



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## STABILITA NAPĚTÍ V NN SÍTÍCH ZATÍŽENÝCH MĚNIČI S AKTIVNÍ REGULACÍ NA KONSTANTNÍ VÝSTUP

VOLTAGE STABILITY IN LV DISTRIBUTION SYSTEMS LOADED BY CONVERTERS WITH CONSTANT  
OUTPUT REGULATION

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Čížek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

BRNO 2017



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**  
Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Ondřej Čížek

**ID:** 154693

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2016/17

## NÁZEV TÉMATU:

### **Stabilita napětí v NN sítích zatížených měniči s aktivní regulací na konstantní výstup**

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Spotřebiče s aktivní regulací na konstantní výstup
2. Analýza chování uvedených spotřebičů při standardních provozních stavech distribučních sítí s ohledem na stabilitu napětí
3. Parametrické modely měničů ve vybraném prostředí
4. Vymezení a provedení souboru simulací
5. Určení podmínek kritických pro stabilitu napětí

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 22.5.2017

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

ČÍŽEK, O. Stabilita napětí v NN sítích zatížených měniči s aktivní regulací na konstantní výstup. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2017, 56 stran.

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Stabilita napětí v NN sítích zatížených měniči s aktivní regulací na konstantní výstup jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 20. 5. 2017

.....

## **ABSTRAKT**

Tato práce obsahuje shrnutí problematiky napěťové stability sítě, které jsou zapříčiněny spotřebiči s konstantním výkonem na výstupu. Také obsahuje modely tohoto spotřebiče a výsledky simulací, které byly provedeny za účelem potvrzení vlivu spotřebičů s konstantním výkonem na výstupu na napěťovou stabilitu.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** stabilita napětí, zátěž s konstantním výkonem na výstupu

## **ABSTRACT**

This thesis contains a summary of voltage stability issues caused by appliances with constant load output. It also contains models of this appliance and outcomes of simulations done for the purpose of conformation of influence of appliances with constant output on voltage stability.

**KEY WORDS:** voltage stability, load with constant output

## OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	7
SEZNAM TABULEK .....	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>2 SKLADBA SPOTŘEBIČŮ.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 CHOVÁNÍ SPOTŘEBIČŮ S KONSTANTNÍM VÝKONEM NA VÝSTUPU .....</b>	<b>14</b>
2.1.1 STATICKÁ CHARAKTERISTIKA SPOTŘEBIČŮ S KONSTANTNÍM VÝKONEM NA VÝSTUPU .....	14
2.1.2 DYNAMICKÁ CHARAKTERISTIKA SPOTŘEBIČŮ S KONSTANTNÍM VÝKONEM NA VÝSTUPU .....	17
<b>2.2 STABILITA NAPĚTÍ V SÍTI.....</b>	<b>19</b>
2.2.1 STATICKÁ STABILITA NAPĚTÍ V SÍTI.....	20
2.2.2 DYNAMICKÁ STABILITA NAPĚTÍ SÍŤE.....	22
<b>3 MODEL SPOTŘEBIČE S KONSTANTNÍM VÝKONEM NA VÝSTUPU .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1 POŽADAVKY NA MODEL SPOTŘEBIČE S KONSTANTNÍM VÝKONEM NA VÝSTUPU .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2 PROVEDENÍ MODELU .....</b>	<b>24</b>
<b>3.3 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI MODELU .....</b>	<b>31</b>
3.3.1 OVĚŘENÍ STATICKÝCH VLASTNOSTÍ MODELU .....	31
3.3.2 OVĚŘENÍ DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ MODELU .....	33
<b>3.4 MODEL SPOTŘEBIČE S KONSTANTNÍM VÝKONEM NA VÝSTUPU S NEHARMONICKÝM ODBĚREM PROUDU.....</b>	<b>38</b>
3.4.1 PROVEDENÍ MODELU S NEHARMONICKÝM ODBĚREM PROUDU .....	39
3.4.2 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI MODELU S NESINUSOVÝM ODBĚREM .....	40
<b>3.5 MODEL ODBĚRU ČINNÉHO VÝKONU .....</b>	<b>41</b>
3.5.1 PROVEDENÍ MODELU ODBĚRU ČINNÉHO VÝKONU .....	41
3.5.2 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI MODELU ČINNÉHO VÝKONU.....	41
<b>4 VLIV SPOTŘEBIČE S KONSTANTNÍM VÝKONEM NA VÝSTUPU NA STABILITU NAPĚTÍ NN SÍŤE.....</b>	<b>43</b>
<b>4.1 MODEL NN SÍŤE.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2 VLIV SPOTŘEBIČŮ S KONSTANTNÍM VÝKONEM NA VÝSTUPU NA STATICKOU NAPĚŤOVOU STABILITU.....</b>	<b>43</b>
<b>4.3 VLIV SPOTŘEBIČŮ S KONSTANTNÍM VÝKONEM NA VÝSTUPU NA DYNAMICKOU STABILITU NAPĚTÍ .....</b>	<b>46</b>
<b>4.4 NÁVRH ŘEŠENÍ ZACHOVÁNÍ NAPĚŤOVÉ STABILITY SYSTÉMU .....</b>	<b>50</b>
<b>5 ZÁVĚR.....</b>	<b>52</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>53</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>54</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Rozložení spotřeby elektrické energie v rámci krajů [5].....</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 2: A/V charakteristiky žárovky pozitivní diferenciální impedance a negativní diferenciální impedance [7].....</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 3: Závislost činného výkonu zátěží na napětí [8] .....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 4: Statická charakteristika spotřebiče s konstantním výkonem na výstupu [4].....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 5: Zjednodušený model elektrického předřadníku pro fluorescenční výbojku [3] .....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 6: Průběh napětí a proudu u fluorescenční výbojky s elektrickým předřadníkem[3] .....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 7: Přehled nejčastěji používaných typů předřadníků pro spotřebiče s konstantním výkonem na výstupu s ohledem na průběh odebíraného proudu [3] .....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 8: Průběhy napětí a proudu pro aktivní PFC obvod [3] .....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 9: Schéma a fázorový diagram pro výpočet nosových křivek při zanedbání odporu[10] .....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 10: Nosové křivky [10] .....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 11: Schéma a fázorový diagram pro výpočet nosových křivek bez zanedbání odporu....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 12: Nosová křivka v závislosti na velikosti zatížitelnosti soustavy[1].....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 13: Vliv poruchy v síti na chování spotřebičů[8] .....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 14: Programovatelný model spotřebiče.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 15: Maska subsystému .....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 16: Subsystém zátěže v modelu .....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 17: Základní smyčka subsystému iLoop.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 18: Výpočet požadovaného reálného proudu .....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 19: Schéma subsystému Irpozadovany .....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 20: Schéma subsystému Urceni_Ir .....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 21: Úprava signálů proudů v subsystému iLoop .....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 22: Odměřená statická charakteristika činného výkonu modelu v závislosti na vstupním napětí.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 23: Odměřená statická charakteristika proudu modelu v závislosti na vstupním napětí</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 24: Odměřená statická charakteristika modelu pro přechod modelu do odporového tvaru a následného vypnutí.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 25: Dynamická charakteristika modelu pro nastavení konstantní zátěže.....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 26: Změna hodnoty činného výkonu v čase pro model nastavený na konstantní výkon ..</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 27: Dynamická charakteristika modelu pro nastavení odporové zátěže .....</i>	<i>35</i>

Obrázek 28: Dynamická charakteristika modelu pro nastavení konstantní zátěže s činným i jalovým výkonem .....	35
Obrázek 29: Změna hodnoty zdánlivého výkonu v čase pro model nastavený na konstantní výkon .....	36
Obrázek 30: Dynamická charakteristika modelu při poklesu napětí pod hodnotu $U_p$ .....	36
Obrázek 31: Změna činného výkonu v čase při poklesu napětí pod hodnotu $U_p$ .....	37
Obrázek 32: Dynamická charakteristika modelu pro nastavení nestability systému pomocí časových konstant.....	37
Obrázek 33: Dynamická charakteristika modelu pro nastavení delší integrační časové konstanty .....	38
Obrázek 34: Dynamická charakteristika modelu pro nastavení postupného nabíhání zatížení ....	38
Obrázek 35: Model subsystému „P zatez s menicem“ .....	39
Obrázek 36: Schéma výpočtu subsystému „iLoop“ pro model s nesinusovým odběrem.....	40
Obrázek 37: Dynamická charakteristika modelu nesinusového odběru v čase simulace 0,4 až 0,8 sekundy .....	40
Obrázek 38: Dynamická charakteristika modelu nesinusového odběru v čase simulace 0,9 až 1,3 sekundy .....	41
Obrázek 39: Dynamická charakteristika modelu „P zatez“ .....	42
Obrázek 40: Model NN síť .....	43
Obrázek 41: Změřená nosová křivka při zatížení odporovou zátěží .....	44
Obrázek 42: Změřená nosová křivka při zatížení zátěží s konstantním odběrem výkonu .....	45
Obrázek 43: Změřené nosové křivky pro jednotlivé modely při zatížení na konstantní výkon .....	46
Obrázek 44: Závislost napětí na odebíraném výkonu při poklesu napětí na $0,5U_n$ a jeho obnově pro různé poměry zátěží .....	47
Obrázek 45: Závislost napětí na odebíraném výkonu při poklesu napětí na $0,5U_n$ a jeho obnově pro různé zatížení spotřebičem s konstantním výkonem.....	48
Obrázek 46: Závislost napětí na odebíraném výkonu při různé velikosti poklesu napětí a jeho obnově při zatížení 10 kW konstantním výkonem .....	49
Obrázek 47: Simulace napětového kolapsu .....	50
Obrázek 48: Porovnání průběhů závislosti napětí na odebíraném výkonu při změně parametru $U_p$ .....	51
Obrázek 49: Dynamická charakteristika modelu v závislosti na změně exponentu alfa.....	54
Obrázek 50: Dynamická charakteristika modelu v závislosti na časových konstantách .....	55
Obrázek 51: Závislost napětí na odebíraném výkonu při různé velikosti poklesu napětí a jeho obnově při zatížení 5 kW konstantním výkonem .....	56
Obrázek 52: Závislost napětí na odebíraném výkonu při různé velikosti poklesu napětí a jeho obnově při zatížení 5 kW konstantním výkonem a 5 kW odporovou zátěží .....	56



---

## SEZNAM TABULEK

*Tabulka 1: Poměrné hodnoty spotřeby el. energie v ČR v jednotlivých odvětvích v procentech [6]*  
.....13

**SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**

ČR – Česká Republika

DC - stejnosměrné

E – napětí na zdroji

f – frekvence

I – proud

$I_m$  – amplituda proudu

KNZ – kontrolovaný napěťový zdroj

KPZ – kontrolovaný proudový zdroj

U – napětí

$U_n$  – jmenovité napětí

$U_p$  – napětí poklesu výkonu

$U_v$  – napětí vypnutí systému

$T_c$  – časová konstanta RC

$T_d$  – časová konstanta dolnoproústného filtru

$T_i$  – časová integrační konstanta

$T_p$  – doba náběhu spotřebiče do plného zatížení

$T_v$  – doba vypnutí spotřebiče

$T_z$  – čas zapnutí spotřebiče

P – činný výkon

PFC – korekce power faktoru (power factor correction)

$P_n$  – jmenovitý činný výkon

R – odpor

$R_n$  – jmenovitý odpor

$R_0$  – paralelní odpor k zátěži dosahující 1/1000 jmenovitého výkonu

S – zdánlivý výkon

$S_k$  – zkratový výkon sítě

Q – jalový výkon

$Q_n$  – jmenovitý jalový výkon

Umeas – měření napětí

X – reaktance

$\alpha$  – parametr napěťové závislosti činného výkonu

$\beta$  – parametr napěťové závislosti jalového výkonu

$\lambda$  – zatížitelnost soustavy

$\lambda_{\max}$  – maximální zatížitelnost soustavy

$\varphi$  – rozdílový úhel mezi napětím a proudem

$\omega$  – úhlová rychlost

# 1 ÚVOD

Posledních několik let se začalo poměrně výrazně měnit složení spotřebičů používaných průmyslem i domácnostmi. Spotřebiče, které mají z hlediska sítě proměnlivý odběr výkonu v závislosti na napětí, jsou nahrazovány produkty s konstantním výkonem na výstupu. Jsou to především jednofázové vodiče se vstupními jednofázovými měniči. Tuto charakteristiku například splňují spínané zdroje, nebo různé druhy předřadníků ve světelné technice. Jako další příklady těchto spotřebičů si můžeme uvést například nabíječky k telefonům a notebookům, nebo zdroje PC. U světelných zdrojů dochází k výměně klasických zdrojů s odporovým charakterem za zdroje využívající měniče.

Jelikož je většina těchto přístrojů volně prodejných, tak nelze regulovat počet současně připojených spotřebičů v síti s touto charakteristikou. S rostoucí poptávkou po těchto spotřebičích je možné, že v budoucnu bude tvořit tento typ majoritní spotřebu výkonu v určitých oblastech.

Důvod využívání těchto zdrojů je jasný. Měníče mají daleko větší efektivnost než klasické zdroje a dodávají stabilní výkon, který je z hlediska spotřebičů velmi žádaným. Z hlediska sítě ovšem mohou mít jednu velmi nepříjemnou vlastnost, a to že zhoršují její napěťovou stabilitu. To je zapříčiněno jejich zpětnou aktivní regulací. Při poklesu napětí v síti, zdroj zvýší odebíraný proud. Tím sice udrží dodávaný konstantní výkon, ovšem větší průchozí proud zapříčiní větší úbytek napětí v síti, což opětovně způsobí zvýšení odběru proudu.

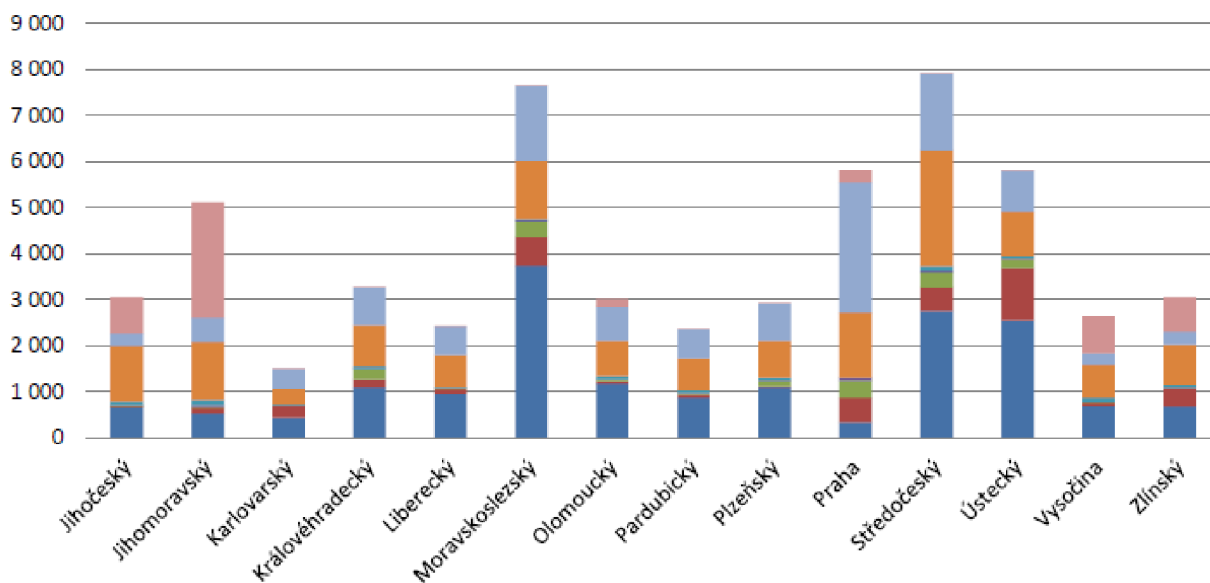
Tento efekt je problematický zejména vzhledem k výrobcům těchto zdrojů, kteří je vyrábějí unifikované pro více napěťových hladin. Zdroje jsou pak schopny plnit funkci odebírání konstantního výkonu i při velkých poklesech napětí.

Cílem této práce je popsání problematiky využívání spotřebičů s konstantním výkonem na výstupu. Dále namodelování takového spotřebiče a provedení jeho analýzy s ohledem na stabilitu napětí. Poté využití celého modelu k analýze účinku spotřebičů na napěťovou stabilitu sítě.

Abychom celou problematiku správně pochopili, musíme si nejprve určit důvody, proč daný problém řešíme a popsat základní principy dané problematiky. Důvod, proč danou problematiku řešíme je poměrně prostý, a to je zajištění stabilního chodu sítě. Proto si prvně musíme správně popsat stav sítě, ve kterém se právě nachází. Jelikož se v této práci soustředíme na spotřebiče s aktivní regulací na konstantní výkon, tak je pro nás důležité, jak velkou část spotřebičů v dnešní době zastávají a jakou by mohly v budoucnu zastávat. Další důležitou informací je pro nás jejich napěťová závislost, čímž se dostáváme k dalšímu bodu, který musíme popsat, a to je stabilita sítě z hlediska napětí, o kterou nám jde v první řadě.

## 2 SKLADBA SPOTŘEBIČŮ

Spotřeba elektrické energie vzhledem k použitým spotřebičům se pro naše účely modelování musí vždy vázat k určitému regionu. V grafu níže (Obrázek 1) máme rozloženou spotřebu ČR za rok 2015 podle jednotlivých krajů. Hodnoty v grafu jsou uvedeny v GWh. Modrá barva značí průmyslovou spotřebu, oranžová spotřebu domácností, světle modrá je spotřeba v rámci obchodu, služeb, školství a zdravotnictví, zelená je spotřeba v rámci dopravy, červená značí spotřebu v energetice a růžová spotřebu ostatních odvětví.



Obrázek 1: Rozložení spotřeby elektrické energie v rámci krajů [5]

Je více než jasné, že každá z výše jmenovaných odvětví má jiné složení spotřebičů, a tedy pro každou oblast by se musel praktikovat jiný model zátěže. Například v Moravskoslezském kraji dosahuje průmyslová spotřeba téměř poloviny z celkové spotřeby celého kraje (48,8 %). Oproti tomu v Jihomoravském kraji se podíl průmyslu na spotřebě podílí z „pouhých“ 10,35%. V Praze zase převládá spotřeba v rámci obchodu, služeb školství a zdravotnictví, která zde tvoří 48,8% celkové spotřeby elektrické energie. Celostátní průměr udává spotřebu v rámci obchodu a služeb v ČR okolo 22%, což jasně ukazuje potřebu modelu právě pro daný region[5].

Pro model, který chceme použít pro odhad chování sítě v budoucnu, je důležitý předpoklad rozložení spotřeby v příštích letech. Pro takový případ je nejlepší se podívat na historii vývoje v posledních několika letech. Například do tabulky níže (Tabulka 1).

Tabulka 1: Poměrné hodnoty spotřeby el. energie v ČR v jednotlivých odvětvích v procentech [6]

	Průmysl	Energetika	Doprava	Stavebnictví	Zemědělství	Domácnosti	Služby	Ostatní
2001	34,34	19,45	3,87	0,58	2,32	21,77	9,39	8,25
2013	33,61	17,40	4,69	0,47	1,73	20,99	9,73	11,37
Rozdíl	- 0,73	- 2,05	+ 0,82	- 0,11	- 0,59	- 0,78	+ 0,34	+ 3,12

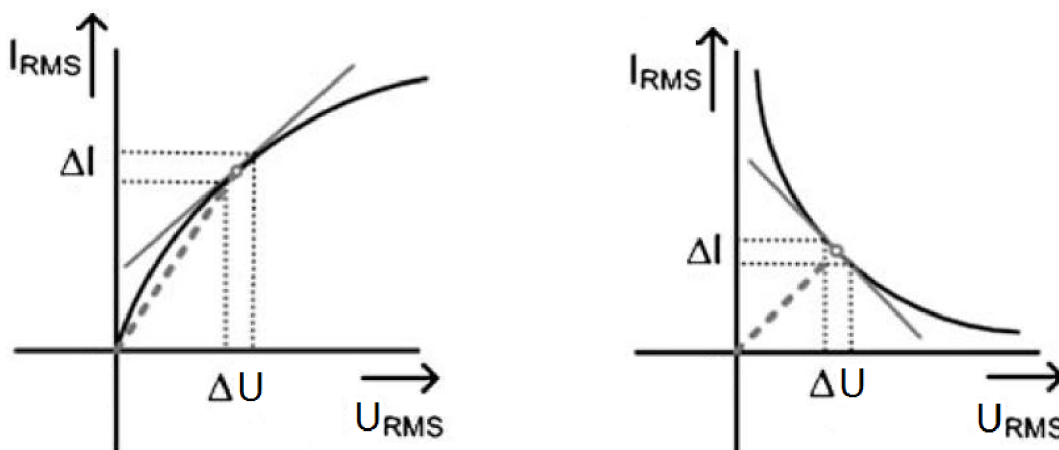
Dále se musíme podívat na složení spotřebičů v rámci jednotlivých odvětví. Rozdělení pouze do odvětví jako je průmysl, může být totiž velmi zavádějící. Bylo by chybou předpokládat, že bude stejné složení spotřebičů v průmyslu, například v Moravskoslezském kraji, kde je velká část těžkého průmyslu a v průmyslu kraje Středočeského, kde má silné zastoupení průmysl automobilový. Takhle bychom mohli jmenovat i další odvětví až na jediné, a to jsou domácnosti. V rámci domácností se dá předpokládat, že v rámci jednotlivých krajů bude složení spotřebičů velmi podobné.

## 2.1 Chování spotřebičů s konstantním výkonem na výstupu

V předchozím textu jsme si určili, jaké složení spotřebičů můžeme očekávat v závislosti na místě, pro které bychom chtěli daný model použít. Z toho můžeme vyvodit, že může v síti nastat okamžik, kdy budou velkou část zátěže tvořit spotřebiče s konstantním výkonem na výstupu. Pro nás je ovšem velmi důležité znát jejich chování s ohledem na jejich napěťovou charakteristiku.

### 2.1.1 Statická charakteristika spotřebičů s konstantním výkonem na výstupu

Obecně můžeme říct, že spotřebiče s konstantním výkonem na výstupu jsou tvořeny vždy měničem. Tento měnič vytváří pro spotřebič stejnosměrné napětí, které je závislé na napětí střídavém ze sítě. Z tohoto důvodu, když stoupne napětí sítě, tak stoupne i napětí stejnosměrné. Elektronika ve snaze udržet konstantní výkon zařízení sníží průtok proudu. V případě poklesu napětí sítě je proces opačný, tedy proud vzroste. Tento efekt může vést k nestabilitě napětí v síti. Tento typ impedance můžeme nazvat negativní diferenciální impedancí a je vidět na obrázku pod textem vpravo (Obrázek 2)[7].



Obrázek 2:  $A/V$  charakteristiky žárovky pozitivní diferenciální impedance a negativní diferenciální impedance [7]

Z charakteristiky pozitivní diferenciální impedance je patrné, že její výkon je závislý na napětí sítě. V případě růstu napětí roste i proud, a tedy i celkový výkon stoupá, nebo opačně s klesajícím napětím klesá i proud. Při zvýšení napětí v síti tedy vzniká větší proud, a proto ovšem vznikají větší úbytky napětí na síti, které způsobí následné snížení odběru proudu, a tedy působí samoregulačně, protože omezuje účinky výkyvu napětí, což pomáhá s udržení napěťové stability. Postupným nahrazováním spotřebičů s charakteristikou podobné pozitivní diferenciální impedance za spotřebiče s negativní diferenciální impedancí (spotřebiče s konstantním výkonem na výstupu) ovšem může způsobit vážné problémy s ohledem na stabilitu napětí.

Je tedy patrné, že odebíraný činný výkon spotřebičů se může měnit v závislosti na napětí v síti. Tento efekt lze popsat jednoduše následující rovnicí:

$$P = P_n \cdot \left( \frac{U}{U_n} \right)^\alpha \quad (1)$$

Kde  $P$  značí aktuální odebíraný činný výkon spotřebiče  
 $P_n$  značí jmenovitý činný výkon spotřebiče  
 $U$  značí aktuální napětí sítě  
 $U_n$  značí jmenovité napětí  
 $\alpha$  značí parametr napěťové závislosti činného výkonu

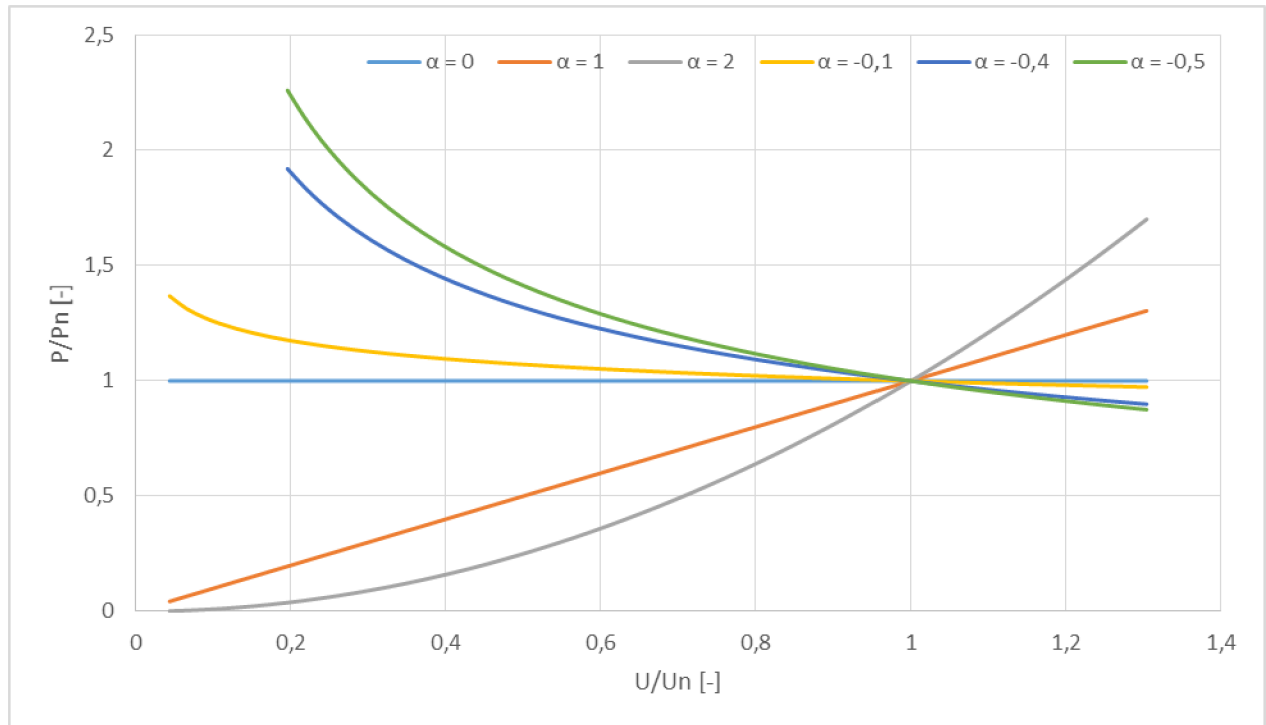
Pro jalový výkon lze obdobně zapsat:

$$Q = Q_n \cdot \left( \frac{U}{U_n} \right)^\beta \quad (2)$$

Kde  $Q$  značí aktuální odebíraný jalový výkon  
 $Q_n$  značí jmenovitý jalový výkon  
 $\beta$  značí parametr napěťové závislosti jalového výkonu

Podle těchto rovnic pak lze sestavit výkonové charakteristiky zátěží pro různé napěťové parametry. Jak je vidět z obrázku (Obrázek 3), v hodnotě jedna poměrného napětí, tedy napětí jmenovitého, se všechny křivky protínají. V tomto bodě odpovídá výkon všech křivek jmenovitému výkonu zatížení  $P_n$ . Změna však nastává v případě, když okamžité napětí  $U$  neodpovídá jmenovitému napětí  $U_n$ . V případě, že napětí vzroste, nastane změna v odebíraných výkonech. U zátěží s parametrem  $\alpha$  větším než nula se odebíraný výkon zvětší, a to tak, že čím vyšší parametr je, tím více se výkon zvýší. Naopak u zátěží se záporným parametrem  $\alpha$  se odebíraný výkon sníží. Také jako v předchozím případě platí, že velikost snížení odpovídá parametru. Výjimečný je pro nás z tohoto ohledu stav, kdy parametr  $\alpha$  odpovídá nule. Pro něj je odebíraný výkon  $P$  nezávislý na napětí, tedy jeho odebíraný výkon pořád odpovídá jmenovitému výkonu  $P_n$ , a proto jej můžeme označit za konstantní. V případě, kdy napětí naopak poklesne, tak zátěže s kladným parametrem zmenší odebíraný výkon a zátěže s parametrem záporným naopak odebíraný výkon zvýší. Zátěž s parametrem  $\alpha$  odpovídajícím nule zůstává konstantní [8].

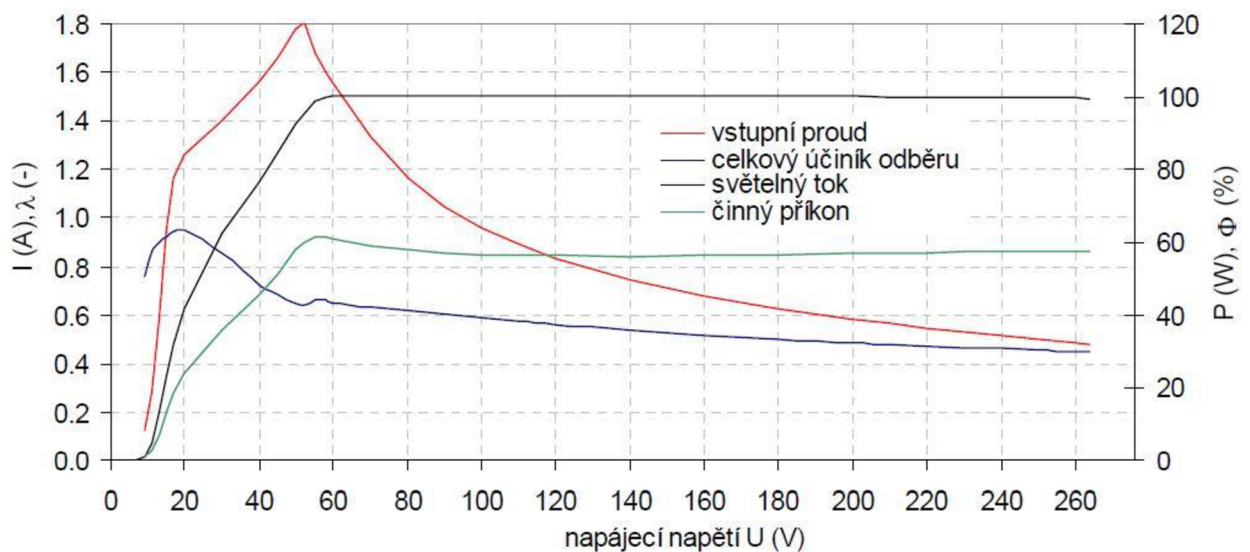
Zátěže s kladným parametrem  $\alpha$  jsou nejčastěji se vyskytující zátěže zapojené v síti. Obecně se dá říct, že mají odporový charakter. Oproti nim jsou zátěže se záporným parametrem spíše ojedinělé. Zátěže s parametrem  $\alpha$  odpovídajícím nule v posledních letech přibývá a lze těžko odhadnout, jak velkou roli budou v síti hrát.



Obrázek 3: Závislost činného výkonu zátěži na napětí [8]

Statická charakteristika skutečného spotřebiče s konstantním výkonem (Obrázek 4) se od ideální (Obrázek 3) ovšem značně liší. Hlavním důvodem je, že při poklesu napětí roste proud exponenciálně a předřadná elektronika má určitá proudová omezení vyplývající z konstrukce. Jak je vidět z obrázku, tak při poklesu napětí zhruba na hodnotu padesáti voltů, se charakteristika spotřebiče mění z konstantního výkonu na odporovou charakteristiku. Výkon začíná klesat od zlomového místa přímo do nuly s klesajícím napětím. Tomu samozřejmě odpovídá i pokles vstupního proudu. Když pokračujeme po křivce s klesajícím napětím dále, tak zjistíme, že se dostáváme do bodu hodnoty dvaceti voltů, kde systém úplně kolabuje.

Aby model odpovídal skutečnému spotřebiči, tak se nemůže řídit pouze ideálními charakteristikami, ale musíme brát též v potaz tyto skutečná omezení a co nejpřesněji je napodobit.

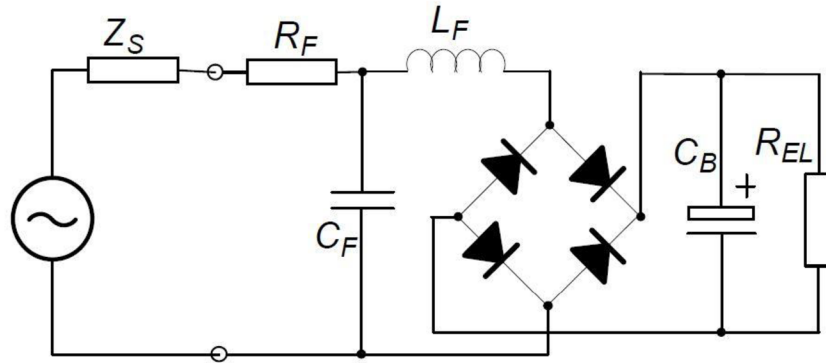


Obrázek 4: Statická charakteristika spotřebiče s konstantním výkonem na výstupu [4]



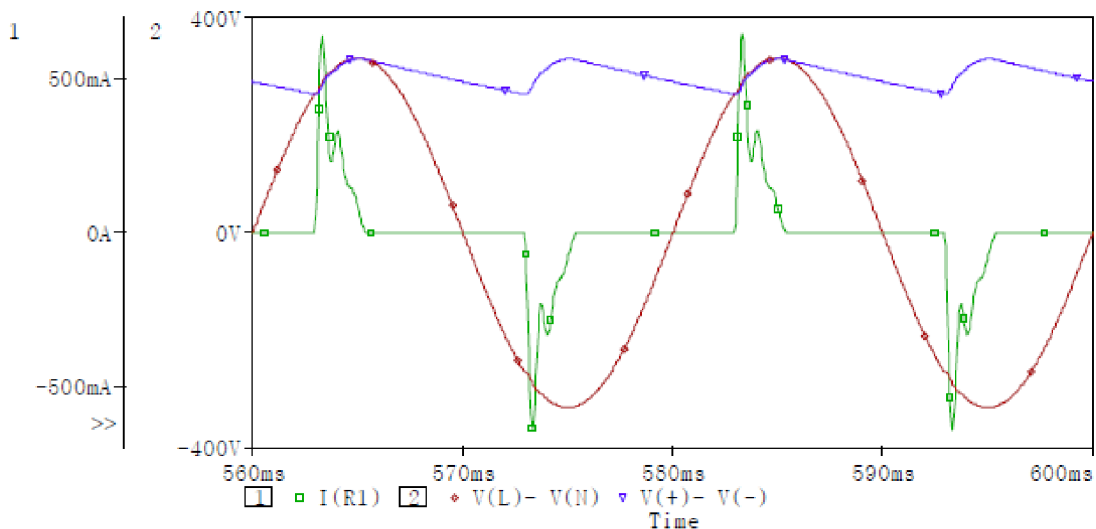
### 2.1.2 Dynamická charakteristika spotřebičů s konstantním výkonem na výstupu

Dynamická charakteristika jednotlivých zátěží s konstantním výkonem je dána složitostí schématu daného spotřebiče. Podoba schématu určuje průběh odebíraného proudu a jeho nesymetrii. Jako příklad spotřebičů tohoto typu můžeme označit následující schéma (Obrázek 5). Jako u všech spotřebičů tohoto typu se skládá z usměrňovače následného kondenzátoru pro vyhlazení napětí. Následně je napojen na zátěž, která by se v nezjednodušeném schématu skládala z řízených tyristorů připojených na impedanci.



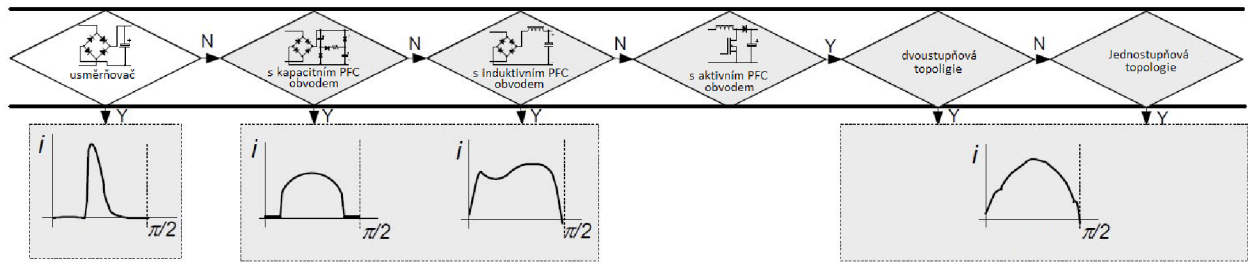
Obrázek 5: Zjednodušený model elektrického předřadníku pro fluorescenční výbojku [3]

Průběh odebíraného proudu je pro tento typ zátěže vidět na obrázku (Obrázek 6). Jak je z obrázku vidět, odběr proudu (zelený) je značně nesymetrický. To je jeden z důvodů, proč se tento typ zařízení používá pouze do dvaceti pět wattů. Červená křivka na obrázku značí vstupní sinusové napětí a modrá křivka značí napětí již za usměrňovačem a kondenzátorem, které je přiváděno ke konečné zátěži.



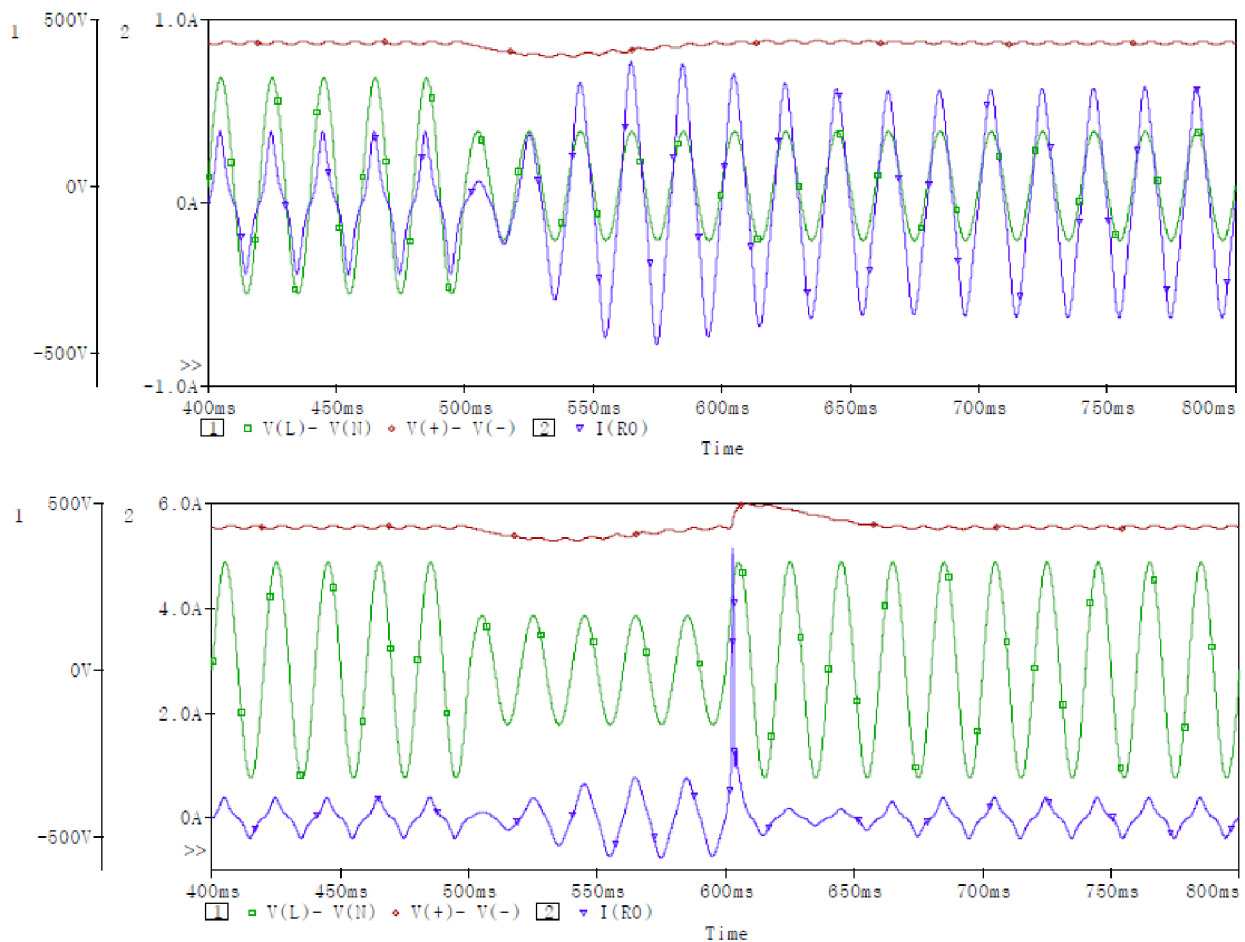
Obrázek 6: Průběh napětí a proudu u fluorescenční výbojky s elektrickým předřadníkem [3]

Jiné typy spotřebičů s konstantním výstupem můžeme rozdělit podle jejich předřadníků. Každý spotřebič má poté určenou křivku odběru proudu podle jeho předřadníku. Když pomíneme již zmíněný předřadník, tak další typy jsou hlavně variace PFC obvodů. Přehled nejčastěji používaných předřadníků a jejich odebírané průběhy proudu lze vidět na obrázku (Obrázek 7).



Obrázek 7: Přehled nejčastěji používaných typů předřadníků pro spotřebiče s konstantním výkonem na výstupu s ohledem na průběh odebraného proudu [3]

Pro další popis si zvolíme předřadník s aktivním PFC obvodem. Podle předchozího obrázku (Obrázek 7) bude odebraný proud téměř sinusového charakteru. Detailní průběh máme zaznamenaný na obrázku (Obrázek 8). Jsou na něm vyobrazeny dvě různé situace, kdy dochází ke změně napětí. Zelená na obrázku značí vstupní sinusové napětí, odebraný proud je modrý a červená značí DC napětí za měničem s kondenzátory[3].



Obrázek 8: Průběhy napětí a proudu pro aktivní PFC obvod [3]

V prvním (horní část) případě napětí klesne z 230 na 115 V. Odebraný proud se nejprve sníží, protože velikost jeho odběru je řízena elektronikou, která ho řídí podle velikosti vstupního napětí. Velikost proudu se tedy nastavuje funkcí, která má za úkol udržet konstantní odebraný výkon. Pro činný výkon ji lze zapsat takto:

$$P = U \cdot I = konst.$$

(3)

Kdybychom zahrnuli i jalový výkon, tak by rovnice (3) měla následující tvar:

$$P + jQ = U \cdot (I_C + jI_J) = konst. \quad (4)$$

Kde  $I_C$  značí činnou složku proudu a  $I_J$  jalovou složku.

V případě pádu se základ pro výpočet proudu, tedy napětí, zmenší, ale elektronika ještě nestihne zareagovat na změnu. Z tohoto důvodu vidíme, že napřed proud poklesne. Následující periodu ovšem zařízení rozpoznává snížené napětí a upravuje odebíraný proud tak, aby dosáhlo původní požadované hodnoty výkonu. Takhle zařízení pracuje, dokud nedosáhne opětovného ustáleného stavu.

Druhá část obrázku (spodní) nám ukazuje opět pokles napětí z 230 na 115 V, ale tentokrát je pokles dočasný a to pouze na 100 ms. Prvně můžeme vidět opět pokles proudu a pak jeho postupný nárůst a stabilizaci. Zajímavější je ovšem pro nás situace, kdy se napětí opět vrací do původního stavu. V tento okamžik nám proud značně vzroste. To je dané stejným důvodem, proč nám nejprve proud klesl, když kleslo i napětí. Řídící elektronika ještě nebyla schopna zareagovat na změnu napětí a zvýšené napětí způsobuje zvýšení odebíraného proudu, což má za následek nejdříve nárůst proudu a pak při úpravě jeho postupné zmenšení, až do ustáleného stavu na požadovaný odebíraný výkon.

V případě, že v síti bude zapojeno více spotřebičů s podobnou charakteristikou, jaká je popsána výše, může být ohrožena statická stabilita napětí sítě a to hlavně v případě poklesu napětí, které má velkou pravděpodobnost výskytu, jež zapříčiňuje následný nárůst odebíraného proudu. V případě, že pokles je velmi krátký, jde nám spíše o stabilitu dynamickou. Té pravděpodobně pomůže, že odezva přístroje není okamžitá, což dává systému jistý čas na stabilizaci, a tedy by měl při poklesu spíše dynamickou stabilitu systému podpořit. Při krátkodobém zvýšení napětí opět chvíli trvá, než systém zareaguje. V době této reakce je odebíraný výkon vyšší, což by opět mělo podpořit dynamickou stabilitu systému.

## 2.2 Stabilita napětí v síti

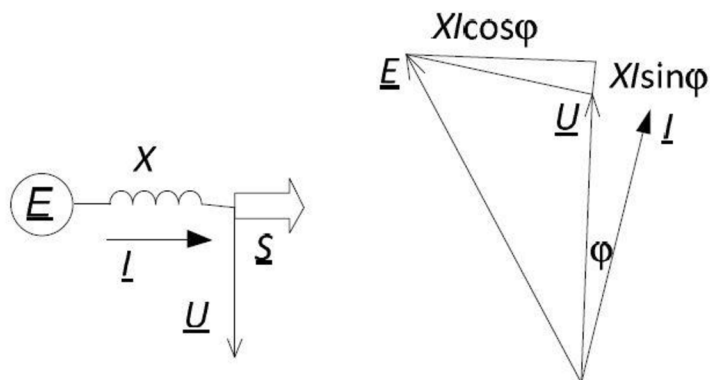
Obecně můžeme označit stabilitu napětí za vlastnost, případně schopnost, sítě. Dala by se definovat jako schopnost systému udržet napětí v požadovaných mezích za normálních provozních podmínek a v případě narušení napětí schopnost uvést vše zpět do podmínek vyhovující provozu sítě. V případě, že napětí je nestabilní a nekontrolovatelně klesá, nastává v systému nestabilita. Nestabilita může vést až k totálnímu kolapsu napětí v dané síti, tedy k částečnému nebo úplnému odstavení.

Napětí sítě je provázáno se zapojenými zátěžemi. Odběrové charakteristiky zátěží jsou totiž závislé na napětí, takže se změnou napětí se změní odběry jednotlivých zátěží, které zapříčiní rozdílný úbytek napětí na síti oproti předchozímu stavu. V případě zapojení většiny spotřebičů s konstantním výkonem na výstupu, může podobná situace vést až ke zhroucení napětí v systému [8].

Stabilitu napětí v sítích můžeme rozdělit na dva různé případy. Jeden je statická stabilita, která řeší stabilitu systému po odeznění přechodových dějů a ustálení systému. Prakticky se řeší pomocí nosových křivek [10]. Druhý je dynamická stabilita systému, která zahrnuje principy týkající se reakce sítě na změnu parametrů v reálném čase, neboli děje přechodové.

### 2.2.1 Statická stabilita napětí v síti

Jak již bylo zmíněno výše, pro statickou stabilitu se používají takzvané nosové křivky, jejichž výpočet se v literaturách uvažuje pro ideální vedení, ve kterém zanedbáváme odpor vedení a kapacitu. Vedení napájíme jedním zdrojem  $E$  a na druhé straně z něj odebíráme výkon  $S$ . Tento systém, v poměrných hodnotách, si můžeme představit následovně [10]:



Obrázek 9: Schéma a fázorový diagram pro výpočet nosových křivek při zanedbání odporu [10]

Z tohoto diagramu vyplývá následující rovnice:

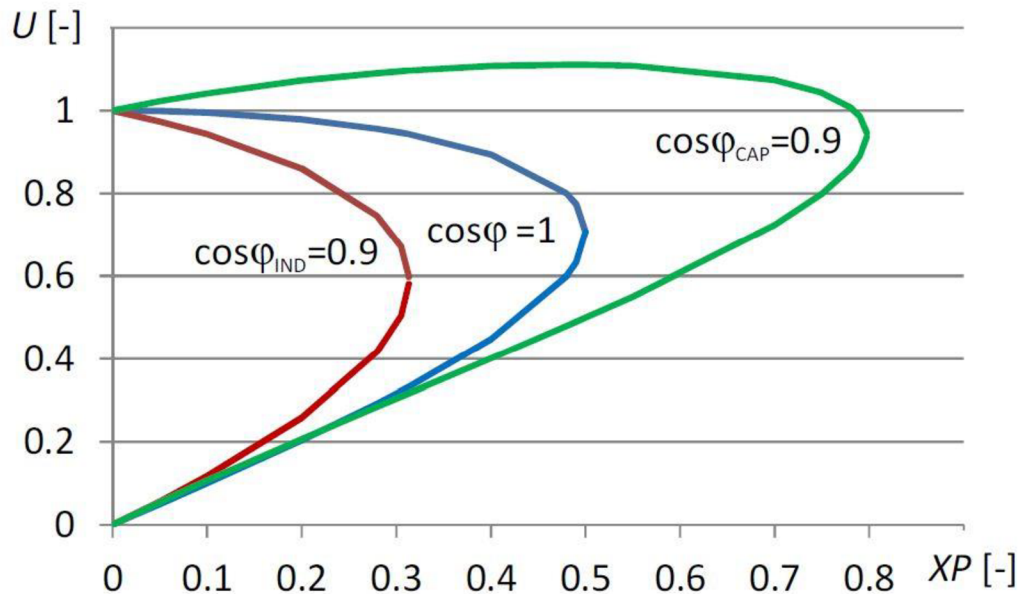
$$E^2 = (U + X \cdot I \cdot \sin\varphi)^2 + (X \cdot I \cdot \cos\varphi)^2 \quad (5)$$

Následnou úpravou můžeme vyjádřit napětí:

$$U^2 = \frac{1 - 2 \cdot P \cdot X \cdot \operatorname{tg}\varphi \pm \sqrt{1 - 4 \cdot P \cdot X \cdot \operatorname{tg}\varphi - 4 \cdot P^2 \cdot X^2}}{2} \quad (6)$$

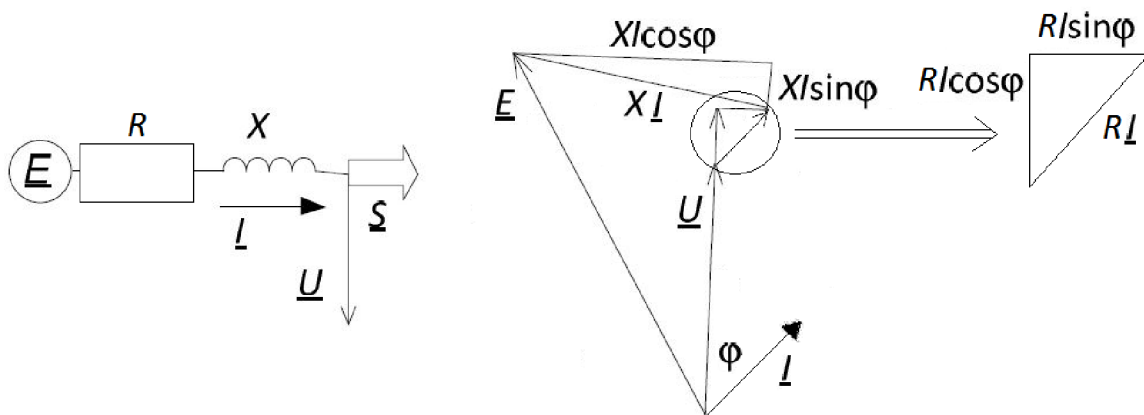
Kde  $U$  značí napětí na konci vedení  
 $E$  značí napětí na zdroji  
 $X$  značí reaktanci vedení  
 $I$  značí procházející proud  
 $\varphi$  značí posuv napětí vůči proudu

Následné grafické řešení vypadá následovně:



Obrázek 10: Nosové křivky [10]

Pro stabilitu napětí v nízkonapěťových sítích bohužel není možné tohle řešení použít, protože v sítích nízkého napětí složka odporu  $R$  hraje příliš významnou roli a její zanedbání by neodpovídalo reálnému problému, tedy rámce této práce. Z tohoto důvodu musíme řešení upravit podle obrázku (Obrázek 11).



Obrázek 11: Schéma a fázorový diagram pro výpočet nosových křivek bez zanedbání odporu

Pro řešení této problematiky využijeme jako vzorové řešení rovnice při zanedbání odporu z literatury[10]. Vyjádříme si tedy napětí na zdroji  $E$ , které má tvar následující rovnice:

$$E^2 = (U + R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi)^2 + (X \cdot I \cdot \cos \varphi - R \cdot I \cdot \sin \varphi)^2 \quad (7)$$

Následně rovnici upravíme, tedy nejprve ji roznásobíme a následně provedeme substituci. Za  $U^2 = A$ ,  $Y = X \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$ ,  $Z = R \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$  a  $E = I$ . Po těchto úpravách dostaneme následující tvar:

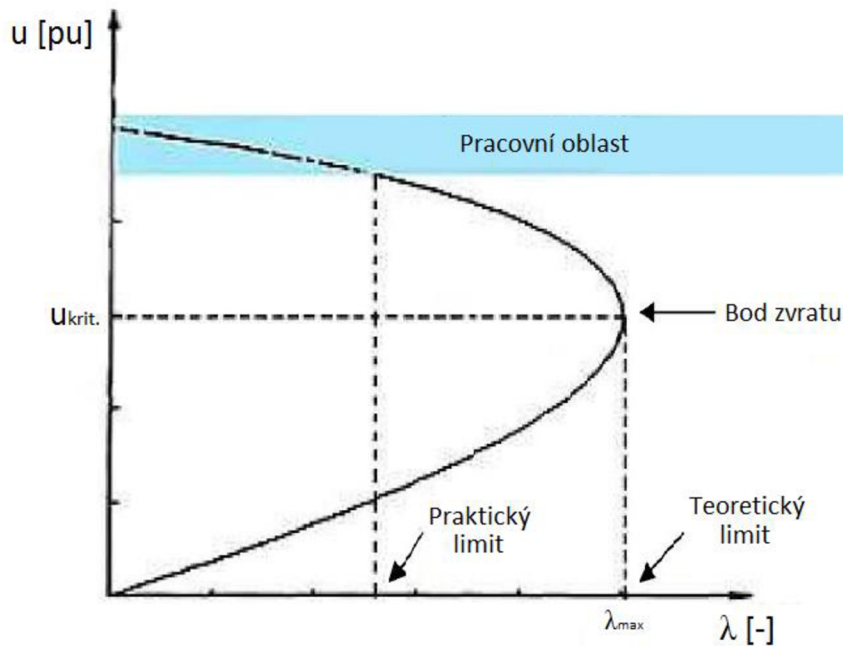
$$1 = A + 2 \cdot Z \cdot \cot \varphi + 2 \cdot Y \cdot \operatorname{tg} \varphi + \frac{Z^2}{A} \cdot \cot^2 \varphi + \frac{Z^2}{A} + \frac{Y^2}{A} \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi + \frac{Y^2}{A} \quad (8)$$

Tuto kvadratickou rovnici poté vyřešíme pomocí diskriminantu do následující konečné podoby, která odpovídá požadavkům této práce.

$$A = \frac{1 - 2.Z.\cotg\varphi - 2.Y.tg\varphi \pm \sqrt{8.Y.Z + 1 - 4.Z.(\cotg\varphi + Z) - 4.Y.(tg\varphi + Y)}}{2} \quad (9)$$

Z křivek je vidět jak se systém chová pro určité účinníky. Například při induktivním odběru je vidět, že maximální přenášený činný výkon přes impedanci je nižší, než při účinníku odpovídajícímu jedné. Zvyšováním odběru činného výkonu může dojít k pádu napětí. Tento pád napětí se též někdy nazývá napěťový kolaps [10].

Na obrázku (Obrázek 10) máme popsané chování z hlediska účinníku. Nyní se na danou problematiku podíváme z pohledu čistě výkonového. Níže (Obrázek 12) je podoba křivky zpracována do závislosti zatížitelnosti soustavy  $\lambda$  na velikosti napětí. Na křivce je vyznačena pracovní oblast soustavy, ve které se pohybujeme při normálním provozu sítě. Tato oblast je ohraničena limitním napětím, které by pro bezpečný chod sítě nemělo být překračováno. Druhá důležitá vyznačená oblast je takzvaný bod zvratu. V tomto bodě je zatížitelnost sítě na své maximální hodnotě (vyobrazeno pomocí  $\lambda_{max}$ ). Napětí, při kterém se do tohoto bodu dostaneme, je značeno jako kritické  $u_{krit.}$ , ponějud v tomto bodě zároveň dochází k napěťovému kolapsu sítě. Tento kolaps má za následek totální výpadek dané sítě, který se též nazývá blackout [1].



Obrázek 12: Nosová křivka v závislosti na velikosti zatížitelnosti soustavy[1]

Z charakteristik, které zde byly popsány, vyplývá že změnou účinníku lze dosáhnout vyšších přenášených výkonů v soustavě. Takovou to změnou ovšem posouváme bod zvratu blíže k pracovní oblasti sítě. Poté stačí menší pokles napětí v soustavě k dosažení zhroucení napětí v síti, a tedy k blackoutu.

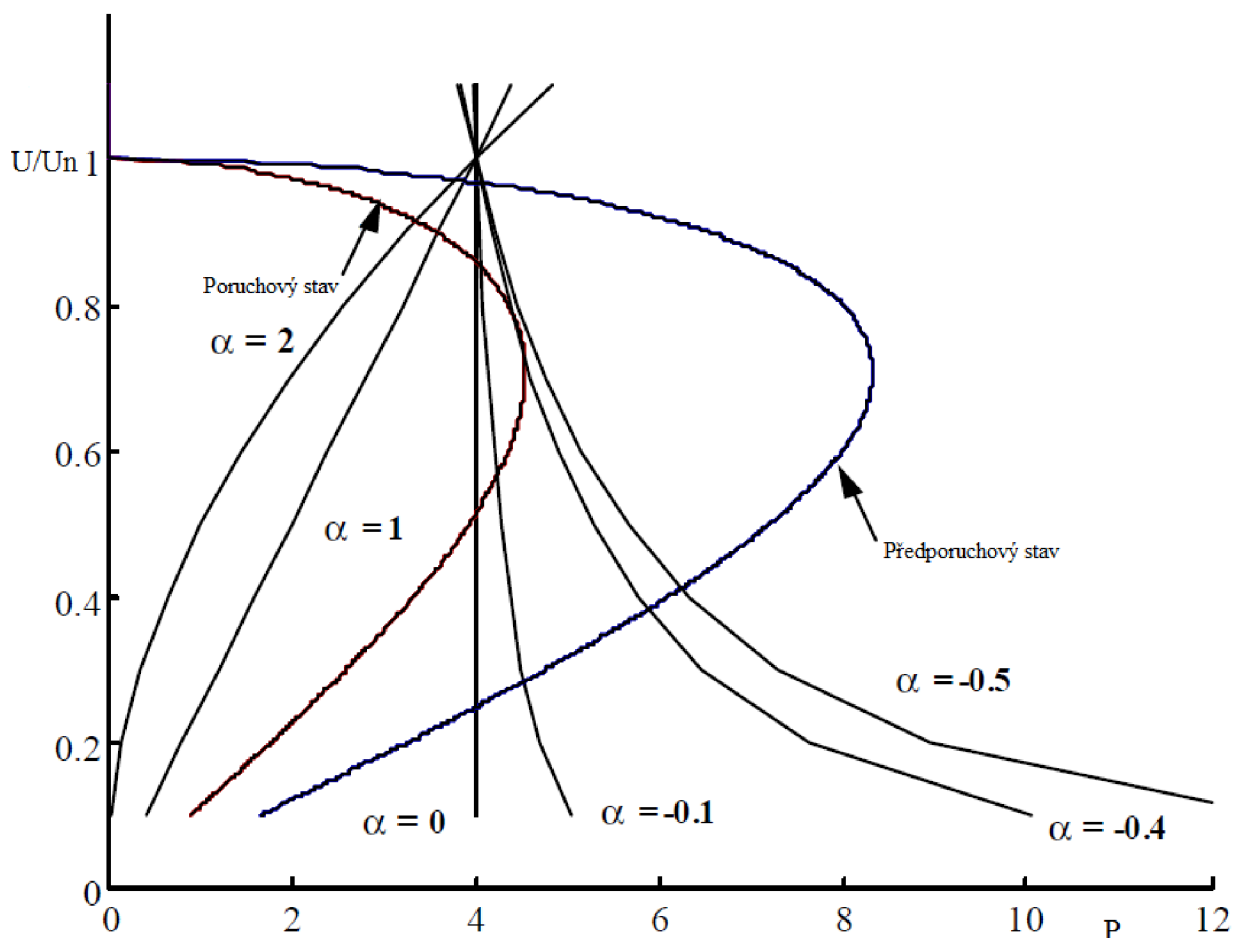
### 2.2.2 Dynamická stabilita napětí sítě

Když chceme řešit dynamickou stabilitu sítě s ohledem na napěťovou stabilitu, vždycky musíme řešit konkrétní systém. Obecně ovšem můžeme říct, že sítě mají určité mechanismy, kterými se chrání a regulují se. Jako příklad můžeme uvést podpěťovou ochranu, která v sítích bývá nastavena okolo hodnoty  $0,7 U_n$ . Další můžeme uvést odbočky transformátorů, kterých je  $\pm 12$ , které jsou schopny regulovat napětí po 1%, tedy po  $0,01 U_n$ . Všechny tyto systémy a jím

podobné jsou nastaveny tak, aby automaticky spínaly podle toho, jak se zrovna vyvíjí podmínky v dané síti[10].

Další prvek, který nelze zanedbat, je regulace dodávaného jalového výkonu do sítě. Jalový výkon je důležitý pro stabilitu napětí sítě kvůli charakteru impedance sítě, ve které značnou složku tvoří reaktance. V naší síti se vyskytuje osm míst, v nichž lze regulovat jalový výkon. Tyto uzly jsou většinou velké rozvodny s blízkým velkým zdrojem a jsou roztroušeny pokud možno rovnoměrně po síti. Systém, který má regulaci na starost v ČR, se nazývá SRU Q [9].

V případě poruchy v síti se změní i tvar nosové křivky. Na obrázku (Obrázek 13) je stav pro síť, která se skládá pouze ze zdroje, transformátoru a paralelního vedení. Náš poruchový stav značí, že jedno z vedení je vypnuto, načež se celému systému mění jeho vlastnosti charakterizované červenou křivkou. Do tohoto obrázku nyní vložíme výkonovou závislost zátěží na napětí (Obrázek 3), kterou invertujeme tak, aby nám odpovídaly osy. Vidíme, že pro nový stav se posunuly pracovní body zátěží. Zátěže s kladným parametrem  $\alpha$  mají jistou samoregulační tendenci. Zátěže se záporným  $\alpha$  mají tendenci k pravého opaku a zátěže s nulovým parametrem, tedy zátěže s konstantním odběrem výkonu, se nemění. Se změnou tvaru nosové křivky se ovšem dostáváme blíže k bodu zvratu, a tedy ke kolapsu sítě. Z obrázku je patrné, že zátěž s  $\alpha = -0,5$  již je s tímto bodem [8].



Obrázek 13: Vliv poruchy v síti na chování spotřebičů[8]

## 3 MODEL SPOTŘEBIČE S KONSTANTNÍM VÝKONEM NA VÝSTUPU

Model spotřebiče s konstantním výkonem na výstupu je pro nás dílčí cíl v této práci. Je třeba k dalšímu kroku, ve kterém sestavíme síť a daný model použijeme jako odběr. Pro tento kompletní model provedeme simulaci, ve které budeme posuzovat vliv zátěže na síť.

### 3.1 Požadavky na model spotřebiče s konstantním výkonem na výstupu

Po daném modelu požadujeme, aby splnil několik podmínek pro funkčnost celé simulace. První je jeho jednoduchost. Potřebujeme, aby daný systém byl co nejjednodušší, aby potřeboval co nejméně výpočetního výkonu. Při požadavcích na vyšší výpočetní výkon by mohla být ohrožena plynulost simulace. Zároveň chceme, aby model byl snadno přenositelný a aplikovatelný na model sítě, což jen podtrhává potřebu jednoduchého systému.

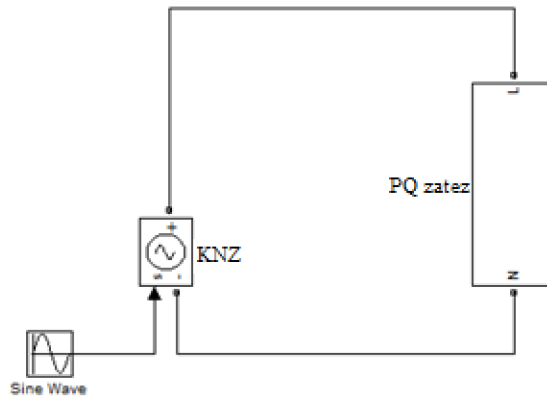
Po modelu potřebujeme, aby byl schopen simulovat požadované odebírané výkony a jejich změny v závislosti na změně napětí. Potřebujeme tedy, aby respektoval výkonové rovnice (1)(2). Všechny parametry v těchto rovnicích jsou pro nás podle potřeby volitelnými konstantami, jimiž budeme charakterizovat spotřebič. Při zařazení více spotřebičů do sítě budeme moci pomocí těchto konstant určovat poměr spotřeby jednotlivými typy zátěží a vytvořit tak několik různých situací. Výjimku tvoří napětí, které jako jediné je proměnné, a od něj se tedy budou odvíjet změny výkonu. Tyto výkony pak musíme upravit do tvaru, které odpovídají požadovanému odebíranému proudu tak, aby byly splněny podmínky z rovnice (3), případně (4). Dále je potřeba, abychom se co nejvíce přiblížili reálné dynamické odezvě spotřebiče, jak je popsáno v kapitole 2.1.2, ze které víme, že je potřeba zahrnout určité zpomalení odezvy systému pro spotřebič s konstantním výkonem na výstupu. To vše musí být provedeno tak, abychom se co nejvíce přiblížili skutečné zátěži.

### 3.2 Provedení modelu

Jako pracovní prostředí jsem zvolil Matlab Simulink pro jeho snadnou programovatelnost v grafickém editoru a rozsáhlou knihovnu blokových schémat, které se dají dobře upravit pro potřebu modelu této práce.

Simulink umožňuje provedení simulace diskrétní formou, kdy je simulace určena nastavitelnou vzorkovací frekvencí, nebo kontinuálně, čili plynulou simulací. Pro potřeby této práce jsem zvolil simulaci kontinuální, a to kvůli možnosti použití dokonalých měničů pro tento typ simulace.

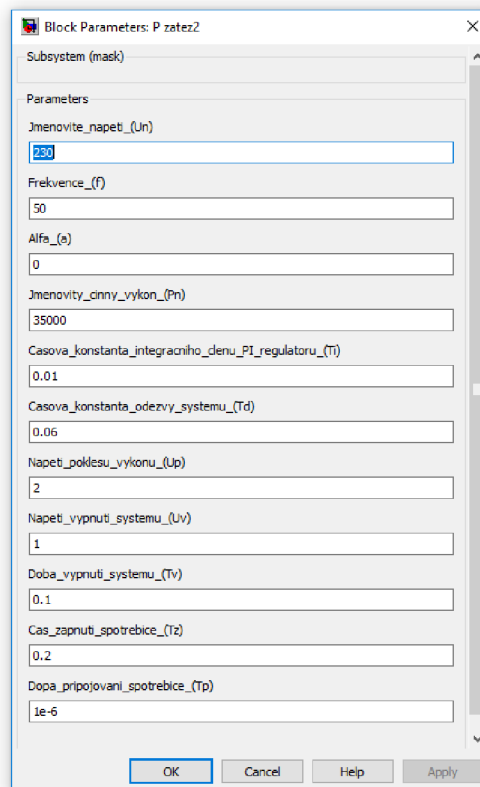




Obrázek 14: Programovatelný model spotřebiče

Pro jednoduchou použitelnost v modelu sítě bylo vytvořeno základní schéma modelu tak, jak je vidět na obrázku výše (Obrázek 14). Použitý zdroj je kontrolovaný napěťový zdroj (KNZ), řízený pomocí nastavitelného sinusového signálu. Tento zdroj lze jednoduše odstavit a místo něj připojit síť, takže podmínka použitelnosti modelu zátěže v modelu sítě je splněna. Signál nám dále putuje do spotřebiče označeného jako „PQ zatez“, kde se nachází model zátěže. Jak název napovídá, model má být programovatelný na odběr jak činného, tak jalového výkonu podle požadavků uživatele.

Jak již bylo zmíněno v požadavcích na model (kapitola 3.1), jediný proměnný parametr modelu je vstupní napětí. Zbylé parametry jsou pro nás konstanty, které je nutno před simulací nadefinovat. Z tohoto důvodu byla vytvořena maska uvedeného subsystému, přes kterou se parametry definují. Její provedení lze vidět na obrázku (Obrázek 15). Skrze masku lze nadefinovat požadované chování spotřebiče pro koncového uživatele.

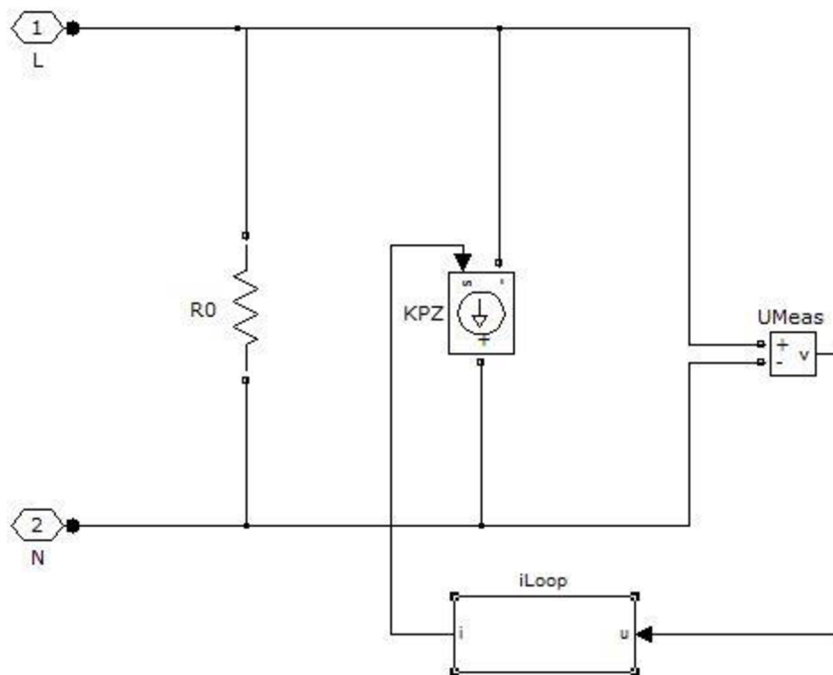


Obrázek 15: Maska subsystému

V masce si tedy nadefinujeme konstantní parametry. Nejprve si určíme parametry určující typ sítě, a to jmenovité napětí  $U_n$  a frekvenci  $f$ . Dále jsou to jmenovitý činný výkon  $P_n$  a jalový výkon  $Q_n$ , od kterých se výpočtem odvozují jejich skutečné hodnoty, parametry alfa  $\alpha$  a beta  $\beta$ , určující závislost výkonu na napětí a jmenovité napětí sítě. Dále pak obsahuje časové konstanty. Časová integrační konstanta  $T_i$  slouží k nastavení PI regulátoru v rámci základní smyčky pro výpočet řídicího signálu. Časová konstanta  $T_d$  pak slouží k nastavení dolnoproputného filtru, neboli nastavuje rychlost odezvy systému. Další konstanty jsou napěťové, a to napětí poklesu výkonu  $U_p$  a napětí vypnutí systému  $U_v$ , které slouží při výpočtu požadovaného výkonu. Jako poslední jsou uvedeny konstanty  $T_v$ ,  $T_z$  a  $T_p$ , které reprezentují dobu vypnutí spotřebiče, okamžik připojení zátěže a dobu, po kterou daný spotřebič nabíhá do plné zátěže.

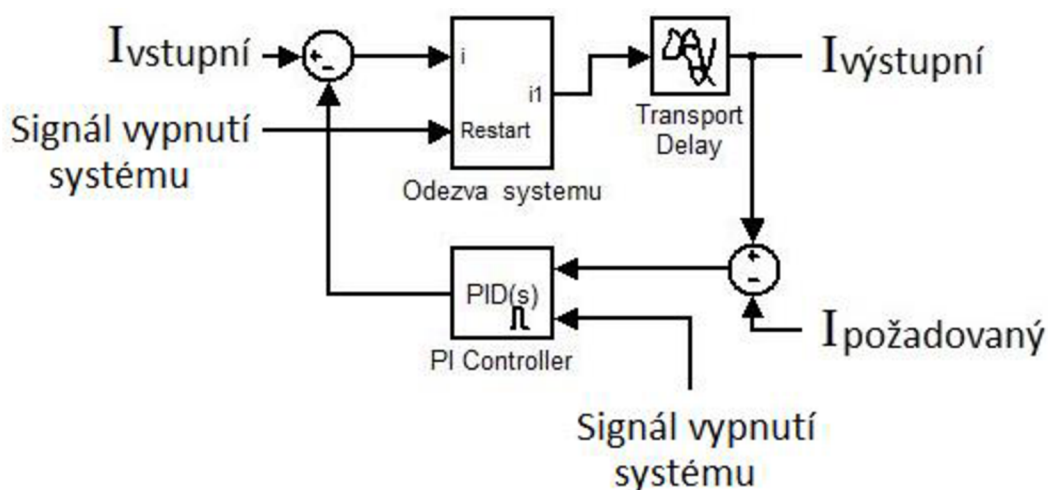
V masce lze taktéž nastavit, aby provedla některé výpočty před provedením simulace. V rámci řešení tohoto konkrétního modelu byla tato funkce využita pro výpočet některých konstant a ochraně modelu proti špatnému zadávání hodnot konstant.

Subsystem zátěže můžeme vidět na obrázku níže (Obrázek 16). Na němž je vidět propojení přes vstupy L a N, mezi nimiž je umístěn kontrolovaný proudový zdroj (KPZ). Tento proudový zdroj nám slouží jako kontrolovaná zátěž. Řešení tohoto typu bylo zvoleno z důvodu programové logiky. Poněkud je problematické přepisovat hodnoty impedance zátěže na základě určitého signálu, ovšem řízení proudového zdroje je k tomu uzpůsobeno. Důležité pro nás je, že zdroj dokáže výborně simulovat chování zátěže, což je požadováno. Na proudovém zdroji je měřena aktuální hodnota napětí (blok UMeas), který předává signál do dalšího subsystemu s názvem „iLoop“. Tento systém upravuje signál tak, aby odpovídal skutečné hodnotě požadovaného odebíraného proudu zátěží. Dále je zde paralelně připnut odpor  $R_0$ . Ten zde musí být umístěn kvůli tomu, že program Simulink neumožňuje napojení sériové impedance ke kontrolovanému proudovému zdroji. Aby daný odpor neměl nechtěný vliv na výslednou simulaci, tak je jeho velikost vypočítávána přes masku systému na hodnotu, která odpovídá odebírání jedné tisícin jmenovitého výkonu.



Obrázek 16: Subsystem zátěže v modelu

Základní předpoklad pro správnou funkci systému je správná reakce systému na změnu napětí. Se změnou napětí se musí změnit odebíraný proud systému a to tak, aby odpovídal našim požadavkům při změně napětí, tedy během přechodového děje a následně po jeho odeznění. Z poznatků, které jsme popsali v kapitole 2.1.1 a 2.1.2 víme, že chceme, aby se proud prvně změnil podle změny vstupního napětí (při poklesu napětí má poklesnout proud a při vzrůstu napětí má následovat nárůst odběru proudu) a následně se postupně dorovnal na požadovanou hladinu, a to postupně za námi určenou dobu. Tento proud pak vezmeme jako výstupní a použijeme jej k řízení proudového zdroje. K tomuto účelu jsme sestrojili základní proudovou smyčku (Obrázek 17). Do této smyčky vstupují aktuální proud, který se odvíjí od vstupního napětí a proud požadovaný, který odpovídá statické charakteristice spotřebiče. Za ideálních podmínek mezi nimi není žádný rozdíl. Když ovšem v systému nastane změna, tak jejich rozdíl je vstupní veličinou do PI regulátoru, který postupně podle nastavené logiky vzniklý rozdíl dorovná. V regulátoru lze nastavit, jak velký bude prvotní skok mezi hodnotou vstupní a požadovanou. Dále lze zde nastavit integrační zesílení, pomocí kterého nastavíme dobu vyrovnaní mezi vstupní a požadovanou hodnotou. Pro praktické použití zesílení nastavujeme pomocí časové integrační konstanty  $T_i$  v masce subsystému. Po odeznění přechodového děje PI regulátor vytváří trvalou odchylku od proudu vstupního. V použitém systému je sice PID regulátor místo PI, ale jeho derivační část je vypnuta, čímž je z něho vytvořen regulátor PI. Dále základní smyčka subsystém „Odezva systému“, jenž umožňuje vyhlazení signálu do požadovaného stavu. Ten se nastavuje pomocí časové konstanty  $T_d$  opět v masce subsystému, která odpovídá době rychlosti reakce systému. Takto provedené řešení vytváří algebraickou smyčku v systému. Jinými slovy se dá říct, že výsledek výpočtu je použit pro jeho samotný výpočet. To odstraníme umístěním bloku „Transport Delay“, díky kterému zpomalíme signál o jeden stupeň výpočtu a tím vyřešíme problém vzniklé smyčky. Dále je do základní smyčky přiváděn signál vypnutí systému, který zajišťuje restart vybraných funkcí a tím přerušuje setrvačnost systému, a zajišťuje okamžité vypnutí.



Obrázek 17: Základní smyčka subsystému iLoop

Pro správnou funkci smyčky musíme mít správně nastavené vstupní hodnoty. Jedná se tedy o vstupní a požadovaný proud. Začneme nejprve u požadovaného proudu, jehož výpočetní logika je vyobrazena na obrázku (Obrázek 18). Logika je dána podle výkonové rovnice (1) pro činný výkon, popřípadě (2) pro jalový. Na začátku výpočtu je přiváděna aktuální měřená efektivní hodnota napětí. Ta je dělena jmenovitou hodnotou napětí, která je zadávána přes masku subsystému. Další krok nám vyjadřuje napěťovou závislost na exponentu. Pro výpočet činného



uvedených napěťových podmínek, je nastavena hodnota požadovaného výkonu na hodnotu blízké nule, což odpovídá vypnutí spotřebiče. Hodnota blízká nule je zvolena z důvodu plynulé funkce systému a chyba, kterou do systému zanáší, je zanedbatelná.

Dále tento subsystém obsahuje výpočet jmenovitého výkonu, respektive ovládní okamžiku zapnutí spotřebiče a jeho postupného náběhu. K tomu bylo použito jednoduché lineární funkce kde je strmota náběhu určena zadanou dobou připojování spotřebiče  $T_p$  a okamžik zapnutí hodnotou  $T_z$ .

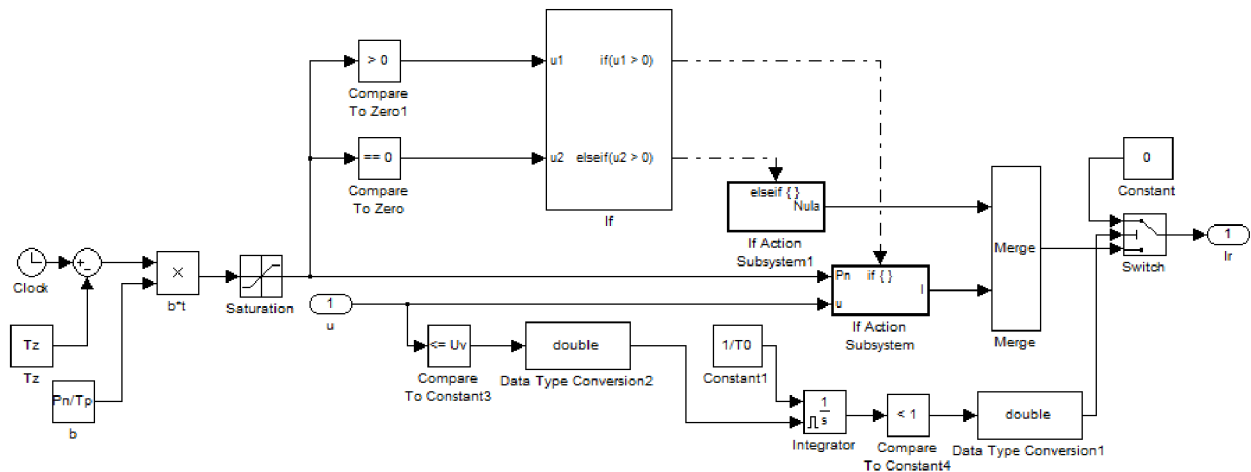
Poslední funkce, která je v subsystému obsažena, je odpočet doby vypnutí systému. Ta je nastavena přes masku pomocí časové konstanty  $T_v$ . V samotném řešení je pak použita konstanta  $T_0$ , která konstantě  $T_v$  odpovídá. Řešení dané problematiky reprezentuje dolní větev subsystému (Obrázek 19). Z té pak de pokyn k vypnutí i do základní smyčky (Obrázek 17).

Nyní se zaměříme na logiku výpočtu vstupního proudu. Jelikož potřebujeme, aby vstupní výkon okamžitě měnil hodnotu se změnou napětí, musí být do výpočtu vřazena měřená efektivní hodnota napětí. Jelikož nemůžeme použít aktuální proud, protože tento proces jej má řídit, což by mělo za následek tvorbu algebraické smyčky, nahradíme proud podle Ohmova zákona měřeným napětím poděleným jmenovitým odporem. Vstupní proud tedy bude následujícího tvaru:

$$I = \frac{U}{R_n} \quad (10)$$

V situaci, kdy měřené napětí odpovídá jmenovitému je i vstupní výkon jmenovitý a rozdíl ve smyčce je tedy nulový. Změna nastává se změnou měřeného napětí, tedy přesně podle našich požadavků. Jmenovitý odpor  $R_n$  ovšem nám není znám, proto jej musíme vypočítat z námi známých parametrů. Jako ideální se jeví princip výpočtu ze jmenovitého výkonu, kde jsou pro nás známé veličiny jmenovitý výkon a napětí. Ty jsou pro nás známy jako konstanty zadané z masky, takže následný výpočet nečiní žádné obtíže. Program ovšem musí být namyšlen tak, aby nebyl ohrožen při chybném zadání jmenovitého výkonu  $P_n$ . Proto je vytvořen subsystém „Urceni\_Ir“, který případně daný problém řeší (Obrázek 20). V prvním kroku porovnává zadanou hodnotu k nule se dvěma možnými výsledky, tedy jestli je větší nebo roven. Jelikož je díky výpočtu masky garantováno, že jmenovitý výkon nikdy nebude menší jak nula, tak vždy je jedna z těchto dvou možností pravdivá. Na tu posléze zareaguje blok „If“, který podle toho spustí dané řešení. Pro kladnou hodnotu použije výše zmíněný princip a následně vypočítanou hodnotou  $R_n$  vydělí měřené efektivní napětí a pro nulu zamění hodnotu výsledného vypočítaného proudu za hodnotu blízkou nule, aby byla zaručena plynulá funkce systému. Chyba, která je zanesená takto do výpočtu, je zanedbatelná. Díky tomu máme tedy všechny požadované parametry pro základní smyčku, která nám nyní může spočítat vstupní výkon.

V subsystému je rovněž výpočet jmenovitého výkonu  $P_n$  a výpočet pro vypnutí systému, které jsou stejné jako v subsystému „Irpazadovany“.

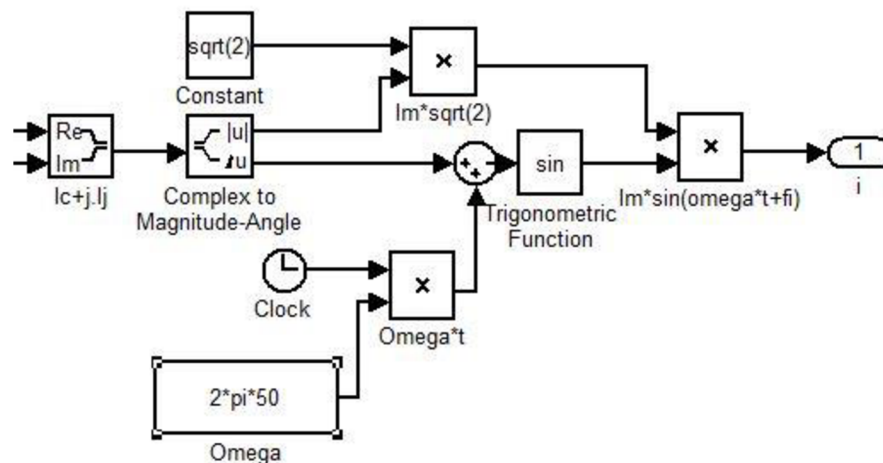


Obrázek 20: Schéma subsystému Urceni\_Ir

Tento princip nám ovšem spočítá pouze výstupní hodnotu reálné složky proudu. Pro získání výstupní hodnoty imaginární složky použijeme novou smyčku, která se ovšem řídí úplně stejnou logikou. Má tedy stejně nastavenou smyčku, která získává obdobným způsobem vstupní a požadovaný výkon. V některých krocích přejímá signál z výpočtu pro činný výkon, aby se předešlo zbytečnému zdvojení výpočtu signálu, který by zpomalil simulaci. Ve výsledku nám vznikají dva výstupy s výstupní reálnou složkou proudu a imaginární složkou proudu.

Tyto hodnoty potřebujeme upravit do tvaru skutečného průběhu proudu, abychom tento průběh pak mohli připojit k řízenému zdroji proudu (Obrázek 16), proto tedy potřebujeme upravit hodnoty proudu do následujícího tvaru:

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (11)$$



Obrázek 21: Úprava signálů proudu v subsystému iLoop

Použijeme tedy úpravu podle obrázku (Obrázek 21). V něm bereme přichodící signál činného a jalového proudu jako složku reálnou a imaginární. V prvním kroku utvoříme z těchto dvou složek komplexní číslo. To pak upravíme do verzorového tvaru. Z něj vezmeme hodnotu velikosti, která nám vyjadřuje efektivní hodnotu proudu. Tu musíme vynásobit odmocninou ze dvou, díky čemuž dostaneme amplitudu proudu  $I_m$ . Hodnota úhlu z verzorového tvaru nám představuje hodnotu úhlu  $\varphi$  z rovnice. K ní musíme přičíst  $\omega t$ , které získáme podle logiky obrázku. Dále už jenom vzniklou hodnotu upravíme pomocí funkce sinus a vynásobíme amplitudou proudu  $I_m$  a tím

získáme signál proudu  $i(t)$ , který odpovídá skutečnému chování proudu v reálném čase, a který tedy můžeme napojit na proudový zdroj a jím ho řídit.

### 3.3 Ověření funkčnosti modelu

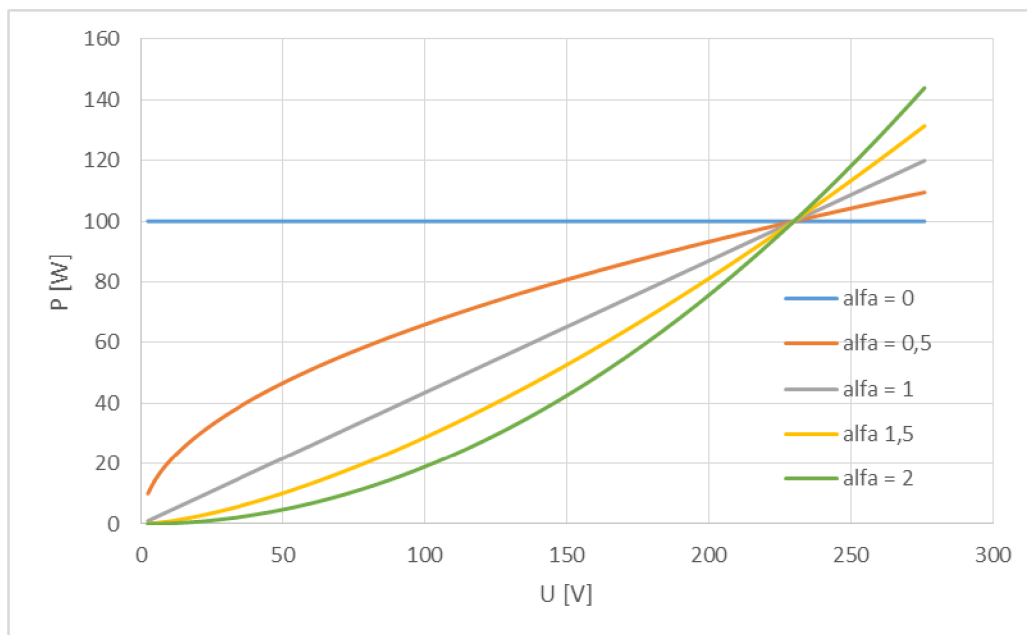
Verifikace modelu je nutná pro ověření jeho vlastností. Bez ověření nelze říci, že po provedení testů na síti má výsledek vypovídající hodnotu. Pro verifikaci modelu byla vytvořena analýza, která má jako vstupní parametry hodnoty napětí a proudu, které jsou měřeny v reálném čase. Ty pak zkoumá podle potřeby uživatele. Analýza je umístěna mimo subsystém pro výpočet zátěže.

System z pohledu uživatele se musí otestovat na jeho statickou a dynamickou charakteristiku.

#### 3.3.1 Ověření statických vlastností modelu

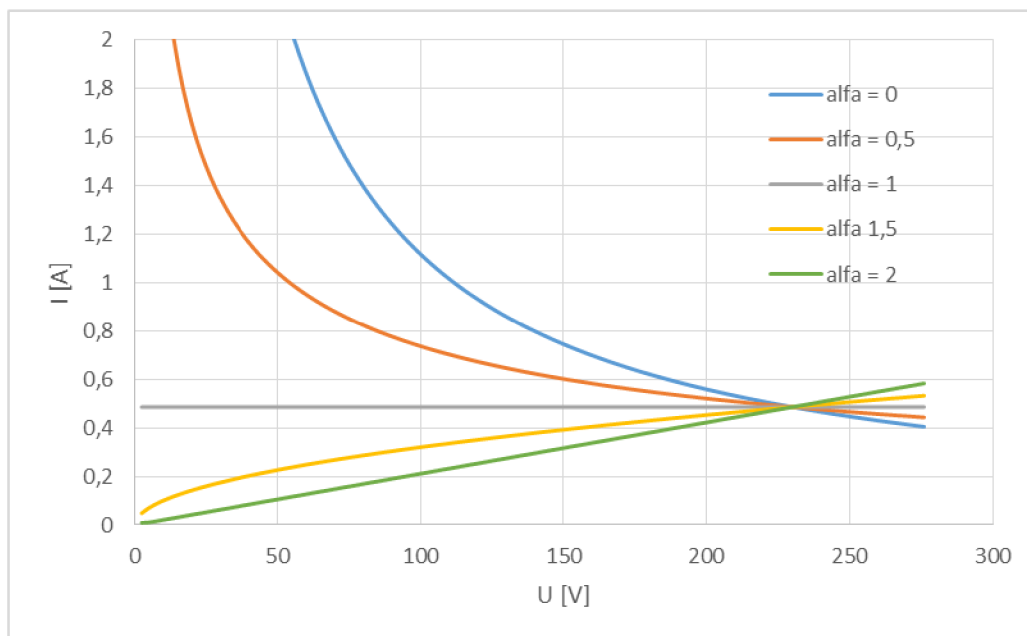
Pro ověření statických vlastností modelu je nutno provést řadu simulací. Každá z těchto simulací se bude lišit ve vstupním napětí do modelu tak, aby byla pokryta celá šíře možného výskytu napětí. Zároveň musí být zadán dostatečně dlouhý čas simulaci, aby mohli odeznít přechodové jevy spojené s počátkem simulace. Za tímto účelem byl vytvořen jednoduchý skript v programu Matlab, který má za úkol provést simulaci s požadovanou nastavenou hodnotou napětí, uložit výstupní hodnoty a poté celý proces spustit znovu s novými vstupními hodnotami. Kvůli opakovanému spouštění simulace je důležité, aby model nebyl příliš početně náročný, protože čas potřebný ke statické analýze by mohl být příliš dlouhý.

Pro prvotní analýzu statického chování systému není potřeba funkce přepnutí modelu do odporového stavu popřípadě jeho vypnutí. Proto jsou pro tuto část analýzy vypnuty. Analýza je provedena na pro vstupní napětí od 2,3 do 276 voltů, což procentuálně odpovídá 1 až 120 procent jmenovité hodnoty. Pro všechny simulace byla zadaná stejná hodnota jmenovitého výkonu, a to 100 wattů činného a 50 voltampérů reaktančních jalového výkonu. U každé simulace se lišily pouze hodnoty parametrů alfa a beta z rovnic (1) a (2). Zvolené byly hodnoty 0, 0,5, 1, 1,5 a 2. Tyto hodnoty by měly dostatečně reprezentovat funkčnost modelu pro běžně se vyskytující spotřebiče v síti, které se pohybují s koeficienty mezi 0 až 2. Výsledek simulace chování odběru činného proudu je vidět na obrázku (Obrázek 22).



Obrázek 22: Odměřená statická charakteristika činného výkonu modelu v závislosti na vstupním napětí

Pro úplnost je zde uvedena i charakteristika chování proudu (Obrázek 23). Je zde uvedena jednak jako ukázka toho, že se proud upravuje správně podle výkonu, ale především toho, že je správně nastavena větev výpočtu pro jalový výkon, který by se do grafu činného výkonu nepromítnul, ale do grafu proudu ano.



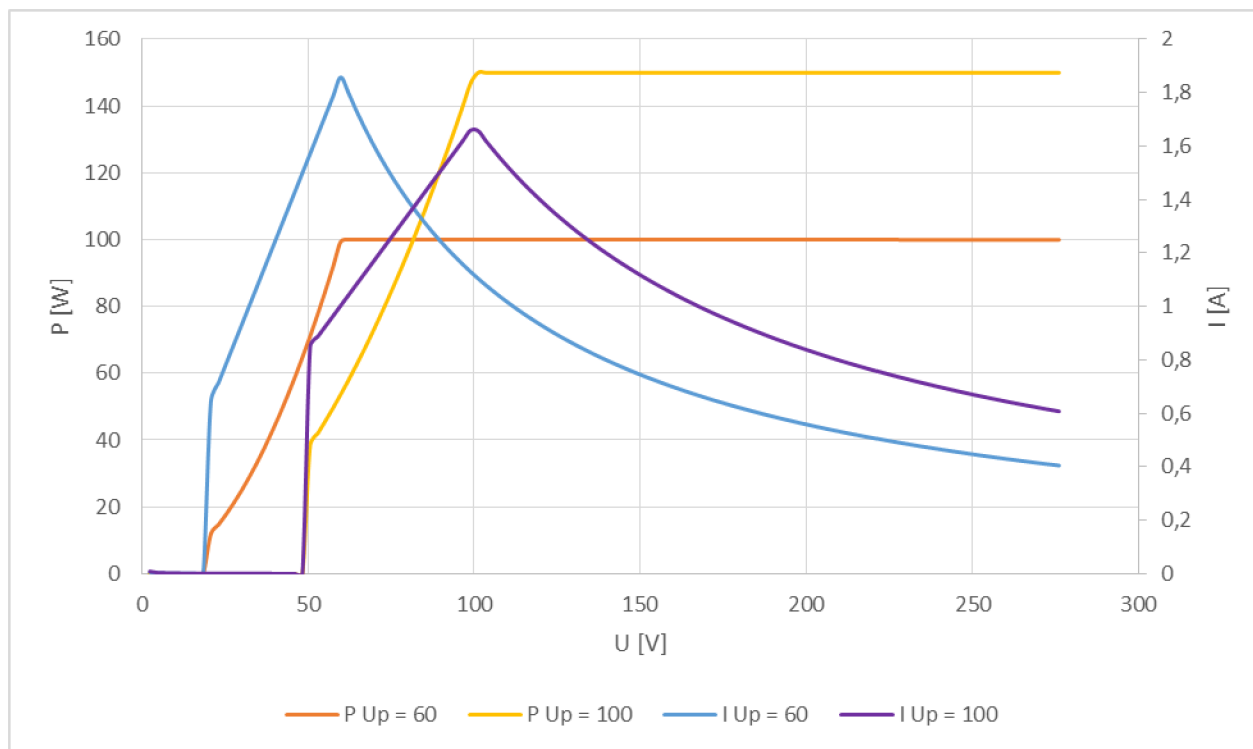
Obrázek 23: Odměřená statická charakteristika proudu modelu v závislosti na vstupním napětí

Po porovnání naměřené statické charakteristiky činného (Obrázek 22) výkonu a hodnot teoretických (Obrázek 3) lze říci, že model splňuje základní požadované statické vlastnosti.

Nyní musíme otestovat přechod modelu do odporového režimu při nastaveném napětí poklesu  $U_p$  a následném vypnutí při napětí  $U_v$ . Pro dobrou přehlednost funkčnosti byly koeficienty alfa a beta nastaveny na nulu tedy na konstantní výkon. Provedeny byly dvě simulace



pro ověření funkčnosti pro jiné hodnoty. Pro první případ je činný výkon nastaven na 100 wattů, jalový výkon na 50 voltampérů reaktančních, napětí poklesu na 60 voltů a napětí vypnutí na 20 voltů. Pro druhý je činný výkon 150 wattů, jalový výkon 75 voltampérů reaktančních, napětí poklesu 100 voltů a napětí vypnutí 50 voltů.



Obrázek 24: Odměřená statická charakteristika modelu pro přechod modelu do odporového tvaru a následného vypnutí

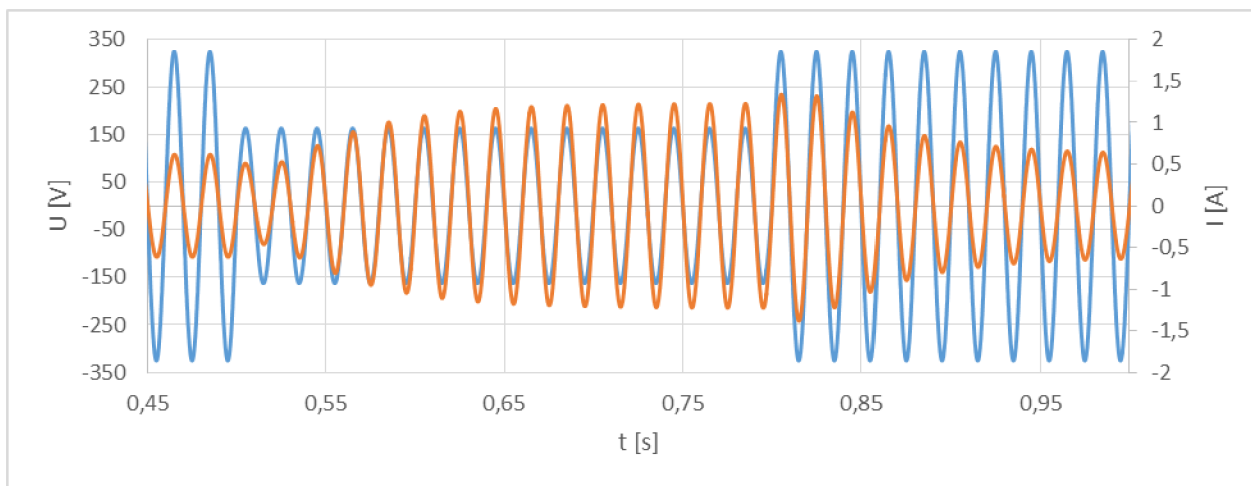
Výsledná charakteristika (Obrázek 24) splňuje kladené požadavky. V nastavených hodnotách plynule přechází do odporového tvaru a následně v hodnotách pro vypnutí dochází k poklesu výkonu a proudu až na nulu. Při srovnání k požadovaným hodnotám (Obrázek 4) jsou námi dosažené výsledky přijatelné.

### 3.3.2 Ověření dynamických vlastností modelu

Na rozdíl od analýzy statických vlastností je dynamická analýza daleko jednodušší. Stačí zobrazit pouze vybrané průběhy v čase. Nejvíce nás budou zajímat průběhy napětí a proudu, popřípadě výkonu. Jelikož jsou tyto veličiny a jejich průběhy závislé na parametrech určených v masce systému, tak musí být provedeno několik analýz v reakci na změnu těchto parametrů. Pro přehlednost musí být zadané parametry vždy uvedeny.

Jako první je zvolena analýza modelu vzhledem ke změně charakteru zátěže, tedy ke změně exponentu alfa, který vyjadřuje napěťovou závislost. Jelikož by všechny zátěže měli za jmenovitého napětí pracovat stejně, vyvoláme pokles napětí v čase 0,5 sekundy na 115 voltů a jeho následný nárůst zpět na jmenovitou hodnotu 230 voltů v čase 0,8 sekundy. Parametry pro tuto simulaci byly nastaveny v masce následovně:

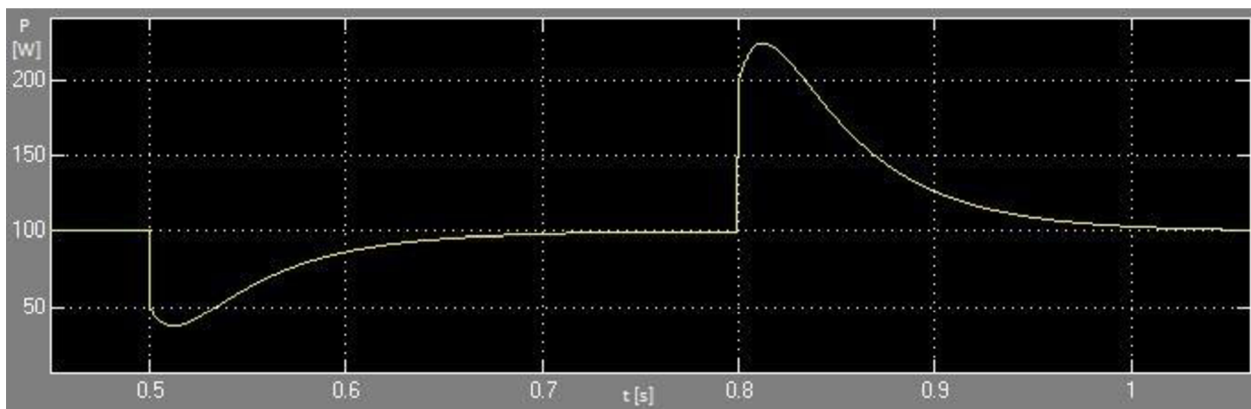
$$\alpha = 0, \beta = 0, P_n = 100, Q_n = 0, T_i = 0,06, T_d = 0,01, U_n = 230, f = 50, U_p = 0, U_v = 0, T_z = 0, T_p = 0, T_v = 0$$



Obrázek 25: Dynamická charakteristika modelu pro nastavení konstantní zátěže

Z charakteristiky (Obrázek 25) je patrné, že se spotřebič při poklesu napětí snaží zachovat odebraný výkon zvýšením odběru proudu. Nejprve ovšem přichází pokles odběru proudu a poté jeho postupné dorovnání. Rychlost poklesu neboli odezva systému je určena časovou konstantou dolnopropustného filtru  $T_d$  a rychlost dorovnání proudu na novou hladinu je dána časovou integrační konstantou  $T_i$ . Při zvýšení napětí v čase 0,8 sekundy se děje téměř stejný děj, ale v opačném podání, tedy proud prvně zaznamená zvýšení a poté ve snaze zachovat konstantní výkon postupně pokles na původní hodnotu.

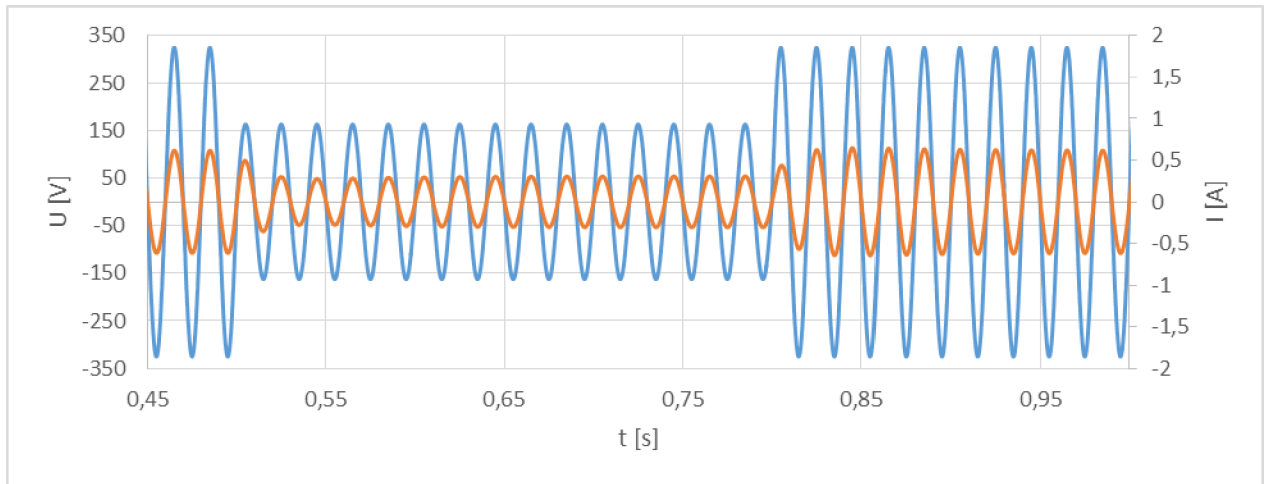
Pro lepší přehlednost se nyní podíváme na průběh efektivní hodnoty činného výkonu (Obrázek 26). Na něm je vidět v čase 0,5 sekundy pokles výkonu a jeho postupné obnovení a v čase 0,8 sekundy při vzrůstu napětí jeho nárůst a poté postupný pád až na jmenovitou hodnotu, což bylo zadané požadované chování modelu.



Obrázek 26: Změna hodnoty činného výkonu v čase pro model nastavený na konstantní výkon

Při porovnání průběhu s teoretickými hodnotami (Obrázek 8) lze říci, že model splňuje pro nastavení na konstantní výkon požadavky, které od něj byly očekávány.

Předešlé nastavení modelu odpovídalo spotřebiči s konstantním výkonem na výstupu. Abychom ověřili správnou funkci modelu, nastavíme nyní spotřebič tak, aby se choval jako odporová zátěž. Parametr alfa se nyní tedy bude rovnat dvěma. Zbylé parametry zůstali nastaveny stejně.



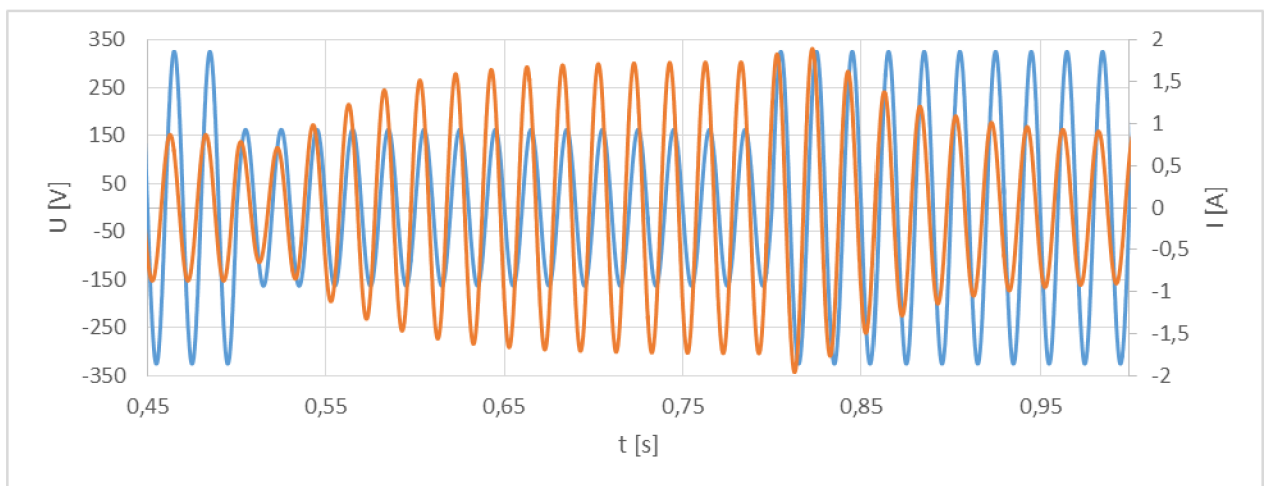
Obrázek 27: Dynamická charakteristika modelu pro nastavení odporové zátěže

Z průběhu (Obrázek 27) je patrné, že při snížení napětí se snížil i odebíraný proud a při jeho opětovném zvýšení na jmenovitou hodnotu se opět zvýšil. Když pomíneme zpomalení způsobené časovými konstantami, které se dají přenastavit, tak nastavení modelu odpovídá odporové zátěži, tedy potvrzuje správnou funkci modelu.

Pro potvrzení správné funkce modelu byly provedeny i další analýzy v závislosti na změně exponentu alfa, které lze shlédnout v příloze (Obrázek 49).

Jako další krok musí být ověřeno chování systému s odebíraným jalovým výkonem. Ten se opět nastaví v masce. Pro naši potřebu je hodnota jmenovitého jalového výkonu nastavena na hodnotu 100 voltampérů reaktančních a zbylé hodnoty jsou nastaveny stejně jako pro simulaci konstantní zátěže, tedy:

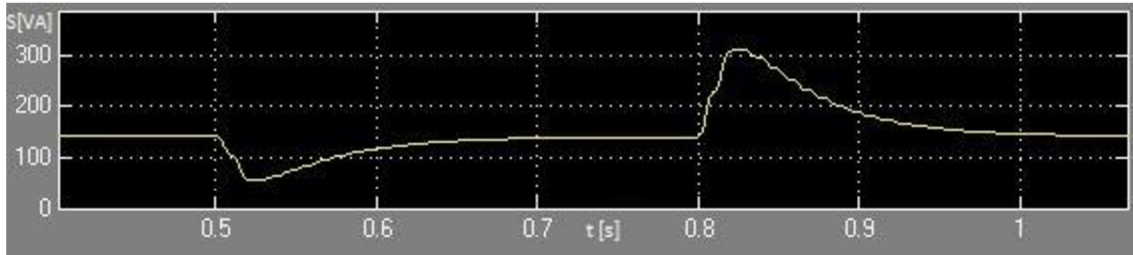
$$\alpha = 0, \beta = 0, P_n = 100, Q_n = 100, T_i = 0,06, T_d = 0,01, U_n = 230, U_p = 0, U_v = 0, T_z = 0, T_p = 0, T_v = 0$$



Obrázek 28: Dynamická charakteristika modelu pro nastavení konstantní zátěže s činným i jalovým výkonem

Z charakteristiky (Obrázek 28) je vidět, že kromě vlastnosti zachování konstantního výkonu na výstupu spotřebiče (úprava velikosti proudu) se proud zpožďuje za napětím. To odpovídá indukčnímu charakteru proudu, což je charakteristika, která byla při zadávání hodnot do masky požadována. Lze tedy říci, že se model v reakci na nastavení jmenovitého jalového výkonu  $Q_n$

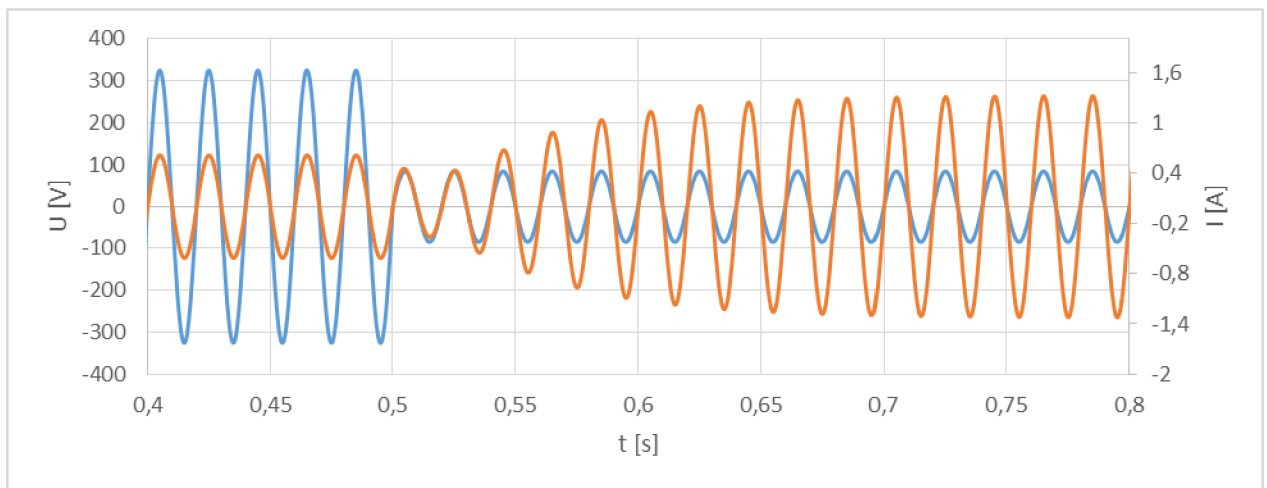
chová podle očekávání. Pro kontrolu se můžeme rovněž podívat na průběh zdánlivého výkonu pro tuto simulaci (Obrázek 29).



Obrázek 29: Změna hodnoty zdánlivého výkonu v čase pro model nastavený na konstantní výkon

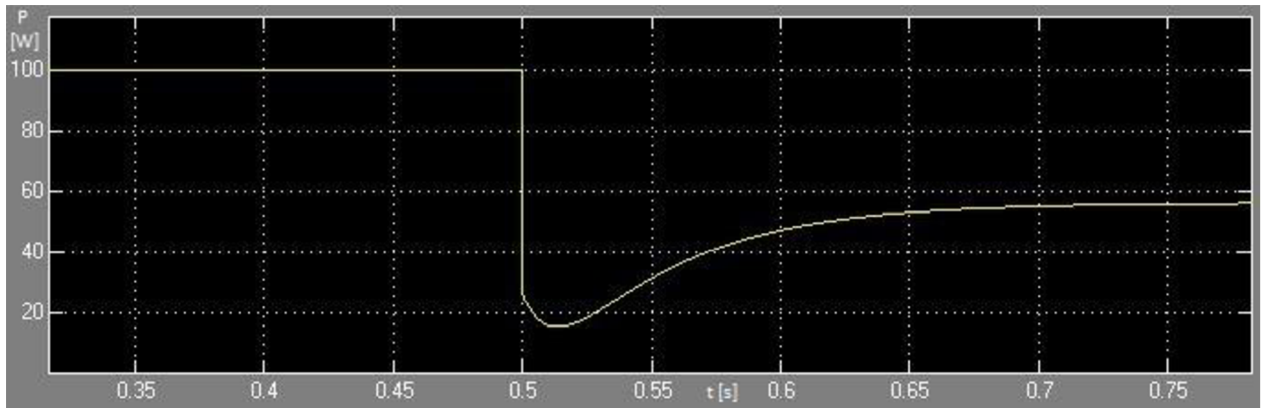
Jako další krok je kontrola systému při přechodu do odporového stavu. Tedy pokud napětí spadne pod nastavitelnou hladinu poklesu  $U_p$ . Hodnotu napětí poklesu je nastavena na 80 voltů a skutečné napětí poklesne až na 60 voltů. Podle změřené charakteristiky (Obrázek 24) výsledný proud pořád vzroste oproti hodnotě při 230 voltech, ale výsledný odebíraný výkon už bude nižší. Nastavení modelu bude tedy následovné:

$$\alpha = 0, \beta = 0, P_n = 100, Q_n = 0, T_i = 0,06, T_d = 0,01, U_n = 230, f = 50, U_p = 80, U_v = 0, T_z = 0, T_p = 0, T_v = 0$$



Obrázek 30: Dynamická charakteristika modelu při poklesu napětí pod hodnotu  $U_p$

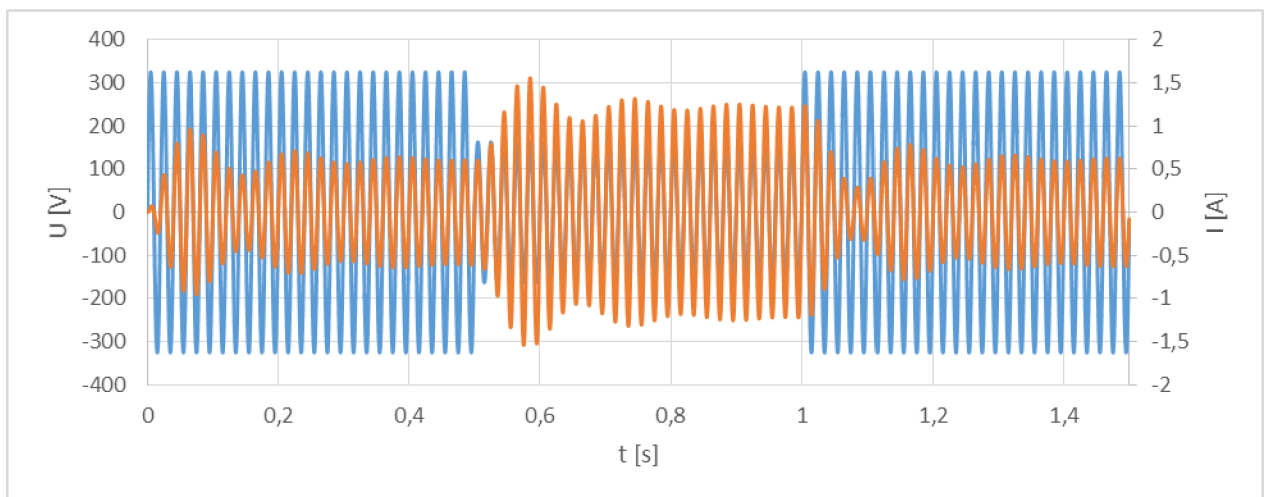
Z charakteristiky (Obrázek 30) se zdá, že se model chová tak, jak je požadováno. Z této charakteristiky ovšem není hned vidět, jestli výkon ve výsledku skutečně poklesl, či nikoliv, proto se podíváme na průběh činného výkonu (Obrázek 31), ze kterého je patrné, že výsledný výkon poklesl, a tedy je funkce správná.



Obrázek 31: Změna činného výkonu v čase při poklesu napětí pod hodnotu  $U_p$

Nyní zbývá k otestování poslední nastavitelná funkce modelu, a to nastavení časových konstant. Časové konstanty jsou nastavitelné dvě, a to časová konstanta dolnoproústného filtru  $T_d$ , která odpovídá rychlosti reakce systému a časová integrační konstanta PI regulátoru  $T_i$ , která odpovídá rychlosti dorovnání hodnoty odebíraného proudu na požadovanou úroveň. Z povahy konstrukce základní výpočtové smyčky by neměla hodnota  $T_d$  být nikdy vyšší, než hodnota  $T_i$ . Kdyby byla, tak by vedla k nestabilitě signálu proudu. Jako příklad správného nastavení hodnot můžeme vzít simulaci konstantního výkonu s hodnotami  $T_i = 0,06$  a  $T_d = 0,01$ . Průběh této simulace (Obrázek 25, Obrázek 26) můžeme považovat za kontrolní. Nyní zkusíme hodnoty časových konstant prohodit. Pro lepší přehlednost upravíme oproti kontrolní simulaci zvýšení napětí na jmenovitou hodnotu až v čase jedné sekundy. Výsledné nastavení bude následující:

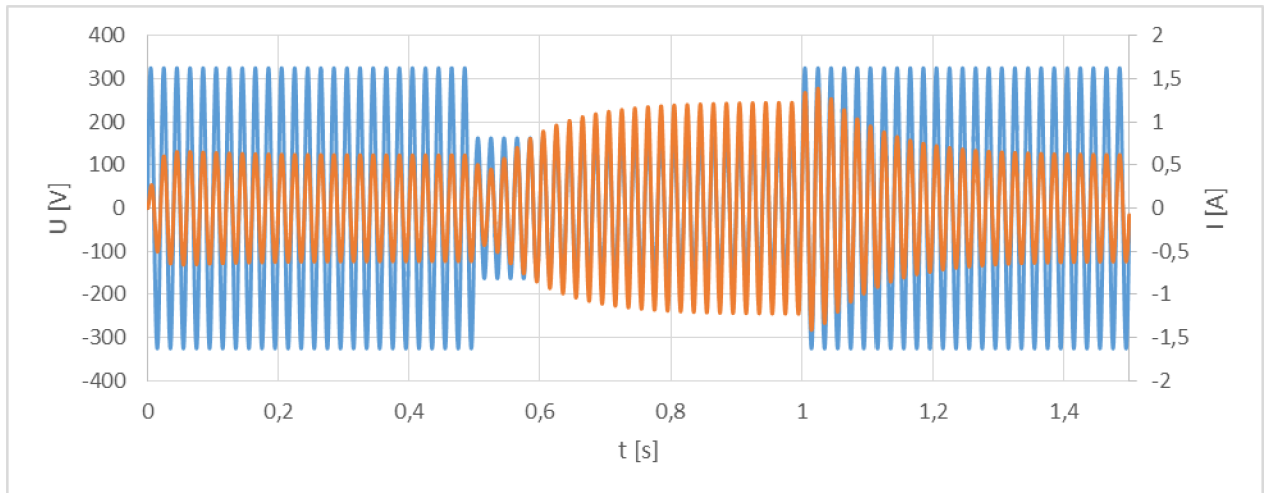
$$\alpha = 0, \beta = 0, P_n = 100, Q_n = 0, T_i = 0,01, T_d = 0,06, U_n = 230, f = 50, U_p = 0, U_v = 0, T_z = 0, T_p = 0, T_v = 0$$



Obrázek 32: Dynamická charakteristika modelu pro nastavení nestability systému pomocí časových konstant

Z obrázku je patrné (Obrázek 32), že se výsledný signál při změně vždy nepatřičně rozkmital. Tím potvrzuje teoretickou podmínku pro správnou funkci systému, že integrační časová konstanta musí být vždy vyšší než časová konstanta dolnoproústného filtru.

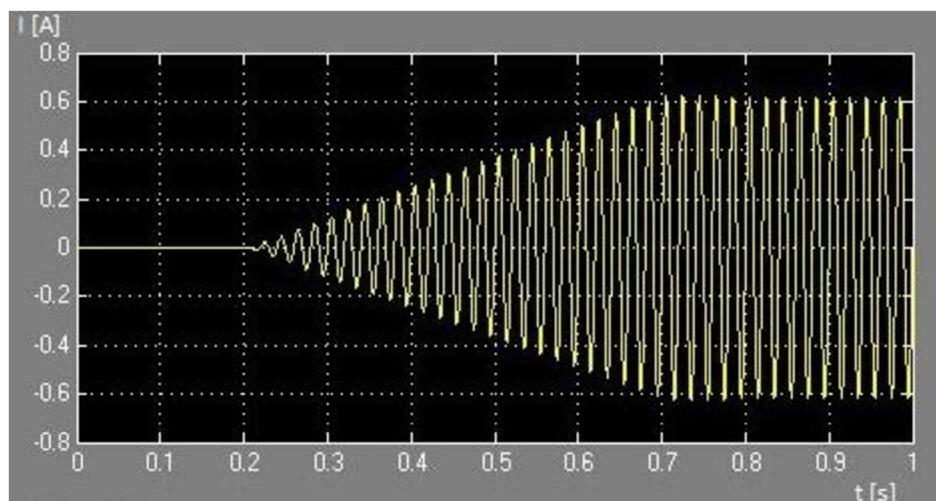
Pro účel této práce je zejména velice důležitá odezva systému na změnu integrační časové konstanty  $T_i$ , proto provedeme simulaci, kdy zpět nastavíme hodnotu  $T_d = 0,01$  a časovou integrační konstantu nastavíme na delší čas a to 0,1 sekundy. Zbylé parametry zůstanou stejné.



Obrázek 33: Dynamická charakteristika modelu pro nastavení delší integrační časové konstanty

Ze simulace (Obrázek 33) je vidět, že oproti kontrolní simulaci (Obrázek 25) se doba ustálení signálu značně zvýšila. To potvrzuje teoretický předpoklad a splňuje požadavek na chování systému. Pro kontrolu správného chování systému s ohledem na nastavení časových konstant byly provedeny další simulace, jež jsou uvedeny v příloze (Obrázek 50).

Poslední funkce, která ještě nebyla uvedena, je schopnost modelu sepnout v požadovaný okamžik a následně postupně nabíhat na požadovanou hodnotu. Za tímto účelem nastavíme konstantu doby zapnutí  $T_z = 0,2$  a dobu nabíhání  $T_d = 0,5$ . Ostatní konstanty zůstanou stejné, jako pro předchozí simulaci, kromě poklesu napětí, které je po celou dobu konstantní.



Obrázek 34: Dynamická charakteristika modelu pro nastavení postupného nabíhání zatížení

Na průběhu proudu (Obrázek 34) je vidět, že spotřebič začal odebírat proud v čase 0,2 s a dosáhl jmenovité hodnoty v čase 0,7 s, což trvalo dobu 0,5 s, takže se chová podle našich požadavků.

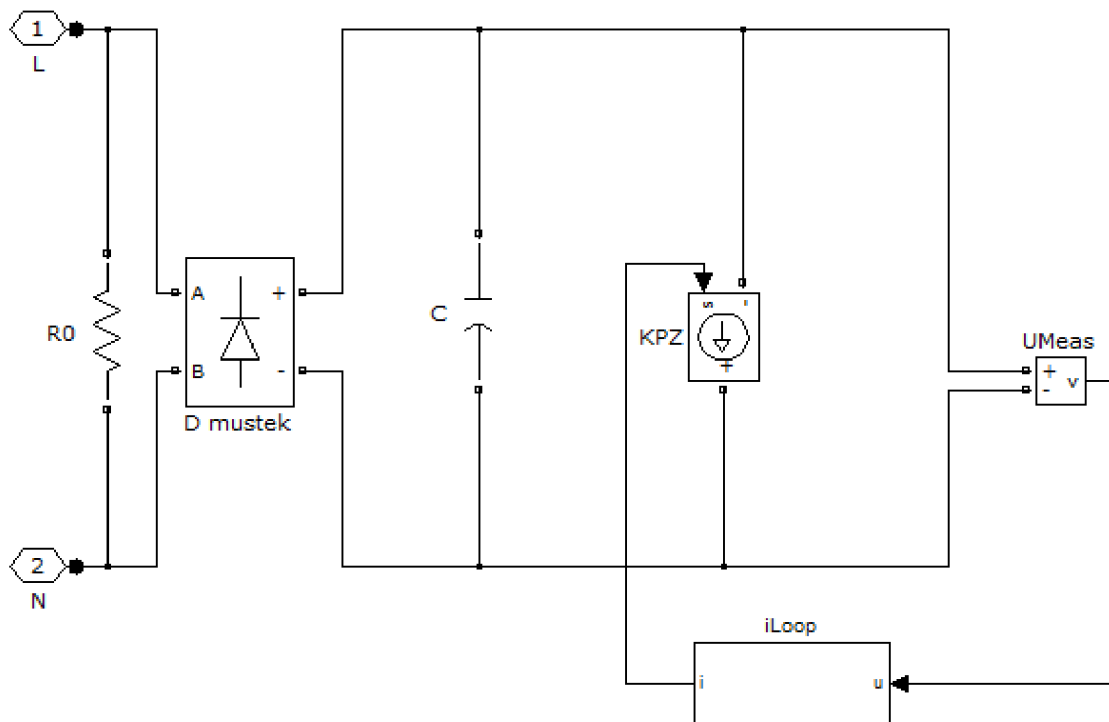
### 3.4 Model spotřebiče s konstantním výkonem na výstupu s neharmonickým odběrem proudu

Model zátěže popsáný v kapitole 3.2 nastavený tak, aby odebíral pouze proud popsatelný pomocí sinusové křivky. Bohužel popisovat některé modely tímto způsobem by bylo chybné,

protože jak je vidět z obrázku (Obrázek 6), některé modely mají dost odlišnou charakteristiku. Pro správnou simulaci je tedy nutné vytvořit model, který bude tento neharmonický odběr respektovat. Název subsystému tohoto modelu je „P zatez s menicem“.

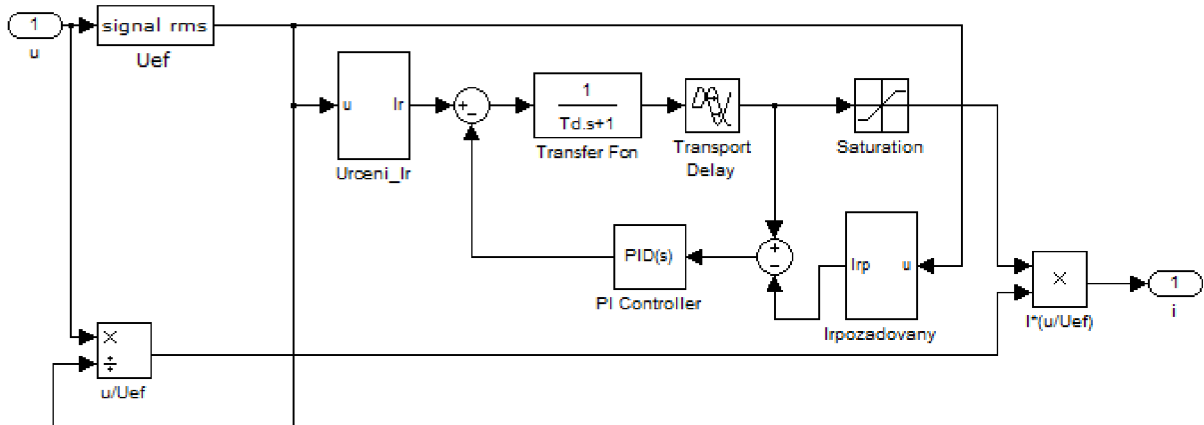
### 3.4.1 Provedení modelu s neharmonickým odběrem proudu

Jako první část modelu se musí změnit předřadná elektronika modelu. Abychom dosáhli správného chování modelu, musí být před samotný výpočet řídicího signálu umístěn diodový můstek a kondenzátor. Diodový můstek je nastavený jako ideální a velikost kondenzátoru se nastavuje podle zadané časové konstanty systému  $T_c$  prvotním výpočtem v masce. Zároveň je pořád připojen paralelní odpor  $R_0$ , který odebírá jednu tisícinu jmenovitého výkonu pro plynulý chod simulace. Po úpravě model dostává následující podobu (Obrázek 35).



Obrázek 35: Model subsystému „P zatez s menicem“

Pro neharmonický model vycházíme z modelu sinusového, a to zejména jeho výpočtové smyčky proudu. Ta může být celá zachována i se svými subsystémy, které vypočítávají vstupní a požadovaný proud (Obrázek 17). Naopak zcela musí být změněn výpočet signálu proudu (Obrázek 21), který vytvářel signál sinusového typu. S tím souvisí i vynechání smyčky pro výpočet jalového výkonu, jelikož již nepůjde zadávat do výpočtu signálu fázový posuv. Signál proudu vycházející z proudové smyčky musí být násoben poměrem aktuálního napětí a jeho efektivní hodnoty, aby odpovídal skutečnému odběru v této části systému. Výsledný výpočet je vidět na obrázku (Obrázek 36).



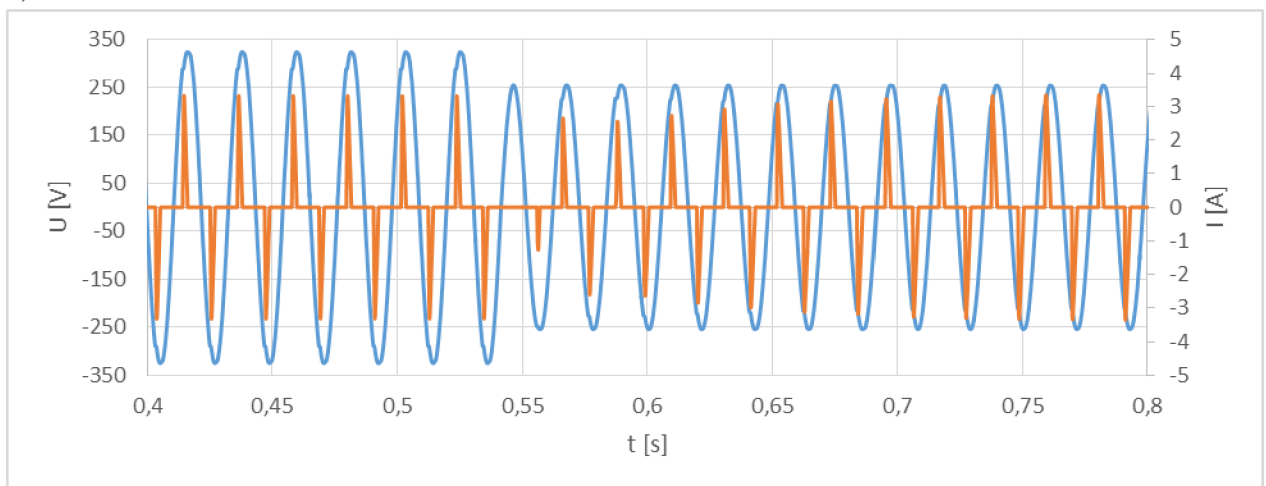
Obrázek 36: Schéma výpočtu subsystému „iLoop“ pro model s nesinusovým odběrem

### 3.4.2 Ověření funkčnosti modelu s nesinusovým odběrem

Ověřování funkčnosti modelu musí znovu proběhnout, jak pro statické vlastnosti modelu, tak pro dynamické. Statické vlastnosti modelu vychází hlavně z logiky nastavení proudové smyčky, a jelikož ta se nezměnila, tak by se též neměla teoreticky měnit statická charakteristika. To bylo následně potvrzeno i ověřovací simulací, takže dále se budeme zabírat pouze dynamickou analýzou.

Jelikož funkce spojené s charakterem proudové smyčky systému jsou již otestované, provedeme pouze krátkou simulaci pro ukázkou změny charakteru odebíraného proudu. Pro dynamickou analýzu vyvoláme pokles napětí, prvně ze jmenovité hodnoty 230 voltů na 180 voltů a následně pokles ze 180 voltů na 30 voltů, abychom se dostali do bodu, kdy je zátěž přepnuta do odporové charakteristiky. Parametry masky jsou nastaveny následovně:

$$\alpha = 0, P_n = 100, T_i = 0,06, T_d = 0,01, U_n = 230, f = 50, U_p = 80, U_v = 20, \tau_c = 0,04, T_z = 0, T_p = 0, T_v = 0$$



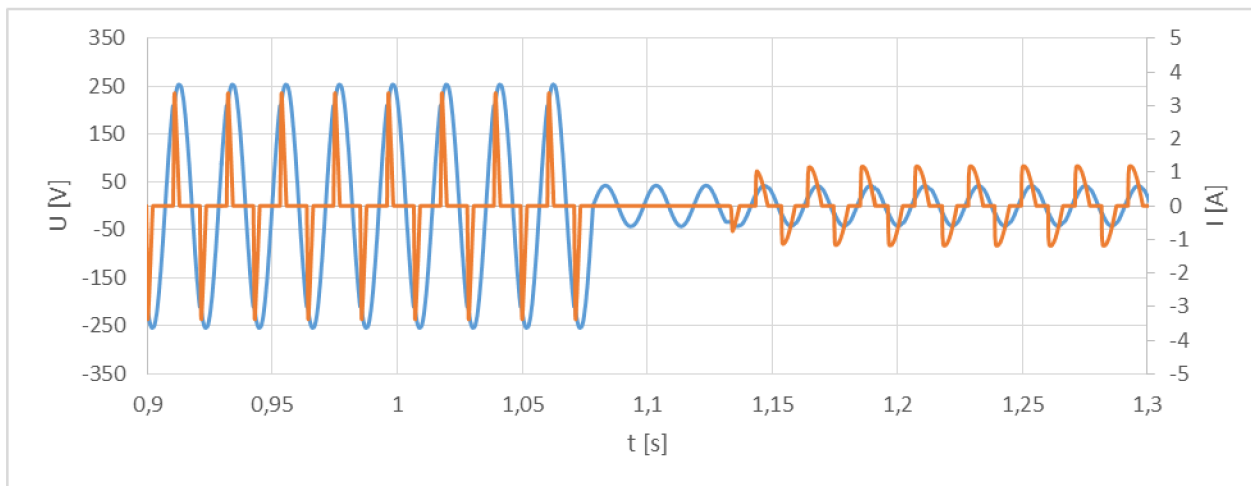
Obrázek 37: Dynamická charakteristika modelu nesinusového odběru v čase simulace 0,4 až 0,8 sekundy

Ze simulace je vidět (Obrázek 37), že proud již není odebírána plynulé sinusové charakteristice, ale v podobě pulsů. Ty při poklesu napětí se utlumí a následně se jejich „peak“ začne postupně vracet na původní hodnotu. Doba odběru pulsů po poklesu ovšem vzrostla tak,



aby výsledný odebíraný výkon zůstal konstantní, čímž splnil zadanou podmínku udržení konstantního výkonu a splnil požadavek na tvar odebíraného proudu.

Pro úplnost si zobrazíme i průběh druhého poklesu, tedy ze 180 voltů na 30 (Obrázek 38). Při tomto poklesu dokonce dojde k výpadku napájení systému, což při takto velkých poklesech odpovídá skutečnému systému. Při obnovení odběru je „peak“ menší, což odpovídá odporové charakteristice a tedy poklesu odběru výkonu a proudu.



Obrázek 38: Dynamická charakteristika modelu nesinusového odběru v čase simulace 0,9 až 1,3 sekundy

### 3.5 Model odběru činného výkonu

Jako poslední vytvořený model vytvořený pro potřeby této práce je model, který odebírá pouze činný výkon. Výhoda tohoto modelu oproti modelu „PQ zatez“ je ta, že má rychlejší odezvu. Název subsystému tohoto provedení je „P zatez“.

#### 3.5.1 Provedení modelu odběru činného výkonu

Provedení modelu „P zatez“ je v podstatě kombinací předchozích řešení. Z modelu „PQ zatez“ používáme logiku tvorby modelu hlavních částí (Obrázek 16). Tedy opět máme kontrolovaný proudový zdroj řízený subsystémem pro výpočet proudového signálu, který je bez předřadné elektroniky. Pro řízení signálu ovšem použijeme subsystém „iLoop“ z modelu „P zatez s menicem“ (Obrázek 36). V tomto provedení je hlavní rozdíl v tom, že oproti systému „PQ zatez“ získáváme signál bez zpoždění z důvodu násobení proudového signálu ze smyčky poměrem okamžitého napětí k jeho efektivní hodnotě. Nevýhodou ovšem je ztráta možnosti odebrání jalového výkonu.

#### 3.5.2 Ověření funkčnosti modelu činného výkonu

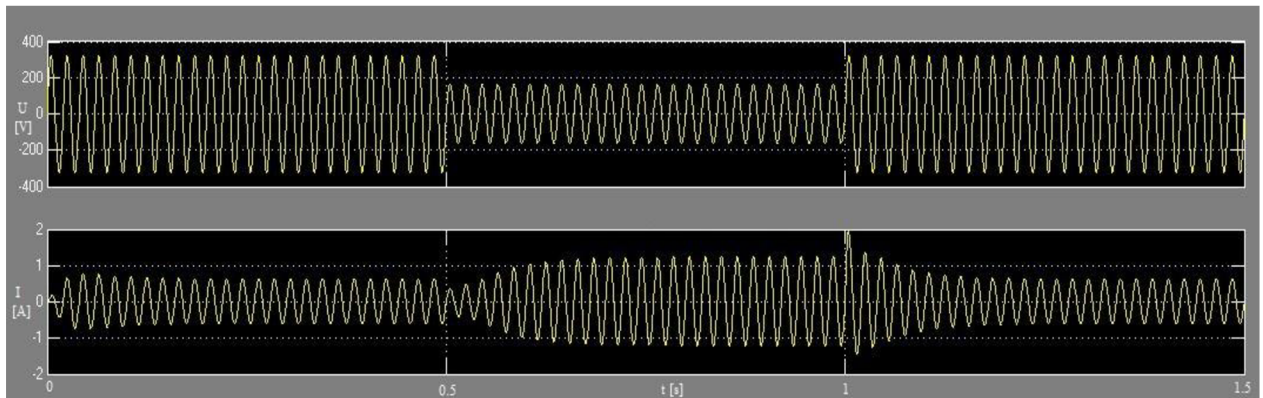
Jelikož je použita opět stejná výpočetní proudová smyčka, tak statická charakteristika opět odpovídá předchozímu testování, vyjma absence jalového výkonu. Můžeme ji tedy srovnat s charakteristikou již naměřenou dříve (Obrázek 24).

Pro dynamickou charakteristiku vyvoláme pokles napětí na 115 voltů a poté opětovně navýšení na jmenovitou hodnotu 230 voltů. Pro dobrou přehlednost nastavíme daný model na konstantní odběr výkonu. Výsledná charakteristika (Obrázek 39) splňuje očekávané požadavky.

Model se změnou napětí reaguje okamžitě a přesně podle požadované charakteristiky. Lze tedy říci, že funkčnost modelu je ověřená.

Nastavení modelu pro simulaci bylo následující:

$\alpha = 0, P_n = 100, T_i = 0,06, T_d = 0,01, U_n = 230, f = 50, U_p = 80, U_v = 20, T_z = 0, T_p = 0, T_v = 0$



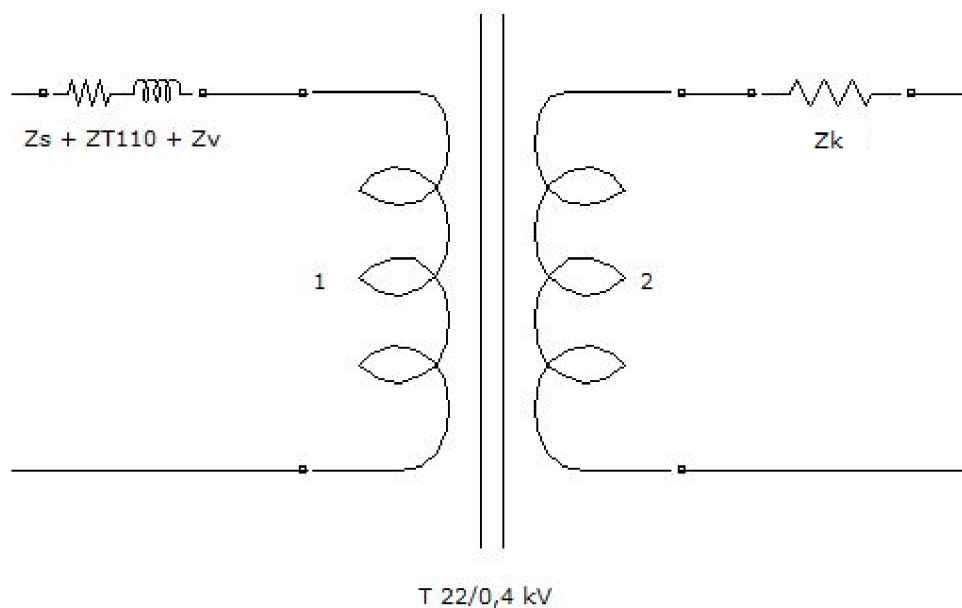
Obrázek 39: Dynamická charakteristika modelu „P zatez“

## 4 VLIV SPOTŘEBIČE S KONSTANTNÍM VÝKONEM NA VÝSTUPU NA STABILITU NAPĚTÍ NN SÍTĚ

Vliv spotřebiče s konstantním výkonem na výstupu lze opět rozdělit do dvou kategorií, a to na vliv statický a vliv dynamický. Aby bylo možné posoudit kterýkoliv z těchto dvou vlivů, je nutné prvně sestavit síť, na které se provedou daná měření.

### 4.1 Model NN sítě

Model sítě provádíme pouze jednofázově, což nebrání uplatnění výsledků na síť třífázové. Aby výsledky z měření byly co nejvíce věrohodné, tak je potřeba sestavit síť, která odpovídá typické NN síti, tedy aby měla parametry průměrné NN sítě. Tato problematika už byla řešena, takže může vycházet z literatury [2]. Samotná síť je tvořena dvěma napěťovými hladinami (22 kV a 0,4 kV). Pouze dvě napěťové hladiny jsou zvoleny z důvodu co největšího zjednodušení modelu, aby byla zachována rychlost simulace. Na nízké hladině napětí je kabel o délce 0,8 km. Dále pokračujeme-li směrem k vyšší napěťové hladině. Tak máme distribuční transformátor 22/0,4 kV, který nám rozděljuje napěťové hladiny. Na vyšší napěťové hladině pak máme 25 km dlouhé venkovní vedení, transformátor 110/22 kV a impedanci reprezentující zbytek sítě. V rámci programu Simulink pak tyto prvky nahradíme impedancemi, jejichž parametry bereme z literatury [2]. Výsledný model je pak vidět na následujícím obrázku (Obrázek 40). Zkratový výkon sítě byl naměřen 134512,7 VA, což bude bráno jako vztažná hodnota.



Obrázek 40: Model NN sítě

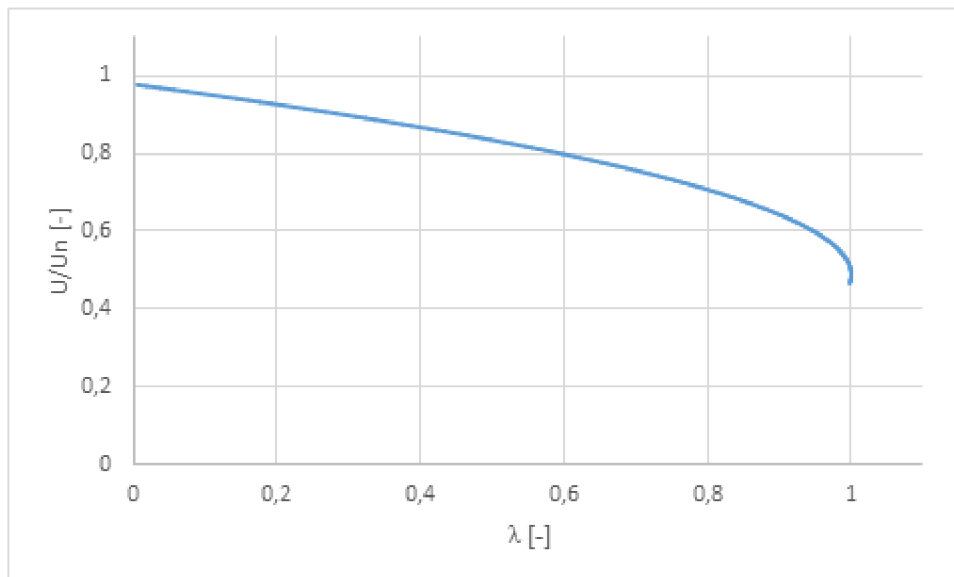
### 4.2 Vliv spotřebičů s konstantním výkonem na výstupu na statickou napěťovou stabilitu

Statická stabilita systému se vyjadřuje pomocí takzvaných nosových křivek. Ty vyjadřují závislost napětí sítě na přenášeném výkonu. Abychom mohli sestavit takovou křivku, potřebujeme na zátěži, která je připojena k síti, postupně zvyšovat výkon. Jako zátěž použijeme

model „P zatez“, který je schopen simulovat odběr činného výkonu. Nastavení modelu je následující:

$$U_n = 230, f = 50, \alpha = 2, P_n = 150000, T_i = 0,06, T_d = 0,01, U_p = 0, U_v = 0, T_z = 2,1, T_p = 149, T_v = 0$$

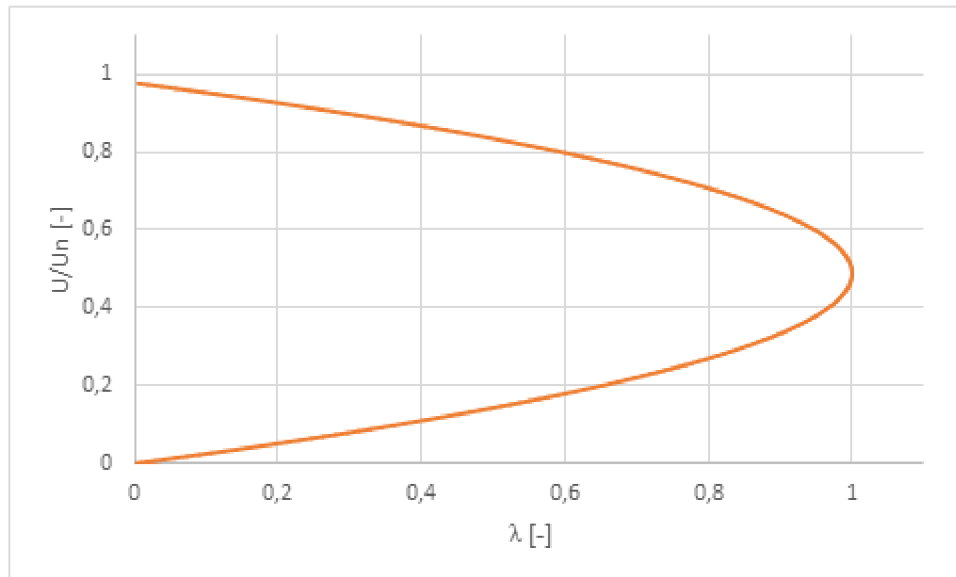
Z parametrů je patrné, že v čase 2,1 sekundy (tedy po odeznění přechodných jevů spojených se spuštěním simulace) má začít postupně nabíhat výkon z nuly na jmenovitou hodnotu  $P_n$ . Ta se má v čase 151,1 sekundy ustálit na hodnotě 150 kW. Parametr alfa ( $\alpha$ ) je nastaven na hodnotu 2, což odpovídá čistě odporové zátěži. Konstanty  $U_p$  a  $U_v$  jsou nastaveny na nulovou hodnotu, tedy funkce přepnutí do odporové charakteristiky a funkce úplného vypnutí spotřebiče jsou vypnuty.



Obrázek 41: Změřená nosová křivka při zatížení odporovou zátěží

Z charakteristiky (Obrázek 41) je vidět, že při daném nastavení charakteristika jen těsně překročila bod zvratu. V okamžiku bodu zvratu byl odebíraný výkon 32741 wattů. Při této hodnotě byl jmenovitý výkon na hodnotě 131991 wattů, což vztaženo ke zkratovému výkonu sítě odpovídá procentuálnímu zatížení 98,125 %. Jinými slovy, by takový jmenovitý výkon byl odebíraný při jmenovité hodnotě napětí, ale protože čistě odporové zatížení má silný samoregulační efekt, tak k dosažení bodu zvratu je potřeba zapojení spotřebiče s daleko vyšší jmenovitou hodnotou výkonu.

Nyní provedeme stejné měření, ale pro zátěž s konstantním odběrem výkonu. Všechny parametry simulace tedy zůstaly stejné až na parametr alfa, který byl změněn na nulu.



Obrázek 42: Změřená nosová křivka při zatížení zátěží s konstantním odběrem výkonu

Zde již byla vykreslena nosová křivka celá (Obrázek 42). Z křivky je patrné, že bod zvratu byl překonán dříve než v případě odporové zátěže. Jmenovitá hodnota výkonu v okamžiku bodu zvratu dosáhla hodnoty 34516 wattů, což vztaheno ke zkratovému výkonu sítě odpovídá 25,66 %. Při porovnání hodnoty spotřebiče s konstantním výkonem na výstupu a spotřebiče odporového typu zjistíme, že k dosažení bodu zvratu stačila zhruba čtvrtina jmenovitého výkonu.

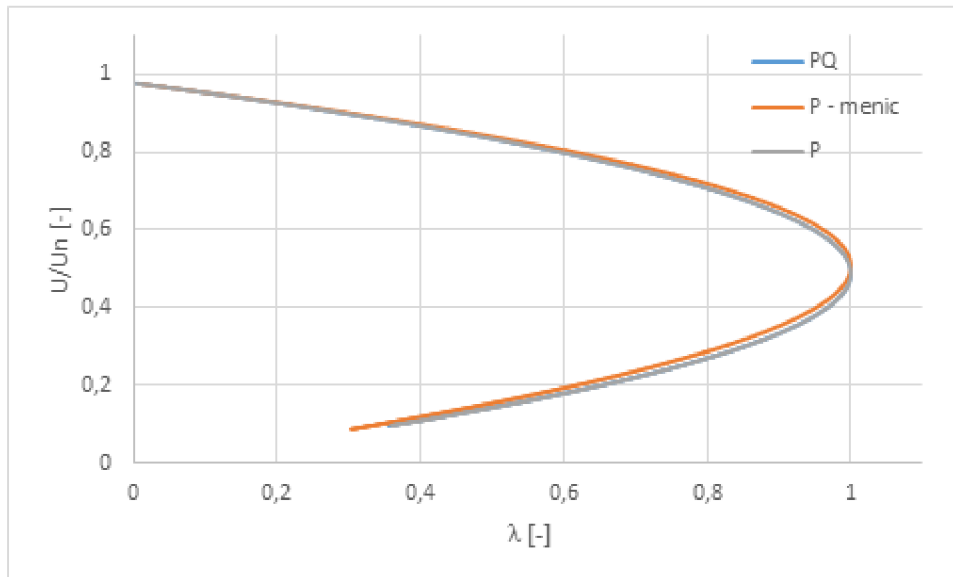
Při opakování simulace se změnou parametru alfa na jedna, tedy na spotřebič s konstantním odběrem proudu, tak hodnota jmenovitého výkonu při dosažení bodu zvratu odpovídala 68110 wattům, což je zhruba polovina hodnoty, která byla potřeba pro spotřebič odporového typu. V poměrných hodnotách odpovídá zatížení ke zkratovému výkonu 50,635 %. Charakteristika odpovídala charakteristice spotřebiče s konstantním výkonem na výstupu (Obrázek 42).

Tyto simulace byly provedeny na modelu „P zatez“, který odebírá harmonický proud. Některé spotřebiče s odebíraným konstantním výkonem ovšem odebírají proud neharmonický. Abychom popsali i vliv neharmonického proudu, byla provedena simulace spotřebiče s konstantním výkonem na výstupu s parametry předchozí simulace, kromě parametru alfa, který odpovídá nule a časové konstanty RC, která odpovídá 0,04 sekundy, na modelu „P zatez s menicem“. Kritický bod se zde dostavil ještě dříve, a to u hodnoty jmenovitého výkonu 33548 wattů, což poměrově ke zkratovému výkonu sítě odpovídá 24,94 %. Důvodem této změny je zvýšený úbytek napětí způsobený výskytem vyšších harmonických, který je způsobený právě daným zkreslením.

Pro potvrzení vlivu vyšších harmonických byla vytvořena řada simulací. Pro každý vytvořený model byly nastaveny stejné parametry a provedeny simulace. Zároveň, aby byl ukázán vliv statické charakteristiky spotřebičů s konstantním výkonem na výstupu (Obrázek 4), byla přidána funkce přechodu spotřebiče do odporové charakteristiky při 80 voltech a úplné vypnutí spotřebiče při 20 voltech. Nastavení parametrů pro model „P zatez“ tedy bylo následující:

$$U_n = 230, f = 50, \alpha = 0, P_n = 150000, T_i = 0,06, T_d = 0,01, U_p = 0, U_v = 0, T_z = 2,1, T_p = 149, T_v = 0$$

Pro model „PQ zatez“ pak byly navíc nastaveny parametry  $Q_n = 0$  a  $b = 0$  a pro model „P zatez s menicem“ byl nastaven parametr  $T_c = 0,04$ .



Obrázek 43: Změřené nosové křivky pro jednotlivé modely při zatížení na konstantní výkon

Na charakteristice (Obrázek 43) je vidět, že křivky modelu „PQ zatez“ a „P zatez“ se překrývají. To pouze podporuje správnost zvoleného řešení. Oproti tomu model „P zatez s menicem“ se lehce liší. To je dáno neharmonickým průběhem odebíraného proudu, jak již bylo vysvětleno výše, tedy potvrzuje předešlé simulace. Křivka se v dané simulaci ovšem nedostala až na totální výpadek napětí. Důvod toho je, že při napětí 80 voltů spotřebič přešel do odporové charakteristiky, takže začal platit samoregulační efekt spotřeby. Z tohoto důvodu žádný ze spotřebičů v charakteristice nedosáhl hodnoty napětí 20 voltů, což byla hodnota, při které se daná zátěž vypne.

### 4.3 Vliv spotřebičů s konstantním výkonem na výstupu na dynamickou stabilitu napětí

Předpoklad pro správné určení vlivu na dynamickou stabilitu systému je správné nastavení chování spotřebiče, zejména jeho časových konstant tak, aby odezva systému odpovídala rychlosti odezvy jako u skutečného spotřebiče (Obrázek 8).

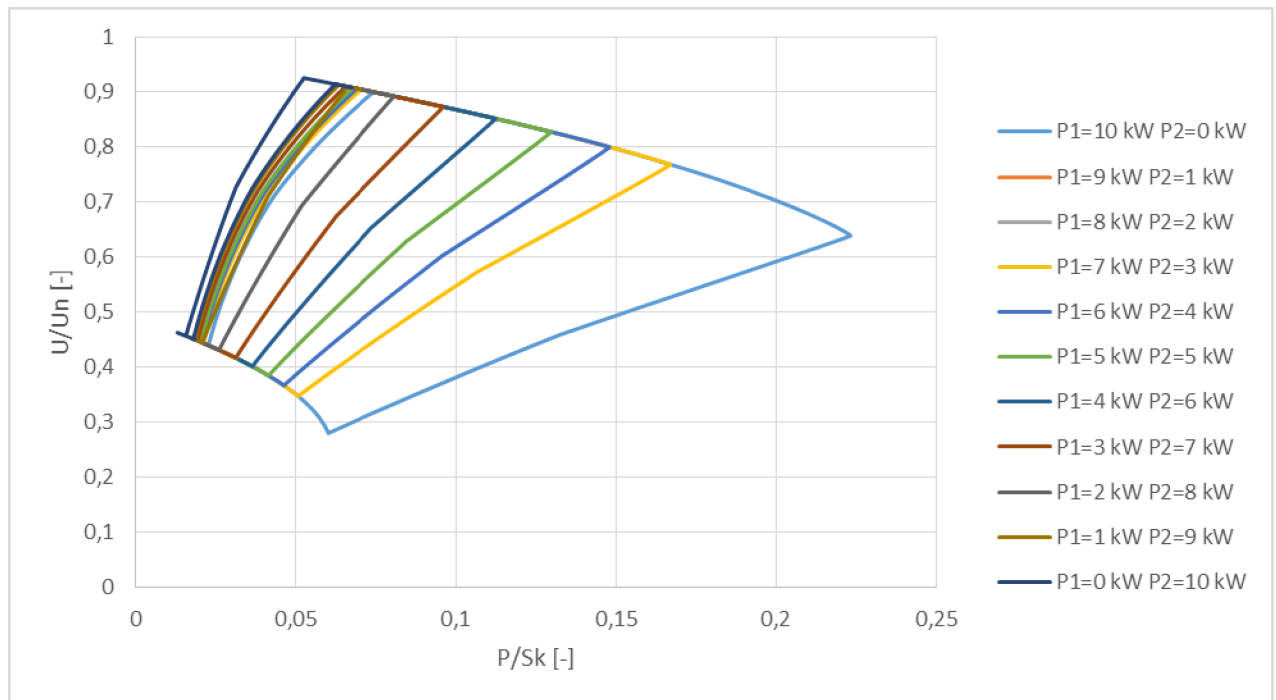
Jako přechodový jev, který může vyvolat napěťovou nestabilitu, použijeme pokles napětí po dobu 100 ms, který pro různé simulace bude mít různou hloubku poklesu. Doba 100 ms odpovídá době opětovného zapnutí sítě a velikost poklesu se mění podle místa v síti, takže tento pokles odpovídá nejčastější se vyskytující napěťové události.

Jako první řadu simulací provedeme simulace, kdy budou zapojeny dva modely „P zatez“, kdy jeden je nastaven jako spotřebič s konstantním výkonem na výstupu (P1) a druhý jako čistě odporová zátěž (P2). Simulace jsou řazeny postupně od připojení pouze odporové zátěže přes stejné poměry až po zátěž konstantním výkonem. Parametry zátěží byly nastaveny následovně:

$$P1: \alpha = 0, T_i = 0,02, T_d = 0,01, U_n = 230, f = 50, U_p = 2, U_v = 1, T_z = 0, T_p = 0, T_v = 0$$

$$P2: \alpha = 2, T_i = 0,02, T_d = 0,01, U_n = 230, f = 50, U_p = 2, U_v = 1, T_z = 0, T_p = 0, T_v = 0$$

Součet zátěží byl zvolen 10 kW. Při tomto výkonu dochází v síti k poklesu napětí o 10 %. Vzhledem ke zkratovému výkonu sítě odpovídá zatížení 7,434 %.



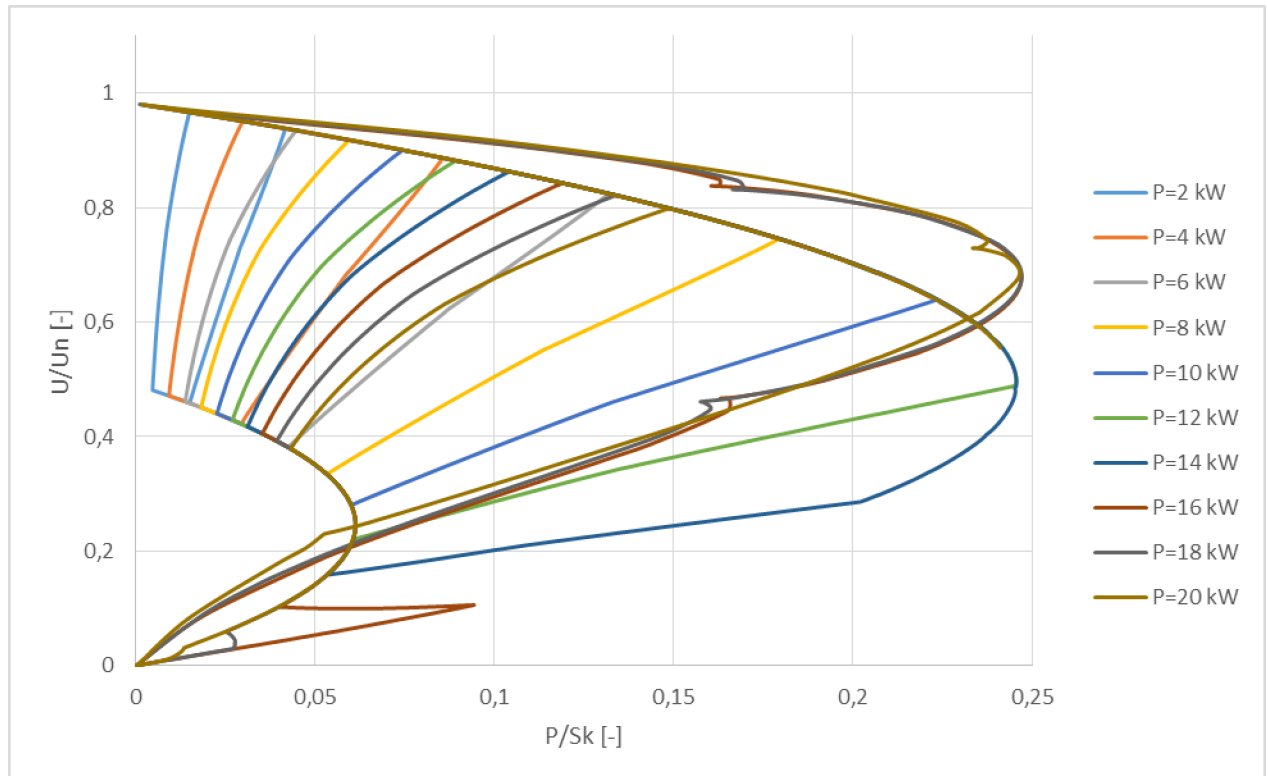
Obrázek 44: Závislost napětí na odebíraném výkonu při poklesu napětí na  $0,5U_n$  a jeho obnově pro různé poměry zátěží

Výsledky simulace (Obrázek 44) jsou převedeny do poměrných jednotek pro přenositelnost výsledků. Z výsledků jsou vidět průběhy poklesů napětí a jejich návrat. Nejprve se vychází z ustáleného stavu, který odpovídá hodnotě nejvyššího napětí pro danou křivku. Následuje pokles napětí doprovázený poklesem výkonu a jeho následná regulace. V rámci regulace se výkon snaží dostat na původní hodnotu v závislosti na poměru typů zátěže, což je následováno dalším poklesem napětí. Poté přichází obnova napětí se zvýšeným odběrem výkonu a následná zpětná regulace.

Při porovnání se změřenou nosovou křivkou (Obrázek 42) lze vidět, že se vytvořila druhá nosová křivka pro jmenovitou hodnotu napětí  $0,5U_n$ . Části křivky, které jsou dále od bodu zvratu, jsou složeny z průběhů zátěží odporového charakteru. Naopak části blízké se k bodu zvratu, jsou složeny z průběhů zátěží s konstantním výkonem. Tedy, i když v této konkrétní simulaci k napěťové destabilizaci systému nedošlo, tak lze vidět, že spotřebič s konstantním výkonem se daleko více přiblížil nestabilnímu stavu než zátěž s čistě odporovým zatížením.

Pro další řadu simulací byl typ zátěže zvolen spotřebič s konstantním výkonem. Parametr, který se bude pro jednotlivé průběhy měnit, je velikost odebíraného výkonu. Pokles napětí bude opět jako v předchozí simulaci po dobu  $100\text{ ms}$  a na hodnotu  $0,5U_n$ . Použitý model je taktéž „Pzatez“. Parametry modelu jsou nastaveny následovně:

$$\alpha = 0, T_i = 0,02, T_d = 0,01, U_n = 230, f = 50, U_p = 2, U_v = 1, T_z = 0, T_p = 0, T_v = 0$$



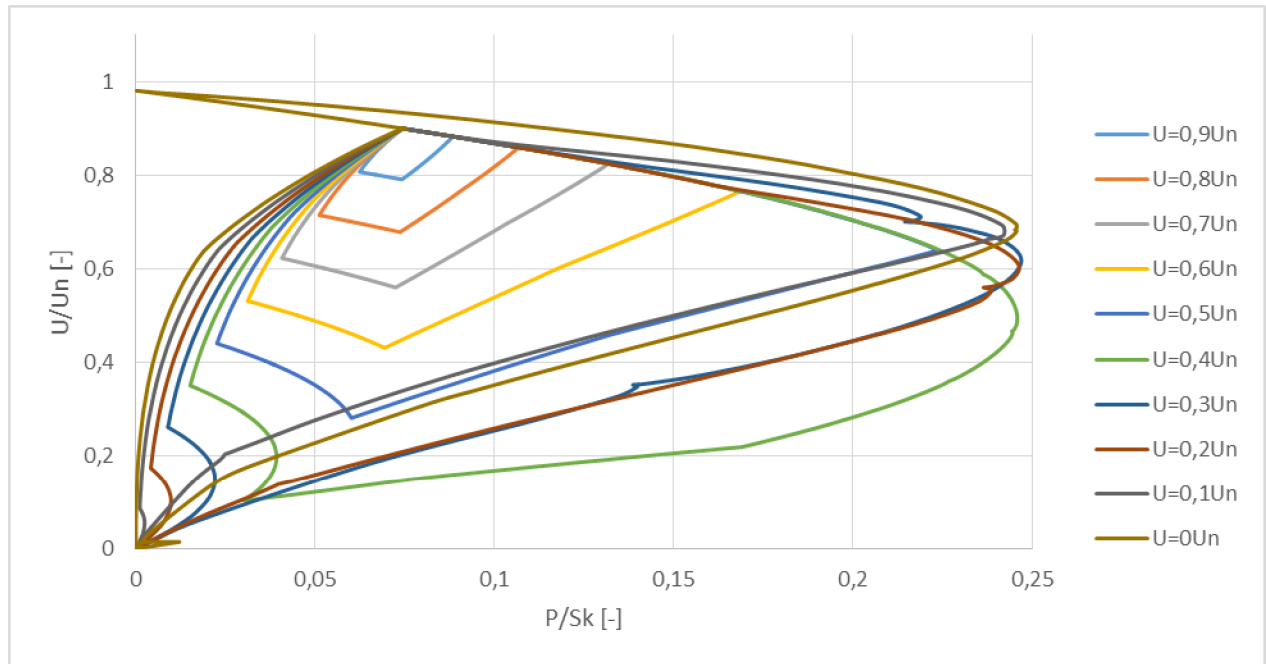
Obrázek 45: Závislost napětí na odebíraném výkonu při poklesu napětí na  $0,5U_n$  a jeho obnově pro různé zatížení spotřebičem s konstantním výkonem

Ze získaných dat (Obrázek 45) lze zjistit, kdy byla překročena stabilita systému. Z grafu to lze určit tak, že napětí spadne pod hodnotu, při které je přenášený maximální výkon pro dané jmenovité napětí. Tedy v našem případě se to stane pro průběh se zatížením  $12 \text{ kW}$ , což poměrově odpovídá zatížení  $8,921 \%$ . Pro všechny průběhy s vyšším jmenovitým výkonem k napěťové nestabilitě dochází taktéž. U průběhů s odběrem vyšším než  $16 \text{ kW}$  dochází dokonce k úplnému kolapsu napětí až do nulových hodnot. Hranice se tedy v tomto případě nachází mezi zátěží  $10 \text{ a } 12 \text{ kW}$ .

Další série simulací bude zaměřena na chování zátěže při různém poklesu napětí. Délka poklesu napětí bude opět  $100 \text{ ms}$ . Připojená zátěž bude simulována pomocí modelu „P zatez“ a bude simulována jako zátěž s konstantním výkonem na výstupu. Parametry dané simulace jsou následující:

$$\alpha = 0, P_n = 10000, T_i = 0,02, T_d = 0,01, U_n = 230, f = 50, U_p = 2, U_v = 1, T_z = 0, T_p = 0, T_v = 0$$





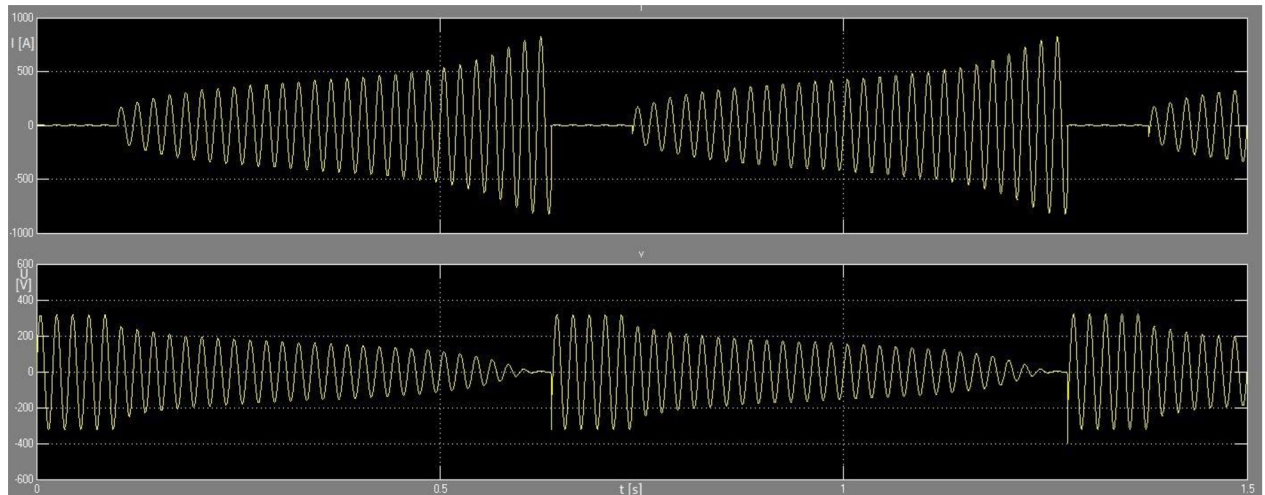
Obrázek 46: Závislost napětí na odebraném výkonu při různé velikosti poklesu napětí a jeho obnově při zatížení 10 kW konstantním výkonem

Ze získaných dat (Obrázek 46) lze vidět, že napěťová nestabilita byla dosažena při poklesu napětí na  $0,4U_n$ . Všechny průběhy s nižším poklesem samozřejmě také pokořily bod zvratu. Zajímavý je průběh při poklesu napětí na  $0,5U_n$ , kdy sice nebylo dosaženo bodu zvratu, ale pravděpodobně při poklesu, který by trval delší dobu, by ho dosaženo bylo. To ukazuje na vliv doby trvání poklesu a rychlosti odezvy systému. Zvrat tedy nastává mezi poklesem napětí na hodnotu mezi  $0,5U_n$  a  $0,4U_n$ . Pro srovnání byly provedeny simulace pomocí stejného modelu, kde je síť zatížena pouze 5 kW konstantním výkonem (Obrázek 51) a 10 kW výkonem rozděleným mezi zátěž odporového charakteru a zátěž s konstantním výkonem v poměru jedna ku jedné.

Proběhnuté simulace dokazují vliv spotřebičů s konstantním výkonem na výstupu na napěťovou stabilitu sítě. Nejlépe je rozdíl oproti klasickým zátěžím vidět na sérii simulací, kdy je postupně výkon odporového charakteru nahrazován výkonem konstantním (Obrázek 44). Simulace rovněž ukazují na to, že se nedají určit obecné podmínky pro přechod systému do nestability. Důvodem je, že je příliš mnoho proměnných, které ovlivňují napěťovou stabilitu. Pro přesné určení musíme mít aspoň některé konstanty určené jako v simulaci pro různou velikost poklesu napětí (Obrázek 46). V této simulaci bylo možné určit, při jakém poklesu napětí dojde k nestabilitě, když jmenovitý odebraný výkon, doba poklesu a složení zátěží bylo neměnné.

Při překročení nestability by se systém mohl dostat do smyčky, při které by se postupně přetížil. Při přetížení by došlo k výpadku zátěží, což by mělo za následek obnovu napětí. Po určité době výpadku by se pak ovšem znovu připojily zátěže a systém by znovu začal přetěžovat. Jak by daný proces mohl probíhat, ukazuje následující simulace (Obrázek 47). Parametry simulace jsou následující:

$$\alpha = 0, P_n = 35000, T_i = 0,02, T_d = 0,01, U_n = 230, f = 50, U_p = 2, U_v = 1, T_z = 0,1, T_p = 1e-6, T_v = 0,1$$

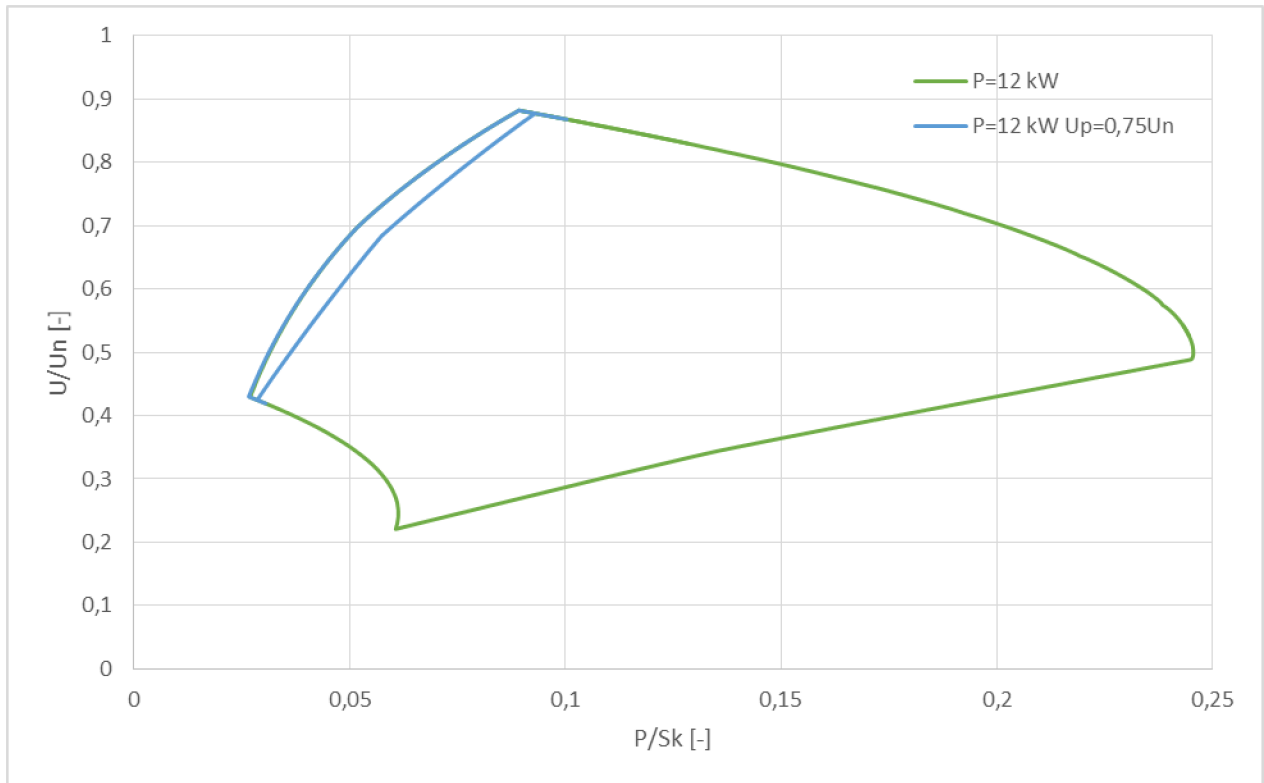


Obrázek 47: Simulace napětového kolapsu

#### 4.4 Návrh řešení zachování napětové stability systému

Na první pohled zřejmé řešení je rozšíření kapacit sítě. To by ovšem bylo velmi nákladné a neefektivní, a proto se zdá tato možnost nereálná. Druhá možnost je upravit zátěže připojované do sítě. Jak je vidět ze změřené charakteristiky (Obrázek 4), zdroje s konstantním výkonem na výstupu jsou schopny zachovávat svou funkci i při velice malých napětích. Důvodem toho je, že zdroje jsou vyráběny jako unifikované pro sítě s různým jmenovitým napětím. Jelikož se vyskytují sítě se jmenovitým napětím okolo 100 voltů, tak v nich zdroje ztrácí svoji funkci zachovávat konstantní výkon při vyšším poměru napětí k napětí jmenovitému, než u sítě jako je naše. Abychom se vyhnuli napětovému kolapsu, je potřeba upravit zdroje tak, aby při poklesu napětí v síti pod určitou hranici přešly do odporové charakteristiky. Jako příklad provedu simulaci, kdy nastavím stejné parametry z již provedené simulace (Obrázek 45 – průběh 12 kW), která skončila kolapsem, ale se změnou parametrů  $U_p$  a  $U_v$ , které zajistí přechod do odporové charakteristiky zátěže při poklesu napětí pod  $0,75U_n$ . V simulaci tedy bude nastaven pokles napětí na dobu 100 ms na hodnotu  $0,5U_n$ . Simulace je provedena na modelu „P zatez“. Parametry jsou nastaveny následovně:

$$\alpha = 0, P_n = 12000, T_i = 0,02, T_d = 0,01, U_n = 230, f = 50, U_p = 172,5, U_v = 20, T_z = 0, T_p = 0, T_v = 0$$



Obrázek 48: Porovnání průběhů závislosti napětí na odebíraném výkonu při změně parametru  $U_p$

Ze simulací je patrné (Obrázek 48), že průběh s přechodem na odporovou charakteristiku nepřekročil bod zvratu, a tudíž na rozdíl oproti průběhu s konstantním výkonem zachoval napěťovou stabilitu systému, a to se značnou rezervou. Lze tedy říci, že řešení tohoto typu může velmi dobře fungovat. Parametr, který by měl definovat tento způsob ochrany napěťové stability sítě, je napětí, kdy by při poklesu pod danou hodnotu spotřebiče ztratily svou schopnost odebrat konstantní výkon a přešly do charakteristiky odporové, jako zde provedený příklad při přechodu charakteristik pro napětí  $0,75U_n$ . Konkrétní hodnota, která by měla být stanovena vzhledem ke jmenovitému napětí, bude muset být kompromis mezi potřebou sítě zachování napěťové stability a potřebou spotřebičů udržení konstantního výkonu. Samozřejmě by musely být zahrnuty i omezení, které vyplývají z konstrukce daných spotřebičů. Ze simulací vyplývá, že daná hodnota by se mohla pohybovat v rozmezí  $0,6U_n - 0,8U_n$ .

## 5 ZÁVĚR

V rámci této práce byly shrnuty teoretické znalosti o spotřebičích s konstantním výkonem na výstupu a jejich vliv na napěťovou stabilitu sítě. Pro úplnost práce zde byly rovněž popsány postupy, jakými se určuje napěťová stabilita systému, a to především v závislosti na přenášený výkon sítě.

Pro ověření předpokladu, že spotřebiče s konstantním výkonem mohou ovlivňovat napěťovou stabilitu, byly sestrojeny tři modely zátěží v prostředí Simulink, které lze velice snadno pomocí nastavitelných parametrů upravit na různé druhy spotřebičů. První model je schopen odběru jak činného, tak jalového výkonu, ale je zatížen zpožděním vzhledem ke změně napětí. Druhý model pokrývá odběr činného výkonu při neharmonickém odběru a třetí model odebírá pouze činný výkon, ale bez zmíněného zpoždění. Modely byly sestrojeny podle koncepce, která respektuje různou napěťovou závislost jednotlivých typů zátěží, což je unikátní postup při programování zátěží, který dosud nebyl nikdy aplikován. Výsledné modely proto musely být rovněž otestovány na ověření jejich funkčnosti, kde výsledné testovací simulace potvrdily jejich funkčnost a správnost.

S hotovými modely bylo možné přejít k simulacím pro ověření vlivu na napěťovou stabilitu. Pro tento účel byla navržena zjednodušená NN síť, která svými parametry představuje průměrnou NN síť. Nejprve byly provedeny simulace pro zjištění vlivu na statickou napěťovou stabilitu. Z nich je patrné, že k dosažení bodu zvratu pro zátěž s konstantním výkonem je potřeba přibližně čtvrtinový jmenovitý výkon oproti zátěži odporového charakteru.

Dále byly provedeny simulace, které hodnotí účinky spotřebičů na napěťovou stabilitu při dynamických změnách. V těchto simulacích je velmi obtížné určit hraniční podmínky napěťové stability. Důvodem je příliš mnoho parametrů, kterými lze definovat napěťové události, jako je aktuální zatížení sítě, charakter zatěžujících spotřebičů nebo velikost a doba poklesu napětí. Ze simulací lze ovšem říci, že při dynamických změnách v síti se zapojenou zátěží s konstantním výkonem na výstupu, je ohrožena napěťová stabilita sítě.

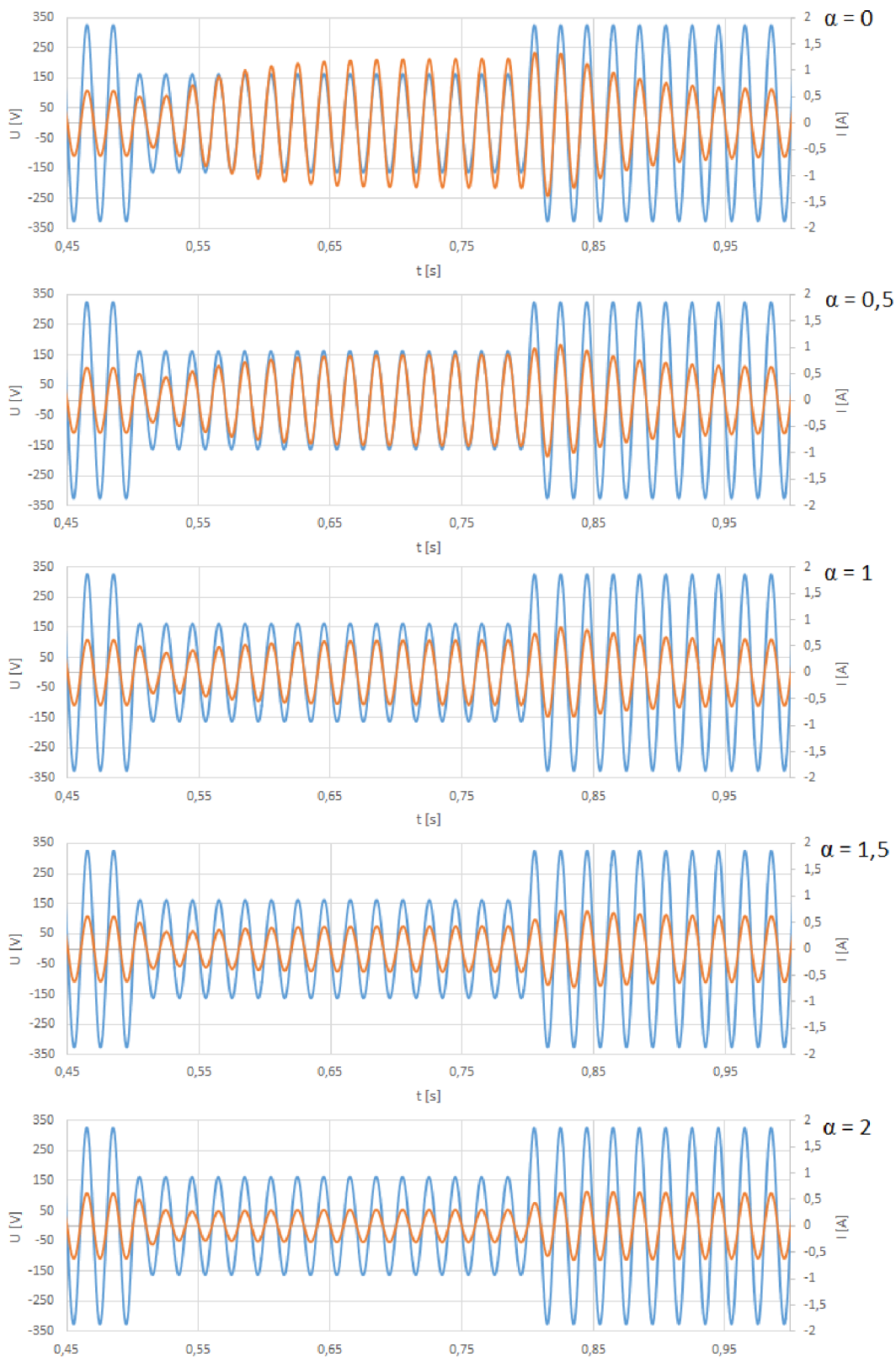
V práci je dále navrhnout způsob řešení dané nestability. V případě poklesu napětí pod předem určenou hranici, by spotřebiče měly přejít ze spotřebičů s konstantním výkonem na spotřebiče odporového charakteru. Pro otestování daného tvrzení byla provedena simulace, která správnost předpokladu potvrzuje. Hodnota napětí pro přechod na odporovou charakteristiku by se mohla pohybovat v rozmezí  $0,6Un - 0,8Un$ .

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ČELADA, J., Řešení napěťové stability elektrizačních soustav v ustáleném stavu [online], Plzeň 2013, [cit. 15-3-2017], 82 stran,  
<https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/10124/Diplomova%20prace%20-%20Bc.%20Jiri%20Celeda.pdf?sequence=1>
- [2] DRÁPELA, J., Kolacia, T., Voltage Sensitivity to Power Flows Related to Distributed Generation. EPE 17<sup>th</sup> International Scientific Conference on 2016, May 16-18, 6pp.
- [3] DRÁPELA, J., Langella, R., Lighting systems. IEEE PES General Meeting 2014, July 27-31, 31 pp.
- [4] DRÁPELA, J., Analýza provozních vlastností měniče MEAN WELL LPC-60-700 při statických a dynamických změnách napětí, Brno 2011, 18 stran
- [5] Energetický regulační úřad. Roční zpráva o provozu ES ČR 2015 [on line]. ERÚ, Praha 2016, [cit. 07-11-2016], 35 stran.,  
[http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni\\_zprava\\_provoz\\_ES\\_2015.pdf/](http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2015.pdf/)
- [6] Energetický regulační úřad. Roční zpráva o provozu ES ČR 2013 [on line]. ERÚ, Praha 2016, [cit. 07-11-2016], 29 stran.,  
[https://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni\\_zprava\\_provoz\\_ES\\_2013.pdf/20c3f587-a658-49f7-ace9-56be8a66b7b9](https://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2013.pdf/20c3f587-a658-49f7-ace9-56be8a66b7b9)
- [7] HESKES, P. J. M., MYRZIK, J. M. A, KLING, W.L, Impact of distribution sytem's nonlinear loads with constant power on grid voltage. European Transactions on Electrical Power, Vol. 21, January 2011, pp. 698-711
- [8] INÉS ROMERO NAVARRO. *Dynamic load models for power systems: estimation of time-varying parameters during normal operation*. Lund: Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation [Institutionen för industriell elektroteknik och automation], Univ, 2002.,158 stran, ISBN 9188934268.
- [9] MACHÁČEK, J., RADIL, L., Ekonomika v energetice, Brno 2014, 102 stran
- [10] MÁŠLO, Karel. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. Asociace energetických manažerů, Praha 2013, 258 stran, ISBN 978-80-260-4461-1.

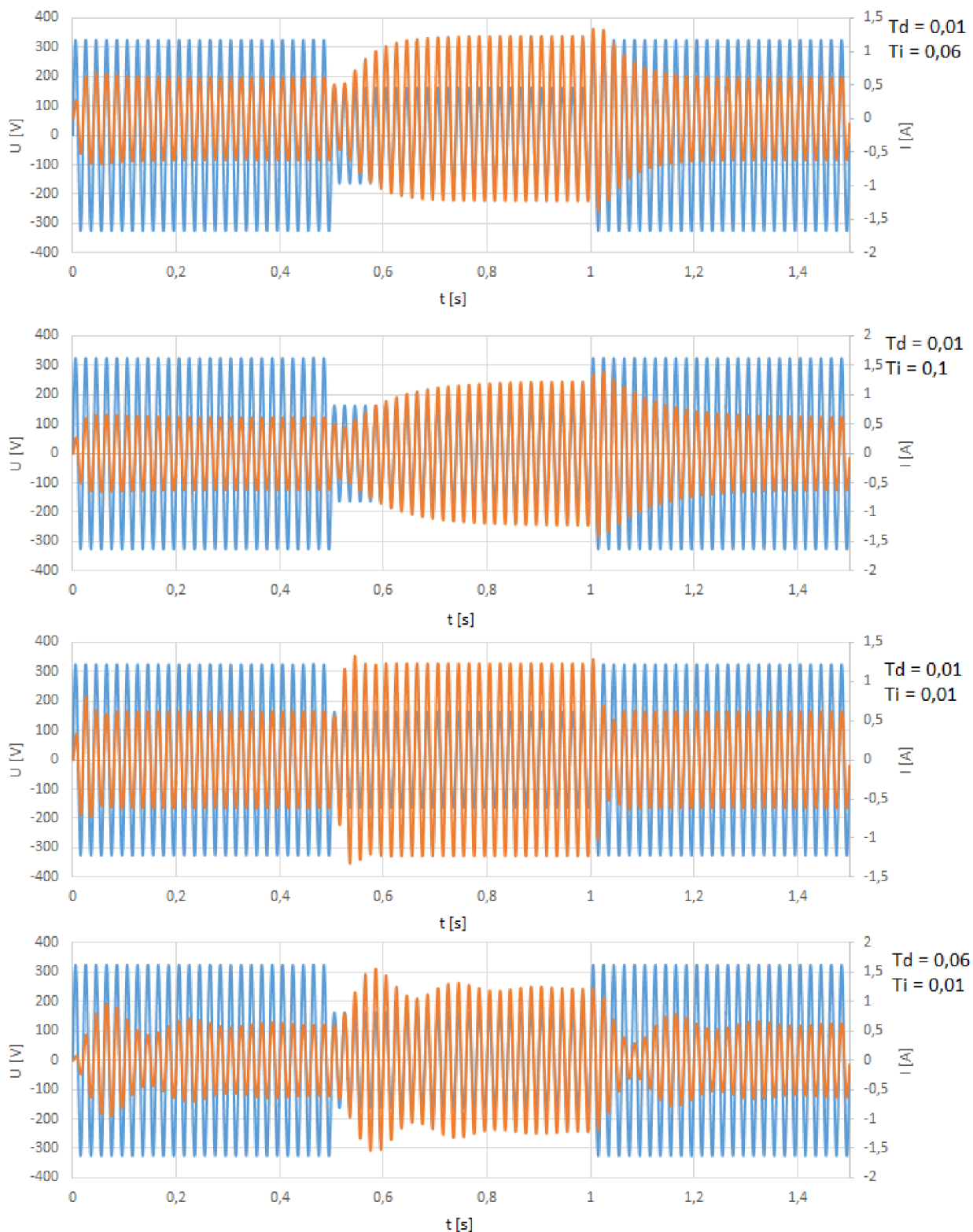
## PŘÍLOHY

Parametry simulace:  $\beta = 0$ ,  $P_n = 100$ ,  $Q_n = 0$ ,  $T_i = 0,06$ ,  $T_d = 0,01$ ,  $U_n = 230$ ,  $f = 50$ ,  $U_p = 0$ ,  $U_v = 0$ ,  $T_z = 0$ ,  $T_p = 0$ ,  $T_v = 0$



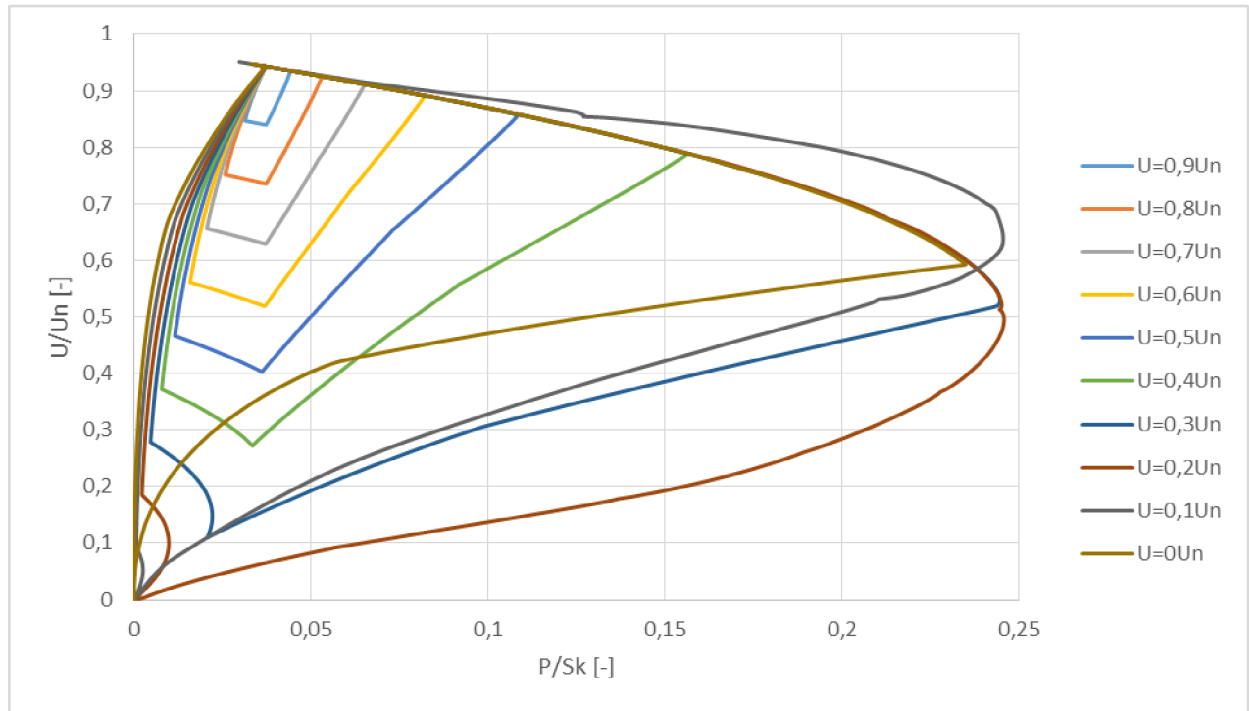
Obrázek 49: Dynamická charakteristika modelu v závislosti na změně exponentu alfa

Parametry simulace:  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 0$ ,  $P_n = 100$ ,  $Q_n = 0$ ,  $U_n = 230$ ,  $f = 50$ ,  $U_p = 0$ ,  $U_v = 0$ ,  $T_z = 0$ ,  $T_p = 0$ ,  $T_v = 0$



Obrázek 50: Dynamická charakteristika modelu v závislosti na časových konstantách

Parametry simulace:  $\alpha = 0$ ,  $P_n = 5000$ ,  $T_i = 0,02$ ,  $T_d = 0,01$ ,  $U_n = 230$ ,  $f = 50$ ,  $U_p = 2$ ,  $U_v = 1$ ,  $T_z = 0$ ,  $T_p = 0$ ,  $T_v = 0$

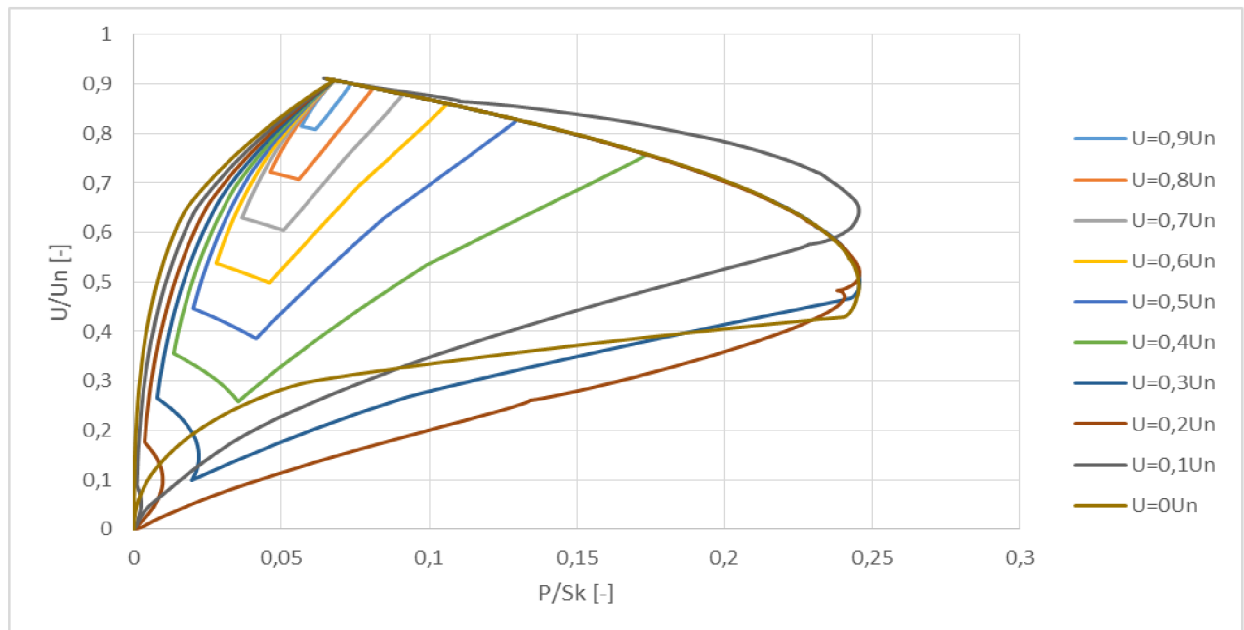


Obrázek 51: Závislost napětí na odebraném výkonu při různé velikosti poklesu napětí a jeho obnově při zatížení 5 kW konstantním výkonem

Parametry simulace:

Zátěž 1:  $\alpha = 2$ ,  $P_n = 5000$ ,  $T_i = 0,02$ ,  $T_d = 0,01$ ,  $U_n = 230$ ,  $f = 50$ ,  $U_p = 2$ ,  $U_v = 1$ ,  $T_z = 0$ ,  $T_p = 0$ ,  $T_v = 0$

Zátěž 2:  $\alpha = 0$ ,  $P_n = 5000$ ,  $T_i = 0,02$ ,  $T_d = 0,01$ ,  $U_n = 230$ ,  $f = 50$ ,  $U_p = 2$ ,  $U_v = 1$ ,  $T_z = 0$ ,  $T_p = 0$ ,  $T_v = 0$



Obrázek 52: Závislost napětí na odebraném výkonu při různé velikosti poklesu napětí a jeho obnově při zatížení 5 kW konstantním výkonem a 5 kW odporovou zátěží