rodinách ostatních. Zvýšení kapacity kapacity C_{fdc2} má tedy obecně za následek převrácení vzájemného vertikálního postavení jednotlivých interharmonických rodin a nejvíce nepravidelné a těžko odhadnutelné chování výsledného GF.

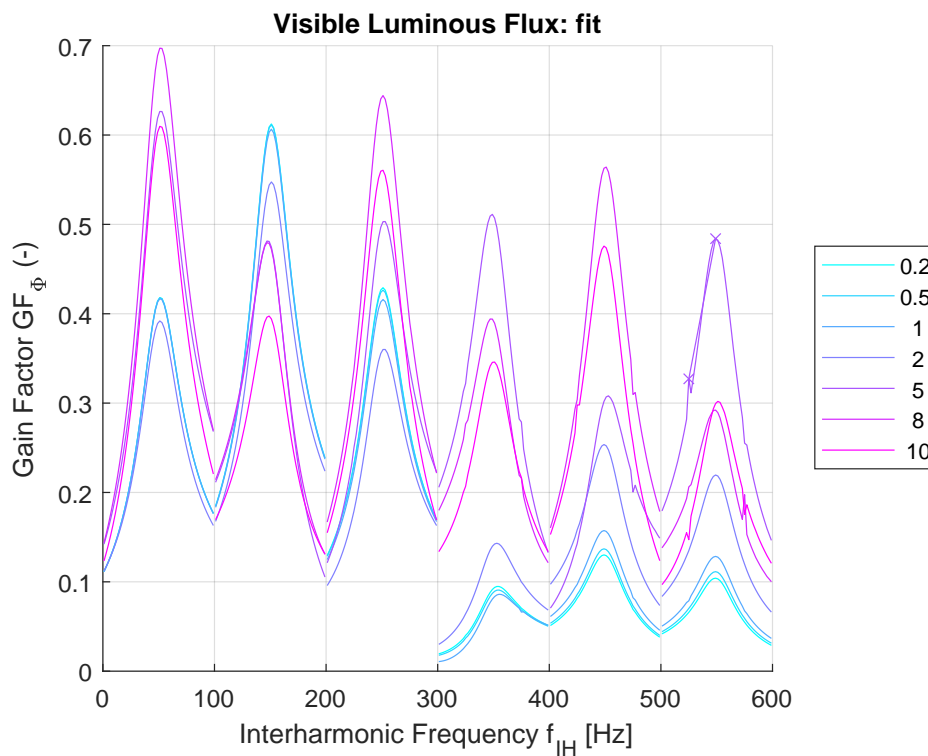


Figure 3.11: Průběhy GF pro změněné hodnoty kondenzátoru C_{fdc2} v závislosti na koeficientu rozšíření

Původní kapacita kondenzátoru C_{fdc3} byla 240 nF. GF byl změřen a porovnán pro hodnoty $C_{fdc3} = 120 \text{ nF}, 240 \text{ nF}, 480 \text{ nF}, 1,2 \mu\text{F}, 1,92 \mu\text{F}$.

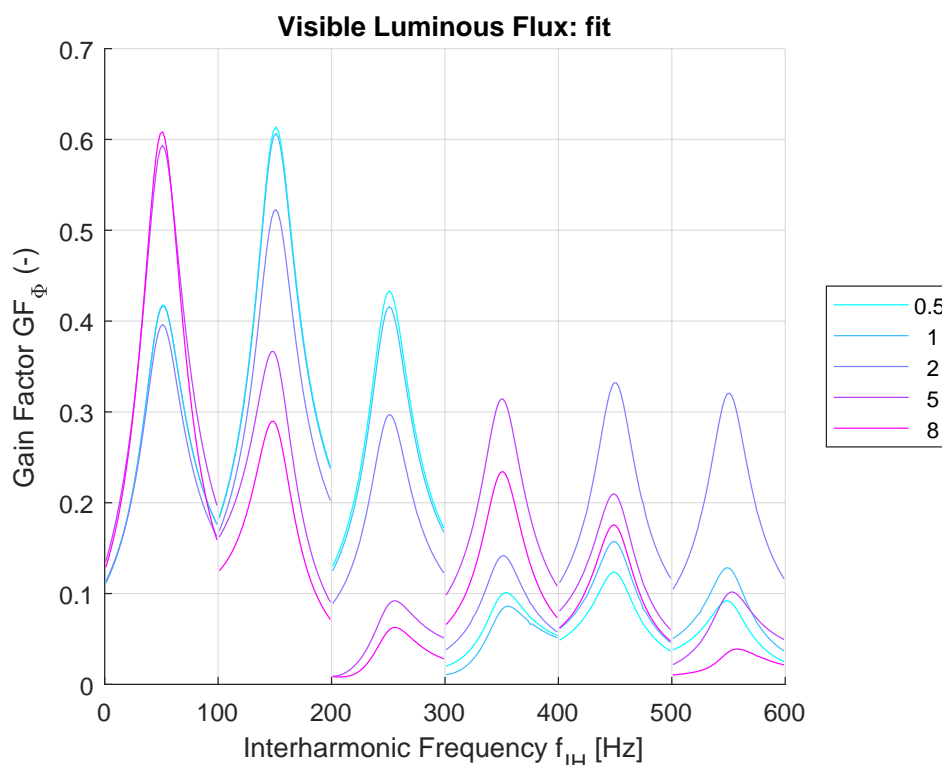


Figure 3.12: Průběhy GF pro změněné hodnoty kondenzátoru C_{fd3} v závislosti na koeficientu rozšíření

Vliv kapacity C_{fd3} na GF je vysoký stabilně ve všech zkoumaných frekvencích. Značné zvýšení hodnoty kapacity způsobuje silný nárůst GF v pásmu 0 až 100 Hz a ještě silnější pokles v následujících dvou pásmech, tedy 100 až 200 Hz a 200 až 300 Hz. V pásmech 300 až 400 Hz a 400 až 500 Hz GF opět vzroste, tenkrát s menší intenzitou, a dále jeho hodnota znovu klesá. Snížení hodnoty kapacity má v počátečních frekvenčních minimální vliv, od 400 Hz způsobuje mírný nárůst GF oproti původní hodnotě. Zajímavé je zde chování pro $Q = 2$, tedy kapacitu 480 nF, kdy se GF daří udržovat si - s výjimkou poklesu v pásmu 300 až 400 Hz - stabilní hodnotu. To znamená silný nárůst v posledních pásmech, který přesahuje vliv značně kapacit, které se od původní hodnoty vychylují značně více.

Cívka L_b představuje spínací cívku buck-boost měniče, funguje jako součást funkčního bloku SMPS, kde by v realizaci předřadníku byla připojena na bázi tranzistoru představujícího spínaný zdroj. Hodnota indukčnosti cívky se podílí na určení spínací frekvence, jak bylo představeno v kapitole 3.1.2 v podkapitole popisující DC část modelu.

Původní hodnota indukčnosti L_b byla 2,6 mH. GF byl změřen a porovnán pro hodnoty $L_b = 1,3$ mH, 2,6 mH, 5,2 mH, 13 mH.

V prvních dvou interharmonických rodinách způsobuje snížení indukčnosti cívky zvýšení úrovně GF, přičemž zvýšení indukčnosti má opačný efekt. Od třetí rodiny dále nabývá GF nejvyšších hodnot při dvojnásobné indukčnosti a nejnižších při nezměněné indukčnosti.

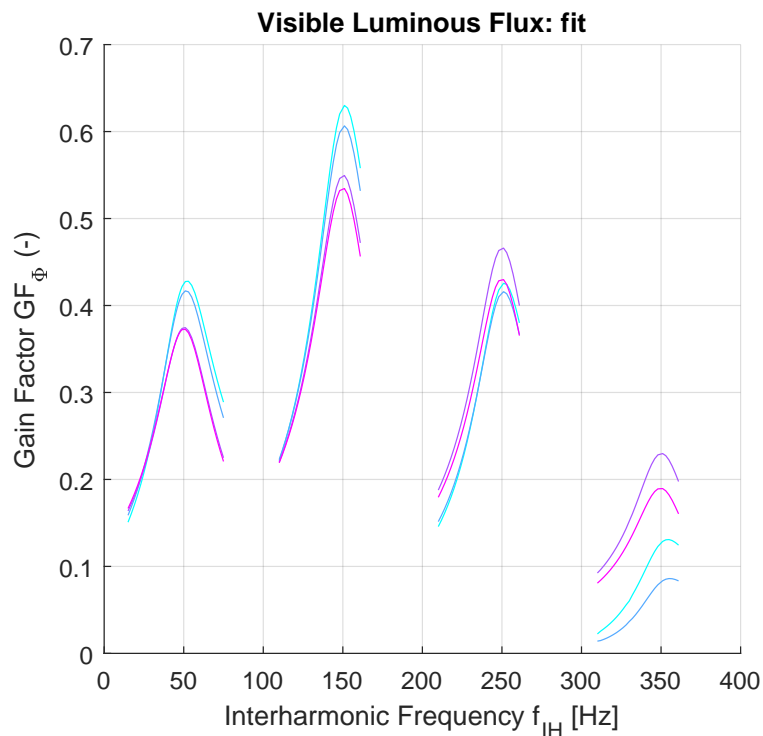


Figure 3.13: Průběhy GF pro změněné hodnoty cívky L_b v závislosti na koeficientu rozšíření

Saturace frekvence spínaného zdroje

Původní hodnota T_{ONmax} byla $6,2 \mu s$. Hodnota ovlivňuje horní hranici periody sepnutí T_{ON} . GF byl změřen a porovnán pro hodnoty $T_{ONmax} = 4,1 \mu s$, $6,2 \mu s$ a $9,3 \mu s$. Snížení hodnoty způsobuje nárůst úrovně GF v první rodině a pokles v následujících, při jejím zvýšení se průběh chová opačně.

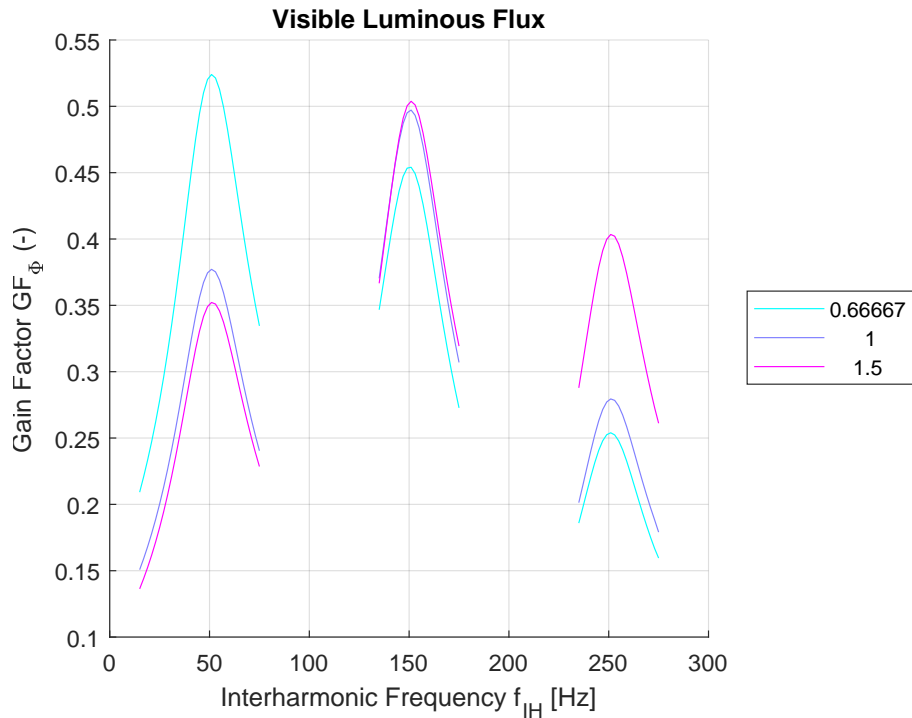


Figure 3.14: Průběhy GF pro změněné hodnoty T_{ONmax} v závislosti na koeficientu rozšíření

Původní hodnota T_{OFFmax} byla $40 \mu s$. Hodnota ovlivňuje horní hranici periody sepnutí T_{OFF} . GF byl změřen a porovnán pro hodnoty $T_{OFFmax} = 8 \mu s$, $10 \mu s$ a $40 \mu s$. Zvyšování hodnoty nemělo na GF vliv. Přílišné snížení hodnoty způsobuje netypický tvar GF, hodnota tedy bude měněna pouze mírně.

Původní hodnota T_{OFFmin} byla $1,5 \mu s$. Hodnota ovlivňuje spodní hranici periody sepnutí T_{OFF} . GF byl změřen a porovnán pro hodnoty $T_{OFFmin} = 0,75 \mu s$, $1,5 \mu s$, $3 \mu s$ a $7,5 \mu s$. Menší změny parametru nejsou na výsledném GF pozorovány, větší změna způsobuje zvýšení úrovně rostoucí s každou další interharmonickou rodinou.

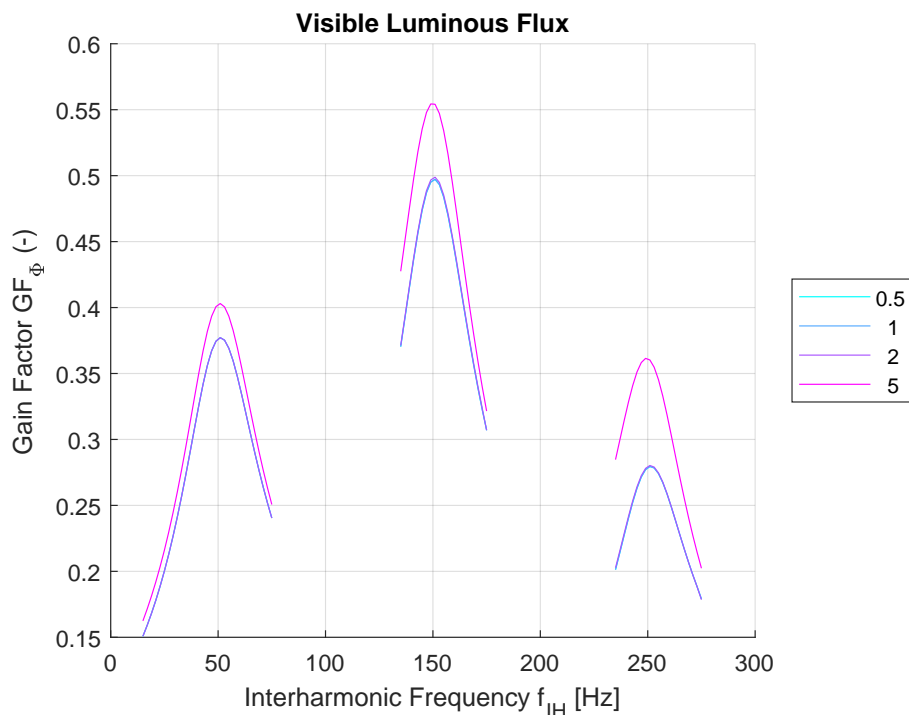


Figure 3.15: Průběhy GF pro změněné hodnoty T_{OFFmin} v závislosti na koeficientu rozšíření

Původní hodnota I_{pkmax} byla 385 mA. GF byl změřen pro hodnoty 77 mA, 192,5 mA, 385 mA, 426 mA. Větší změny hodnoty způsobují posun a rozhození tvaru GF. Snížení hodnoty způsobí pokles úrovně GF ve druhé interharmonické rodině a nárůst v ostatních, úrovně všech rodin se víceméně vyrovnávají. Mírné zvýšení hodnoty I_{pkmax} způsobuje nárůst úrovně GF v prvních dvou rodinách a pokles ve třetí.

Neuvedené grafy GF jsou v přílohách v sekci A.

3.2.3 Závislosti na parametrech ve výstupní části

Spotřební část zahrnuje kondenzátor C_d a paralelní větev ekvivalentní LED lampě. Jelikož měření vyjadřuje citlivost samotného předřadníku, bude provedeno jen pro určení vlivu kondenzátoru.

Původní hodnota kapacity kondenzátoru C_d byla 220 μ F, což je nejvyšší hodnota kapacity na celém předřadníku a to až o tři řády, jelikož C_d představuje výstupní kondenzátor buck-boost měniče. Takto vysoká kapacita a bezprostřední blízkost spotřebiči způsobuje zatím nejznatelnější vliv na světelný tok ze všech měřených součástí.

GF byl změřen pro hodnoty $C_d = 40 \mu\text{F}$, $110 \mu\text{F}$, $220 \mu\text{F}$, $440 \mu\text{F}$ a $1,1 \text{ mF}$.

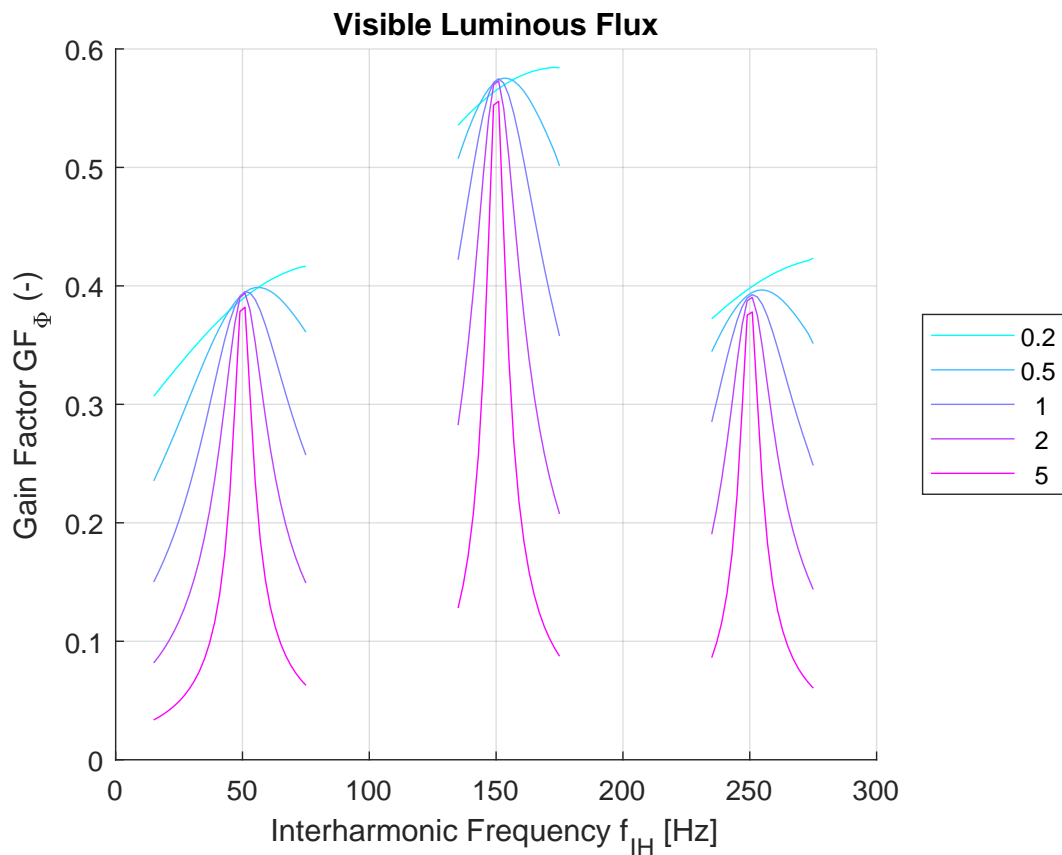


Figure 3.16: Průběhy GF pro změněné hodnoty kondenzátoru C_d v závislosti na koeficientu rozšíření

Změna kapacity C_d ovlivňuje úroveň i šířku GF stabilně napříč všemi rodinami. Snížení kapacity způsobuje zvýšení úrovně GF a zároveň snižuje strmost jeho průběhu, graf se tedy rozšíří. Další efekt snížení kapacity je posun grafu doprava v závislosti na snížení, při hodnotě $C_d = 40 \mu\text{F}$ až o 23 Hz. Zvýšení kapacity analogicky snižuje úroveň GF a způsobuje větší strmost grafu, nezpůsobuje však žádný posun opačným směrem.

3.3 Tvorba zjednodušených obecných modelů

Cílem bylo sestavit zjednodušený model předřadníku typu V, který by byl dost obecný pro možnost adaptace na některou ze sad naměřených dat. Výsledný model musí splňovat následující parametry:

- Funguje pro stejnou úroveň vstupního napětí vůči původnímu modelu
- Stejná úroveň výstupního napětí s minimální odchylkou vůči původnímu modelu
- Obdobná charakteristika chování výstupního GF světelného toku vůči naměřeným datům nebo dostatek modifikovatelných parametrů pro dosažení dané charakteristiky v oblasti alespoň prvních tří rodnin

Původní model pracuje se standardním síťovým napětím 230V/50Hz, výstupní napětí na lampě osciluje mezi hodnotami 68V a 72V (graf průběhu výstupního napětí).

Pro sestavení bylo navrženo několik potenciálních způsobů zapojení a regulace – pokles výstupního napětí oproti vstupnímu lze realizovat zapojením předřadníku jako buck měniče nebo buck-boost měniče s odpovídající pevně nastavenou střídou, nebo aktivně regulovanou střídou. Řízení střídy je realizováno PID regulátorem, nebo případně složitějším regulátorem přejatým z původního modelu.

Pro každou kombinaci typu měniče a způsobu regulace bude sestaven nový model předřadníku a vypočítány nebo případně odhadnuty všechny potřebné parametry. Parametry budou dále během simulací odladěny pro maximální podobnost původním výstupním hodnotám. Po odladění bude provedena citlivostní analýza na dané parametry, vyhodnocena schopnost modelu dosáhnout naměřených dat GF a případně budou parametry modelu nastaveny tak, aby odpovídaly daným naměřeným GF. Výsledkem by v tomto případě byl model předřadníku odpovídajícího chování daného reálného předřadníku, na kterém bylo provedeno měření.

| Architektura měniče/Způsob regulace | Buck měnič | Buck-boost měnič |
|--------------------------------------|------------|------------------|
| Pevně nastavená střída | 3.3.1 | 3.3.4 |
| PID regulátor střídy | 3.3.2 | 3.3.5 |
| Regulátor přejatý z původního modelu | 3.3.3 | 3.3.6 |

Table 3.1: Přehled vytvořených zjednodušených modelů

3.3.1 Model buck s nastavenou střídou

První sestavený model využívá architekturu buck měniče s pevně nastavenou střídou. Zvolené hodnoty byly spočítány s pomocí [14]. Zvolená střída byla spočítána jako:

$$d = \frac{U_{INMAX}}{U_{OUTMAX}} = \frac{72}{325} = 0,22 \quad (3.7)$$

Zvolená hodnota L_b podle [14] jako:

$$L = \frac{U_{IN} \cdot D}{I_L \cdot f_{sw}} = \frac{230 \cdot 0,22}{0,166 \cdot 20000} = 15 \text{ mH} \quad (3.8)$$

Kde za spínací frekvenci f_{sw} byla přejata změřená střední hodnota z původního modelu, tedy 20 kHz. Zvolené hodnoty vstupního a výstupního kondenzátoru C_{dc} a C_b byly odhadnuty jako 35 nF a 1320 μ F. Citlivost lampy K byla zvolena jako 1,41.

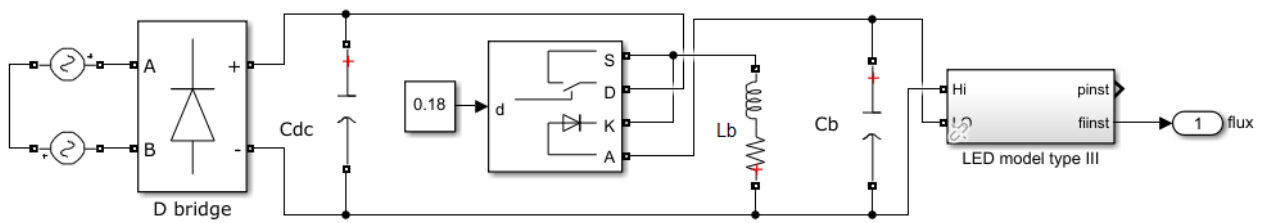


Figure 3.17: Zjednodušený model buck s konstantní střídou

Na modelu byla následně provedena citlivostní analýza na parametry C_b , L_b , C_{dc} , d a K .

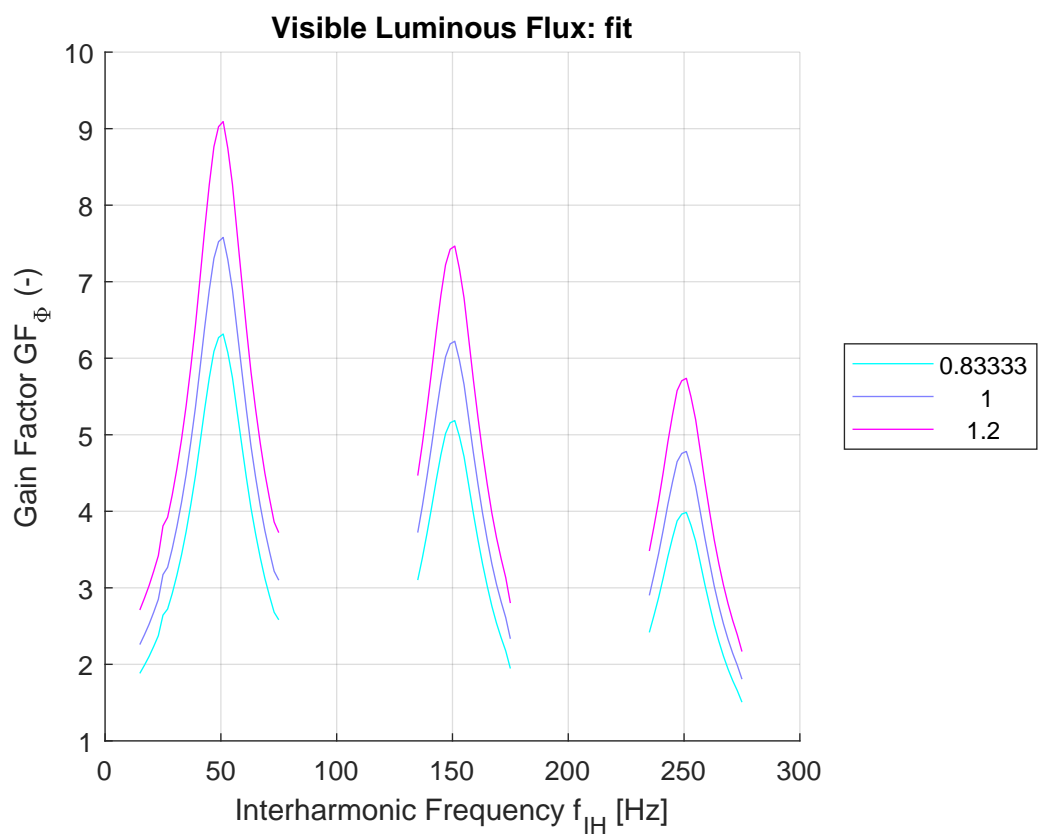


Figure 3.18: Citlivostní analýza modelu buck s konstantní střídou na parametr K v závislosti na koeficientu rozšíření

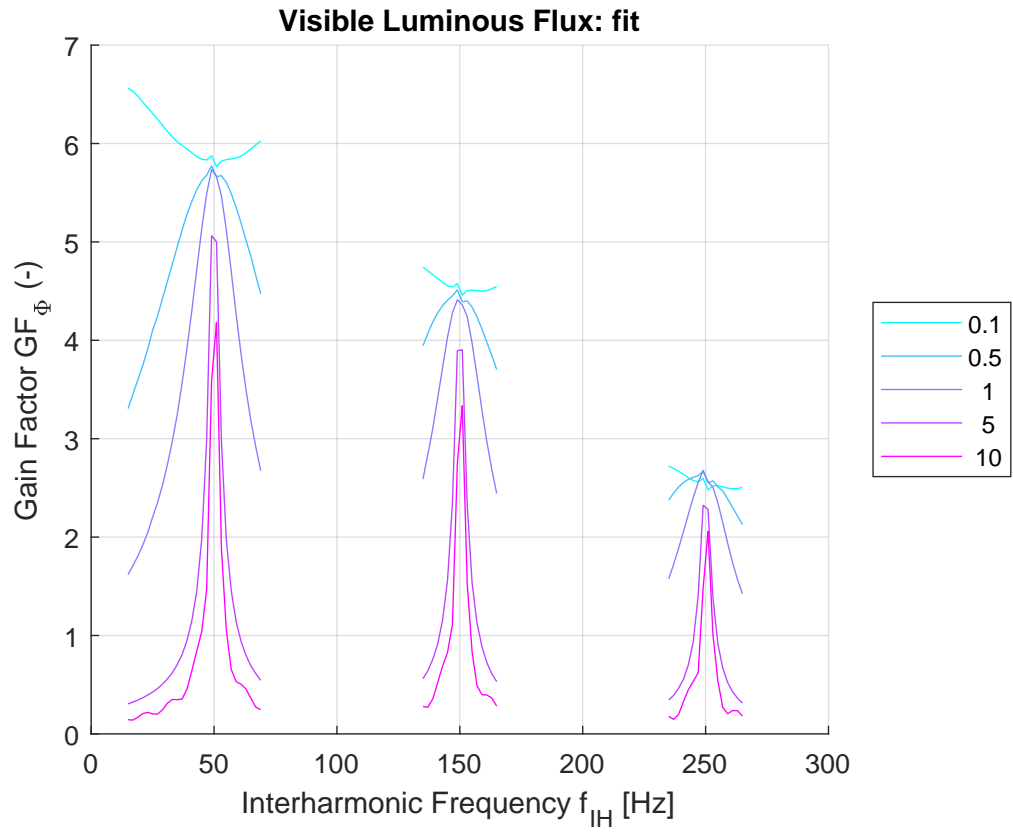


Figure 3.19: Citlivostní analýza modelu buck s konstantní střídou na parametr C_b v závislosti na koeficientu rozšíření

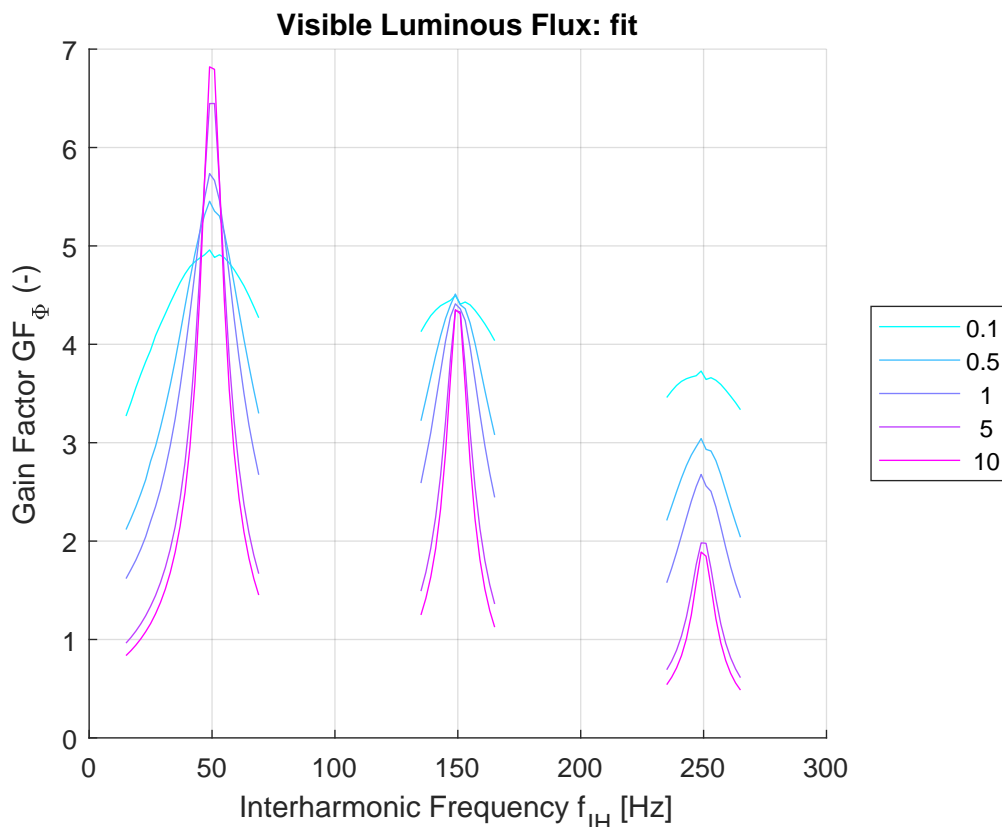


Figure 3.20: Citlivostní analýza modelu buck s konstantní střídou na parametr L_b v závislosti na koeficientu rozšíření

Parametry C_b a K měly stabilní vliv napříč všemi rodinami. Kapacita C_b ovlivnila šířku a strmost jednotlivých rodin, citlivost lampy K očekávatelně ovlivnila jejich vertikální úroveň. Vliv parametru L_b byl zanedbatelný, vliv C_{dc} byl nulový. Žádný z parametrů neovlivnil postavení jednotlivých rodin GF vzájemně vůči sobě tak, aby bylo možné jeho úpravou dosáhnout požadované charakteristiky, kdy druhá rodina nabývá nejvyšších hodnot. Model je tedy příliš zjednodušený.

3.3.2 Model buck s regulovanou střídou

Druhý model využívá architekturu buck měniče stejně jako první, je ale doplněný o dopřednovazební PID regulaci střídy. Regulátor využívá průběh vstupního napětí seškálovaný pro obor hodnot $[0,1]$ jako žádanou hodnotu a vyškálovaný proud tekoucí lampou jako regulační odchylku. Cílem je přiblížit průběh proudu průběhu napětí a potlačit tak čistě kapacitní či čistě induktivní chování systému. Výsledná střída osciluje mezi hodnotami 0,225 a 0,442 bez nutnosti saturace.

Hodnoty C_b , L_b , C_{dc} byly zvoleny stejné jako v předchozím modelu. PID regulátor byl realizován pomocí bloku transfer function v paralelní podobě $P + I/s + Ds$. Jeho hodnoty byly nastaveny jako: $P = 0,182$, $I = 0,00001$, $D = 0,62$.

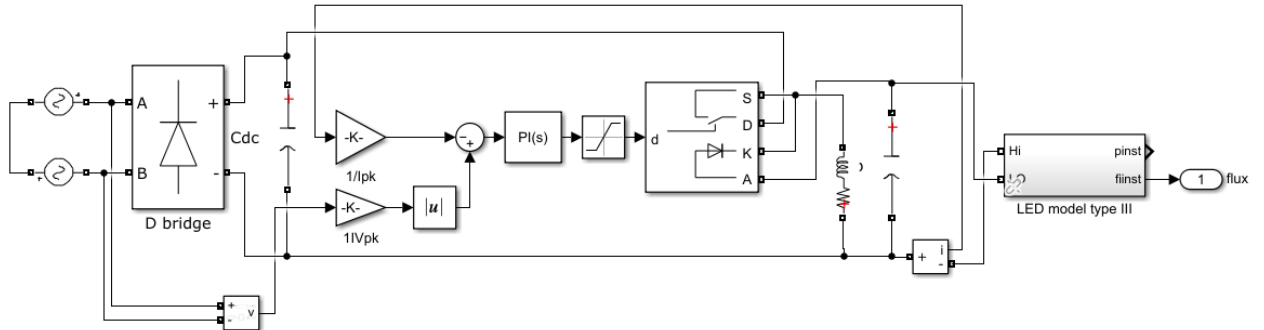


Figure 3.21: Zjednodušený model buck s PI regulací střídá

Následně byla provedena citlivostní analýza GF na parametry C_b , L_b , C_{dc} , K , a všechny tři složky PID regulátoru. Změna kapacity C_b opět ovlivňuje vertikální postavení i šířku GF. Indukčnost L_b má zanedbatelný vliv. Proporcionální složka regulátoru svým zvýšením zúžuje každou lichou rodinu GF a rozšiřuje každou sudou – při snížení se chová opačně. Po několika citlivostních analýzách bylo rozhodnuto o odstranění derivační složky a ponechání čistě PI regulátoru. Vliv derivační složky byl minimální, její odstranění chod modelu nijak neovlivnilo a naopak pomohlo ve zjednodušení modelu, což bylo původním záměrem.

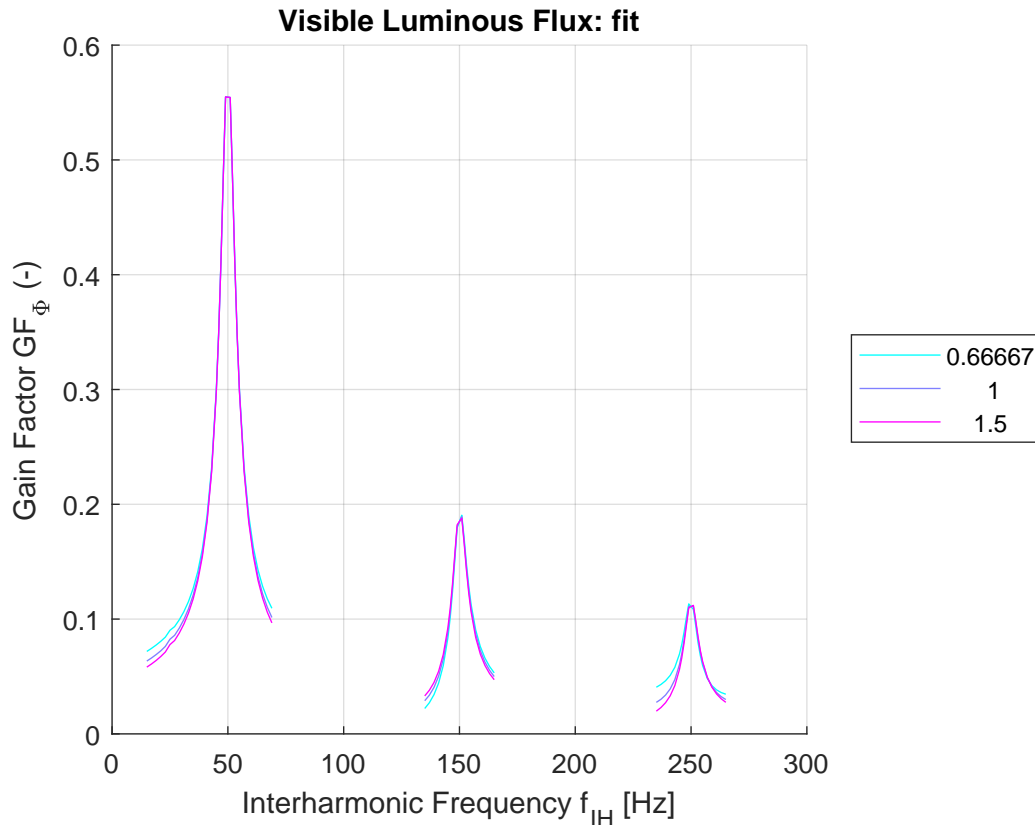


Figure 3.22: Citlivostní analýza modelu buck s PID regulací na parametr P v závislosti na koeficientu rozšíření

Neuvedené grafy GF jsou v přílohách v sekci C.

3.3.3 Model buck s regulací periody sepnutí

Třetí model opět využívá architekturu buck měniče, PID regulátor je zde ale nahrazen regulačním blokem "CPeak_AvSwC" z původního modelu. Tomu je přiváděno usměrněné vstupní napětí jako signál V_{in} a napětí na LED jako signál V_{out} .

Parametry regulačního bloku CPeak_AvSwC byly zvoleny stejně jako v původním modelu, tedy $I_{pkmax} = 385 \text{ mA}$, $T_{ONmax} = 6,2 \mu\text{s}$, $T_{ONmin} = 0 \mu\text{s}$, $T_{OFFmax} = 40 \mu\text{s}$, $T_{OFFmin} = 1,5 \mu\text{s}$. Ostatní parametry mimo regulační byly ponechány stejné jako v předchozích modelech typu buck.

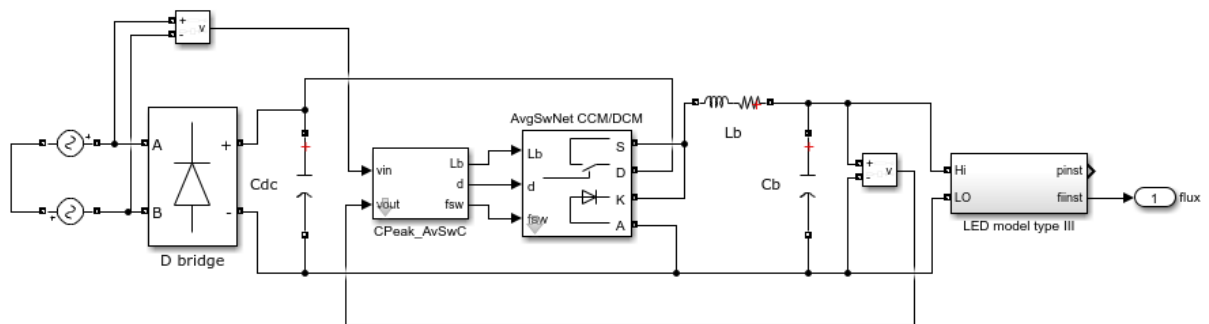


Figure 3.23: Zjednodušený model buck s regulačním blokem CPeak_AwSwC

Následně byla provedena provedena citlivostní analýza GF na parametry C_b , L_b , C_{dc} , K , I_{pkmax} , T_{ONmax} , T_{ONmin} , T_{OFFmax} a T_{OFFmin} . Změna kapacity C_b stejně jako u předchozích modelů ovlivňuje vertikální postavení i šířku GF. Zvýšení indukčnosti L_b zvýší úroveň prvních dvou interharmonických rodnin a sníží úroveň následujících. Změna kapacity C_{dc} ovlivnila GF mizivě, změna citlivosti lampy K měla očekávatelný efekt ovlivnění úrovně GF stabilně napříč všemi rodninami. Zvýšení hodnoty T_{ONmax} posune úroveň každé liché rodniny nahoru a každé sudé dolů. Snížení hodnoty nemá znatelný vliv. Snížení hodnoty T_{OFFmax} se chová přesně opačně. Změna parametrů T_{ONmin} a T_{OFFmin} neměla na výsledný GF žádný vliv - z těchto výsledků je vidět, že perioda sepnutí T_{ON} i perioda rozepnutí T_{OFF} jsou saturovány na své maximální hodnoty. Změna hodnoty I_{pkmax} neměla na výsledný GF vliv. Ani jeden z parametrů neumožňuje požadovanou volnost manipulace s GF, model tedy není vhodný pro verifikaci na datech.

Neuvedené grafy GF jsou v přílohách v sekci D.

3.3.4 Model buck-boost s nastavenou střídou

Čtvrtý model využívá architekturu buck-boost měniče. To znamená změnu zapojení spínacího tranzistoru, diody a cívky L_b .

Hodnoty d , C_b , L_b , C_{dc} a f_{sw} byly zvoleny stejně jako v prvním modelu, po nestálých výsledcích simulace bylo ale zřejmé, že musí být upraveny. Aby úroveň napětí na výstupu odpovídala vzorovému modelu, pevná střída byla nastavena na 0,18. Vhodné hodnoty kapacity a indukčnosti součástí byly zvoleny pro nejplynulejší průběh GF s co nejnižší nastavenou dobou ustálení. Pro indukčnost L_b byla zvolena hodnota 40 mH, pro kapacity kondenzátorů C_{dc} a C_b hodnoty 35 nF a 400 μ F. Hodnota f_{sw} byla ponechána jako 20 kHz.

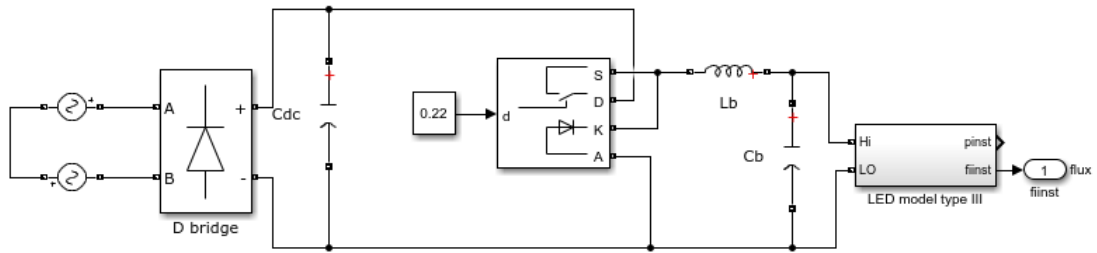


Figure 3.24: Zjednodušený model buck-boost s pevně nastavenou střídou

Následně byla provedena citlivostní analýza GF na parametry C_b , L_b , C_{dc} a K .

Změna kapacity C_b opět ovlivňuje šířku GF stabilně napříč všemi rodinami. Její snížení má zároveň zřejmý vliv na dobu ustálení obvodu při přepnutí frekvence. Změny indukčnosti L_b mají obdobný vliv jako kapacity C_b . Kapacita C_{dc} opět nemá na výsledný GF znatelný vliv. Citlivost lampy K očekávatelně ovlivňuje úroveň GF napříč všemi rodinami. Žádný z parametrů opět neumožňuje dosáhnout požadovaného rozložení jednotlivých rodin tak, aby globální maximální hodnota byla ve druhé rodině.

Neuvedené grafy GF jsou v přílohách v sekci G.

3.3.5 Model buck-boost s regulovanou střídou

Pátý model vyměňuje konstantní střídu čtvrtého modelu za PID regulátor, stejně jako tomu bylo v případě prvního a druhého modelu. PID regulátor byl realizován v paralelní podobě $P + I/s + Ds$. Jednotlivé regulační složky byly nastaveny jako: $P = 0,182$, $I = 0,00004$, $D = 0,32$. Indukčnost L_b musela být zvýšena až na 1,2H, nižší hodnoty měly značný negativní vliv na dobu ustálení systému a tudíž i na časovou náročnost simulací. Hodnoty kapacity byly ponechány stejné jako v předchozím modelu.

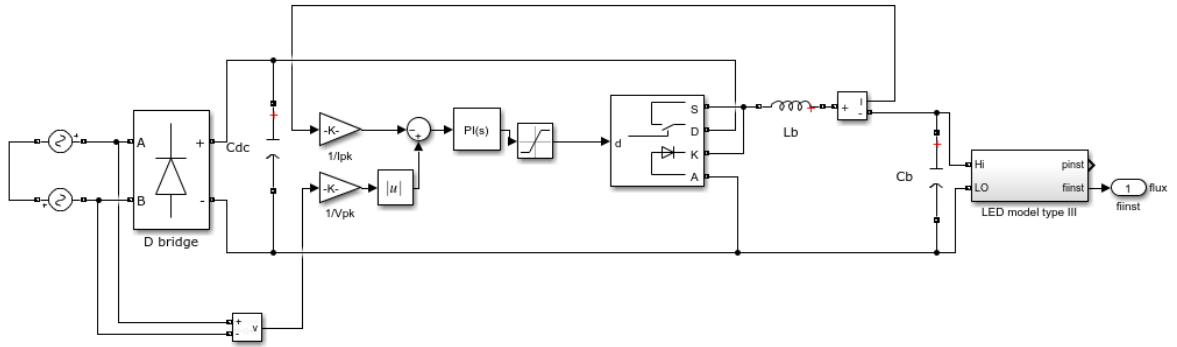


Figure 3.25: Zjednodušený model buck-boost s PI regulací střídá

Následně byla provedena citlivostní analýza GF na parametry C_b , L_b , C_{dc} , K , P , I a D . Snížení kapacity C_b opět způsobuje rozšíření GF stabilně napříč všemi rodinami. Snížení indukčnosti L_b se zdá zvyšovat úroveň druhé rodiny, což by byl žádaný efekt, ale zvýšení úrovně je příliš nízké na úkor destabilizace systému. Změna kapacity C_{dc} na výsledný GF opět nemá žádný vliv. Citlivost lampy K očekávatelně ovlivňuje úroveň GF napříč všemi rodinami. Snížení regulační složky P způsobuje nárůst úrovně v prvních dvou interharmonických rodinách, větší změna má ale negativní vliv na stabilitu systému. Změny hodnot regulačních složek I a D neměly na GF znatelný vliv, složka D byla tedy odstraněna pro zjednodušení modelu podobně jako u předchozího modelu typu buck. Ani jedním z parametrů se nepodařilo dosáhnout požadovaného chování GF, kdy druhá rodina přesáhne tu první. Zmíněné rodiny se nanejvýš povedlo vyrovnat, model je tedy opět nevhodný pro využití v další části práce.

Neuvedené grafy GF jsou v přílohách v sekci F.

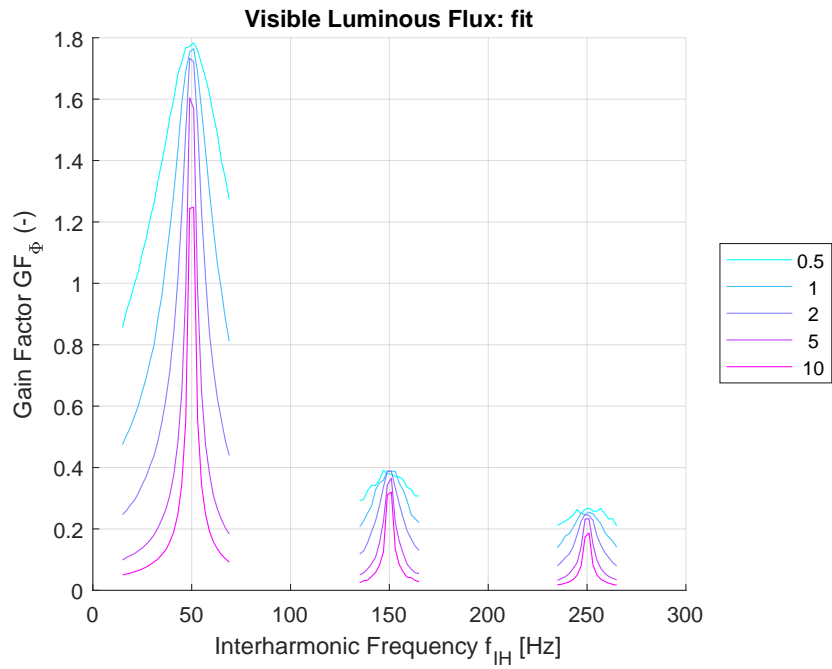


Figure 3.26: Citlivostní analýza modelu buck-boost s PID regulací na parametr C_b v závislosti na koeficientu rozšíření

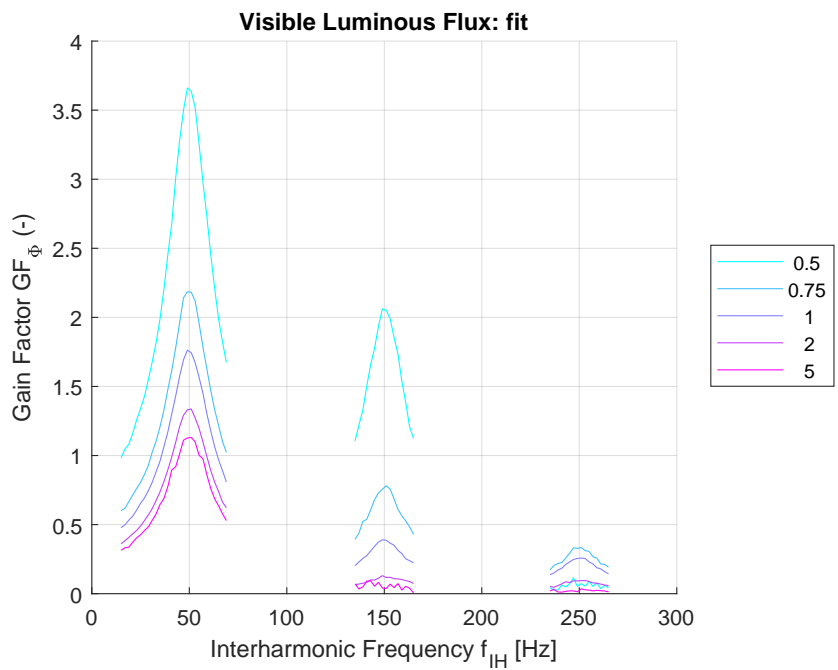


Figure 3.27: Citlivostní analýza modelu buck-boost s PID regulací na parametr P v závislosti na koeficientu rozšíření

3.3.6 Model buck-boost s regulací periody sepnutí

Poslední model je topologicky nejbližší modelu původnímu. Jedná se o model typu buck-boost s regulačním blokem "CPeak_AvSwC" přejatým z původního modelu. Model bylo třeba odladit změněním hodnot $C_b = 800 \mu\text{F}$ a $L_{dc} = 3 \text{ mH}$. Parametry regulačního bloku byly zvoleny jako: $I_{pkmax} = 385 \text{ mA}$, $T_{ONmax} = 5 \mu\text{s}$, $T_{ONmin} = 0 \mu\text{s}$, T

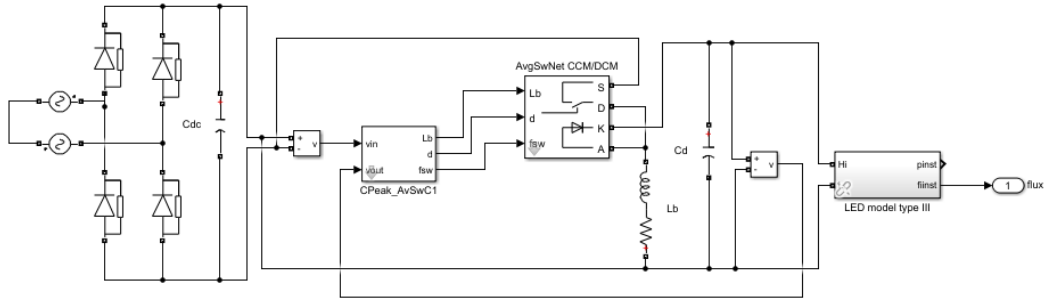


Figure 3.28: Zjednodušený model buck-boost s regulačním blokem CPeak_AwSwC

Následně byla provedena citlivostní analýza na hodnoty C_b , C_{dc} , L_b , K , T_{ONmax} , T_{ONmin} , T_{OFFmax} , T_{OFFmin} a I_{pkmax} . Již při první citlivostní analýze je zřejmé, že výstupní GF předřadníku snadno dosahuje požadovaného chování - kdy GF nabývá globálního maxima v druhé interharmonické frekvenční rodině. Kapacita C_b zachovává svou obvyklou vlastnost ovlivnění vertikální úrovně i strmosti GF stabilně napříč všemi rodinami. Kapacita C_{dc} znovu nemá znatelný vliv. Snížení indukčnosti L_b vede ke snížení úrovně prvních dvou interharmonických rodin a zvýšení úrovně těch dalších, třetí rodina je díky tomu schopná přesáhnout tu první. Zvýšení indukčnosti má za následek návrat k nežádoucímu tvaru GF z předchozích modelů, tedy ke globálnímu maximu v první rodině. Citlivost lampy K má očekávatelný vliv zvýšení vertikální úrovně GF napříč všemi rodinami. Parametry T_{ONmin} a T_{OFFmax} neměly bez větších změn na GF vliv. Snížení hodnoty T_{ONmax} zvyšuje úroveň GF v prvních dvou rodinách a snižuje ji v dalších rodinách. Citlivostní analýza na parametr T_{OFFmin} vykazovala opačný efekt. Z tohoto chování a netečnosti hodnot T_{ONmin} a T_{OFFmax} lze vyčíst, že perioda sepnutí T_{ON} je saturována na maximální hodnotu a perioda rozepnutí T_{OFF} na minimální. Nejdůležitějším výsledkem citlivostních analýz bylo chování GF při úpravě maximálního proudu I_{pkmax} . Jeho zvýšení či snížení obdobně ovlivňuje úroveň GF v první rodině a opačně ve třetí rodině, a to s minimálními rozdíly v rodině druhé. Parametr I_{pkmax} bude tedy klíčový

pro následnou verifikaci modelu v další části práce.

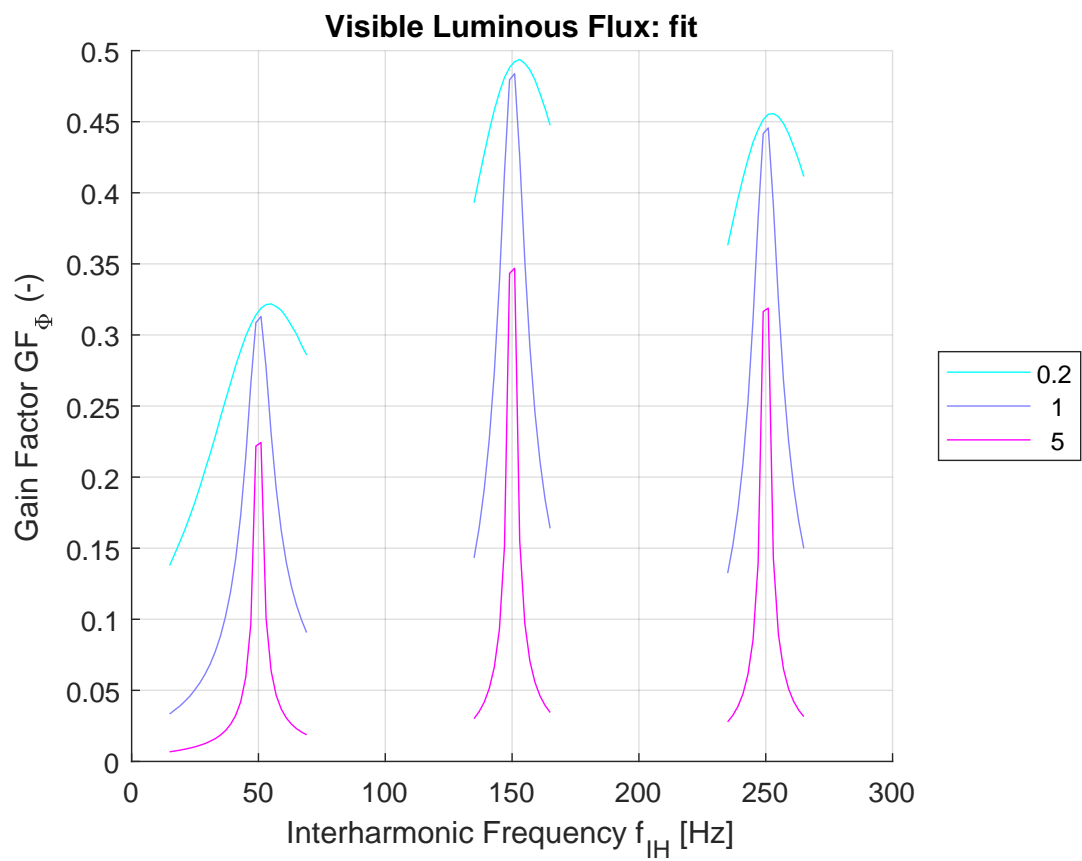


Figure 3.29: Citlivostní analýza modelu buck-boost s regulačním blokem CPeak_AwSwC na hodnotu kapacity C_b v závislosti na koeficientu rozšíření

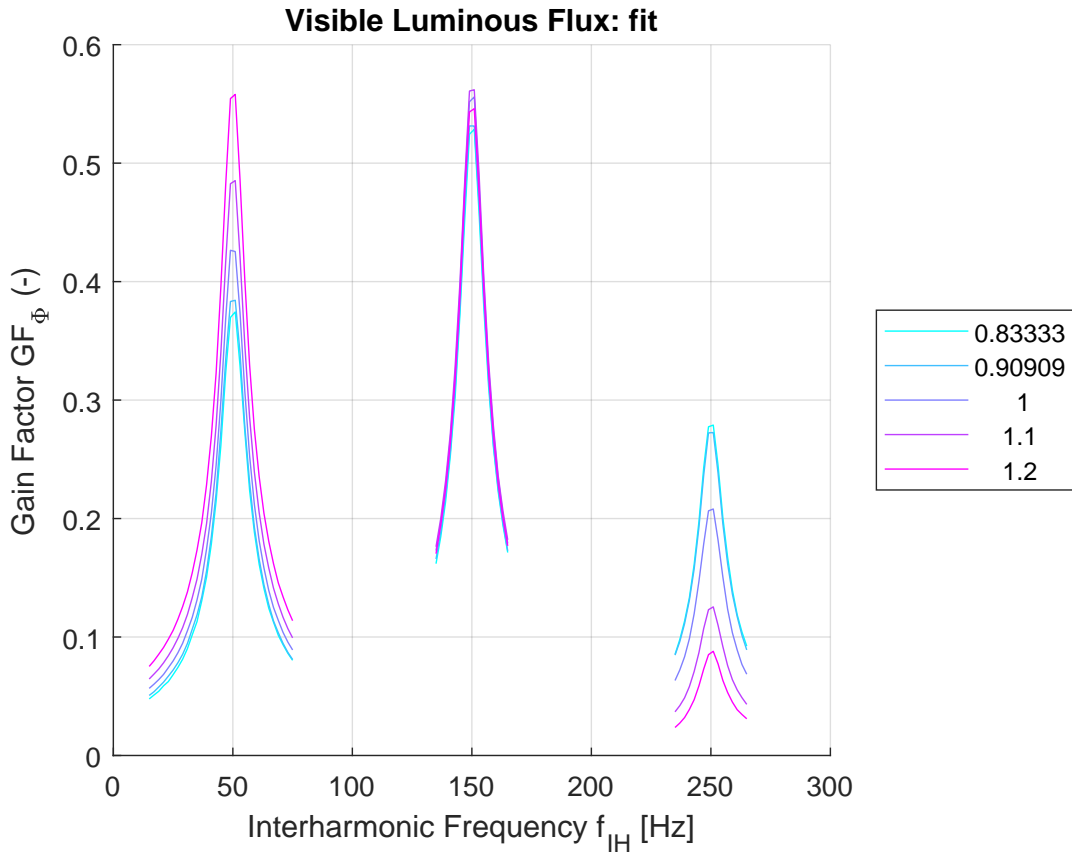


Figure 3.30: Citlivostní analýza modelu buck-boost s regulačním blokem CPeak_AwSwC na parametr I_{pkmax} v závislosti na koeficientu rozšíření

Neuvedené grafy GF jsou v přílohách v sekci C.

3.4 Verifikace modelů na naměřených datech

V následující části práce bude provedena verifikace modelů na naměřených datech, kdy budou parametry modelu upravovány tak, aby výsledný GF odpovídaly naměřeným hodnotám reálných led svítidel. Důraz zde bude kladen hlavně na první dvě interharmonické frekvenční rodiny. Verifikace bude provedena na původním modelu a na všech zjednodušených modelech, na nichž bude daný tvar GF dosažitelný. Výsledky z nezměněného původního modelu budou považovány za další sadu dat, pro níž bude také provedena verifikace na zjednodušených modelech.

Pro verifikaci modelů předřadníku byly poskytnuty 2 sady naměřeného GF. První svítidlo, na němž bylo provedeno měření, byla led žárovka značky Auraglow o výkonu 14 W, druhá byla led žárovka značky Philips o výkonu 9,5 W. Předřadníky obou

svítidel topologicky odpovídaly třídě V.

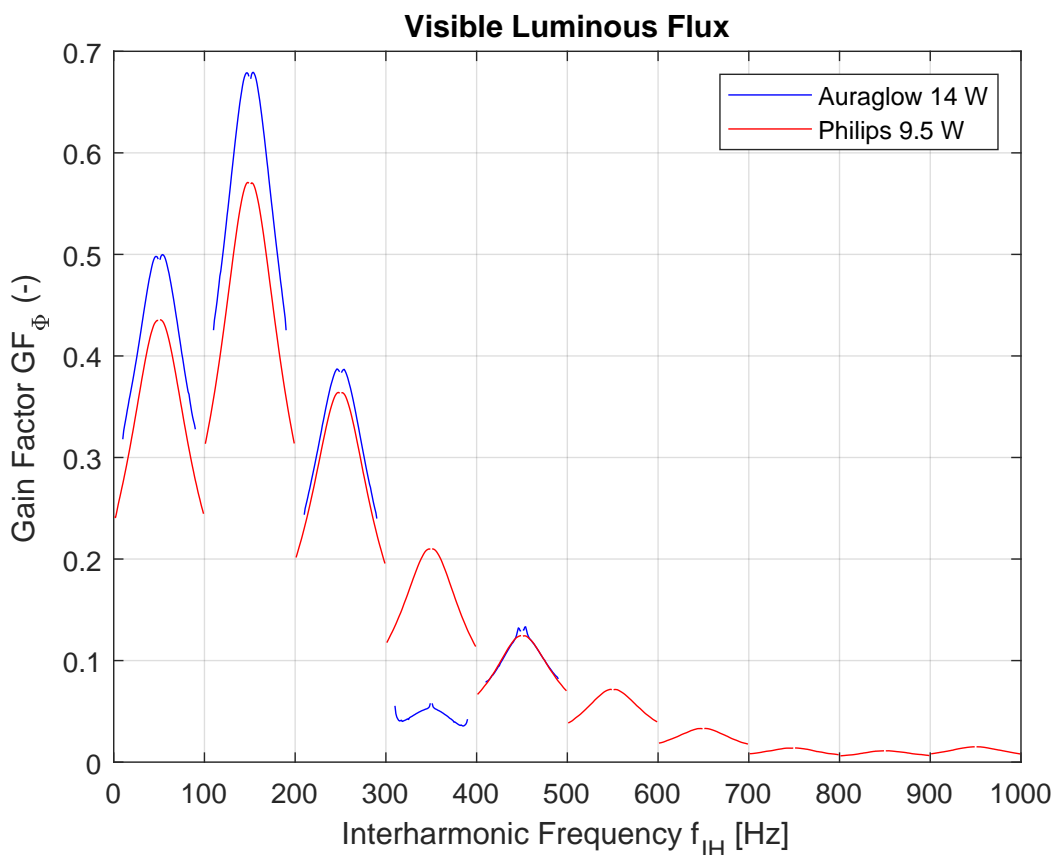


Figure 3.31: Naměřené hodnoty GF pro obě svítidla

3.4.1 Verifikace původního modelu

V sekci 3.2 bylo mezi parametry modelu identifikováno několik hlavních hybatelů, které lze využít pro verifikaci původního modelu na naměřených datech. Mezi tyto klíčové parametry jsou počítány kapacita C_{fdcl} pro pohyb jednotlivými interharmonickými frekvenčními rodinami nezávisle na sobě, kapacita C_d pro změnu strmosti průběhu a samozřejmě citlivost lampy K pro změnu úrovně GF stabilně napříč všemi rodinami.

Verifikace modelu pro žárovku Auraglow 14 W

Jako první byla provedena verifikace původního modelu na data GF naměřená na žárovce Auraglow. Důraz byl kladen na vyrovnání prvních dvou interharmonických frekvenčních rodin, povedlo se však zhruba vyrovnat první tři. V posouvání vzá-

jenné polohy jednotlivých rodin hrála hlavní roli kapacita C_{fdc1} . Odpovídající strmosti GF bylo dosaženo změnou kapacity C_d , to mělo ale za následek posun grafu o 6 Hz doprava. Zároveň se nepodařilo zreplikovat pokles do lokálního minima uprostřed intervalu jednotlivých rodin.

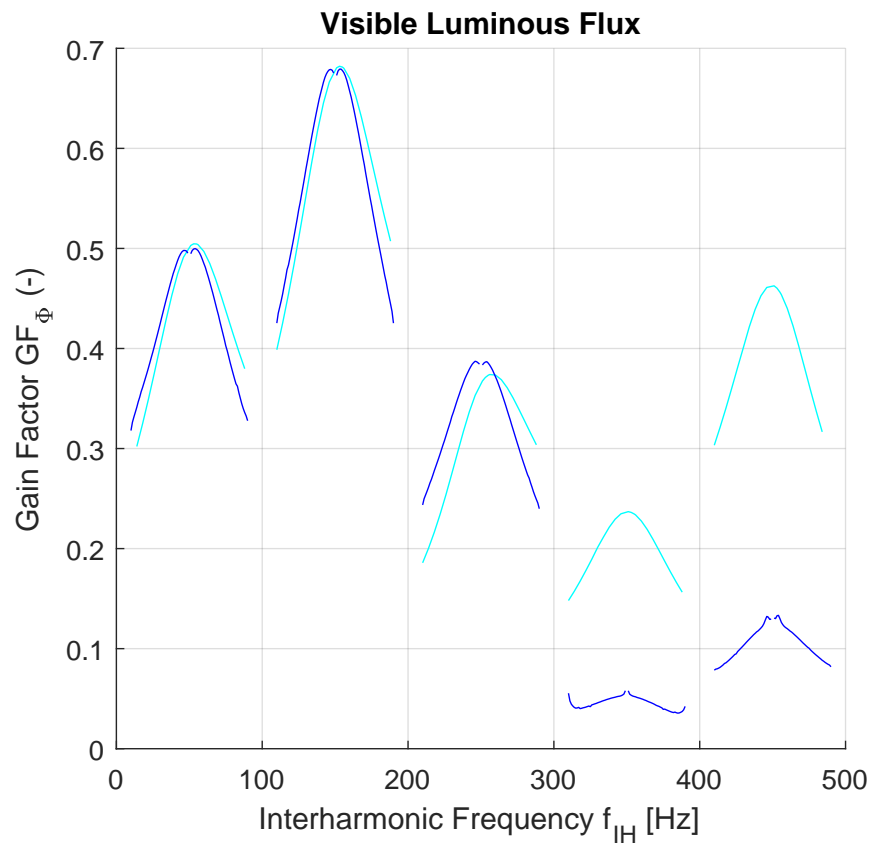


Figure 3.32: Verifikace původního modelu pro žárovku Auraglow
Tmavě modrá- naměřené hodnoty, světle modrá - odsimulované hodnoty

Pro dosažení požadovaného tvaru byly nastaveny parametry:

| | |
|--------------------|-------------------|
| K | 2,05 |
| C_{fdc1} | 176 nF |
| C_{d} | 119 μF |
| R_{fdc} | 25 k Ω |
| L_{fdc} | 0,27 mH |
| T_{ONmax} | 5,6 μs |

Neuvedené hodnoty nebyly změněny.

Verifikace modelu pro žárovku Philips 9,5 W

Dále byla provedena verifikace původního modelu pro žárovku Philips. Důraz byl kladen na vyrovnání prvních dvou interharmonických rodin, toho bylo docíleno primárně úpravou hodnoty kapacity C_{fdc1} . První dvě rodiny se povedlo vyrovnat v požadované úrovni, průběh dalších rodin zachován nebyl. Odpovídající strmosti bylo docíleno změnou kapacity C_{d} , to mělo ale za následek posun grafu o 6 Hz doprava.

Pro dosažení požadovaného tvaru byly nastaveny parametry:

| | |
|--------------------|-------------------|
| K | 1,73 |
| C_{fdc1} | 246,4 nF |
| C_{d} | 119 μF |
| R_{fdc} | 25 k Ω |
| L_{fdc} | 1 mH |
| T_{ONmax} | 5,6 μs |

Neuvedené hodnoty nebyly změněny.

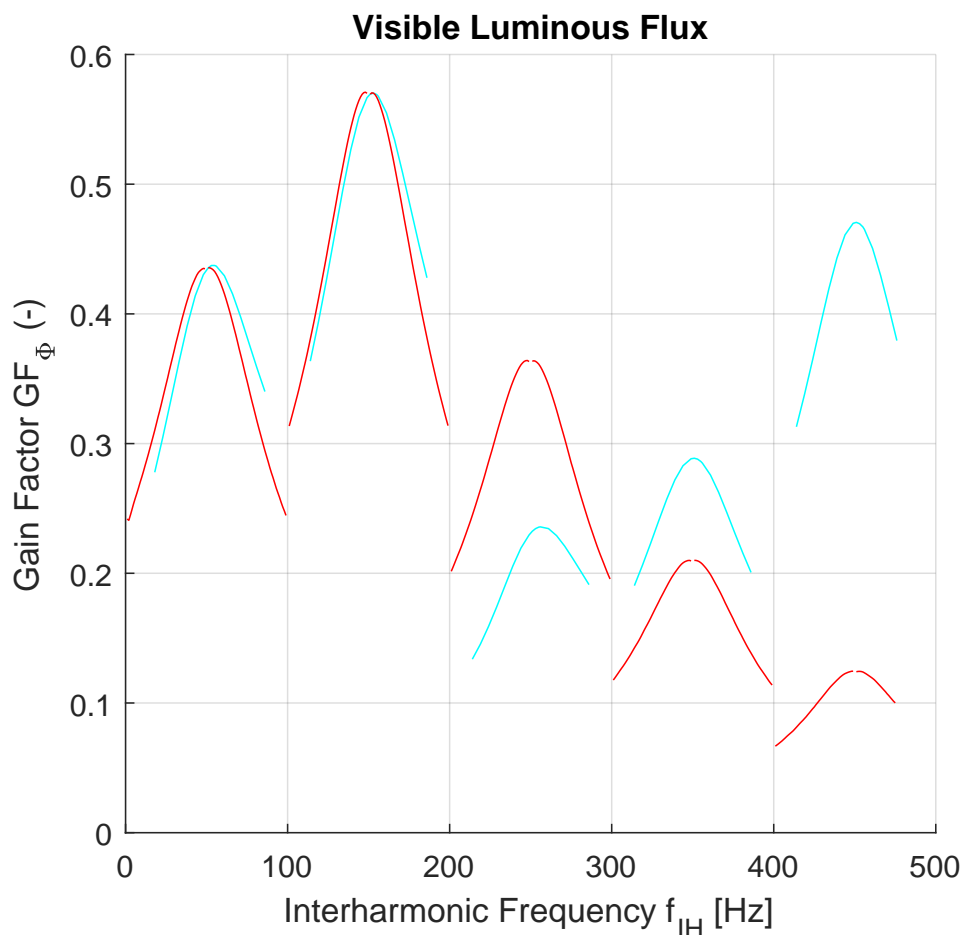


Figure 3.33: Verifikace původního modelu pro žárovku Philips
Červená - naměřené hodnoty, světle modrá - odsimulované hodnoty

3.4.2 Verifikace zjednodušených modelů

Po provedení citlivostních analýz bylo rozhodnuto, že jediný model použitelný pro všechny sady dat je model číslo šest, tedy buck-boost měnič s regulací z původního modelu. Žádný jiný předřadník nedosahoval požadovaného tvaru GF, kdy se globální maximum nachází ve druhé interharmonické frekvenční rodině. Další hodnoty mohou být změněny pro doladění detailů, ale zmíněné parametry jsou klíčové pro manipulaci s GF.

Verifikace modelu pro žárovku Auraglow 14 W

Nejdříve byla provedena verifikace na data led žárovky Auraglow. Černý graf GF odpovídá hodnotám naměřeným, světle modrý odsimulovaným. Důraz byl kladen na sladění prvních dvou rodin, jejich vzájemné rozložení odpovídá i dále. Lokální minimum uprostřed intervalu každé rodiny se daným modelem nepovedlo zreplikovat, a rozšíření jednotlivých rodin s pomocí výstupního kondenzátoru C_b mělo za následek drobný posun na grafu zhruba o 6 Hz doprava.

Pro dosažení požadovaného tvaru byly nastaveny parametry:

| | |
|--------------|-------------|
| K | 1,74 |
| C_b | 127 μ F |
| L_b | 3 mH |
| I_{pkmax} | 303 mA |
| T_{ONmin} | 0 μ s |
| T_{ONmax} | 5 μ s |
| T_{OFFmax} | 30 μ s |
| T_{OFFmin} | 3,5 μ s |

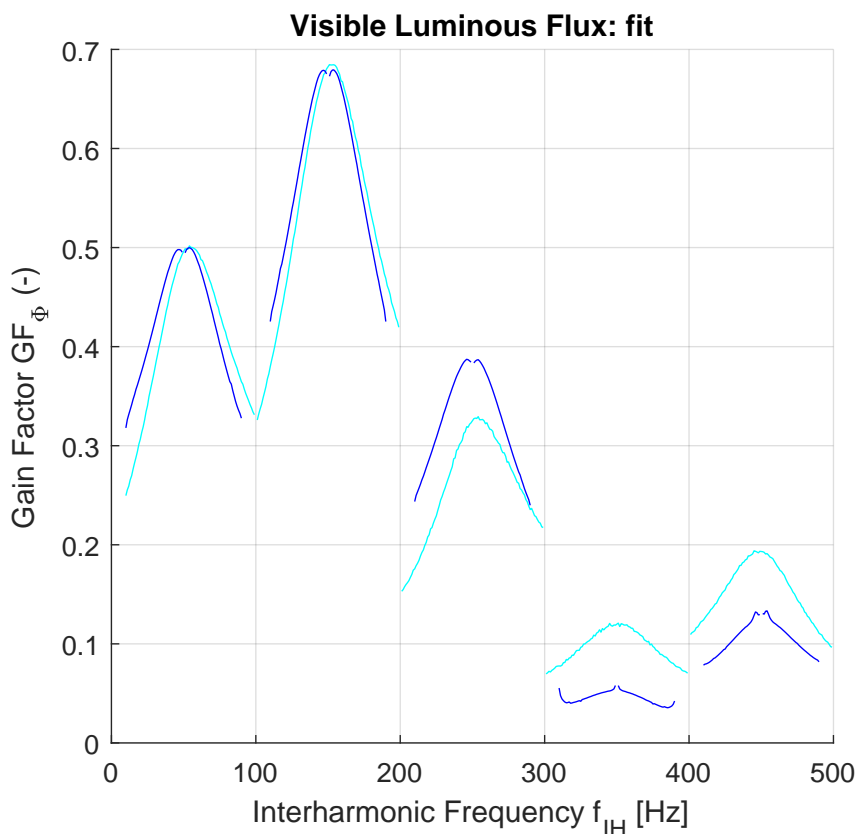


Figure 3.34: Verifikace zjednodušeného modelu pro žárovku Auraglow
Černá - naměřené hodnoty, světle modrá - odsimulované hodnoty

Verifikace modelu pro žárovku Philips 9,5 W

Dále byla provedena verifikace na data led žárovky Philips. Černý graf GF odpovídá hodnotám naměřeným, světle modrý odsimulovaným. Důraz byl opět kladen na sladění prvních dvou rodin, jejich vzájemné rozložení odpovídá až po rodu šestou. Tvar všech jednotlivých rodin byl dodržen.

Pro dosažení požadovaného tvaru byly nastaveny parametry:

| | |
|--------------|-------------------|
| K | 1,38 |
| C_b | 127 μF |
| L_b | 2,25 mH |
| I_{pkmax} | 370 mA |
| T_{ONmax} | 6,2 μs |
| T_{ONmin} | 0 μs |
| T_{OFFmax} | 40 μs |
| T_{OFFmin} | 1,5 μs |

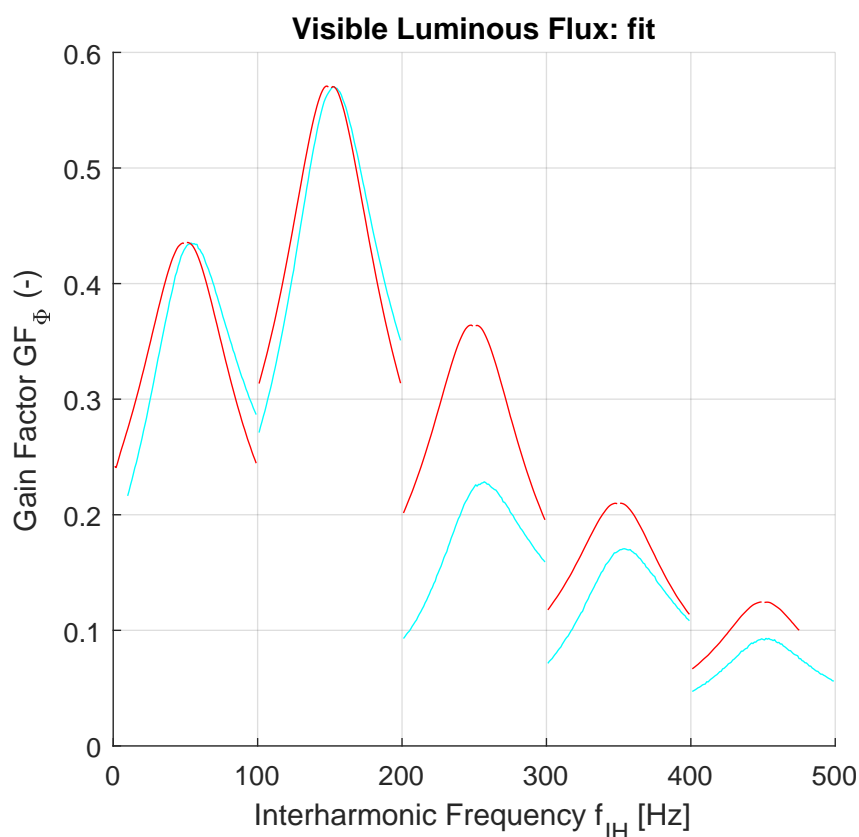


Figure 3.35: Verifikace zjednodušeného modelu pro žárovku Philips
Červená - naměřené hodnoty, světle modrá - odsimulované hodnoty

Verifikace pro výsledky původního modelu

Výstup nezměněného původního modelu devítiwattové LED žárovky Tesla byl použit jako třetí sada dat pro verifikaci zjednodušeného modelu. Důraz byl opět kladen na vyrovnání prvních dvou interharmonických frekvenčních rodin. Vzhledem k podobnosti v architektuře obou modelů se však povedlo vyrovnat i ostatní rodiny, přičemž odchylka mírně roste s každou další rodinou. Vzhledem ke stejné míře strmosti obou průběhů nebylo nutné snižovat kapacitu C_b , na grafu tedy nesledujeme žádný horizontální posun.

Požadovaného tvaru bylo vzhledem k podobnosti obou modelů dosaženo užitím hodnot podobných původnímu modelu:

| | |
|---------------------|-------------------|
| K | 1,56 |
| C_b | 220 μF |
| L_b | 3 mH |
| I_{pkmax} | 385 mA |
| T_{ONMAX} | 6,2 μs |
| T_{ONMIN} | 2 μs |
| T_{OFFMAX} | 40 μs |
| T_{OFFMIN} | 1,5 μs |

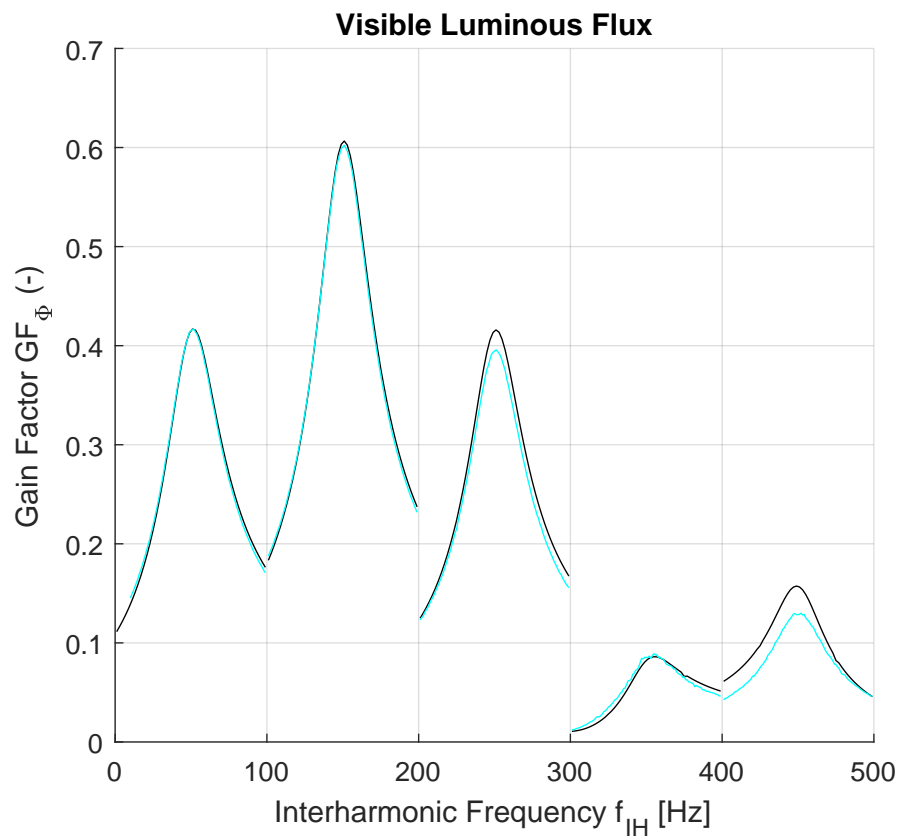


Figure 3.36: Verifikace zjednodušeného modelu pro žárovku Tesla

4 Závěr

V úvodu a teoretické části byla čtenářům představena a vysvětlena problematika týkající se moderního osvětlení a byly popsány způsoby měření a zhodnocování kvality osvětlení. Byl přiblížen fenomén flickru, tedy rychlé změny v intenzitě světla, který může být vnímán vědomě či podvědomě. Pro detekci a měření flickru byly následně popsány dva způsoby realizace flickrmetru. V rámci problematiky byly zohledněny možné zdravotní následky vystavení osvětlení špatné kvality, jako například migrény, zrakové obtíže nebo možný výskyt epileptických záchvatů.

Na základě těchto informací byla opodstatněna potřeba užívání předřadníků - tedy zařízení upravující frekvenci blikání v osvětlené s cílem eliminace flickru. Byly představeny klíčové pojmy interharmonická frekvenční rodina a Gain Factor, který byl výstupem všech měření v praktické části. Dále bylo popsáno osm topologických kategorií předřadníků rozdělených podle přítomnosti určitých složek a způsobů regulace, architektura a výhody jednotlivých kategorií byly přiblíženy.

Pro potřeby praktické části byl poskytnut model devítiwattové LED žárovky Tesla spadající pod kategorii V. Model byl podrobně rozebrán a veškeré jeho komponenty a principy funkce popsány. Byla provedena série citlivostních analýz na různé parametry modelu, pro zjištění konkrétního chování při daných změnách. Na základě těchto analýz byl model verifikován pro různé sady dat, čtrnáctiwattové LED svítidlo Auraglow a devítiapůlwattové LED svítidlo Philips. Verifikace modelu probíhala postupnou úpravou parametrů až po vyrovnání výsledného odsimulovaného Gain Factoru s naměřeným, přičemž hlavní důraz byl kladen na vyrovnání prvních dvou interharmonických frekvenčních rodin. Verifikaci modelu pro obě sady lze nazvat úspěšnou. Pro žárovku Auraglow se model povedlo verifikovat zhruba pro první tři interharmonické rodiny, pro žárovku Philips první dvě.

Následně bylo od původního modelu žárovky Tesla odvozeno několik modelů s různými stupni zjednodušení. Modely byly založeny na architektuře buck a buck-boost meniče, pro každý typ byly použity tři různé způsoby řízení spínání proudu - konstantně nastavená střída, střída řízená PI regulátorem a střída řízená regulačním

blokem přejatým z původního modelu. Celkově tedy vzniklo šest zjednodušených modelů. Modely byly následně odladěny, optimalizovány a jejich příslušné citlivostní analýzy byly zdokumentovány. Všechny modely byly uvedeny v chod a vydávaly srozumitelné výstupy, jenom jeden model však umožňoval dostatečnou volnost modifikací, aby s ním mohlo být dosaženo verifikace na naměřená data. Jednalo se o buck-boost měnič s regulačním blokem z původního modelu, tedy model topologicky nejbližší originálu. Všechny ostatní zjednodušené modely byly pro použití na danou charakteristiku Gain Factoru vyřazeny.

Na jediném vhodném modelu byla dále provedena verifikace jak pro data Gain Factoru naměřených na výše zmíněných žárovkách Auraglow a Philips, tak na výstupním GF z původního modelu žárovky Tesla s nezměněnými parametry. Verifikace modelu lze ve všech třech případech opět považovat za úspěšnou - pro naměřená data byl model vyrovnán na prvních dvou interharmonických frekvenčních rodinách s drobným horizontálním posunem, pro data z původního modelu bylo vyrovnání provedeno bez posunu a zároveň s minimálními změnami přítomných parametrů oproti hodnotám v původním modelu.

Použitá literatura

1. *Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems – Definitions and Measurement Models*. 1st ed. Vídeň, Rakousko: International Commission on Illumination, 2016.
2. DRAPELA, J. et al. Light flicker of fluorescent lamps with different types of ballasts caused by interharmonics. In: *2005 IEEE Russia Power Tech* [online]. IEEE, 2005, pp. 1–7 [visited on 2022-04-27]. ISBN 978-5-93208-034-4. Available from DOI: [10.1109/PTC.2005.4524419](https://doi.org/10.1109/PTC.2005.4524419).
3. WILKINS, Arnold; VEITCH, Jennifer; LEHMAN, Brad. LED lighting flicker and potential health concerns: IEEE standard PAR1789 update. In: *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition* [online]. IEEE, 2010, pp. 171–178 [visited on 2022-04-27]. ISBN 978-1-4244-5286-6. Available from DOI: [10.1109/ECCE.2010.5618050](https://doi.org/10.1109/ECCE.2010.5618050).
4. *IEC 61000-4-15: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-15: Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications*. 2nd ed. Geneva, Switzerland: IEC Central Office, 0210.
5. *IEC TR 61 547-1: Equipment for general lighting purposes – EMC immunity requirements – Part 1 : An objective voltage fluctuation immunity test method*. 1st ed. Geneva, Switzerland: IEC Central Office, 2015.
6. LEHMAN, Brad; WILKINS, Arnold J. Designing to Mitigate Effects of Flicker in LED Lighting: Reducing risks to health and safety. *IEEE Power Electronics Magazine* [online]. 2014, vol. 1, no. 3, pp. 18–26 [visited on 2022-04-27]. ISSN 2329-9207. Available from DOI: [10.1109/MPPEL.2014.2330442](https://doi.org/10.1109/MPPEL.2014.2330442).
7. OKUDAN, Zeynep Vildan; OZKARA, Cigdem. Reflex epilepsy: triggers and management strategies. *Neuropsychiatric Disease and Treatment* [online]. 2018, vol. 14, pp. 327–337 [visited on 2022-04-27]. ISSN 1178-2021. Available from DOI: [10.2147/NDT.S107669](https://doi.org/10.2147/NDT.S107669).

8. COLLIN, Adam J. et al. Light Flicker and Power Factor Labels for Comparing LED Lamp Performance. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. 2019, vol. 55, no. 6, pp. 7062–7070 [visited on 2022-04-27]. ISSN 0093-9994. Available from DOI: [10.1109/TIA.2019.2919643](https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2919643).
9. DRAPELA, Jiri et al. Experimental evaluation and classification of LED lamps for light flicker sensitivity. In: *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)* [online]. IEEE, 2018, pp. 1–6 [visited on 2022-04-27]. ISBN 978-1-5386-0517-2. Available from DOI: [10.1109/ICHQP.2018.8378857](https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378857).
10. KUKACKA, Leos; DRAPELA, Jiri. A Preliminary Study on Modeling of Voltage Induced Flicker Sensitivity of Fluorescent and LED Lamps with Closed-Loop Control. In: *2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)* [online]. IEEE, 2020, pp. 1–5 [visited on 2022-04-27]. ISBN 978-1-7281-3697-4. Available from DOI: [10.1109/ICHQP46026.2020.9177905](https://doi.org/10.1109/ICHQP46026.2020.9177905).
11. DRAPELA, J.; TOMAN, P. Interharmonic - Flicker Curves of Lamps and Compatibility Level for Interharmonic Voltages. In: *2007 IEEE Lausanne Power Tech* [online]. IEEE, 2007, pp. 1552–1557 [visited on 2022-04-27]. ISBN 978-1-4244-2189-3. Available from DOI: [10.1109/PCT.2007.4538546](https://doi.org/10.1109/PCT.2007.4538546).
12. MAKSIMOVIC, D.; ERICKSON, R. *Advances in Averaged Switch Modeling and Simulation* [online]. Boulder, Colorado: Colorado Power Electronics Center (CoPEC), 1999 [visited on 2022-05-01]. Available from: <https://pdfs.semanticscholar.org/816d/9e535e20161fca0e25ba71a58a973c81caa2.pdf>.
13. SLEZINGR, J. et al. A new simplified model of compact fluorescent lamps in the scenario of smart grids. In: *2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power*. 2012, pp. 835–841. Available from DOI: [10.1109/ICHQP.2012.6381237](https://doi.org/10.1109/ICHQP.2012.6381237).
14. *Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage*. 2nd ed. Dallas, Texas: Texas Instruments, 2015. ISBN SLVA477B.

A Citlivostní analýza původního modelu

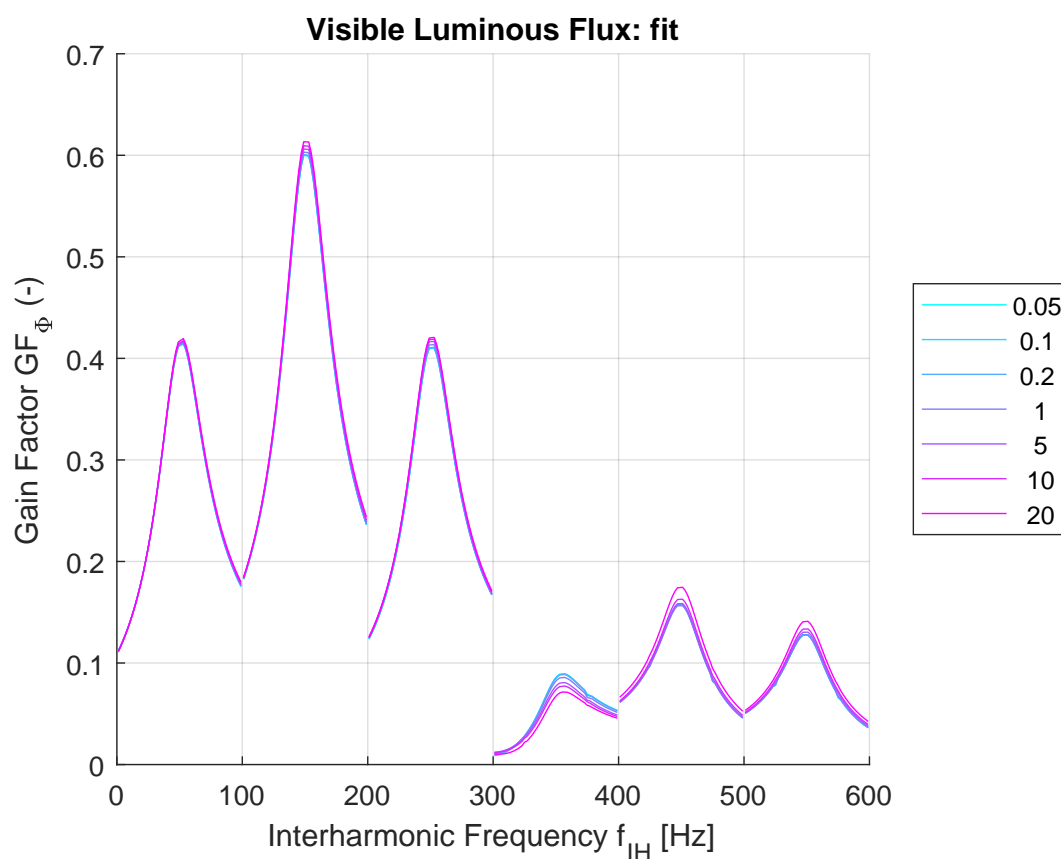


Figure A.1: Průběhy GF pro změněné hodnoty cívky L_{fac} v závislosti na koeficientu rozšíření

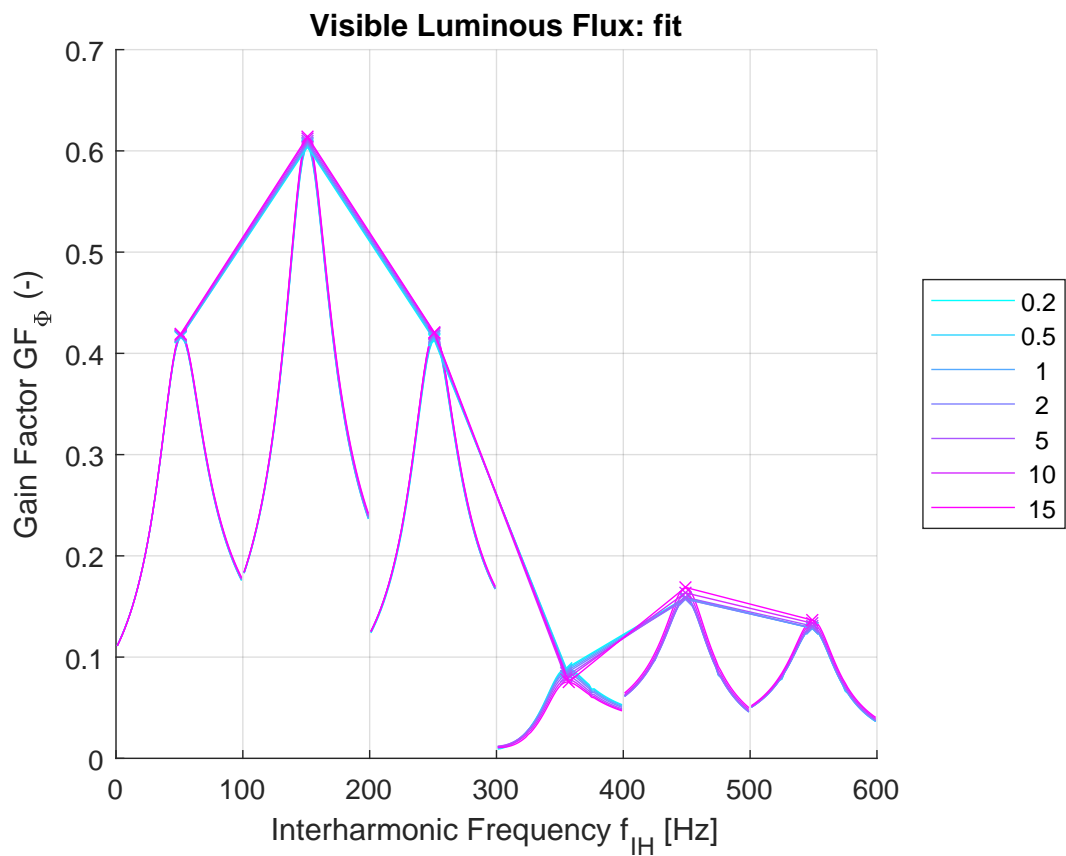


Figure A.2: Průběhy GF pro změněné hodnoty cívky L_{fdc} v závislosti na koeficientu rozšíření

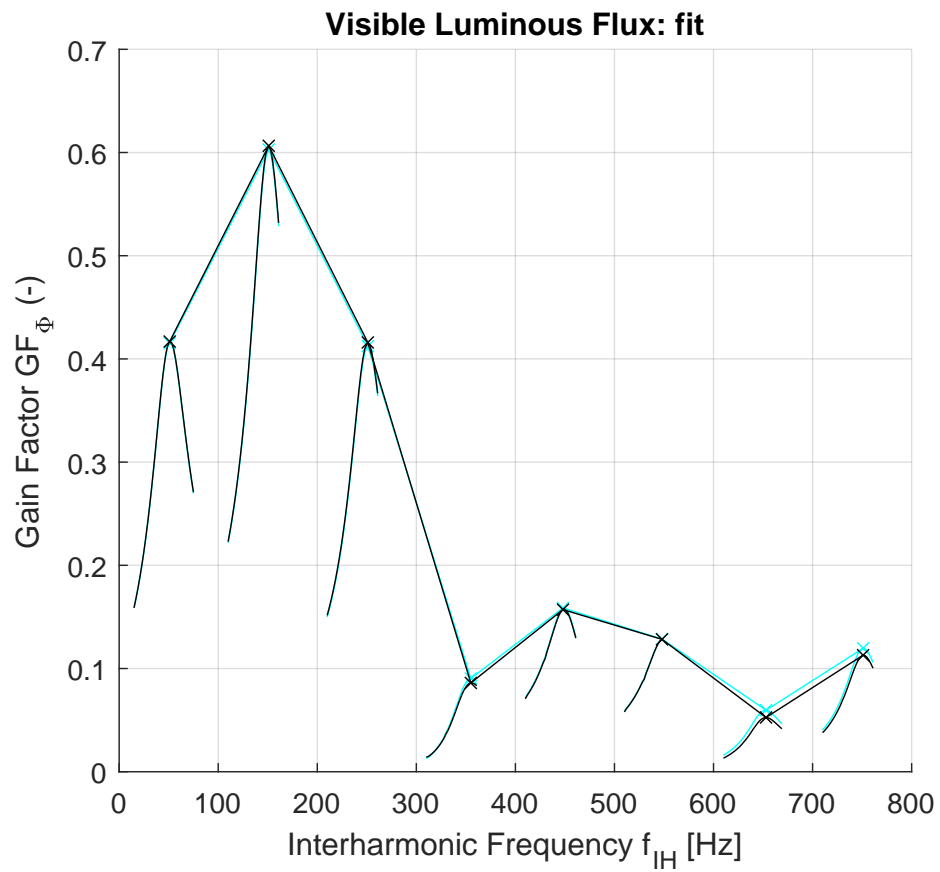


Figure A.3: Průběh GF při odebrání vstupní části se součástkami C_{fac} a L_{fac}
Černá - vstupní část zachována, světle modrá - vstupní část odebrána

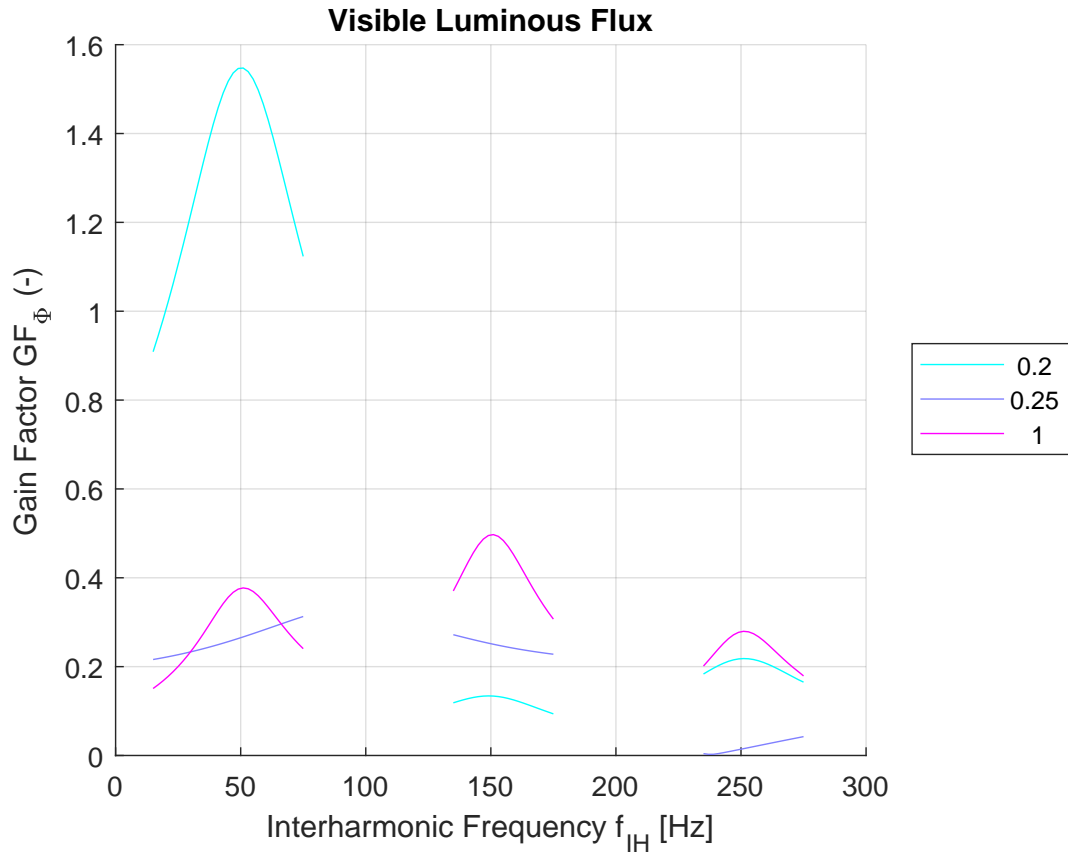


Figure A.4: Průběhy GF pro změněné hodnoty T_{OFFmax} v závislosti na koeficientu rozšíření

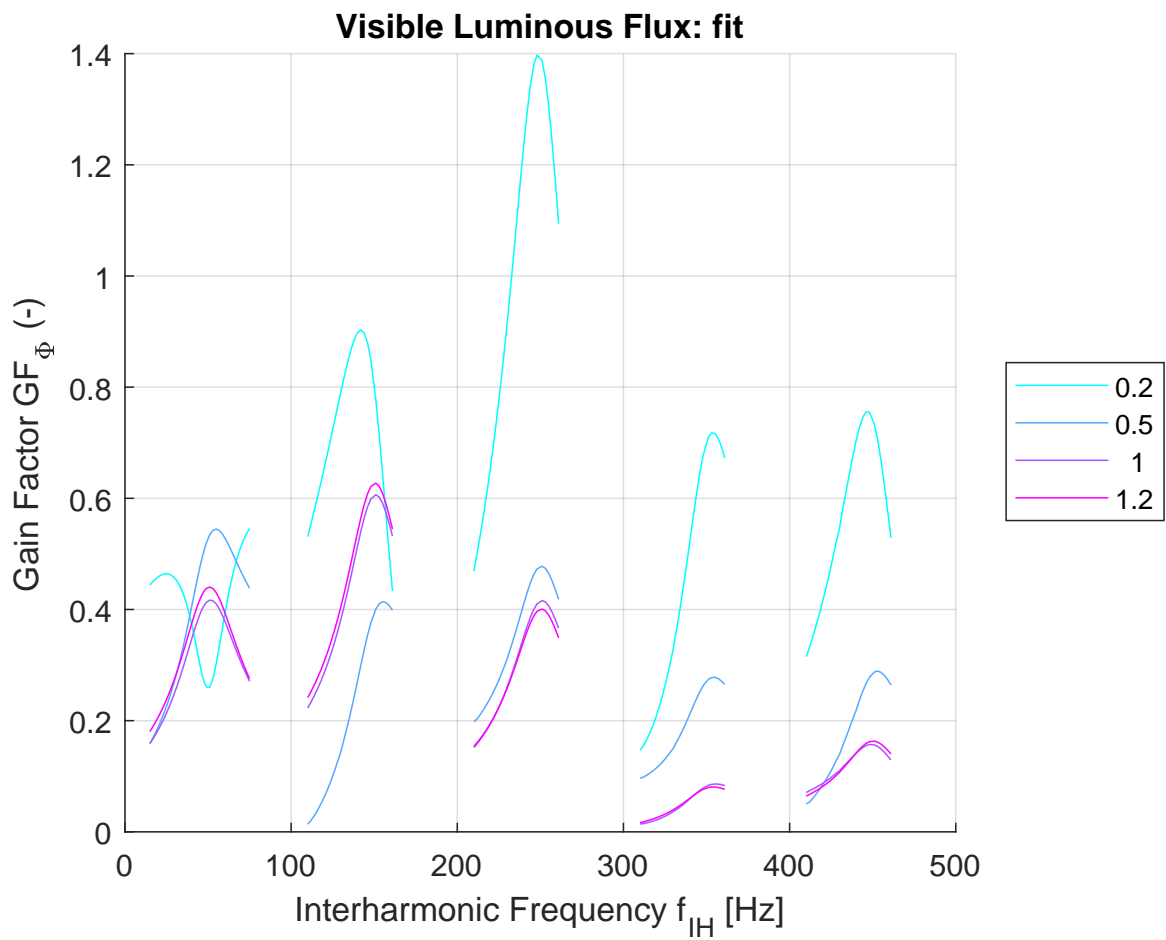


Figure A.5: Průběhy GF pro změněné hodnoty I_{pkmax} v závislosti na koeficientu rozšíření

B Citlivostní analýzy zjednodušeného modelu typu buck s konstantní střídou

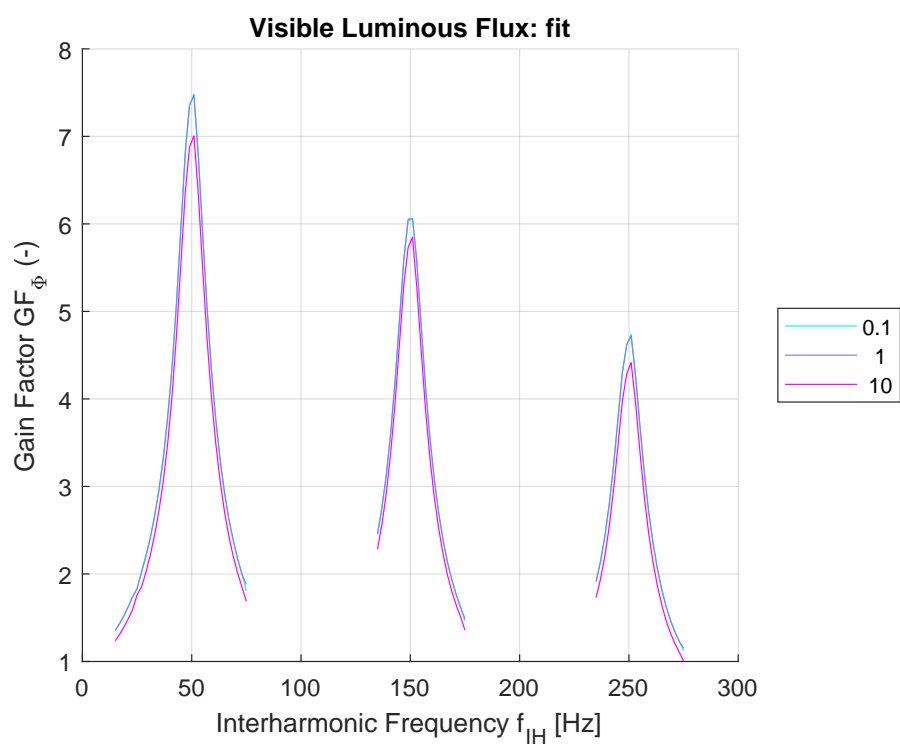


Figure B.1: Průběhy GF zjednodušeného modelu typu buck s konstantní střídou pro změněné hodnoty C_{dc} v závislosti na koeficientu rozšíření

C Citlivostní analýzy zjednodušeného modelu typu buck s PI regulátorem

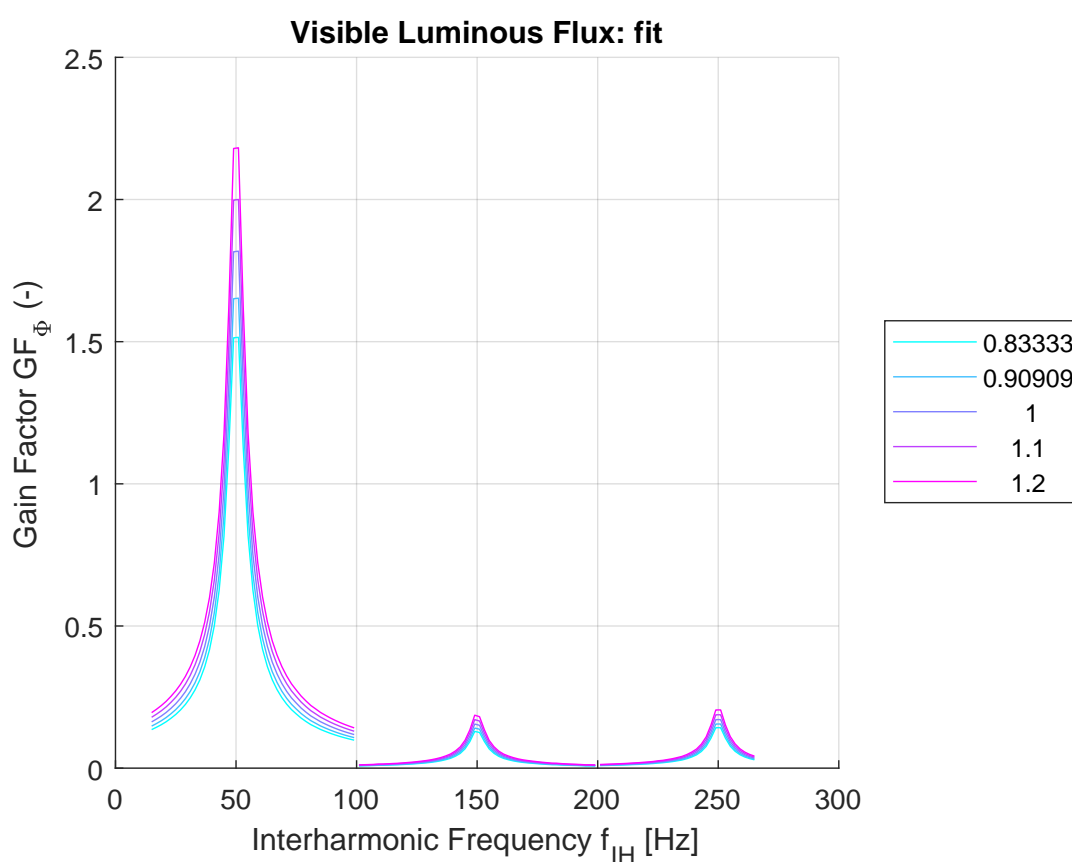


Figure C.1: Průběhy GF zjednodušeného modelu typu buck s PI regulátorem pro změněné hodnoty K v závislosti na koeficientu rozšíření

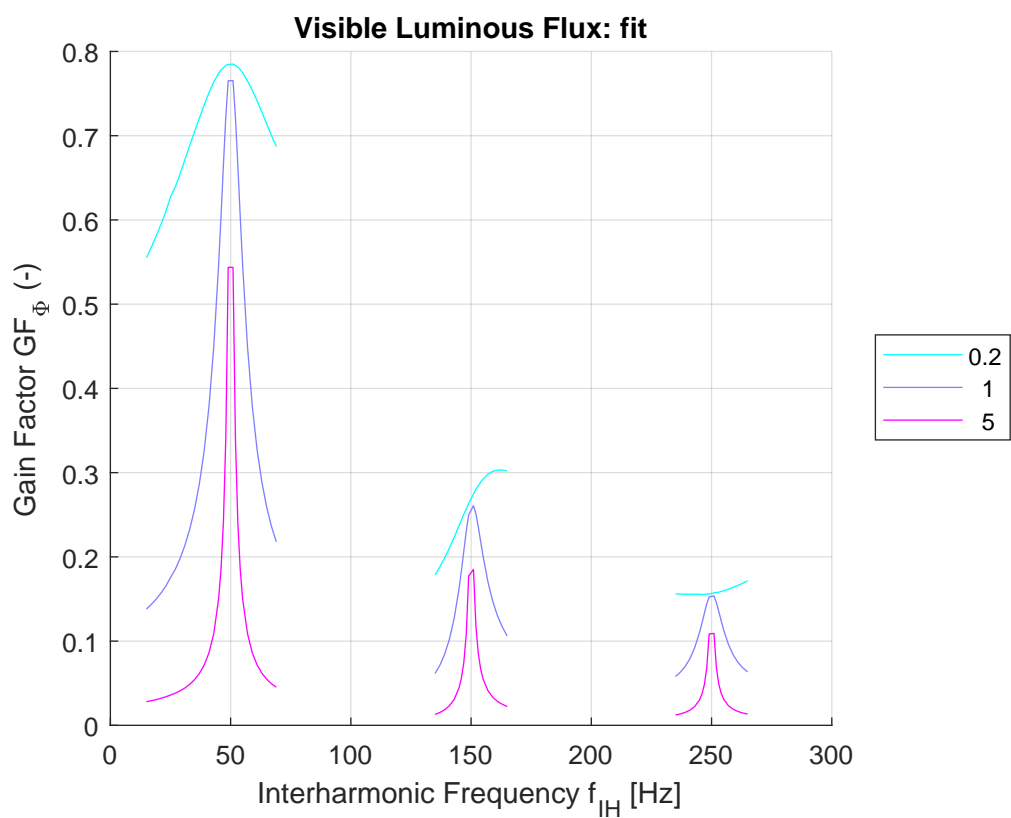


Figure C.2: Průběhy GF zjednodušeného modelu typu buck s PI regulátorem pro změněné hodnoty C_b v závislosti na koeficientu rozšíření

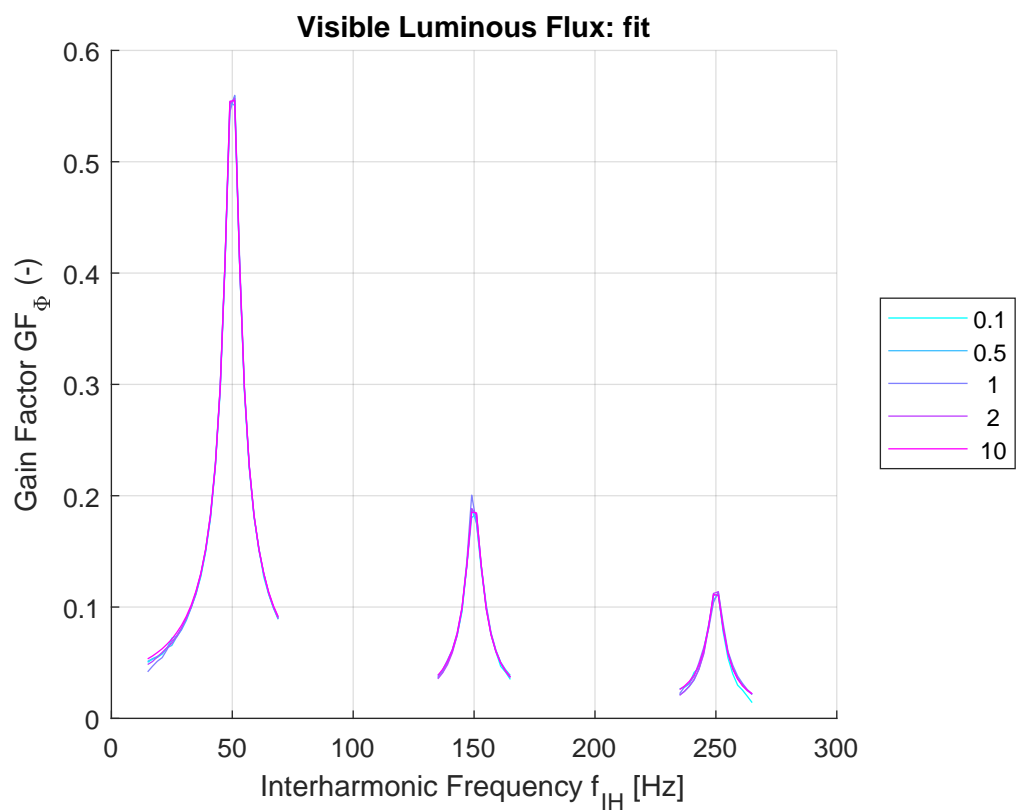


Figure C.3: Průběhy GF zjednodušeného modelu typu buck s PI regulátorem pro změněné hodnoty L_b v závislosti na koeficientu rozšíření

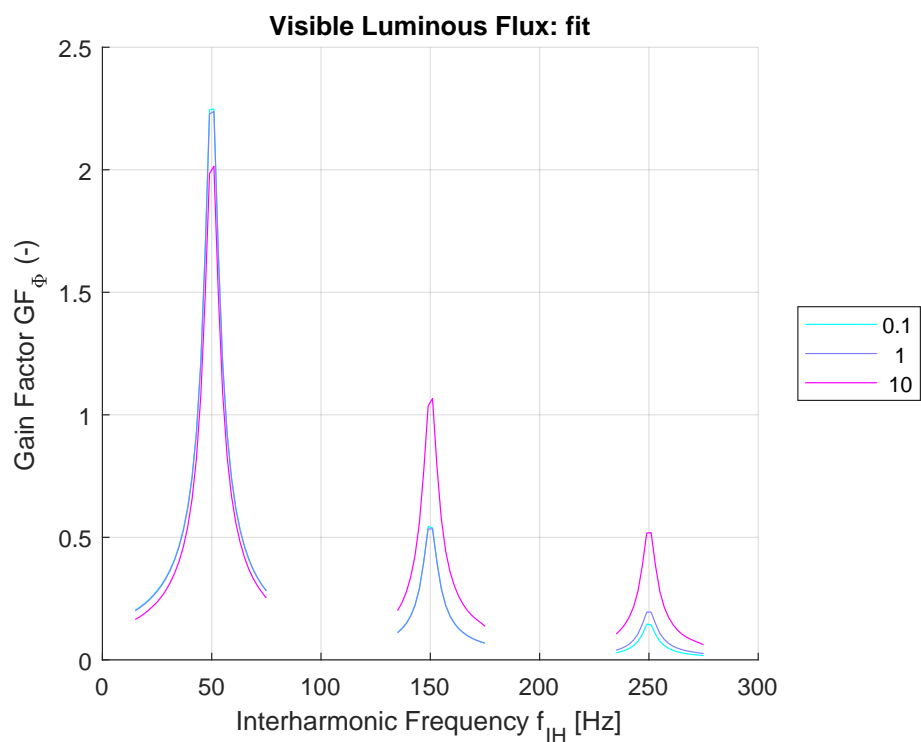


Figure C.4: Průběhy GF zjednodušeného modelu typu buck s PI regulátorem u pro změněné hodnoty C_{dc} v závislosti na koeficientu rozšíření

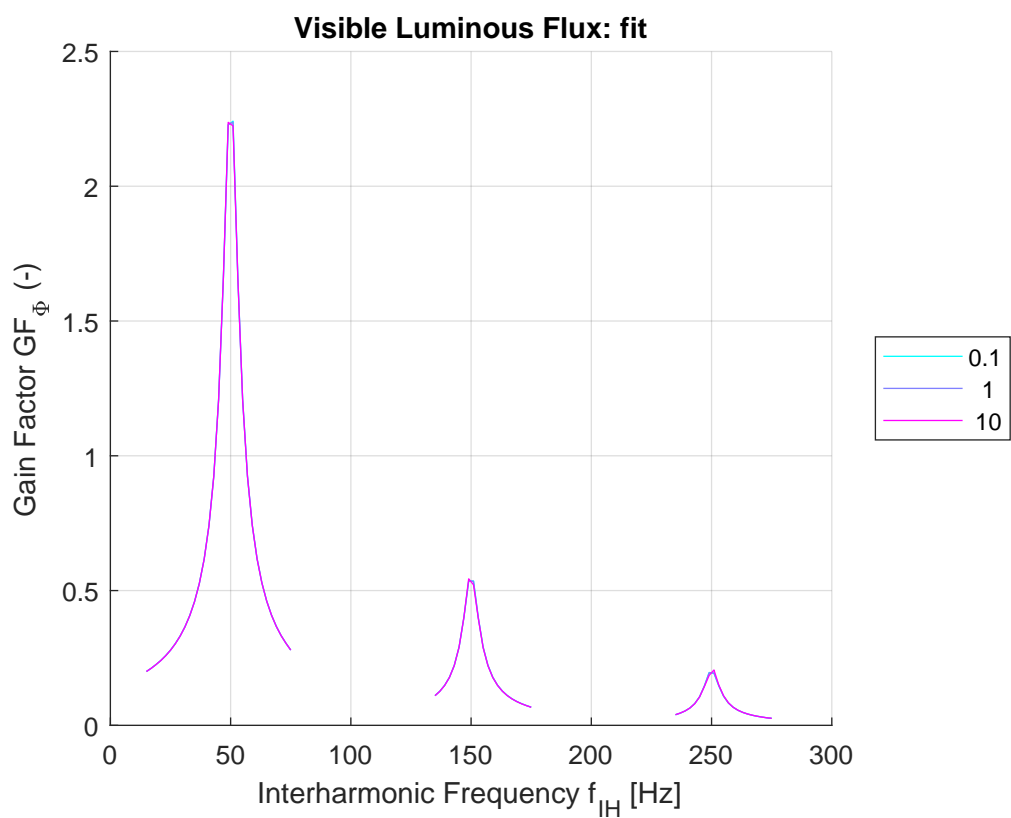


Figure C.5: Průběhy GF zjednodušeného modelu typu buck s PI regulátorem pro změněné hodnoty I v závislosti na koeficientu rozšíření

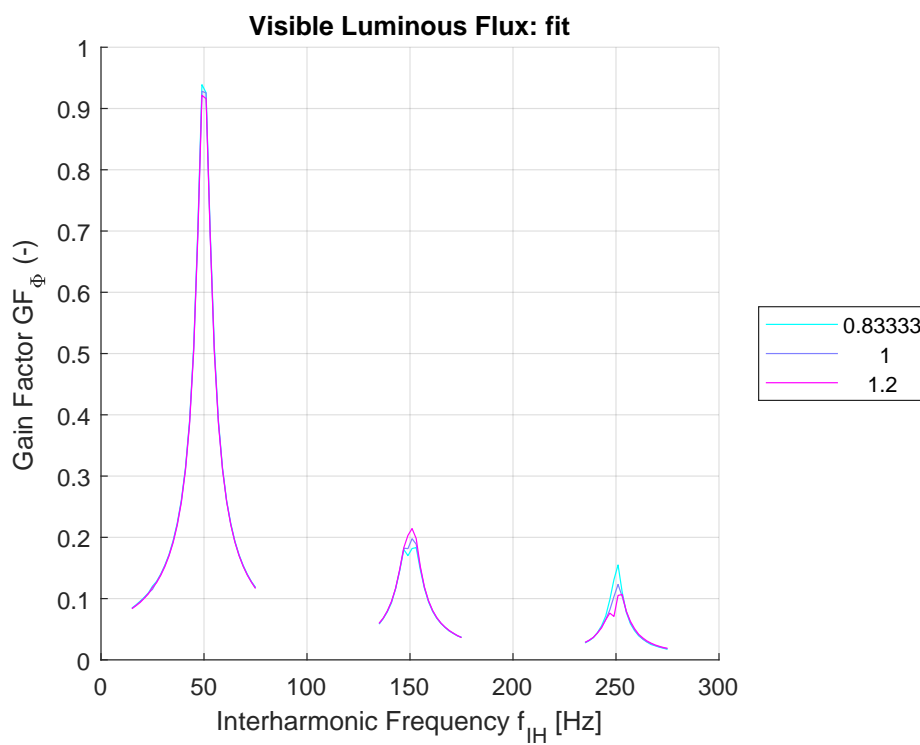


Figure C.6: Průběhy GF zjednodušeného modelu typu buck s PID regulátorem pro změněné hodnoty D v závislosti na koeficientu rozšíření

D Citlivostní analýzy zjednodušeného modelu typu buck s regulačním blokem Cpeak_AwSwC

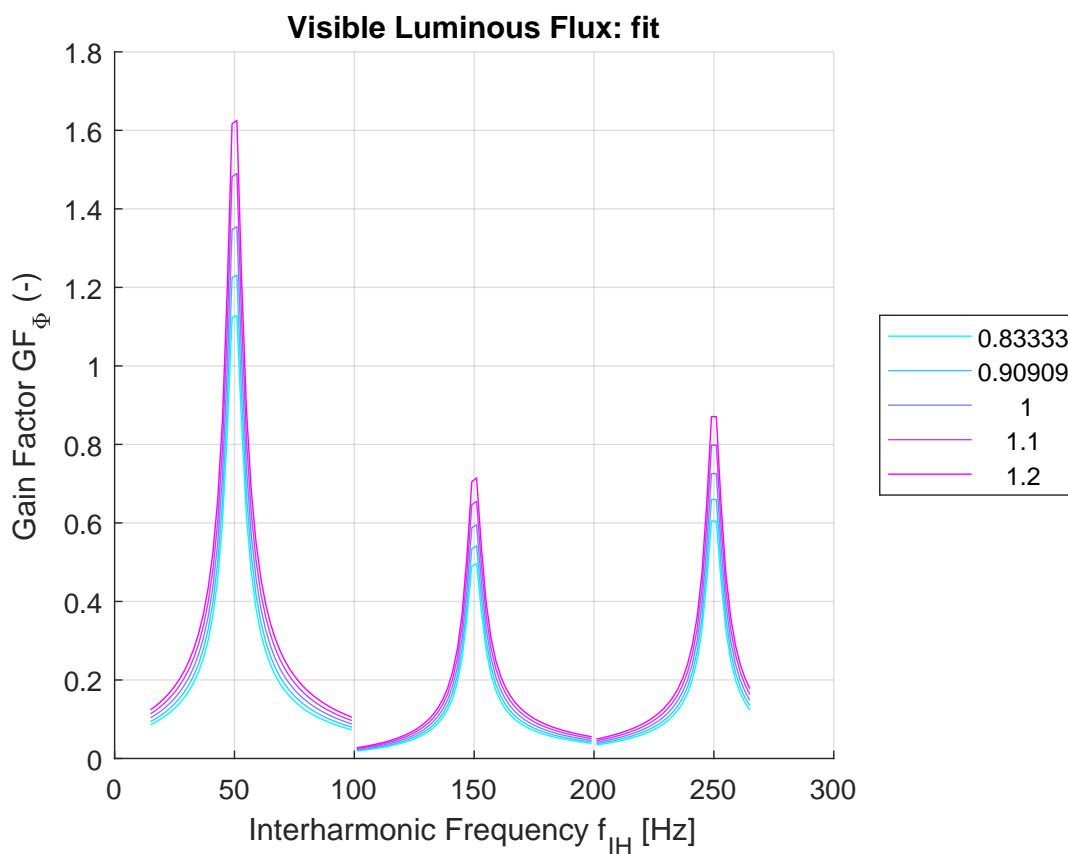


Figure D.1: Průběhy GF zjednodušeného modelu typu buck s regulačním blokem CPeak_AwSwC pro změněné hodnoty K v závislosti na koeficientu rozšíření

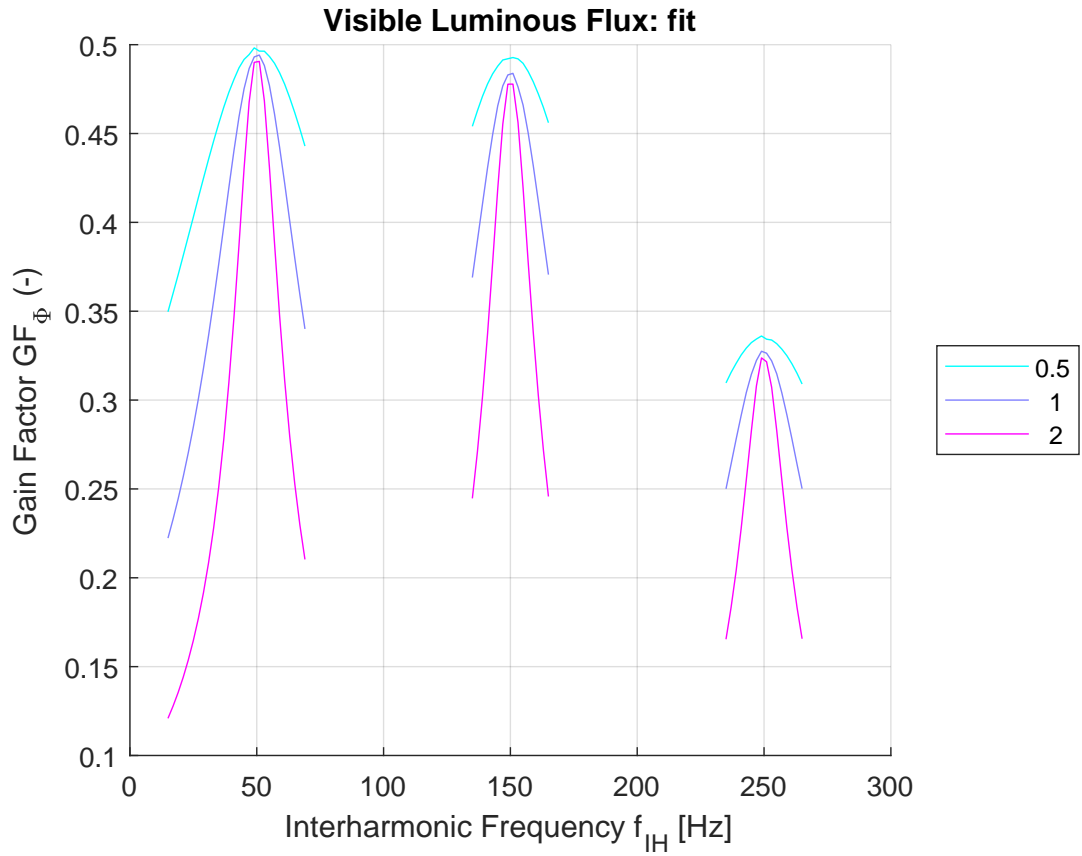


Figure D.2: Průběhy GF zjednodušeného modelu typu buck s regulačním blokem CPeak_AwSwC pro změněné hodnoty C_b v závislosti na koeficientu rozšíření

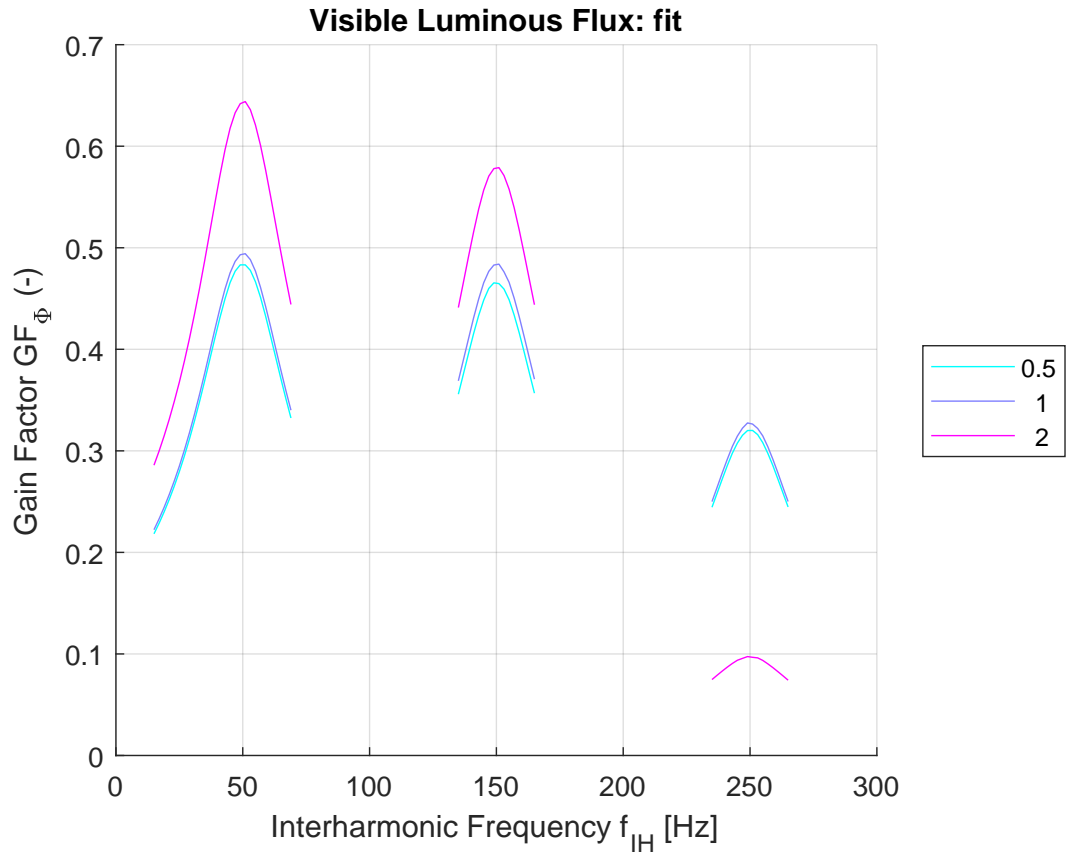


Figure D.3: Průběhy GF zjednodušeného modelu typu buck s regulačním blokem CPeak_AwSwC pro změněné hodnoty L_b v závislosti na koeficientu rozšíření

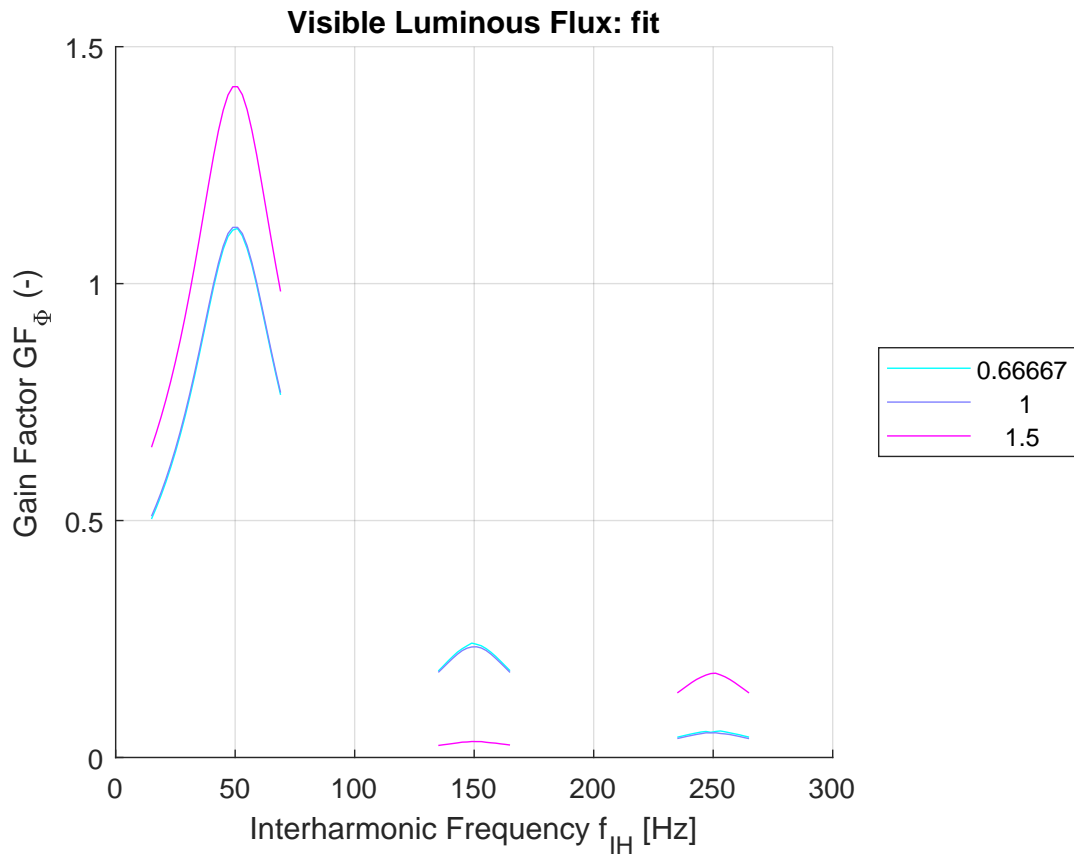


Figure D.4: Průběhy GF zjednodušeného modelu typu buck s regulačním blokem CPeak_AwSwC pro změněné hodnoty T_{ONmax} v závislosti na koeficientu rozšíření

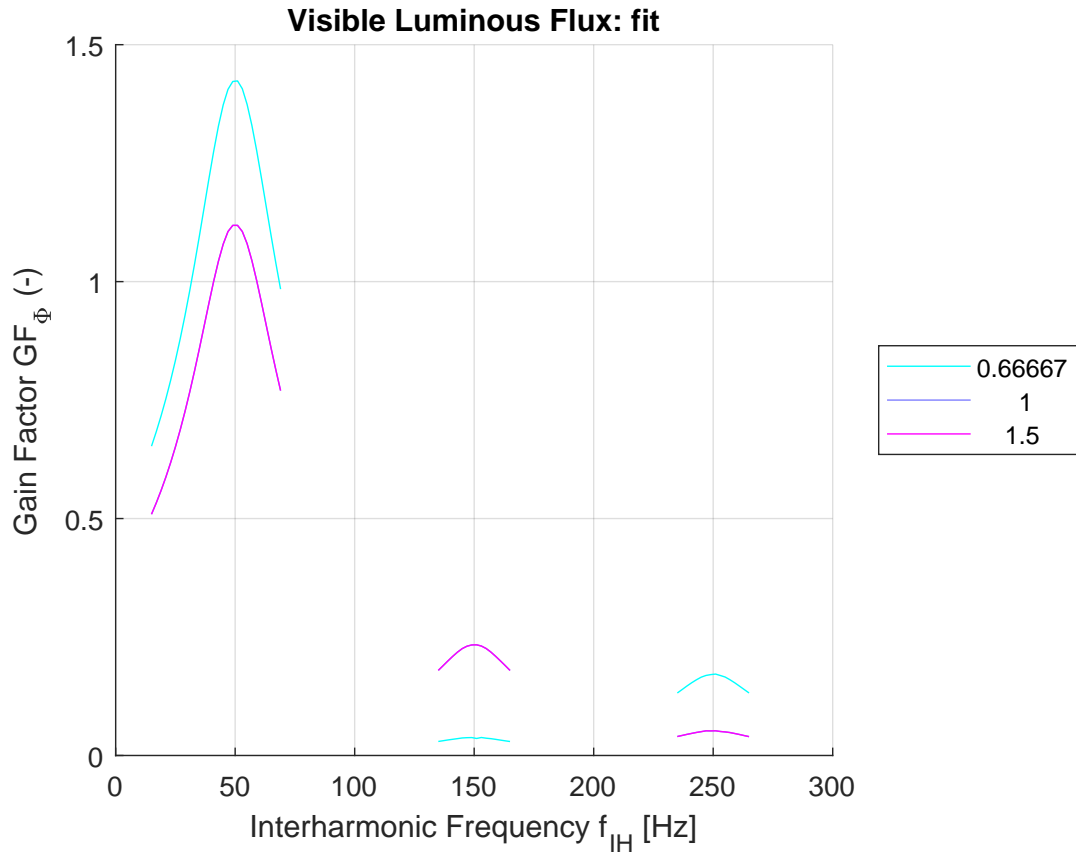


Figure D.5: Průběhy GF zjednodušeného modelu typu buck s regulačním blokem CPeak_AwSwC pro změněné hodnoty T_{OFFmax} v závislosti na koeficientu rozšíření

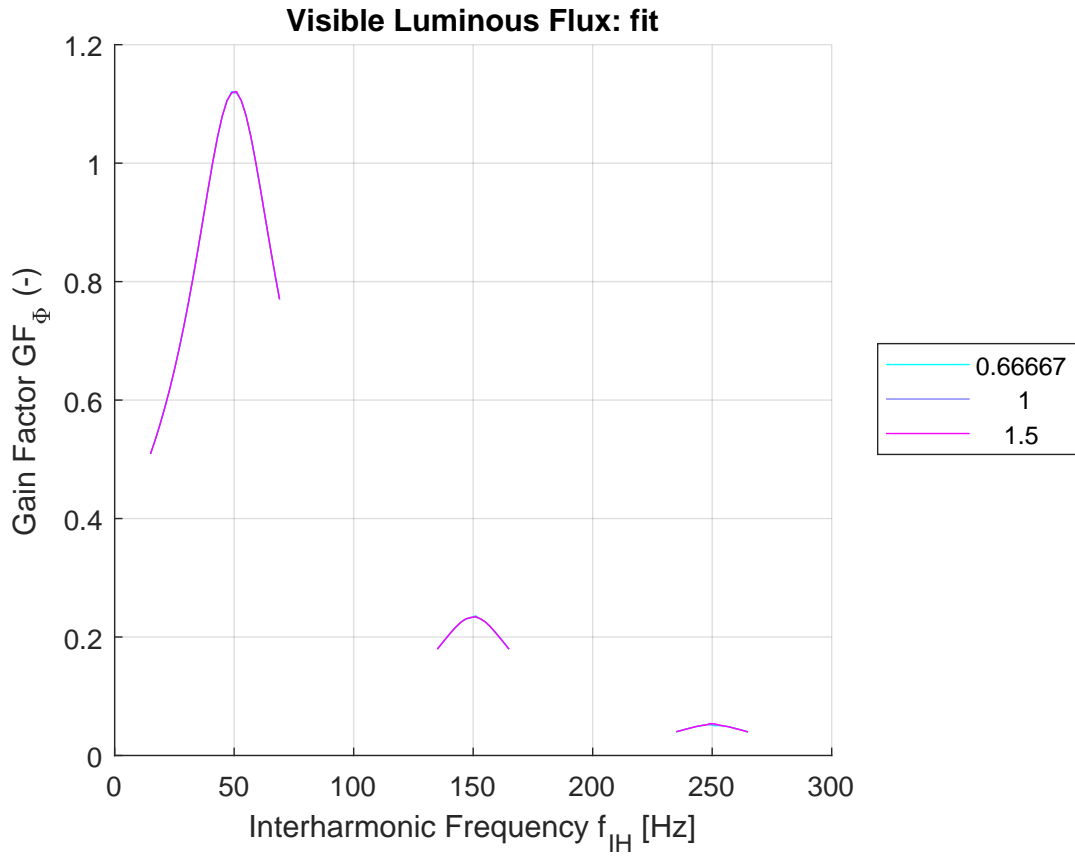


Figure D.6: Průběhy GF zjednodušeného modelu typu buck s regulačním blokem CPeak_AwSwC pro změněné hodnoty T_{OFFmin} v závislosti na koeficientu rozšíření

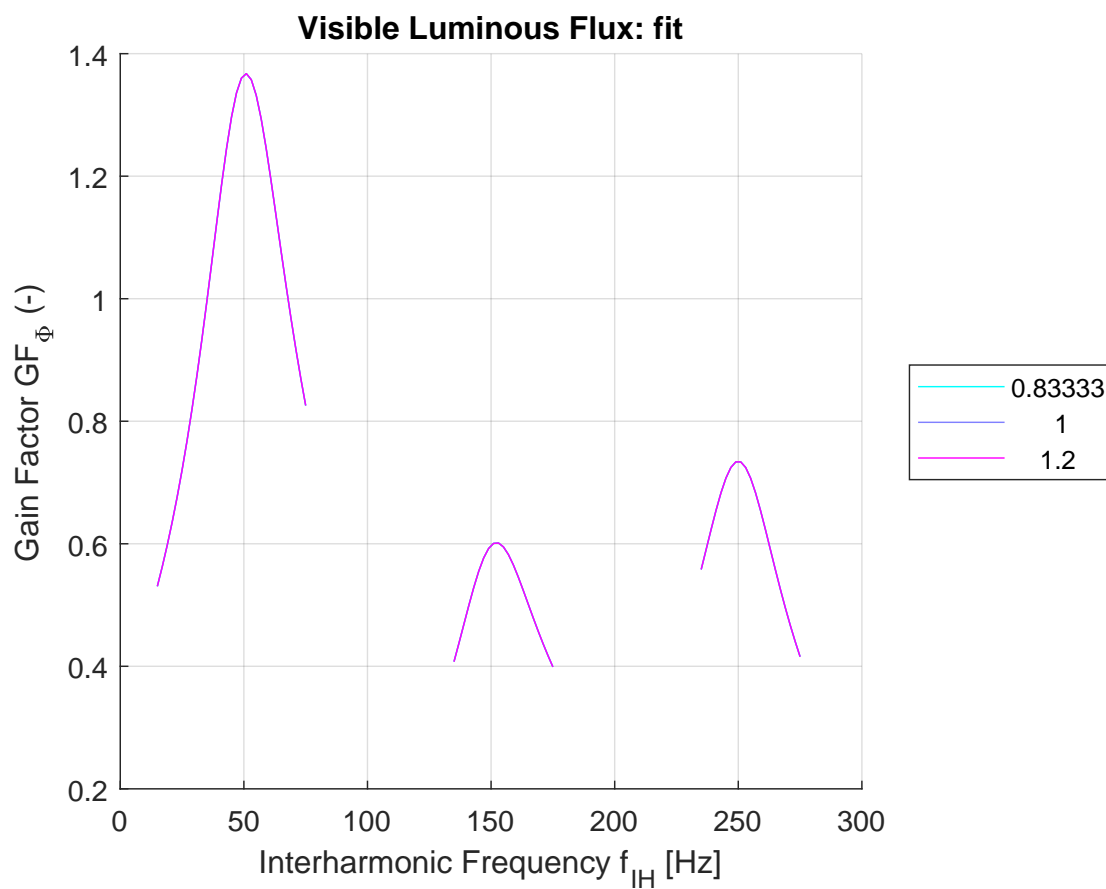


Figure D.7: Průběhy GF zjednodušeného modelu typu buck s regulačním blokem CPeak_AwSwC pro změněné hodnoty I_{pkmax} v závislosti na koeficientu rozšíření

E Citlivostní analýzy zjednodušeného modelu buck-boost s konstantní střídou

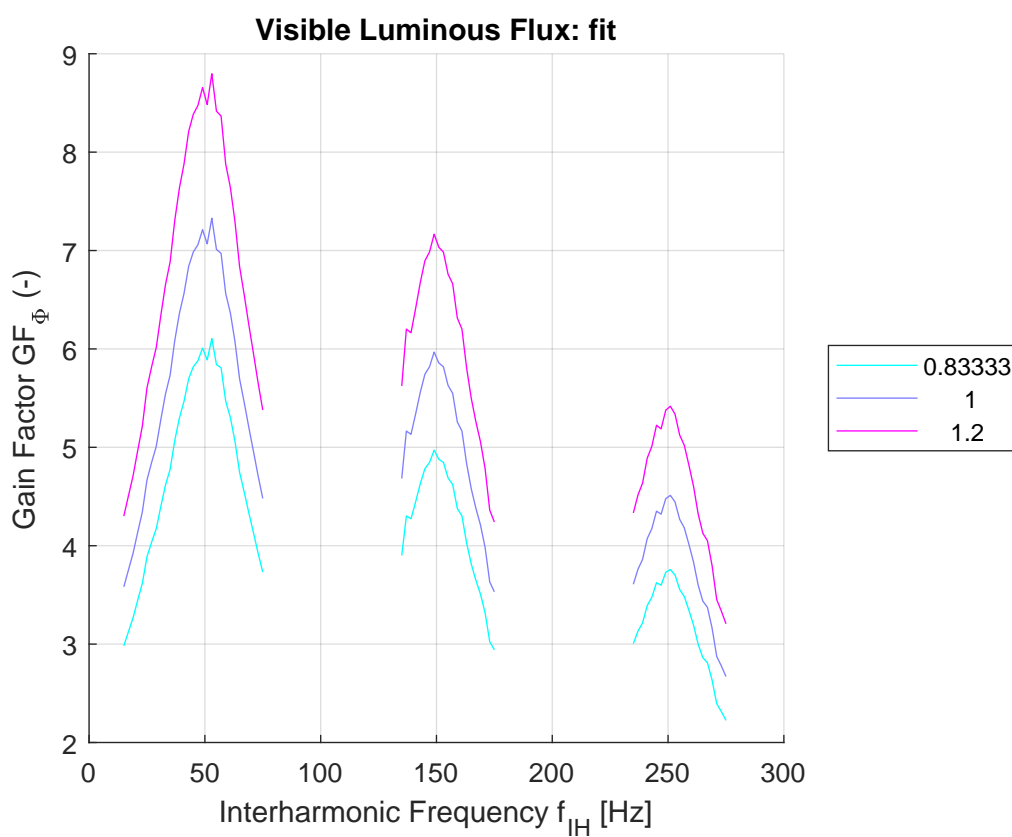


Figure E.1: Citlivostní analýza modelu buck-boost s konstantní střídou na parametr K v závislosti na koeficientu rozšíření

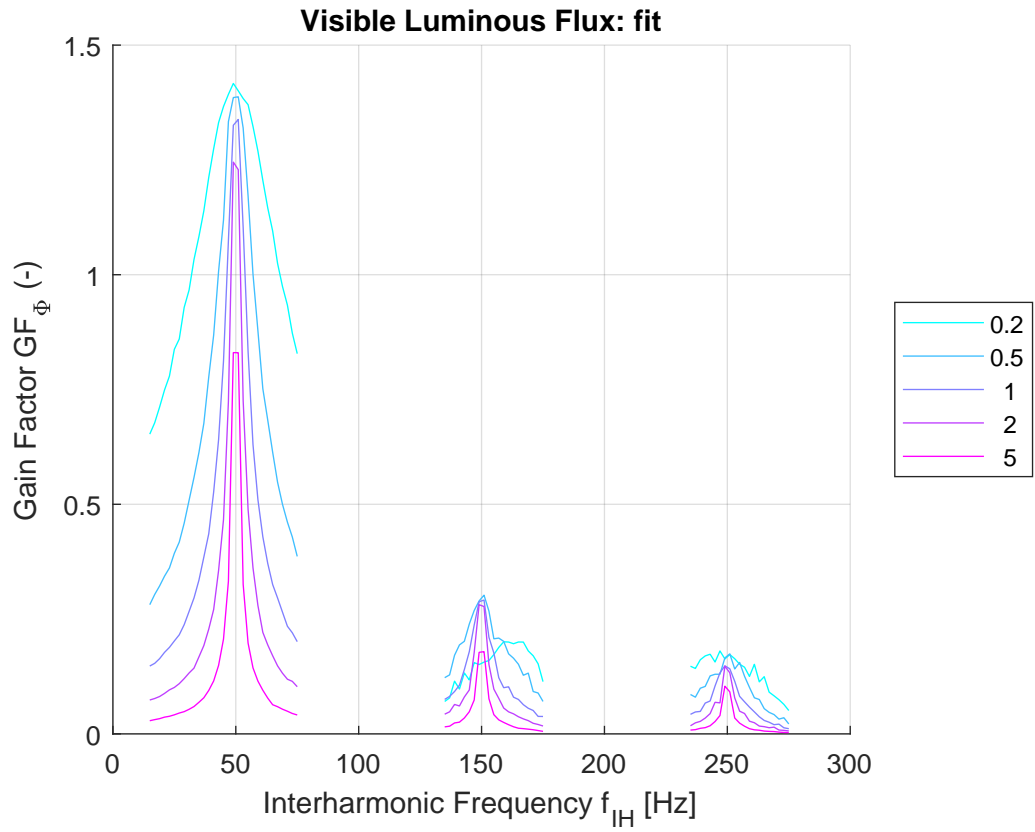


Figure E.2: Citlivostní analýza modelu buck-boost s konstantní střídou na parametr C_b v závislosti na koeficientu rozšíření

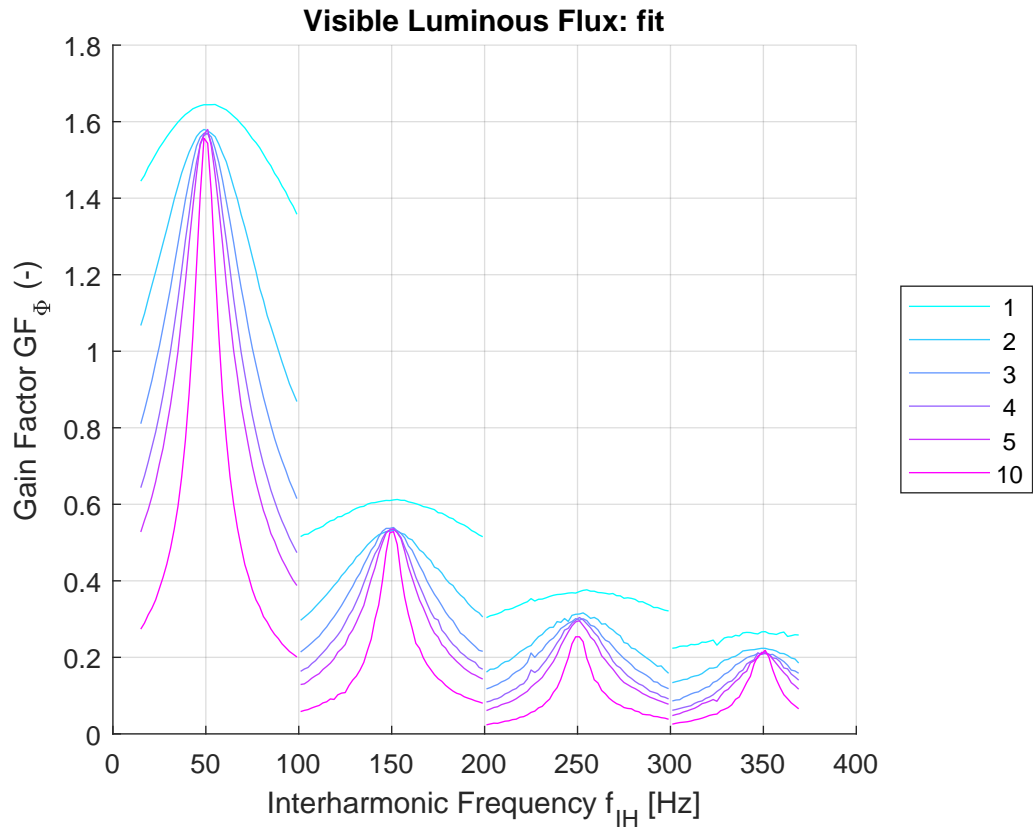


Figure E.3: Citlivostní analýza modelu buck-boost s konstantní střídou na parametr L_b v závislosti na koeficientu rozšíření

F Citlivostní analýzy zjednodušeného modelu buck-boost s PI regulátorem

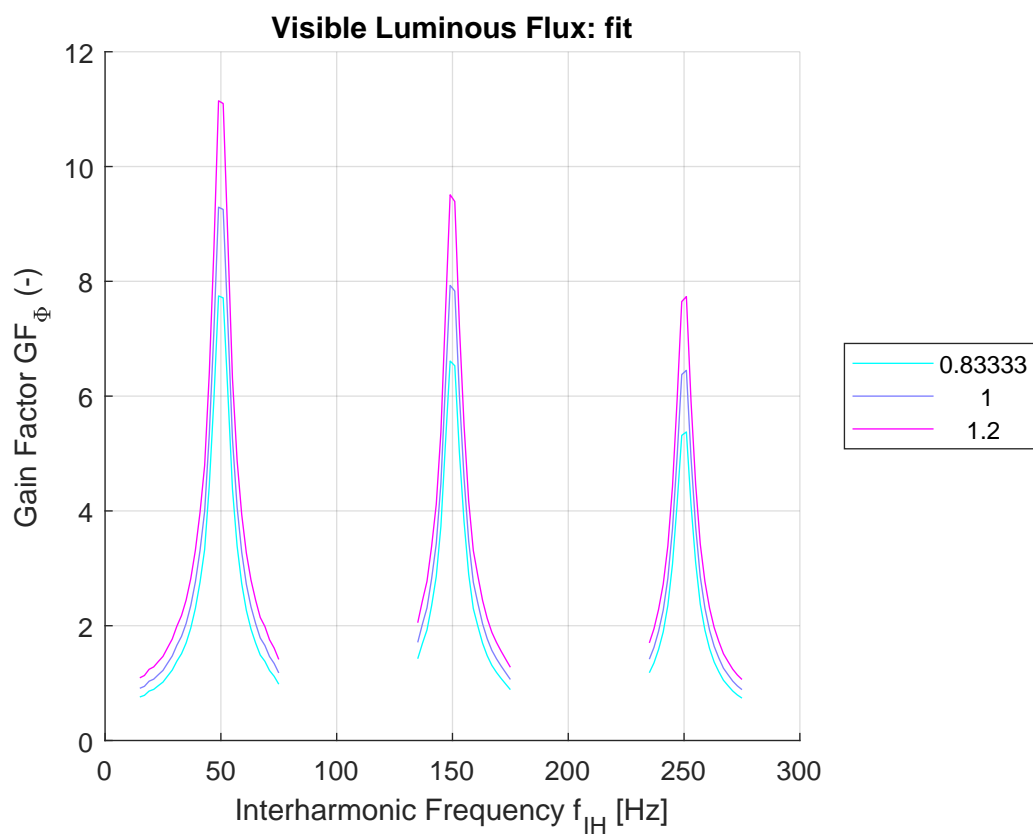


Figure F.1: Citlivostní analýza modelu buck-boost s PID regulací na parametr K v závislosti na koeficientu rozšíření

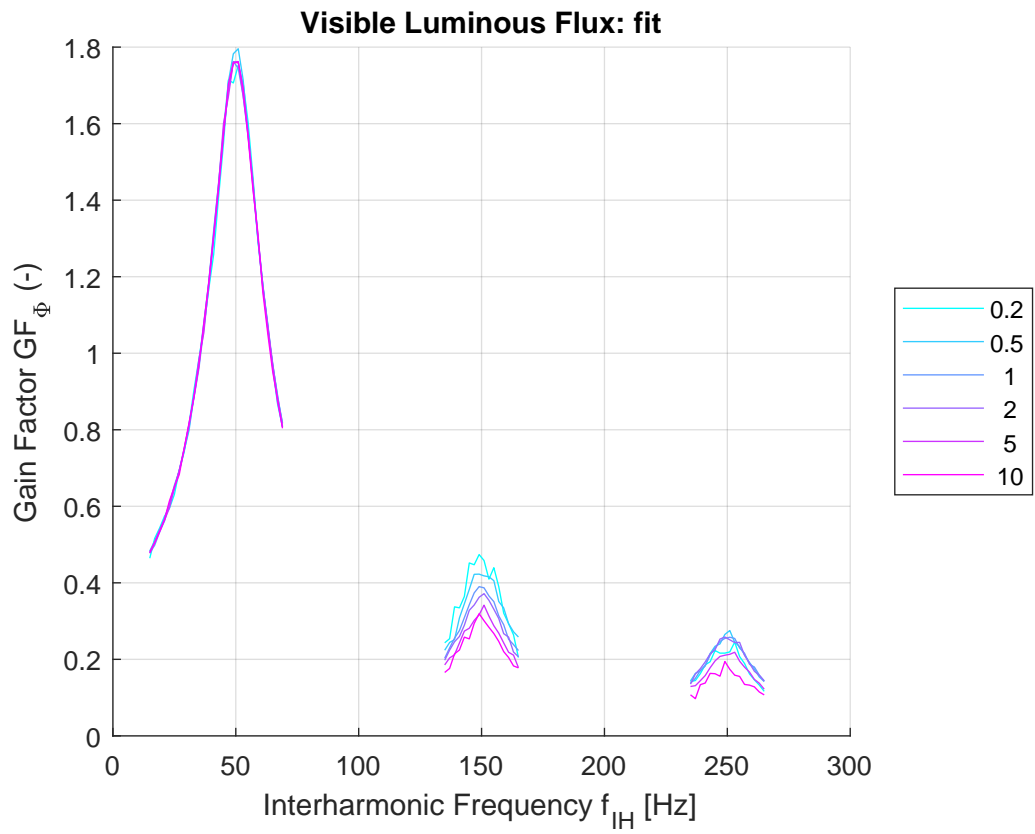


Figure F.2: Citlivostní analýza modelu buck-boost s PID regulací na parametr L_b v závislosti na koeficientu rozšíření

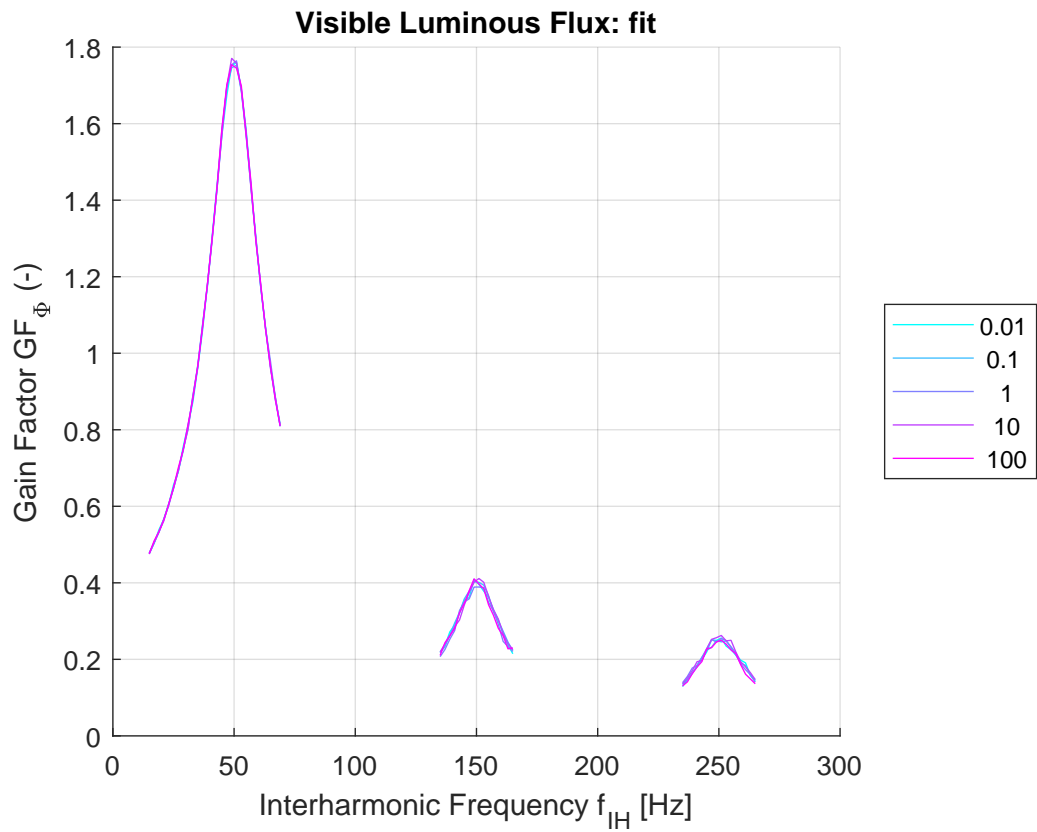


Figure F.3: Citlivostní analýza modelu buck-boost s PID regulací na parametr C_{dc} v závislosti na koeficientu rozšíření

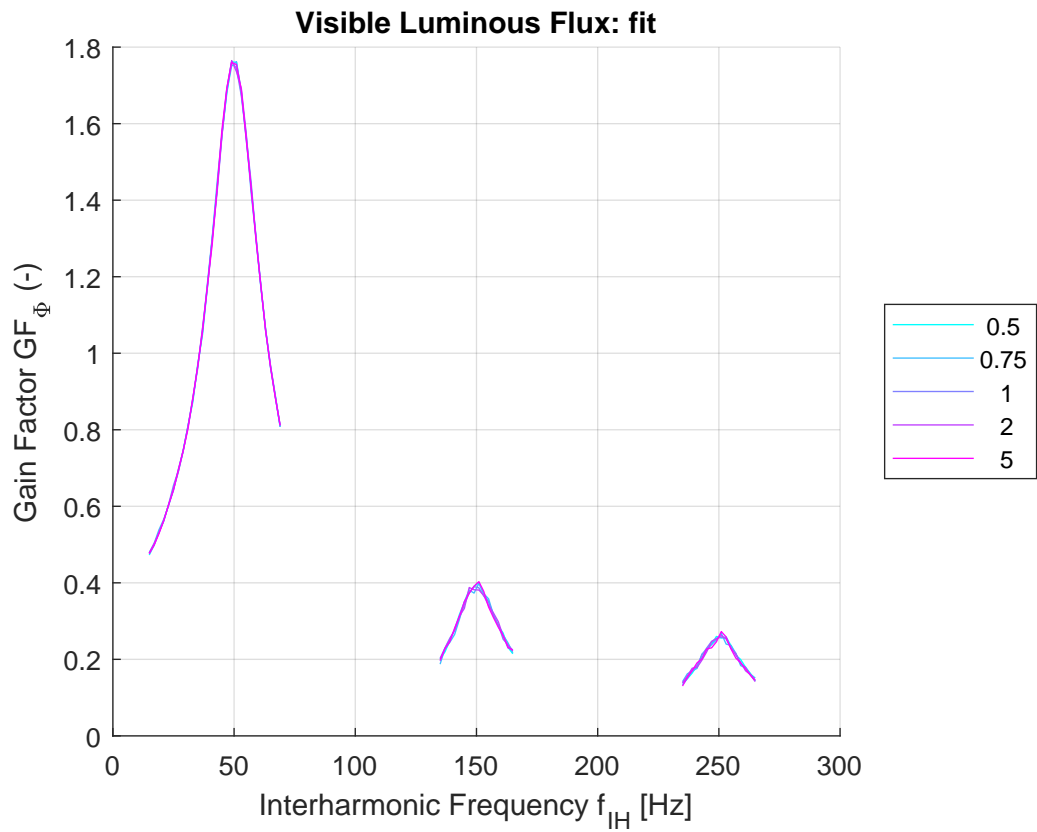


Figure F.4: Citlivostní analýza modelu buck-boost s PID regulací na parametr I v závislosti na koeficientu rozšíření

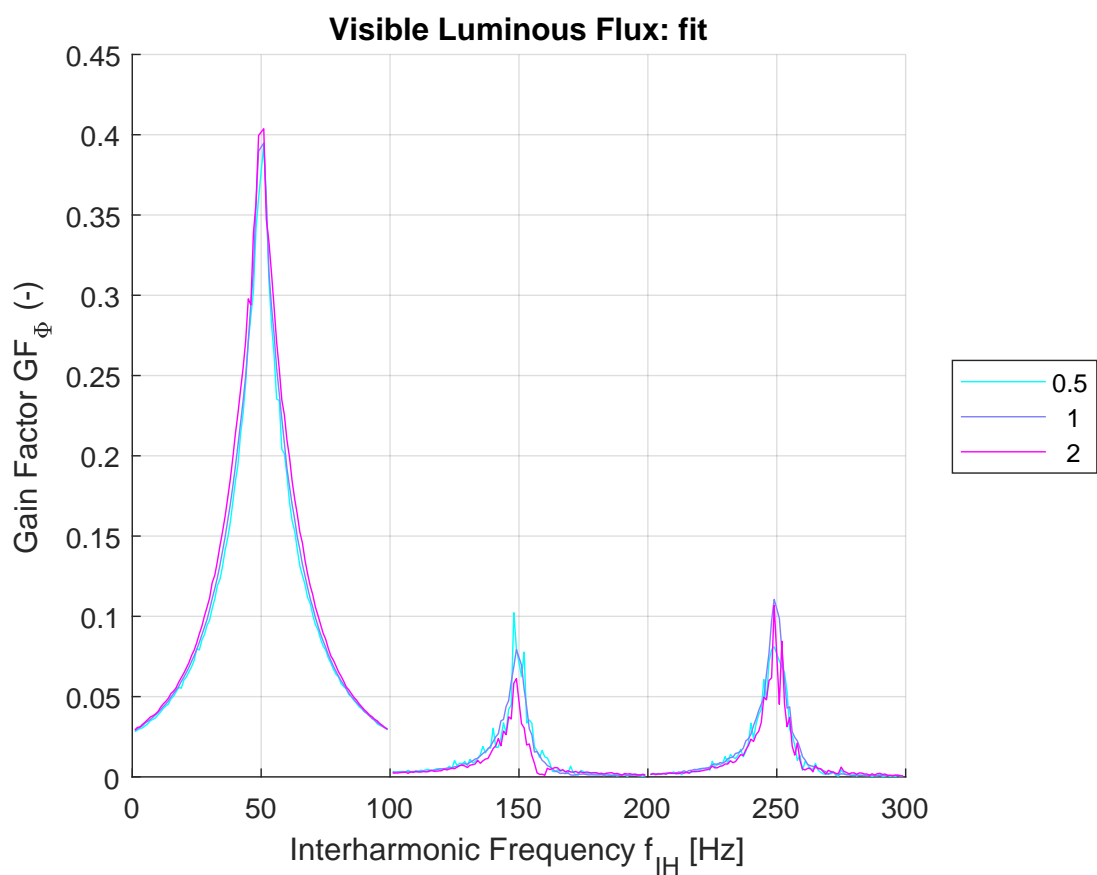


Figure F.5: Citlivostní analýza modelu buck-boost s PID regulací na parametr D v závislosti na koeficientu rozšíření

G Citlivostní analýzy zjednodušeného modelu typu buck-boost s regulačním blokem Cpeak_AwSwC

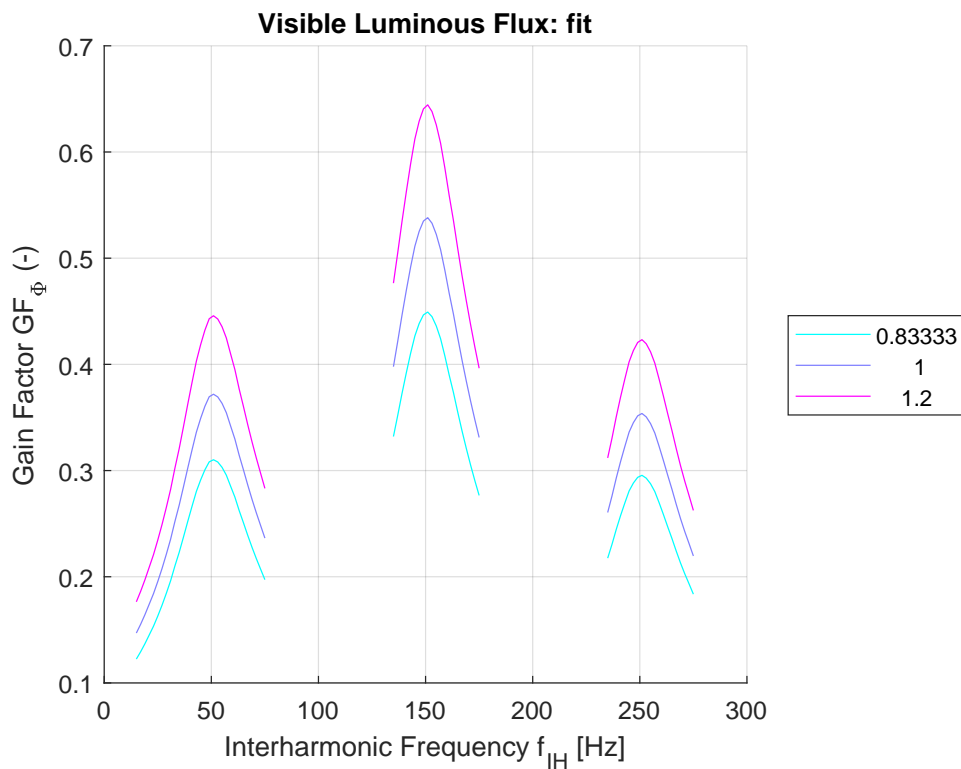


Figure G.1: Citlivostní analýza modelu buck-boost s regulačním blokem CPeak_AwSwC na hodnotu indukčnosti K v závislosti na koeficientu rozšíření

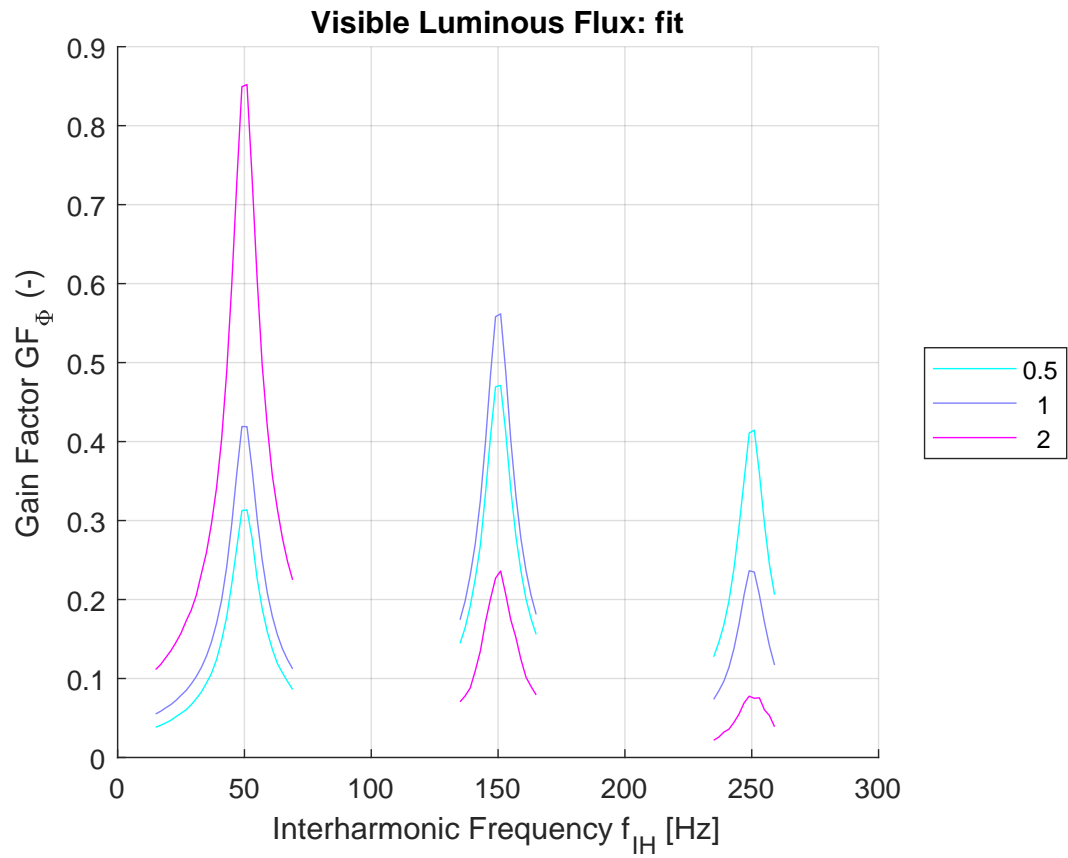


Figure G.2: Citlivostní analýza modelu buck-boost s regulačním blokem CPeak_AwSwC na hodnotu indukčnosti L_b v závislosti na koeficientu rozšíření

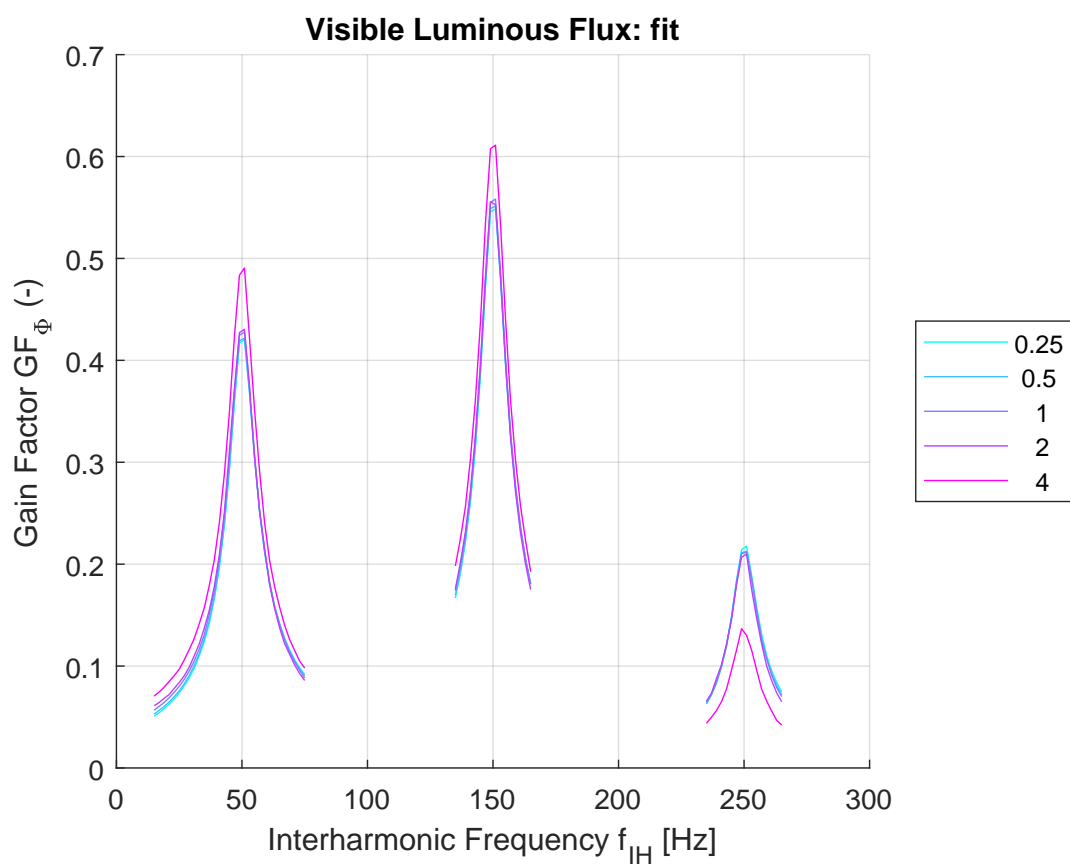


Figure G.3: Citlivostní analýza modelu buck-boost s regulačním blokem CPeak_AwSwC na parametr T_{OFFmin} v závislosti na koeficientu rozšíření

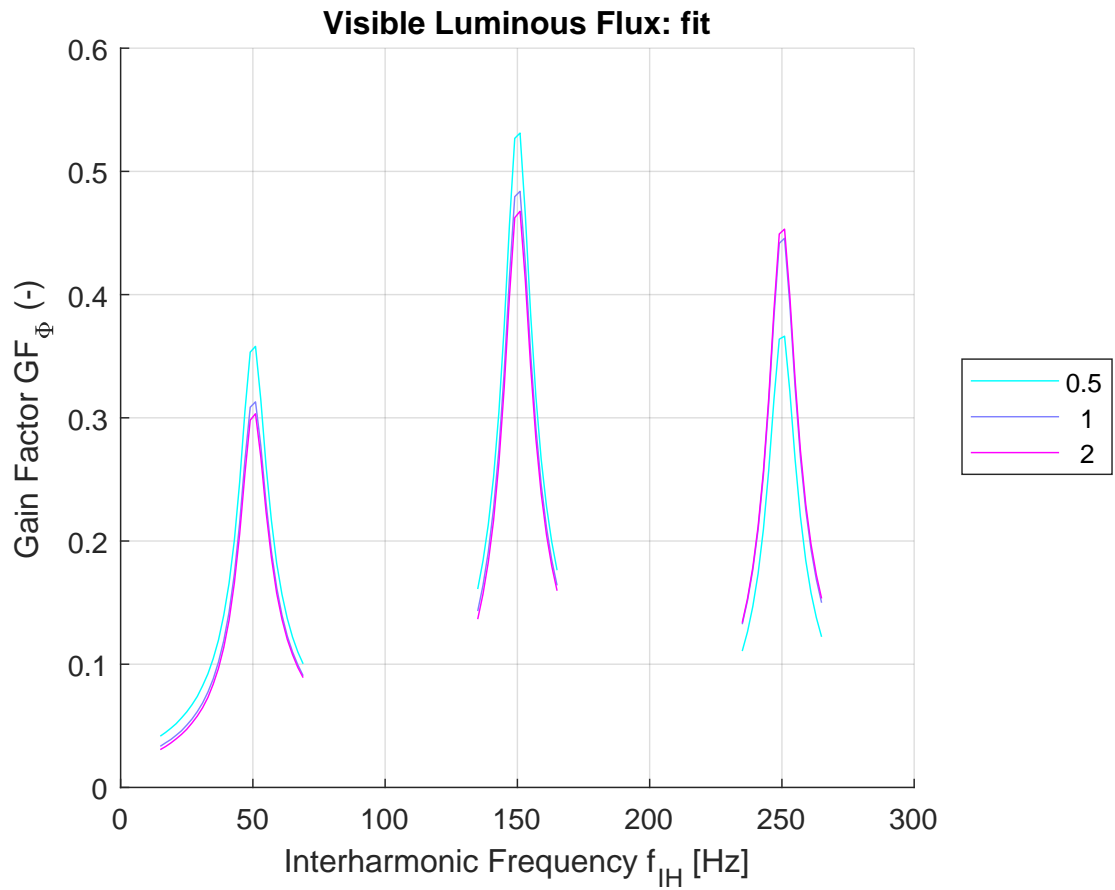


Figure G.4: Citlivostní analýza modelu buck-boost s regulačním blokem CPeak_AwSwC na parametr T_{ONmax} v závislosti na koeficientu rozšíření